

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

AVALIAÇÃO DA PENETRABILIDADE DE CLORETOS NO CONCRETO: INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE DOSAGEM E SENSIBILIDADE DOS MÉTODOS DE ENSAIO

por

Leonardo Ramos Wiprich Campos

Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Oceânica

Abril de 2026

Dissertação - PPGEO – FURG

Leonardo Ramos Wiprich Campos

Mestre em Engenharia Oceânica

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 para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

gov.br Documento assinado digitalmente
CRISTOFER HOOD MARQUES
Data: 18/05/2026 10:09:50-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Cristofer Hood Marques
Coordenador do PPGEO

Banca examinadora:

gov.br Documento assinado digitalmente
FABIO COSTA MAGALHÃES
Data: 15/04/2026 16:10:49-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

.....

Prof. Dr. Fábio Costa Magalhães
Orientador — FURG/PPGEO

gov.br Documento assinado digitalmente
MAURO DE VASCONCELLOS REAL
Data: 15/04/2026 20:07:52-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

.....

Prof. Dr. Mauro de Vasconcellos Real
Membro Interno — FURG/PPGEO

tuid
FIRMA DIGITAL
Maria Noel Pereyra Dominguez

.....

Profa. Dra. María Noel Pereyra Domínguez
Membro Externo — UDELAR

gov.br Documento assinado digitalmente
LEANDRO CANDIDO DE LEMOS PINHEIRO
Data: 15/04/2026 18:08:59-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

.....

Prof. Dr. Leandro Candido de Lemos Pinheiro
Membro Externo — IFRS

Rio Grande, 15 de abril de 2026

C198a

Campos, Leonardo Ramos Wiprich
Avaliação da penetrabilidade de cloretos no concreto: influência dos parâmetros de dosagem e sensibilidade dos métodos de ensaio / Leonardo Ramos Wiprich Campos. - 2026.
92f.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, 2026.

Orientador: Dr. Fábio Costa Magalhães

1. Engenharia Oceânica. 2. Concreto. 3. Durabilidade. 4. Penetração de cloretos. 5.Dosagem. I.Magalhães, Fábio Costa. II. Título.

CDU 62(26)

Catalogação na fonte: Bibliotecária Brenda Sequeira CRB10/1979

"O homem teme o tempo, mas o tempo teme as pirâmides."

ANTIGO PROVÉRBIO ÁRABE

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha sincera gratidão ao Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção Civil (LEMCC), do Instituto Federal do Rio Grande do Sul (IFRS), na cidade de Rio Grande, bem como à Universidade Federal do Rio Grande (FURG), pela inestimável contribuição e pelo apoio ao longo da minha jornada na pós-graduação, em nível de mestrado, em Engenharia Oceânica. A infraestrutura disponibilizada e os recursos oferecidos foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Registro, também, meu especial reconhecimento à Prof.ª Dr.ª Flávia Mattos, cuja orientação inicial e incentivo foram determinantes para a decisão de ingressar no mestrado em Engenharia Oceânica. Sua trajetória acadêmica no mesmo curso e instituição, aliada ao apoio e ao encorajamento oferecidos, teve papel fundamental no início desta jornada.

Manifesto, ainda, meu apreço à Facultad de Ingeniería da Universidad de la República (FING-UDELAR), de Montevidéu, Uruguai, pela calorosa receptividade durante o período de mobilidade acadêmica, que representou uma etapa enriquecedora na minha formação. Em especial, expresso meu reconhecimento à Prof.ª Dr.ª Maria Noel Pereyra e à Prof.ª Dr.ª Patrícia Vila, pela orientação dedicada, pelo apoio constante e pela generosidade com que compartilharam seus conhecimentos e experiências ao longo dessa jornada.

Ademais, registro meus mais sinceros agradecimentos à engenheira civil Rita Oliveira, também mestranda no mesmo curso, que atuou como colega dedicada e colaboradora incansável ao longo de todos os ensaios realizados para esta dissertação, bem como durante o período de mobilidade acadêmica na FING-UDELAR. Sua presença constante e seu apoio técnico e pessoal foram fundamentais para o progresso e o êxito deste trabalho e, de maneira geral, para toda a minha trajetória no curso e na redação desta dissertação.

Agradeço, ainda, à CAPES, pelo suporte financeiro e pelo incentivo contínuo à pesquisa e ao avanço acadêmico, sem os quais esta conquista não teria sido possível.

Por fim, manifesto um agradecimento especial ao Prof. Dr. Fábio Magalhães, cuja orientação experiente e dedicada foi essencial para a realização dos meus objetivos acadêmicos e profissionais. A todos estes, meu mais profundo reconhecimento e apreço por suas contribuições inestimáveis

RESUMO

A preocupação com a durabilidade das estruturas de concreto armado tem se intensificado, sobretudo em ambientes sujeitos à ação de íons cloreto, cuja penetração está diretamente associada ao início do processo de corrosão das armaduras. Nesse contexto, o presente trabalho tem por objetivo avaliar a influência de parâmetros de dosagem — em especial a relação água/aglomerante e a incorporação de adições minerais e aditivo cristalizante — sobre a penetrabilidade de cloretos no concreto, bem como analisar a sensibilidade de diferentes métodos de ensaio na caracterização desse fenômeno. Para tanto, foi desenvolvido um programa experimental composto por doze traços de concreto, produzidos com relações água/aglomerante de 0,45 e 0,55, incluindo combinações com metacaulim, sílica de casca de arroz e aditivo cristalizante. Os concretos foram avaliados por meio dos ensaios de resistência à compressão axial, absorção de água por capilaridade, resistividade elétrica (volumétrica e superficial) e, com destaque, pelo ensaio de migração de cloretos em regime não estacionário (NT Build 492), utilizado para a determinação do coeficiente de migração iônica. Com base nos resultados experimentais, procedeu-se à análise probabilística da vida útil, considerando a variabilidade dos parâmetros envolvidos no processo de penetração de cloretos; para isso, foram adotados cenários representativos de exposição, com cobrimento de 50 mm, concentrações superficiais de cloretos de 2,00% e 4,00% e temperatura média de 18 °C, sendo a vida útil caracterizada a partir do tempo associado a uma probabilidade de falha de 10%. Os resultados indicam que os parâmetros de dosagem exercem influência significativa sobre a penetrabilidade de cloretos, evidenciada pela redução dos coeficientes de migração e pelo aumento da resistividade elétrica em concretos com menor relação água/aglomerante e com incorporação de adições minerais; em contrapartida, o ensaio de resistência à compressão demonstrou baixa sensibilidade às variações de dosagem, confirmando sua limitação como indicador de durabilidade. Adicionalmente, verificou-se que concretos com a mesma classe de resistência podem apresentar desempenhos significativamente distintos quanto à vida útil estimada, o que reforça a inadequação de abordagens exclusivamente baseadas em parâmetros prescritivos. Dessa forma, evidencia-se a importância da utilização de indicadores de durabilidade diretamente relacionados aos mecanismos de transporte de agentes agressivos, bem como da adoção de abordagens baseadas no desempenho, aliadas a métodos probabilísticos, na avaliação da durabilidade do concreto, contribuindo para o aprimoramento de práticas de projeto voltadas à estimativa mais realista da vida útil de estruturas expostas a ambientes agressivos.

Palavras-chave: concreto, durabilidade, penetração de cloretos, dosagem.

ABSTRACT

Concerns about the durability of reinforced concrete structures have been growing, especially in environments exposed to chloride ions, whose ingress is directly linked to the onset of reinforcement corrosion. In this context, this study aims to assess how mix design parameters—particularly the water-to-binder ratio and the use of mineral additions and a crystalline admixture—affect chloride penetrability in concrete, as well as to evaluate how sensitive different testing methods are in capturing this behavior. To do so, an experimental program was carried out using twelve concrete mixes with water-to-binder ratios of 0.45 and 0.55, including combinations with metakaolin, rice husk ash, and a crystalline admixture. The concretes were tested for compressive strength, water absorption by capillary action, and electrical resistivity (both bulk and surface), with particular emphasis on the non-steady-state chloride migration test (NT Build 492), used to determine the ionic migration coefficient. Based on the experimental results, a probabilistic service life analysis was performed, accounting for the variability of the parameters involved in chloride ingress. Representative exposure conditions were considered, including a 50 mm cover depth, surface chloride concentrations of 2.00% and 4.00%, and an average temperature of 18 °C, with service life defined as the time corresponding to a 10% probability of failure. The results show that mix design parameters have a significant impact on chloride penetrability, as reflected by lower migration coefficients and higher electrical resistivity in concretes with lower water-to-binder ratios and with mineral additions. On the other hand, compressive strength testing showed limited sensitivity to changes in mix design, confirming its limitations as a durability indicator. It was also observed that concretes with the same strength class can exhibit markedly different estimated service lives, highlighting the shortcomings of approaches based solely on prescriptive parameters. Overall, the findings emphasize the importance of using durability indicators that are directly tied to transport mechanisms, as well as adopting performance-based approaches combined with probabilistic methods for evaluating concrete durability, ultimately supporting more reliable service life predictions for structures exposed to aggressive environments.

Keywords: concrete, durability, chloride penetration, mix design.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO 17
1.1. Considerações iniciais 17
1.2. Justificativa 18
1.3. Objetivos 19
1.3.1. Objetivo geral 19
1.3.2. Objetivos específicos 19
1.4. Delimitações 19
1.5. Estrutura do trabalho 20
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 21
2.1. O processo de deterioração do concreto armado 21
2.2. Durabilidade e vida útil do concreto armado 23
2.2.1. Durabilidade do concreto armado em ambientes marinhos 25
2.2.2. Transporte de agentes agressivos no concreto 26
2.3. Métodos de avaliação da durabilidade do concreto armado 28
2.3.1. Abordagem baseada no desempenho via Indicadores de Durabilidade 30
2.3.2. Indicadores de durabilidade e a estimativa da penetração de cloretos no concreto 33
2.4. Implicações das adições minerais e cristalizantes na vida útil do concreto 34
2.5. Estimativa de vida útil e confiabilidade estrutural 36
3. METODOLOGIA 40
3.1. Materiais 40
3.1.1. Cimento Portland 40
3.1.2. Agregado miúdo 41
3.1.3. Agregado graúdo 43
3.1.4. Adições minerais 44
3.1.5. Aditivo cristalizante 45
3.1.6. Aditivo plastificante 46
3.1.7. Água 46
3.2. Dosagens dos concretos e condicionamento das amostras 47
3.3. Indicadores de Durabilidade 49
3.3.1. Resistência mecânica à compressão axial 50
3.3.2. Absorção de água por capilaridade 50
3.3.3. Determinação do coeficiente de migração 52

3.3.4. Resistividade elétrica volumétrica (Bulk) 56
3.3.5. Resistividade elétrica superficial (método de Wenner) 58
3.4. Análise probabilística 58
4. RESULTADOS 62
4.1. Resistência à compressão 62
4.2. Absorção de água por capilaridade 65
4.3. Coeficiente de migração de cloretos no regime não estacionário 68
4.4. Resistividade elétrica volumétrica (Bulk) 76
4.5. Resistividade elétrica superficial (método de Wenner) 79
4.6. Vida útil característica 82
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS 85
5.1. Principais conclusões 85
5.2. Sugestões para trabalhos futuros 87
6. REFERÊNCIAS 88

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Fundamentos do dimensionamento de estruturas de concreto armado orientado por desempenho (Fonte: Adaptado de Beushausen *et al*., 2016. Traduzido pelo autor). 31
Figura 2.2 - 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). 38
Figura 3.1 - Curva granulométrica da areia fina (Fonte: Autor). 42
Figura 3.2 - Curva granulométrica da areia média (Fonte: Autor). 43
Figura 3.3 - Curva granulométrica do agregado graúdo (Fonte: Autor). 44
Figura 3.4 - Corpos de prova recém desmoldados, instantes antes de serem submergidos no tanque de cura (Fonte: Autor). 48
Figura 3.5 - Esquema de corte dos corpos de prova (dimensões em mm) (Fonte: Autor). 49
Figura 3.6 - Realização do ensaio de resistência à compressão axial (Fonte: Autor). 50
Figura 3.7 - Realização do ensaio de absorção de água por capilaridade (Fonte: Autor). 51
Figura 3.8 - Esquema do ensaio prescrito pela NT Build 492 (Fonte: Adaptado de NT Build 492 (NORDTEST, 1999). Traduzido pelo autor). 52
Figura 3.9 - Equipamento utilizado para realização do ensaio NT Build 492:1999 (Fonte: Autor). 53
Figura 3.10 - Amostra de concreto após aspersão da solução de nitrato de prata (Fonte: Autor). 54
Figura 3.11 - 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). 54
Figura 3.12 – Esquematização do ensaio de resistividade volumétrica (Fonte: Autor). 57
Figura 3.13 – Esquematização do ensaio de resistividade superficial (Fonte: Autor). 58
Figura 4.1 - Resistência à compressão dos concretos aos 7 dias de idade (Fonte: Autor). 62
Figura 4.2 - Resistência à compressão dos concretos aos 28 dias de idade (Fonte: Autor). 63
Figura 4.3 - Resistência à compressão dos concretos aos 180 dias de idade (Fonte: Autor). 64
Figura 4.4 - Absorção de água por capilaridade nos concretos ag/agl = 0,45 (Fonte: Autor). 66
Figura 4.5 - Absorção de água por capilaridade nos concretos ag/agl = 0,55 (Fonte: Autor). 66
Figura 4.6 - Coeficiente de migração de cloretos aos 28 dias (Fonte: Autor). 68
Figura 4.7 - coeficiente de migração de cloretos aos 56 dias (Fonte: Autor). 70
Figura 4.8 - coeficiente de migração de cloretos aos 180 dias (Fonte: Autor). 71
Figura 4.9 - Fator de envelhecimento (α) obtido a partir da linearização dos coeficientes de migração em escala logarítmica para todas as misturas analisadas. 74
Figura 4.10 - Fator de envelhecimento (α) obtido a partir da linearização dos coeficientes de migração em escala logarítmica para todas as misturas analisadas. 74
Figura 4.11 - Resistividade elétrica volumétrica aos 28 dias (Fonte: Autor). 76
Figura 4.12 - Resistividade elétrica volumétrica aos 56 dias (Fonte: Autor). 77
Figura 4.13 - Resistividade elétrica volumétrica aos 180 dias (Fonte: Autor). 78
Figura 4.14 - Resistividade elétrica superficial aos 28 dias (Fonte: Autor). 79
Figura 4.15 - Resistividade elétrica superficial aos 56 dias (Fonte: Autor). 80
Figura 4.16 - Resistividade elétrica superficial aos 180 dias (Fonte: Autor). 81

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Características do cimento Portland utilizado. 41
Tabela 3.2. Características físicas do agregado miúdo. 42
Tabela 3.3. Características físicas do agregado graúdo. 43
Tabela 3.4. Características físicas e químicas das adições minerais utilizadas. 45
Tabela 3.5. Características físicas e químicas do aditivo cristalizante. 46
Tabela 3.6. Concretos produzidos e consumo de material (em kg/m^3 de concreto). 47
Tabela 3.7. Tensão imposta e tempo de duração do ensaio prescrito pela NT Build 492:1999. 53
Tabela 3.8. Classificação dos concretos quanto à difusividade. 55
Tabela 3.9. Variáveis aleatórias utilizadas na avaliação probabilística. 60
Tabela 4.1- Fator de envelhecimento (α) e coeficiente de determinação ($R2$). 73
Tabela 4.2 - Vida útil característica (em anos). 82

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Latinas

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

R	Constante universal dos gases
$R(x,t)$	Resistência da estrutura
$S(t)$	Solicitações à estrutura
T	Temperatura
U	Voltagem
V	Velocidade
V_f	Vazão de escoamento do fluido
dC/dL	Gradiente de concentração
erf	Função de erro de Gauss
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
k_e	Influência da temperatura na difusão
pH	Potencial hidrogeniônico
r	Raio capilar
t	Tempo
t_k	Vida útil característica
t_0	Idade do concreto ao ser medido o coeficiente D_0
t'	Idade do concreto ao ser exposto ao cloreto
x_c	Cobrimento da armadura
x_p	Profundidade média da penetração de cloretos
y	Massa específica da água

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
σ	Desvio padrão

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	*American Concrete Institute*
ag/agl	Relação água/aglomerante do concreto
ALCONPAT	*Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construción*
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
CT	Comitê Técnico
CZ	Cristalizante
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
RHS	Sílica de casca de arroz
SF	Sílica ativa
VBA	*Visual Basics for Applications*
VUP	Vida útil de projeto
ZTN	Zona totalmente de névoa

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações iniciais

No atual cenário normativo brasileiro, a NBR 6118 (2023) apresenta o procedimento para o projeto de estruturas de concreto. Contudo, com relação à durabilidade das estruturas de concreto, a NBR 6118 (2023) é majoritariamente prescritiva — ou seja, considera que o atendimento a valores limite impostos a alguns parâmetros (com resistência à compressão, consumo de cimento, relação água/cimento e espessura da camada de cobrimento) é suficiente para assegurar o cumprimento da vida útil das estruturas. Essa abordagem tem sido amplamente empregada no estabelecimento de requisitos mínimos de projeto e execução, especialmente em função de sua simplicidade de aplicação e consolidação normativa.

Paralelamente à abordagem prescritiva, tem-se desenvolvido o conceito baseado no desempenho, no qual a avaliação da durabilidade é realizada por meio da determinação direta de propriedades relacionadas ao comportamento do concreto frente aos mecanismos de deterioração. De acordo com Wally *et al.* (2021), há uma crescente discussão sobre a incorporação de abordagens baseadas no desempenho no projeto de estruturas de concreto com maior durabilidade, especialmente em condições mais severas de exposição. Nesse contexto, as especificações prescritivas, amplamente consolidadas na prática de engenharia, podem ser complementadas por metodologias que considerem de forma mais explícita a interação entre os materiais e o ambiente ao longo do tempo. Assim, as abordagens baseadas no desempenho, ao incorporarem ensaios específicos voltados à avaliação do potencial de durabilidade, vêm ganhando relevância por possibilitarem uma análise mais abrangente do comportamento do concreto frente às condições de exposição

A problemática da durabilidade está diretamente ligada ao ataque de cloretos, de dióxido de carbono e de sulfatos, de forma que tais agentes agressivos penetram no concreto por meio dos poros naturais à estrutura. Portanto, para garantir que determinado concreto tenha características adequadas à agressividade do ambiente, é necessário recorrer a ensaios cuja finalidade seja avaliar a penetrabilidade de agentes agressivos no material. Logo, os ensaios de penetrabilidade de cloretos deverão ser os mais adequados para a avaliação da durabilidade do concreto em ambientes marinhos. Cabe mencionar, de forma complementar, que processos deletérios de origem interna, como a reação álcali-sílica, também podem comprometer a durabilidade do concreto; entretanto, tais mecanismos não constituem objeto de análise neste estudo.

Como já citado, os métodos de análise da penetrabilidade de cloretos no concreto são

fundamentais para avaliar a durabilidade das estruturas, especialmente em ambientes agressivos, como zonas marítimas. Dentre as principais técnicas utilizadas, destaca-se o NT Build 492:1999, ensaio que mede a migração de cloretos sob a aplicação de um campo elétrico e permite uma quantificação mais rápida da resistência à penetração desses íons no concreto quando comparado a outros métodos, como UNE 83987:2014 e ASTM (2012) (Sell Junior *et al.*, 2021). Esse método é amplamente adotado em estudos de durabilidade devido à sua eficiência em condições aceleradas.

