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

VIDA ÚTIL DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM UTILIZAÇÃO DE SÍLICA ATIVA E METACAULIM FRENTE AO ATAQUE POR CLORETOS: INDICADORES DE DURABILIDADE E ANÁLISE PROBABILÍSTICA

por

Gustavo Bosel Wally

Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Oceânica

Rio Grande, dezembro, 2019

VIDA ÚTIL DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM UTILIZAÇÃO DE SÍLICA ATIVA E METACAULIM FRENTE AO ATAQUE POR CLORETOS: INDICADORES DE DURABILIDADE E ANÁLISE PROBABILÍSTICA

Por

Gustavo Bosel Wally
Bacharel em Engenharia 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
Coorientador: Prof. Dr. Mauro de Vasconcellos Real

Aprovada por:

Prof. Dr. Liércio André Isoldi	PPGEO/FURG
Prof. Dr. André Tavares da Cunha Guimarães	EE/FURG
Prof. Ph.D. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho	PPGEC/UFRGS

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

Rio Grande, 09 de dezembro de 2019

"VIDA ÚTIL DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM UTILIZAÇÃO DE SÍLICA ATIVA E METACAULIM FRENTE AO ATAQUE POR CLORETOS: INDICADORES DE DURABILIDADE E ANÁLISE PROBABILÍSTICA"

Gustavo Bosel Wally

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 de Vasconcellos Real
Coorientador – PPGEO/FURG

Prof. Dr. Liércio André Isoldi
Membro Interno – PPGEO/FURG

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

Prof. Dr. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho
Membro Externo – UFRGS/PPGEC

Ficha Catalográfica

W215v Wally, Gustavo Bosel.
Vida útil de concretos produzidos com utilização de sílica ativa e metacaulim frente ao ataque por cloretos : indicadores de durabilidade e análise probabilística / Gustavo Bosel Wally. – 2019.
117 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Rio Grande/RS, 2019.
Orientador: Dr. Fábio Costa Magalhães.
Coorientador: Dr. Mauro de Vasconcellos Real.

1. Penetração de cloretos 2. Adições minerais 3. Abordagem com base no desempenho 4. Análise probabilística I. Magalhães, Fábio Costa II. Real, Mauro de Vasconcellos III. Título.

CDU 624.012.45:551.46

Catalogação na Fonte: Bibliotecária Vanessa Ceiglinski Nunes CRB 10/2174

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida e pela graça e misericórdia renovadas diariamente;

À minha amada Fernanda, pelo companheirismo, parceria, compreensão, auxílio, suporte e sustento na realização deste trabalho e em todas as esferas da vida. Te amo!

Aos meus pais, Gilson e Alexandra, pela educação que me deram, por me fazerem entender a importância dos estudos e pelo carinho e amor a mim dedicados;

Ao meu orientador, que também se tornou um grande amigo, Prof. Fábio C. Magalhães, pela condução precisa e cuidadosa desta dissertação, pelas dúvidas sanadas e pelas boas conversas;

Ao Prof. Mauro de V. Real, meu coorientador, pela disponibilidade e entusiasmo em participar deste trabalho com valiosas contribuições;

Ao Félix K. Sell Junior, colega e amigo que o mestrado me apresentou, com quem pude dividir as dificuldades e alegrias encontradas durante essa jornada;

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, assim como aos bolsistas Matheus L. Moraes e Angelina R. de Mattos e ao laboratorista Fernando R. Teixeira pelo auxílio na caracterização dos materiais utilizados, produção dos concretos e execução dos ensaios;

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

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica (PPGEO), pela oportunidade de fazer parte de seu curso de mestrado, e aos professores vinculados ao programa, pelos conhecimentos transmitidos e pela agradável convivência;

À Universidade Federal do Rio Grande;

A todos aqueles não citados aqui, mas que fazem parte da minha vida pessoal e/ou acadêmica e que acompanharam este período de realização do mestrado, meu sincero agradecimento.

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

RESUMO

Fatores relacionados à durabilidade e à previsão de vida útil têm ganhado importância cada vez maior no projeto de estruturas de concreto armado durante os últimos anos. As principais causas da deterioração precoce das estruturas são a penetração de cloretos e a carbonatação. Em diversos casos, além da agressividade do ambiente e das solicitações impostas à estrutura, a qualidade do concreto não atende a parâmetros mínimos, reduzindo, assim, a vida útil das estruturas. Neste trabalho são avaliadas as influências da utilização de sílica ativa e metacaulim em aspectos relacionados à durabilidade e à vida útil de estruturas expostas a ambientes marinhos. A abordagem com base no desempenho, por meio da avaliação de indicadores de durabilidade, é utilizada na análise da durabilidade potencial dos concretos produzidos. Esse tipo de abordagem se mostra fundamental visto que a abordagem tradicionalmente adotada nos projetos de durabilidade se restringe à prescrição de valores limite para o cobrimento das armaduras e para parâmetros de dosagem do concreto, como relação água/aglomerante máxima, consumo de cimento mínimo e f_{ck} mínimo. Além da avaliação da resistência à compressão, a absorção de água por capilaridade, a resistência à penetração de cloretos e o coeficiente de difusão aparente são tomados como indicadores de durabilidade dos concretos produzidos. Visando abranger as variabilidades que podem ser assumidas pelos parâmetros envolvidos no processo de penetração de cloretos no concreto, uma análise probabilística da vida útil dos concretos produzidos é apresentada. Os resultados mostram que a utilização de sílica ativa e metacaulim gera melhorias significativas às propriedades relacionadas à durabilidade do concreto, proporcionando a redução da penetrabilidade de cloretos e da difusividade do concreto em até 56,02 % e 90,49 %, respectivamente, e influenciando diretamente na expressiva diminuição da probabilidade de ocorrência da corrosão. A importância da abordagem com base no desempenho é verificada e discutida, uma vez que os resultados indicam que concretos da mesma classe de resistência podem possuir comportamentos distintos quando avaliados sob a ótica da durabilidade.

Palavras-chave: Penetração de cloretos. Adições minerais. Abordagem com base no desempenho. Análise probabilística.

ABSTRACT

Factors related to durability and service life prediction have become increasingly important in the design of reinforced concrete structures during the last years. The main causes of early deterioration of structures are chloride penetration and carbonation. In many cases, besides the environment aggressiveness and the loads imposed on the structure, the concrete quality does not meet minimum parameters, thus reducing the service life of the structure. This work evaluates the influence of the use of silica fume and metakaolin on aspects related to durability and service life of structures exposed to marine environments. The performance-based approach, through the evaluation of durability indicators, is used to analyze the potential durability of the produced concretes. This type of approach is fundamental since the approach traditionally used in durability design is restricted to the prescribing of limit values for cover depth and concrete admixture parameters, such as maximum water/binder ratio, minimum cement content, and minimum compressive strength. In addition to the evaluation of compressive strength, capillary water absorption, chloride penetration resistance, and diffusion coefficient are taken as durability indicators of the produced concretes. Aiming to cover the variability of the parameters involved in the chloride penetration process, a probabilistic assessment of the service life of concrete is presented. The results show that the use of silica fume and metakaolin generates significant improvements in the properties related to the concrete durability, reducing the penetration of chloride and concrete diffusivity by up to 56.02 % and 90.49 %, respectively, and influencing directly in the significant decrease of the probability of corrosion. The importance of the performance-based approach is verified and discussed since the results indicate that concretes of the same strength class may have different behavior when evaluated from the perspective of durability.

Keywords: Chloride penetration. Mineral admixtures. Performance-based approach. Probabilistic assessment.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO 19
1.1. Considerações Iniciais 19
1.2. Objetivos 21
1.2.1. Objetivo Geral 21
1.2.2. Objetivos Específicos 21
1.3. Delimitações 21
1.4. Limitações 22
1.5. Estrutura do Trabalho 22
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 23
2.1. Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto Armado 23
2.1.1. Vida útil de projeto (VUP) 24
2.2. Durabilidade do concreto aplicada a ambientes marinhos 27
2.2.1. Mecanismos de transporte no concreto 29
2.3. Métodos de avaliação da durabilidade do concreto 33
2.3.1. Conceitos de abordagem com base no desempenho e Indicadores de Durabilidade 33
2.3.2. Indicadores de Durabilidade aplicados à estimativa da penetração de cloretos no concreto 36
2.3.3. Fatores intervenientes no processo de penetração de cloretos no concreto 39
2.4. Adições minerais e suas implicações na vida útil do concreto 40
2.4.1. Sílica ativa 41
2.4.2. Metacaulim 43
2.5. Estimativa de vida útil e confiabilidade estrutural 46
2.5.1. Conceitos de confiabilidade estrutural 48
2.5.2. Métodos de determinação da probabilidade de falha e do índice de confiabilidade 53
2.5.3. Critério para iniciação da corrosão 58
2.5.4. Vida útil característica 60
2.5.5. Aplicações da análise de confiabilidade nas avaliações de durabilidade 61
3. METODOLOGIA 64
3.1. Programa experimental 65
3.1.1. Materiais utilizados 65
3.1.2. Concretos avaliados 70
3.1.3. Avaliação dos Indicadores de Durabilidade 73
3.2. Análise probabilística 81

3.2.1. Modelo de penetração de cloretos utilizado 81
3.2.2. Cálculo da probabilidade de corrosão 84
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES 86
4.1. Resistência à compressão 86
4.2. Absorção de água por capilaridade 87
4.3. Resistência à penetração de cloretos 89
4.4. Coeficiente de difusão aparente 90
4.5. Análise paramétrica do modelo de penetração de cloretos utilizado 92
4.6. Verificação dos resultados das simulações 95
4.7. Resultados das simulações 97
4.8. Vida útil característica 100
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS 102
5.1. Principais conclusões 102
5.2. Sugestões para trabalhos futuros 104
6. REFERÊNCIAS 105

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Modelo de vida útil proposto por Tuutti 25
Figura 2.2 - Modelo de vida útil proposto por Helene 26
Figura 2.3 - Princípios do projeto de estruturas de concreto armado baseado em desempenho 35
Figura 2.4 - Correlação entre os coeficientes de difusão obtidos por ensaios de imersão e pelo método normatizado pela NT Build 492 38
Figura 2.5 - Precisão dos métodos de ensaio de difusividade avaliados no programa de pesquisa ChlorTest (2005) 39
Figura 2.6 - Parâmetros que influenciam na penetração de cloretos no concreto 40
Figura 2.7 - Influência do teor de sílica ativa na resistência à penetração de cloretos do concreto 43
Figura 2.8 - Difusão relativa versus proporção de sílica ativa empregada na mistura 43
Figura 2.9 - Influência do teor de substituição de cimento Portland por metacaulim na probabilidade de corrosão em estruturas de concreto armado 45
Figura 2.10 - Função densidade de probabilidade da função de resistência de estrutura (R) e da função de solicitações (S) 50
Figura 2.11 - Função densidade de probabilidades da função M (f_M) 50
Figura 2.12 - Relação entre a probabilidade de falha e o índice de confiabilidade estrutural 52
Figura 2.13 - Evolução da relação entre as variáveis S e R em função do tempo 52
Figura 2.14 - Funcionamento do Método de Simulação de Monte Carlo 55
Figura 2.15 - Esquema dos domínios no método de Monte Carlo utilizando duas variáveis de entrada 55
Figura 2.16 - Nuvem de pontos de um problema utilizando amostragem por importância 56
Figura 2.17 - Representação gráfica do FORM 58
Figura 2.18 – Perfil de confiabilidade estrutural devido à penetração de cloretos 59
Figura 2.19 - Função densidade de probabilidade da vida útil e vida útil característica no ELS de uma estrutura de concreto armado sujeita à penetração de cloretos 60
Figura 2.20 - Concentração de cloretos na profundidade da armadura em função da idade a partir da qual uma probabilidade pré-estabelecida de falha é admitida 61

Figura 3.1 - Procedimento metodológico realizado 64
Figura 3.2 - Curva granulométrica da areia fina 67
Figura 3.3 - Curva granulométrica da areia média 67
Figura 3.4 - Curva granulométrica do agregado graúdo 68
Figura 3.5 - Corpos de prova moldados após execução dos traços 72
Figura 3.6 - Esquema de corte dos corpos de prova (dimensões em mm) 72
Figura 3.7 - Esquema do processo de seleção das amostras para realização dos ensaios de migração iônica 73
Figura 3.8 - Realização do ensaio de resistência à compressão axial 74
Figura 3.9 - Realização do ensaio de absorção de água por capilaridade 75
Figura 3.10 - Esquema da realização do ensaio de resistência à penetração de cloretos 76
Figura 3.11 - Equipamento utilizado para realização do ensaio prescrito pela ASTM C 1202 76
Figura 3.12 - Esquema da realização do ensaio prescrito pela NT Build 492 78
Figura 3.13 - Equipamento utilizado para determinação do coeficiente de difusão 79
Figura 3.14 - Aparência da amostra de concreto após aspersão da solução de nitrato de prata 79
Figura 3.15 - Medição da profundidade de penetração de cloretos média em cada amostra submetida ao ensaio 80

Figura 4.1 - Resistência à compressão axial dos concretos avaliados 86
Figura 4.2 - Absorção de água por capilaridade nos concretos com sílica ativa 88

Figura 4.3 - Absorção de água por capilaridade nos concretos com metacaulim 88
Figura 4.4 - Carga passante através das amostras de concreto 89
Figura 4.5 - Coeficiente de difusão aparente dos concretos avaliados 91
Figura 4.6 - Influência do coeficiente de variação dos parâmetros de entrada na concentração de cloretos média 93
Figura 4.7 - Efeito do COV das variáveis básicas na variabilidade da concentração de cloretos 94
Figura 4.8 - Influência do coeficiente de variação dos parâmetros de entrada na probabilidade de falha da estrutura 94
Figura 4.9 - Convergência estatística dos resultados obtidos através do MCS-AI: (a) probabilidade de falha; (b) índice de confiabilidade; (c) coeficiente de variação da probabilidade de falha 97
Figura 4.10 - Influência da sílica ativa e do metacaulim na probabilidade de ocorrência da corrosão em estruturas com cobrimento de 40 mm 98
Figura 4.11 - Influência da sílica ativa e do metacaulim na probabilidade de ocorrência da corrosão em estruturas com cobrimento de 50 mm 98
Figura 4.12 - Influência da sílica ativa e do metacaulim na probabilidade de ocorrência da corrosão em estruturas com cobrimento de 60 mm 99
Figura 4.13 - Influência da sílica ativa e do metacaulim na probabilidade de ocorrência da corrosão em estruturas com cobrimento de 70 mm 99

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1. Níveis de abordagem para a concepção de estruturas de concreto duráveis 27
Quadro 2.2. Incertezas no processo de avaliação da confiabilidade estrutural 47

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Resumos de métodos normatizados relacionados à penetração de cloretos no concreto 37
Tabela 2.2. Resultados da avaliação da vida útil de concretos contendo adições de sílica ativa e metacaulim 46
Tabela 2.3. Classificação de concretos com adições de sílica ativa e metacaulim quanto à resistência à penetração de cloretos 46
Tabela 2.4. Índice de confiabilidade alvo, considerando consequências de média gravidade, conforme a idade da estrutura 53

Tabela 3.1. Características do cimento Portland utilizado 65
Tabela 3.2. Características físicas do agregado miúdo 66
Tabela 3.3. Características físicas do agregado graúdo 68
Tabela 3.4. Características físicas e químicas das adições minerais utilizadas 69
Tabela 3.5. Concretos estudados e consumo de material (em kg/m^3 de concreto) 71
Tabela 3.6. Penetrabilidade de cloretos de acordo com a carga passante 77
Tabela 3.7. Tensão imposta e tempo de duração do ensaio prescrito pela NT Build 492 78
Tabela 3.8. Classificação dos concretos quanto à difusividade 80
Tabela 3.9. Distribuições de probabilidade utilizadas na análise paramétrica 83
Tabela 3.10. Distribuições de probabilidades das variáveis consideradas na análise probabilística . 85

Tabela 4.1. Avaliação preliminar da probabilidade de falha calculada utilizando os métodos MCS, MCS-AI e FORM 95
Tabela 4.2. Valores das variáveis aleatórias que constituem pontos de falha através dos métodos MCS-AI e FORM 96
Tabela 4.3. Vida útil característica (em anos) das estruturas analisadas. 100

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Latinas

A	Área [m^2]
C	Concentração de cloretos [%]
C	Coulomb
C_0	Concentração inicial de cloretos [%]
C_{CR}	Concentração de cloretos crítica [%]
C_i	Concentração iônica [mol/m^3]
C_S	Concentração superficial de cloretos [%]
$C(x,t)$	Concentração de cloretos no interior da estrutura [%]
D	Coeficiente de difusão [m^2/s]
D_0	Coeficiente de difusão inicial do concreto [m^2/s]
D_{ns}	Coeficiente de difusão em estado não-estacionário [m^2/s]
D_{nssm}	Coeficiente de difusão aparente [m^2/s]
E	Potencial elétrico [V]
E_A	Energia de ativação da difusão [J]
F	Constante de Faraday [$J/(V \times mol)$]
F_R	Função de distribuição acumulada de R
H	Altura da coluna d'água [m]
K_h	Permeabilidade hidráulica [m/s]
I	Corrente elétrica [A]
J	Fluxo iônico [$mol/(m^2 \times s)$]
L	Espessura [m]
M	Função margem de segurança
P_f	Probabilidade de falha [%]
Q	Carga elétrica [C]

R	Constante universal dos gases $[\mathrm{J/(K \times mol)}]$
$R(x,t)$	Resistência da estrutura
$S(t)$	Solicitações à estrutura
T	Temperatura [ºC]
U	Voltagem [V]
V	Velocidade $[\mathrm{m/s}]$
V_f	Vazão de escoamento do fluido $[\mathrm{m^3/s}]$
dC/dL	Gradiente de concentração $[\mathrm{g/m^4}]$
erf	Função de erro de Gauss
f_{ck}	Resistência característica do concreto à compressão [Pa]
f_{cm}	Resistência média do concreto à compressão [Pa]
f_M	Função densidade de probabilidades de M
f_S	Função densidade de probabilidade de S
$g(x)$	Função de desempenho
h	Altura de penetração da água por capilaridade [m]
k_e	Influência da temperatura na difusão
pH	Potencial hidrogeniônico
r	Raio capilar [m]
t	Tempo [s]
t_k	Vida útil característica [s]
t_0	Idade do concreto ao ser medido o coeficiente D_0 [s]
t'	Idade do concreto ao ser exposto ao cloreto [s]
x_c	Cobrimento da armadura [m]
x_p	Profundidade média da penetração de cloretos [m]
y	Massa específica da água $[\mathrm{kg/m^3}]$

Letras Gregas

α	Vetor dos cossenos diretores
α	Fator de envelhecimento do concreto
β	Índice de confiabilidade
Φ	Distribuição de probabilidades acumulada
μ	Valor médio
υ	Tensão superficial da água [N/m]
σ	Desvio padrão

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	*American Concrete Institute*
ag/agl	Relação água/aglomerante do concreto
ASTM	*American Society for Testing and Materials*
CEB	*Comité Euro-International du Béton*
CDF	Função densidade de probabilidade
CEN	*Comité Européen de Normalisation*
COV	Coeficiente de variação
CP	Cimento Portland
EDX	Fluorescência de raios-X por dispersão de energia
ELF	Estado limite de fadiga
ELS	Estado limite de serviço
ELU	Estado limite último
EN	*European Standard*
FIP	*International Federation for Structural Concrete*
FORM	*First Order Reliability Method*
IDs	Indicadores de Durabilidade
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil
MCS	Método de Simulação de Monte Carlo
MCS-AI	Método de Monte Carlo com Amostragem por Importância
MK	Metacaulim
NBR	Norma brasileira
NM	Norma Mercosul
PS	Viga do paramento – ponto superior
SF	Sílica ativa

SORM	*Second Order Reliability Method*
UFPel	Universidade Federal de Pelotas
VUP	Vida útil de projeto
ZTN	Zona totalmente de névoa

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Iniciais

O concreto é um dos materiais de construção mais empregados ao redor do mundo, se fazendo presente em diversas obras de engenharia e possuindo grande importância na composição dos custos da construção civil e na economia mundial. No entanto, as manifestações patológicas relacionadas ao ambiente no qual o elemento estrutural está localizado são um grande desafio para os envolvidos em sua concepção e execução, influenciando diretamente na durabilidade dessas estruturas (MAGALHÃES, 2018).

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), os mecanismos de deterioração das estruturas de concreto armado podem ser (1) relacionados ao concreto, causados, por exemplo, por processos químicos como ataques por sulfatos, trocas iônicas e reações alcalinas; (2) relativos à armadura, ocasionados pelo processo de corrosão do aço presente no interior do concreto e (3) referentes ao elemento estrutural, devido a ações mecânicas, impactos, variações térmicas, fatores reológicos e outros. No entanto, é amplamente reconhecido que a ação de íons cloreto, e a consequente corrosão das armaduras, é o principal mecanismo de degradação de elementos estruturais em concreto armado, fato esse devido ao transporte dos íons ao interior do concreto, os quais atingem a armadura, causando sua despassivação e desencadeando o processo de corrosão (ANDRADE, 1986; TANG, 1996; HELENE *et al.*, 2018; PELLIZZER, 2019).

Em países industrializados, nos quais a expansão das obras de infraestruturas ocorreu após a metade do século passado, o dispêndio financeiro com manutenção e reparo de estruturas deterioradas é grande e crescente (ANGST, 2018). Além disso, estima-se que o número de estruturas que necessitam de reparos aumentará acentuadamente nos próximos anos (POLDER *et al*., 2012; ANGST, 2019).

Apesar de não representarem um tema novo, aspectos referentes à durabilidade e à vida útil das estruturas de concreto armado ainda são um dos grandes desafios encontrados pela construção civil. Dessa forma, são crescentes as pesquisas sobre o tema nas últimas décadas (GJØRV e VENNESLAND, 1979; HELENE, 1986; ISAIA, 1995; SATO, 1998; GUIMARÃES, 2000; ALEXANDER e THOMAS, 2015; GJØRV, 2015; YU *et al*., 2017; VERA *et al*., 2017; ALEXANDER, 2018; MAGALHÃES, 2018; RIBEIRO, 2018) em busca de modelos que melhor descrevam a penetração dos íons no concreto e dosagens do concreto que diminuam a entrada desses agentes deletérios.

Em busca de produzir concretos mais coesos, menos suscetíveis à penetração de cloretos e, assim, mais duráveis, estudos acerca das adições de metacaulim (AQUINO *et al*., 2001; PAIVA *et al*., 2017) e de sílica ativa (JAMIL *et al*., 2013; GURSEL *et al.*, 2016) apontam que o uso desses materiais gera melhorias às propriedades do concreto, produzindo novas reações durante o processo de hidratação do cimento e agindo tanto química quanto fisicamente. Segundo Ribeiro (2018), a utilização de 15 % de sílica ativa ou metacaulim na mistura do concreto pode aumentar em mais de 100 % a vida útil de uma estrutura em concreto armado exposta a ambientes marinhos.

Com o aumento do uso de novas misturas de concreto devido ao seu bom desempenho quanto à durabilidade, sejam com adições minerais, aditivos químicos ou outros, a abordagem com base no desempenho se mostra relevante na avaliação da qualidade do material. Isso ocorre porque a abordagem tradicionalmente adotada nos projetos de durabilidade se restringe à prescrição de valores limite para o cobrimento das armaduras e para parâmetros de dosagem do concreto, como relação água/aglomerante (ag/agl) máxima, consumo de cimento mínimo e f_{ck} mínimo. Assim, são ignorados os diferentes desempenhos que os vários tipos de aditivos e adições podem propiciar ao concreto, além de não serem completamente abrangidos aspectos como qualidade da execução da estrutura e processo de cura (BAROGHEL-BOUNY *et al*., 2009; BEUSHAUSEN *et al*., 2016). A abordagem com base no desempenho, por sua vez, utiliza de Indicadores de Durabilidade, os quais visam mensurar parâmetros-chave da qualidade do concreto, como coeficiente de difusão, porosidade e permeabilidade, para estimar e aferir a durabilidade potencial do concreto. A avaliação das características do concreto a partir de seu desempenho torna-se ainda mais importante quando esse material é empregado em estruturas expostas a ambientes de severa agressividade, como o ambiente marinho.

É também amplamente reportado na literatura (ANDRADE, 2001; GULIKERS, 2006; LORENSINI, 2006; FERREIRA e GULIKERS, 2008; ANDRADE, 2017; PELLIZZER, 2019) que as incertezas e não linearidades presentes no processo de penetração de cloretos no concreto fazem com que modelos puramente determinísticos apresentem resultados pouco condizentes com a realidade. Soma-se a isso a não consideração de fatores que exercem influência no processo de penetração. Dessa forma, a avaliação do nível de segurança estrutural ao longo da vida útil para a qual o elemento foi projetado mostra-se pertinente.

Nesse contexto, o presente trabalho visa contribuir ao estudo da durabilidade de concretos produzidos com adições pozolânicas quando expostos a ambientes marinhos, apresentando não somente uma análise experimental, mas utilizando dados obtidos a partir dessas análises em uma

análise probabilística, a fim de estimar a vida útil de estruturas que sejam concebidas com a utilização desses materiais.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo avaliar o potencial de durabilidade de concretos produzidos com utilização de sílica ativa e metacaulim em substituição parcial ao cimento Portland por meio de Indicadores de Durabilidade, bem como estimar a vida útil desse material quando exposto a ambientes marinhos utilizando métodos probabilísticos.

1.2.2. Objetivos Específicos

Avaliar a influência do tipo e do teor das adições minerais propostas no potencial de durabilidade do concreto empregando a abordagem com base no desempenho a partir da análise de Indicadores de Durabilidade do concreto, como absorção de água por capilaridade, resistência à penetração de cloretos e coeficiente de difusão;

Discutir a importância da avaliação da qualidade do concreto quanto à durabilidade utilizando a abordagem com base no desempenho em contraponto à abordagem prescritiva atualmente adotada nos projetos de durabilidade;

Realizar, a partir do coeficiente de difusão medido experimentalmente, uma análise probabilística da vida útil dos concretos estudados quando expostos a ambientes marinhos, avaliando o nível de segurança estrutural atingido considerando diferentes espessuras da camada de cobrimento da armadura e vidas úteis de projeto.

1.3. Delimitações

Esta pesquisa apresenta como delimitações (1) a avaliação das substituições de cimento Portland por sílica ativa e metacaulim somente nos teores de 5, 10 e 20 %; (2) a produção de concretos somente com relação água/aglomerante 0,45; (3) a análise do coeficiente de difusão somente no regime não estacionário; (4) a avaliação do período de iniciação da penetração de cloretos até o estado limite de serviço, não sendo considerado o processo de propagação e suas consequências; (5) a concentração superficial de cloretos (Cs) adotada para análise probabilística tomada em uma estrutura na cidade de Rio Grande/RS, sendo que podem ser encontrados valores de Cs superiores a esses.

1.4. Limitações

São limitações no presente trabalho (1) a utilização do cimento CP II Z-40, o qual, segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018), contém de 6 a 14 % de material pozolânico em sua composição, podendo afetar na avaliação da influência das adições minerais. Esse cimento, no entanto, é atualmente o mais facilmente encontrado na região para obras estruturais; (2) a realização do ensaio normatizado pela ATSM C 1202 (ASTM, 2012) utilizando uma diferença de potencial elétrico de 30 V, diferente dos 60 V propostos na norma; (3) a determinação do coeficiente de difusão dos concretos a partir de um ensaio de migração, uma vez que métodos que utilizaram somente o processo de difusão requerem períodos mais longos de exposição do concreto aos íons.

1.5. Estrutura do Trabalho

Este trabalho está apresentado em cinco capítulos, sendo este o primeiro, no qual são abordadas as considerações iniciais sobre o tema, assim como objetivos, delimitações do estudo e limitações impostas à pesquisa.

No capítulo 2 é realizada uma revisão de literatura sobre os temas necessários à compreensão da metodologia e da análise dos resultados, como conceitos acerca da durabilidade e da vida útil das estruturas de concreto armado, influência e importância do emprego de adições minerais na composição do concreto, avaliação da qualidade do concreto utilizando a abordagem com base no desempenho e conceitos de confiabilidade aplicados à avaliação da vida útil das estruturas.

O terceiro capítulo descreve o processo metodológico empregado neste trabalho, apresentando os métodos utilizados na realização do programa experimental e os parâmetros de entrada adotados à análise de confiabilidade.

O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos a partir da metodologia proposta e as discussões sobre estes.

Por fim, o capítulo 5 versa sobre as considerações finais do trabalho, bem como elenca as principais conclusões, perspectivas e sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma revisão de literatura acerca de assuntos pertinentes ao estudo proposto, como durabilidade e vida útil de estruturas de concreto armado, desempenho dessas estruturas quando expostas a ambientes agressivos, influência do uso de adições minerais na durabilidade do concreto, conceitos de avaliação da qualidade do concreto a partir da abordagem com base no desempenho e aplicação de métodos probabilísticos e teoria da confiabilidade à previsão da vida útil de estruturas.

2.1. Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto Armado

O concreto é o material mais utilizado na construção civil e o principal insumo em grande parte das obras de infraestrutura (BANSAL *et al*., 2017). Ribeiro e Cascudo (2018), no entanto, destacam que a evolução da construção civil, junto ao aperfeiçoamento dos sistemas construtivos e das metodologias de cálculo, apesar de possibilitar uma maior produtividade e menores custos, também gerou o aumento da esbeltez das estruturas, com diminuição do cobrimento das armaduras e aumento substancial das tensões de trabalho, contribuindo para uma menor durabilidade das edificações. Liu *et al*. (2014) afirmam que um número significativo de estruturas ao redor do mundo tem apresentado sinais de deterioração precocemente e, segundo dados da *American Society of Civil Engineers* (2017, *apud* MALHEIRO *et al*., 2018), 9,1 % das pontes em utilização nos Estados Unidos da América são consideradas estruturalmente deficientes e têm seu custo de reparos estimado em US$123 bilhões.

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), a durabilidade do concreto é a capacidade da estrutura de resistir às condições a si impostas definidas pelo autor do projeto e o contratante no início da elaboração do projeto. Por sua vez, o *Committee* 201 (ACI, 2001) considera como durabilidade do concreto de cimento Portland a sua capacidade de resistir à ação de ataques químicos, abrasão, intempéries ou outros processos de degradação. Assim, um concreto durável será capaz de manter sua qualidade, forma e capacidade de utilização iniciais quando exposto a um determinado ambiente e por um período de tempo estabelecido durante sua concepção (HACKL e KOHLER, 2016).

Andrade (2005) afirma que um concreto durável não conferirá, necessariamente, durabilidade à estrutura, estando esta também relacionada a aspectos como detalhes arquitetônicos e construtivos, cobrimento da armadura, deformidade da estrutura e outros. Segundo Mindess e Young (1981), uma estrutura de concreto armado projetada corretamente para o ambiente ao qual será exposta e executada com um bom controle de qualidade não necessitará de manutenção por décadas.

Quando o concreto armado começou a ser utilizado, em meados do século XIX, diversos pesquisadores e envolvidos com a construção civil consideravam que a vida útil desse material era infinita. No entanto, é sabido que com o passar do tempo as estruturas de concreto sofrem transformações causadas por suas interações com o ambiente no qual estão inseridas e que podem comprometer sua funcionalidade, estabilidade e desempenho. De acordo com Neville (1987), pode ainda ocorrer uma deterioração prematura dessas estruturas devido a fatores como mal entendimento dos processos de deterioração, determinação equivocada da agressividade do ambiente ou mudanças nos processos de construção ao longo do tempo.

Helene (1993) afirma que a vasta gama de ambientes nos quais as estruturas de concreto armado são utilizadas constitui um dos maiores desafios para a padronização e elaboração de modelos de vida útil probabilísticos ou determinísticos, podendo uma mesma estrutura se comportar de modo diferente quanto à durabilidade de acordo com o ambiente no qual está inserida, sendo essa, portanto, uma característica resultante das interações entre o concreto, o ambiente de exposição e as condições de uso.

Segundo Andrade (2005) o estudo acerca da durabilidade evoluiu principalmente devido ao avanço do entendimento sobre os mecanismos de transporte de fluidos em meios porosos, possibilitando a associação do tempo aos modelos físicos e matemáticos que expressam esses mecanismos. Tais mecanismos são regidos pelo tipo, tamanho e distribuição dos poros existentes no interior do concreto (CEB, 1993). Desta forma, quanto maior for a dificuldade encontrada pelos agentes agressivos para entrar na estrutura de poros do concreto, maior será a durabilidade do mesmo (OLLIVIER e TORRENTI, 2014).

Magalhães (2018) destaca que a consideração sobre durabilidade e vida útil das estruturas na fase de projeto é um procedimento recente, introduzido na Europa e nos Estados Unidos na década de 1990 e no Brasil em 2003, após a publicação da NBR 6118 (ABNT, 2003), a qual foi posteriormente substituída pela NBR 6118 (ABNT, 2014). Mais tarde, em 2013, foi reiterada pela a publicação da NBR 15575 (ABNT, 2013), a qual considera a durabilidade das estruturas de concreto como parâmetro de desempenho das construções civis.

2.1.1. Vida útil de projeto (VUP)

Cascudo (2015) afirma que nos últimos anos o conceito de durabilidade sofreu grande evolução, deixando de ser aquilo que simplesmente supera um período determinado e passando a algo que tem seus aspectos funcionais e propriedades fundamentais preservados ao longo do tempo.

Tornou-se, assim, através da introdução do conceito de vida útil, algo palpável e mensurável e não mais somente qualitativo. O autor afirma ainda que as abordagens acerca da durabilidade das estruturas, outrora fundamentadas em avaliações sintomáticas, andam agora em direção à abordagem baseada em desempenho.