A absorção de água por capilaridade, por sua vez, conforme a NBR 9779:2012, é amplamente empregada como indicador indireto da permeabilidade do concreto, sendo frequentemente utilizada como parâmetro complementar na análise da facilidade de ingresso de agentes agressivos. Esse ensaio avalia a ascensão de água pelos poros do material, estando diretamente relacionado à facilidade de ingresso de cloretos e outros agentes agressivos na matriz cimentícia.

De maneira análoga, o ensaio de resistividade elétrica, baseado no método de Wenner, está diretamente associado à capacidade do concreto de dificultar o transporte de íons e de umidade em seu interior. Trata-se de um método não destrutivo, de rápida execução, que possibilita avaliações in loco da qualidade do concreto quanto à sua durabilidade.

Apesar de se basearem em princípios distintos, esses métodos são complementares, permitindo uma avaliação mais abrangente da capacidade do concreto de resistir à penetração de cloretos, aspecto fundamental para a estimativa da vida útil de estruturas de concreto armado expostas a ambientes agressivos

1.2. Justificativa

Os ensaios de penetrabilidade de cloretos, conforme já mencionado, tendem a ser os mais adequados para a avaliação e estimativa da durabilidade do concreto em ambientes marinhos, uma vez que estão diretamente relacionados aos mecanismos de ingresso de agentes agressivos responsáveis pela iniciação dos processos de deterioração.

Nesse contexto, o presente estudo tem como foco a análise comparativa da sensibilidade dos diferentes métodos de ensaio – compressão axial, NT Build 492:1999, absorção de água por capilaridade e resistividade elétrica volumétrica e superficial – frente a variações nos parâmetros de dosagem. Busca-se, assim, compreender o grau de resposta de cada técnica às mudanças na composição do concreto, de modo a evidenciar as limitações de abordagens exclusivamente prescritivas e reforçar a importância da adoção de uma abordagem baseada no desempenho como complemento à prática normativa vigente.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo geral

A pesquisa tem por objetivo avaliar a sensibilidade dos métodos de avaliação da penetrabilidade de cloretos frente às variações nos parâmetros de dosagem dos concretos, considerando, especialmente, a influência da relação água/aglomerante, da incorporação de adições minerais e da utilização de aditivo cristalizante.

1.3.2. Objetivos específicos

Avaliar a influência da relação água/aglomerante (0,45 e 0,55) na penetrabilidade de cloretos em concretos com diferentes composições;

Investigar o efeito da incorporação de adições minerais (metacaulim e sílica de casca de arroz) e de aditivo cristalizante nas propriedades relacionadas à durabilidade do concreto;

Determinar e analisar o coeficiente de migração de cloretos em regime não estacionário, por meio do ensaio prescrito pela norma NT Build 492:1999 (NORDTEST), comparando os diferentes traços de concreto;

Avaliar a sensibilidade dos ensaios de resistência à compressão, absorção de água por capilaridade e resistividade elétrica (volumétrica e superficial) frente às variações nos parâmetros de dosagem;

Comparar o desempenho dos diferentes indicadores de durabilidade quanto à sua capacidade de representar a resistência do concreto à penetração de cloretos;

Estimar a vida útil dos concretos produzidos por meio de análise probabilística, considerando distintos cenários de exposição a cloretos;

Analisar a relação entre os parâmetros de dosagem, os indicadores de durabilidade e a vida útil estimada, à luz de abordagens baseadas no desempenho.

1.4. Delimitações

Esta pesquisa apresenta como delimitações: (1) a avaliação das substituições de cimento Portland por sílica de casca de arroz, metacaulim e cristalizante nos teores de 5%, 5% e 2 % respectivamente; (2) a produção de concretos com relação água/aglomerante 0,45 e 0,55; (3) a análise do coeficiente de migração 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.

1.5. Estrutura do trabalho

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos. O primeiro, correspondente à seção atual, apresenta as considerações iniciais sobre o tema, incluindo os objetivos, as delimitações do estudo e as limitações enfrentadas durante a pesquisa. Em seguida, o segundo capítulo desenvolve uma revisão bibliográfica abrangente, abordando os conceitos essenciais para a compreensão da metodologia e da análise dos resultados, com ênfase na durabilidade e vida útil de estruturas de concreto armado, na importância das adições minerais na composição do concreto, nos métodos de avaliação com base no desempenho e nos fundamentos de confiabilidade aplicados à estimativa da vida útil estrutural. Na sequência, o terceiro capítulo descreve de forma detalhada a metodologia empregada, com destaque para os procedimentos do programa experimental e para os parâmetros considerados na análise de confiabilidade. Posteriormente, o quarto capítulo apresenta os resultados obtidos por meio da abordagem proposta, além de discutir criticamente os dados encontrados. Por fim, o quinto capítulo reúne as considerações finais, sintetizando as principais conclusões do estudo e apontando direções para investigações futuras na área.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão da literatura abordando temas relevantes para o desenvolvimento do estudo, incluindo a durabilidade e a vida útil de estruturas em concreto armado, o comportamento dessas estruturas em ambientes de elevada agressividade – em especial em ambientes costeiros, nos quais ocorrem, majoritariamente, ataques por cloretos – os efeitos da incorporação de adições minerais na durabilidade do concreto, os fundamentos da avaliação da qualidade do concreto com base no desempenho, bem como a utilização de métodos probabilísticos e da teoria da confiabilidade na estimativa da vida útil das estruturas

2.1. O processo de deterioração do concreto armado

Em ambientes litorâneos, a deterioração de estruturas de concreto armado está fortemente associada à penetração de íons cloreto, constituindo um dos mecanismos mais relevantes de degradação ao longo da vida útil. Esses íons ingressam na matriz cimentícia principalmente por difusão e absorção capilar, migrando através da rede de poros até atingirem a armadura. Ao alcançarem a superfície do aço, os cloretos promovem a ruptura da película passiva mantida pelo elevado pH do concreto, desencadeando o processo de corrosão eletroquímica.

A partir desse ponto, o processo corrosivo passa a comprometer progressivamente a integridade do sistema estrutural. A formação de produtos de corrosão, com volume superior ao do aço original, gera tensões internas que induzem a fissuração do concreto de cobrimento. Esse fenômeno reduz tanto a capacidade resistente do aço à tração quanto a do concreto à compressão, além de favorecer a intensificação do ingresso de agentes agressivos. Como consequência, observa-se uma evolução contínua da deterioração, caracterizada pela perda de seção das armaduras, destacamento do cobrimento e, em estágios mais avançados, pela possibilidade de ruína estrutural.

É importante destacar que a degradação do concreto armado raramente ocorre por meio de um único mecanismo isolado. Em condições reais de exposição, diferentes processos podem atuar de forma simultânea ou sinérgica, ampliando a complexidade do fenômeno. Nesse sentido, a interação entre a penetração de cloretos e outros mecanismos, como a carbonatação, pode intensificar significativamente o avanço da deterioração, conforme evidenciado por Folić *et al.* (2024). Essa sobreposição de processos reforça a necessidade de compreender a durabilidade como um fenômeno multifatorial, fortemente dependente das condições ambientais e das características do material.

Sob essa perspectiva, a durabilidade do concreto pode ser entendida como a capacidade da estrutura de manter seu desempenho ao longo do tempo, mesmo quando submetida às condições de

exposição previstas em projeto. Essa definição está alinhada com a NBR 6118 (ABNT, 2014) e é complementada pelo código FIP-CEB (1989), que associa a durabilidade à manutenção do desempenho estrutural durante uma vida útil previamente estabelecida. Dessa forma, a durabilidade deixa de ser interpretada apenas como resistência ao tempo, passando a incorporar explicitamente a interação entre material, ambiente e desempenho estrutural.

Apesar dos avanços nas tecnologias de materiais e nos métodos de projeto, a penetração de cloretos permanece como uma das principais causas de deterioração de estruturas de concreto armado. Esse mecanismo está diretamente associado à fissuração do concreto, ao estufamento das armaduras e à redução da capacidade resistente do sistema estrutural (Gjørv, 2008). Além disso, a presença de níveis críticos de cloretos, especialmente em concretos fissurados, tende a acelerar o processo corrosivo, favorecendo a progressão da degradação ao longo do tempo (Alleguan *et al.*, 2018).

A relevância desse problema torna-se ainda mais evidente quando se considera a ampla utilização do concreto na construção civil, especialmente em obras de infraestrutura (Bansal *et al*., 2017). Paralelamente, a evolução das técnicas construtivas tem conduzido à concepção de estruturas mais esbeltas, frequentemente associadas a menores cobrimentos das armaduras, o que pode aumentar a suscetibilidade à penetração de agentes agressivos (Ribeiro e Cascudo, 2018). Esse cenário é corroborado por evidências observadas em campo, nas quais diversas estruturas apresentam sinais de deterioração precoce. Como exemplo, aproximadamente 9,1% das pontes em operação nos Estados Unidos são classificadas como estruturalmente deficientes, com custos de reparo estimados em cerca de US$ 123 bilhões (American Society of Civil Engineers, 2017, apud Malheiro *et al.*, 2018).

Diante desse contexto, a incorporação dos conceitos de durabilidade e vida útil como critérios de projeto estrutural passou a ganhar maior relevância nas últimas décadas. Inicialmente desenvolvida na Europa e nos Estados Unidos a partir da década de 1990 (Magalhães, 2018), essa abordagem foi progressivamente incorporada ao contexto brasileiro com a publicação da NBR 6118 (ABNT, 2003), posteriormente revisada em 2014, e reforçada pela NBR 15575 (ABNT, 2013), que estabelece a durabilidade como um dos parâmetros fundamentais para a avaliação do desempenho das edificações.

Nesse cenário, torna-se evidente que a compreensão do processo de deterioração do concreto armado constitui um ponto de partida essencial para a avaliação da durabilidade das estruturas. Em particular, a identificação dos mecanismos de ingresso e transporte de agentes agressivos representa um aspecto central para a análise do desempenho ao longo do tempo, servindo de base para o desenvolvimento de métodos mais representativos de avaliação da vida útil estrutural.

2.2. Durabilidade e vida útil do concreto armado

Durabilidade e vida útil constituem conceitos intimamente relacionados, porém conceitualmente distintos, cuja correta compreensão é fundamental para a análise do desempenho de estruturas de concreto armado. De forma geral, a durabilidade pode ser entendida como a capacidade do material ou da estrutura de resistir, ao longo do tempo, à ação de agentes agressivos — como cloretos, sulfatos, variações térmicas e ciclos de umidade — sem apresentar perda significativa de desempenho funcional. Trata-se, portanto, de uma propriedade que não depende de um único parâmetro isolado, mas da interação entre características do material, condições ambientais e decisões adotadas no projeto e na execução.

Ao longo das últimas décadas, esse conceito passou por uma evolução significativa, deixando de ser interpretado apenas como a capacidade de resistir ao tempo e assumindo um caráter mais abrangente, voltado à manutenção do desempenho das estruturas ao longo de sua vida útil (Cascudo, 2015). Essa mudança de perspectiva reflete uma transição importante na engenharia de materiais e estruturas, na qual abordagens baseadas exclusivamente na observação de manifestações patológicas vêm sendo progressivamente substituídas por métodos que buscam antecipar o comportamento do material frente às condições de exposição previstas em projeto.

Nesse contexto, o conceito de vida útil emerge como um desdobramento natural da noção de durabilidade. A vida útil pode ser definida como o período durante o qual a estrutura mantém suas características e cumpre adequadamente suas funções, sem a necessidade de intervenções significativas, desde que respeitadas as condições de uso e manutenção estabelecidas em projeto (ABNT, 2014). Dessa forma, a vida útil não se limita à integridade física do material, mas está diretamente associada ao desempenho estrutural e funcional ao longo do tempo, incorporando implicitamente a influência de processos de deterioração progressiva.

A partir dessa compreensão, torna-se evidente que a avaliação da durabilidade do concreto armado não deve ser dissociada da análise dos mecanismos de deterioração que atuam ao longo do tempo. Entre esses mecanismos, destacam-se a penetração de íons cloreto, a carbonatação, o ataque por sulfatos e os processos de lixiviação, todos capazes de modificar a microestrutura da matriz cimentícia e reduzir a proteção conferida às armaduras. Esses fenômenos resultam da interação contínua entre o material e o ambiente, sendo fortemente influenciados por variáveis como umidade, temperatura, presença de agentes agressivos e ciclos de molhagem e secagem (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Em particular, a deterioração associada à corrosão das armaduras ocorre, em grande medida,

quando esses agentes conseguem penetrar na matriz do concreto e atingir o aço, promovendo a ruptura da camada passiva que o protege. A corrosão resultante gera produtos expansivos que induzem tensões internas, levando à fissuração e ao destacamento do cobrimento, o que, por sua vez, acelera o processo de degradação e reduz progressivamente a capacidade resistente da estrutura (HELENE, 1999). Esse comportamento evidencia que a durabilidade está diretamente relacionada à capacidade do concreto de dificultar o ingresso e o transporte de agentes agressivos em seu interior.

A suscetibilidade a esses mecanismos tem sido intensificada por transformações nas práticas de projeto e execução. O desenvolvimento de estruturas mais esbeltas, aliado à redução do cobrimento das armaduras e à busca por maior eficiência estrutural, pode aumentar a vulnerabilidade à penetração de agentes agressivos quando os aspectos relacionados à durabilidade não são devidamente considerados. Esse cenário reforça a necessidade de incorporar critérios de durabilidade desde as etapas iniciais de concepção estrutural, assegurando o desempenho ao longo da vida útil prevista (RIBEIRO; CASCUDO, 2018).

Nesse sentido, o controle das propriedades do concreto durante sua produção e execução assume papel central. Parâmetros como a relação água/aglomerante, o teor de cimento, o tipo de agregados e a presença de adições minerais influenciam diretamente a microestrutura da matriz cimentícia e, consequentemente, sua resistência à penetração de agentes agressivos. Concretos com menor relação água/aglomerante tendem a apresentar matrizes mais densas e com menor conectividade de poros, reduzindo o transporte de íons e contribuindo para o aumento da durabilidade (HELENE; TERZIAN, 1993).

Diante dessa complexidade, torna-se necessário avançar para abordagens que não apenas descrevam o fenômeno da deterioração, mas que também permitam prever seu desenvolvimento ao longo do tempo. Modelos de previsão de vida útil têm sido desenvolvidos com esse objetivo, integrando parâmetros experimentais e formulações físico-matemáticas para representar o transporte de agentes agressivos na matriz cimentícia e estimar o tempo necessário para que condições críticas sejam atingidas (KESSY, 2013). Essa capacidade de previsão representa um avanço significativo em relação a abordagens puramente descritivas, permitindo uma análise mais consistente do desempenho estrutural.

Dessa forma, a durabilidade do concreto armado pode ser compreendida como o resultado da interação entre a qualidade do material, as condições ambientais e as decisões adotadas no projeto e na execução. A consideração integrada desses fatores não apenas contribui para mitigar os riscos de deterioração prematura, mas também constitui a base para o desenvolvimento de metodologias mais

robustas de avaliação da vida útil, alinhadas com abordagens baseadas no desempenho (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

2.2.1. Durabilidade do concreto armado em ambientes marinhos

A durabilidade do concreto armado deve ser analisada à luz das condições específicas de exposição às quais a estrutura está submetida, uma vez que o ambiente exerce influência decisiva sobre o seu desempenho ao longo do tempo. Nesse contexto, a durabilidade pode ser compreendida como a capacidade dos elementos estruturais de resistirem às ações agressivas do meio, preservando suas propriedades e funcionalidade ao longo da vida útil. Assim, a interação entre o material e o ambiente de exposição assume papel central na definição do comportamento das estruturas, condicionando diretamente sua evolução ao longo do tempo (Almeida e Sales, 2018).

Essa interação se manifesta por meio de múltiplos mecanismos de degradação, decorrentes da ação combinada de agentes químicos, físicos e biológicos. Os processos de natureza química estão, em geral, associados a reações entre substâncias agressivas e os constituintes da pasta cimentícia, comprometendo sua integridade. Paralelamente, agentes físicos podem induzir fissuração em função de variações térmicas, cristalização de sais nos poros ou solicitações mecânicas, enquanto agentes biológicos contribuem para processos de biodeterioração envolvendo desde microrganismos até organismos de maior porte. Em conjunto, esses mecanismos tendem a atuar de forma simultânea e acumulativa, intensificando a degradação tanto do concreto quanto das armaduras ao longo do tempo (Almeida e Sales, 2018). Essa sobreposição de processos evidencia que a durabilidade não pode ser atribuída a um único fenômeno isolado, mas sim ao resultado da interação entre diferentes agentes e mecanismos de deterioração.

Em ambientes marinhos, essa condição torna-se particularmente crítica. A ampla utilização do concreto armado nessas regiões, associada à elevada agressividade do meio, faz com que a durabilidade dessas estruturas dependa fortemente da sua capacidade de resistir ao ingresso contínuo de agentes deletérios. Nessas condições, a presença predominante de íons cloreto assume papel central, uma vez que esses íons favorecem o desencadeamento do processo de corrosão das armaduras, contribuindo diretamente para a redução da vida útil das estruturas (Weerdt *et al.*, 2019).

A elevada agressividade dos ambientes marinhos está diretamente relacionada às características da atmosfera costeira, que compreende regiões sobre o mar ou próximas ao litoral, onde há significativa presença de cloretos e sulfatos, tanto dissolvidos na água quanto transportados na forma de aerossóis. Essas condições favorecem o avanço da corrosão nas armaduras, acelerando

os processos de deterioração e tornando esse tipo de exposição um dos mais severos para estruturas de concreto armado (Helene, 1999). Essa severidade é amplamente reconhecida na literatura, sendo os ambientes marinhos frequentemente classificados entre os mais críticos no que se refere à degradação do concreto (Zhuo *et al.*, 2010).

Além disso, a complexidade da ação marinha decorre da atuação simultânea de diferentes mecanismos de degradação. A água do mar, por exemplo, não apenas contribui para a corrosão das armaduras devido à presença de cloretos e sulfatos, mas também pode induzir processos de erosão superficial e outros efeitos físicos que comprometem a integridade da matriz cimentícia. Dessa forma, o ambiente marinho configura um cenário particularmente desafiador para o desempenho estrutural em longo prazo (Bertolini, 2010).

Esse comportamento está diretamente associado à composição da água do mar, que apresenta, em média, cerca de 3,5% de sais solúveis, com predominância de cloretos de sódio e magnésio. Esses compostos estão presentes tanto na fase líquida quanto na forma de aerossóis dispersos na atmosfera, favorecendo a exposição contínua das estruturas a agentes agressivos. A presença adicional de sulfatos intensifica os mecanismos de degradação, atuando sobre a matriz cimentícia e contribuindo para a deterioração de sua microestrutura (Mehta e Monteiro, 2014).

Como consequência direta dessa exposição, a corrosão das armaduras se inicia quando a concentração de íons agressivos atinge níveis suficientes para romper a camada passiva que protege o aço. A partir desse ponto, o processo corrosivo conduz à formação de produtos expansivos, que podem apresentar volumes significativamente superiores ao do metal original. Esse fenômeno gera tensões internas no concreto, induz fissuração e acelera progressivamente a deterioração estrutural, estabelecendo um ciclo de degradação que tende a se intensificar ao longo do tempo (Helene, 1999; Mehta e Monteiro, 2014; Almeida e Sales, 2018).