Segundo Alexander (2018), a modelagem da vida útil das estruturas, que está relacionada intimamente com o projeto de vida útil, é destinada a permitir a quantificação da vida útil de projeto das estruturas, a fim de conferir melhor desempenho estrutural e maiores eficiência operacional e otimização financeira.

Um dos mais antigos modelos de vida útil das estruturas foi proposto por Tuutti (1982). Trata-se de um modelo bastante simples e que divide o processo de degradação nos períodos de iniciação e de propagação, como apresenta a Fig. 2.1.

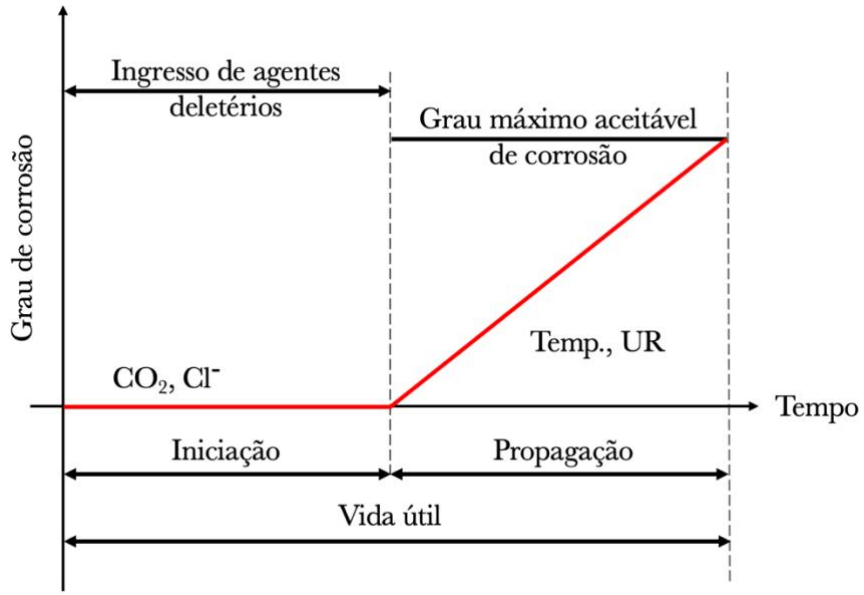

Figura 2.1 - Modelo de vida útil proposto por Tuutti (Fonte: Adaptado de Tuutti, 1982. Traduzido pelo autor).

No modelo apresentado na Fig. 2.1, o período de iniciação compreende o ingresso dos agentes deletérios, como o CO_2 e cloretos. Já o período de propagação é aquele no qual já houve a despassivação da armadura e o grau de corrosão aumenta consideravelmente, levando a estrutura a um estado limite caso não haja nenhum tipo de intervenção corretiva.

Helene (1993) apresenta um modelo para situações genéricas, visando representar de forma abrangente os principais mecanismos de degradação que operam sobre as estruturas de concreto ao longo de seu período de serviço. A Figura 2.2 apresenta esse modelo, o qual divide a vida útil das estruturas em quatro partes.

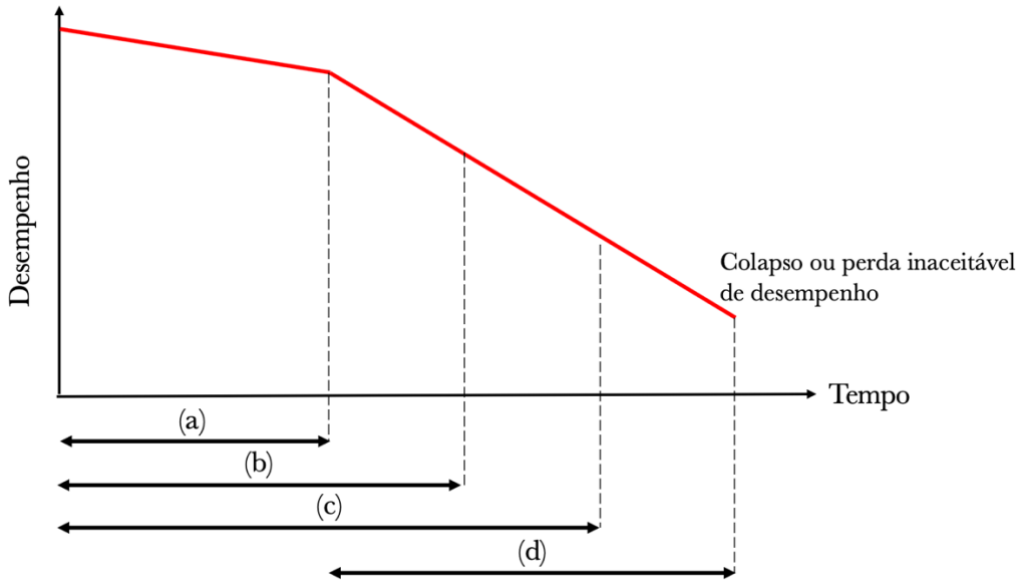

Figura 2.2 - Modelo de vida útil proposto por Helene (Fonte: Adaptado de Helene, 1993).

Os quatro estágios de vida útil das estruturas apresentados na Fig. 2.2 podem, de acordo com Ribeiro e Cascudo (2018), ser classificados em:

(a) **Vida útil de projeto**: também conhecida como período de iniciação, é a etapa na qual os agentes agressivos estão penetrando pela rede de poros do concreto, sem gerar danos à estrutura. A vida útil de projeto de estruturas convencionais é de 50 anos, podendo ser estendida para 100 anos no caso de pontes ou 200 anos no caso de barragens;

(b) **Vida útil de serviço**: período no qual há o início da manifestação dos agentes nocivos, por meio da fissuração do concreto por ataque químico ou manchas decorrentes da corrosão da armadura. A estimativa do prazo dessa vida útil é bastante difícil, visto que varia para cada situação;

(c) **Vida útil total**: intervalo de tempo necessário à ruptura e ao colapso parcial ou total da estrutura. Nesse período a estrutura já está condenada ou os custos de reparo são extremamente altos;

(d) **Vida útil residual**: abrange parte das vidas úteis de serviço e total. Corresponde ao período de tempo no qual a estrutura será capaz de atuar em suas funções, contando após uma intervenção ou inspeção.

O *Model Code for Service Life Design* (CEB-FIP, 2006) considera como vida útil de projeto o período para o qual uma estrutura é projetada para desempenhar determinada função, devendo, para isso, serem quantificados o desempenho e a deterioração do material, ser adotada uma análise de risco

adequada, em geral baseada em métodos probabilísticos que conduzem a medidas de confiabilidade, e serem considerados os custos com intervenções e manutenções.

Visando atender aos critérios de vida útil de projeto, Cascudo (2017, *apud* RIBEIRO e CASCUDO, 2018) apresenta quatro níveis de abordagem a partir da concepção estrutural e em função da vida útil desejada. O Quadro 2.1 apresenta esses níveis e os tipos de abordagem em questão.

Quadro 2.1. Níveis de abordagem para a concepção de estruturas de concreto duráveis.
Fonte: Organizado por Cascudo (2017, *apud* RIBEIRO e CASCUDO, 2018).

Níveis de abordagem	Tipo de abordagem
Nível 1	**Abordagem prescritiva**: utiliza métodos prescritivos que visam melhorar a qualidade do concreto, como consumo mínimo de cimento, relação a/c máxima, cobrimento mínimo, f_{ck} mínimo, etc. Adequado para VUP de até 50 anos.
Nível 2	**Abordagem mista**: além da ordenação prescritiva (Nível 1), são considerados na avaliação do concreto parâmetros de desempenho chamados de indicadores de durabilidade, como coeficiente de permeabilidade à água e aos gases, resistividade elétrica e difusividade de cloretos. Adequado para VUP entre 50 e 100 anos.
Nível 3	**Abordagem de desempenho (determinística)**: adota modelos determinísticos de previsão de vida útil, como modelos para penetração de cloretos e carbonatação. Adequado para VUP superior a 100 anos.
Nível 4	**Abordagem de desempenho (probabilística)**: emprega modelos probabilísticos ou semi-probabilísticos a partir da utilização de modelos preditivos a da consideração das variabilidades dos valores das variáveis envolvidas.

Em termos de normatização brasileira, a NBR 15575 (ABNT, 2013), que versa sobre requisitos mínimos de desempenho que devem ser atendidos pelas edificações, especifica uma vida útil de projeto mínima de 50 anos para edifícios e outras estruturas comuns. Essa norma, no entanto, não estabelece valores mínimos de vida útil para outras estruturas importantes, como pontes e viadutos, tampouco apresenta indicativos de como conduzir a modelagem matemática para a determinação deste período.

2.2. Durabilidade do concreto aplicada a ambientes marinhos

As estruturas de concreto armado são de grande importância à construção de elementos

expostos a ambientes marinhos como pontes, portos e plataformas devido à sua capacidade de suportar as adversidades impostas por um ambiente tão agressivo. No entanto, a vida útil destas pode ser reduzida por diversos mecanismos de degradação (WEERDT *et al*., 2019).

Como já discutido anteriormente, a durabilidade do concreto consiste na capacidade dos elementos estruturais resistirem às agressões do ambiente no qual estão inseridas. Assim, é essencial conhecer os efeitos e as influências que o ambiente gera sobre uma estrutura de concreto (ALMEIDA e SALES, 2018).

Almeida e Sales (2018) afirmam também que as ações exercidas pelo ambiente nas estruturas de concreto podem ser devidas a agentes químicos, físicos e biológicos. Normalmente o processo de deterioração proveniente da ação de agentes químicos é resultado da interação entre os agentes nocivos presentes na atmosfera e os constituintes da pasta cimentícia. Por sua vez, os agentes físicos podem causar fissuração do concreto devido à exposição a temperaturas extremas, à cristalização dos sais nos poros ou ao carregamento estrutural. Já os agentes biológicos causam a biodeterioração das estruturas, podendo eles ser microrganismos (fungos e bactérias) ou macrorganismos (cupins e roedores). Em geral, os processos físicos, químicos e biológicos contribuem simultaneamente à deterioração das estruturas e podem, também, ter seus efeitos sobre o concreto e a armadura somados, potencializando, assim, o processo de degradação. Salienta-se que a corrosão das armaduras abordada neste trabalho ocorre devido a um processo eletroquímico. Esta, no entanto, é causada por um agente químico – a saber, os íons cloreto.

Helene (1999), ao apresentar uma classificação da agressividade ambiental às estruturas de concreto armado com base nas interações dessas com o macroclima, afirma que a atmosfera marinha, que compreende regiões ao ar livre, sobre o mar e perto da costa, pode conter cloretos e sulfatos em proporções elevadas, sendo extremamente agressiva e contribuindo com a aceleração do processo de corrosão das armaduras. Zhuo *et al*. (2010) também apontam o ambiente marinho como o mais nocivo às estruturas de concreto, uma vez que os íons prejudiciais ao concreto podem causar o dano inicial da estrutura.

Devido à grande variedade e complexidade de efeitos que pode causar nas estruturas de concreto, a ação da água do mar requer atenção especial. Além de nociva à durabilidade das armaduras, ao aumentar a possibilidade de corrosão, também pode causar danos ao concreto, gerando processos físicos e químicos de degradação simultâneos, como ataque por cloretos, sulfatos, erosão superficial e outros (BERTOLINI, 2010).

De modo geral, a maior parte das águas do mar apresenta composição química

aproximadamente uniforme, tendo 3,5 % de sais solúveis em sua massa. A atmosfera marinha contém cloretos de sódio (NaCl) e de magnésio ($MgCl_2$) tanto na forma de cristais como em gotículas d'água. Esse ambiente também contém sulfatos, os quais também são agressivos à microestrutura do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Quando os íons agressivos atingem a armadura em uma concentração superior à concentração crítica, a camada passivadora do aço é rompida e é desencadeada a corrosão. O processo corrosivo, além de reduzir a seção transversal do aço, contribui também para a deterioração do concreto uma vez que o produto da corrosão, que pode gerar um aumento de volume de 600 % em relação ao metal original, gera tensões de tração no interior da estrutura, causando a abertura de fissuras no concreto (HELENE, 1999; MEHTA e MONTEIRO, 2014; ALMEIDA e SALES, 2018).

2.2.1. Mecanismos de transporte no concreto

A durabilidade do concreto está ligada diretamente ao ingresso de agentes nocivos no material, os quais podem gerar danos tanto ao concreto em si quanto ao aço da armadura, ocasionando, assim, uma redução da vida útil da estrutura de concreto armado como um todo (OSLAKOVIC *et al*., 2010). Dessa forma, se relaciona a qualidade do concreto com a sua penetrabilidade. Um alto grau de penetrabilidade indica um concreto de má qualidade, principalmente em uma abordagem quanto à durabilidade. A alta penetrabilidade de uma estrutura já executada, no entanto, também pode ser resultado de carregamento prematuro, assentamento da estrutura ou sobrecargas, os quais podem gerar o surgimento de fissuras e consequente entrada de agentes agressivos (ALEXANDER *et al*., 2010; KESSY, 2013).

Os mecanismos de transporte responsáveis pelo ingresso de agentes nocivos ao interior do concreto são a absorção capilar, a permeabilidade, a migração e a difusão. Desses, pode-se destacar a penetração por permeabilidade e a difusão como os principais mecanismos que afetam a durabilidade do concreto (KWAN e WONG, 2005). Ainda, segundo Kessy (2013), embora esses mecanismos possam ocorrer de forma combinada, é necessário compreender os princípios por trás de cada um individualmente em busca de diretrizes e métodos para a quantificação da resistência do concreto.

A seguir, os quatro mecanismos citados acima são apresentados e discutidos.

a) Absorção capilar:

Absorção é o processo por meio do qual líquidos se movem através da matriz porosa do concreto sob sucção capilar devido à diferença de teor de água (BAMFORTH, 1990). Para

Cascudo (1997), a absorção de substâncias danosas às estruturas por meio dos capilares do concreto é o primeiro passo para a contaminação dessas, ocorrendo imediatamente após o contato entre o fluido contaminado e a superfície do concreto. Nepomuceno (2005) corrobora ao afirmar que, visto que dificilmente os materiais de construção encontram-se saturados, a absorção capilar é um dos principais mecanismos para o ingresso de líquidos no concreto.

Segundo Silva (2006), a absorção capilar pode ser tomada como um indicativo da porosidade do concreto e da resistência que esse apresenta à entrada de agentes nocivos diluídos em líquidos. Esse processo está diretamente ligado à microestrutura do concreto, ao diâmetro, tamanho, distribuição e interligação dos poros e ao grau de saturação do concreto (BASHEER *et al*., 2001; SILVA, 2006).

Em grande parte dos casos, a maior concentração de líquidos se dá na camada de concreto que cobre a armadura e diminui conforme a profundidade é aumentada (BALLIM *et al*., 2009, *apud* KESSY, 2013). Segundo Kessy (2013), a absorção é um mecanismo de transporte importante à penetração de cloretos em estruturas de concreto parcialmente saturado, sendo a entrada dos íons muito mais veloz do que se ocorresse apenas por difusão.

Para Helene (1993), deve-se medir a absorção capilar do concreto quando o mecanismo de transporte for o de penetração de água devido à pressão atmosférica normal, uma vez que o preenchimento dos vazios ocorre sem que haja um gradiente de pressão aplicado.

De acordo com Yuan e Santhanam (2013), a ascensão por capilaridade pode ser medida através da lei de Jurin, apresentada na Eq. (2.1):

$$h = \frac{2 \times \nu}{r \times y} \tag{2.1}$$

onde h é a altura de penetração da água por capilaridade [m], ν é a tensão superficial da água [kg/m], r é o raio do capilar [m] e y é a massa específica da água [kg/m^3].

Neville (2016) salienta que, em concretos de boa qualidade, a absorção costuma não exceder 10 % em massa.

b) Permeabilidade:

Mehta e Monteiro (2014) definem permeabilidade como a facilidade com a qual um fluido pode fluir através dos poros do concreto devido a uma diferença de pressão. A permeabilidade dos

concretos depende de vários fatores, como a proporção dos materiais empregados na mistura, o método de cura, a microestrutura do compósito, seu grau de saturação, as características do fluido e a espessura do elemento de concreto (KESSY, 2013). Mehta e Monteiro (2014) salientam ainda que o fator principal que contribui para a permeabilidade da matriz cimentícia é a interconectividade dos poros, a qual decresce com a evolução do cimento devido ao refinamento de sua microestrutura. Em grande parte dos casos, o volume dos poros corresponde entre 30 e 40 % do volume total da pasta cimentícia.

Considerando um escoamento em estado estacionário e não turbulento, o coeficiente de permeabilidade do concreto pode ser calculado por meio da lei de Darcy, conforme a Eq. (2.2):

$$V_f = \frac{K_h \times A \times H}{L} \tag{2.2}$$

onde V_f é a vazão de escoamento do fluido [m^3/s], K_h é o coeficiente de permeabilidade hidráulica [m/s], H é a altura da coluna d'água [m], A é área da superfície por onde percola a água [m^2] e L é a espessura da amostra [m].

c) Migração:

Migração é o processo por meio do qual ocorre a movimentação de íons devido à ação de um campo elétrico proveniente de uma diferença de potencial (NEPOMUCENO, 2005; RIBEIRO, 2018). A migração no concreto é avaliada por meio de ensaios acelerados em laboratórios (KESSY, 2013) e com base na equação de Nernst-Planck, apresentada na Eq. (2.3), cuja utilização foi proposta por Andrade (1993).

$$-J_i(x) = D_i \frac{\partial C_i(x)}{\partial x} + \frac{z_i F}{R T} D_i C_i \frac{\partial E(x)}{\partial x} + C_i V(x) \tag{2.3}$$

onde J é o fluxo iônico [mol/m^2s], D_i é o coeficiente de difusão [m^2/s], $C_i(x)$ é a concentração iônica [mol/m^3], z_i é a valência iônica, F é a constante de Faraday [9,6548 × 10^4 J/(V × mol)], R é a constante universal dos gases [8,314 J/(mol × K)], T é a temperatura [K], $E(x)$ é o potencial elétrico aplicado (V) e V é a velocidade de convecção [m/s].

A equação de Nernst-Planck descreve o fluxo de massa devido aos processos de migração, difusão e convecção, sendo o fluxo total a soma desses três processos. A consideração da migração é significativa para estruturas de concreto que podem sofrer com fugas de corrente, corrosão galvânica

ou que estão sob proteção catódica (KESSY, 2013).

d) Difusão:

Difusão é o deslocamento de massa que ocorre devido à existência de um gradiente de concentração ou diferença de potencial químico. O fluxo do deslocamento se dá da região de maior concentração à região de menor concentração (TANG, 1999). Os dois principais agentes causadores da degradação das estruturas de concreto, os cloretos e o dióxido de carbono (CO_2), têm seu ingresso governado majoritariamente pelo processo de difusão, e a penetração do oxigênio, essencial ao desenvolvimento do processo catódico, também é dada via difusão (CASCUDO, 1997; POULSEN e MEJLBRO, 2006).

A primeira lei de Fick, apresentada na Eq. (2.4) pode ser usada para determinar a taxa de penetração do cloreto por meio do fluxo iônico *J*. O sinal negativo mostra que o fluxo se dá em um gradiente de concentração negativo. O coeficiente de difusão efetivo, a concentração de cloretos na superfície e a profundidade de penetração dos íons são determinados de maneira experimental (KESSY, 2013).

$$J = -D\,\frac{dC}{dL} \tag{2.4}$$

onde *J* é a taxa do transporte de massa [g/(m^2 × s)], *D* é o coeficiente de difusão [m^2/s], $\frac{dC}{dL}$ é o gradiente de concentração [g/m^4], *C* é a concentração de cloretos [g/m^3] e *L* é a espessura da amostra [m].

Esse modelo, no entanto, não é empregado com frequência pois não considera variações ocorridas ao longo do tempo. Jastrzebski (1987, *apud* GUIMARÃES, 2000) afirma que, em estruturas de concreto, o fluxo e o gradiente de concentração variam no tempo, sendo, assim, um processo de difusão em estado não estacionário.

A segunda lei de Fick, expressa na Eq. (2.5), é mais utilizada e abrange também as variações de concentração no tempo, porém baseia-se em suposições como o fato do concreto ser heterogêneo e inerte (TANG, 1996). Kessy (2013) afirma que, utilizando a segunda lei de Fick, é possível prever o perfil de cloretos no concreto conhecendo seu coeficiente de difusão e a concentração de cloretos na superfície do material.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -D\,\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \tag{2.5}$$

onde C é a concentração de cloretos [kmol/m^3], t é o tempo [s], D é o coeficiente de difusão [m^2/s] e x é a distância da face externa do material [m].

De acordo com Kwan e Wong (2005), a absorção, a permeabilidade e a difusão se inter-relacionam uma vez que dependem de fatores similares, como a microestrutura e estrutura de poros do concreto. A difusão, no entanto, se mostra mais sensível ao grau de saturação e à umidade relativa do concreto.

2.3. Métodos de avaliação da durabilidade do concreto

2.3.1. Conceitos de abordagem com base no desempenho e Indicadores de Durabilidade

Atualmente a durabilidade das estruturas de concreto armado é uma grande preocupação por motivos de segurança e economia. Assim, esforços têm sido somados na realização de projetos de durabilidade e de modelos preditivos de vida útil das estruturas, a fim de conferir maior vida útil e menor custo de ciclo de vida às estruturas, além de propiciar um correto planejamento das intervenções de manutenção (BAROGHEL-BOUNY *et al*., 2009).

A abordagem prescritiva tradicionalmente empregada nos projetos de durabilidade limita-se a estipular parâmetros como consumo de cimento mínimo, f_{ck} mínimo e relação ag/agl máxima. Esses limites, embora tenham tendência a afetar as propriedades de durabilidade, não estabelecem condições definitivas para que o concreto seja realmente mais durável. Além disso, a abordagem prescritiva não considera os efeitos potencialmente positivos de adições minerais, aditivos químicos e procedimentos empregados durante a execução da estrutura, limitando a possibilidade do uso de misturas de concretos inovadoras. Assim, essa metodologia pode resultar em uma prática antieconômica e insustentável à indústria da construção (BEUSHAUSEN *et al*., 2019).

Torrent *et al*. (2016) destacam ainda as variações que podem ocorrer nos valores-limite prescritos para uma mesma classe de agressividade. Por exemplo, os países que adotaram a norma EN 206 modificaram significativamente as recomendações acerca da relação ag/agl e do consumo de cimento. Assim, em diferentes países, quando considerada uma mesma classe de exposição ambiental, a relação ag/agl máxima pode variar em até 0,15. Além disso, a faixa de teor mínimo de cimento é grande, variando de 150 a 400 kg/m^3 de concreto quando consideradas estruturas expostas a

ambientes ricos em cloretos.

Por consequência, é crescente a demanda pela inclusão de conceitos e métodos avançados de controle de qualidade do concreto e de previsão da vida útil na normatização de estruturas de concreto, incluindo abordagens baseadas em desempenho e/ou probabilísticas, especialmente em relação à (não-)ocorrência da corrosão das armaduras (BAROGHEL-BOUNY *et al*., 2011). A previsão da vida útil das estruturas de concreto armado, por sua vez, confronta-se ainda com pelo menos duas grandes dificuldades: a longa vida útil comumente requerida e a multiplicidade de combinações possíveis entre as solicitações (cargas) e as agressões (agentes químicos internos ou externos). Assim, quando há necessidade de refinamento nas previsões, é necessário o auxílio de ferramentas mais precisas, sofisticadas e complexas (BAROGHEL-BOUNY *et al*., 2009)

Nesse contexto, foi desenvolvida uma abordagem baseada no desempenho a partir da avaliação dos chamados Indicadores de Durabilidade (IDs), os quais avaliam parâmetros-chave do material em relação à durabilidade, como, por exemplo, coeficiente de difusão, porosidade e permeabilidade, e que foram inicialmente propostos pela *Association Française de Génie Civil* (BAROGHEL-BOUNY, 2007).

A avaliação a partir dos IDs possibilita a análise direta da influência de diversos componentes do concreto na durabilidade da estrutura frente ao ambiente ao qual essa será exposta. O emprego de materiais cimentícios suplementares ou de aditivos químicos que visam aumentar a durabilidade, ainda que afete sutilmente aspectos como consumo de cimento e resistência à compressão do concreto, pode resultar em um concreto significativamente mais durável se esses materiais forem selecionados, dosados e utilizados corretamente. Assim, avaliar o concreto na sua fase de projeto e em suas primeiras idades possibilita a otimização das especificações de dosagem e de cobrimento das armaduras. Os resultados tomados a partir dos IDs podem, ainda, ser utilizados como parâmetros de entrada em modelos de previsão de vida útil ou do início do processo de corrosão da armadura (BEUSHAUSEN *et al*., 2016). Os princípios básicos do projeto de durabilidade baseado em desempenho estão apresentados na Fig. 2.3.

É também associada aos indicadores de durabilidade uma classificação do potencial de ocorrência de corrosão das armaduras para cada tipo de concreto, podendo essa ser muito baixa, baixa, média, alta ou muito alta (ALEXANDER e THOMAS, 2015; BEUSHAUSEN *et al*., 2016; BJEGOVIĆ *et al*., 2016). Baroghel-Bouny *et al*. (2011) afirmam que a avaliação da durabilidade potencial de um determinado concreto consistirá na comparação dos valores medidos nos IDs com os valores limites de cada classe. Também, a partir dessa análise, é possível avaliar se um concreto é

mais durável que outro, auxiliando na tomada de decisões a respeito da dosagem da mistura para um determinado ambiente.

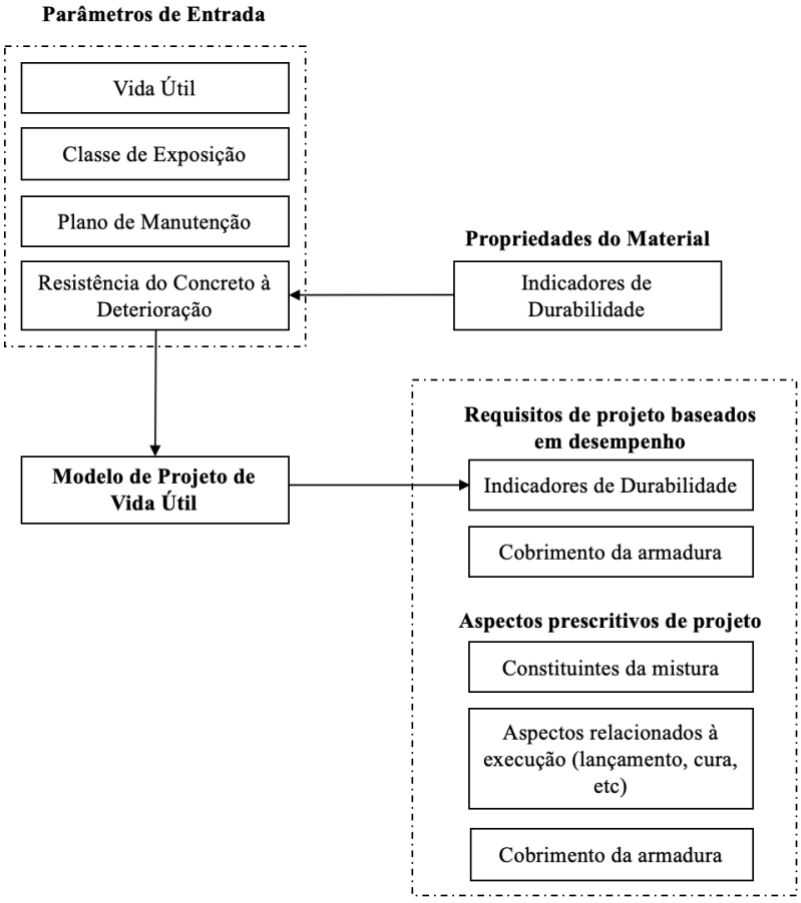

Figura 2.3 - Princípios do projeto de estruturas de concreto armado baseado em desempenho (Fonte: Adaptado de Beushausen *et al*., 2016. Traduzido pelo autor).

Como mostra a Fig. 2.3, o projeto de vida útil também deve conter um plano de manutenções. Dessa forma, o proprietário da estrutura deve receber instruções sobre como melhor gerenciar a estrutura a fim de que a mesma cumpra sua vida útil projetada (BEUSHAUSEN *et al*., 2016).

Deve-se atentar, de acordo com Beushausen *et al*. (2016), ao fato de que o projeto baseado em desempenho pode requerer a inclusão de requisitos prescritivos para parâmetros dos materiais (materiais constituintes e dosagem do concreto, por exemplo), uma vez que a interpretação dos indicadores de durabilidade avaliados pode depender do tipo de material utilizado. Por exemplo, concretos produzidos com diferentes aglomerantes podem apresentar valores semelhantes para indicadores de durabilidade, como resistividade elétrica e permeabilidade, mas mecanismos de fixação de cloretos diferentes, proporcionando, assim, diferentes durabilidades.

Os indicadores de durabilidade podem, ainda, ser utilizados na avaliação da vida útil residual de uma estrutura já existente. Uma vez que informações como a composição do concreto não são indispensáveis, apesar de importantes, a abordagem a partir dos IDs pode ser facilmente adotada no diagnóstico, manutenção e monitoramento de estruturas possivelmente degradadas (BAROGHEL-BOUNY *et al*., 2011). Salienta-se que podem ser utilizados os mesmos IDs tanto no projeto de vida útil da estrutura quando na avaliação da vida útil residual (THIERY *et al*., 2012).

Neste trabalho não serão discutidos todos os métodos enquadrados como indicadores de durabilidade presentes na literatura, uma vez que cada país que adota a abordagem com base no desempenho possuí seu conjunto específico de ensaios para este fim. Serão posteriormente abordados o coeficiente de difusão, a resistência à penetração de cloretos e a absorção de água por capilaridade. Informações a respeito de outros indicadores de durabilidade podem ser obtidas em trabalhos como Baroghel-Bouny *et al*. (2011), Beushausen e Luco (2016), Beushausen *et al*. (2016) e Ribeiro e Cascudo (2018).

2.3.2. Indicadores de Durabilidade aplicados à estimativa da penetração de cloretos no concreto

Com base nos diferentes mecanismos de transporte de cloretos no interior do concreto apresentados na seção 2.2.1, existem diversas maneiras de avaliar a resistência de uma estrutura em concreto à penetração desse íon.

Quando o ingresso do cloreto é avaliado de forma natural, a penetração ocorre lentamente. Assim, em busca de dados que indiquem mais rapidamente a resistência do concreto à entrada de agentes agressivos, surgem os ensaios acelerados, nos quais a entrada do íon no concreto é comumente forçada pela imposição de uma diferença de potencial elétrico. Esses métodos, no entanto, representam com menor precisão o comportamento real da relação entre os íons e a estrutura quando comparados com ensaios de penetração natural (JEN *et al*., 2017; HINO JÚNIOR, 2019).

Yuan e Santhanam (2013) afirmam que nas últimas duas décadas muitos métodos de medição do ingresso de cloretos no concreto foram propostos e desenvolvidos com objetivos de (a) classificar a resistência do concreto ao ingresso dos íons e (b) obter parâmetros de entrada para previsões de vida útil de estruturas sujeitas a ambientes ricos em cloretos.

Alguns desses ensaios podem cumprir somente com o primeiro propósito, como o método normatizado pela ASTM C 1202 (ASTM, 2012), no qual a carga passante através de uma amostra de concreto é medida por um período de 6 h. Este tipo de ensaio não pode ser usado diretamente como

um parâmetro de entrada em modelo de previsão de vida útil das estruturas, sendo mais adequado para ser uma ferramenta no controle de qualidade do concreto executado. Por outro lado, o coeficiente de difusão do concreto, que pode ser determinado a partir de diversos ensaios, pode ser adotado em modelos de previsão de vida útil (YUAN e SANTHANAM, 2013).

Na Tabela 2.1 são apresentados métodos de avaliação da penetração de cloretos normatizados em alguns países.

Tabela 2.1. Resumos de métodos normatizados relacionados à penetração de cloretos no concreto. Fonte: Adaptado de Hino Júnior (2019).

Base teórica	**Método de ensaio**	**Parâmetro avaliado**	**Duração**	**Referência**
2ª Lei de Fick	Imersão em solução de NaCl	Coeficiente de difusão aparente	> 35 dias	NT Build 443
				ASTM C 1556
Eq. de Nernst-Plank	Aplicação de corrente elétrica (12 V) em sistema com NaCl e NaOH	Coef. de difusão em estado não-estacionário	Várias semanas	NT Build 355
	Aplicação de corrente elétrica (10 a 60 V) em sistema com NaCl e NaOH	Coef. de difusão aparente em estado não-estacionário	6 a 96 h	NT Build 492
	Aplicação de corrente elétrica (12 V) em sistema com NaCl e H_2O	Coef. de difusão nos estados estacionário e não-estacionário	> 14 dias	UNE 83987
Outros	Aplicação de corrente elétrica (60 V) em sistema com NaCl e NaOH	Resistência à penetração de cloretos	6 h	ASTM C 1202/ AASHTO T277
	Exposição de uma face da amostra à solução de NaCl	Perfil de cloretos	> 90 dias	ASTM C 1543/ AASHTO T259

Percebe-se que existem na literatura muitos métodos voltados à medição da difusividade do concreto. A Nordtest[1], por exemplo, normatizou três diferentes tipos de ensaio, sendo um de migração em regime estacionário (NT Build 355), um de migração em estado não estacionário (NT Build 492) e o método de ensaio por imersão (NT Build 443).

Embora todos esses métodos sejam acelerados, cada um deles tem uma duração. No entanto,

[1] Órgão conjunto de países nórdicos voltado à cooperação técnica e normatização de métodos relacionados à avaliação da conformidade de materiais.

como o método de migração em estado não estacionário não requer um longo período de exposição à solução salina, esse é o único método para um ensaio muito rápido, independente da idade do concreto. Assim, o ensaio normatizado pela NT Build 492 (NORDTEST, 1999) mostra-se viável e satisfatório no controle de qualidade do concreto durante a concretagem e em idades iniciais (GJØRV, 2003, *apud* GJØRV, 2015).

O método de ensaio em regime não estacionário foi originalmente desenvolvido por Tang em 1996. Anos depois, foi submetido a muitos testes e comparações com outros métodos no programa de pesquisa europeu DuraCrete (2000). Em consequência, a difusividade de cloretos no concreto medida através do ensaio normatizado pela NT Build 492 (NORDTEST, 1999) foi adotada como base das diretrizes gerais do projeto de durabilidade apresentado nesse programa (GJØRV, 2015). Destaca-se ainda que os resultados obtidos por meio desse método apresentam forte correlação estatística com os resultados apresentados pelo ensaio de imersão, como apresenta a Fig. 2.4.

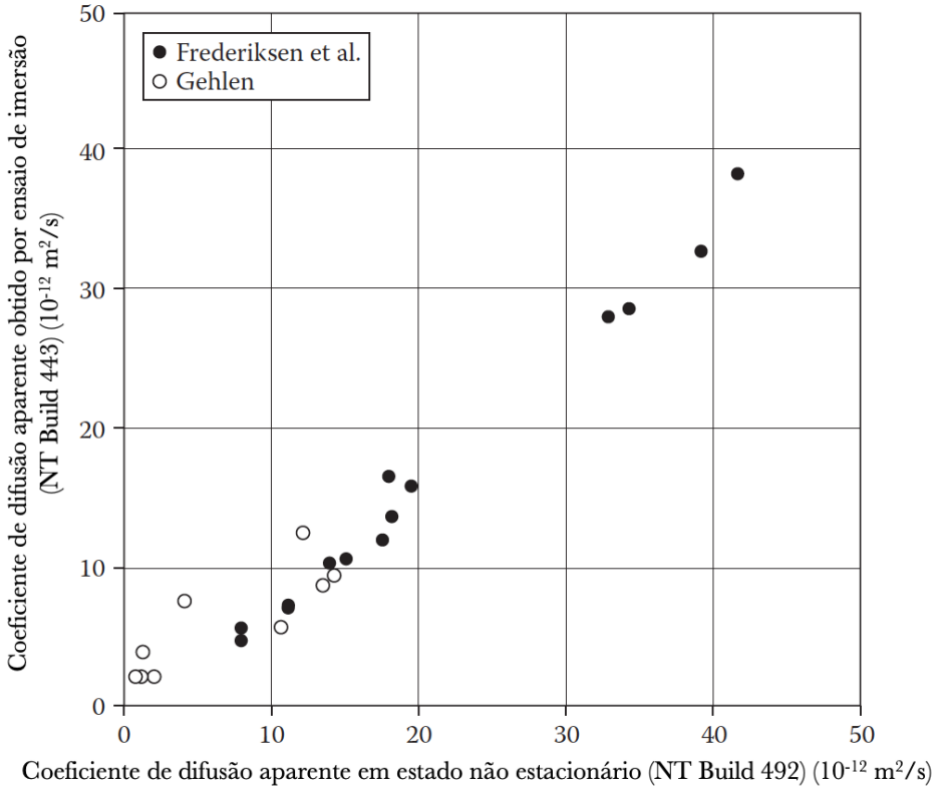

Figura 2.4 - Correlação entre os coeficientes de difusão obtidos por ensaios de imersão e pelo método normatizado pela NT Build 492 (Fonte: Adaptado de Gjørv, 2015).

A precisão do método de migração em regime não estacionário foi demonstrada pelo programa de pesquisa europeu ChlorTest (2005), que avaliou e comparou muitos métodos de ensaio. Devido a sua precisão, simplicidade e rapidez, esse método passou gradualmente a ser empregado por outros

países, como Estados Unidos e China (GJØRV, 2015). Os resultados da precisão dos métodos avaliados pelo projeto ChlorTest (2005) são apresentados na Fig. 2.5.

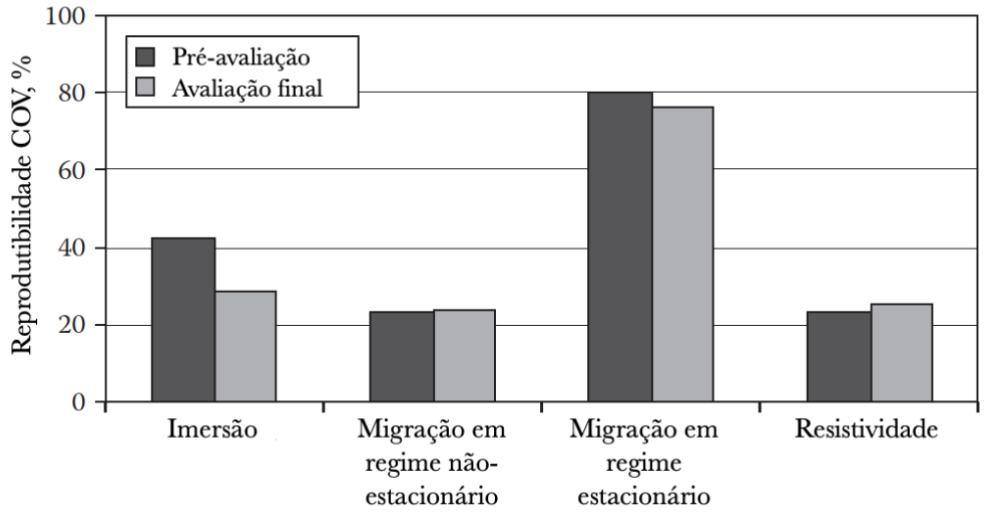

Figura 2.5 - Precisão dos métodos de ensaio de difusividade avaliados no programa de pesquisa ChlorTest (2005) (Fonte: Adaptado de Gjørv, 2015).

2.3.3. Fatores intervenientes no processo de penetração de cloretos no concreto

Nas análises com vistas à durabilidade de estruturas de concreto armado comumente adota-se o coeficiente de difusão como principal parâmetro da penetrabilidade do concreto, a qual está ligada a diversos fatores relacionados à composição e à execução do material, como tipo de cimento utilizado, relação ag/agl, uso de adições minerais e tempo de cura. É necessário, porém, compreender que aspectos ambientais também influenciam na penetração de agentes agressivos no concreto, como a umidade relativa e a concentração de cloretos na superfície de estrutura. Na Figura 2.6 são apresentados fatores que influenciam no processo de penetração de cloretos em estruturas de concreto.

Além desses fatores, ao avaliar a difusividade do concreto por meio de ensaios acelerados, outros aspectos também influenciam no coeficiente de difusão obtido, como a tensão imposta ao sistema durante a realização do ensaio e a temperatura sob a qual o procedimento foi realizado. No entanto, as normas que regem tais ensaios costumam apresentar equações que relacionam esses parâmetros com o coeficiente de difusão. Assim, ao determinar a difusividade do concreto por meio de ensaios acelerados, deve-se atentar para que as condições de ensaio descritas em norma, como temperatura, tensão imposta e espessura da amostra utilizada, sejam atendidas.

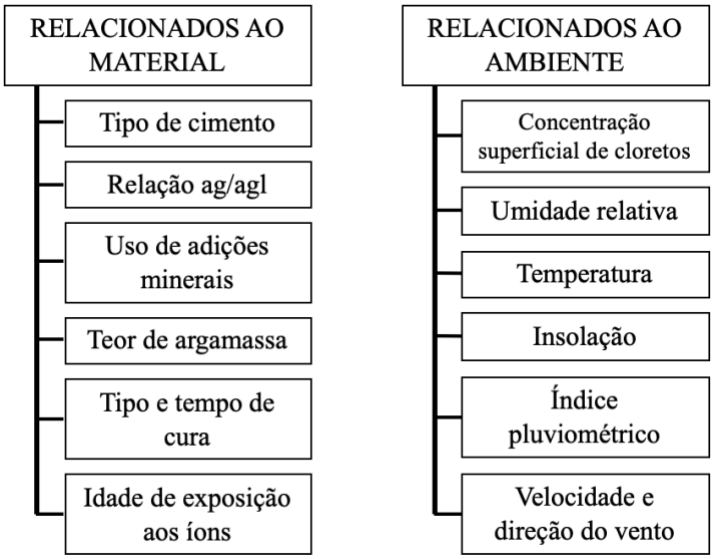

Figura 2.6 - Parâmetros que influenciam na penetração de cloretos no concreto (Fonte: Autor).

2.4. Adições minerais e suas implicações na vida útil do concreto

O concreto é o material de construção mais versátil, amplamente utilizado e geralmente empregado visando sua resistência a esforços de compressão. O uso de materiais cimentícios suplementares na produção do concreto é crescente, tornando o produto final mais barato e conferindo-lhe, comumente, maior trabalhabilidade, resistência e/ou durabilidade (SRIVASTAVA *et al*., 2012). Segundo Dal Molin (2011), esses materiais são divididos em dois grupos: pozolânicos e não-pozolânicos (ou hidráulicos), sendo, os últimos, materiais que reagem com a água e possuem propriedades aglomerantes similares às do cimento.

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), as pozolanas são materiais silicosos ou silico-aluminosos que não têm propriedades aglomerantes. Quando as finas partículas do material pozolânico são dissipadas em meio à pasta cimentícia, são gerados diversos locais de nucleação para a precipitação dos produtos de hidratação, tornando a pasta mais homogênea. Esse efeito físico é chamado de efeito *filler*. Além disso, a utilização desses materiais desencadeia também a reação pozolânica, na qual a sílica amorfa presente nas pozolanas reage com o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) produzido durante a hidratação do cimento, resultando na formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), composto que influencia diretamente na resistência mecânica do concreto (SABIR *et al*., 2001; ANTONOVICH e GOBERIS, 2003; SIDDIQUE, 2011).

As melhorias geradas pelas adições pozolânicas em aspectos físicos e químicos da microestrutura do concreto resultam, em geral, em um concreto mais resistente, mais denso, menos poroso e, por consequência, menos suscetível ao ingresso de agentes deletérios como os íons cloreto

(OLLIVIER e TORRENTI, 2014). No entanto, segundo Ribeiro (2018), os mecanismos de reação e o efeito dessas adições na durabilidade do concreto variam devido às diferentes composições químicas e mineralógicas de cada material.

2.4.1. Sílica ativa

A sílica ativa, considerada uma pozolana de alta reatividade, é um subproduto da produção do silício metálico ou de ligas de ferro-silício a partir de carvão e quartzo de pureza elevada e possui teor de SiO_2 normalmente entre 85 e 90 %. Visando principalmente a capacidade de a sílica ativa conferir melhores propriedades mecânicas e de durabilidade aos materiais cimentícios, diversos estudos têm abordado sua utilização desde a década de 1980 (ISAIA, 1995; RASHAD *et al*., 2011; TRINDADE, 2015). A NBR 13956 (ABNT, 2012), que normatiza a sílica ativa para uso com cimento Portland, determina que a sílica ativa deve possuir um teor mínimo de 85 % de SiO_2.

As partículas de sílica ativa são, em sua grande maioria, amorfas e ultrafinas, com tamanho médio entre 0,1 e 0,5 μm, o que corresponde a, aproximadamente, um centésimo do tamanho médio de uma partícula de cimento. Devido à sua elevada finura, grande área superficial e alto teor de dióxido de silício, a sílica ativa é uma pozolana quimicamente reativa e sua utilização, em adição ou substituição parcial ao cimento na produção do concreto, reduz consideravelmente a probabilidade de ocorrência de corrosão da armadura ao refinar a microestrutura do compósito (SHI *et al*., 2012). Mehta e Monteiro (2014) salientam que a sílica ativa é capaz de consumir grande parte da portlandita produzida durante a hidratação do cimento Portland. No entanto, ressaltam que o C-S-H proveniente da reação pozolânica tende a ser menos denso que o C-S-H inicialmente formado na hidratação do cimento.

Segundo Ribeiro (2018), diversos pesquisadores têm se dedicado a analisar a influência do uso de sílica ativa no processo de corrosão de estruturas em concreto armado e todos autores relatam uma redução significativa da penetração de cloretos em concretos com utilização de sílica ativa, com substituições no teor de 15 % de massa de cimento reduzindo o coeficiente de difusão, em média, em 91 %. O uso de algumas pozolanas em teores elevados (como 15 % de sílica ativa, por exemplo), afeta fortemente outras propriedades do concreto, podendo ocasionar fissurações devido à retração e demandando cuidados extras durante a cura do concreto, fatos observados por diversos autores, como Shekarchi *et al*. (2009) e Imam *et al*. (2018).

Duval e Kadri (1998), ao avaliar a trabalhabilidade e a resistência à compressão de concretos produzidos com sílica ativa, concluíram que a substituição de até 10 % de cimento por sílica ativa

não reduziu a trabalhabilidade do concreto em estado fresco, no entanto, quanto menor a relação ag/agl utilizada, maior a perda de *slump* devido ao aumento do teor de adição da sílica ativa. Por tal fato, a substituição de cimento por sílica ativa é comumente seguida pela utilização de aditivos superplastificantes, os quais visam dar maior trabalhabilidade à pasta sem que haja necessidade de uma maior adição de água. Cong *et al*. (1990) afirmam que a substituição parcial de cimento por sílica ativa, combinada ao emprego de aditivos superplastificantes, aumenta significativamente a resistência à compressão da pasta cimentícia. Hassan *et al*. (2012), que desenvolveram concretos com teores de sílica entre 3 e 11 %, afirmam que a melhor resistência à compressão foi obtida com percentual de substituição de 8 %.

Song *et al*. (2010), após avaliarem o refinamento da estrutura de poros e a densificação da matriz cimentícia, relatam que a finura da sílica ativa utilizada afeta consideravelmente a permeabilidade do concreto e que o teor ótimo de adição para um menor transporte de massa no interior do concreto está entre 8 e 12 % de sílica em relação à massa de cimento. Gjørv (1993, *apud* KHAN e SIDDIQUE, 2011) concluiu que a sílica ativa reduz significativamente a permeabilidade à água do concreto, sendo o coeficiente de permeabilidade reduzido de $1{,}6 \times 10^{-7}$ para 4×10^{-10} quando foram utilizados 10 kg/m^3 de sílica ativa em um concreto com consumo de cimento de 100 kg/m^3. Salienta-se que o consumo de cimento de 100 kg/m^3 de concreto é um valor bastante inferior aos parâmetros normativos atuais.

A utilização de sílica ativa no concreto também reduz significativamente a penetrabilidade de cloretos no compósito. Ferreira (2003) e Poon *et al*. (2006) obtiveram resultados satisfatórios no ensaio de penetrabilidade de cloretos, normatizado pela ASTM C 1202 (ASTM, 2012), em concretos com substituição de 10 % de cimento por sílica ativa ensaiados à idade de 28 dias. Em todas as misturas produzidas por esses autores, com relações ag/agl compreendidas entre 0,3 e 0,6, o concreto com sílica ativa mostrou-se significativamente mais resistente ao ingresso dos íons.

Khan e Siddique (2011), utilizando dados de diversos autores, apresentam graficamente a redução na carga elétrica passante e na difusividade relativa da pasta devido ao emprego de sílica ativa no concreto. A Figura 2.7 e a Fig. 2.8 mostram esses resultados.

Bagheri *et al*. (2013) afirmam que a difusividade do concreto é inversamente proporcional ao teor de adição de sílica ativa no material, isto é, quanto maior é o teor de sílica utilizado, menor é o coeficiente de difusão do concreto. Os autores ainda salientam que a utilização de 2,5 % de sílica ativa foi responsável por uma redução de aproximadamente 50 % do coeficiente de difusão em relação ao concreto referência. Mendes (2009), por sua vez, utilizando 10 % de sílica ativa, em

substituição ao cimento, em uma mistura com relação ag/agl 0,55, obteve difusividade 90 % inferior à apresentada pelo concreto sem adições.

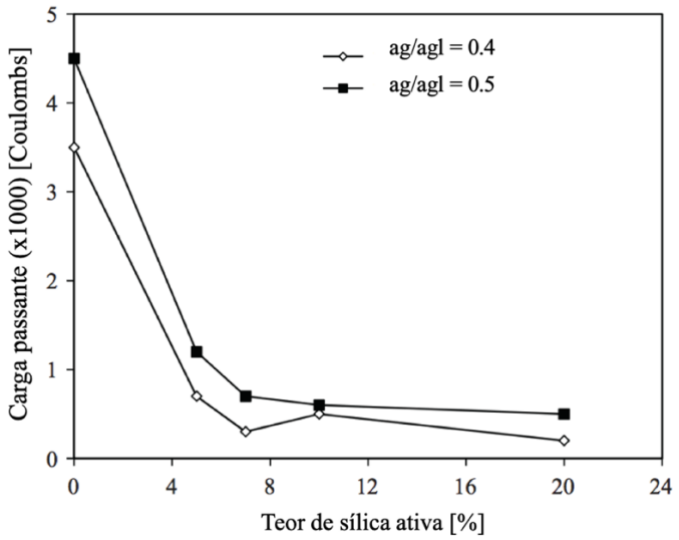

Figura 2.7 - Influência do teor de sílica ativa na resistência à penetração de cloretos do concreto (Fonte: Adaptado de Khan e Siddique, 2011. Traduzido pelo autor).

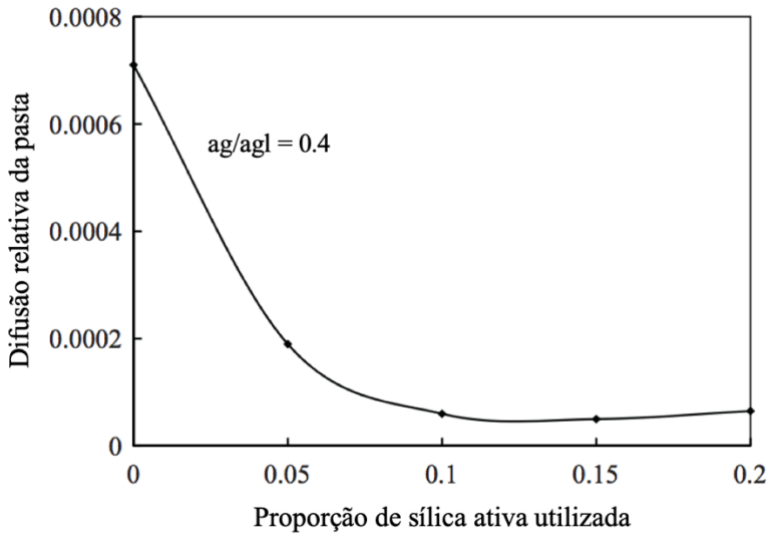

Figura 2.8 - Difusão relativa versus proporção de sílica ativa empregada na mistura (Fonte: Adaptado de Khan e Siddique, 2011. Traduzido pelo autor).

Ainda, de acordo com Medeiros *et al*. (2013), a utilização da sílica ativa em substituição parcial ao cimento Portland pode aumentar a vida útil da estrutura de concreto em até 440 % sem que haja perdas de resistência à compressão e de trabalhabilidade do material.

2.4.2. Metacaulim

O metacaulim é um material obtido a partir da calcinação do argilomineral caulinita,

processado a temperaturas entre 500 e 800 ºC, altamente amorfo e que apresenta forte atividade pozolânica (FRÍAS *et al*., 2000; LOVE *et al*., 2007; KRAJČI *et al*., 2015). Esse material é composto por dióxido de silício (SiO_2), entre 50 e 55 %, e óxido de alumínio (Al_2O_3), de 40 a 45 % (POON *et al*., 2001) e pode ainda conter, entre outros, MgO, CaO e TiO_2 (SIDDIQUE e KLAUS, 2009).

Segundo Barata (1998), ao ser submetida a tratamentos térmicos com temperaturas compreendidas entre 600 e 900 ºC, a caulinita, composta por silicatos hidratados de alumínio, sofre um processo de desidroxilação responsável por quebrar sua estrutura cristalina devido à remoção das hidroxilas. Após esse processo, a caulinita passa a ser um composto altamente amorfo e quimicamente instável conhecido como metacaulinita ($Al_2Si_2O_7$).

A disponibilidade de material e o aumento de durabilidade conferido a concretos e argamassas têm sido o principal motivo para a utilização de pozolanas à base de argila como material suplementar ao cimento Portland (TEODORO, 2016). Além disso, dependendo do tipo de argila e da temperatura de processamento, o metacaulim pode aumentar significativamente a resistência à compressão do concreto em idades iniciais (EL-DIADAMONY *et al*., 2018), o que, segundo Wild *et al*. (1996), é uma combinação do efeito *filler* do metacaulim com a hidratação acelerada do cimento.

A adição de metacaulim às misturas cimentícias modifica a cinética de hidratação do cimento e as reações que ocorrem nesse período, além de gerar alterações na microestrutura e nas propriedades em estado fresco do concreto. Tal fato ocorre devido ao aumento de pontos de nucleação resultante da adição pozolânica, favorecendo a hidratação do C_3S do cimento Portland. Por sua vez, a reação pozolânica ocorre mais tardiamente, de acordo com a reatividade do metacaulim, pela interação entre a metacaulinita e o hidróxido de cálcio, formando o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e os aluminatos de cálcio hidratados (C_2ASH_8, C_4AH_{13} e C_3AH_6) (FIGUEIREDO *et al*., 2014; SCRIVENER *et al*., 2015; CACERES *et al*., 2018).

Ribeiro (2018) afirma que além dos efeitos pozolânico e de microfiller, a elevada concentração de Al_2O_3 faz com que o metacaulim seja capaz de melhorar consideravelmente a resistência do concreto à penetração de cloretos, uma vez que a interação entre aluminatos e cloretos leva à formação do sal de Friedel, diminuindo a quantidade de íons livres.

Gruber *et al*. (2001) afirmam que a utilização de apenas 12 % de metacaulim em relação à massa de cimento é capaz de reduzir a penetração de cloretos no concreto em até 60 %. Carasek *et al*. (2011), ao avaliarem a utilização de metacaulim em diferentes dosagens do concreto, também verificaram a eficácia dessa utilização na diminuição da permeabilidade do concreto a cloretos.

Al-alaily *et al*. (2017) realizaram uma modelagem estatística e probabilística da vida útil de concretos com diferentes teores de metacaulim a fim de avaliar a probabilidade de ocorrência de corrosão em diversas idades. Os resultados obtidos são apresentados na Fig. 2.9.

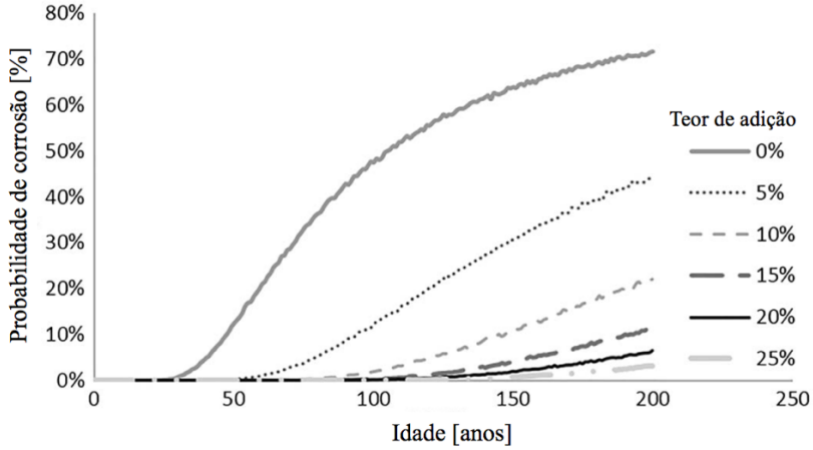

Figura 2.9 - Influência do teor de substituição de cimento Portland por metacaulim na probabilidade de corrosão em estruturas de concreto armado (Fonte: Adaptado Al-alaily *et al*., 2017. Traduzido pelo autor).

Na Figura 2.9 pode-se perceber que para períodos de até 100 anos os teores de 15, 20 e 25 % apresentam resultados semelhantes, com probabilidade de corrosão próxima a 0 %. No entanto, para uma vida útil maior (200 anos, por exemplo), quanto maior o percentual de substituição, mais durável se mostrou o material. Deve-se atentar, porém, ao fato de que, do ponto de vista prático, o uso de 25 % de substituição é pouco recomendado.

Ribeiro (2018) apresenta ainda um comparativo da vida útil de concretos produzidos com teores de 5, 10 e 15 % de sílica ativa e metacaulim e com cobrimento da armadura de 40 mm. Seus resultados são apresentados na Tab. 2.2.

A partir dos dados apresentados na Tab. 2.2, Ribeiro (2018) afirma que o desempenho superior apresentado pelo metacaulim em relação à sílica ativa em percentuais mais elevados confirma o que é esperado, visto que esse material alia o fenômeno físico de refinamento dos poros e diminuição de sua interconectividade ao fenômeno químico, elevando a formação de sal de Friedel (cloro-aluminato) graças à maior disponibilidade de aluminatos. Destaca-se que, de modo geral, os valores apresentados na Tab. 2.2 estão abaixo do esperado para a vida útil de uma estrutura. Este fato pode estar ligado à elevada agressividade do ambiente considerado e/ou à consideração do coeficiente de difusão inicial D_0 como constante ao longo de toda a vida útil da estrutura.

Tabela 2.2. Resultados da avaliação da vida útil de concretos contendo adições de sílica ativa e metacaulim.
Fonte: Ribeiro (2018).

Teor de adição	**Tipo de adição**	
	Sílica ativa	**Metacaulim**
Referência (0 %)	11,64 anos	
5 %	16,01 anos	13,51 anos
10 %	20,12 anos	20,62 anos
15 %	23,25 anos	31,62 anos

Por fim, Ribeiro (2018) apresenta ainda uma análise do coeficiente de difusão em estado não estacionário (D_{ns}) de concretos contendo sílica ativa e metacaulim. Os valores são apresentados na Tab. 2.3. Novamente é possível verificar o benefício do emprego de metacaulim ao concreto, fazendo com que esse apresente resistência à penetração de cloretos "muito alta" em todos os percentuais de adição avaliados.

Tabela 2.3. Classificação de concretos com adições de sílica ativa e metacaulim quanto à resistência à penetração de cloretos.
Fonte: Ribeiro (2018).

Teor de adição	**Difusividade do cloreto (D_{ns}) [10^{-8}cm^2/s]**		**Resistência à penetração do cloreto**
	Sílica ativa	**Metacaulim**	
Referência (0 %)	9,22		Alta
5 %	5,88	4,97	Alta / Muito alta
10 %	5,31	4,30	Alta / Muito alta
15 %	4,13	3,07	Muito alta

2.5. Estimativa de vida útil e confiabilidade estrutural

As estruturas em concreto armado são projetadas para atenderem parâmetros de segurança, desempenho em serviço e durabilidade. Quando pelo menos um desses requisitos não é atendido, considera-se atingido um estado limite (MAGALHÃES, 2014).

A NBR 6118 (ABNT, 2014) menciona três estados limite que podem ser atingidos por uma

estrutura: Estado Limite Último (ELU), Estado Limite de Serviço (ELS) e Estado Limite de Fadiga (ELF). O primeiro está relacionado a colapsos estruturais que impliquem no impedimento da utilização da estrutura. O segundo, por sua vez, é atingido antes de ser esgotada a capacidade resistente da estrutura, fazendo com que não seja recomendado o uso da mesma. Por fim, o ELF está ligado aos danos gerados à estrutura devido a cargas cíclicas e sucessivas que levam ao colapso estrutural por meio da abertura e da propagação de fissuras. A avaliação da confiabilidade estrutural se torna uma verificação da segurança da estrutura em relação a esses três casos.

Melchers e Beck (2018) apontam as incertezas relacionadas ao processo de análise de uma estrutura com vistas à durabilidade. Essas incertezas e suas características são apresentadas no Quadro 2.2.

Quadro 2.2. Incertezas no processo de avaliação da confiabilidade estrutural.
Fonte: Adaptado de Melchers e Beck (2018).

Tipo de Incerteza	**Descrição**
Decisão	Verificação do atingimento de um determinado estado limite
Fenomenológica	Está relacionada a situações não previstas ou não mensuradas da maneira correta
Modelo	Consequência de simplificações realizadas em modelos que visam descrever um comportamento real
Previsão	Refere-se à previsão das condições do elemento futuramente
Física	Diz respeito à aleatoriedade dos materiais, dimensões dos elementos e à avaliação das solicitações impostas
Fatores Humanos	Falhas humanas ocorridas durante o projeto, a execução e/ou a utilização da estrutura
Estatística	Relacionada à previsão das distribuições de probabilidade das variáveis envolvidas no processo

De acordo com Santiago (2011), por meio das teorias de confiabilidade é possível quantificar as incertezas envolvidas no processo e, a partir disso, determinar a probabilidade de uma estrutura atingir um estado limite.

2.5.1. Conceitos de confiabilidade estrutural

A análise de durabilidade com base na teoria de confiabilidade possibilita a avaliação da probabilidade de um estado limite ser atingido em um determinado período de tempo. As prescrições comumente presentes em normas se baseiam em probabilidades de falha pré-estabelecidas e consideram uma agressividade média do ambiente e um nível razoável de durabilidade (MAGALHÃES, 2018).

> O termo confiabilidade estrutural é geralmente empregado para designar a medida probabilística de segurança de determinado sistema ou estrutura frente a um determinado desempenho esperado. [...] pode-se defini-lo como o complemento da probabilidade de falha e consequente violação de determinado estado limite (MAGALHÃES, 2014, p. 73).

Lorensini (2006) afirma que a avaliação da deterioração de estruturas de concreto armado é um processo complexo devido ao grande número de parâmetros envolvidos e ao fato de a cada um deles estar relacionada uma grande variabilidade. Dessa maneira, uma avaliação probabilística se faz necessária para descrever o processo de deterioração das estruturas.

Para Ferreira (2006), a análise de durabilidade é baseada na probabilidade de determinado fato ocorrer, sendo esse, comumente, aquele que marca o fim da vida útil da estrutura. Dessa forma, o evento que marca o fim da vida útil da estrutura pode ser descrito por meio de uma função estado limite $g(x,t)$, na qual x é o vetor das variáveis básicas envolvidas e t é o tempo.

Para avaliação de um estado limite, o critério de falha pode, de forma geral e simplificada, ser descrito através da Eq. (2.6):

$$g(x,t) = R(x,t) - S(t) \tag{2.6}$$

onde *R(x,t)* refere-se aos mecanismos resistentes da estrutura frente à solicitação avaliada e *S(t)* diz respeito às solicitações que podem conduzir a estrutura a atingir o estado-limite em questão.

Magalhães (2018) relata que, em casos de análise de durabilidade de estruturas suscetíveis à penetração de cloretos, *R(x,t)* representa a resistência do concreto à penetração dos íons quando a análise se concentra na estimativa do tempo necessário ao início do processo de despassivação da armadura. Essa resistência varia, por exemplo, em função da qualidade do concreto empregado, do cobrimento da armadura e outros. Já o vetor *S(t)* representa, nesse caso, a combinação entre a ação dos cloretos e as condições ambientais às quais a estrutura está exposta.

Frente à grande variabilidade dos parâmetros envolvidos nas variáveis R e S, como já discutido anteriormente, a avaliação de confiabilidade só se faz possível em termos probabilísticos.

Assim, a probabilidade de não-ocorrência de um estado limite é dada por $P(R > S)$. Pode-se, ainda, avaliar a probabilidade de falha (P_f) do sistema estrutural em questão, sendo essa dada por $P(R < S)$.

Haldar e Mahadevan (2000) afirmam que conforme os parâmetros envolvidos no fenômeno analisado e suas respectivas distribuições de probabilidades passam a ser conhecidos, a P_f pode ser calculada a partir da Eq. (2.7). Para tal, R e S devem ser funções contínuas e estatisticamente independentes.

$$P_f = \int_0^{\infty} F_R(s)\, f_s(s)\, ds \tag{2.7}$$

onde F_R é função de distribuição acumulada de R e f_s é a função densidade de probabilidade de S.

Assim, considerando uma estrutura com resistência R sujeita a uma solicitação S, sendo essas estatisticamente independentes e ambas com distribuições normais de probabilidade, isto é, $N(\mu_R, \sigma_R)$ e $N(\mu_S, \sigma_S)$, a função margem de segurança (M) do sistema estrutural pode ser descrita pela Eq. (2.8):

$$M = R - S \tag{2.8}$$

onde M é função margem de segurança, R é a função resistência da estrutura e S é a função de solicitações.

Dessa forma, o valor esperado da função M e seu desvio padrão podem ser descritos conforme a Eq (2.9) e a Eq. (2.10), respectivamente. Tal dedução pode também ser verificada na Fig. 2.10.

$$\mu_M = \mu_R - \mu_S \tag{2.9}$$

onde μ_M é o valor esperado da função margem de segurança, μ_R é o valor médio função resistência da estrutura e μ_S é o valor médio da função de solicitações.

$$\sigma_M = \sqrt{{\sigma_R}^2 + {\sigma_S}^2} \tag{2.10}$$

sendo σ_M o desvio padrão da função M, σ_R o desvio padrão de R e σ_S o desvio padrão da função de solicitações.

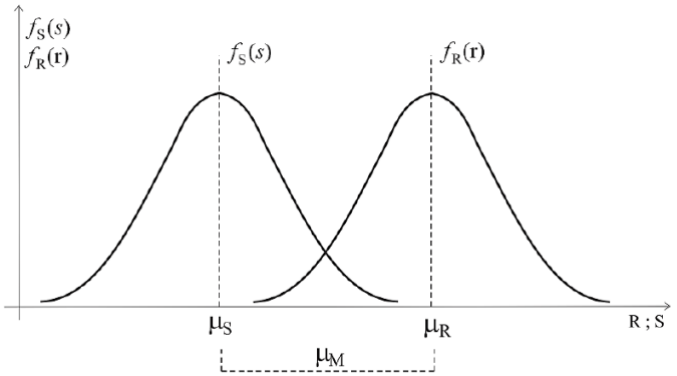

Figura 2.10 - Função densidade de probabilidade da função de resistência de estrutura (R) e da função de solicitações (S) (Fonte: Adaptado de Ang e Tang, 2007).