Diante desse cenário, torna-se evidente que a avaliação da durabilidade de estruturas expostas a ambientes marinhos exige a compreensão detalhada dos mecanismos de ingresso e transporte de agentes agressivos no concreto. Em particular, a forma como esses agentes penetram e se deslocam na matriz cimentícia constitui um aspecto central para a análise do desempenho ao longo do tempo, estabelecendo uma conexão direta com os métodos de avaliação da durabilidade baseados no comportamento do material frente à ação desses agentes.

2.2.2. Transporte de agentes agressivos no concreto

O transporte de agentes agressivos no concreto constitui o mecanismo fundamental que

governa o processo de deterioração de estruturas de concreto armado, especialmente em ambientes contendo íons cloreto. Nesse sentido, a compreensão desse fenômeno é essencial para a análise da durabilidade, uma vez que o desempenho do material ao longo do tempo está diretamente associado à sua capacidade de dificultar o ingresso e a mobilidade dessas espécies no interior da matriz cimentícia. De forma geral, esse transporte ocorre principalmente por meio dos mecanismos de difusão, absorção capilar e permeação, sendo fortemente influenciado pela microestrutura do concreto e pela conectividade da rede de poros.

Entre esses mecanismos, a difusão desempenha papel central em concretos saturados, sendo governada por gradientes de concentração que promovem o deslocamento de íons ao longo do tempo. A intensidade desse processo está diretamente relacionada às características da matriz cimentícia, em especial à porosidade e à tortuosidade dos caminhos de transporte. Nesse contexto, modificações na microestrutura do material podem alterar significativamente a taxa de difusão. Estudos recentes, como o de Yuan *et al.* (2023), demonstram que a incorporação de adições minerais reativas, como o metacaulim, promove o refinamento da rede de poros e o aumento da densificação da matriz, resultando na redução da mobilidade de íons cloreto em concretos expostos a ambientes marinhos.

Entretanto, em condições reais de exposição, o transporte de agentes agressivos não se limita ao mecanismo difusivo. Em concretos parcialmente saturados, a absorção capilar tende a assumir papel predominante, sendo responsável pela ascensão de soluções contendo íons agressivos através da rede de poros capilares interconectados. Esse fenômeno está diretamente associado ao grau de saturação do material e torna-se particularmente relevante em ambientes sujeitos a ciclos de molhagem e secagem, como regiões costeiras e estruturas expostas à atmosfera marinha. Nessas condições, a alternância entre saturação e evaporação favorece o ingresso contínuo de cloretos no interior do concreto, intensificando o processo de deterioração (MEHTA; MONTEIRO, 2014; HELENE, 1999).

A permeação, por sua vez, corresponde ao fluxo de fluidos induzido por gradientes de pressão hidráulica através da matriz cimentícia. Embora esse mecanismo seja mais expressivo em estruturas submetidas à ação direta de fluidos sob pressão, como reservatórios e barragens, sua contribuição não pode ser negligenciada em concretos com elevada permeabilidade ou com presença de microfissuras. Nesses casos, a conectividade da rede de poros e a existência de descontinuidades estruturais favorecem o transporte de agentes agressivos, aumentando a suscetibilidade à degradação (AUDENAERT; YUAN; DE SCHUTTER, 2010).

De maneira geral, a predominância de cada um desses mecanismos depende das condições de

exposição e das características do material, sendo comum que eles atuem de forma simultânea ao longo da vida útil da estrutura. Essa interação reforça o caráter multifatorial do processo de deterioração e evidencia que a resistência do concreto à penetração de agentes agressivos está diretamente associada à sua microestrutura. Parâmetros como a relação água/aglomerante, o tipo de aglomerante, o teor de cimento e a incorporação de adições minerais exercem influência decisiva na formação da rede de poros e, consequentemente, na mobilidade de íons no interior do material. Concretos com menores relações água/aglomerante tendem a apresentar matrizes mais densas e com menor conectividade de poros, reduzindo significativamente o transporte de íons cloreto e de outros agentes deletérios (HELENE; TERZIAN, 1993; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Diante desse panorama, torna-se evidente que a análise da durabilidade do concreto armado deve necessariamente considerar os mecanismos de transporte de agentes agressivos como elemento central de avaliação. A compreensão desses processos permite não apenas identificar os fatores que influenciam a penetrabilidade de íons no material, mas também orientar estratégias de dosagem e seleção de materiais voltadas à redução da mobilidade de espécies agressivas. Esse entendimento constitui, portanto, a base para o desenvolvimento de abordagens mais representativas de avaliação da durabilidade, fundamentadas no comportamento físico do material frente às condições reais de exposição (BAMFORTH, 1990; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

2.3. Métodos de avaliação da durabilidade do concreto armado

A avaliação da durabilidade do concreto armado pode ser conduzida por diferentes abordagens, as quais refletem distintas formas de interpretar o comportamento do material frente aos mecanismos de deterioração. Tradicionalmente, destaca-se a metodologia prescritiva, amplamente adotada em normas e práticas de projeto, que se baseia na definição de requisitos mínimos relacionados à composição do concreto, como o teor de cimento, a resistência característica à compressão e a relação água/aglomerante. Essa abordagem desempenha papel fundamental no controle tecnológico e na padronização das práticas construtivas, contribuindo de forma significativa para a obtenção de concretos com desempenho satisfatório em diversas condições de exposição.

Embora tais especificações influenciem propriedades relevantes à durabilidade, observa-se que sua atuação ocorre de forma indireta em relação aos mecanismos físicos responsáveis pela deterioração do material. Nesse sentido, a utilização exclusiva de parâmetros de composição pode não capturar integralmente o comportamento do concreto frente ao transporte de agentes agressivos. Conforme destacado por Beushausen *et al.* (2019), a abordagem prescritiva apresenta limitações no que se refere à incorporação dos efeitos de materiais suplementares cimentícios, aditivos químicos e

práticas executivas, os quais podem exercer influência significativa na microestrutura do concreto e, consequentemente, em sua durabilidade. Ainda assim, tais limitações não invalidam sua aplicação, mas evidenciam a necessidade de complementação por métodos mais diretamente relacionados ao desempenho do material.

Essa necessidade torna-se mais evidente quando se analisam as diferenças entre recomendações normativas em distintos contextos geográficos. Para uma mesma classe de agressividade ambiental, os limites prescritos podem apresentar variações significativas entre países, refletindo adaptações locais e interpretações específicas das condições de exposição. Conforme apontado por Torrent *et al.* (2016), mesmo entre países que adotam a norma europeia EN 206, observa-se variação expressiva nos valores recomendados para a relação água/aglomerante e para o consumo mínimo de cimento. Esse cenário indica que, embora consolidada, a abordagem prescritiva depende de ajustes empíricos e condições regionais, o que reforça a importância de métodos adicionais que permitam uma avaliação mais direta do desempenho do concreto.

Diante desse contexto, observa-se, nas últimas décadas, uma tendência de incorporação de abordagens fundamentadas no desempenho, que atuam de forma complementar às especificações prescritivas. Nessas metodologias, a análise passa a considerar diretamente propriedades relacionadas ao comportamento do material frente aos mecanismos de deterioração, permitindo uma avaliação mais representativa da durabilidade. Conforme discutido por Baroghel-Bouny *et al.* (2011), essa evolução não substitui a abordagem tradicional, mas a amplia, proporcionando maior consistência na análise do desempenho ao longo do tempo.

Adicionalmente, a crescente complexidade dos problemas associados à durabilidade tem impulsionado a adoção de abordagens que incorporam explicitamente a variabilidade dos parâmetros envolvidos. A estimativa da vida útil de estruturas de concreto armado envolve, de forma inerente, incertezas relacionadas às propriedades dos materiais, às condições ambientais e às ações atuantes. Nesse sentido, métodos probabilísticos têm se mostrado particularmente adequados, pois permitem tratar essas variabilidades de forma sistemática e integrada às demais abordagens de avaliação.

Ainda assim, a previsão da vida útil estrutural permanece como um desafio relevante na engenharia civil. Entre os principais fatores que dificultam essa estimativa, destacam-se a necessidade de considerar períodos de exposição frequentemente longos e a ampla gama de combinações possíveis entre ações mecânicas e agentes agressivos. Diante desse cenário, torna-se imprescindível o uso de ferramentas analíticas mais robustas, capazes de integrar as vantagens das abordagens prescritivas com aquelas baseadas no desempenho.

Assim, a integração entre métodos prescritivos e abordagens baseadas no desempenho, associada ao uso de ferramentas probabilísticas, representa uma estratégia mais completa e consistente para a avaliação da durabilidade do concreto armado. Essa combinação permite, simultaneamente, garantir requisitos mínimos de qualidade e incorporar análises mais diretamente relacionadas aos mecanismos físicos de deterioração, estabelecendo bases mais sólidas para a estimativa da vida útil estrutural.

2.3.1. Abordagem baseada no desempenho via Indicadores de Durabilidade

Diante das limitações associadas às abordagens prescritivas, torna-se necessária a adoção de metodologias capazes de representar de forma mais direta os mecanismos físicos que governam a deterioração do concreto. Nesse contexto, destaca-se a abordagem baseada no desempenho, fundamentada na análise dos chamados Indicadores de Durabilidade (IDs), os quais permitem avaliar propriedades do material diretamente relacionadas à sua resistência à penetração e ao transporte de agentes agressivos.

Os indicadores de durabilidade correspondem a parâmetros que refletem características essenciais da microestrutura do concreto, como porosidade, permeabilidade e coeficiente de migração de íons. Essa abordagem, originalmente proposta no âmbito da Association Française de Génie Civil (Baroghel-Bouny, 2007), parte do princípio de que a durabilidade deve ser avaliada com base no comportamento real do material frente às condições de exposição, e não apenas a partir de parâmetros indiretos de composição. Dessa forma, os IDs estabelecem uma conexão direta entre as propriedades do concreto e os mecanismos de deterioração discutidos anteriormente, especialmente aqueles associados ao transporte de agentes agressivos.

A utilização dos indicadores de durabilidade possibilita uma análise mais consistente da influência dos diferentes componentes do concreto sobre seu desempenho ao longo do tempo. Materiais cimentícios suplementares e aditivos químicos, frequentemente negligenciados em abordagens prescritivas, podem exercer papel significativo na modificação da microestrutura da matriz cimentícia e, consequentemente, na redução da mobilidade de íons agressivos. Assim, ainda que a incorporação desses materiais não resulte necessariamente em ganhos expressivos em parâmetros tradicionais, como a resistência à compressão, pode promover melhorias substanciais na durabilidade do concreto quando corretamente selecionados e dosados. Nesse sentido, a avaliação baseada em IDs permite otimizar as especificações de dosagem e de cobrimento das armaduras ainda na fase de projeto, contribuindo para um desempenho mais adequado em serviço.

Além disso, os resultados obtidos por meio dos indicadores de durabilidade podem ser utilizados como parâmetros de entrada em modelos de previsão de vida útil, possibilitando a estimativa do tempo necessário para o início do processo de corrosão das armaduras (Beushausen *et al.*, 2016). A Figura 2.1 ilustra os fundamentos essenciais do projeto de durabilidade orientado por desempenho, evidenciando a integração entre propriedades do material, condições de exposição e critérios de avaliação do desempenho estrutural ao longo do tempo.

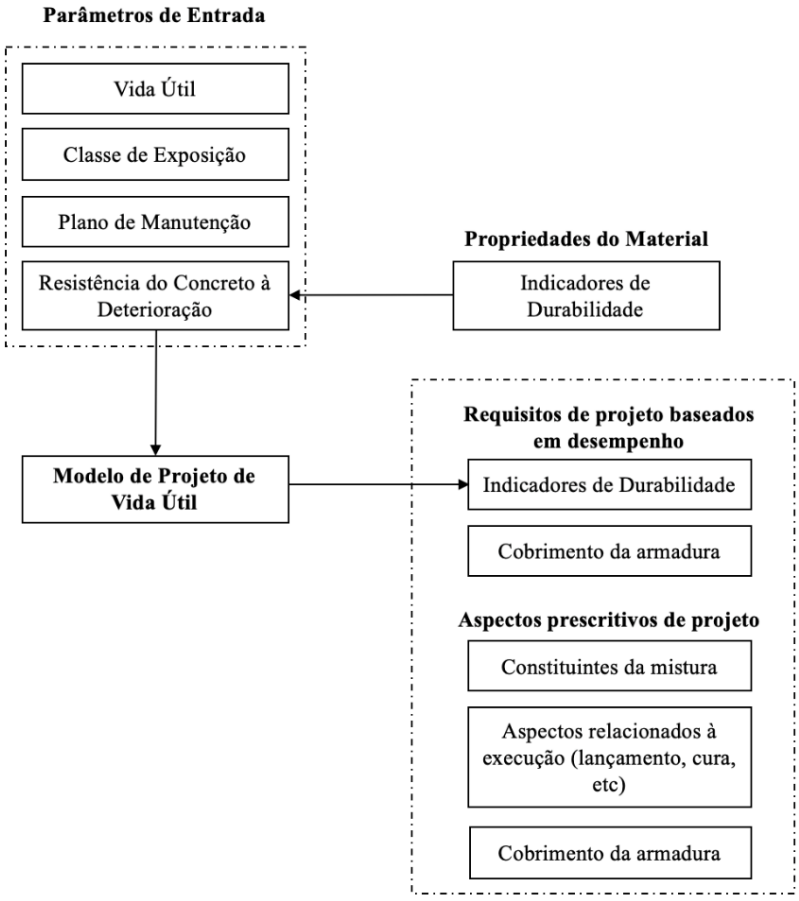


Figura 2.1 - Fundamentos do dimensionamento de estruturas de concreto armado orientado por desempenho (Fonte: Adaptado de Beushausen *et al*., 2016. Traduzido pelo autor).

Os indicadores de durabilidade também permitem estabelecer classificações quanto ao risco de corrosão das armaduras, associando diferentes tipos de concreto a níveis distintos de desempenho. Conforme discutido por Alexander e Thomas (2015), esses níveis podem variar de muito baixo a muito alto, possibilitando a comparação entre diferentes composições e a seleção da dosagem mais adequada ao ambiente de exposição. Essa capacidade de classificação representa um avanço importante em relação às abordagens tradicionais, uma vez que permite uma avaliação mais direta e

fundamentada do comportamento do material.

Entretanto, é importante reconhecer que a abordagem baseada no desempenho não elimina completamente a necessidade de critérios prescritivos. Em muitos casos, a interpretação dos indicadores de durabilidade depende das características dos materiais utilizados, o que pode exigir a adoção complementar de requisitos relacionados à composição do concreto. Conforme destacado por Beushausen *et al.* (2016), concretos produzidos com diferentes aglomerantes podem apresentar valores semelhantes em indicadores como resistividade elétrica ou permeabilidade, mas diferirem significativamente em aspectos como a capacidade de fixação de cloretos, resultando em desempenhos distintos ao longo do tempo. Esse aspecto evidencia que a análise baseada em IDs deve ser conduzida de forma criteriosa, considerando as particularidades de cada sistema cimentício.

Outro ponto relevante é a versatilidade dessa abordagem, que permite sua aplicação não apenas na fase de projeto, mas também na avaliação de estruturas em serviço. Os indicadores de durabilidade podem ser utilizados na estimativa da vida útil residual, constituindo uma ferramenta útil para diagnóstico, monitoramento e tomada de decisão em estratégias de manutenção (Baroghel-Bouny *et al.*, 2011; Thiery *et al*., 2012). Essa aplicabilidade amplia significativamente o alcance dos IDs, consolidando-os como instrumentos importantes na gestão da durabilidade de estruturas de concreto armado.

No contexto deste trabalho, não será realizada uma análise exaustiva de todos os indicadores de durabilidade disponíveis na literatura, tendo em vista a diversidade de métodos adotados em diferentes países e normas. Serão considerados, especificamente, o coeficiente de migração iônica, determinado por meio do ensaio NT Build 492 (1999), a absorção de água por capilaridade e as resistividades elétricas, tanto volumétrica (Bulk) quanto superficial (método de Wenner). Esses parâmetros foram selecionados por sua relação direta com os mecanismos de transporte de agentes agressivos no concreto, constituindo, portanto, indicadores representativos do desempenho do material frente à penetração de cloretos.

Dessa forma, a abordagem baseada no desempenho, por meio da utilização de indicadores de durabilidade, representa um avanço significativo na avaliação do concreto armado, permitindo uma análise mais alinhada aos fenômenos físicos que governam sua deterioração. Essa perspectiva estabelece as bases para a integração entre ensaios experimentais e modelos de previsão de vida útil, aproximando a análise da durabilidade de uma abordagem mais realista e fundamentada no comportamento do material em condições reais de exposição.

2.3.2. Indicadores de durabilidade e a estimativa da penetração de cloretos no concreto

A avaliação da penetrabilidade de cloretos no concreto constitui um dos aspectos centrais na análise da durabilidade de estruturas expostas a ambientes agressivos. Nesse contexto, os indicadores de durabilidade assumem papel fundamental, uma vez que permitem quantificar, de forma direta ou indireta, a capacidade do material de resistir ao transporte de íons agressivos em sua matriz. Essa capacidade está intrinsicamente associada às características microestruturais do concreto, especialmente à porosidade, à conectividade da rede capilar e à tortuosidade dos caminhos de transporte, que controlam o fluxo de espécies iônicas no interior do material.

A melhoria dessas características microestruturais tem sido consistentemente associada à redução da permeabilidade e à limitação do transporte de íons cloreto, contribuindo para o aumento da durabilidade do concreto (Xue *et al.*, 2025). Nesse sentido, torna-se evidente que a avaliação da penetrabilidade de cloretos deve ser conduzida com base em parâmetros capazes de representar, de maneira fiel, esses mecanismos físicos, o que justifica a utilização de indicadores de durabilidade diretamente relacionados ao comportamento do material frente ao ingresso de agentes agressivos.

Diversos indicadores têm sido propostos com esse objetivo, baseando-se em propriedades físicas e eletroquímicas da matriz cimentícia que influenciam o deslocamento de espécies iônicas. Entre os parâmetros mais utilizados destacam-se o coeficiente de migração de cloretos, a resistividade elétrica e a absorção de água por capilaridade, além de ensaios de migração acelerada, que permitem avaliar a facilidade com que os cloretos se deslocam através da estrutura porosa do concreto (AUDENAERT; YUAN; DE SCHUTTER, 2010; KESSY, 2013). Cada um desses indicadores captura aspectos específicos do fenômeno de transporte, sendo, portanto, complementares na caracterização do desempenho do material.

Dentre esses parâmetros, o coeficiente de migração de cloretos assume papel central na análise da durabilidade, especialmente em modelos matemáticos de previsão de vida útil fundamentados na segunda lei de Fick. Esse coeficiente representa, de forma direta, a taxa de transporte dos íons ao longo do tempo, estando fortemente associado à microestrutura do concreto e às condições de exposição. Concretos com matriz mais densa, menor porosidade capilar e maior tortuosidade dos caminhos de transporte tendem a apresentar menores coeficientes de difusão, refletindo maior resistência à penetração de cloretos (JEN; STOMPINIS; JONES, 2017). Dessa forma, o coeficiente de migração se estabelece como um parâmetro-chave para a análise quantitativa da durabilidade.

A avaliação do transporte iônico pode ser complementada pela resistividade elétrica do

concreto, propriedade que expressa a capacidade do material de conduzir corrente através da solução presente em seus poros. Considerando que o deslocamento de íons ocorre predominantemente por esse meio, valores mais elevados de resistividade indicam menor mobilidade iônica e, consequentemente, maior resistência à penetração de cloretos. Esse parâmetro tem sido amplamente utilizado como indicador indireto do risco de corrosão das armaduras, permitindo uma avaliação rápida e não destrutiva do desempenho do concreto (HELENE *et al.*, 2018).