Ang e Tang (2007) apresentam a função densidade de probabilidades da função M (f_M) (Fig. 2.11), por meio da qual se verifica que:

$$\mu_M = 0 + \beta\ \sigma_M \tag{2.11}$$

logo:

$$\beta = \frac{\mu_M}{\sigma_M} \tag{2.12}$$

onde β é o índice de confiabilidade da estrutura desde que M apresente uma distribuição normal de probabilidades.

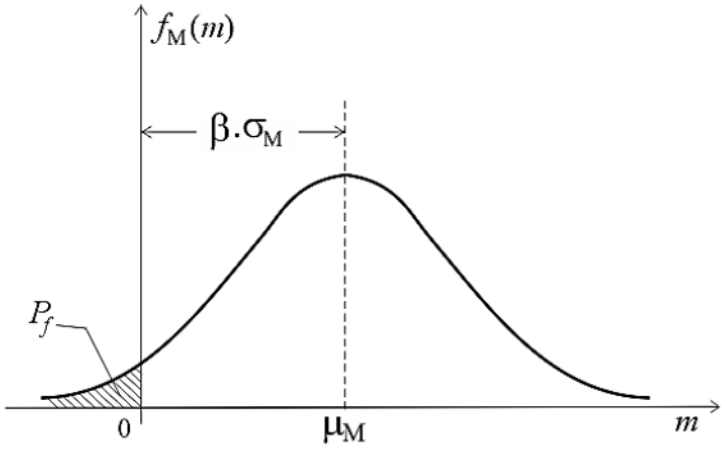

Figura 2.11 - Função densidade de probabilidades da função M (f_M) (Fonte: Adaptado de Ang e Tang, 2007).

Admitindo a distribuição de probabilidade acumulada (Φ) da função M como normal, a P_f apresentada na Fig. 2.11 pode ser determinada através da Eq. (2.13) (ANG e TANG, 2007).

$$P_f = \Phi(-\beta) \tag{2.13}$$

onde P_f é a probabilidade de falha da estrutura, Φ representa a distribuição de probabilidade acumulada e β é o índice de confiabilidade.

No entanto, quando a função M não segue uma distribuição normal de probabilidades, a determinação de P_f pode ser feita relacionando o número de falhas obtidas e o número de simulações realizadas, como mostra a Eq. (2.14) (HALDAR e MAHADEVAN, 2000). Essa metodologia requer um número maior de simulações a fim de diminuir o percentual de erro admitido na análise, como será apresentado posteriormente.

$$P_f = \frac{N_f}{N} \tag{2.14}$$

onde P_f é a probabilidade de falha da estrutura, N_f número de falhas obtido no processo e N é o número de simulações realizadas.

Nesse caso, o índice de confiabilidade (β) pode ser determinado conforme a Eq. (2.15).

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f) \tag{2.15}$$

onde β é o índice de confiabilidade, Φ^{-1} é a função inversa da distribuição de probabilidade acumulada e P_f é a probabilidade de falha.

Avaliando a Fig. 2.11 é perceptível que o aumento do valor de β gera uma redução da probabilidade de falha, representada pela área hachurada. Nota-se, assim, que a P_f é função do índice de confiabilidade, sendo esse um importante parâmetro para a comparação do nível de segurança obtido no projeto de uma estrutura (REAL, 2000). É importante também atentar à não linearidade entre P_f e β. Diminuições pequenas no índice de confiabilidade causam aumentos significativos na probabilidade de falha da estrutura, como mostra a Fig. 2.12.

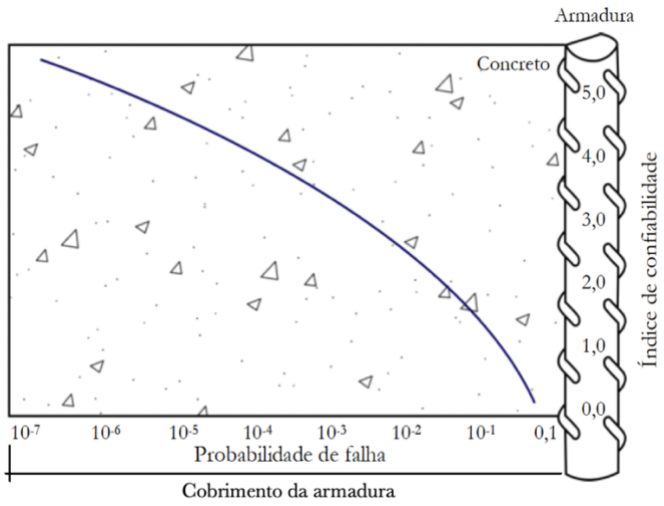

Figura 2.12 - Relação entre a probabilidade de falha e o índice de confiabilidade estrutural (Fonte: Adaptado de Possan, 2010).

Quando a análise de confiabilidade é aplicada à avaliação da durabilidade estrutural, o sistema tende a sofrer alterações em suas condições gerais ao longo do tempo devido à existência de mecanismos que modificam a relação entre a resistência da estrutura e as solicitações sofridas pela mesma (MAGALHÃES, 2018).

A Figura 2.13 apresenta a evolução de relação entre *R* e *S* com o passar do tempo. Conforme aumenta o período de exposição da estrutura ao ambiente agressivo, a capacidade do concreto em resistir à penetração de agentes nocivos tende a reduzir, assim como a concentração dos agentes na superfície ou no interior da estrutura tende a aumentar. Assim, tomando somente a variação das médias absolutas de *R* e *S* em função do tempo, percebe-se uma aproximação entre as variáveis e consequente redução da margem de segurança *M* (GJØRV, 2015; MAGALHÃES, 2018).

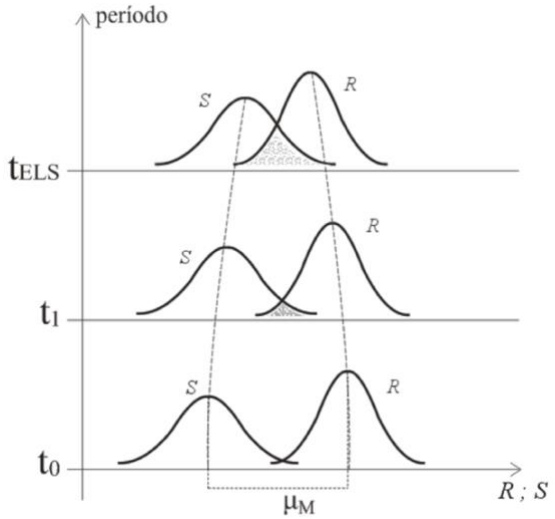

Figura 2.13 - Evolução da relação entre as variáveis S e R em função do tempo (Fonte: Adaptado de Gjørv, 2015).

Comumente, na avaliação de durabilidade de estruturas de concreto armado, a situação de falha está atrelada ao momento no qual o concreto deixa de dar proteção física ou química às armaduras a fim de evitar a corrosão. Quando a camada passivadora é rompida, o processo de degradação é acelerado e a vida útil da estrutura entra em contagem regressiva. Por tais fatos, grande parte das avaliações de durabilidade são baseadas em critérios de probabilidade de ocorrência de corrosão, a qual é iniciada após um valor crítico preestabelecido ser atingido (GJØRV, 2015; VERA *et al*., 2017).

A NBR 6118 (ABNT, 2014) não prescreve valores alvo para o índice de confiabilidade, definindo, somente, a vida útil de projeto como o período no qual são mantidas as características da estrutura sem que haja intervenções significativas desde que atendidos os requisitos de uso e manutenção indicados por projetista e construtor.

Gjørv (2015) afirma que a probabilidade de falha de uma estrutura quanto à corrosão não deve ultrapassar os 10 % ($\beta \approx 1{,}28$). A EN 1990 (CEN, 2002), por sua vez, apresenta valores de índice de confiabilidade diferentes em função da idade da estrutura, como mostra a Tab. 2.4.

Tabela 2.4. Índice de confiabilidade alvo, considerando consequências de média gravidade, conforme a idade da estrutura.
Fonte: EN 1990 (CEN, 2002).

Estado Limite	**Índice de confiabilidade (β) alvo**	
	1 ano	**50 anos**
Último (ELU)	4,7	3,8
de Serviço (ELS)	2,9	1,5

2.5.2. Métodos de determinação da probabilidade de falha e do índice de confiabilidade

Para que a determinação da probabilidade de falha e/ou do índice de confiabilidade de uma estrutura seja possível faz-se necessário o conhecimento das características das variáveis envolvidas no fenômeno avaliado (MAGALHÃES, 2014). Diversas técnicas foram desenvolvidas para possibilitar o cálculo da probabilidade de falha e essas podem ser classificadas, de acordo com Sagrilo (1994), em (1) métodos de integração numérica; (2) métodos analíticos; (3) métodos de simulação; e (4) métodos mistos ou híbridos.

Neste trabalho, para a análise de confiabilidade, serão utilizadas metodologias analíticas e de

simulação. Nesta sessão são apresentados conceitos relativos ao Método de Simulação de Monte Carlo, Método de Monte Carlo com Amostragem por Importância e Método de Confiabilidade de Primeira Ordem (*FORM*), com objetivo de apresentar um panorama acerca dos métodos utilizados no processo metodológico. Informações e detalhes sobre esses e outros métodos de avaliação da confiabilidade estrutural podem ser encontrados em Haldar e Mahadevan (2000), Gomes (2001), Ang e Tang (2007), Melchers e Beck (2018) e Beck (2019).

Método de Simulação de Monte Carlo (MCS)

O método de Simulação de Monte Carlo (*Monte Carlo Simulation - MCS*) é uma das ferramentas mais adotadas na estimativa da probabilidade de falha de um sistema, fato ligado à funcionalidade do método na avaliação de problemas que envolvem variáveis aleatórias com distribuição de probabilidades conhecida (MAGALHÃES, 2018).

Melchers e Beck (2018) afirmam que o método de Monte Carlo permite a solução de problemas de modelos de elevada complexidade e com qualquer número de variáveis aleatórias, facilitando a resolução de problemas lineares e não-lineares, com poucas ou muitas variáveis.

Na prática, o *MCS* se caracteriza pela realização de um grande número de simulações a partir de um conjunto de parâmetros de entrada gerados obedecendo à distribuição de frequência das variáveis envolvidas no processo, sendo em cada simulação utilizado um conjunto particular de valores gerados conforme a distribuição de probabilidade de cada variável (SAASSOUH e LOUNIS, 2012)

Real (2000) afirma ainda que, uma vez que o desempenho da estrutura é função de diversas variáveis aleatórias, a resposta da estrutura também será uma variável aleatória.

De acordo com Lorensini (2006), esse método, quando aplicado à avaliação da deterioração de estrutura em concreto armado, pode ser utilizado tanto para calcular as estatísticas, como média, desvio padrão e tipo de distribuição, das respostas dos modelos de deterioração, quanto para calcular a probabilidade de ocorrência de um desempenho insatisfatório.

Na Figura 2.14 é apresentado um modelo esquemático do funcionamento do método de Monte Carlo. Já a Fig. 2.15 apresenta esquematicamente a avaliação da probabilidade de falha via método de Monte Carlo considerando a função de falha como $g(X) = 0$. Cada ponto na figura representa a resposta de uma simulação. Os pontos localizados no domínio de falha, isto é, $g(X) < 0$, representam o não atendimento à função estado limite.

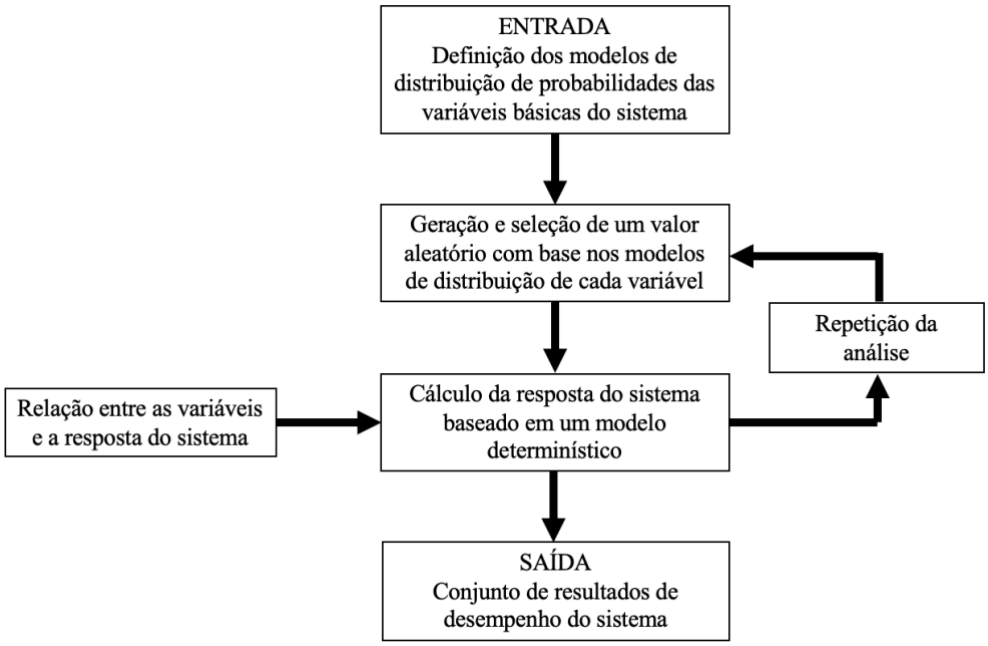

Figura 2.14 - Funcionamento do Método de Simulação de Monte Carlo (Fonte: Adaptado de Real, 2000).

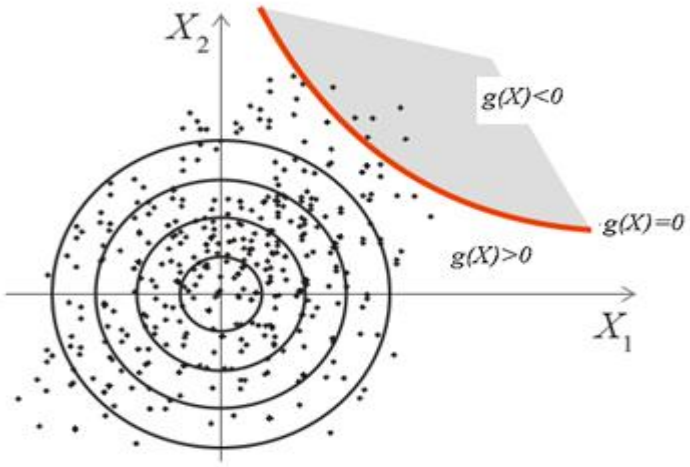

Figura 2.15 - Esquema dos domínios no método de Monte Carlo utilizando duas variáveis de entrada (Fonte: Nogueira, 2006).

Para que a probabilidade de falha do sistema seja determinada com precisão, pode ser necessário um número elevado de simulações, o que demanda maior tempo e processamento computacional e é uma das desvantagens do método de Monte Carlo (MAGALHÃES, 2018).

Haldar e Mahadevan (2000) apresentam uma equação que relaciona o número de simulações necessárias para uma representação mais realística do fenômeno estudado via método de Monte Carlo

e a probabilidade de falha admissível. Essa fórmula é apresentada na Eq. (2.16).

$$\varepsilon\% = \sqrt{\frac{1 - P_f}{N \times P_f}} \times 200\ \% \tag{2.16}$$

onde $\varepsilon\%$ é o percentual de erro admitido, P_f é a probabilidade de falha e N é número de simulações.

Método de Monte Carlo com Amostragem por Importância (MCS-AI)

Nos últimos anos as técnicas de amostragem por importância têm sido objeto de muito estudo pois estão entre as técnicas mais eficientes na busca pela diminuição do número de simulações necessário e/ou da variância dos resultados obtidos (MELCHERS e BECK, 2018).

De acordo com Haldar e Mahadevan (2000), a ideia básica da amostragem por importância é concentrar a distribuição dos pontos de amostragem na região de maior importância, isto é, na área que apresenta maior contribuição à ocorrência de falhas, ao invés de espalhá-los uniformemente ao longo de todos os valores possíveis, como apresenta a Fig. 2.16.

O deslocamento dos pontos de amostragem pode ser realizado a partir da utilização da função de amostragem $h(x)$, na qual os valores médios das variáveis de importância são os pontos de falha mais prováveis (BECK, 2019). Esses pontos podem ser obtidos e/ou verificados utilizando o método *FORM* (MAGALHÃES, 2018).

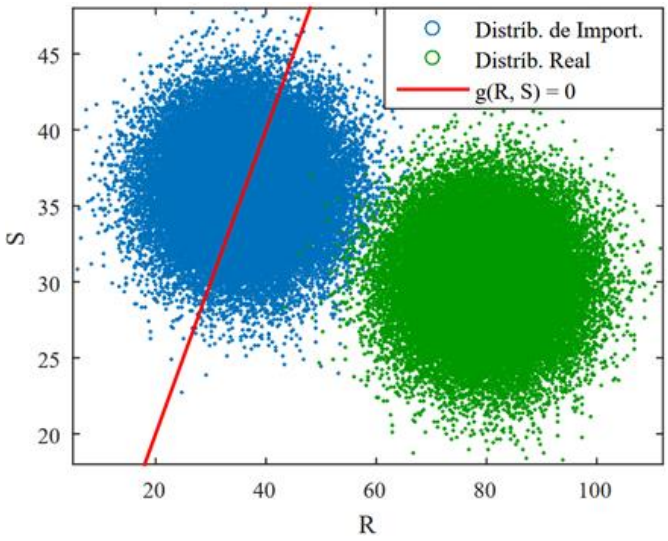

Figura 2.16 - Nuvem de pontos de um problema utilizando amostragem por importância (Fonte: Titello e Real, 2017).

Segundo Beck (2019), ao multiplicar e dividir a Eq. (2.7) pela função $h(x)$, são obtidas a

Eq. (2.17) e, por consequência, a Eq. (2.18).

$$P_f = \int_0^{\infty} \left[F_R(s) \, \frac{f_s(s)}{h(x)} \right] h(x) dx \tag{2.17}$$

$$P_f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} F_R(s_i) \, \frac{f_s(s_i)}{h(x_i)} \tag{2.18}$$

onde $f_s(s)$ é a função densidade de probabilidade conjunta das distribuições originais do sistema e $h(x)$ é a função densidade de probabilidade conjunta das distribuições de importância.

O peso de amostragem ω_i de cada um dos pontos amostrados é determinado com base na Eq. (2.19).

$$\omega_i = \frac{f_s(s_i)}{h(x_i)} \tag{2.19}$$

Assim, segundo Beck (2019), considerando as distribuições de probabilidade conjuntas originais e de importância, o cálculo de probabilidade de falha pode ser realizado utilizando o seguinte procedimento:

(a) gerar *N* amostras s_i a partir da função de amostragem $h(x)$;
(b) verificar a ocorrência de falha para cada amostra;
(c) analisar o peso de cada amostra, a partir da Eq. (2.19);
(d) estimar a média da probabilidade de falha através da Eq. (2.18);
(e) estimar a variância da probabilidade de falha.

Método de Confiabilidade de Primeira Ordem (FORM)

Sendo conhecidas as distribuições de probabilidade das variáveis envolvidas no processo analisado, além do Método de Simulação de Monte Carlo, o Método de Confiabilidade de Primeira Ordem (*First Order Reliability Method – FORM*) pode ser utilizado (MAGALHÃES, 2014).

Assim como no Método de Monte Carlo, o estado limite pode ser definido pela função $g(X) = 0$, a qual separa o domínio de segurança ($g(X) > 0$) do domínio de falha ($g(X) < 0$) (SAGRILO, 1994).

A determinação do índice de confiabilidade através do método *FORM* consiste na avaliação da distância mínima *D*, a qual é tomada como índice de confiabilidade (β), do hiperplano das variáveis

padronizadas em relação à origem (SAGRILO, 1994; LOW e TANG, 1997). A Figura 2.17 apresenta graficamente essa relação, considerando uma função de duas variáveis.

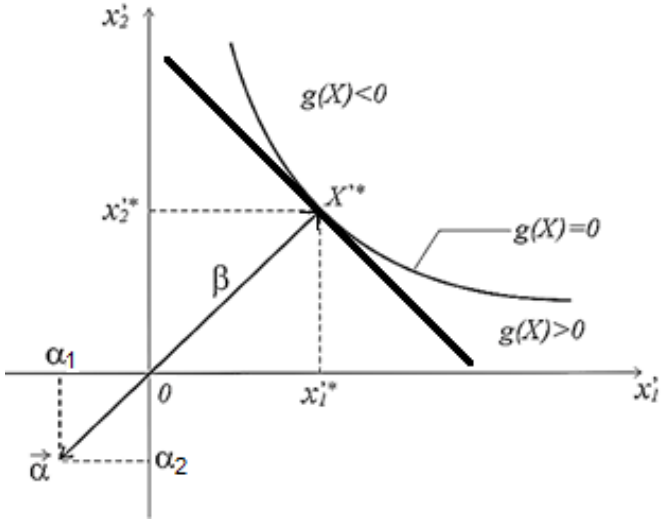

Figura 2.17 - Representação gráfica do FORM (Fonte: Adaptado de Sagrilo, 1994).

A determinação da distância mínima e consequentemente de β baseia-se no método de *Hasofer-Lind* e utiliza o método dos multiplicadores de Lagrange (HALDAR e MAHADEVAN, 2000). Outras informações sobre os algoritmos utilizados no processo de minimização podem ser obtidas em Low e Tang (1997), Haldar e Mahadevan (2000), Ang e Tang (2007), Low e Tang (2007), Magalhães (2014) e outros.

Magalhães (2018) salienta ainda que o *FORM* possibilita também a avaliação dos parâmetros aos quais o resultado é mais sensível através dos cossenos diretores (α), sendo essa uma ferramenta importante na atribuição da relevância de cada uma das variáveis envolvidas, permitindo um melhor entendimento do processo e de quais fatores requerem maior atenção na busca pela confiabilidade estrutural requerida.

2.5.3. Critério para iniciação da corrosão

O critério de falha é uma das incertezas presentes na avaliação da segurança estrutural de modo geral. Trata-se de uma incerteza de decisão e é fundamental na definição precisa do alcance do estado limite considerado (MAGALHÃES, 2014).

Ao contrário das avaliações de confiabilidade que envolvem o atingimento de um estado limite último (ELU), como análises acerca de vigas ou pilares, as análises de durabilidade demandam uma definição subjetiva do critério de falha. Na teoria, o processo de degradação se inicia quando os agentes nocivos atingem um teor crítico no interior da estrutura. Na prática, entretanto, os efeitos

desse ingresso só serão percebidos quando houver a ruptura da camada passivadora e início do processo corrosivo. O momento exato em que esse fenômeno ocorre, no entanto, assim como o nível de comprometimento tido como limite para a armadura, são aspectos que geram divergências entre pesquisadores e normas sobre o assunto (MAGALHÃES, 2018).

Para Lorensini (2006), a modelagem do processo de corrosão da armadura é algo bastante complexo, visto que depende de fatores como concentração superficial de cloretos, coeficiente de difusão do cloreto no concreto, entre outros aspectos. O autor apresenta uma divisão do processo de deterioração estrutural devido ao ingresso de cloretos, a qual é apresentada na Fig. 2.18.

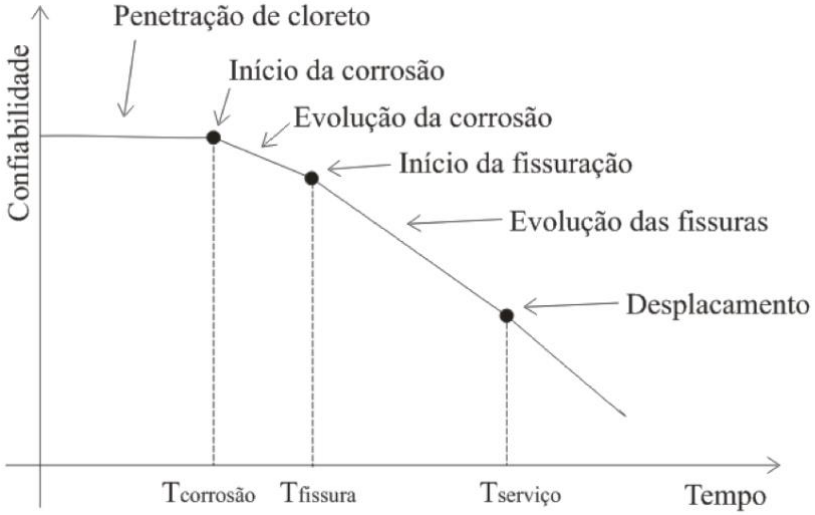

Figura 2.18 – Perfil de confiabilidade estrutural devido à penetração de cloretos (Fonte: Lorensini, 2006).

Lorensini (2006) afirma ainda que a definição da vida útil da estrutura é, portanto, dependente do estado limite considerado, isto é, se de serviço ou último. No caso do estado limite de serviço quanto à durabilidade, pode ser tomado como fator de controle o surgimento de fissuras causadas pela corrosão. Já para o estado limite último, o elemento de controle é a perda de resistência do elemento estrutural devido à redução da seção da armadura. No entanto, considerando que quando a fissuração passa a ser visível o processo de corrosão das armaduras já foi desencadeado e dificilmente será cessado ou revertido, adota-se no presente trabalho a despassivação da armadura como atingimento do ELS. Assim, será tomada como função estado limite para o ingresso de cloretos no concreto a Eq. (2.20).

$$g(x,t) = C_{CR} - C(x,t) \tag{2.20}$$

onde C_{CR} é a concentração crítica de cloretos no interior do concreto considerada para o início da

corrosão e $C(x,t)$ é a concentração de cloretos a uma profundidade x da superfície do concreto após um período de tempo t.

2.5.4. Vida útil característica

Ao avaliar probabilisticamente a vida útil de estruturas em concreto armado, é necessário também analisar o tempo de vida total de um elemento estrutural sob a ótica da probabilidade. Tal necessidade ocorre em razão da possível variação no tempo necessário para que o estado limite definido seja atingido devido à aleatoriedade dos parâmetros intervenientes no processo (MAGALHÃES, 2018).

A consideração de vida útil característica (t_k) é análoga à já familiar resistência característica do concreto à compressão (f_{ck}). Essa resistência característica é dada por um valor que possui uma probabilidade pré-definida de não ser atendido. Assim, a vida útil de uma estrutura pode ser definida como a idade a partir da qual ocorre um percentual de falha superior ao admitido, como mostra a Fig. 2.19 (KHATRI e SIRIVIVATNANON, 2004; MAGALHÃES, 2018).

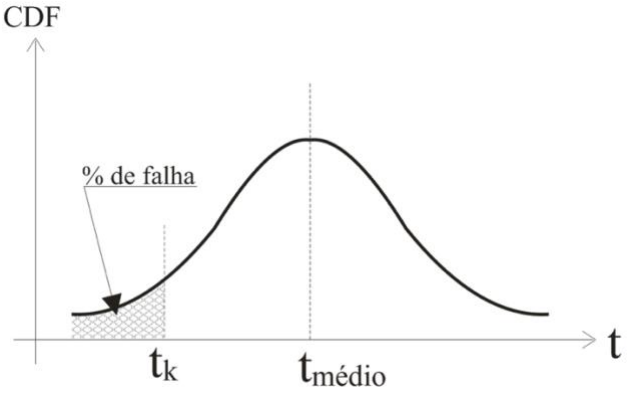

Figura 2.19 - Função densidade de probabilidade da vida útil e vida útil característica no ELS de uma estrutura de concreto armado sujeita à penetração de cloretos (Fonte: Magalhães, 2018).

Na Figura 2.19 é apresentada graficamente uma função densidade de probabilidade (CDF) hipotética do tempo para que o estado limite seja atingido, isto é, as idades obtidas probabilisticamente nas quais a função estado limite é igual a zero. O valor $t_{médio}$ representa a média desses resultados e t_k representa a idade a partir da qual um valor superior ao admitido de falha ocorre (MAGALHÃES, 2018).

Magalhães (2018) destaca ainda que se pode definir como vida útil característica a idade a partir da qual apenas um percentual previamente estabelecido de falha é admitido, como verifica-se esquematicamente na Fig. 2.20, na qual é apresentado um perfil de concentração de cloretos na profundidade da camada de cobrimento em relação ao tempo. Os valores de tempo referem-se à idade

na qual ocorre um percentual F % de falha. Desta forma, o gráfico apresenta as idades nas quais a probabilidade de falha preestabelecida foi atingida. Assim, t_k, que se refere ao tempo no qual F % dos resultados da função estado limite é negativo, define um valor característico de tempo a partir do qual um percentual de falha superior ao limite ocorre.

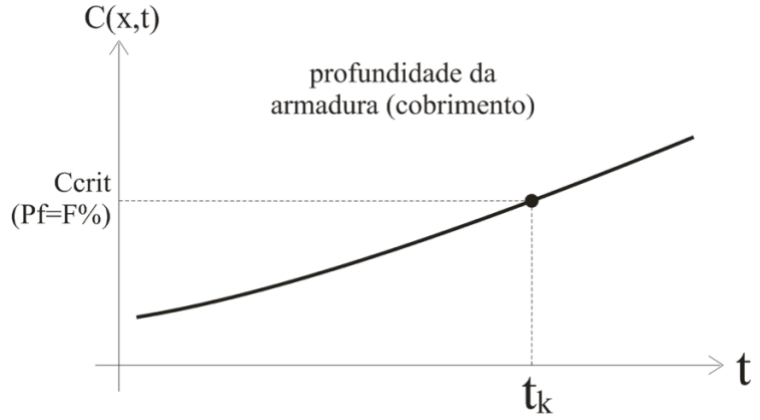

Figura 2.20 - Concentração de cloretos na profundidade da armadura em função da idade a partir da qual uma probabilidade pré-estabelecida de falha é admitida (Fonte: Magalhães, 2018).

2.5.5. Aplicações da análise de confiabilidade nas avaliações de durabilidade

Devido à quantidade de variáveis envolvidas no processo de deterioração das estruturas e às variabilidades que essas podem apresentar, conforme discutido na seção anterior, diversos autores têm focado seus estudos na aplicação da teoria da confiabilidade à investigação da durabilidade e vida útil das estruturas de concreto armado.

Maage *et al*. (1996) propuseram um modelo teórico para a previsão de vida útil de estruturas baseado na segunda lei de Fick combinado a resultados empíricos provenientes de ensaios laboratoriais e estruturas existentes. À época, os autores salientaram a necessidade de mais dados a fim de refinar o modelo e apresentar resultados mais precisos.

Engelund e Sørensen (1998) apresentaram um modelo probabilístico de ingresso de cloretos em estruturas de concreto e avaliaram a utilização de dados obtidos em estruturas existentes. A partir disso, foi estimado o tempo necessário para que o processo de corrosão tivesse início. Por fim, os autores calcularam ainda a probabilidade de necessidade de reparos em diversas idades e o tempo remanescente até que seja necessária uma intervenção para fins de correção preventiva. A avaliação foi feita com base nos métodos *FORM* e *Second Order Reliability Method* (*SORM*).

Kong *et al*. (2002) avaliaram a confiabilidade de concretos em condição saturada frente ao ataque por cloretos. Foram tomadas como aleatórias as variáveis relação ag/agl, admitindo-se distribuições de probabilidades Uniforme e Triangular, e tempo de cura, cuja distribuição de

probabilidades admitida foi a Normal. Foi utilizado o método de Monte Carlo.

Lorensini (2006), também utilizando o método de Monte Carlo, apresentou uma modelagem da deterioração de elementos estruturais em concreto armado sujeitos à penetração de íons cloreto. Uma análise paramétrica foi realizada a partir das distribuições de probabilidades da difusividade do concreto, da temperatura ambiente e da relação ag/agl do concreto. Com esses dados, foi realizada uma estimativa do tempo necessário para o início da corrosão, para o início da abertura de fissuras e para o fim de vida útil de serviço da estrutura.

Thiery *et al*. (2012) aplicaram a teoria da confiabilidade na avaliação da corrosão das armaduras devido à carbonatação. Foram utilizados os modelos de Papadakis e de Bakker na análise de penetração de CO_2 no concreto. Após realizar análises utilizando concretos de três diferentes dosagens, os autores afirmaram que a falta de dados e informações a respeito das variabilidades assumidas pelas variáveis envolvidas no processo de carbonatação gerou um resultado semelhante ao obtido de forma determinística, sendo, portanto, para esse caso, insignificante a análise probabilística.

Liberati *et al*. (2014) analisaram a influência da corrosão das armaduras na resistência à flexão de vigas em concreto armado por meio da teoria da confiabilidade estrutural. Com base na norma de dimensionamento de estruturas em concreto armado vigente e nas leis de Fick e Faraday, os autores dimensionaram vigas em concreto armado e avaliaram probabilisticamente a penetração de cloretos na estrutura e a perda de seção transversal sofrida pela armadura. O método de Monte Carlo foi utilizado para calcular a probabilidade de falha. Os resultados apontaram a influência direta da relação ag/agl e da agressividade do ambiente ao qual o elemento estrutural está exposto na previsão da vida útil do mesmo.

Pradelle *et al*. (2017) propuseram uma metodologia probabilística para previsão de vida útil dos concretos e compararam os resultados obtidos com os valores atingidos na abordagem com base em desempenho através do uso de indicadores de durabilidade. A estimativa calculada pelo modelo numérico foi menor que a avaliada experimentalmente em concretos expostos ao ambiente marinho em zona de maré. Tal fato pode estar relacionado aos altos coeficientes de variação admitidos na simulação numérica para o cobrimento da armadura e para a concentração crítica de cloretos. A divergência encontrada nesse estudo requer atenção especial, uma vez que, apesar de ser a favor da segurança, a determinação de uma vida útil baixa através de metodologia numérica pode levar a grandes dispêndios financeiros.