De forma complementar, a absorção de água por capilaridade fornece informações relevantes sobre o transporte de fluidos na matriz cimentícia, estando diretamente relacionada à porosidade e à conectividade da rede capilar. Em concretos parcialmente saturados, esse mecanismo pode desempenhar papel predominante no ingresso de agentes agressivos. Assim, menores valores de absorção capilar estão associados a uma microestrutura mais refinada e, consequentemente, a uma menor suscetibilidade à penetração de cloretos (ISAIA, 1995).

A utilização integrada desses indicadores permite uma avaliação mais abrangente e consistente do comportamento do concreto frente à ação de agentes agressivos. Enquanto o coeficiente de migração fornece uma medida direta da taxa de transporte iônico, a resistividade elétrica e a absorção capilar oferecem informações complementares sobre a mobilidade de íons e a conectividade da rede de poros. A correlação entre esses parâmetros possibilita uma compreensão mais robusta dos mecanismos de deterioração, contribuindo para estimativas mais confiáveis da vida útil de estruturas de concreto armado expostas a ambientes contendo cloretos (KESSY, 2013; AUDENAERT; YUAN; DE SCHUTTER, 2010).

Nesse contexto, a seleção adequada dos indicadores de durabilidade assume papel decisivo na avaliação da penetrabilidade de cloretos e, consequentemente, na análise da vida útil estrutural. A escolha de parâmetros diretamente relacionados aos mecanismos de transporte de agentes agressivos permite não apenas caracterizar o desempenho do material de forma mais representativa, mas também estabelecer uma base consistente para a integração com modelos de previsão de vida útil, conforme será explorado nas seções seguintes.

2.4. Implicações das adições minerais e cristalizantes na vida útil do concreto

A durabilidade do concreto armado está diretamente associada à sua capacidade de resistir ao ingresso e ao transporte de agentes agressivos, sendo a microestrutura da matriz cimentícia o principal fator que governa esse comportamento. Nesse contexto, a incorporação de adições minerais e aditivos químicos surge como uma estratégia fundamental para a modificação dessas características

microestruturais, permitindo a obtenção de concretos com desempenho superior em ambientes agressivos.

As adições minerais têm sido amplamente empregadas com esse objetivo, uma vez que atuam diretamente na densificação da matriz cimentícia. Estudos recentes indicam que a utilização de materiais como o metacaulim pode reduzir significativamente a migração de íons cloreto, contribuindo para o aumento da durabilidade de estruturas expostas a ambientes severos (Falade *et al.*, 2024). Esse efeito está associado à elevada reatividade pozolânica dessas adições, que promove modificações relevantes na estrutura interna do concreto, conforme destacado por Homayoonmehr *et al.* (2022).

De maneira geral, a atuação das adições minerais pode ser compreendida a partir de dois mecanismos principais: as reações pozolânicas e o efeito de preenchimento de poros. As reações pozolânicas envolvem a interação entre sílica reativa e o hidróxido de cálcio liberado durante a hidratação do cimento, resultando na formação adicional de silicato de cálcio hidratado (C–S–H), principal responsável pela resistência e pela coesão da matriz cimentícia. Paralelamente, o efeito filler promove o preenchimento de vazios na matriz, contribuindo para o refinamento da rede capilar. Como consequência da atuação conjunta desses mecanismos, observa-se a formação de uma microestrutura mais densa e menos permeável, o que reduz significativamente a mobilidade de íons agressivos no interior do material (MEHTA; MONTEIRO, 2014; ISAIA, 1995).

Entre as adições minerais mais utilizadas destacam-se o metacaulim e a sílica proveniente das cinzas de casca de arroz, ambos caracterizados por elevada reatividade e capacidade de modificar a microestrutura do concreto. A incorporação desses materiais resulta em uma matriz cimentícia mais compacta, com menor porosidade capilar e maior tortuosidade dos caminhos de transporte iônico, dificultando o ingresso de agentes agressivos e reduzindo a probabilidade de corrosão das armaduras (JAMIL *et al.*, 2013; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

O metacaulim, em particular, tem sido amplamente estudado devido à sua elevada eficiência na melhoria das propriedades mecânicas e de durabilidade. Sua incorporação promove um refinamento significativo da estrutura de poros, contribuindo não apenas para a redução da permeabilidade, mas também para o aumento da resistência mecânica do concreto (Bansal *et al.*, 2017). Além disso, materiais pozolânicos podem aumentar a capacidade de ligação química dos íons cloreto na matriz cimentícia, reduzindo a quantidade de cloretos livres disponíveis para iniciar o processo de corrosão das armaduras (Homayoonmehr *et al*., 2022). Esse aspecto evidencia que a durabilidade do concreto não depende apenas da redução do transporte de íons, mas também da

capacidade do material de imobilizar esses agentes em sua estrutura.

De forma consistente, evidências reportadas na literatura indicam que a utilização de adições minerais pode reduzir significativamente a taxa de penetração de cloretos no concreto, principalmente em função do refinamento da rede capilar e do aumento da tortuosidade dos caminhos de transporte iônico. Esse efeito contribui para retardar o início do processo de corrosão das armaduras e, consequentemente, prolongar a vida útil das estruturas expostas a ambientes agressivos (JIN *et al.*, 2018).

Além das adições minerais, os aditivos cristalizantes têm sido empregados como alternativa para o aumento da durabilidade do concreto por meio da redução de sua permeabilidade. Esses materiais atuam promovendo a formação de cristais insolúveis no interior dos poros e microfissuras da matriz cimentícia, bloqueando caminhos preferenciais para o transporte de água e de íons agressivos. Dessa forma, a ação dos cristalizantes contribui para a impermeabilização do concreto e para a limitação do ingresso de cloretos, especialmente em estruturas sujeitas à exposição contínua à umidade (HELENE *et al.*, 2018).

Nesse cenário, a utilização combinada de adições minerais e aditivos cristalizantes se apresenta como uma estratégia particularmente eficaz para o aumento da durabilidade do concreto armado. Enquanto as adições minerais promovem o refinamento da microestrutura e a redução da conectividade dos poros, os cristalizantes atuam no bloqueio de caminhos preferenciais de transporte, resultando em um efeito sinérgico na redução da penetrabilidade de agentes agressivos. Essa abordagem reforça a importância da escolha criteriosa dos constituintes do concreto no processo de projeto, evidenciando que a durabilidade está diretamente associada à engenharia da microestrutura do material.

Dessa forma, a modificação da matriz cimentícia por meio da incorporação de adições minerais e aditivos cristalizantes constitui um dos principais caminhos para o aumento da vida útil de estruturas de concreto armado. Esse entendimento estabelece uma ligação direta entre a composição do material, os mecanismos de transporte de agentes agressivos e os indicadores de durabilidade, consolidando as bases para a análise do desempenho do concreto em condições reais de exposição

2.5. Estimativa de vida útil e confiabilidade estrutural

A estimativa da vida útil de estruturas de concreto armado constitui uma etapa fundamental na avaliação da durabilidade, uma vez que permite quantificar o tempo durante o qual o sistema estrutural é capaz de manter seu desempenho sob determinadas condições de exposição. Em

estruturas sujeitas à ação de cloretos, esse processo está diretamente associado ao transporte de íons agressivos no interior do concreto, sendo influenciado por variáveis como a difusividade do material, a espessura de cobrimento das armaduras, a concentração crítica de cloretos necessária para a despassivação do aço e as condições ambientais de exposição. Como esses parâmetros apresentam variabilidade significativa, torna-se evidente que a previsão da vida útil envolve incertezas inerentes ao próprio processo de deterioração (MAGALHÃES, 2018).

Diante desse cenário, abordagens puramente determinísticas mostram-se limitadas para a análise da durabilidade, uma vez que não são capazes de representar adequadamente a variabilidade dos parâmetros envolvidos. Nesse contexto, a teoria da confiabilidade estrutural surge como uma ferramenta essencial, permitindo incorporar explicitamente essas incertezas na avaliação do desempenho ao longo do tempo (SANTIAGO, 2011; MAGALHÃES, 2018). Essa abordagem baseia-se na definição de funções de estado limite, que estabelecem a relação entre a capacidade resistente do sistema e as solicitações ou ações atuantes, possibilitando a análise probabilística da ocorrência de falhas.

De forma geral, a análise de confiabilidade tem como objetivo estimar a probabilidade de ocorrência de um determinado estado limite ao longo do tempo, considerando as distribuições estatísticas das variáveis envolvidas. Entre os métodos mais utilizados destacam-se o First Order Reliability Method (FORM) e o Second Order Reliability Method (SORM), que permitem estimar probabilidades de falha por meio da aproximação da função de estado limite no espaço das variáveis aleatórias (ENGELUND; SØRENSEN, 1998; SANTIAGO, 2011). No entanto, para problemas de maior complexidade, como aqueles associados à deterioração por cloretos, métodos baseados em simulação, como a técnica de Monte Carlo, têm se mostrado particularmente adequados, por possibilitarem a representação mais direta da variabilidade dos parâmetros envolvidos.

No contexto específico da durabilidade de estruturas de concreto armado, a aplicação da teoria da confiabilidade permite estimar probabilisticamente o tempo necessário para que um determinado mecanismo de deterioração atinja um estado limite previamente definido. No caso da corrosão induzida por cloretos, esse estado limite é, em geral, associado ao instante em que a concentração crítica de cloretos atinge a profundidade da armadura, desencadeando o processo de despassivação do aço (MAGALHÃES, 2018). Essa definição estabelece uma ligação direta entre os mecanismos de transporte de íons, discutidos anteriormente, e a avaliação da vida útil estrutural.

Como consequência dessa abordagem, a vida útil deixa de ser interpretada como um valor determinístico único e passa a ser tratada como uma variável aleatória, associada a uma distribuição

de probabilidades. Dessa forma, diferentes idades podem ser vinculadas a diferentes probabilidades de ocorrência do estado limite considerado, permitindo uma análise mais realista do desempenho estrutural ao longo do tempo. A partir dessa distribuição, torna-se possível definir parâmetros representativos da vida útil.

Entre esses parâmetros, destaca-se a vida útil característica, conceito análogo ao de resistência característica no dimensionamento estrutural. De acordo com essa abordagem, a vida útil característica corresponde ao tempo associado a uma probabilidade de falha previamente estabelecida, representando um limite de desempenho considerado aceitável para a estrutura (KHATRI; SIRIVIVATNANON, 2004; MAGALHÃES, 2018). Em termos probabilísticos, esse valor pode ser interpretado como um quantil da distribuição do tempo de falha, enquanto o valor médio representa o tempo médio de ocorrência do estado limite.

De acordo com Magalhães (2018), uma forma alternativa de interpretar esse conceito consiste em analisar a evolução temporal da concentração de cloretos na profundidade da armadura, conforme ilustrado na Figura 2.2. Nessa representação, diferentes curvas estão associadas a diferentes probabilidades de falha, permitindo identificar os instantes em que determinadas condições críticas são atingidas ao longo do tempo.

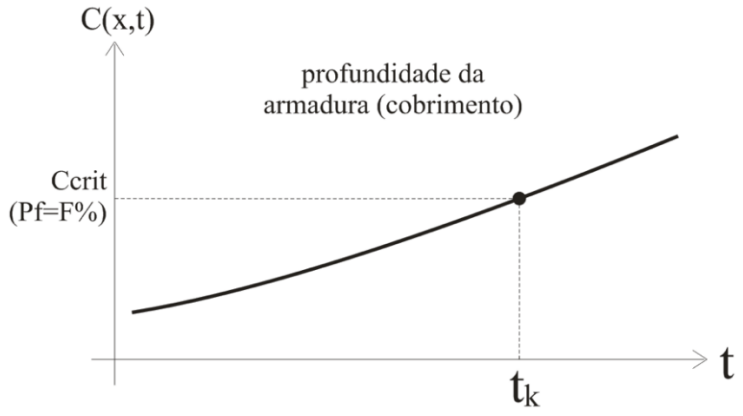


Figura 2.2 - Concentração de cloretos na profundidade da armadura em função da idade a partir da qual uma probabilidade pré-estabelecida de falha é admitida (Fonte: Magalhães, 2018).

A aplicação de métodos probabilísticos na avaliação da durabilidade de estruturas de concreto armado tem sido amplamente investigada na literatura. Estudos clássicos, como o de Maage *et al.* (1996), propuseram modelos teóricos baseados na segunda lei de Fick para estimar a vida útil de estruturas expostas à ação de cloretos, combinando formulações matemáticas com dados experimentais. De forma semelhante, Engelund e Sørensen (1998) aplicaram métodos de

confiabilidade, como o FORM e o SORM, para estimar probabilidades associadas ao início da corrosão e à necessidade de intervenções ao longo da vida útil.

Outras abordagens têm explorado o uso de simulações probabilísticas para avaliar o impacto da variabilidade dos parâmetros do concreto no desempenho estrutural. Kong *et al.* (2002) e Lorensini (2006), por exemplo, utilizaram simulações de Monte Carlo para modelar o processo de deterioração de estruturas de concreto armado, considerando variáveis como difusividade, relação água/aglomerante e condições ambientais. Esses estudos evidenciam a capacidade dessa técnica de representar de forma mais realista a variabilidade dos parâmetros envolvidos e suas consequências na probabilidade de falha.

Além disso, a teoria da confiabilidade tem sido aplicada na análise de diferentes mecanismos de deterioração. Thiery *et al.* (2012) investigaram probabilisticamente a corrosão induzida por carbonatação, enquanto Liberati *et al.* (2014) analisaram o impacto da corrosão na capacidade resistente de elementos estruturais. Pradelle *et al.* (2017), por sua vez, propuseram metodologias baseadas na integração entre indicadores de durabilidade e modelos probabilísticos, destacando a importância da qualidade dos dados experimentais na confiabilidade das previsões. Mais recentemente, Angst (2018) reforçou que, apesar dos avanços na modelagem, a principal limitação para estimativas mais precisas de vida útil ainda está associada à disponibilidade de dados representativos das condições reais de exposição.

De maneira geral, os estudos apresentados evidenciam que a abordagem probabilística, fundamentada na teoria da confiabilidade, representa uma ferramenta robusta para a avaliação da durabilidade de estruturas de concreto armado. No entanto, a obtenção de estimativas confiáveis de vida útil depende diretamente da adequada caracterização estatística das variáveis envolvidas, bem como da qualidade dos dados utilizados como parâmetros de entrada nos modelos.

Nesse contexto, torna-se evidente que a integração entre indicadores de durabilidade, mecanismos de transporte de agentes agressivos e métodos probabilísticos constitui a base para uma análise mais realista e consistente da vida útil estrutural. Essa integração estabelece o elo final entre os conceitos discutidos ao longo deste capítulo, fornecendo o suporte teórico necessário para a abordagem metodológica adotada neste trabalho.

3. METODOLOGIA

Este capítulo tem por objetivo descrever o procedimento metodológico adotado neste estudo, com o fim de familiarizar o leitor com as etapas e procedimentos aplicados, facilitando assim a compreensão dos resultados obtidos e das discussões subsequentes.

Inicialmente, são abordados a caracterização dos materiais, a dosagem e a execução dos concretos, além do período de cura. Nesse contexto, foram produzidos doze traços de concreto distintos, obtidos por meio da substituição parcial do cimento por aditivo cristalizante, metacaulim e sílica de cinza de casca de arroz. Em seguida, realizou-se a caracterização granulométrica do cimento CP V e dos agregados utilizados em todas as misturas. Posteriormente, os concretos foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão axial, absorção de água por capilaridade, determinação do coeficiente de migração em estado não estacionário (NT Build 492;1999) e resistividade elétrica volumétrica e superficial (método de Wenner), sendo o coeficiente de migração experimentalmente obtido posteriormente empregado como parâmetro de entrada na análise de confiabilidade.

Na sequência, apresenta-se a análise probabilística proposta, na qual, com base em dados de diversos autores, como Medeiros e Helene (2008), bem como na difusividade medida experimentalmente, avalia-se o nível de segurança de estruturas construídas com os concretos desenvolvidos no programa experimental desta dissertação, especialmente no que se refere ao risco de corrosão das armaduras.

3.1. Materiais

3.1.1. Cimento Portland

Foi utilizado cimento CP-V ARI (alta resistência inicial), comercialmente disponível na cidade de Rio Grande/RS. Esse cimento está em conformidade com os requisitos estabelecidos pela NBR 16697 (ABNT, 2018) e não contém adições minerais em sua composição original. Apesar de apresentar elevada resistência inicial, o concreto produzido por este cimento possui uma matriz com maior quantidade de poros. Assim, essa característica em especial permite avaliar de forma mais clara como as adições minerais (cristalizante, metacaulim e sílica de cinzas de casca de arroz) contribuem para o fechamento dos poros e, consequentemente, para o aumento da resistência do concreto à penetração de cloretos.

A Tabela 3.1 apresenta as características do cimento Portland empregado neste estudo.

Tabela 3.1. Características do cimento Portland utilizado.
Fonte: Relatório do Fabricante (2024).

Propriedade avaliada		**Resultado**	**Limite NBR 16697:2018**
Massa específica (g/cm^3)		3,14	-
Finura	Retido na # 200 (%)	0,11	≤ 10,00
	Retido na # 325 (%)	1,63	-
	Área esp. Blaine (cm^2/g)	5078,00	≥ 2800,00
Resistência à compressão (Mpa)	1 dia	27,00	14,00
	3 dias	37,00	≥ 24,00
	7 dias	42,00	≥ 35,00
	28 dias	48,00	≥ 41,00
Teores químicos (%)	MgO	4,10	-
	SO_3	4,18	≤ 4,00
	Perda ao fogo	4,10	≤ 8,50

3.1.2. Agregado miúdo

Foram empregadas duas areias de diferentes granulometrias como agregado miúdo, com o objetivo de alcançar um empacotamento mais eficiente dos grãos e, consequentemente, maior coesão na matriz do concreto. Essas areias foram obtidas na cidade de Pelotas/RS, sendo amplamente utilizadas em obras locais. A Tabela 3.2 apresenta as propriedades físicas dessas areias, cujos resultados foram obtidos a partir dos ensaios descritos nas normas NM 248 (ABNT, 2003), NM 45 (ABNT, 2006) e NM 52 (ABNT, 2009). Já as curvas granulométricas das areias fina e média podem ser visualizadas nas Figura 3.1 e Figura 3.2, respectivamente.