Angst (2018) apresenta uma previsão do tempo necessário para o início do processo de corrosão devido à penetração de cloretos utilizando dados de amostras de laboratório e de estruturas

existentes. O autor afirma que, embora muitas vezes se considere a necessidade de modelos que descrevam de melhor forma a penetração dos íons no concreto, o gargalo para previsões mais confiáveis acerca da vida útil das estruturas é, dentre outros, a falta de dados laboratoriais que reflitam com maior precisão a situação de estruturas expostas aos ambientes agressivos.

Nota-se, com base nos estudos apresentados, que a necessidade de dados obtidos em laboratório que se assemelhem aos de estruturas sujeitas à penetração de íons nocivos e as variabilidades que podem ser assumidas pelos parâmetros intervenientes no processo de penetração desses agentes são os principais desafios impostos às previsões de vida útil de estruturas de concreto armado expostas a ambientes de severa agressividade.

3. METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentado o procedimento metodológico realizado no presente trabalho, a fim de deixar o leitor a par dos métodos empregados e, assim, facilitar a posterior compreensão dos resultados obtidos e das discussões sobre estes.

A primeira etapa deste capítulo relata o programa experimental realizado. São apresentados a caracterização dos materiais, a dosagem e execução dos concretos, o período de cura e os ensaios laboratoriais realizados. Foram realizados ensaios de resistência à compressão axial, absorção de água por capilaridade, resistência à penetração de cloretos e determinação do coeficiente de difusão em estado não-estacionário. O coeficiente de difusão determinado experimentalmente foi posteriormente tomado como parâmetro de entrada na análise de confiabilidade.

A segunda etapa, por sua vez, apresenta a análise probabilística proposta. Utilizando dados de diversos autores e com base na difusividade medida experimentalmente, é avaliado o nível de segurança de estruturas que utilizem os concretos desenvolvidos no programa experimental desta dissertação quanto à corrosão das armaduras.

A Figura 3.1 apresenta esquematicamente a metodologia empregada neste trabalho.

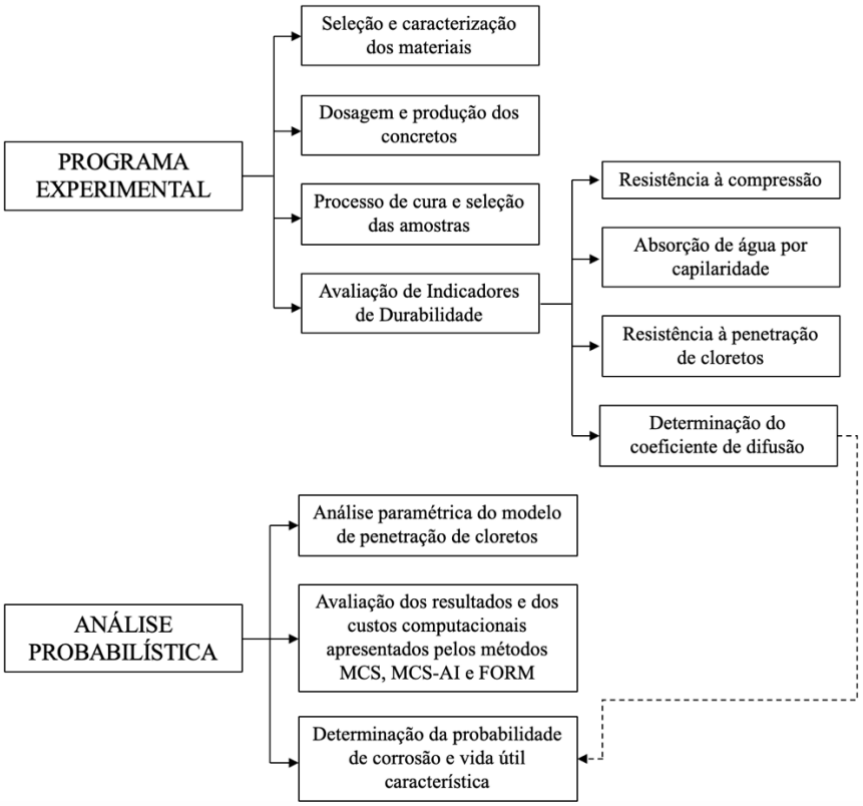

Figura 3.1 - Procedimento metodológico realizado (Fonte: Autor).

3.1. Programa experimental

A seguir são apresentadas as etapas realizadas experimentalmente, compreendendo desde a caracterização dos materiais utilizados até a realização dos ensaios propostos.

3.1.1. Materiais utilizados

Cimento Portland

Foi utilizado cimento CP II Z-40 comercialmente disponível na cidade de Rio Grande/RS. Esse está enquadrado dentro dos limites prescritos pela NBR 16697 (ABNT, 2018). Sabe-se que esse cimento pode conter entre 6 e 14 % de adição pozolânica em sua mistura original, fato que limita parcialmente os resultados obtidos neste trabalho uma vez que a sílica ativa e o metacaulim não serão os únicos compostos presentes na mistura além do clínquer Portland. No entanto, optou-se por esse cimento pois é o mais facilmente encontrado no mercado local para obras estruturais.

A Tabela 3.1 apresenta as características do cimento Portland utilizado neste trabalho.

Tabela 3.1. Características do cimento Portland utilizado.
Fonte: Relatório do Fabricante (2019).

Propriedade avaliada		**Resultado**	**Limite NBR 16697:2018**
Massa específica (g/cm^3)		3,00	-
Finura	Retido na # 200 (%)	0,00	≤ 10,00
	Retido na # 325 (%)	0,60	-
	Área esp. Blaine (cm^2/g)	4893,00	≥ 2800,00
Resistência à compressão (MPa)	1 dia	22,40	-
	3 dias	34,30	≥ 15,00
	7 dias	39,40	≥ 25,00
	28 dias	46,90	≥ 40,00
Teores químicos (%)	MgO	6,10	-
	SO_3	3,10	≤ 4,00
	Perda ao fogo	4,90	≤ 8,50

Agregado miúdo

Foram utilizadas como agregado miúdo areias com duas granulometrias distintas, visando a produção de concretos com melhor empacotamento dos grãos e, assim, mais coesos. Ambas são provenientes da cidade de Pelotas/RS e são utilizadas nas construções locais. A Tabela 3.2 apresenta as características físicas das areias utilizadas. Os dados apresentados na Tab. 3.2 foram obtidos através dos ensaios prescritos na NM 248 (ABNT, 2003), NM 45 (ABNT, 2006) e NM 52 (ABNT, 2009). As curvas granulométricas das areias fina e média são apresentadas, respectivamente, na Fig. 3.2 e na Fig. 3.3.

Tabela 3.2. Características físicas do agregado miúdo.
Fonte: Autor.

Peneiras (mm)	**Areia fina**		**Areia média**	
	% Retido	**% Retido Acumulado**	**% Retido**	**% Retido Acumulado**
4,8	0,1	0,1	0,1	0,1
2,4	0,5	0,6	4,7	4,8
1,2	2,0	2,6	9,5	14,3
0,6	12,6	15,2	21,3	35,6
0,3	40,7	55,9	52,5	88,1
0,15	33,3	89,2	10,7	98,8
< 0,15	10,8	100	1,2	100
Total	100	-	100	-
Módulo de Finura	1,64		2,42	
Dimensão máx (mm)	2,40		4,75	
Massa específica (g/cm^3)	2,67		2,65	
Massa unitária (g/cm^3)	1,39		1,53	

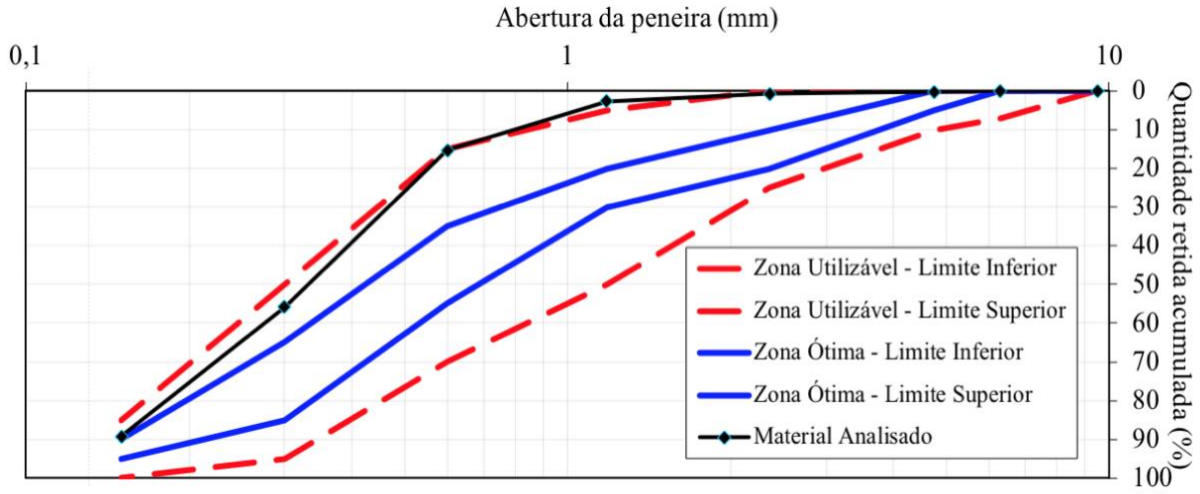

Figura 3.2 - Curva granulométrica da areia fina (Fonte: Autor).

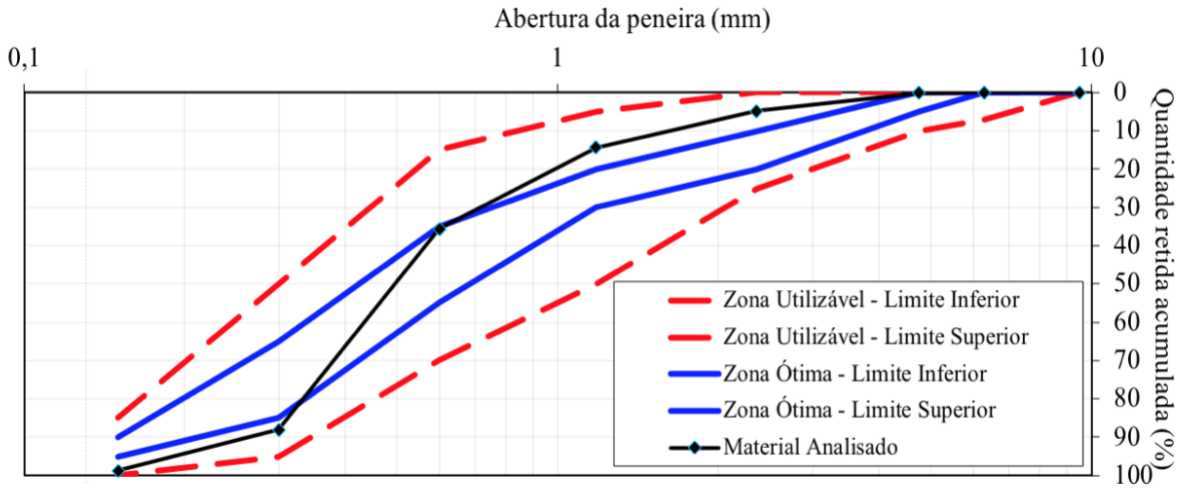

Figura 3.3 - Curva granulométrica da areia média (Fonte: Autor).

Agregado graúdo

O agregado graúdo adotado foi a brita 1, também disponível e utilizada na cidade de Rio Grande/RS e região. Suas características físicas são apresentadas na Tab. 3.3. Sua curva granulométrica pode ser visualizada na Fig. 3.4.

Tabela 3.3. Características físicas do agregado graúdo.
Fonte: Autor.

Peneiras (mm)	Brita 1	
	% Retido	% Retido Acumulado
19,0	0,0	0,0
12,5	24,3	24,3
9,5	50,8	75,1
6,3	24,2	99,3
4,8	0,0	99,3
< 4,8	0,0	99,3
Total	99,3	-
Módulo de Finura	6,71	
Dimensão máx (mm)	12,5	
Massa específica (g/cm^3)	1,46	
Massa unitária (g/cm^3)	2,65	

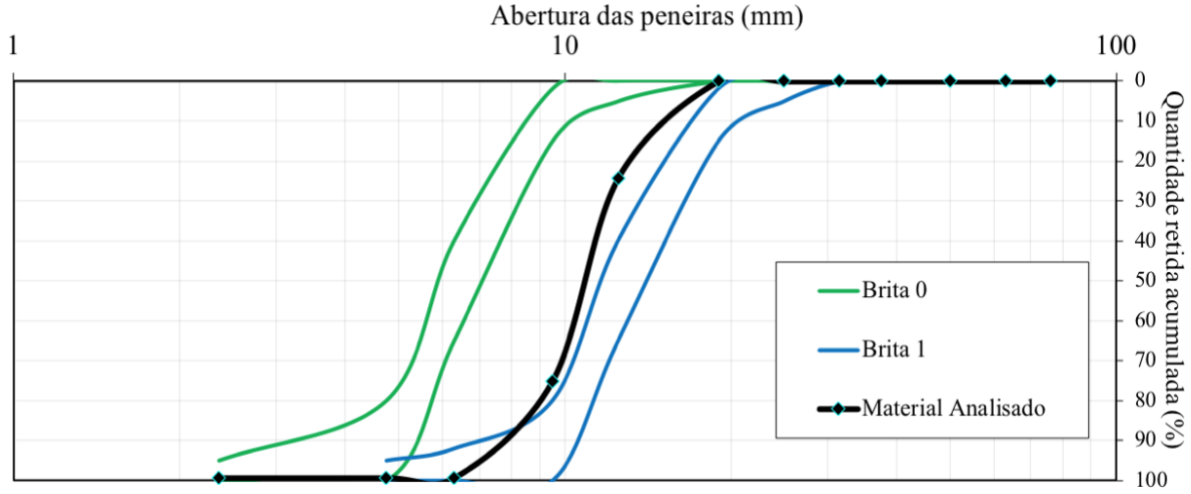

Figura 3.4 - Curva granulométrica do agregado graúdo (Fonte: Autor).

Adições minerais

As adições minerais utilizadas neste trabalho em substituição parcial ao cimento Portland foram a sílica ativa e o metacaulim. Esses materiais foram submetidos a ensaios de fluorescência de

raios-X por dispersão de energia (*EDX*) e granulometria a laser para avaliação de suas características químicas e físicas, respectivamente. Ambas as análises foram realizadas no laboratório do grupo de pesquisas NOVONANO da Universidade Federal de Pelotas (UFPel). Os resultados são apresentados na Tab. 3.4.

Tabela 3.4. Características físicas e químicas das adições minerais utilizadas.
Fonte: Autor.

Propriedade avaliada		**Sílica ativa**	**Metacaulim**
Massa específica (g/cm^3)		2,22	2,53
Superfície específica (m^2/g)		18,30	22,15
Teores químicos (%)	SiO_2	88,32	41,15
	K_2O	6,14	2,33
	CaO	4,35	0,082
	Fe_2O_3	0,68	16,61
	MnO	0,39	0,37
	Cu_2O	0,053	-
	Rb_2O	0,04	-
	SrO	0,032	0,021
	Al_2O_3	-	35,57
	TiO_2	-	2,84
	ZrO_2	-	0,59
	Nb_2O_5	-	0,19
	V_2O_3	-	0,14
	ZnO	-	0,067
	Ga_2O_3	-	0,042

Com base na Tab. 3.4, verifica-se que a sílica ativa empregada possui teor de SiO_2 superior ao mínimo recomendado pela NBR 13956 (ABNT, 2012), podendo, portanto, ser utilizada como adição ao concreto de cimento Portland. Também se nota que o metacaulim utilizado pode ser considerado pozolânico visto que a soma dos teores de SiO_2, Al_2O_3 e Fe_2O_3 resulta em 93,33 %, valor superior ao limite mínimo de 70 % indicado pela NBR 12653 (ABNT, 2015).

Ainda, a partir dos dados apresentados na Tab. 3.4, destaca-se que mesmo que a sílica ativa e o metacaulim confiram melhorias às propriedades do concreto, essas serão geradas por mecanismos diferentes, principalmente quando avaliada a penetração de cloretos. A sílica ativa, de elevada finura e alto teor de SiO_2, tende a reagir com o hidróxido de cálcio gerado durante a hidratação do cimento, resultando em acréscimos de resistências devido à formação de C-S-H. Além disso, a sílica ativa pode modificar a microestrutura do concreto devido ao seu efeito *filler* e pela densificação da zona de transição entre a pasta e o agregado, como destacado por vários autores (SIDDIQUE e KLAUS, 2009; FIGUEIREDO *et al*., 2015; RIBEIRO, 2018) e discuto na seção 2.4 deste trabalho.

Já o metacaulim, além de propiciar as reações pozolânicas e o efeito *filler*, reduz a penetração de cloreto no concreto devido à maior presença de Al_2O_3 (35,57 %). Tal fato se dá em consequência da interação entre cloretos e aluminatos, que leva à formação de sal de Friedel (cloro-aluminato). Dessa forma é reduzida a quantidade de íons livres disponíveis para causar a despassivação das armaduras e para atuar no processo corrosivo.

Aditivo

Para garantir a trabalhabilidade dos concretos produzidos e manter fixa a relação ag/agl, foi utilizado aditivo polifuncional quando necessário. De acordo com o fabricante, o produto utilizado neste trabalho possui massa específica que pode variar entre 1,14 e 1,20 g/cm^3 e é isento de cloretos.

Água

Para o amassamento dos concretos foi utilizada água potável fornecida pela distribuidora responsável pelo abastecimento da cidade de Rio Grande/RS.

3.1.2. Concretos avaliados

Todas as misturas foram dosadas com base no método do IPT/USP, proposto por Helene e Terzian (1993). A relação aglomerante:agregado foi fixada em 1:4 e definiu-se a relação ag/agl em 0,45 para todos os traços. Também se adotou o valor de 100 $\pm$ 10 mm para o abatimento dos concretos. Assim, quando necessário, lançou-se mão do aditivo polifuncional para aumentar a trabalhabilidade do material.

A Tabela 3.5 apresenta as misturas produzidas e a quantidade necessária de cada material à produção de 1 m^3 de concreto. O termo “R 45” diz respeito à mistura referência e sua relação ag/agl. Os demais traços são identificados pela sigla referente à pozolana utilizada (“SF” para sílica ativa e “MK” para metacaulim), seguida pelo número que indica o percentual de substituição empregado em

relação à massa de cimento (5, 10 ou 20 %).

Salienta-se que neste trabalho não é contemplada a avaliação da viabilidade técnica e econômica da produção de concretos com teores elevados de sílica ativa e metacaulim (20 %, por exemplo) em grandes centrais de concreto. A análise desses percentuais restringe-se somente à avaliação de sua influência em aspectos físicos, químicos e mecânicos do concreto executado em ambiente de laboratório.

Tabela 3.5. Concretos estudados e consumo de material (em kg/m^3 de concreto).
Fonte: Autor.

Nome	Relação ag/agl	Cimento	SF	MK	Areia fina	Areia média	Brita 1
SF 20	0,45	320,00	80,00	0,00	128,00	512,00	960,00
SF 10	0,45	360,00	40,00	0,00	128,00	512,00	960,00
SF 5	0,45	380,00	20,00	0,00	128,00	512,00	960,00
MK 20	0,45	320,00	0,00	80,00	128,00	512,00	960,00
MK 10	0,45	360,00	0,00	40,00	128,00	512,00	960,00
MK 5	0,45	380,00	0,00	20,00	128,00	512,00	960,00
R 45	0,45	400,00	0,00	0,00	128,00	512,00	960,00

Preparação, pré-condicionamento e seleção das amostras

Todas as misturas foram executadas em betoneira intermitente de eixo inclinado. Foram moldados 16 corpos de prova cilíndricos, de dimensões ϕ 100 mm x 200 mm, conforme a NBR 5738 (ABNT, 2016), sendo essa quantidade suficiente para a realização dos ensaios propostos e sua repetitividade. A Figura 3.5 apresenta uma das misturas logo após sua execução e moldagem dos corpos de prova.

Os corpos de prova foram mantidos em cura submersa em solução saturada de hidróxido de cálcio a 23 $\pm$ 2 ºC, de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2016), até a idade de 120 dias, na qual deu-se início à realização dos ensaios.

Figura 3.5 - Corpos de prova moldados após execução dos traços (Fonte: Autor).

As amostras destinadas aos ensaios de resistência à penetração de cloretos e determinação do coeficiente de difusão aparente em estado não-estacionário foram cortadas em fatias com espessura de 50 mm, conforme indicado pelas normas que regem ambos os métodos. No corte, foram rejeitados os primeiros 25 mm de cada extremidade dos corpos de prova, sendo os 150 mm restantes divididos em três peças de 50 mm cada. Foram cortados 5 corpos de prova por traço, totalizando 15 amostras destinadas aos ensaios de migração iônica. O corte dos corpos de prova é apresentado esquematicamente na Fig. 3.6.

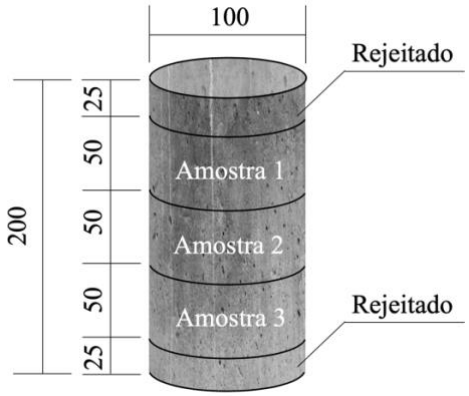

Figura 3.6 - Esquema de corte dos corpos de prova (dimensões em mm) (Fonte: Autor).

Foi ainda determinado o teor de argamassa das amostras obtidas. Para isso foi utilizada uma adaptação da ASTM E 562 (ASTM, 2011), como proposto por Ribeiro *et al*. (2012). Através dessa

metodologia é possível estimar a quantidade relativa de uma determinada fase (agregado graúdo, por exemplo) sobrepondo 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 3.7 apresenta esquematicamente essa metodologia.

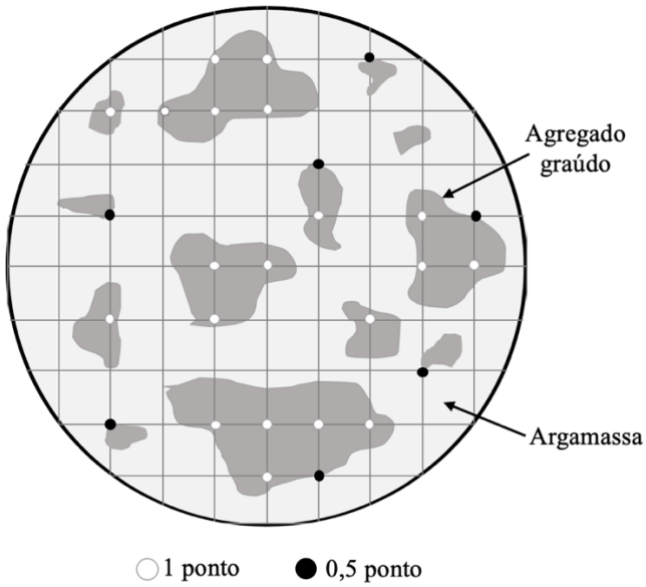

Figura 3.7 - Esquema do processo de seleção das amostras para realização dos ensaios de migração iônica (Fonte: Autor).

No exemplo apresentado na Fig. 3.7, 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 15 amostras obtidas, foram selecionadas as oito com composições mais semelhantes, sendo quatro destinadas ao ensaio de resistência à penetração de cloretos e outras quatro destinadas ao ensaio de determinação do coeficiente de difusão aparente em estado não-estacionário.

3.1.3. Avaliação dos Indicadores de Durabilidade

Serão, a seguir, apresentados os ensaios realizados neste programa experimental. Como já discutido anteriormente, este trabalho não abordará todos os métodos enquadrados como Indicadores de Durabilidade presentes na literatura, uma vez que cada país que adota esse tipo de abordagem tem seu conjunto particular de ensaios normatizados para esse fim.

A resistência à compressão axial, a absorção de água por capilaridade, a resistência à penetração de cloretos e o coeficiente de difusão aparente em estado não-estacionário serão avaliados a fim de verificar a qualidade dos concretos, a influência do tipo e do teor das adições minerais utilizadas e a durabilidade potencial de cada mistura. O coeficiente de difusão será também utilizado como parâmetro de entrada na análise de confiabilidade a ser realizada posteriormente.

Resistência à compressão axial

A resistência à compressão axial dos concretos foi determinada conforme prescrito pela NBR 5739 (ABNT, 2018). Neste ensaio foram utilizados três corpos de prova de cada um dos traços avaliados.

A Figura 3.8 apresenta a realização do ensaio de resistência à compressão axial.

Figura 3.8 - Realização do ensaio de resistência à compressão axial (Fonte: Autor).

Absorção de água por capilaridade

A análise da absorção de água por capilaridade foi realizada segundo a NBR 9779 (ABNT, 2012). Os corpos de prova foram inicialmente levados à estufa, à temperatura de 105 ± 5 ºC, onde foram mantidos por 24 h e, em seguida, passaram por resfriamento em temperatura ambiente. Após resfriados, os corpos de prova foram colocados sobre suportes dentro de um recipiente no qual o nível d'água foi mantido constante em 5 ± 1 mm. A realização deste ensaio é mostrada na Fig. 3.9.

No decorrer do ensaio verificou-se periodicamente a massa dos corpos de prova durante 72 h. A absorção de água por capilaridade foi, por fim, definida pela razão entre o aumento da massa do corpo de prova devido à ascensão da água e sua seção transversal.

Figura 3.9 - Realização do ensaio de absorção de água por capilaridade (Fonte: Autor).

Resistência à penetração de cloretos

Para avaliação da resistência dos concretos à penetração de cloretos foi utilizado o ensaio descrito na ASTM C 1202 (ASTM, 2012). Esse método consiste no monitoramento da corrente elétrica passante através do corpo de prova de concreto, o qual deve ter dimensões de 100 mm de diâmetro e 50 mm de espessura.

Os concretos destinados à realização deste ensaio foram cortados, como já apresentado anteriormente, e tiveram suas laterais impermeabilizadas a fim de garantir o fluxo iônico unidirecional. Após a impermeabilização e a saturação das amostras, a qual foi realizada por meio de submersão em água saturada com cal por um período de 24 h, deu-se início ao ensaio.

Os corpos de prova foram confinados entre dois compartimentos, sendo um deles preenchido com solução de NaCl a 3 % e o outro com NaOH a 0,3 mol. O polo negativo da fonte de corrente foi ligado na face que continha a solução de NaCl, sendo, por consequência, o polo positivo ligado à extremidade com NaOH.

Uma das grandes críticas impostas a este método refere-se ao fato de que a tensão recomendada (60 V) é extremamente elevada, acarretando superaquecimento do sistema e consequentes prejuízos à confiabilidade dos dados obtidos (ANDRADE, 1993). Na fase de elaboração desta proposta metodológica foi testada a imposição de uma tensão de 60 V e também se verificou o superaquecimento das soluções, gerando complicações à execução do ensaio, como vazamentos das soluções, por exemplo. Assim, optou-se pela aplicação de uma tensão de menor intensidade (30 V) e posteriormente fez-se a correção dos valores de corrente medidos no circuito elétrico através da Lei de Ohm.

A Figura 3.10 e a Fig. 3.11 apresentam, respectivamente, o esquema de realização do ensaio e o aparato utilizado para a execução deste.

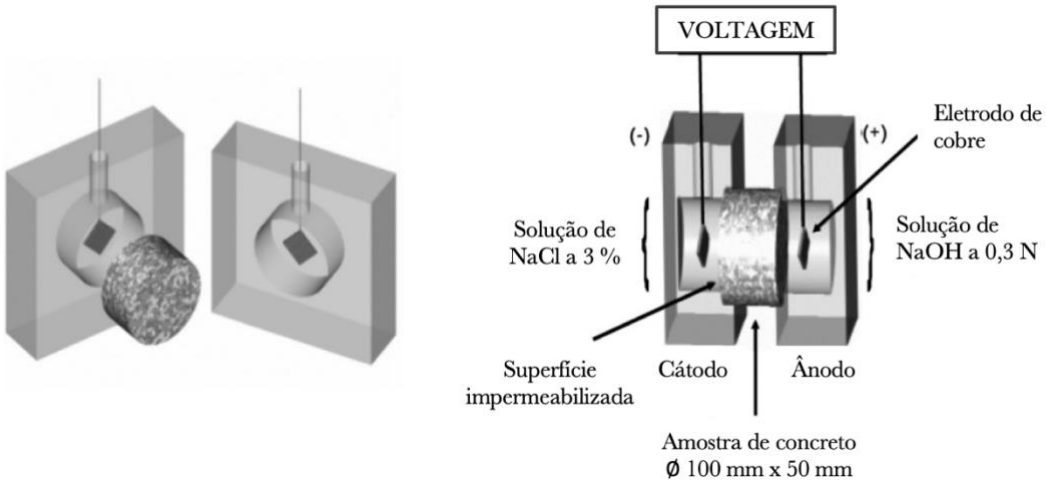

Figura 3.10 - Esquema da realização do ensaio de resistência à penetração de cloretos (Fonte: Adaptado de Medeiros *et al*., 2013).

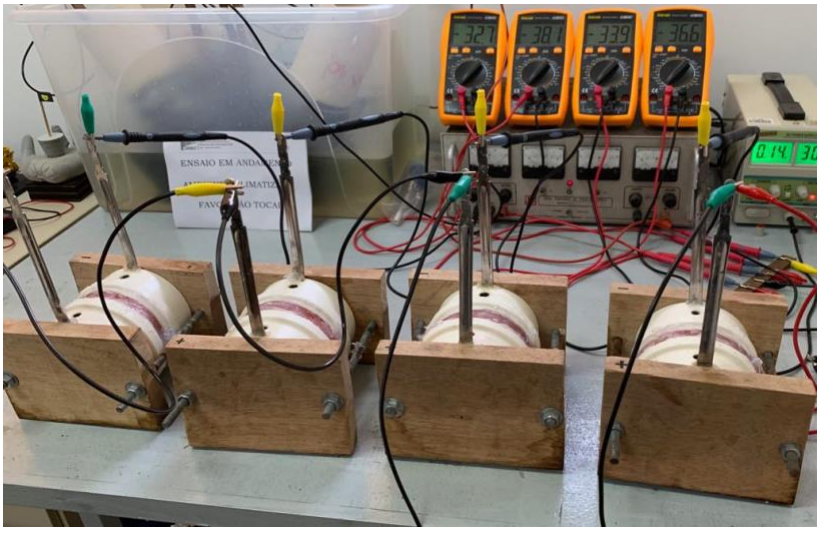

Figura 3.11 - Equipamento utilizado para realização do ensaio prescrito pela ASTM C 1202 (ASTM, 2012) (Fonte: Autor).

Durante as 6 h de duração do ensaio são realizadas leituras da corrente passante a cada 30 minutos. Após esse período a carga passante é calculada de acordo com a Eq. (3.1).

$$Q = 900\ (I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \ \ldots \ + 2I_{330} + \ I_{360}) \tag{3.1}$$

onde Q é a carga passante [C], I_0 é a corrente medida imediatamente após a aplicação da tensão [A]

e I_t é a corrente medida *t* minutos após o início do ensaio [A].

A partir da determinação da carga passante, é também determinada a penetrabilidade de cloretos no concreto avaliado conforme apresentado na Tab. 3.6.

Tabela 3.6. Penetrabilidade de cloretos de acordo com a carga passante.
Fonte: ASTM C 1202 (ASTM, 2012).

Carga Passante [C]	Penetrabilidade de Cloretos
> 4000	Alta
2000 – 4000	Moderada
1000 – 2000	Baixa
100 – 1000	Muito baixa
< 100	Desprezível

Determinação do coeficiente de difusão

O coeficiente de difusão em estado não estacionário dos concretos foi determinado de acordo com o procedimento normatizado pela NT Build 492 (NORDTEST, 1999). Este é um ensaio de migração, uma vez que o deslocamento dos íons ocorre devido à imposição de uma diferença de potencial elétrico, que determina o coeficiente de difusão aparente do concreto através de uma equação empírica, considerando a tensão imposta, o tempo de duração do ensaio e a profundidade de penetração de cloretos.

Foram utilizadas fatias de concreto de 100 mm de diâmetro e 50 mm de altura, as quais foram impermeabilizadas e saturadas de maneira idêntica à adotada para as amostras submetidas ao ensaio de resistência à penetração de cloretos.

A configuração do ensaio é apresentada na Fig. 3.12.

Inicialmente as amostras foram submetidas a uma tensão de 30 V. Com base na corrente inicial, a tensão imposta ao sistema foi ajustada e o tempo de duração do ensaio foi determinado de acordo com os valores apresentados na Tab. 3.7. Destaca-se que todos os concretos avaliados neste trabalho demandaram ensaios com duração de 24 ou 48 h. Foram também medidas as temperaturas da solução anódica no início e ao fim do ensaio.

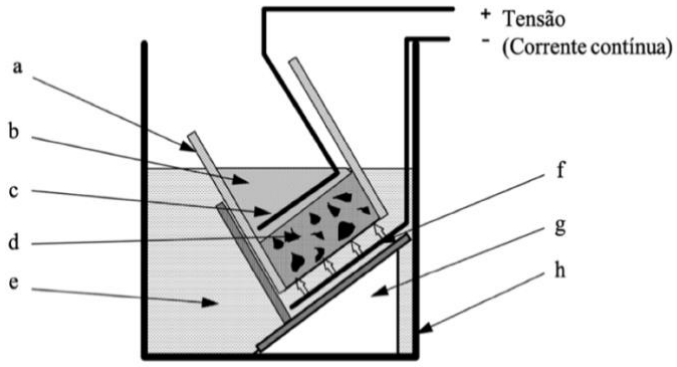

Figura 3.12 - Esquema da realização do ensaio prescrito pela NT Build 492 (Fonte: Adaptado de NT Build 492 (NORDTEST, 1999). Traduzido pelo autor).

sendo: a) proteção de borracha; b) solução contendo NaOH; c) ânodo; d) amostra de concreto; e) solução contendo NaCl; f) cátodo; g) suporte plástico e h) caixa plástica. O compartimento indicado por "e" contém solução de NaCl a 10 % e a área denominada "b" contém solução de NaOH a 0,3 M.