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

Peneiras (mm)	Areia fina		Areia média	
	% Retido	% Retido Acumulado	% Retido	% Retido Acumulado
4,8	0,0	0,0	0,0	0,0
2,4	0,0	0,0	2,0	2,01
1,2	0,67	0,8	9,4	11,4
0,6	9,7	10,4	26,2	37,6
0,3	78,3	88,6	41,3	78,9
0,15	10,7	99,3	15,1	94,0
< 0,15	0,7	100	6,0	100
Total	100	-	100	-
Módulo de Finura	1,98		2,24	
Dimensão máx (mm)	2,36		2,36	
Massa específica (g/cm^3)	2,67		2,65	

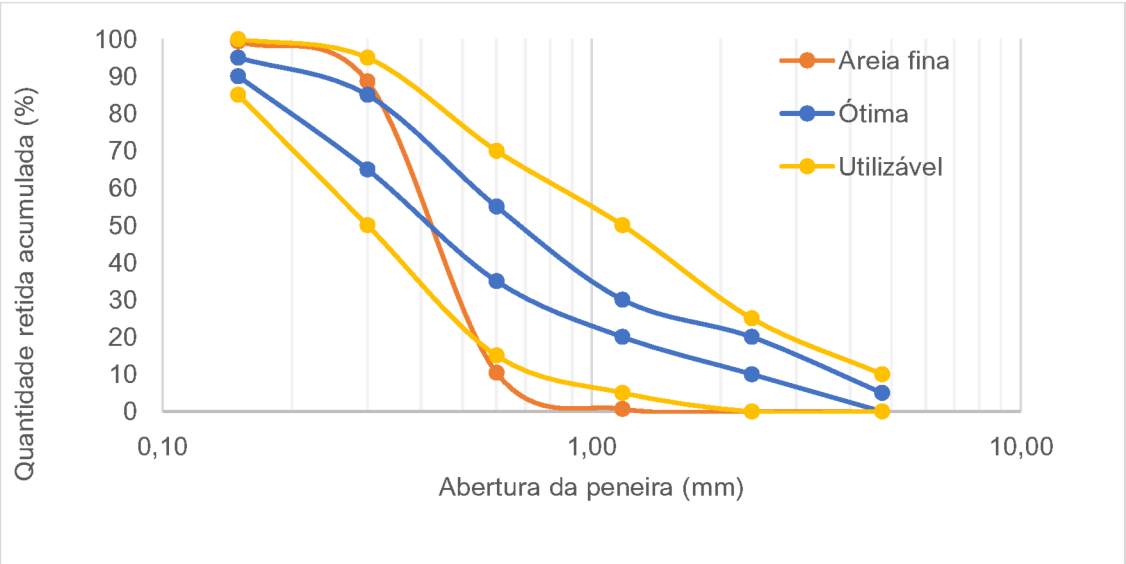


Figura 3.1 - Curva granulométrica da areia fina (Fonte: Autor).

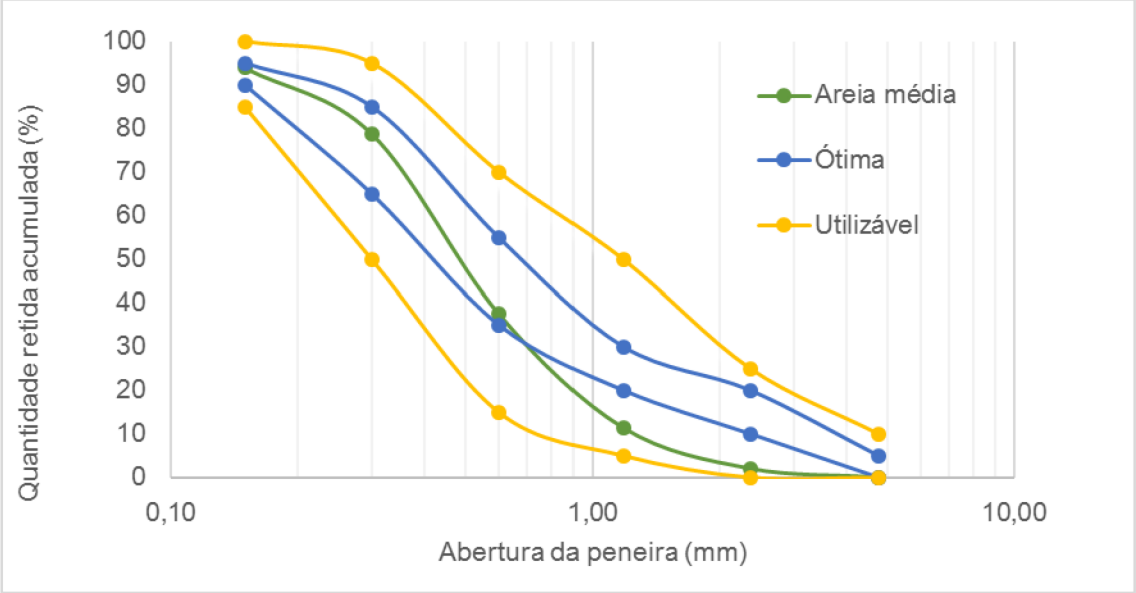


Figura 3.2 - Curva granulométrica da areia média (Fonte: Autor).

3.1.3. Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado foi o granito (brita 1), originário da cidade de Pelotas – RS, comumente empregada em obras na cidade de Rio Grande/RS e arredores. Suas propriedades físicas estão descritas na Tabela 3.3, enquanto a distribuição granulométrica encontra-se representada na Figura 3.3.

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

Peneiras (mm)	**Brita 1**	
	% Retido	**% Retido Acumulado**
19	0	0
12,5	33,5	38,8
9,5	42,5	44,6
6,3	24,0	20,6
4,8	0	100,0
< 4,8	0	100,0
Total	100,0	-
Módulo de Finura	1,12	
Dimensão máx (mm)	19,0	
Massa específica (g/cm^3)	2,65	

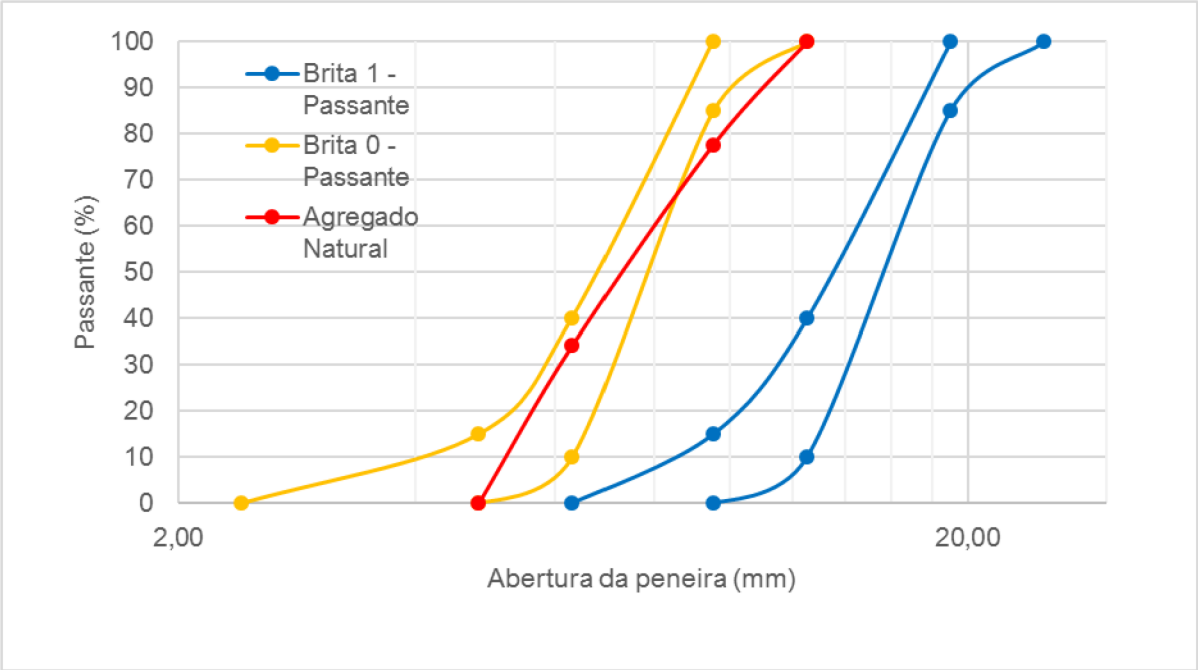


Figura 3.3 - Curva granulométrica do agregado graúdo (Fonte: Autor).

3.1.4. Adições minerais

As adições minerais utilizadas neste trabalho em substituição parcial ao cimento Portland foram a sílica ativa (cinzas de casca de arroz) e o metacaulim. Os dados aqui tabelados foram adquiridos do banco de dados do laboratório LEMCC do IFRS de Rio Grande. 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. Os resultados são apresentados na Tabela 3.4.

Analisando a Tabela 3.4, observa-se que a sílica ativa utilizada apresenta um teor de SiO_2 acima do valor mínimo estabelecido pela NBR 13956 (ABNT, 2012), o que a qualifica para uso como adição no concreto de cimento Portland. Além disso, verifica-se que o metacaulim empregado pode ser classificado como material pozolânico, uma vez que a soma dos teores de SiO_2, Al_2O_3 e Fe_2O_3 alcança 93,33 %, ultrapassando o limite mínimo de 70 % definido pela NBR 12653 (ABNT, 2015).

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

Propriedade avaliada		**Sílica ativa (RHS)**	**Metacaulim**
Massa específica (g/cm^3)		2,22	2,53
Superfície específica (m^2/g)		18,30	8,15
Diâmetro médio dos grãos (μm)		4,60	12,41
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

3.1.5. Aditivo cristalizante

O aditivo cristalizante empregado neste trabalho foi o Tecnocrystal Mix, cuja função principal é promover a impermeabilização do concreto por meio da formação de cristais que bloqueiam os poros da matriz cimentícia. Ele reage com a umidade e minerais do cimento, formando cristais insolúveis que bloqueiam poros e capilares, conferindo proteção profunda, permanente e capacidade de autocicatrização de fissuras.

Tabela 3.5. Características físicas e químicas do aditivo cristalizante.
Fonte: Autor.

Dados técnicos		**Cristalizante**
Densidade (kg/cm^3)		1.100
Superfície específica (m^2/g)		12,089 ± 0,1507
Volume dos poros (cm^3/g)		0,0422
Diâmetro do poro (Å)		133,0313
Dosagem (em % do cimento)		2 – 3
Dados do produto	Tipo	impermeabilizante
	Estado	Sólido (em pó)
	Cor	Cinza
Teores químicos (%)	Al_2O_3	5,05
	SiO_2	55,74
	CaO	28,84
	Fe_2O_3	1,04
	TiO_2	0,39
	K_2O	0,86
	MnO	0,06
	MgO	2,40
	Outros	0,41
	Perda ao fogo	5,20

3.1.6. Aditivo plastificante

Para assegurar a trabalhabilidade dos concretos produzidos, mantendo constante a relação água/aglomerante, foi empregado um aditivo polifuncional conforme a necessidade. O produto utilizado neste estudo foi o Silicon Plast 305, produzido pela Tecnosil que, segundo o fabricante, apresenta massa específica compreendida entre 1,00 e 1,20 g/cm³ e é isento de cloretos.

3.1.7. Água

A água utilizada para o preparo dos concretos é potável e foi fornecida pela companhia de abastecimento local.

3.2. Dosagens dos concretos e condicionamento das amostras

As dosagens das misturas foram elaboradas com base no método desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) em colaboração com a Universidade de São Paulo (USP), conforme descrito por Helene e Terzian (1993). Adotou-se, para metade dos traços, a relação água/aglomerante de 0,45. Foram produzidos, também, traços com relação água/aglomerante igual a 0,55. Ademais, para garantir a consistência desejada dos concretos, foi estipulado um abatimento de 100 ± 10 mm, recorrendo-se ao uso de aditivo polifuncional sempre que necessário para melhorar a trabalhabilidade do material.

A Tabela 3.6 detalha as misturas preparadas, assim como as quantidades de cada material necessárias para a fabricação de 1 m³ de concreto. As designações “REF 45” e “REF 55” referem-se às misturas de referência, diferenciadas pela relação água/aglomerante adotada. Os demais traços são identificados pelas siglas correspondentes às pozolanas utilizadas, seguidas de sua respectiva relação água/aglomerante: “RHS” indica sílica de casca de arroz, “MK” representa metacaulim e “CZ” corresponde ao cristalizante.

Tabela 3.6. Concretos produzidos e consumo de material (em kg/m^3 de concreto).
Fonte: Autor.

Nome	Cimento	Areia fina	Areia média	Brita 1	Água	MK	RHS	CZ
REF-45	401,0	219,0	511,0	1051,0	182,0	-	-	-
REF-55	401,0	219,0	511,0	1051,0	219,0	-	-	-
CZ-45	401,0	219,0	511,0	1051,0	182,0	-	-	8,02
CZ-55	401,0	219,0	511,0	1051,0	219,0	-	-	8,02
MK-45	380,9	219,0	511,0	1051,0	182,0	20,10	-	-
MK-55	380,9	219,0	511,0	1051,0	219,0	20,10	-	-
RHS-45	380,9	219,0	511,0	1051,0	182,0	-	20,10	-
RHS-55	380,9	219,0	511,0	1051,0	219,0	-	20,10	-
CZ-MK-45	380,9	219,0	511,0	1051,0	182,0	20,10	-	8,02
CZ-MK-55	380,9	219,0	511,0	1051,0	219,0	20,10	-	8,02
CZ-RHS-45	380,9	219,0	511,0	1051,0	182,0	-	20,10	8,02
CZ-RHS-55	380,9	219,0	511,0	1051,0	219,0	-	20,10	8,02

É importante destacar que este estudo não contempla a análise da viabilidade técnica e econômica para a produção em larga escala de concretos com elevados teores de sílica ativa e

metacaulim (por exemplo, 5%) em centrais de concreto comerciais. A avaliação desses níveis concentra-se exclusivamente na investigação de seus efeitos sobre as propriedades físicas, químicas e mecânicas do concreto produzido em condições laboratoriais.

Condicionamento, seleção e preparação das amostras

Todas as misturas foram preparadas em betoneira de eixo inclinado, operando de forma intermitente. Para cada traço, foram moldados 16 corpos de prova cilíndricos com dimensões de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura, em conformidade com a NBR 5738 (ABNT, 2016). Essa quantidade foi considerada adequada para a realização dos ensaios previstos, bem como para garantir a repetibilidade dos resultados. A Figura 3.4 ilustra uma das misturas logo após sua preparação e o processo de moldagem dos corpos de prova.



Figura 3.4 - Corpos de prova recém desmoldados, instantes antes de serem submergidos no tanque de cura (Fonte: Autor).

Após a desmoldagem, os corpos de prova foram submetidos à cura submersa em solução saturada de hidróxido de cálcio, mantida a uma temperatura de 23 ± 2 ºC, conforme especificado na NBR 5738 (ABNT, 2016), até atingirem as idades previstas para a realização dos respectivos ensaios, que variaram entre 7 e 180 dias.

As amostras destinadas aos ensaios de resistência à migração de íons cloreto e à determinação do coeficiente de migração aparente em condições não estacionárias foram seccionadas em fatias de 50 mm de espessura, conforme as diretrizes estabelecidas pelas normas correspondentes a cada método. Durante o processo de corte, os 25 mm iniciais de cada extremidade dos corpos de prova foram descartados, e a porção central restante, com 150 mm, foi dividida em três segmentos de 50 mm. Para cada traço, foram cortados três corpos de prova, totalizando nove amostras utilizadas nos ensaios de migração (NT Build 492;1999). A Figura 3.5 apresenta um esquema ilustrativo do processo de corte dos corpos de prova.

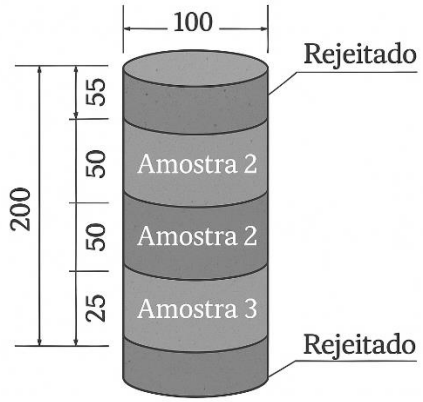


Figura 3.5 - Esquema de corte dos corpos de prova (dimensões em mm) (Fonte: Autor).

3.3. Indicadores de Durabilidade

No presente estudo, a avaliação da durabilidade dos concretos será conduzida com base na análise de diferentes indicadores experimentais, com destaque para o ensaio de migração de cloretos conforme a metodologia estabelecida na NT Build 492, o qual será adotado como o principal parâmetro de caracterização do desempenho do material frente à penetração de agentes agressivos. Esse ensaio será utilizado como base para a determinação do coeficiente de migração iônica, a partir do qual serão obtidos os dados fundamentais para a análise probabilística da vida útil, incluindo a estimativa do fator de envelhecimento do concreto.

A escolha do ensaio de migração de cloretos conforme a NT Build 492 deve-se à sua ampla utilização na literatura e à sua adequação para a obtenção de parâmetros diretamente empregados em modelos de previsão de vida útil. O coeficiente de migração determinado por esse método será adotado como principal parâmetro de entrada nas análises de confiabilidade estrutural desenvolvidas neste trabalho.

De forma complementar, serão realizados os ensaios de resistência à compressão axial, absorção de água por capilaridade e resistividade elétrica — tanto superficial quanto volumétrica — com o objetivo de fornecer uma caracterização adicional do comportamento dos concretos produzidos. Esses ensaios atuarão como ferramentas auxiliares na interpretação dos resultados do ensaio principal, permitindo avaliar a influência do tipo e do teor das adições minerais e do aditivo cristalizante na microestrutura do material e, consequentemente, em sua durabilidade potencial.

Dessa forma, enquanto o ensaio de migração de cloretos constitui o eixo central da análise, os demais indicadores de durabilidade desempenham papel complementar, auxiliando na interpretação dos efeitos das variáveis de dosagem sobre a microestrutura do concreto e na análise comparativa do

desempenho dos diferentes traços. Esses resultados contribuem para a consistência das análises desenvolvidas na etapa de modelagem probabilística da vida útil.

3.3.1. Resistência mecânica à compressão axial

A resistência mecânica à compressão axial dos concretos, Figura 3.6, foi determinada de acordo com os procedimentos estabelecidos pela NBR 5739 (ABNT, 2018). Para cada traço analisado, foram ensaiados dois corpos de prova cilíndricos. A resistência considerada para cada mistura corresponde ao maior valor obtido entre os corpos de prova.



Figura 3.6 - Realização do ensaio de resistência à compressão axial (Fonte: Autor).

3.3.2. Absorção de água por capilaridade

A avaliação da absorção de água por capilaridade foi realizada conforme os procedimentos estabelecidos na NBR 9779 (ABNT, 2012). Inicialmente, os corpos de prova foram submetidos à secagem em estufa a (100 ± 5) °C por um período de 24 horas, até a obtenção de massa constante, sendo posteriormente mantidos em resfriamento até atingirem a temperatura ambiente em condições controladas. Esse procedimento tem por finalidade garantir que a massa inicial corresponda efetivamente ao estado seco do material, permitindo que o ganho de massa ao longo do ensaio seja atribuído exclusivamente à absorção de água por capilaridade, Figura 3.7.



Figura 3.7 - Realização do ensaio de absorção de água por capilaridade (Fonte: Autor).

Após essa etapa, os corpos de prova foram posicionados sobre suportes no interior de um recipiente, de modo que apenas uma de suas faces permanecesse em contato com a água, mantendo-se o nível constante em 5 ± 1 mm acima da base. Durante a realização do ensaio, a massa dos corpos de prova foi monitorada em intervalos de tempo previamente definidos (3 h, 6 h, 24 h, 48 h e 72 h), sendo cada leitura realizada após a remoção do excesso de água superficial, com o objetivo de evitar interferências na medição. A absorção de água por capilaridade foi então determinada a partir da razão entre o incremento de massa ao longo do tempo, decorrente da ascensão capilar da água, e a área da seção transversal em contato com o fluido, conforme expresso pela Eq. (3.1(3.1).

$$C = \frac{m_t - m_0}{A} \tag{3.1}$$

Em que C representa a absorção de água por capilaridade, m_t a massa do corpo de prova no instante t, m_0 a massa inicial seca e A a área da seção transversal em contato com a água.

Para a análise dos resultados, a absorção de água por capilaridade foi representada em função da raiz quadrada do tempo. Essa escolha fundamenta-se no fato de que o processo de absorção capilar em materiais porosos é governado por mecanismos de transporte difusivo, nos quais a penetração do fluido ocorre proporcionalmente à raiz quadrada do tempo. Dessa forma, ao se representar graficamente a absorção em função de $\sqrt{t}$, obtém-se, nos estágios iniciais do ensaio, uma relação aproximadamente linear, cuja inclinação está associada à sorptividade do material (parâmetro que quantifica a taxa de absorção de água por unidade de área em função da raiz do tempo), permitindo uma interpretação mais direta e consistente do comportamento do concreto frente à penetração de água.

3.3.3. Determinação do coeficiente de migração

O coeficiente de migração de cloretos em regime não estacionário dos concretos foi obtido conforme o método prescrito na norma NT Build 492 (NORDTEST, 1999). Trata-se de um ensaio de migração, no qual o transporte de íons é provocado pela aplicação de uma diferença de potencial elétrico. Esse procedimento permite calcular o coeficiente de migração aparente do concreto por meio de uma equação empírica que leva em conta a voltagem aplicada, o tempo de ensaio e a profundidade de penetração dos íons cloreto.

Para a realização do ensaio, utilizou-se corpos de prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 50 mm de altura. As faces laterais foram impermeabilizadas, assegurando um fluxo iônico unidirecional durante o ensaio. Após esse processo, as amostras foram saturadas por imersão em água destilada durante 24 horas, e, então, iniciou-se o ensaio.

A configuração adotada para o ensaio acima descrito está ilustrada na Figura 3.8.

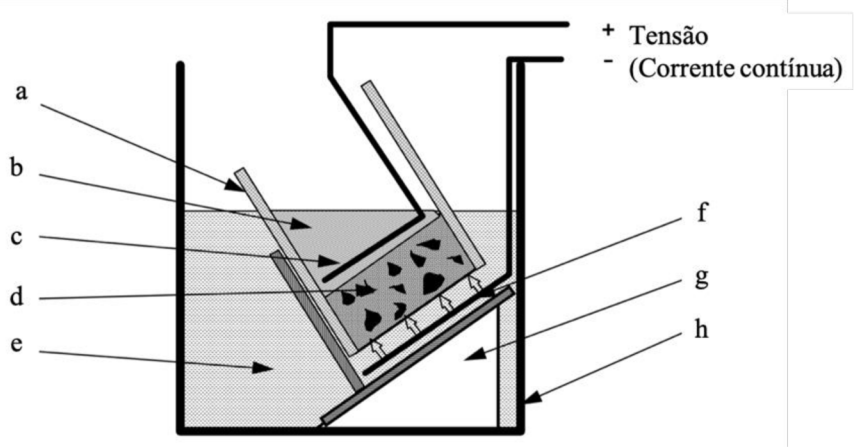


Figura 3.8 - Esquema do ensaio prescrito pela NT Build 492 (Fonte: Adaptado de NT Build 492 (NORDTEST, 1999). Traduzido pelo autor).

Assim, suas respectivas identificações demonstram: 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 área denominada "b" contém solução de NaOH a 0,3 M.

As amostras foram, inicialmente, submetidas a uma tensão de 30 V. A partir da corrente elétrica registrada no início do ensaio, a tensão aplicada ao sistema foi ajustada, e o tempo total de ensaio foi definido conforme os valores indicados na Tabela 3.7. Ressalta-se que, para todos os concretos analisados neste estudo, foi necessária a realização de ensaios com duração de 24 ou 48 horas. Além disso, as temperaturas da solução anódica foram monitoradas tanto no início quanto ao final do ensaio. Logo, na Figura 3.9 é apresentado o aparato utilizado para este ensaio.

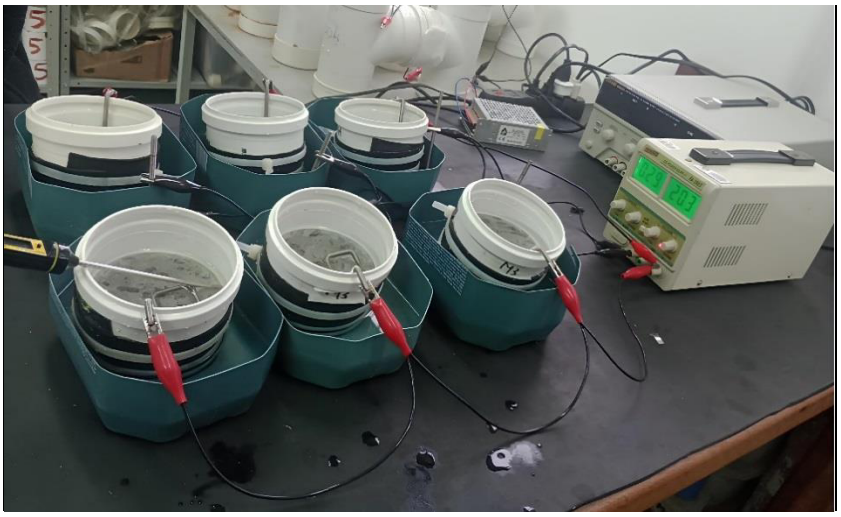


Figura 3.9 - Equipamento utilizado para realização do ensaio NT Build 492:1999 (Fonte: Autor).

Tabela 3.7. Tensão imposta e tempo de duração do ensaio prescrito pela NT Build 492:1999. 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

Ao término do ensaio, as amostras de concreto foram fraturadas diametralmente e pulverizadas com uma solução de nitrato de prata ($AgNO_3$) a 0,1 M. Esse procedimento permite identificar a profundidade de penetração dos íons cloreto, uma vez que as regiões afetadas apresentam coloração mais clara, conforme ilustrado apresenta a Figura 3.10.



Figura 3.10 - Amostra de concreto após aspersão da solução de nitrato de prata (Fonte: Autor).

A medição da profundidade de penetração, por sua vez, foi realizada em sete pontos distintos de cada amostra, utilizando-se paquímetro sempre que viável e, em casos específicos, com o auxílio de recursos computacionais. A Figura 3.11 apresenta a orientação prevista na norma aplicável ao ensaio quanto à determinação da profundidade média de penetração de cloretos nas amostras de concreto.

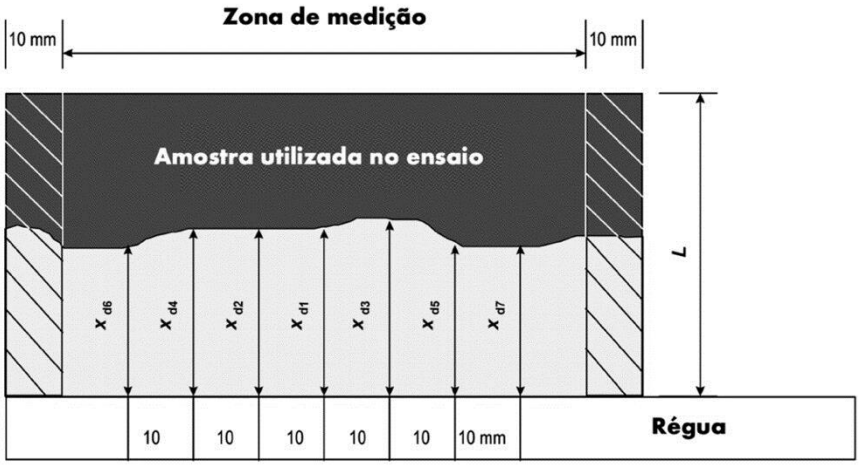


Figura 3.11 - Medição da profundidade de penetração de cloretos média em cada amostra submetida ao ensaio (Fonte: Adaptado de NT Build 492 (NORDTEST, 1999). Traduzido pelo autor).

Finalmente, o coeficiente de migração em estado não estacionário (D_{nssm}) é determinado pela Eq. (3.2).

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

onde D_{nssm} é o coeficiente de migração 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 norma NT Build 492 (NORDTEST, 1999) não estabelece uma classificação da difusividade do concreto com base nos valores de D_{nssm}. Contudo, essa classificação foi sugerida por Nilsson *et al*. (1998) e encontra-se apresentada na Tabela 3.8. Ressalta-se, entretanto, que a utilização dessa classificação deve ser realizada com cautela, uma vez que não possui caráter normativo e apresenta limitações quanto à sua generalização, não devendo, portanto, ser interpretada como um critério absoluto ou prescritivo

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	Alta
10 – 15	Moderada
5 – 10	Baixa
2,5 – 5	Muito baixa
< 2,5	Desprezível

É importante destacar que, ao se determinar a resistência à penetração de cloretos por meio de um método de ensaio acelerado, deve-se considerar que os resultados obtidos diferem significativamente daqueles observados em condições reais de exposição. O valor de D_{nssm}, portanto, representa apenas um índice simplificado da resistência à migração de cloretos e das propriedades gerais de durabilidade do concreto, de forma semelhante ao valor da resistência à compressão aos 28 dias, que também funciona como um indicador simplificado e relativo das características mecânicas do material.

Fator de envelhecimento

O fator de envelhecimento do concreto (α) foi determinado a partir da análise da variação do

coeficiente de migração de cloretos em regime não estacionário (Dnssm) ao longo do tempo, conforme proposto por Tang (1996) e Gjørv (2014). Esse parâmetro representa a taxa de redução do coeficiente de migração em função da idade do concreto, estando diretamente associado à evolução da microestrutura da matriz cimentícia. Para sua determinação, os valores experimentais de D_{nssm} obtidos em diferentes idades foram ajustados a uma relação do tipo potencial, na qual o coeficiente de migração é expresso como função do tempo. Aplicando-se logaritmo a essa relação, obtém-se uma forma linearizada, conforme:

$$Log\ D = Log\ D_0 - \alpha\ Log_{(\frac{t}{to})}$$

Onde D corresponde ao coeficiente de migração na idade t, D_0 ao coeficiente de migração em uma idade de referência t_0, e α ao fator de envelhecimento. Dessa forma, a partir da representação dos dados experimentais em escala logarítmica (Log D versus Log t), o parâmetro α foi obtido como o coeficiente angular da reta ajustada por regressão linear, representando, em módulo, a taxa de redução do coeficiente de migração ao longo do tempo.

Valores mais elevados de α indicam uma redução mais acentuada da difusividade, refletindo um maior refinamento da rede de poros. Esse comportamento está associado à continuidade das reações de hidratação e, quando presentes, às reações pozolânicas, que promovem a formação adicional de produtos cimentícios, reduzindo a conectividade dos poros e, consequentemente, a mobilidade de íons no interior do concreto.

3.3.4. Resistividade elétrica volumétrica (Bulk)

Para este ensaio em específico, adotou-se o método descrito na Prática Recomendada para a determinação da resistividade elétrica em corpos de prova de concreto (IBRACON, 2021b), utilizando-se, então, dois corpos de prova saturados (com água destilada) de cada traço para a execução do ensaio. Inicialmente, posicionaram-se duas esponjas umedecidas entre os eletrodos metálicos, sobre os quais foi aplicada uma massa de 2 kg. Em seguida, aplicou-se uma diferença de potencial ao sistema, e a corrente elétrica resultante foi registrada. Posteriormente, repetiu-se o procedimento, agora com o corpo de prova inserido entre as esponjas, como está demonstrado na Figura 3.12.

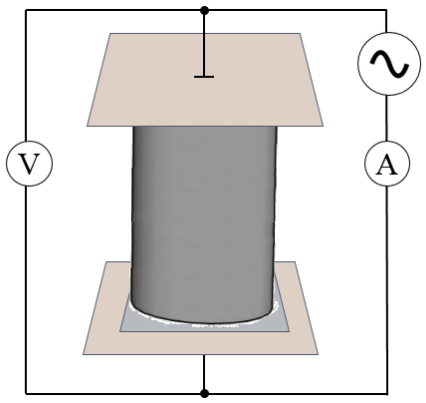


Figura 3.12 – Esquematização do ensaio de resistividade volumétrica (Fonte: Autor).

A resistência elétrica é calculada, de acordo com a Lei de Ohm, por meio da Equação (3.3).

$$R = V/I \tag{3.3}$$

Onde R é a resistência elétrica [Ω], V é a diferença de potencial entre os eletrodos [V] e I é a corrente elétrica que circula pelo circuito [A].

Já a resistência elétrica do concreto, por sua vez, foi obtida por meio da Equação (3.4).

$$R_c = R_{c+sp} - R_{sp} \tag{3.4}$$

Onde R_c é a resistência elétrica do concreto [Ω], R_{c+sp} é a resistência elétrica do concreto somada à das esponjas [Ω] e R_{sp} é a resistência elétrica das esponjas [Ω].

A resistividade elétrica do concreto pode, então, ser obtida a partir da Equação (3.5).

$$\rho_c = R_c \cdot S/L \tag{3.5}$$

Onde ρ_c é a resistividade elétrica do concreto [Ω·m], R_c é a resistência elétrica do concreto [Ω], S a área da face da amostra em que a esponja está localizada [m²] e L é a altura das amostras [m].

A resistividade elétrica volumétrica do concreto é apresentada em valores inteiros, correspondendo à média aritmética das duas medições realizadas em cada corpo de prova, conforme estabelecido na Equação (3.6).

$$\rho_{Vcon} = \underline{\rho_c} \cdot k_c \tag{3.6}$$

Onde ρ_{Vcon} é a resistividade elétrica volumétrica do concreto [Ω·m], ρ_c é a média das duas medidas feitas em cada corpo de prova [Ω·m] e k_c é o fator de cura, igual 1,1 para cura em imersão em água saturada de Ca(OH)2 .

3.3.5. Resistividade elétrica superficial (método de Wenner)

O ensaio para determinação da resistividade elétrica superficial por meio do método dos quatro pontos, também denominado método de Wenner, foi formalizado pela norma americana AASHTO T 358-15 (AASHTO, 2015) e descrito na Prática Recomendada para medição da resistividade elétrica em corpos de prova de concreto (IBRACON, 2021).

Para a execução do ensaio, foram utilizados dois corpos de prova cilíndricos com dimensões de 100 x 200 mm, previamente saturados (com água destilada), para cada mistura. Logo, as amostras foram posicionadas em um suporte com o objetivo de evitar sua rotação durante a medição, como está demonstrado na Figura 3.13 e, então, a sonda foi aplicada longitudinalmente nas posições angulares de 0º, 90º, 180º e 270º.

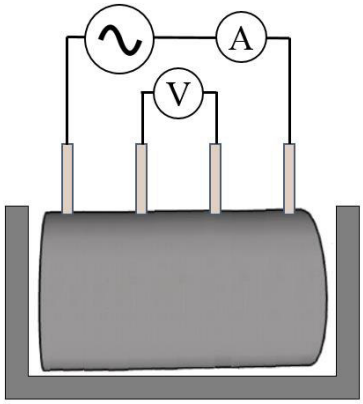


Figura 3.13 – Esquematização do ensaio de resistividade superficial (Fonte: Autor).

A resistividade elétrica superficial do concreto é obtida pela média das quatro leituras realizadas em cada corpo de prova, conforme descrito na Equação (3.7)

$$\rho_{Scon} = \underline{\rho_c} \cdot k_c \cdot k_f \tag{3.7}$$

Onde ρ_{Scon} é resistividade elétrica superficial do concreto [Ω·m], ρ_c é resistividade elétrica do concreto obtida no ensaio, k_c é o fator de cura (igual a 1,1 para cura em imersão em água saturada de Ca(OH)2), e k_f o fator de forma do corpo de prova, igual a 0,571.

3.4. Análise probabilística

A estimativa probabilística da vida útil das estruturas foi conduzida com base no modelo DURACON, desenvolvido como uma evolução dos conceitos estabelecidos no projeto europeu DuraCrete (DURACRETE, 2000). Esse modelo combina a solução analítica da Segunda Lei de Fick, empregada para descrever o transporte de íons cloreto no concreto, com procedimentos de simulação de Monte Carlo, permitindo avaliar de forma probabilística o tempo necessário para o início do

processo de corrosão das armaduras.

O teor de cloretos na profundidade da armadura é estimado por:

$$C(x,t) = C_S \left[1 - erf\left(\frac{x_c}{2\sqrt{D(t)t}}\right)\right] \tag{3.8}$$

Onde $C(x,t)$ é o teor de cloretos (%), C_S é a concentração superficial de cloretos (%), erf é a função erro, x_c é o cobrimento da armadura (mm), t é a idade para a qual a previsão está sendo realizada (anos) e $D(t)$ é o coeficiente de migração aparente dependente do tempo.

A evolução temporal da difusividade é descrita pelo modelo de envelhecimento:

$$D(t) = \frac{D_0}{1 - \alpha}\left[\left(1 + \frac{t'}{t}\right)^{1-\alpha} - \left(\frac{t'}{t}\right)^{1-\alpha}\right]\left(\frac{t_0}{t}\right)^{\alpha} k_e \tag{3.9}$$

sendo $D(t)$ o coeficiente de migração de cloretos no concreto [mm2/ano], D_0 o coeficiente de migração de referência [mm2/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. (3.10).

$$k_e = exp\left[\frac{E_A}{R}\left(\frac{1}{293} - \frac{1}{273 + T}\right)\right] \tag{3.10}$$

Onde 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:

$$g(x,t) = C_{CR} - C(x,t) \tag{3.11}$$

Na qual 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. A probabilidade de falha da estrutura, isto é, a probabilidade de ocorrência da corrosão das armaduras, é determinada conforme a Eq. (3.12)

$$P_f = P\,(C(x,t) \geq C_{CR}) \tag{3.12}$$

A estimativa dessa probabilidade foi realizada por meio de simulação de Monte Carlo, na qual os valores das variáveis aleatórias são gerados repetidamente a partir de suas respectivas distribuições

estatísticas. Para cada conjunto de valores amostrados (Tabela 3.9), calcula-se a concentração de cloretos na profundidade da armadura ao longo do tempo e verifica-se o atendimento da função de estado limite. A repetição desse procedimento ao longo de muitas simulações permite estimar a frequência relativa de ocorrência da condição de falha, fornecendo uma estimativa da probabilidade de despassivação das armaduras.

Tabela 3.9. Variáveis aleatórias utilizadas na avaliação probabilística.
Fonte: Autor

Parâmetro de entrada	**Unidade**	**Referência**	**Distribuição**	**Média**	**COV**
Coeficiente de migração (D_0)	m^2/s	Autor	Normal	D_{28}	0,10
Cobrimento nominal (x_c)	mm	NBR 6118 (2023)	Determinística	50	-
Concentração superficial de cloretos (C_S)	%(1)	Federation Internationale du Beton (2015)	Lognormal	2,00	0,45
Temperatura (T)	ºC	INMET (2019) [2]	Normal	18	0,20
Fator de envelhecimento (α)	-	Boddy *et al*. (2001)	Normal	α	0,20
Tempo (t_0)	dias	Boddy *et al*. (2001)	Determinístico	28	-
Concentração crítica (C_{CR})	%[1]	Angst *et al*. (2009)	Normal	0,40	0,15

As variáveis de entrada foram modeladas como parâmetros estocásticos; o horizonte de análise adotado foi de 150 anos, sendo realizadas 10^6 simulações para cada cenário analisado, de modo a garantir estabilidade estatística na estimativa das probabilidades de falha. As simulações foram implementadas por meio de rotinas computacionais desenvolvidas na linguagem Python, utilizando bibliotecas científicas para geração de variáveis aleatórias, manipulação de dados e avaliação numérica das equações do modelo.