Tabela 3.7. Tensão imposta e tempo de duração do ensaio prescrito pela NT Build 492.
Fonte: NT Build 492 (NORDTEST, 1999. Traduzido pelo autor).

Corrente inicial I_{30V} (com 30 V) (mA)	**Tensão aplicada após ajuste (V)**	**Possível nova corrente inicial (mA)**	**Duração do ensaio (h)**
$I_0 < 5$	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

A Figura 3.13 apresentada o aparato utilizado para este ensaio.

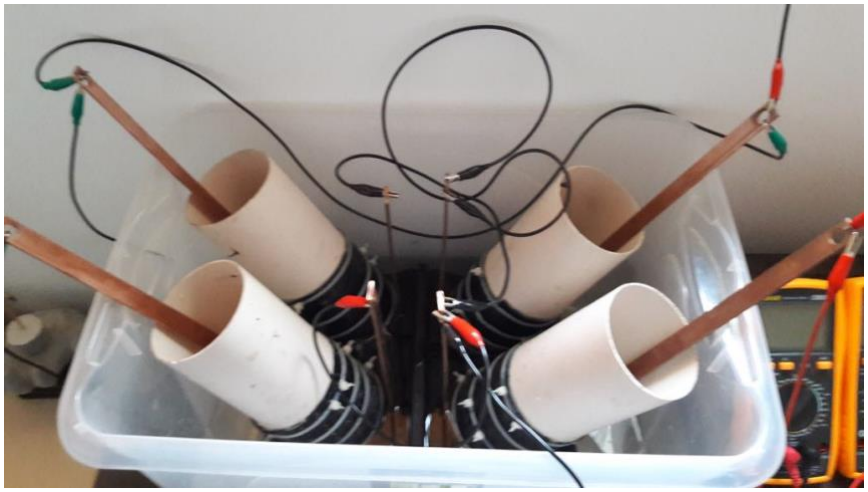

Figura 3.13 - Equipamento utilizado para determinação do coeficiente de difusão (Fonte: Autor).

Ao final do teste as amostras de concreto foram rompidas diametralmente e nelas foi pulverizada solução de $AgNO_3$ a 0,1 M. Dessa forma é possível verificar até qual profundidade houve penetração de cloretos, uma vez que as áreas impregnadas passam a apresentar coloração mais clara, como apresenta a Fig. 3.14.

Figura 3.14 - Aparência da amostra de concreto após aspersão da solução de nitrato de prata (Fonte: Autor).

A medição da profundidade de penetração foi realizada em sete pontos diferentes para cada amostra, utilizando paquímetro quando possível e, em casos particulares, auxílio computacional. A Figura 3.15 apresenta a recomendação sobre a medição da profundidade média de penetração de cloretos em cada amostra de concreto presente na norma que rege este ensaio.

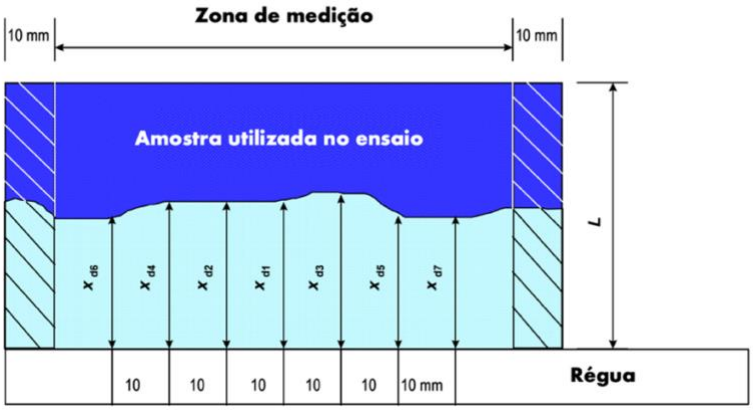

Figura 3.15 - Medição da profundidade de penetração de cloretos média em cada amostra submetida ao ensaio (Fonte: Adaptado de NT Build 492 (NORDTEST, 1999). Traduzido pelo autor).

Por fim, o coeficiente de difusão em estado não estacionário (D_{nssm}) é determinado pela Eq. (3.2) (NORDTEST, 1999).

$$D_{nssm} = \frac{0{,}0239\,(273+T)L}{(U-2)t}\,(x_D - 0{,}0238\sqrt{\frac{(273+T)\,L\,x_D}{U-2}}) \tag{3.2}$$

onde D_{nssm} é o coeficiente de difusão aparente ($\times 10^{-12}$) [m^2/s], T é o valor médio entre as temperaturas inicial e final [ºC], L é a espessura da amostra [mm], U é o valor absoluto da voltagem aplicada [V], x_D é a média das profundidades de penetração [mm] e t é o tempo de duração do ensaio [s].

A NT Build 492 (NORDTEST, 1999) não apresenta uma classificação da difusividade do concreto em função do valor de D_{nssm}. Essa classificação, no entanto, foi proposta por Nilsson *et al.* (1998) e é apresentada na Tab. 3.8.

Tabela 3.8. Classificação dos concretos quanto à difusividade.
Fonte: Nilsson *et al*. (1998).

D_{nssm} (x 10^{-12}) [m^2/s]	Difusividade do Concreto
> 15,0	Alta
10,0 – 5,0	Moderada
5,0 – 10,0	Baixa
2,5 – 5,0	Muito baixa
< 2,5	Desprezível

Destaca-se o fato de que quando o coeficiente de difusão do concreto é determinado através de um método de ensaio tão acelerado, é necessário estar ciente de que os resultados obtidos podem ser diferentes daquilo que ocorre em condições normais em campo. O valor de D_{nssm} é, portanto, um índice simples que reflete a resistência à penetração dos íons e as propriedades gerais de durabilidade do concreto, de maneira análoga à resistência à compressão avaliada aos 28 dias, que também é um índice simples e relativo, refletindo a resistência à compressão e as propriedades mecânicas gerais do concreto.

3.2. Análise probabilística

3.2.1. Modelo de penetração de cloretos utilizado

O modelo que descreve a penetração de cloretos no concreto adotado na análise probabilística realizada neste trabalho foi apresentado por Gjørv (2015) e tem como base a solução da segunda lei da difusão de Fick. Esse modelo, no entanto, considera o coeficiente de difusão variável no tempo devido ao refinamento da microestrutura do concreto ao longo dos anos, como amplamente discutido na literatura (MANGAT e MOLLOY, 1994; MAAGE *et al*., 1996; THOMAS e BAMFORTH, 1999; STANISH e THOMAS, 2003; LUPING e GULIKERS, 2007; AUDENAERT *et al*., 2010; ANDRADE *et al*., 2011; SONG *et al*., 2013), além de considerar os efeitos que a temperatura ambiente exerce sobre o processo de difusão.

Destaca-se que esse modelo foi desenvolvido a partir de aprimoramentos do modelo inicialmente proposto pelo projeto europeu DuraCrete (2000). Desde então o modelo tem sido adotado por diversas organizações, principalmente nos países nórdicos, como a *Norwegian Association for Harbor Engineers* e a *World Association for Waterborne Transport Infrastructure*, e utilizado em normas que versam sobre projeto vida útil de estruturas em concreto armado expostas a ambientes de severa agressividade com base em probabilidade.

O modelo utilizado é apresentado a partir da Eq. (3.3).

$$C(x,t) = C_S \left[1 - erf\left(\frac{x_c}{2\sqrt{D(t)t}}\right)\right] \tag{3.3}$$

onde $C(x,t)$ é a concentração de cloretos na profundidade x_c após um período t [% (em relação à massa de cimento)], C_S é a concentração de cloretos na superfície da estrutura [% (em relação à massa de cimento)], erf é a função de erro de Gauss, x_c é o cobrimento da armadura [mm], $D(t)$ é o coeficiente de difusão de cloretos no concreto (Eq. (3.4)) e t é a idade para a qual a previsão está

sendo realizada (anos).

$$D(t) = \frac{D_0}{1 - \alpha}\left[\left(1 + \frac{t'}{t}\right)^{1-\alpha} - \left(\frac{t'}{t}\right)^{1-\alpha}\right]\left(\frac{t_0}{t}\right)^{\alpha} k_e \tag{3.4}$$

sendo $D(t)$ o coeficiente de difusão de cloretos no concreto [mm^2/ano], D_0 o coeficiente de difusão de referência [mm^2/ano] medido no instante t_0 [anos] e t' a idade do concreto quando exposto aos íons [anos]. A variável α representa o fator de envelhecimento do concreto, no qual é considerada a evolução da microestrutura do material, como discutido anteriormente, e k_e é o parâmetro que leva em conta o efeito da temperatura, como apresenta a Eq. (3.5).

$$k_e = exp\left[\frac{E_A}{R}\left(\frac{1}{293} - \frac{1}{273 + T}\right)\right] \tag{3.5}$$

na qual exp é a função exponencial, E_A é a ativação de energia para a difusão do cloreto [kcal/mol], R é a constante universal dos gases perfeitos e T é a temperatura [ºC].

Com base nesse modelo e utilizando a função estado limite apresentada na Eq. (2.20), a probabilidade de falha da estrutura, isto é, a probabilidade de ocorrência da corrosão das armaduras, é determinada conforme a Eq. (3.6).

$$P_f = P\ (C(x,t)\ \geq\ C_{CR}) \tag{3.6}$$

Deve-se atentar ao fato de que esse é um modelo matemático simplificado que considera a penetração unidirecional de cloretos e que contém parâmetros de entrada incertos. Esses cálculos, portanto, não apresentarão resultados idênticos aos apresentados por estruturas reais expostas a ambientes ricos em cloretos. Assim, as probabilidades de corrosão determinadas através desse modelo devem servir como base para a tomada de decisão acerca de soluções técnicas de manutenção ao longo da vida útil da estrutura.

Análise paramétrica

Visando uma melhor compreensão do modelo utilizado e da influência de seus parâmetros de entrada na estimativa da vida útil das estruturas, uma análise paramétrica foi realizada.

Os valores médios utilizados nessa análise foram tomados de diversos autores. O coeficiente de difusão D_0 adotado foi o do traço R 45 produzido no programa experimental deste trabalho. Já os coeficientes de variação (COV) de cada um dos parâmetros seguem os utilizados na análise de sensibilidade apresentada por Andrade (2001). Esses valores são apresentados na Tab. 3.9.

Tabela 3.9. Distribuições de probabilidade utilizadas na análise paramétrica.
Fonte: Autor.

Parâmetro de entrada	Unidade	Referência	Distribuição	Média	COV
Coeficiente de difusão (D_0)	m^2/s	Autor	Normal	D_{nssm} (R 45)	0,1
					0,2
					0,3
					0,4
					0,5
					0,6
Cobrimento nominal (x_c)	mm	NBR 6118 (2014)	Normal	50,00	0,1
					0,2
					0,3
					0,4
					0,5
					0,6
Concentração superficial de cloretos (C_S)	%[1]	Guimarães (2000)	Lognormal	2,07	0,1
					0,2
					0,3
					0,4
					0,5
					0,6
Temperatura (T)	ºC	INMET (2019)[2]	Normal	18,00	0,1
					0,2
					0,3
					0,4
					0,5
					0,6
Fator de envelhecimento (α)	-	Boddy *et al.* (2001)	Normal	0,43	0,1
					0,2
					0,3
					0,4
					0,5
					0,6
Concentração crítica (C_{CR})	%[1]	Angst *et al.* (2009)	Normal	0,40	0,1
					0,2
					0,3
					0,4
					0,5
					0,6

[1] percentual em relação à massa de cimento; [2] valor da temperatura média na cidade de Rio Grande (RS) durante o ano de 2018. O uso da temperatura média anual é recomendado por Gjørv (2015, p. 107).

A análise paramétrica foi realizada considerando uma vida útil de projeto de 50 anos.

O método de Monte Carlo foi utilizado na realização da análise paramétrica. Em cada avaliação foram gerados 10^7 valores para cada variável aleatória, resultando em 10^7 valores distintos de $C(x,t)$ e de P_f. Esse número se mostrou suficiente à convergência estatística dos resultados obtidos e, com base na Eq. (2.16), tem-se que o erro percentual das análises é de 0,19 %.

Inicialmente foram avaliados os efeitos das alterações do COV das variáveis básicas na concentração $C(x,t)$. Para tal, estabeleceu-se uma relação entre a concentração de cloretos obtida considerando os coeficientes de variação apresentados na Tab. 3.9 ($C(x,t)_{(COV)}$) e a concentração de cloretos sem considerar nenhuma variabilidade dos parâmetros básicos ($C(x,t)_{(COV=0)}$). Após, foi analisado o efeito das alterações do COV de cada uma das variáveis básicas no coeficiente de variação de $C(x,t)$. Por fim, analisou-se a influência das variabilidades atribuídas aos parâmetros de entrada na P_f calculada pelo modelo. As variações dos valores de C_{CR} foram consideradas somente nessa última análise, visto que esse parâmetro não influencia no valor médio e no COV de $C(x,t)$.

3.2.2. Cálculo da probabilidade de corrosão

O cálculo da probabilidade de corrosão foi realizado a fim de avaliar a vida útil dos concretos produzidos no programa experimental deste trabalho. O coeficiente de difusão D_0 utilizado para cada um dos traços foi medido experimentalmente com base na metodologia descrita na seção "Determinação do coeficiente de difusão" deste trabalho.

Foram consideradas estruturas com cobrimento nominal da armadura de 40 e 50 mm (referentes à recomendação da NBR 6118 (ABNT, 2014) para classes de agressividade ambiental III e IV, respectivamente), e 60 e 70 mm (valores relatados por Gjørv (2015) a partir da experiência com estruturas expostas a ambientes de severa agressividade na costa norueguesa).

A concentração superficial de cloretos adotada foi a obtida por Guimarães (2000) em uma estrutura existente localizada em uma zona totalmente de névoa (ponto PS-ZTN) na cidade de Rio Grande/RS. Apesar do valor de C_S ser tema recorrente de discussão, os teores superficiais de cloretos apresentados por Guimarães (2000) têm sido utilizados como parâmetros em previsões de vida útil realizadas por diversos autores, como Andrade (2001), Possan e Andrade (2014) e Magalhães (2018).

A temperatura ambiente considerada nas análises é a apresentada pelo Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil (INMET) como média durante o ano de 2018 na cidade de Rio Grande/RS (aproximadamente 18 ºC). A consideração da temperatura média anual é recomendada por

Gjørv (2015) na apresentação do modelo de penetração de cloretos utilizado. O resumo dos parâmetros considerados na análise probabilística e suas respectivas distribuições de probabilidades é apresentado na Tab. 3.10.

Tabela 3.10. Distribuições de probabilidades das variáveis consideradas na análise probabilística. Fonte: Autor.

Parâmetro de entrada	**Unidade**	**Referência**	**Distribuição**	**Média**	**COV**
Coeficiente de difusão (D_0)	m^2/s	Autor	Normal	D_{nssm}	0,10
Cobrimento nominal (x_c)	mm	NBR 6118 (2014) Gjørv (2015)	Normal	40,00 50,00 60,00 70,00	0,10
Concentração superficial de cloretos (C_S)	% [1]	Guimarães (2000)	Lognormal	2,07	0,23
Temperatura (T)	ºC	INMET (2019)	Normal	18 [2]	0,20
Fator de envelhecimento (α)	-	Boddy *et al*. (2001) Shekarchi *et al*. (2009)	Normal	0,43 [3] 0,50 [4] 0,55 [5]	0,20
Concentração crítica (C_{CR})	% [1]	Angst *et al*. (2009)	Normal	0,40	0,15

[1] percentual em relação à massa de cimento; [2] valor aproximado da temperatura média na cidade de Rio Grande (RS) durante o ano de 2018. O uso da temperatura média anual é recomendado por Gjørv (2015, p. 107); [3] valor adotado para o traço referência; [4] valor adotado para as misturas que contêm metacaulim; [5] valor adotado para as misturas que contêm sílica ativa.

A P_f foi calculada para as idades de 25, 50, 100, 150 e 200 anos. A partir dos resultados obtidos na análise probabilística, foi também determinada a vida útil característica (t_k) de estruturas construídas e sujeitas às condições ambientais consideradas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os principais resultados obtidos a partir da metodologia descrita no capítulo 3.

4.1. Resistência à compressão

As resistências médias à compressão axial (f_{cm}) dos concretos produzidos são apresentadas na Fig. 4.1. Estes valores foram obtidos a partir da avaliação de três corpos de prova de cada mistura. Destaca-se que todos os traços avaliados atendem aos valores mínimos prescritos pela NBR 6118 (ABNT, 2014) e pela NBR 12655 (ABNT, 2015) para a classe de agressividade ambiental IV.

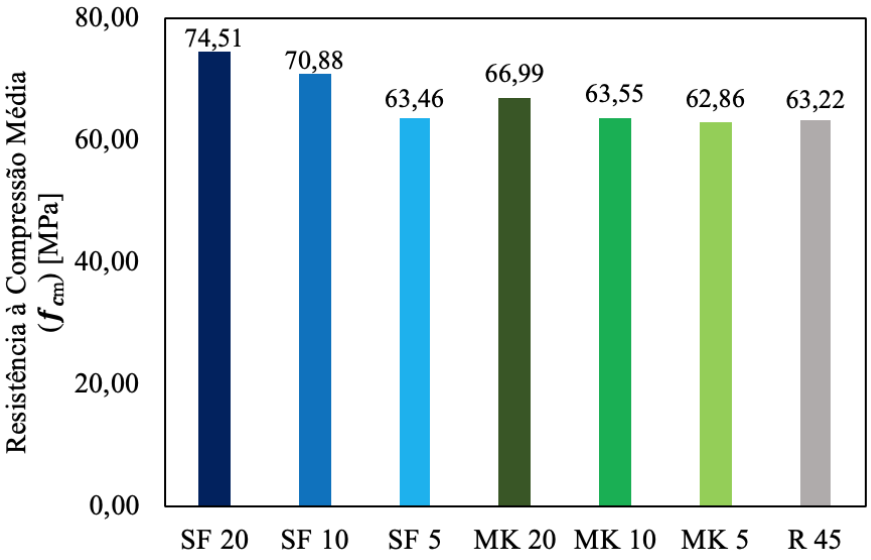

Figura 4.1 - Resistência à compressão axial dos concretos avaliados (Fonte: Autor).

Verifica-se na Fig. 4.1 a influência positiva gerada pela sílica ativa na resistência à compressão média (f_{cm}) do concreto. Apesar do traço SF 5 apresentar f_{cm} superior em apenas 0,24 MPa em relação à mistura referência, a utilização de sílica ativa nos teores de 10 % e 20 % foi responsável por incrementos de 12,11 % e 17,86 %, respectivamente, frente à resistência do traço R 45. Destaca-se também que, avaliando somente as misturas com emprego de sílica ativa, a mistura SF 20 possui f_{cm} superior em 17,41 % e 5,12 % em relação aos traços SF 5 e SF 10, respectivamente.

A utilização de metacaulim, por sua vez, mostrou-se positiva somente quando utilizados os teores de 10 % e 20 %, sendo a resistência à compressão desses concretos superiores ao traço referência em 0,33 MPa e 3,77 MPa, respectivamente. O traço MK 5, no entanto, apresentou f_{cm} inferior ao concreto referência em 0,57 %. Nota-se que o aumento do teor de metacaulim gerou

melhorias na resistência à compressão. Essas, porém, são pequenas, sendo a resistência do traço MK 20 superior ao MK 5 em apenas 4,13 MPa.

O aumento da resistência à compressão devido à utilização da sílica ativa e do metacaulim está relacionado principalmente à alta reatividade desses materiais, a qual, por sua vez, está fortemente ligada à dimensão das partículas e aos altos teores de sílica e alumina reativas presentes nas adições pozolânicas utilizadas. Como apresentado na seção 2.4, a reação pozolânica que ocorre entre a portlandita ($Ca(OH)_2$) e as adições minerais acarreta a formação de C-S-H secundário, aumentando a resistência mecânica do concreto, reduzido o volume de vazios e refinando a estrutura de poros do material.

Ressalta-se que uso da sílica ativa mostra-se mais eficaz que o emprego de metacaulim quando analisada a resistência mecânica à compressão, sendo o resultado apresentado pelo traço SF 5 superior ao do traço MK 5 e muito próximo da mistura MK 10. Além disso, destaca-se que o concreto com 10 % de sílica ativa possui f_{cm} superior inclusive ao traço MK 20. Esses resultados estão diretamente ligados ao fato de a sílica ativa possuir teor de SiO_2 superior ao metacaulim (Tab. 3.4), possibilitando maior consumo de hidróxido de cálcio e, consequentemente, maior formação de C-S-H.

Cabe ainda salientar que as variações de resistência à compressão entre os traços R 45, MK 5, MK 10 e SF 5 são inferiores a 1 MPa. Essa diferença é bastante pequena quando analisado o grau de precisão do ensaio em questão, podendo a simples variação entre corpos de prova de um mesmo traço ser superior a esse valor.

4.2. Absorção de água por capilaridade

A Figura 4.2 e a Fig. 4.3 apresentam, respectivamente, os resultados obtidos para os traços com sílica ativa e metacaulim no ensaio de absorção de água por capilaridade.

A partir dos dados apresentados na Fig. 4.2 e na Fig. 4.3, percebe-se que cada adição mineral conferiu ao concreto um comportamento diferente quanto à absorção de água por capilaridade.

Novamente o emprego de sílica ativa, em qualquer dos teores utilizados, se mostrou benéfico, melhorando as propriedades do concreto em estado endurecido. Destaca-se que, ao final do ensaio, o uso de apenas 5 % de sílica ativa gerou a redução da absorção por capilaridade em 10 %. Os traços SF 10 e SF 20 também apresentam resultados satisfatórios, sendo esses da ordem de 12,17 % e 20,87 %, respectivamente, em relação ao concreto referência. Salienta-se ainda que os corpos de prova dos traços SF 5 e SF 10 apresentaram a mesma absorção nas primeiras 6 h de ensaio. Entre as medições de 6 e 24 h, a mistura SF 5 apresentou absorção 0,01 g/cm^2 superior à SF 10, diferença que

se manteve constante nas 24 h seguintes. Por fim, às 72 h, tal diferença foi de apenas 0,03 g/cm^2.

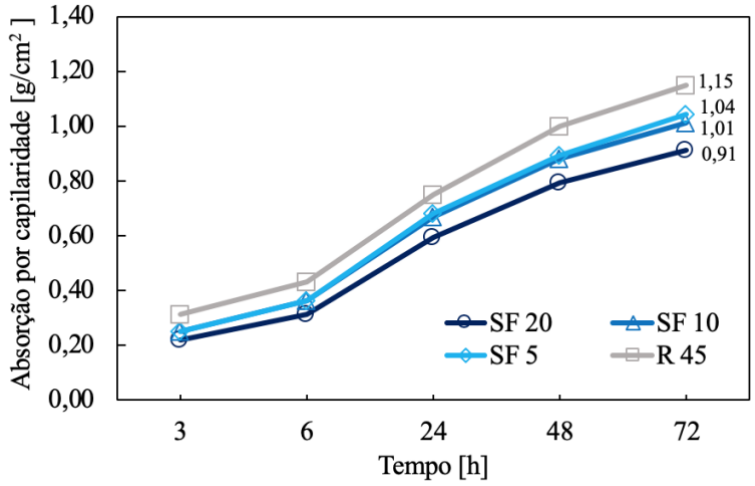

Figura 4.2 - Absorção de água por capilaridade nos concretos com sílica ativa (Fonte: Autor).

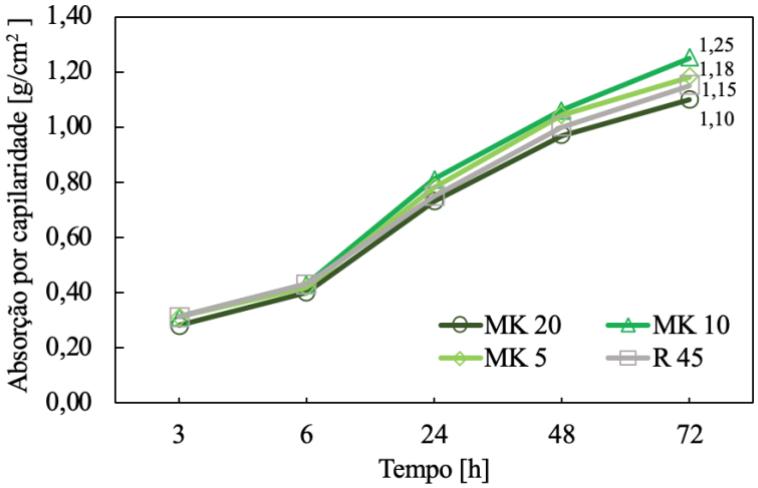

Figura 4.3 - Absorção de água por capilaridade nos concretos com metacaulim (Fonte: Autor).

Por outro lado, o metacaulim somente propiciou ao concreto uma menor absorção capilar quando utilizado no teor de 20 %. Ainda assim, essa redução foi bastante pequena, de 4,34 % em relação ao traço R 45 após as 72 h de ensaio, e menor que a obtida com o uso de 5 % de sílica ativa. Os traços R 45, MK 5 e MK 10 apresentaram absorção bastante semelhante até às primeiras 6 h de ensaio, sendo a diferença entre os valores menor ou igual a 0,01 g/cm^2. Ao final do ensaio, a absorção por capilaridade das misturas MK 5 e MK 10 foi superior à do traço referência em 0,03 g/cm^2 e 0,1 g/cm^2, respectivamente.

Teodoro (2016) destaca que o uso de adições minerais promove uma diminuição do diâmetro dos poros do concreto, podendo ocasionar uma maior sucção de água e aumentando os valores obtidos

no ensaio de absorção de água por capilaridade. Quando esse fato ocorre, como no caso dos traços MK 5 e MK 10 apresentados, não significa necessariamente que o concreto é mais poroso ou permeável, já que ele pode estar expressando uma maior capacidade de sucção de água devido à força dos capilares de menor diâmetro. Por outro lado, quando observada a redução significativa da absorção de água por capilaridade devido ao uso de adições minerais, considera-se que além da redução do diâmetro dos poros houve também o fechamento das ligações entre eles.

4.3. Resistência à penetração de cloretos

As cargas passantes (Q) através das amostras de concreto durante a realização do ensaio normatizado pela ASTM C1202 (ASTM, 2012) são apresentadas na Fig. 4.4. Com base nos valores apresentados na Tab. 3.6, todos os concretos são classificados com penetrabilidade de cloretos "muito baixa" ($100 < Q < 1000$).

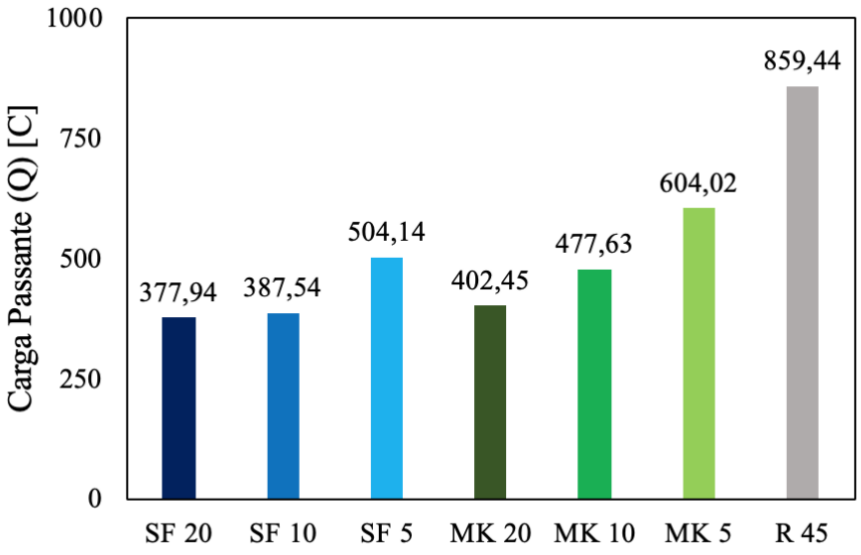

Figura 4.4 - Carga passante através das amostras de concreto (Fonte: Autor).

Ao contrário do ensaio de absorção por capilaridade, este ensaio é um parâmetro mais diretamente relacionado ao movimento de íons cloreto no interior do concreto. Desta forma seus resultados tendem a apresentar maior correlação com o fenômeno da penetração de cloretos em estruturas reais. No entanto, deve-se atentar ao fato de que não foram avaliados os possíveis efeitos do processo de carbonatação das amostras ocorrido na fase de pré-condicionamento.

Os traços com utilização de metacaulim, que apresentaram pequenas variações em relação à mistura referência quando avaliadas a resistência à compressão axial e a absorção de água por

capilaridade, conferiram ao concreto melhorias significativas quanto à penetrabilidade de cloretos. Nessa avaliação, o uso de metacaulim no teor de 5 % implicou na redução da carga passante em 29,72 %. Já para os traços MK 10 e MK 20, essa diminuição foi da ordem de 44,43 % e 53,17 %, respectivamente, frente ao concreto R 45.

Salienta-se o fato de que a resistência à compressão apresentada pelo traço MK 5 foi inferior à mistura referência em 0,36 MPa (Fig. 4.1). No entanto, quando avaliada a carga passante, a suscetibilidade do concreto à penetração de cloretos foi reduzida em 255,42 C (29,72 %). Nota-se, portanto, a importância da abordagem com base no desempenho na avaliação da durabilidade potencial do concreto, uma vez que materiais que possuem valores de f_c muito próximos podem apresentar comportamentos distintos quando avaliados os mecanismos de ingresso de agentes agressivos devido ao uso de adições minerais.

A sílica ativa, por sua vez, novamente conferiu melhorias ao concreto. Apesar da mistura SF 5 propiciar boa redução da carga passante (355,30 C), destaca-se que o teor de 10 % diminui a penetrabilidade de cloretos do concreto a menos da metade quando comparado ao traço referência.

Em uma análise geral acerca da influência do tipo de adição mineral utilizada, verifica-se que os melhores resultados foram obtidos quando utilizada a sílica ativa. Essa diferença foi mais acentuada quando comparados os traços com teor de substituição igual a 5 % (99,89 C). Já o resultado mais próximo entre as duas pozolanas foi observado quando comparadas as misturas MK 20 e SF 20, sendo essa diferença da ordem de 24,51 C (aproximadamente 6 %).

4.4. Coeficiente de difusão aparente

Os resultados obtidos no ensaio de determinação do coeficiente de difusão aparente em estado não-estacionário (D_{nssm}) e a classificação dos concretos quanto a sua difusividade são apresentados na Fig. 4.5. Assim como apontado na discussão acerca dos resultados de resistência à penetração de cloretos, reitera-se que não foram considerados os possíveis efeitos do processo de carbonatação das amostras ocorrido na fase de pré-condicionamento

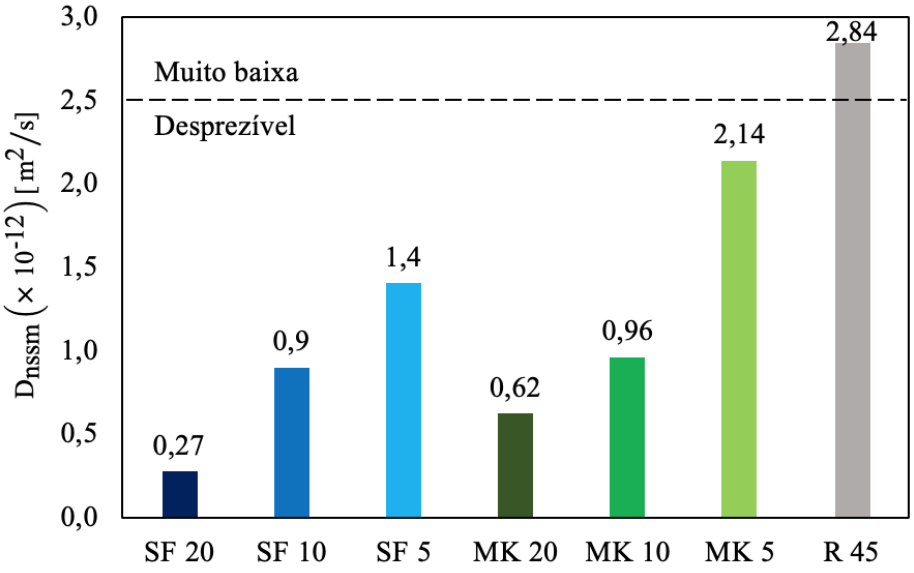

Figura 4.5 - Coeficiente de difusão aparente dos concretos avaliados (Fonte: Autor).

Inicialmente nota-se que a utilização das adições minerais, em todos os seus teores, propiciou coeficientes de difusão classificados como “desprezíveis”. No entanto, ainda que tenham obtido a mesma classificação, deve-se atentar ao valor de D_{nssm} de cada concreto, uma vez que esse é um parâmetro de entrada do modelo de previsão de vida útil utilizado neste trabalho e em outros disponíveis na literatura. Dessa forma, ainda que dois ou mais concretos possuam a mesma classificação quanto à difusividade, a discrepância entre os coeficientes de difusão pode acarretar previsões de vida útil significativamente diferentes.

Avaliando os valores de D_{nssm} obtidos, é mais evidente o resultado apresentado pelo concreto SF 20, cuja difusividade é 56,45 % inferior à mistura MK 20, que possui mesmo teor de material pozolânico, e 90,49 % inferior ao traço referência. Os coeficientes de difusão dos concretos produzidos com sílica ativa e metacaulim são bastante similares aos apresentados por Meddah *et al*. (2018), que também avaliaram as propriedades de concretos com utilização dessas adições minerais. No entanto, diferentemente dos resultados apresentados na Fig. 4.5, Meddah *et al*. (2018) relatam que para um mesmo teor de substituição, o metacaulim representou a maior redução na difusividade dos concretos, ainda que a variável “tipo de substituição” tenha sido identificada pelos autores como “estatisticamente insignificante”.

Como apresentado na seção 2.4, a utilização de materiais pozolânicos em substituição parcial ao cimento Portland em concretos pode gerar dois efeitos diferentes – a saber, físico e químico. A visível redução dos coeficientes de difusão gerada pelas adições pozolânicas pode estar, portanto,

relacionada (a) a alterações na estrutura porosa do concreto devido ao efeito *filler*, através do qual as partículas de sílica ativa ou metacaulim criam barreiras físicas que impõem dificuldades ao ingresso dos íons no concreto, como apontado por Wild *et al*. (1996); (b) ao aumento da resistividade do concreto e consequente maior dificuldade à condução elétrica dos íons, como indicado por Teodoro (2016) e (c) à fixação de íons cloro pelos compostos resultantes das reações pozolânicas, através de combinações químicas e formação do sal de Friedel (cloro-aluminato de cálcio hidratado), como sugerido por Ribeiro (2018).

Destaca-se também a notável diferença de difusividade existente entre os traços R 45, MK 5, MK 10 e SF 5. Esses concretos, como discutido anteriormente, possuem resistências à compressão muito próximas, com variações inferiores a 1 MPa. No entanto, analisando os valores de D_{nssm} obtidos pelas misturas R 45 e MK 10, percebe-se uma redução de 66,2 % gerada pela utilização da adição mineral. Além disso, ainda que todos concretos obedeçam aos mesmos parâmetros prescritivos de dosagem, o traço R 45 foi o único classificado com difusividade "muito baixa" entre os avaliados.

Com base nesses fatos, é reafirmada a importância da existência de um arcabouço técnico para verificação da qualidade do concreto e de sua durabilidade potencial, visto que concretos que seguem as mesmas prescrições e que possuem resistências à compressão bastante similares podem apresentar comportamentos significativamente distintos quando avaliadas as propriedades relacionadas à durabilidade.

Salienta-se, por fim, que apesar das expressivas reduções do coeficiente de difusão do concreto geradas pelos traços com teores mais altos de adições minerais, esses podem demandar outros cuidados durante a execução da estrutura, como um adequado processo de cura, e conduzir, por exemplo, à ocorrência de fissuras no concreto devido à retração. Assim, com base nos valores de D_{nssm} apresentados e nas experiências reportadas por diversos autores, como explanado na revisão bibliográfica deste trabalho, entende-se que os concretos SF 5, SF 10 e MK 10 são as soluções mais viáveis para o problema abordado.

4.5. Análise paramétrica do modelo de penetração de cloretos utilizado

A Figura 4.6 apresenta a relação entre o COV das variáveis básicas do modelo e a concentração de cloretos na profundidade da armadura ($C(x,t)$).

Verifica-se, com base na Fig. 4.6, a grande influência gerada pelas variações do cobrimento da armadura que, com COV = 0,2, aumenta em aproximadamente três vezes a concentração de cloretos. Salienta-se que esse não é um parâmetro de qualidade do concreto, mas sim uma variável

relacionada à qualidade da execução da estrutura.

A correta consideração acerca do fator de envelhecimento do concreto também se mostra importante, visto que suas variabilidades causam impactos semelhantes aos obtidos pelo aumento do COV_{x_c}, principalmente quando considerados COV $\leq$ 0,3. Destaca-se que esse comportamento é válido para a idade considerada na realização dessa análise (50 anos), podendo ser obtidas variações percentuais diferentes quando analisadas outras idades, uma vez que o parâmetro α está diretamente ligado à evolução da hidratação do cimento e da microestrutura do material, assim como às condições impostas pelo ambiente de exposição.

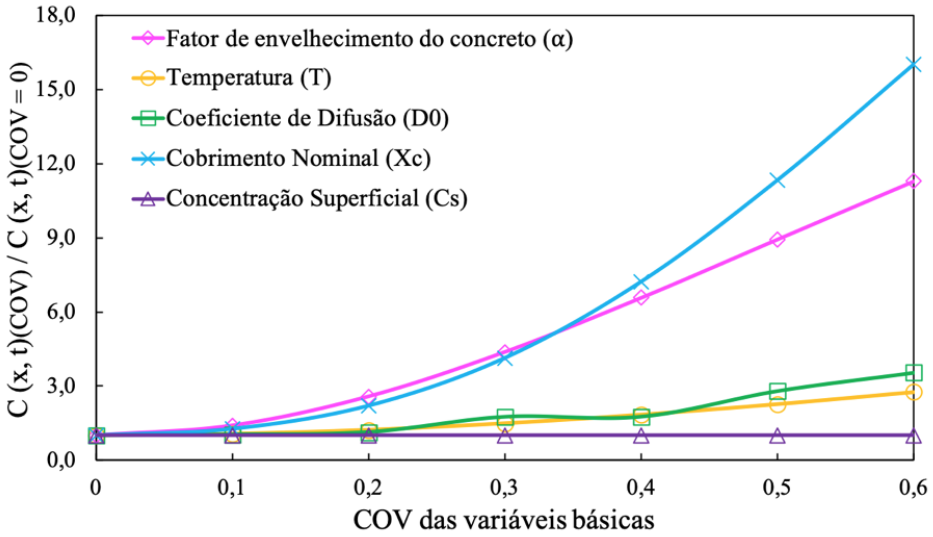

Figura 4.6 - Influência do coeficiente de variação dos parâmetros de entrada na concentração de cloretos média (Fonte: Autor).

Por fim, nota-se que a variável D_0 apresenta aumentos significativos na concentração de cloretos média quando seu COV é igual ou superior a 0,2. Assim, percebe-se a importância da qualidade do concreto empregado em estruturas expostas a ambientes agressivos, visto que esse material, além de possuir baixo coeficiente de difusão, deve também possuir variabilidades pequenas quanto à difusividade.

A influência das variações do COV das variáveis do modelo no $COV_{(C(x,t))}$ é apresentada na Fig. 4.7.

Observa-se, na Fig. 4.7, que as variáveis x_c e α, além de apresentarem aumento nos valores médios de $C(x,t)$ devido às alterações de seu COV, também fazem com que a amostra da concentração de cloretos tenha seu coeficiente de variação elevado. Destaca-se ainda o

comportamento das variabilidades de C_S que, apesar de não gerarem alterações significativas na concentração de cloretos média (Fig. 4.6), elevam o $COV_{(C(x,t))}$ a aproximadamente 0,59 quando $COV_{(C_S)}$ = 0,6.

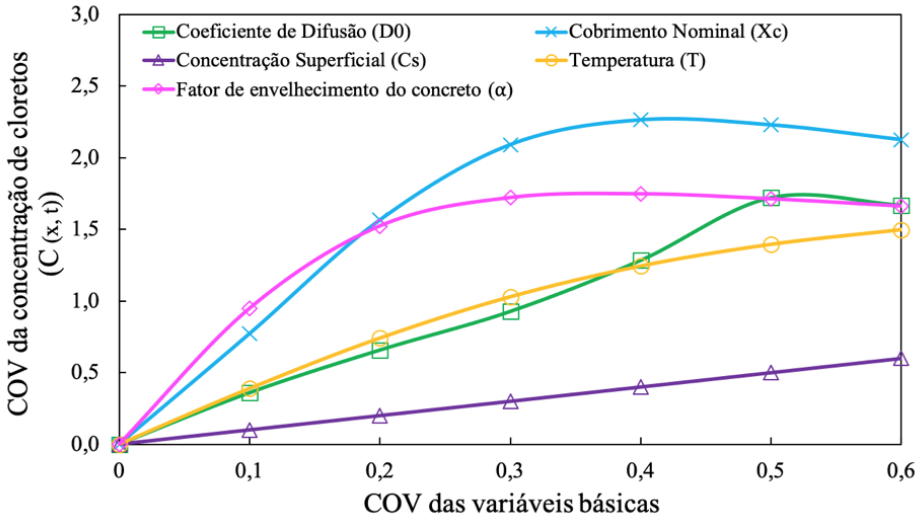

Figura 4.7 - Efeito do COV das variáveis básicas na variabilidade da concentração de cloretos (Fonte: Autor).

Na Figura 4.8 é apresentada a relação entre os coeficientes de variação dos parâmetros de entrada do modelo e a probabilidade de falha da estrutura.

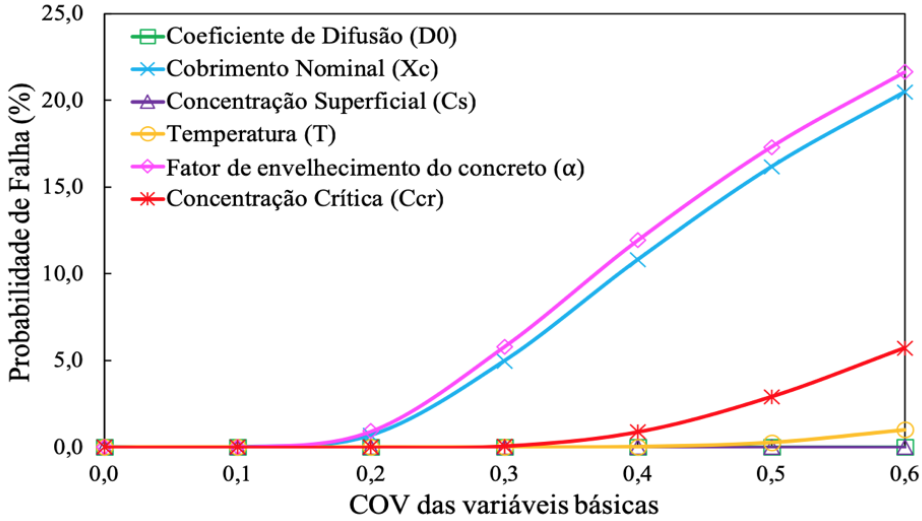

Figura 4.8 - Influência do coeficiente de variação dos parâmetros de entrada na probabilidade de falha da estrutura (Fonte: Autor).

Com base na Fig. 4.8, percebe-se que as variabilidades do cobrimento da armadura e do fator

de envelhecimento do concreto são as que mais interferem na probabilidade de falha do modelo, fato que está ligado ao apresentado na Fig. 4.6 e Fig. 4.7. Nota-se, ainda, a influência gerada pela variabilidade de C_{CR}. Esse valor, que é amplamente discutido na literatura e cujo valor médio não é consensual, como apontado por Angst *et al*. (2009), pode ocasionar uma P_f superior a 5 % ao ter seu COV = 0,6.

4.6. Verificação dos resultados das simulações

Inicialmente, visando avaliar a proximidade entre os resultados obtidos através dos métodos de Monte Carlo, Monte Carlo com Amostragem por Importância e FORM, a P_f foi determinada considerando os traços R 45, MK 10 e SF 10, cobrimento nominal da armadura de 50 mm e idade de 50 anos. Para esses casos, foram também avaliados os pontos de falha obtidos através dos métodos FORM e MCS-AI. Os resultados dessas análises preliminares são apresentados na Tab. 4.1 e Tab. 4.2. Os pontos de falha apresentados na Tab. 4.2 indicam o conjunto de valores mais próximos à média de cada variável que conduzem a uma situação de falha (despassivação da armadura, neste trabalho).

Quando utilizado o Método de Monte Carlo, foram realizadas 10^7 simulações para cada uma das situações avaliadas. Já quando empregado o MCS-AI, foram realizadas 200 atualizações do ponto de falha, sendo em cada atualização realizadas 1000 simulações. Para esse método, com base nos pontos de falha obtidos via FORM, adotou-se o fator de correção das médias $h(x)$ = 1,20. Assim, os valores médios das variáveis de entrada utilizadas na análise probabilística sofreram alterações da ordem de 20 % para mais ou para menos a fim de acelerar a convergência estatística dos resultados obtidos, como anteriormente discutido na seção "Método de Monte Carlo com Amostragem por Importância (MCS-AI)".

Tabela 4.1. Avaliação preliminar da probabilidade de falha calculada utilizando os métodos MCS, MCS-AI e FORM.
Fonte: Autor.

	R 45			**MK 10**			**SF 10**		
	MCS	**MCS-AI**	**FORM**	**MCS**	**MCS-AI**	**FORM**	**MCS**	**MCS-AI**	**FORM**
P_f (%)	49,72	49,70	49,23	0,52	0,52	0,54	0,20	0,20	0,21

Tabela 4.2. Valores das variáveis aleatórias que constituem pontos de falha através dos métodos MCS-AI e FORM.
Fonte: Autor.

Variável	Unidade	R 45		MK 10		SF 10	
		MCS-AI	**FORM**	**MCS-AI**	**FORM**	**MCS-AI**	**FORM**
D_0	m^2/s ($\times 10^{-12}$)	2,86802	2,83887	1,00011	1,00435	0,95365	0,94450
x_c	mm	48,31250	50,03944	43,71824	44,57959	43,49896	44,12104
C_S	% [1]	2,19923	2,01369	2,57001	2,43751	2,58396	2,46685
T	º C	19,36053	17,96974	22,06205	21,60816	22,14181	21,86230
α	-	0,38977	0,43105	0,29946	0,31969	0,29322	0,31564
C_{CR}	% [1]	0,39360	0,40014	0,38166	0,38473	0,38168	0,38374

[1] percentual em relação à massa de cimento.

Com base nos dados apresentados na Tab. 4.1 e na Tab. 4.2, verifica-se que os valores de P_f calculados utilizando os três métodos são muito similares, com variações não superiores a 1 %. Também se percebe a proximidade entre os pontos de falha obtidos via FORM e MCS-AI. Salienta-se que o FORM é um método que considera algumas linearizações, como apresentado anteriormente. Dessa forma, variações mais significativas dos pontos de falha em relação aos determinados através do método MCS-AI podem estar ligadas a essas simplificações.

Tendo em vista a coerência verificada entre os resultados obtidos quando utilizados os métodos FORM, MCS e MCS-AI, o Método de Monte Carlo com Amostragem por Importância foi utilizado nas análises de confiabilidade apresentadas na sequência deste trabalho. Essa escolha se deu pelo fato de o MCS-AI ser, entre os métodos considerados, o que requer menor número de simulações e, assim, demanda menores custos computacionais.

A convergência estatística dos resultados obtidos em uma das análises realizadas pelo método MCS-AI é apresentada na Fig. 4.9. Cabe salientar que, apesar de não apresentadas, a convergência estatística foi verificada em todas as situações analisadas.

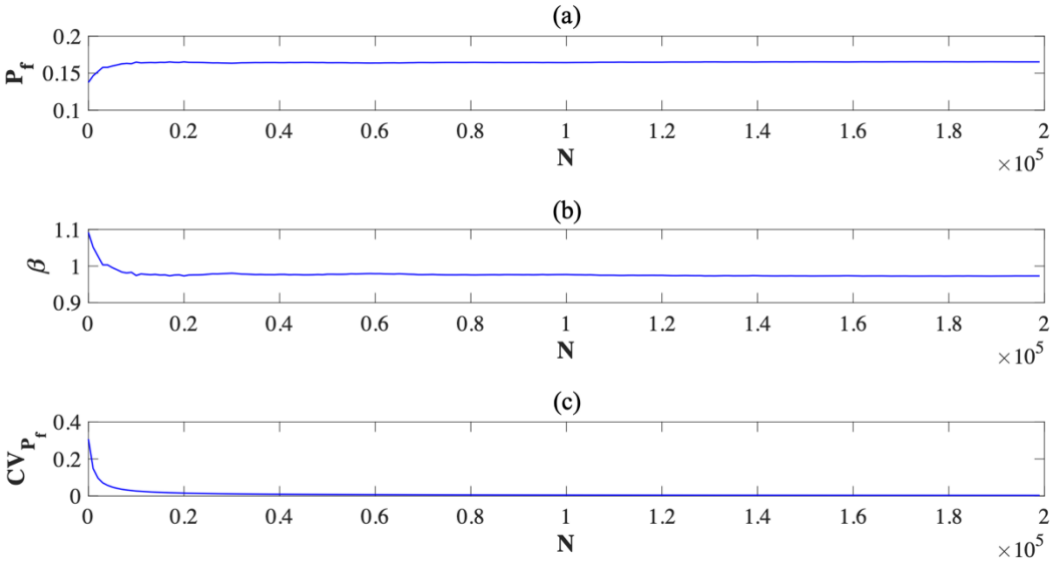

Figura 4.9 - Convergência estatística dos resultados obtidos através do MCS-AI: (a) probabilidade de falha; (b) índice de confiabilidade; (c) coeficiente de variação da probabilidade de falha (Fonte: Autor).

4.7. Resultados das simulações

Os resultados obtidos através das simulações realizadas utilizando o Método de Monte Carlo com Amostragem por Importância são apresentados nas Figs. 4.10 – 4.13. Destaca-se que, como já discutido anteriormente, o critério de falha adotado na análise probabilística refere-se ao estado limite de serviço da estrutura, ou seja, à quebra da camada passivadora da armadura devido à ação de cloretos. Ao analisar a Fig. 4.13, deve-se atentar ao fato de que, devido aos baixos valores de P_f apresentados, essa tem como limite superior de seu eixo das ordenadas o valor de 70 %.

De maneira geral, verifica-se que o uso das adições minerais reduziu a probabilidade de ocorrência da corrosão em todas as idades e espessuras de cobrimento avaliadas. Esses resultados estão ligados diretamente aos dados apresentados e discutidos em relação ao Coeficiente de difusão aparente, visto que esse é o mecanismo de transporte de cloretos considerado no modelo de penetração utilizado.

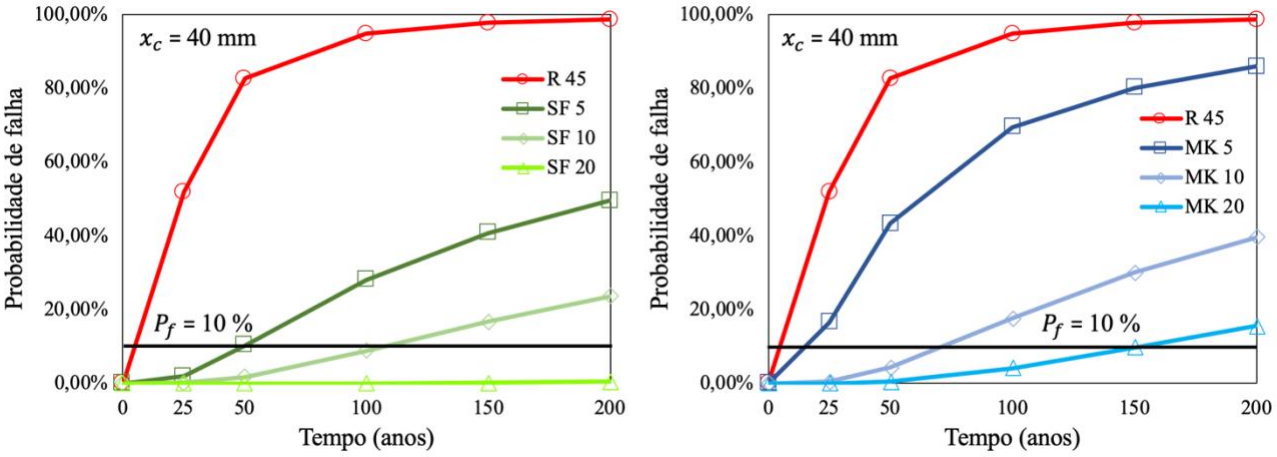

Figura 4.10 – Influência da sílica ativa e do metacaulim na probabilidade de ocorrência da corrosão em estruturas com cobrimento de 40 mm (Fonte: Autor).

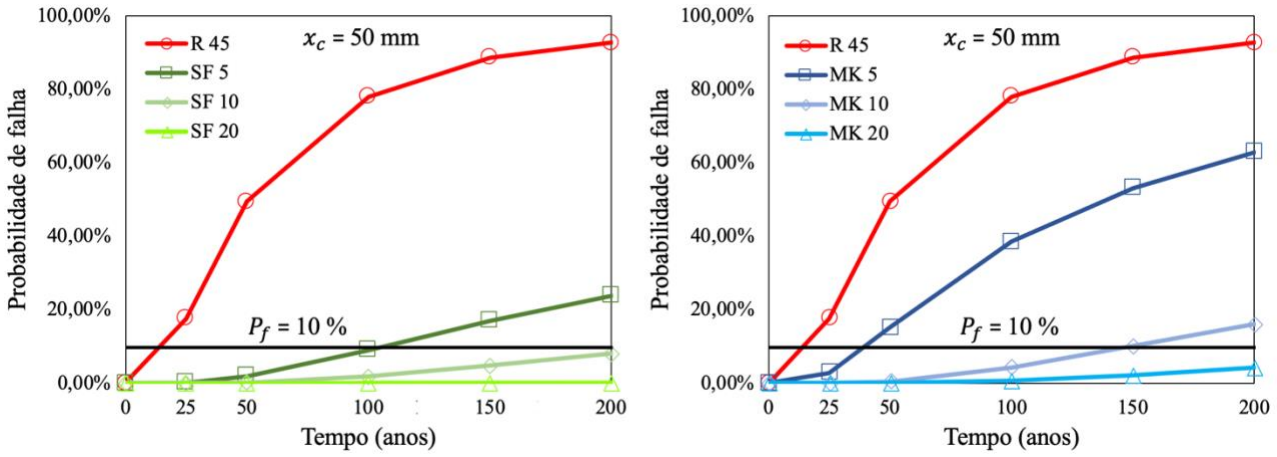

Figura 4.11 - Influência da sílica ativa e do metacaulim na probabilidade de ocorrência da corrosão em estruturas com cobrimento de 50 mm (Fonte: Autor).

Com base na Fig. 4.10 e Fig. 4.11, as quais consideram, respectivamente, os cobrimentos de armaduras indicados pela NBR 6118 (ABNT, 2014) para as classes de agressividade ambiental III e IV, é novamente evidenciada a importância da aplicação da abordagem com base no desempenho ao projeto de durabilidade e à avaliação da vida útil de estruturas expostas a ambientes agressivos.

Destaca-se, por exemplo, que a P_f é de 17,70 % já aos 25 anos quando considerado o traço R 45 e cobrimento de 50 mm. Por outro lado, quando utilizados 5 % de sílica ativa, ainda que o cobrimento da armadura seja reduzido para 40 mm, a probabilidade de corrosão é reduzida para 1,89 % aos 25 anos e para 10,32 % aos 50 anos.

Salienta-se ainda que para a idade de 100 anos, se empregado o concreto referência, a

probabilidade de falha atinge 53,17 % se utilizado x_c = 60 mm (Fig. 4.12) e 30,77 % se adotado cobrimento de 70 mm (Fig. 4.13). Esses valores de cobrimento das armaduras não são normatizados no Brasil, porém são adotados em obras especiais em países como a Noruega. No entanto, se considerados os concretos MK 10 ou SF 10, esses valores são reduzidos para 4,31 % e 1,82 %, respectivamente, quando adotado x_c = 50 mm. Todavia, esse tipo de consideração e tomada de decisão, que pode gerar benefícios econômicos, construtivos e/ou arquitetônicos à estrutura, requer experiências prévias com a utilização dos Indicadores de Durabilidade como método de aferição da qualidade do concreto e como parâmetro de entrada em modelos de previsão de vida útil.

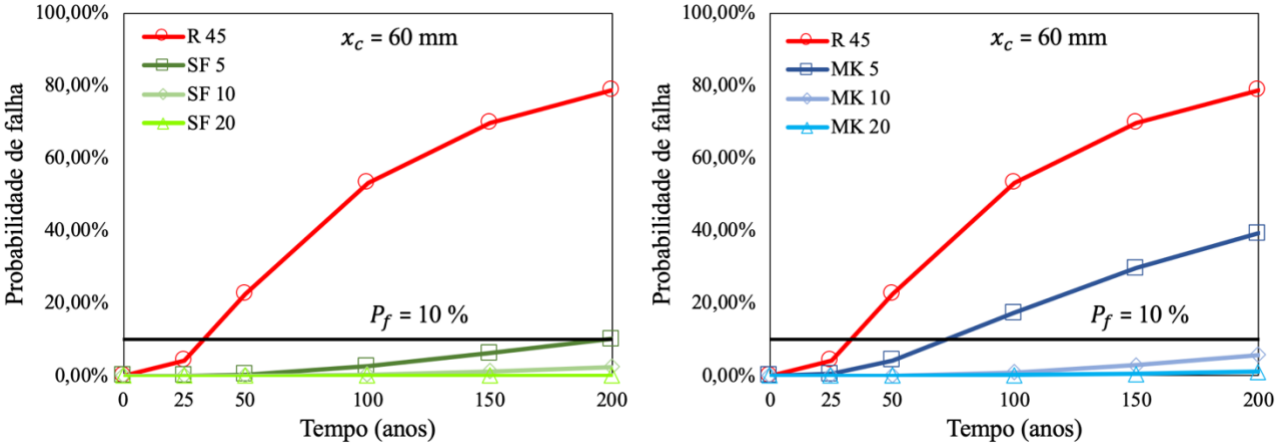

Figura 4.12 - Influência da sílica ativa e do metacaulim na probabilidade de ocorrência da corrosão em estruturas com cobrimento de 60 mm (Fonte: Autor).

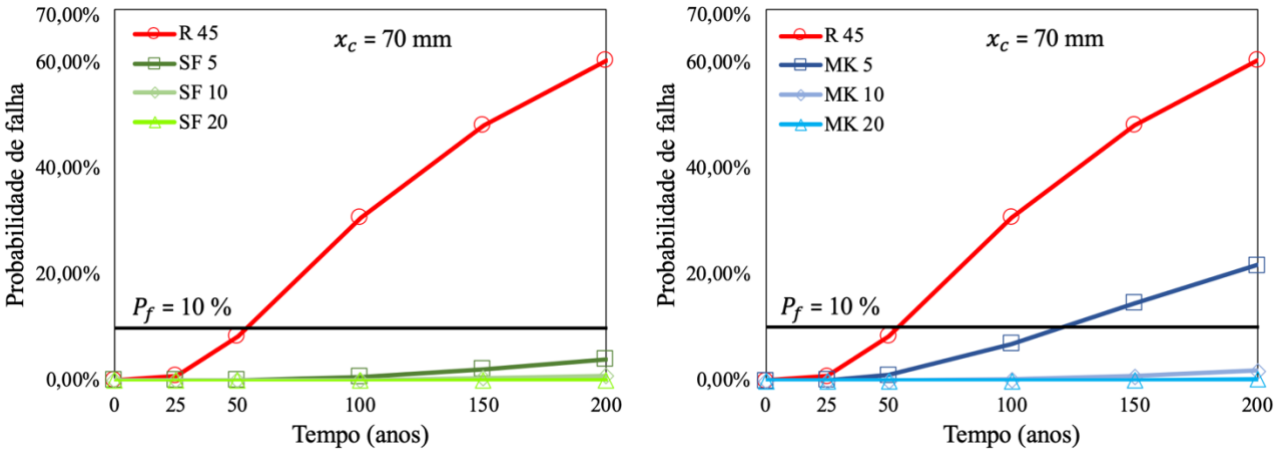

Figura 4.13 - Influência da sílica ativa e do metacaulim na probabilidade de ocorrência da corrosão em estruturas com cobrimento de 70 mm (Fonte: Autor).

Observa-se, como esperado, que se utilizado x_c = 70 mm, a P_f sofre consideráveis reduções, atingindo valores próximos de 0 % aos 200 anos se utilizados metacaulim ou a sílica ativa em teores iguais ou superiores a 10 %. Apesar de incomum à realidade brasileira e de demandar cuidados extras, como a respeito da fissuração do concreto de cobrimento, por exemplo, a consideração de cobrimentos de armadura elevados associados ao uso de adições minerais pode ser benéfica em estruturas que estejam expostas a ambientes agressivos e que demandem longas vidas úteis, como pontes, cais, diques e outros.

4.8. Vida útil característica

Os valores de vida útil característica (t_k) obtidos na análise probabilística são apresentados na Tab. 4.3. Deve-se perceber que, como descrito anteriormente, o valor de 10 % foi tomado como P_f máxima admissível.

Tabela 4.3. Vida útil característica (em anos) das estruturas analisadas.
Fonte: Autor.

Traço	**Cobrimento da armadura (mm)**			
	40	**50**	**60**	**70**
SF 20	> 200,00	> 200,00	> 200,00	> 200,00
SF 10	125,96	> 200	> 200,00	> 200,00
SF 5	46,94	125,12	182,14	> 200,00
MK 20	179,17	> 200,00	> 200,00	> 200,00
MK 10	76,84	150,49	> 200,00	> 200,00
MK 5	18,87	45,00	78,44	113,97
R 45	4,20	12,97	39,98	51,97

Como se sabe, em razão da grande quantidade de fatores intervenientes no processo de degradação de estruturas em concreto armado devido à penetração de cloretos, os valores apresentados na Tab. 4.3 não devem ser tomados como números definitivos da vida útil, mas sim como base para a análise do comportamento da estrutura ao longo do tempo e para a tomada de decisões relacionadas a manutenções e intervenções. No entanto, não se pode deixar de evidenciar que o uso de adições minerais gera um aumento extremamente expressivo na estimativa de vida útil das estruturas. Além disso, é notório que apenas os parâmetros prescritivos apresentados pelas normas de dimensionamento são incapazes de garantir uma vida útil satisfatória.

Destaca-se que, assim como no dimensionamento de um elemento estrutural para um estado limite predefinido são considerados coeficientes parciais de segurança, solicitações e resistências características e uma probabilidade de falha preestabelecida, é desejável que o projeto e a análise de durabilidade das estruturas andem também em direção às avaliações que considerem parâmetros de resistências e solicitações.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A avaliação da qualidade do concreto e sua potencial durabilidade quando exposto a ambientes de severa agressividade são temas de notável relevância, especialmente em países que possuem vasta região costeira como o Brasil. Ao longo deste trabalho foram abordadas questões fundamentais para melhor compreensão do complexo fenômeno da penetração de cloretos no concreto, bem como para avaliação da qualidade do concreto e do nível de segurança estrutural. Visando fomentar o uso de métodos que indiquem a durabilidade potencial do concreto ainda em suas idades iniciais, ensaios acelerados de penetração de cloretos foram realizados. Foi também discutida a influência da utilização das pozolanas sílica ativa e metacaulim nas propriedades de transporte do concreto endurecido.

Uma discussão a respeito da importância da abordagem com base no desempenho no projeto e na avaliação da durabilidade de estruturas de concreto armado em contraponto à abordagem prescritiva foi apresentada. Como apontado, concretos que seguem os mesmos parâmetros prescritivos (como resistência à compressão mínima ou relação água/aglomerante máxima) podem apresentar comportamentos completamente distintos quanto à durabilidade. A influência desses diferentes comportamentos no nível de segurança estrutural foi discutida.

Considerando a grande variabilidade que os parâmetros envolvidos no processo de penetração de cloretos no concreto podem assumir, uma análise probabilística foi realizada. Para avaliação da probabilidade de falha, foram consideradas estruturas dimensionadas de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014). O Método de Monte Carlo com Amostragem por Importância foi utilizado na determinação da probabilidade de falha das estruturas avaliadas, bem como na determinação da vida útil característica dessas.