A vida útil característica t_k foi definida como o tempo necessário para que a probabilidade de falha por despassivação das armaduras atinja $p_f = 10\%$, seguindo a recomendação de Gjørv (2009), segundo a qual a probabilidade de ocorrência de corrosão não deve ultrapassar esse limite ao longo da vida de serviço da estrutura. Dessa forma, o tempo correspondente a esse nível de probabilidade de falha é adotado como estimativa da vida útil da estrutura no cenário considerado.

O cenário-base considerou concentração superficial de cloretos $c_s = 2{,}00\%$, derivada da Federation Internationale du Beton (2015). A temperatura empregada no modelo corresponde à média anual registrada na cidade de Rio Grande/RS no ano de 2024 (18°C), obtida a partir dos dados da estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (2024).

4. RESULTADOS

Este capítulo apresenta e discute os principais resultados obtidos com base na metodologia detalhada no capítulo anterior.

4.1. Resistência à compressão

Os resultados obtidos pelo ensaio de resistência à compressão axial aos 7 dias de idade estão apresentados na Figura 4.1.

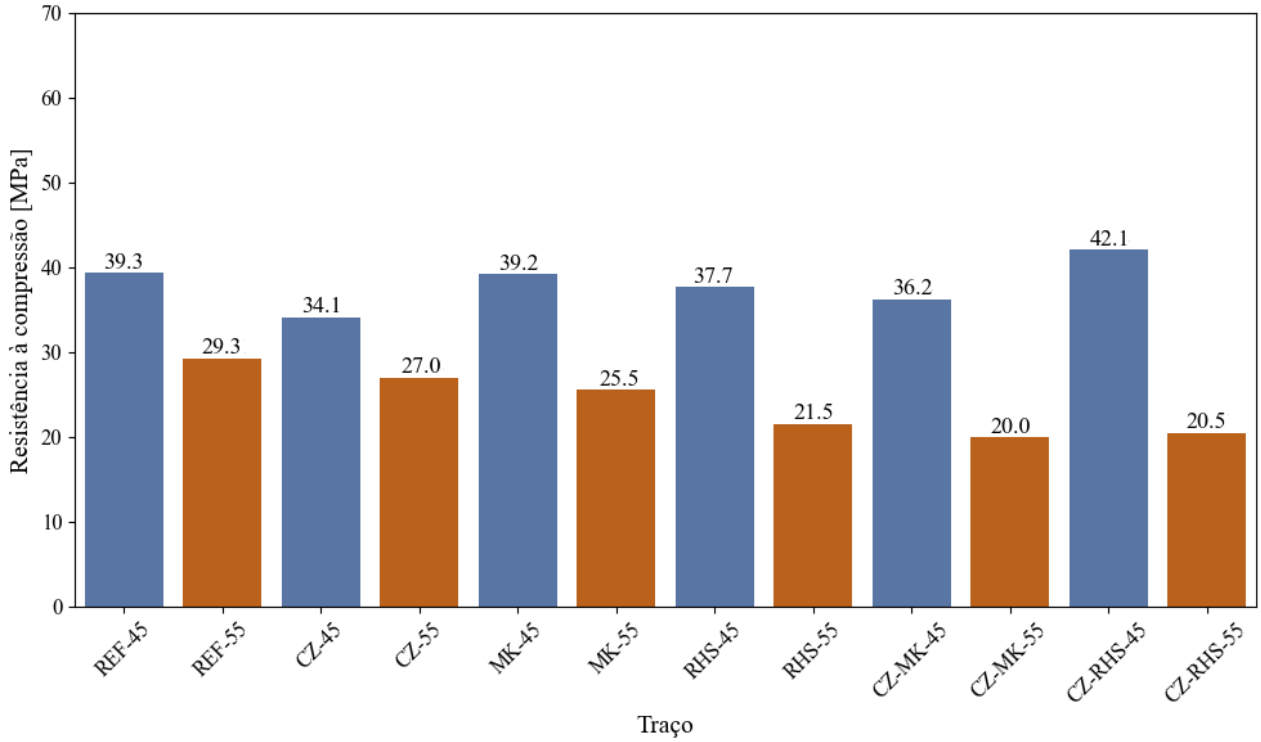


Figura 4.1 - Resistência à compressão dos concretos aos 7 dias de idade (Fonte: Autor).

Aos 7 dias de idade, os resultados de resistência à compressão revelam diferenças significativas entre os traços avaliados, especialmente em função da relação água/aglomerante (ag/agl) e, de maneira geral, os concretos com ag/agl 0,45 apresentaram resistências superiores aos de ag/agl 0,55, comportamento esperado em função da menor relação água/aglomerante.

O traço de referência com relação ag/agl 0,45 (REF-45) obteve a maior resistência entre os traços sem adições (39,3 MPa), enquanto sua contraparte com ag/agl 0,55 (REF-55) apresentou uma resistência inferior (29,3 MPa), refletindo uma redução considerável no desempenho mecânico inicial.

Quanto às adições minerais, os resultados demonstram comportamentos distintos. O

metacaulim (MK) apresentou desempenho semelhante ao concreto de referência com ag/agl 0,45, indicando boa atividade pozolânica nos primeiros dias, mas perdeu eficiência em ag/agl 0,55. A sílica de casca de arroz (RHS), quando usada isoladamente, também apresentou bons resultados iniciais em ag/agl 0,45, sendo superior ao CZ, que demonstrou menor contribuição para a resistência aos 7 dias. Notavelmente, a combinação CZ-RHS em ag/agl 0,45 resultou na maior resistência entre todos os traços (42,1 MPa). Por outro lado, os traços com múltiplas adições e ag/agl 0,55 apresentaram resistências significativamente reduzidas.

Agora, os resultados obtidos pelo ensaio de resistência à compressão axial aos 28 dias de idade estão apresentados na Figura 4.2

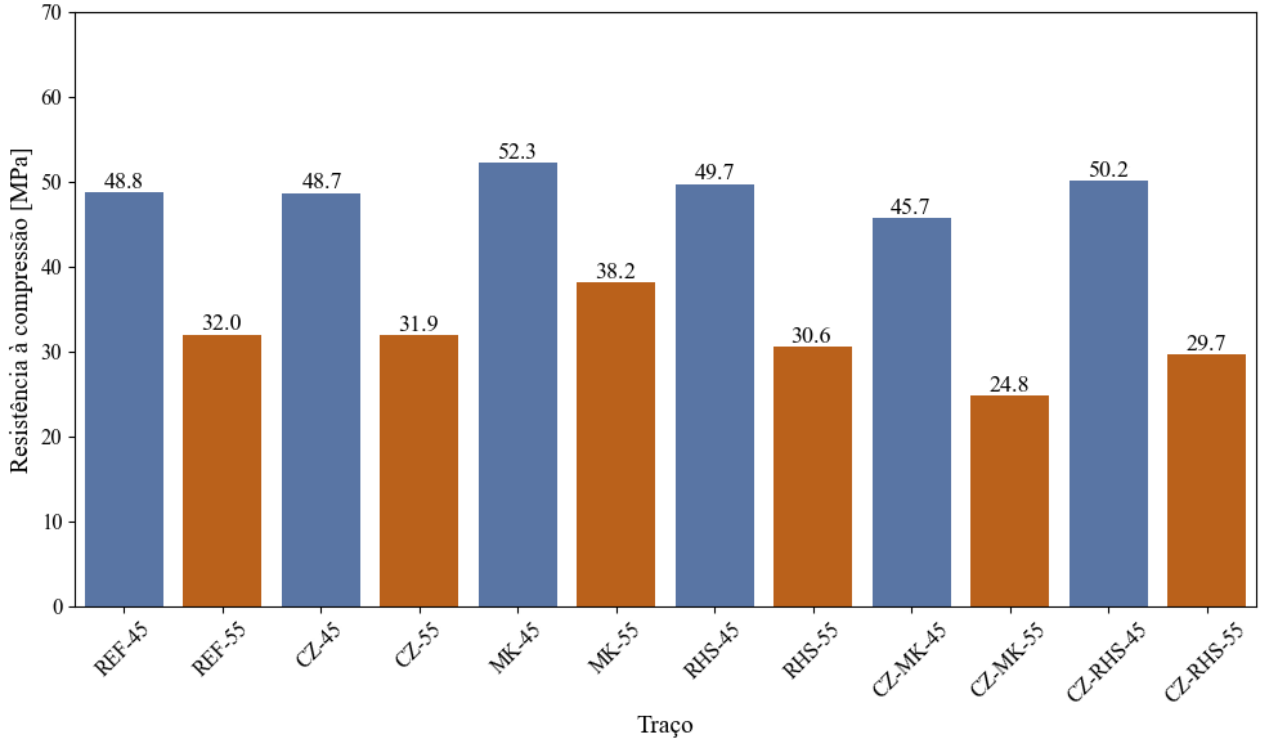


Figura 4.2 - Resistência à compressão dos concretos aos 28 dias de idade (Fonte: Autor).

Aos 28 dias de idade, observa-se um aumento significativo na resistência à compressão de todos os traços avaliados. A influência da relação água/aglomerante (ag/agl) continua evidente. O traço de referência REF-45 atingiu 48,8 MPa, enquanto REF-55 alcançou apenas 32,0 MPa.

Analisando o comportamento das adições minerais, nota-se que o metacaulim (MK) obteve o melhor desempenho individual aos 28 dias, com MK-45 alcançando 52,3 MPa — o valor mais alto entre todos os traços. Este resultado evidencia a elevada atividade pozolânica do metacaulim, que contribui para a formação de produtos cimentícios secundários ao longo da cura, melhorando a resistência mecânica. A sílica de casca de arroz (RHS) também apresentou bom desempenho, com

RHS-45 atingindo 49,7 MPa, resultado superior à referência e ao traço com cristalizante (CZ-45), que obteve 48,7 MPa.

Em relação às adições combinadas, o traço CZ-RHS-45 alcançou 50,16 MPa, sendo o melhor resultado entre os traços com adições mistas, demonstrando uma interação positiva entre o cristalizante e a sílica de casca de arroz no desenvolvimento da resistência a médio prazo.

Os resultados obtidos pelo ensaio de resistência à compressão axial aos 180 dias de idade na Figura 4.3

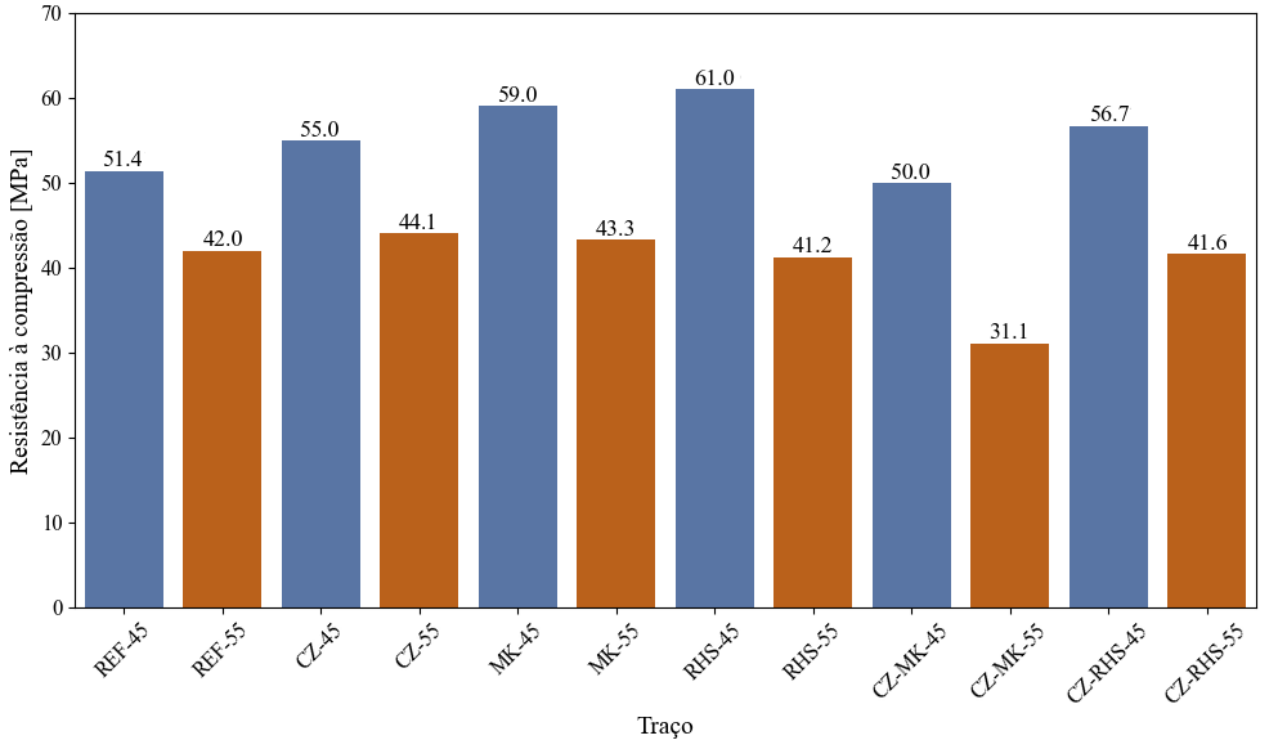


Figura 4.3 - Resistência à compressão dos concretos aos 180 dias de idade (Fonte: Autor).

Aos 180 dias de idade, observa-se um avanço expressivo na resistência à compressão de todos os traços de concreto, evidenciando a continuidade do processo de hidratação e a consolidação da matriz cimentícia ao longo do tempo.

Entre os traços avaliados, destaca-se o RHS-45, que atingiu 61,0 MPa, representando o melhor desempenho geral do estudo e demonstrando a elevada eficiência da sílica de casca de arroz como adição pozolânica de longo prazo. Em seguida, o MK-45 apresentou 59,0 MPa, consolidando-se como o segundo melhor resultado e evidenciando que o metacaulim mantém sua contribuição significativa à resistência mesmo em idades avançadas de cura

Quanto às misturas ternárias, o traço CZ-RHS-45 apresentou 56,7 MPa, resultado também

bastante satisfatório, enquanto o CZ-MK-45 obteve 50,0 MPa, ambos indicando que as combinações de adições continuam a oferecer benefícios mecânicos relevantes, embora ligeiramente inferiores aos melhores desempenhos das adições minerais individuais.

Ao longo das três idades analisadas (7, 28 e 180 dias), observou-se uma evolução consistente da resistência à compressão em todos os traços, evidenciando o contínuo processo de hidratação e o aprimoramento progressivo da microestrutura do concreto. Nos estágios iniciais (7 dias), os concretos com menor relação água/aglomerante (0,45) já apresentaram desempenho superior, tendência que se manteve e se acentuou nas idades subsequentes. Aos 28 dias, a diferença entre os traços se tornou mais evidente, com destaque para o metacaulim (MK-45) e para a combinação cristalizante e sílica de casca de arroz (CZ-RHS-45). Por fim, aos 180 dias, confirmou-se o efeito benéfico das adições pozolânicas, principalmente da sílica de casca de arroz, cujo traço RHS-45 alcançou 61,0 MPa, seguido pelo MK-45 com 59,0 MPa, consolidando-se como os concretos de melhor desempenho mecânico global. Em síntese, os resultados indicam que as adições minerais ativas contribuíram para o aumento progressivo da resistência ao longo do tempo, destacando-se especialmente os traços com sílica de casca de arroz e metacaulim. Por outro lado, observa-se que o aditivo cristalizante não apresenta como mecanismo principal a elevação da resistência à compressão, estando sua atuação predominantemente associada à redução da permeabilidade por meio do preenchimento e bloqueio de poros e microfissuras na matriz cimentícia.

4.2. Absorção de água por capilaridade

A Figura 4.4 e Figura 4.5 apresentam os resultados obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade para os traços com relação ag/agl de 0,45 e 0,55, respectivamente.

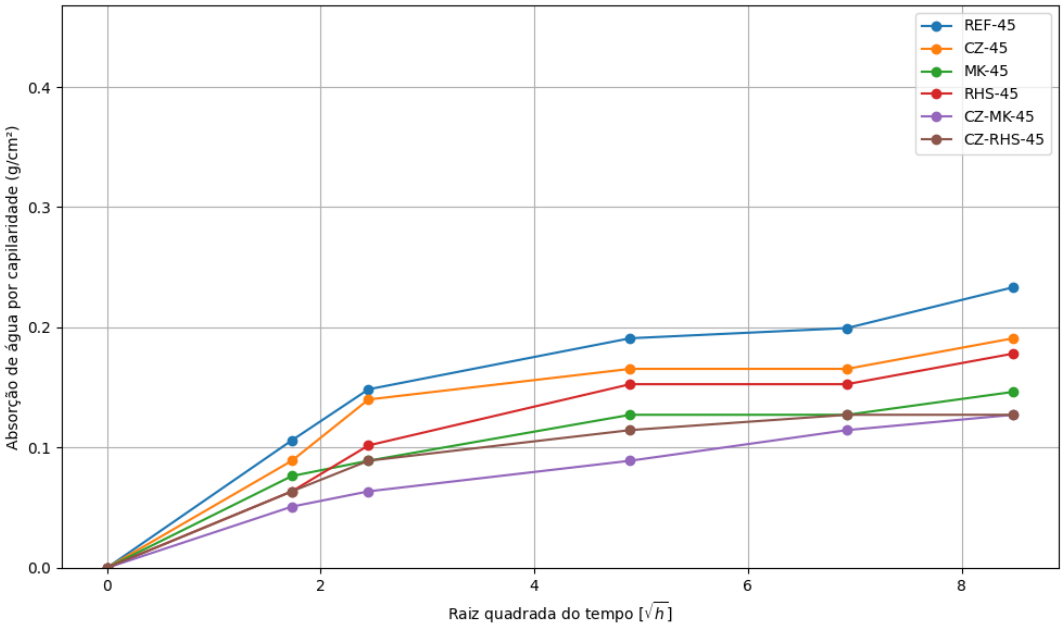


Figura 4.4 - Absorção de água por capilaridade nos concretos ag/agl = 0,45 (Fonte: Autor).

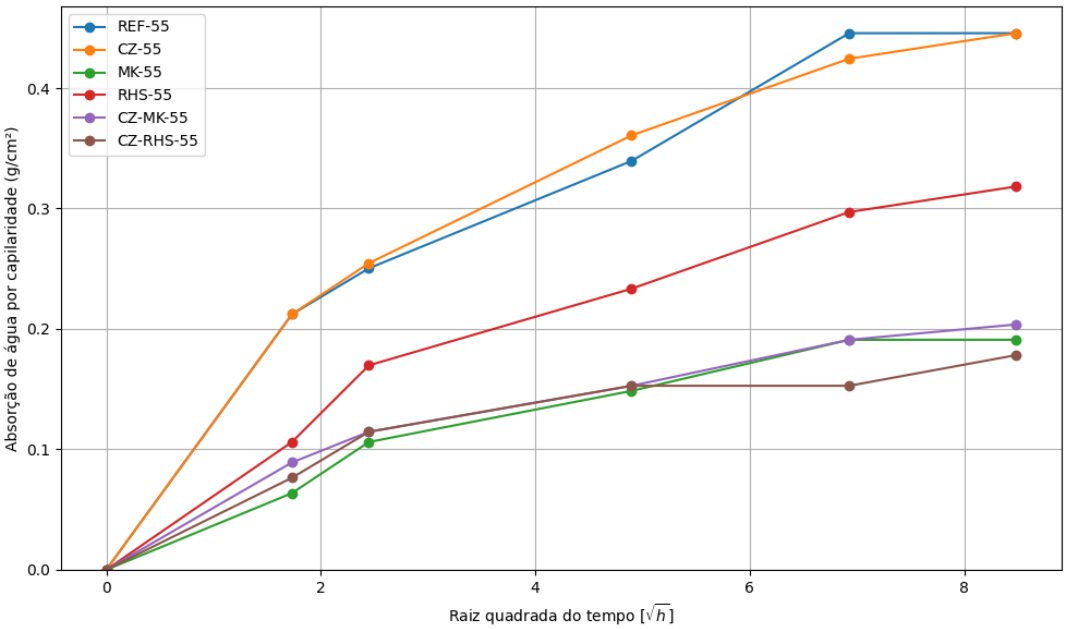


Figura 4.5 - Absorção de água por capilaridade nos concretos ag/agl = 0,55 (Fonte: Autor).