5.1. Principais conclusões

Após a realização do processo metodológico apresentado neste trabalho, podem ser destacadas as seguintes conclusões:

(a) A utilização de sílica ativa e metacaulim, de maneira geral, gerou melhorias às propriedades do concreto. Ainda que em alguns casos os ganhos de resistência à compressão devido ao uso das pozolanas não tenham sido significativos, destacam-se as expressivas reduções obtidas no coeficiente de difusão e na penetrabilidade de cloretos dos concretos, que sofreram reduções de até 90 % quando utilizadas as adições minerais;

(b) A avaliação das características do concreto a partir da abordagem com base no desempenho é de grande importância no projeto de durabilidade das estruturas. Inferiu-se neste trabalho que concretos que possuem a mesma relação água/aglomerante e que pertencem à mesma classe de resistência podem apresentar comportamentos significativamente distintos quando avaliados sob a ótica da durabilidade em ambientes ricos em cloretos. Assim, mostra-se necessária a consolidação de normas técnicas acerca da durabilidade do concreto baseadas na avaliação de indicadores de durabilidade em detrimento ao uso de métodos prescritivos;

(c) Observou-se que os métodos de Monte Carlo, Monte Carlo com Amostragem por Importância e FORM apresentam resultados similares na determinação da P_f de estruturas de concreto armado sujeitas a ambientes marinhos, podendo, portanto, serem utilizados na avaliação no nível de segurança estrutural frente ao ataque por cloretos;

(d) A análise paramétrica do modelo de penetração de cloretos utilizado mostra a grande relação entre as variabilidades do cobrimento nominal da armadura e a probabilidade de ocorrência da corrosão. Esse fato corrobora a importância de um controle de qualidade cada vez mais rigoroso na execução de estruturas em concreto armado, principalmente quando expostas a ambientes agressivos;

(e) Com base nos resultados da análise de sensibilidade e da análise probabilística, verifica-se a fundamental importância da abordagem em termos de probabilidade na avaliação da vida útil de estruturas, uma vez que as variabilidades que podem ser assumidas por cada um dos parâmetros de entrada do modelo de penetração de cloretos causam grandes variações na probabilidade de falha do sistema. Como se sabe, devido à grande quantidade de parâmetros envolvidos, os valores de vida útil obtidos a partir das análises probabilísticas não devem ser tomados como números definitivos, mas sim como base para a avaliação do comportamento da estrutura ao longo do tempo e para a tomada de decisões a respeito de intervenções;

(f) A abordagem da durabilidade de estruturas de concreto armado caminha em direção às avaliações em termos de desempenho. Assim, a introdução dos indicadores de durabilidade, de modelos de previsão de vida útil e do conceito de vida útil característica apresentam-se como aspectos fundamentais na avaliação da durabilidade de elementos estruturais sujeitos a ambientes agressivos. Dessa forma, é necessário que sejam estabelecidos programas experimentais ligados à aplicação numérica para que, por meio de novos referenciais normativos, sejam definidos procedimentos de determinação da vida útil característica e as probabilidades de falha limites para cada relação ambiente/estrutura, contribuindo para a

tomada de decisão na fase de projeto e para o dimensionamento de elementos estruturais capazes de cumprir um período mínimo de vida útil, garantindo o desempenho desejado e evitando custos prematuros com manutenções e reparos.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Entre as sugestões para trabalhos futuros sobre o tema, destacam-se:

(a) Avaliar a utilização de outros métodos como Indicadores de Durabilidade, como ensaios de resistividade elétrica, permeabilidade à água e ao ar e difusão de cloretos;

(b) Avaliar a penetração de cloretos em concretos com sílica ativa e metacaulim em exposição natural, assim como relacionar a influência do uso de métodos acelerados de penetração de cloretos na determinação do coeficiente de difusão do concreto e na estimativa da vida útil das estruturas;

(c) Realizar outros ensaios de migração de cloretos, como o normatizado pela UNE 83987, a fim de determinar o coeficiente de difusão nos regimes estacionário e não-estacionário;

(d) Avaliar a influência do uso de sílica ativa e metacaulim em outras propriedades relacionadas à durabilidade, como avanço da frente de carbonatação, mitigação da reação álcali-agregado e ataque por sulfatos;

(e) Utilizar modelos matemáticos que descrevam a penetração de cloretos no concreto de maneira mais sofisticada, como, por exemplo, o modelo bidimensional apresentado por Val e Trapper (2006);

(f) Analisar experimentalmente o comportamento do fator de envelhecimento do concreto (α) ao longo do tempo quando utilizadas diferentes adições pozolânicas, de forma a estabelecer uma melhor calibração para esse fator que demonstrou acarretar grandes variações nos resultados do modelo analisado;

(g) Avançar em estudos acerca do uso de Indicadores de Durabilidade com vistas à construção de um referencial normativo nacional a respeito do tema, de modo similar ao já adotado em alguns países europeus

(h) Analisar a viabilidade econômica do uso da sílica ativa e do metacaulim em diversos teores, considerando o aumento de custo de produção do concreto e o incremento da vida útil estrutural propiciados pelo emprego dessas adições.

6. REFERÊNCIAS

AL-ALAILY, H., HASSAN, A. A. A., HUSSEIN, A. A. Probabilistic and Statistical Modeling of Chloride-Induced Corrosion for Concrete Containing Metakaolin. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 29 (11), p. 04017205(1)-04017205(10), 2017. doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002062.

ALEXANDER, M. G., SANTHANAM, M., BALLIM, Y. Durability design and specification for concrete structures – the way forward. **International Journal of Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics**, 2 (3), p. 95-105, 2010.

ALEXANDER, M. G. Service life design and modelling of concrete structures – background, developments and implementation. **Revista ALCONPAT**, 8 (3), p. 224-245, 2018. dx.doi.org/10.21041/ra.v8i3.325.

ALEXANDER, M., THOMAS, M. Service life prediction and performance testing – Current developments and practical applications. **Cement and Concrete Research**, 78 (A), p. 155-164, 2015. doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.05.013.

ALMEIDA, F. C. R; SALES, A. **Ação do meio ambiente sobre as estruturas de concreto: efeitos e considerações para projeto**. In: Corrosão e Degradação em Estruturas de Concreto – Teoria, controle e técnicas de análise e intervenção. Rio de Janeiro, Elsevier, 2018.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 201. **ACI Manual of Concrete Practice**. Detroit, 2001.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **C 1202 – Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetrations**. West Conshohocken, ASTM International, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **E 562 – Standard Test Method for Determining Volume Fraction by Systematic Manual Point Count**. West Conshohocken, ASTM International, 2011.

ANDRADE, C. Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements. **Cement and Concrete Research**, 23 (3), p. 724-742, 1993. doi.org/10.1016/0008-8846(93)90023-3.

ANDRADE, C., CASTELLOTE, M., D'ANDREA, R. Chloride Aging Factor of Concrete Measured by Means of Resistivity. **Proceedings of 12th International Conference on Durability of Building Materials and Components**. p. 1-8, 2011.

ANDRADE, C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. São Paulo, Pini, 1986.

ANDRADE, C. Reliability analysis of corrosion onset: initiation limit state. **Journal of Structural Integrity and Maintenance**, 2 (4), p. 200-208, 2017. doi.org/10.1080/24705314.2017.1388693.

ANDRADE, J. J. O., 2001. **Contribuição à previsão de vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: Iniciação por cloretos**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

ANDRADE, T. **Tópicos sobre durabilidade do concreto**. In: Concreto: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo, IBRACON, 2005.

ANG, A. H-S., TANG, W. H. **Probability concepts in engineering – Emphasis on Applications to Civil and Environmental Engineering**. New York, John Wiley & Sons, 2007.

ANGST, U., ELSENER, B., LARSEN, C. K., VENNESLAND, Ø. Critical chloride content in reinforced concrete – A review. **Cement and Concrete Research**, 39 (12), p. 1122-1138, 2009. doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.08.006.

ANGST, U. M. Challenges and opportunities in corrosion of steel in concrete. **Materials and Structures**, 51 (4), p. 1-20, 2018. doi.org/10.1617/s11527-017-1131-6.

ANGST, U. M. Predicting the time to corrosion initiation in reinforced concrete structures exposed to chlorides. **Cement and Concrete Research**, 115 (2019), p. 559-567, 2019. doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.08.007.

ANTONOVICH, V., GOBERIS, S. The effect of different admixtures on the properties of refractory concrete with Portland cement. **Journal of Materials Science**, 9 (4), p. 379-382, 2003.

AQUINO, W., LANGE, D. A., OLEK, J. The influence of metakaolin and silica fume on the chemistry of alkali-silica reaction products. **Cement and Concrete Composites**, 23 (6), p. 485-493, 2001. doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00096-2.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: **Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015 (corrigida em 2016).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: **Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9779: **Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade**. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12653: **Materiais pozolânicos – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2014 (corrigida em 2015).

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13956: **Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta**. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575: **Edificações habitacionais – Desempenho**. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697: **Cimento Portland – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2018.

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

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

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

AUDENAERT, K., YUAN, Q., DE SCHUTTER, G. On the time dependency of the chloride migration coefficient in concrete. **Construction and Building Materials**, 24 (3), p. 396-402, 2010. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.07.003.

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**, 47 (2013), p. 1402-1408, 2013. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.037.

BAMFORTH, P. B. Minimizing the risk of chloride corrosion by selection of concreting material. **3rd International Symposium of Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction**. P. 119-131. 1990.

BANSAL, B. K., CHOUHAN, D. S., GUPTA, T., SHARMA, R. K. Behavior of concrete utilizing metakaoline: A review. **European Journal of Advances in Engineering and Technology**, 4 (7), p. 549-554, 2017.

BARATA, M. S., 1998. **Concreto de alto desempenho no estado do Pará: estudo de viabilidade técnica e econômica de produção de concreto de alto desempenho com materiais disponíveis em Belém através do emprego de adições de sílica ativa e metacaulim**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

BAROGHEL-BOUNY, V. **Concrete design for a given structure service life – Durability management with regard to reinforcement corrosion and alkali-silica reaction – State-of-the-art and guide for the implementation of a predictive performance approach based upon durability indicators**. Paris, AFGC Scientific and Technical Documents. Publicado em francês em 2004; publicado em inglês em 2007.

BAROGHEL-BOUNY, V., KINOMURA, K., THIERY, M., MOSCARDELLI, S. Easy assessment of durability indicators for service life prediction or quality control of concretes with high volumes of supplementary cementitious material. **Cement and Concrete Composites**, 33 (2011), p. 832-847, 2011. doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.04.007.

BAROGHEL-BOUNY, V., NGUYEN, T. Q., DANGLA, P. Assessment and prediction of RC structure service life by means of durability indicators and physical/chemical models. **Cement and Concrete Composites**, 33 (2009), p. 522-534, 2009. doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.01.009.

BASHEER, L., KROPP, J., CLELAND, D. J. Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review. **Construction and Building Materials**, 15 (2-3), p. 93-103, 2001. doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00058-1.

BECK, A. T. **Confiabilidade e segurança das estruturas**. Rio de Janeiro, Elsevier, 2019.

BEUSHAUSEN, H., ALEXANDER, M. G., BASHEER, M., BAROGHEL-BOUNY, V., D'ANDRÉA, R., GONÇALVES, A., GULIKERS, J., JACOBS, F., KHRAPKO, M., MONTEIRO, A. V., NANUKUTTAN, S. V., OTIENO, M., POLDER, R., TORRENT, R. **Principles of the Performance-Based Approach for Concrete Durability**. In: Performance-Based Specifications and Control of Concrete Durability – State-of-the-art Report RILEM TC 230-PSC. New York, Springer, 2016.

BEUSHAUSEN, H., LUCO, L. F. **Performance-Based Specifications and Control of Concrete Durability – State-of-the-Art Report RILEM TC 230-PSC**. New York, Springer, 2016.

BEUSHAUSEN, H., TORRENT, R., ALEXANDER, M. G. Performance-based approaches for concrete durability: State of the art and future research needs. **Cement and Concrete Research**, 19 (2019), p. 11-20, 2019. doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.01.003.

BERTOLINI, L. **Materiais de construção: Patologia, reabilitação e prevenção**. São Paulo, Oficina de Textos, 2010.

BJEGOVIĆ, D., SERDAR, M., OSLAKOVIĆ, I. S., JACOBS, F., BEUSHAUSEN, H., ANDRADE, C., MONTEIRO, A. V., PAULINI, P., NANUKUTTAN, S. **Test Methods for Concrete Durability Indicators**. In: Performance-Based Specifications and Control of Concrete Durability – State-of-the-art Report RILEM TC 230-PSC. New York, Springer, 2016.

BODDY, A., HOOTON, R. D., GRUBER, K. A. Long-term testing of the chloride-penetration resistance of concrete containing high-reactive metakaolin. **Cement and Concrete Research**, 31 (5), p. 759-765, 2001. doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00492-6.

CACERES, D. P. E., ROMANO, R. C. O., JOHN, V. M., CINCOTTO, M. A. Retracción química de pastas de cemento con incorporación de metacaolín. **Ambiente Construído**, 18 (3), p. 327-339, 2018. dx.doi.org/10.1590/s1678-86212018000300284.

CARASEK, H., CASCUDO, O., FERREIRA, R. B., YSSORCHE-CUBAYNES, M. P., OLLIVIER, J. P. L'essai AASHTO T 277 et la protection des bétons contre la corrosion des armatures. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, 15 (1), p. 49-75, 2011. doi.org/10.1080/19648189.2011.9693306.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras de concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. São Paulo, Pini, 1997.

CASCUDO, O. Requisitos de projeto, normalização e execução para estruturas com longa vida útil –

Personalidade Entrevistada. **Revista Concreto e Construções**, 79 (2015), p. 26-40, 2015.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. **Assessment of concrete structures and design procedures for upgrading (redesign)**. Código FIP-CEB, Bulletin d'Information, Paris, 1989.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. **fib Model Code for Service Life Design**. fib Bulletin 34, Lausanne, 2006.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. **Model Code 1990**. London, 1993.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. EN 1990: **Eurocode – Basis of structural design**. Brussels, 2002.

CONG, X., GONG, S., DARWIN, D., McCABE, S. L. **Role of silica fume in compressive strength of cement paste, mortars and concrete**. SL Report 90-2, University of Kansas Structural Engineering and Materials Laboratory, 1990.

DAL MOLIN, D. C. C. **Adições minerais**. In: Concreto: Ciência e tecnologia. São Paulo, IBRACON, 2011.

DUVAL, R., KADRI, E. H. Influence of silica fume on the workability and the compressive strength of high-performance concretes. **Cement and Concrete Research**, 28 (4), p. 533-547, 1998. doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00010-6.

EL-DIADAMONY, H., AMER, A. A., SOKKARY, T. M., EL-HOSENY, S. Hydration and characteristics of metakaolin pozzolanic cement pastes. **Housing and Building National Research Center Journal**, 14 (2), p. 150-158, 2018. doi.org/10.1016/j.hbrcj.2015.05.005.

ENGELUND, S., SØRENSEN, J. D. A probabilistic model for chloride-ingress and initiation of corrosion in reinforced concrete structures. **Structural Safety**, 20 (1), p. 69-89, 1998. doi.org/10.1016/S0167-4730(97)00022-2.

FERREIRA, R. B., 2003. **Influência das adições minerais nas características do concreto de cobrimento e seu efeito na corrosão de armadura induzida por cloreto**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás.

FERREIRA, R. M., GULIKERS, J. Critical considerations on the assessment of the durability (serviceability) limit state of reinforced concrete structures. **Proceedings of 11th International Conference on Durability of Building Materials and Components**. p. 1560-1567, 2008.

FERREIRA, R. M. Optimização da vida útil de estruturas de betão armado: uma nova abordagem. **4ª Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas**. p. 1-16, 2006.

FIGUEIREDO, C. P., SANTOS, F. B., CASCUDO, O., CARASEK, H., CACHIM, P., VELOSA, A. O papel do metacaulim na proteção dos concretos contra a ação deletéria de cloretos. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, 7 (4), p. 685-708, 2014. dx.doi.org/10.1590/S1983-41952014000400008.

FRÍAS, M., ROJAS, M. I. S., CABRERA, J. The effect that the pozzolanic reaction of metakaolin has on the heat evolution in metakaolin-cement mortars. **Cement and Concrete Research**, 30 (2), p. 209-216, 2000. doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00231-8.

GJØRV, O. E. **Projeto de durabilidade de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade**. Trad.: Leda Maria Marques Dias Beck. São Paulo, Oficina de Textos, 2015.

GJØRV, O. E., VENNESLAND, O. Diffusivity of chlorides from seawater into concrete. **Cement and Concrete Research**, 9 (2), p. 229-238, 1979. dx.doi.org/10.1016/0008-8846(79)90029-2.

GOMES, H. M., 2001. **Técnicas de Avaliação da Confiabilidade em Estruturas de Concreto Armado**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

GRUBER, K. A., RAMLOCHAN, T., BODDY, A., HOOTON, R. D., THOMAS, M. D. A. Increasing concrete durability with high-reactivity metakaolin. **Cement and Concrete Composites**, 23 (6), p. 479-484. doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00097-4.

GUIMARÃES, A. T. C., 2000. **Vida útil de estruturas de concreto armado em ambientes marítimos**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade de São Paulo.

GULIKERS, J. Considerations on the reliability of service life predictions using a probabilistic approach. **Journal de Physique IV**, 136 (2006), p. 233-241. dx.doi.org/10.1051/jp4:2006136024.

GURSEL, A. P., MARYMAN, H., OSTERTAG, C. A life-cycle approach to environmental, mechanical, and durability properties of “green” concrete mixes with rice husk ash. **Journal of Cleaner Production**, 112 (1), p. 823-836, 2016. doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.029.

HACKL, J., KOHLER, J. Reliability assessment of deteriorating reinforced concrete structures by representing the coupled effect of corrosion initiation and progression by Bayesian networks. **Structural Safety**, 62 (2016), p. 12-23, 2016. doi.org/10.1016/j.strusafe.2016.05.005.

HALDAR, A., MAHADEVAN, S. **Probability, Reliability and Statistical Methods in Engineering Design**. New York, John Wiley & Sons, 2000.

HASSAN, A. A. A., LACHEMI, M., HOSSAIN, K. M. A. Effect of metakaolin and silica fume on the durability of self-consolidating concrete. **Cement and Concrete Composites**, 34 (6), p. 801-807, 2012. doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.02.013.

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

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

HELENE, P. R. L. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. 4ª Ed. São Paulo, Pini, 1999.

HELENE, P. R. L., GUIGNONE, G., VIEIRA, G., RONCETTI, L., MORONI, F. Avaliação da

penetração de cloretos e da vida útil de concretos autocicatrizantes ativados por aditivo cristalino. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, 11 (3), p. 544-563, 2018. http://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952018000300007.

HELENE, P., TERZIAN, P. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. São Paulo, Pini, 1993.

HINO JÚNIOR, J. R., 2019. **Penetração de cloreto em concretos de diferentes resistências e teores de adição pozolânica a partir da comparação de diferentes normas**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Construção Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná.

IMAM, A., KUMAR, V., SRIVASTAVA, V. Review study towards effect os Silica Fume on the fresh and hardened properties of concrete. **Advances in Concrete Construction**, 6 (2), p. 145-157, 2018. doi.org/10.12989/acc.2018.6.2.145.

ISAIA, G. C., 1995. **Efeitos de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de alto desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade de São Paulo.

JAMIL, M., KAISH, A. B. M. A., RAMAN, S. N., ZAIN, M. F. M. Pozzolanic contribution of rice husk ash in cementitious system. **Construction and Building Materials**, 47 (2013), p. 588-593, 2013. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.088.

JEN, G., STOMPINIS, N., JONES, R. Chloride ingress in a belite-calcium sulfoaluminate cement matrix. **Cement and Concrete Research**, 98 (2017), p. 130-135, 2017. doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.013.

KESSY, J. G., 2013. **Durability specifications for structural concrete – an international comparison**. Master's thesis of Science in Engineering, Faculty of Engineering and Built Environment, University of Cape Town.

KHAN, M. I., SIDDIQUE, R. Utilization of silica fume in concrete: Review of durability properties. **Resources, Conservation and Recycling**, 57 (2011), p. 30-35, 2011. doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.09.016.

KHATRI, R. P., SIRIVIVATNANON, V. Characteristic service life for concrete exposed to marine environments. **Cement and Concrete Research**, 34 (2004), p. 745-752, 2004. doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00086-3.

KONG, J. S., ABABNEH, A. N., FRANGOPOL, D. M., XI, Y. Reliability analysis of chloride penetration in saturated concrete. **Probabilistic Engineering Mechanics**, 17 (3), p. 305-315, 2002. doi.org/10.1016/S0266- 8920(02)00014-0.

KRAJČI, L., MOJUMDAR, S. C., JANOTKA, I., PUERTAS, F., PALACIOS, M., KULIFFAYOVÁ, M. Performance of composites with metakaolin-blended cements. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, 119 (2), p. 851-863, 2015. doi.org/10.1007/s10973-014-4119-2.

KWAN, A. K. H., WONG, H. H. C. Durability of Reinforced Concrete Structures: theory *vs*. practice.

Proceedings of the Hong Kong Government Standing Committee on Concrete Technology Annual Concrete Seminar. p. 1-20. 2005.

LIBERATI, E. A. P., LEONEL, E. D., NOGUEIRA, C. G. Influência da corrosão da armadura na capacidade resistente à flexão de vigas em concreto armado: uma abordagem via teoria da confiabilidade. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, 7 (3), p. 379-413, 2014. dx.doi.org/10.1590/S1983-41952014000300005.

LIU, R., JIANG, L., XU, J. XIONG, C., SONG, Z. Influence of carbonation on chloride-induced reinforced corrosion in simulated concrete pore solutions. **Construction and Building Materials**, 56 (2014), p. 16-20, 2014. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.030.

LORENSINI, R. V., 2006. **Análise probabilística da deterioração de estruturas em concreto armado**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Estruturas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais.

LOVE, C. A., RICHARDSON, I. G., BROUGH, A. R. Composition and structure of C-S-H in white Portland cement - 20% metakaolin pastes hydrated at 25 ºC. **Cement and Concrete Research**, 37 (2), p. 109-117, 2007. doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.11.012.

LOW, B. K., TANG, W. H. Efficient Reliability Evaluation Using Spreadsheet. **Journal of Engineering Mechanics**, 123 (7), p. 749-752, 1997. doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1997)123:7(749).

LOW, B. K., TANG, W. H. Efficient Spreadsheet Algorithm for First-Order Reliability Method. **Journal of Engineering Mechanics**, 133 (12), p. 1378-1387, 2007. doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2007)133:12(1378).

LUPING, T., GULIKERS, J. On the mathematics of time-dependent apparent chloride diffusion coefficient in concrete. **Cement and Concrete Research**, 37 (4), p. 589-595, 2007. doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.01.006.

MAAGE, M., HELLAND, S., POULSEN, E., VENNESLAND, Ø., CARLSEN, J. E. Service life prediction of existing concrete structures exposed to marine environment. **ACI Materials Journal**, 93 (6), p. 1-8, 1996.

MAGALHÃES, FÁBIO C., 2014. **A problemática dos concretos não conformes e sua influência na confiabilidade de pilares de concreto armado**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MAGALHÃES, FELIPE C., 2018. **Proposição de um modelo para a penetração de íons cloreto em concreto: estudo dos parâmetros intervenientes e análise probabilística**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MALHEIRO, R., CAMÕES, A., MEIRA, G., AMORIM, M. T., CASTRO-GOMES, J., FERREIRA, R. M. Behaviour of cementitious matrices subjected to the combined action of chloride ions and carbonation. **Matéria**, 23 (3), p. 1-18, 2018. dx.doi.org/10.1590/s1517-707620180003.0496.

MANGAT, P. S., MOLLOY, B. T. Prediction of long term chloride concentration in concrete. **Materials and Structures**, 27 (1994), p. 338-346, 1994. doi.org/10.1007/BF02473426.

MEDDAH, M. S., ISMAIL, M. A., EL-GAMAL, S., FITRIANI, H. Performances evaluation of binary concrete designed with silica fume and metakaolin. **Construction and Building Materials**, 166 (2018), p. 400-412. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.138.

MEDEIROS, M. H. F., GOBBI, A., GROENWOLD, J. A., HELENE, P. Previsão da vida útil de concreto armado de alta resistência com adição de metacaulim e sílica ativa em ambientes marinhos. **Revista Escola de Minas**, 66 (1), p. 59-65, 2013.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto – Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo, PINI, 2008.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. HASPARYK, N. P. (Ed. Trad.). 2ª Ed. São Paulo, Ibracon, 2014.

MELCHERS, R. E., BECK, A. T. **Structural Reliability Analysis and Prediction**. New Jersey, John Wiley & Sons, 2018.

MENDES, M. V. A. R., 2009. **Avaliação das propriedades de transporte de massa em concretos contendo adições minerais**. Dissertação de Mestrado – Área de Concentração: Construção Civil, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás.

MINDESS, S.; YOUNG, J. F. **Concrete**. Upper Saddle River, Prentice Hall, 1981.

NEPOMUCENO, A. A. **Mecanismos de transporte de fluidos no concreto**. In: Concreto – ensino, pesquisa e realizações. São Paulo, IBRACON, 2005.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Trad.: Ruy Alberto Cremonini. Porto Alegre, Bookman, 2016.

NEVILLE, A. M. Why we have concrete durability problems. **Proceedings of ACI SP-100 International Conference on Concrete Durability**, American Concrete Institute, Detroit, USA, 1987.

NILSSON, L., NGO, M. H., GJØRV, O. High-performance repair materials for concrete structures in the port of Gothenburg. **2nd International Conference on Concrete Under Severe Conditions: Environment and Loading**, p. 1193-1198, 1998.

NOGUEIRA, H. A. T., 2006. **Avaliação da confiabilidade de pilares curtos em concreto armado projetados segundo a NBR 6118:2003**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Estruturas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais.

NORDTEST. NT Build 492: **Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments**. NORDTEST, 1999.

OLLIVIER, J. P.; TORRENTI, J. M. **A estrutura porosa dos concretos e as propriedades de**

transporte. In: Durabilidade do concreto: Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente. CASCUDO, O; CARASEK, H. (Ed. Trad.). São Paulo, IBRACON, 2014.

OSLAKOVIC, I. S., GJEGOVIC, D., MIKULIC, D. Evaluation of service life design models on concrete structures exposed to marine environments. **Materials and Structures**, 43 (10), p. 1397-1412, 2010. doi.org/10.1617/s11527-010-9590-z.

PAIVA, H., SILVA, A. S., VELOSA, A., CACHIM, P., FERREIRA, V. M. Microstructure and hardened state properties on pozzolan-containing concrete. **Construction and Building Materials**, 140 (2017), p. 374-384, 2017. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.120.

PELLIZZER, G. P., 2019. **Sobre a modelagem numérica da difusão de cloretos no concreto: Uma abordagem pelo Método dos Elementos de Contorno com aplicação de modelos de confiabilidade e otimização**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas), Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

POLDER, R. B., PEELEN, W. H. A., COURAGE, W. M. G. Non-traditional assessment and maintenance methods for aging concrete structures – technical and non-technical issues. **Materials and Corrosion**, 63 (12), p. 1147-1153, 2012. doi.org/10.1002/maco.201206725.

POON, C. S., KOU, S. C., LAM, L. Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete. **Construction and Building Materials**, 20 (10), p. 858-865, 2006. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.07.001.

POON, C. S., LAM, L., KOU, S. C., WONG, Y. L., WONG, R. Rate of pozzolanic reaction of metakaolin in high-performance cement pastes. **Cement and Concrete Research**, 31 (9), p. 1301-1306, 2001. doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00581-6.

POSSAN, E., ANDRADE, J. J. O. Markov chains and reliability analysis for reinforced concrete structure service life. **Materials Research**, 17 (3), p. 593-602, 2014. dx.doi.org/10.1590/S1516-14392014005000074.

POSSAN, E., 2010. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

POULSEN, E., MEJLBRO, L. **Diffusion of chloride in concrete – Theory and Application**. Abingdon, Taylor & Francis, 2006.

PRADELLE, S., THIÉRY, M., BAROGHEL-BOUNY, V. Sensitivity analysis of chloride ingress models: Case of concretes immersed in seawater. **Construction and Building Materials**, 136 (2017), p. 44-56, 2017. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.019.

RASHAD, M. M., HESSIEN, M. M., ABDEL-AAL, E. A., EL-BARAWY, K., SINGH, R. K. Transformation of silica fume into chemical mechanical polishing (CMP) nano-slurries for advanced semiconductor manufacturing. **Powder Technology**, 205 (1-3), p. 149-154, 2011. doi.org/10.1016/j.powtec.2010.09.005.

REAL, M. V., 2000. **Análise probabilística de estruturas de concreto armado, sob estado plano de tensão, através do Método dos Elementos Finitos**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

RIBEIRO, D. V. **Estrutura dos poros e mecanismos de transporte no concreto**. In: Corrosão e Degradação em Estruturas de Concreto – Teoria, controle e técnicas de análise e intervenção. Rio de Janeiro, Elsevier, 2018.

RIBEIRO, D. V.; CASCUDO, O. **Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto**. In: Corrosão e Degradação em Estruturas de Concreto – Teoria, controle e técnicas de análise e intervenção. Rio de Janeiro, Elsevier, 2018.

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. doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.09.002.

RYAN, P. C., O'CONNOR, A. J. Probabilistic analysis of the time to chloride induced corrosion for different Self-Compacting Concretes. **Construction and Building Materials**, 47 (2013), p. 1106-1116, 2013. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.110.

SAASSOUH, B., LOUNIS, Z. Probabilistic modeling of chloride-induced corrosion in concrete structures using first- and second-order reliability methods. **Cement and Concrete Composites**, 34 (9), p. 1082-1093, 2012. doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.05.001.

SABIR, B. B., WILD, S., BAI, J. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. **Cement and Concrete Composites**, 23 (6), p. 441-454, 2001. doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00092-5.

SAGRILO, L. V. S., 1994. **Análise da confiabilidade estrutural utilizando os métodos analíticos FORM e SORM**. Tese de Doutorado em Engenharia, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

SANTIAGO, W. C., 2011. **Estudo da (Não-)Conformidade de Concretos Produzidos no Brasil e sua Influência na Confiabilidade Estruturas**. Dissertação de Mestrado em Estruturas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

SATO, N. M. N., 1998. **Análise da porosidade e de propriedades de transporte de massa em concretos**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo.

SCRIVENER, K. L., JUILLAND, P., MONTEIRO, P. J. M. Advances in understanding hydration of Portland cement. **Cement and Concrete Research**, 78 (Part A), p. 38-56, 2015. doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.05.025.

SHEKARCHI, M., RAFIEE, A., LAYSSI, H. Long-term chloride diffusion in silica fume concrete in harsh marine climates. **Cement and Concrete Composites**, 31 (10), p. 769-775, 2009. doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.08.005.

SHI, X., XIE, N., FORTUNE, K., GONG, J. Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview. **Construction and Building Materials**, 30 (2012), p. 125-138, 2012. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.038.

SIDDIQUE, R., KLAUS, J. Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review. **Applied Clay Science**, 43 (3-4), p. 392-400, 2009. doi.org/10.1016/j.clay.2008.11.007.

SIDDIQUE, R. Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties. **Resources, Conservation and Recycling**, 55 (11), p. 923-932, 2011. doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.06.012.

SILVA, D. R., 2006. **Estudo de inibidores de corrosão em concreto armado, visando a melhoria na sua durabilidade**. Tese de Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

SONG, H., PACK, S., NAM, S., JANG, J., SARASWATHY, V. Estimation of the permeability of silica fume cement concrete. **Construction and Building Materials**, 24 (3), p. 315-321, 2010. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.033.

SONG, L., SUN, W., GAO, J. Time Dependent Chloride Diffusion Coefficient in Concrete. **Journal of Wuhan University of Technology – Material Science Edition**, 28 (2), p. 314-319, 2013. doi.org/10.1007/s11595-013-0685-6.

SRIVASTAVA, V., KUMAR, R., AGARWAL, V. C., MEHTA, P. K. Effect of Silica Fume and Metakaolin combination on concrete. **International Journal of Civil and Structural Engineering**, 2 (3), p. 893-900, 2012. doi.org/10.6088/ijcser.00202030017.

STANISH, K., THOMAS, M. The use of bulk diffusion tests to establish time-dependent concrete chloride diffusion coefficients. **Cement and Concrete Research**, 33 (1), p. 55-62, 2003. doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00925-0.

TANG, L. Concentration dependence of diffusion and migration of chloride ions: Part 2. Experimental evaluations. **Cement and Concrete Research**, 29 (9), p. 1469-1474, 1999. doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00120-9.

TANG, L., 1996. **Chloride transport in concrete – Measurement and prediction**. Doctoral thesis, Dept. of Building Materials, Chalmers Universities of Technology, Gothernburg.

TEODORO, R., 2016. **Avaliação das características de diferentes metacaulins e sua influência na estrutura interna do concreto e em propriedades ligadas à durabilidade**. Dissertação de Mestrado – Área de Concentração: Construção Civil, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás.

TITELLO, E. P., REAL, M. V. **Método de Monte Carlo com amostragem por importância para análise de estruturas**. Rio Grande, Universidade Federal do Rio Grande, 2017.

THIERY, M., CREMONA, C., BAROGHEL-BOUNY, V. Application of the reliability theory to the assessment of carbonation-induced corrosion risk of rebars. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, 16 (3-4), p. 273-287, 2012. doi.org/10.1080/19648189.2012.667987.

THOMAS, M. D. A., BAMFORTH, P. B. Modelling chloride diffusion in concrete: Effect of fly ash and slag. **Cement and Concrete Research**, 29 (1999), p. 487-495, 1999. doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00192-6.

TORRENT, R., D'ANDRÉA, R., GONÇALVES, A., JACOBS, F., IMAMOTO, K., KANELLOPOULOS, A., KHRAPKO, M., MONTEIRO, A. V., NANUKUTTAN, S. **Prescriptive Durability Specifications**. In: Performance-Based Specifications and Control of Concrete Durability – State-of-the-art Report RILEM TC 230-PSC. New York, Springer, 2016.

TRINDADE, G. H., 2015. **Influência da incorporação de cinza da casca do arroz e sílica ativa no cimento Portland frente à reação álcali-sílica: desenvolvimento de uma nova proposta de método para avaliação da RAS em materiais suplementares ao cimento Portland**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

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

VAL, D. V., TRAPPER, P. A. **Probabilistic evaluation of time to corrosion initiation in RC elements exposed to chlorides: 2-D modelling**. In: Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Performance and Cost. London, Taylor & Francis Group, 2006.

VERA, G. de, ANTÓN, C., LÓPEZ, M. P., CLIMENT, M. A. Depassivation time estimation in reinforced concrete structures exposed to chloride ingress: A probabilistic approach. **Cement and Concrete Composites**, 79 (2017), p. 21-33, 2017. dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.12.012.

WEERDT, K., LOTHENBACH, B., GEIKER, M. R. Comparing chloride ingress from seawater and NaCl solution in Potland cement mortars. **Cement and Concrete Research**, 115 (2019), p. 80-89, 2019. doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.09.014.

WILD, S., KHATIB, J. M., JONES, A. Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete. **Cement and Concrete Research**, 26 (10), p. 1537-1544, 1996. doi.org/10.1016/0008-8846(96)00148-2.

YUAN, Q., SANTHANAM, M. **Test Methods for Chloride Transport in Concrete**. In: Performance of Cement-Based Materials in Aggressive Aqueous Environments – State-of-the-art Report RILEM TC 211-PAE. New York, Springer, 2013.

YU, B., NING, C., LI, B. Probabilistic durability assessment of concrete structures in marine environments: reliability and sensitivity analysis. **China Ocean Engineering**, 31 (1), p. 63-73, 2017. doi.org/10.1007/s13344-017-0008-3.

ZHUO, Z., FENG, X., DAWANG, L. Stochastic durability analysis of pre-stressed concrete structure under marine environment. **Proceedings of 2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering**, p. 765-767, 2010.