A análise dos resultados obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade, realizado aos 28 dias de idade dos concretos, evidencia diferenças marcantes entre os traços com relação água/aglomerante de 0,45 e 0,55. De maneira geral, os concretos com ag/agl 0,55 apresentaram valores significativamente mais elevados de absorção ao longo de todo o intervalo analisado, indicando maior porosidade e menor compacidade da matriz cimentícia, em comparação aos traços com ag/agl 0,45.

Observa-se, ainda, que as curvas apresentam comportamento aproximadamente linear nos estágios iniciais quando representadas em função da raiz quadrada do tempo, o que confirma a adequação dessa abordagem para a análise do fenômeno de absorção capilar.

No gráfico correspondente aos traços com ag/agl 0,45, observa-se que o traço de referência (REF-45) apresentou os maiores valores de absorção em todos os tempos analisados, atingindo aproximadamente 0,23 g/cm² ao final do ensaio. Em contrapartida, os traços com adições demonstraram desempenho superior, com reduções consistentes na absorção capilar. Dentre as adições individuais, o metacaulim (MK-45) e a sílica de casca de arroz (RHS-45) apresentaram comportamentos bastante próximos, com valores finais em torno de 0,14 a 0,15 g/cm², indicando um refinamento relevante da microestrutura. Já o traço com cristalizante (CZ-45) apresentou desempenho intermediário, com valores próximos de 0,19 g/cm², ainda inferiores ao traço de referência. Entre as adições mistas, destaca-se o traço CZ-MK-45, que apresentou os menores valores de absorção ao longo de todo o ensaio, atingindo aproximadamente 0,13 g/cm² ao final, seguido de perto pelo CZ-RHS-45, com comportamento muito semelhante. Esses resultados indicam uma clara sinergia entre as adições minerais e o aditivo cristalizante na redução da capilaridade.

Além dos valores absolutos de absorção, observa-se que a inclinação das curvas nos trechos iniciais — associada à sorptividade — também se reduz significativamente nos traços com adições, indicando menor velocidade de absorção capilar e, consequentemente, menor facilidade de ingresso de fluidos no interior do concreto. Esse comportamento está diretamente relacionado ao refinamento da microestrutura da matriz cimentícia, caracterizado pela redução da conectividade dos poros capilares e pelo aumento da tortuosidade dos caminhos de transporte, o que dificulta o avanço da frente de umedecimento no interior do material.

Nesse contexto, considerando que, em concretos parcialmente saturados, o transporte de íons agressivos ocorre predominantemente por sucção capilar, a redução da absorção observada nos traços com adições indica um potencial aumento da durabilidade frente à penetração de cloretos. Ademais, eventuais desvios da linearidade observados em tempos mais elevados podem ser atribuídos à aproximação da saturação dos poros, o que reduz gradativamente a taxa de absorção capilar ao longo do ensaio.

Por sua vez, no gráfico referente aos traços com ag/agl 0,55, observa-se um comportamento mais crítico, com níveis de absorção significativamente mais elevados. Os traços REF-55 e CZ-55 apresentaram os maiores valores ao final do ensaio, ambos atingindo aproximadamente 0,45 g/cm², evidenciando elevada porosidade e maior facilidade de transporte de água. A utilização de adições

minerais promoveu melhorias perceptíveis, embora os valores permaneçam superiores aos observados nos traços com menor relação ag/agl. O traço com sílica de casca de arroz (RHS-55) apresentou desempenho intermediário, com valor final em torno de 0,32 g/cm², enquanto o metacaulim (MK-55) apresentou redução mais significativa, atingindo aproximadamente 0,19 g/cm². Entre as combinações, os traços CZ-MK-55 e CZ-RHS-55 se destacaram com os menores valores de absorção, próximos de 0,20 g/cm² e 0,18 g/cm², respectivamente, demonstrando que a combinação de adições continua sendo eficaz mesmo em condições menos favoráveis.

Portanto, com base nos resultados obtidos, verifica-se que a adição individual com melhor desempenho no controle da absorção capilar foi o metacaulim (MK), enquanto, entre as adições mistas, o traço CZ-MK apresentou desempenho ligeiramente superior nos concretos com ag/agl 0,45, sendo acompanhado de perto pelo CZ-RHS, especialmente no caso dos traços com ag/agl 0,55. Esses resultados reforçam o papel das adições minerais, isoladas e combinadas com o cristalizante, na redução da permeabilidade e no aprimoramento da durabilidade do concreto.

4.3. Coeficiente de migração de cloretos no regime não estacionário

Os resultados obtidos no ensaio de determinação do coeficiente de migração de cloretos no regime não estacionário (Dnssm) aos 28 dias de idade dos traços de concreto, são apresentados na Figura 4.6.

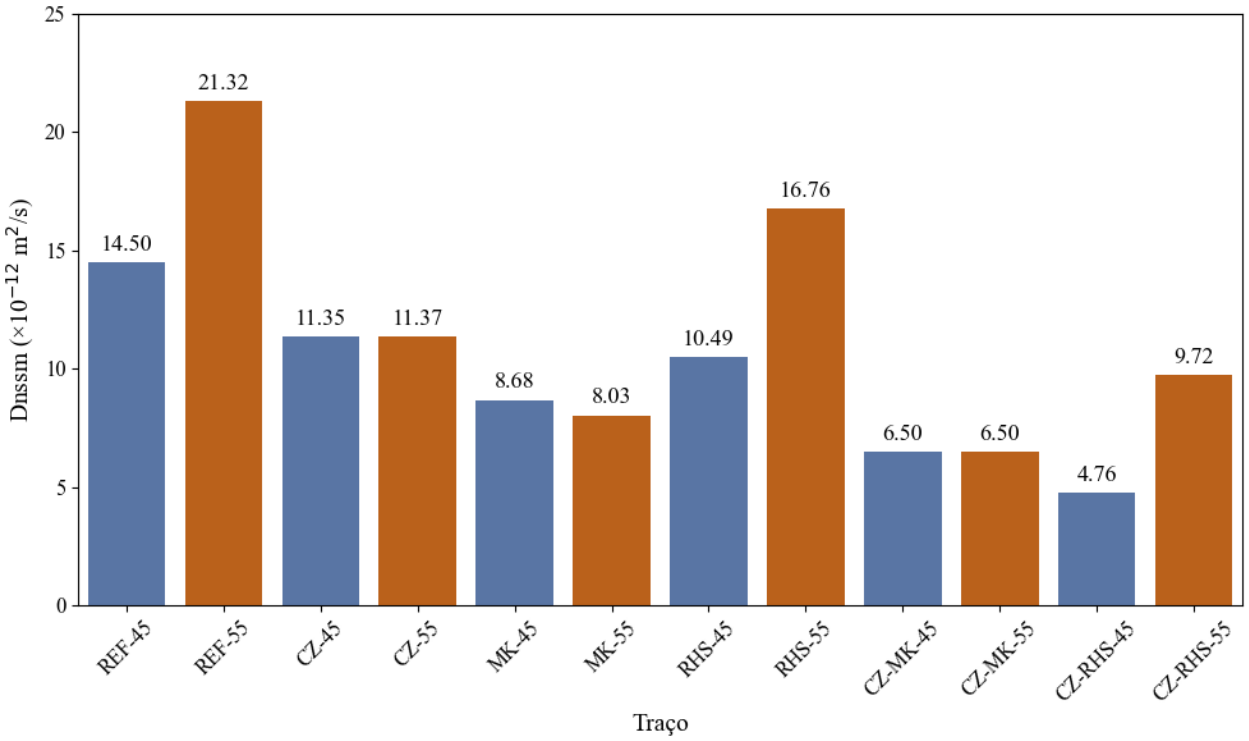


Figura 4.6 - Coeficiente de migração de cloretos aos 28 dias (Fonte: Autor).

Os resultados do ensaio de migração acelerada de íons cloreto revelam diferenças expressivas no desempenho dos diversos traços de concreto e, de modo geral, observa-se que os concretos formulados com relação ag/agl de 0,45 apresentaram coeficientes de migração mais baixos do que os correspondentes com ag/agl 0,55, confirmando a influência negativa de maiores teores de água na estrutura capilar do concreto e, consequentemente, na sua permeabilidade aos íons agressivos.

O traço de referência com ag/agl 0,45 (REF-45) apresentou um coeficiente de 14,5 $\times 10^{-12}$ m²/s, valor consideravelmente inferior ao do REF-55, que alcançou 21,32 $\times 10^{-12}$ m²/s. Essa diferença reforça o entendimento de que a redução da porosidade, promovida por uma menor relação ag/agl, contribui para o aumento da durabilidade do concreto frente à penetração de cloretos.

Em relação às adições minerais utilizadas de forma isolada, o metacaulim (MK) destacou-se positivamente. O traço MK-45 apresentou coeficiente de 8,68 $\times 10^{-12}$ m²/s, evidenciando a alta capacidade do metacaulim em refinar a matriz do concreto, reduzir a conectividade dos poros e, assim, dificultar a migração de íons cloreto. Traços com sílica de casca de arroz (RHS) e cristalizante (CZ) também demonstraram desempenho satisfatório, com coeficientes de 10,49 $\times 10^{-12}$ m²/s e 11,35 $\times 10^{-12}$ m²/s, respectivamente, no caso da relação ag/agl 0,45.

Os melhores resultados, contudo, foram observados nos traços que incorporaram adições em combinação. A associação entre cristalizante e metacaulim (CZ-MK-45) apresentou um coeficiente de apenas 6,5 $\times 10^{-12}$ m²/s, enquanto a combinação entre cristalizante e sílica de casca de arroz (CZ-RHS-45) atingiu o menor valor entre todos os traços avaliados, com 4,76 $\times 10^{-12}$ m²/s. Tais resultados sugerem uma ação sinérgica entre as adições, proporcionando uma matriz ainda mais densa e resistente à penetração de cloretos, sobretudo quando associada a uma relação ag/agl reduzida.

Logo, a Figura 4.7 destaca o coeficiente de migração dos traços avaliados aos 56 dias de idade.

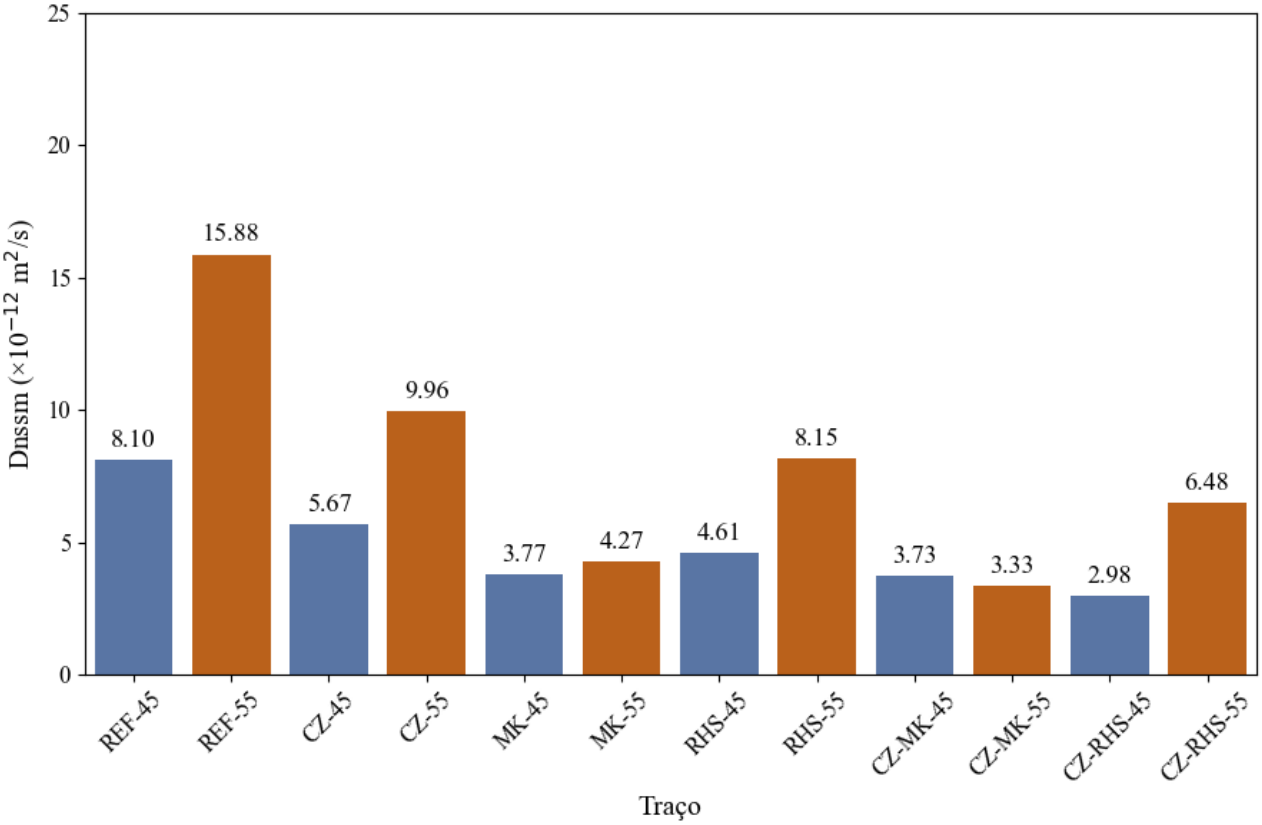


Figura 4.7 - coeficiente de migração de cloretos aos 56 dias (Fonte: Autor).

Aos 56 dias de idade, os resultados do coeficiente de migração de cloretos demonstram avanços importantes na durabilidade dos concretos avaliados, com reduções consideráveis em comparação aos valores observados aos 28 dias. A continuidade dos processos de hidratação e das reações pozolânicas contribuiu para o aumento da densificação da matriz cimentícia, refletindo-se em menores coeficientes de permeabilidade.

Entre as adições individuais, o metacaulim (MK) demonstrou, novamente, excelente desempenho: o traço MK-45 atingiu 3,77 $\times 10^{-12}$ m²/s e o MK-55, 4,27 $\times 10^{-12}$ m²/s, ambos inferiores aos respectivos traços de referência. A sílica de casca de arroz (RHS), por sua vez, também obteve bons resultados, com RHS-45 alcançando 4,61 $\times 10^{-12}$ m²/s e RHS-55, 8,15 $\times 10^{-12}$ m²/s. Já o cristalizante (CZ), isoladamente, resultou em coeficientes de 5,67 $\times 10^{-12}$ m²/s para CZ-45 e 9,96 $\times 10^{-12}$ m²/s para CZ-55.

Entre os traços com adições combinadas, destacou-se, uma vez mais o CZ-RHS-45, que apresentou o menor coeficiente de migração de todos os traços analisados (2,98 $\times 10^{-12}$ m²/s). A combinação CZ-MK também teve desempenho expressivo, com CZ-MK-45 registrando 3,73 $\times 10^{-12}$ m²/s e CZ-MK-55, 3,33 $\times 10^{-12}$ m²/s.

A seguir, a Figura 4.8 destaca o coeficiente de migração dos traços aos 180 dias de vida.

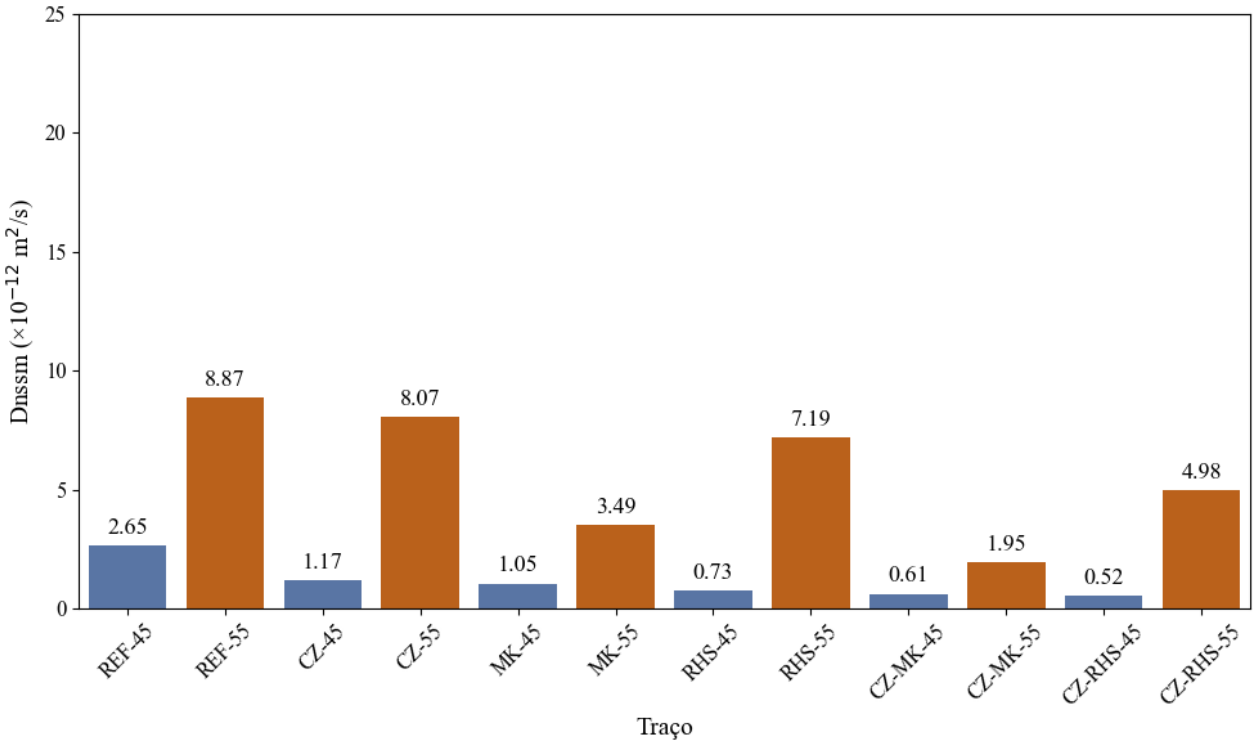


Figura 4.8 - coeficiente de migração de cloretos aos 180 dias (Fonte: Autor).

Aos 180 dias de idade, os resultados do ensaio de migração de cloretos (NT Build 492) evidenciam uma expressiva redução dos coeficientes de penetração em comparação com as idades anteriores, indicando uma evolução significativa na densificação da matriz cimentícia e, consequentemente, na impermeabilidade do concreto. Essa melhora é atribuída à continuidade das reações pozolânicas e ao avanço da hidratação, que contribuem para o refinamento dos poros e a redução da conectividade capilar.

Entre os traços analisados, destaca-se o CZ-RHS-45, que obteve o menor coeficiente de migração (0,52 × 10^{-12} m²/s), seguido pelo CZ-MK-45 (0,61 × 10^{-12} m²/s) e RHS-45 (0,73 × 10^{-12} m²/s), evidenciando que as adições pozolânicas e cristalizantes, isoladas ou combinadas, exerceram forte influência na durabilidade do material.

A análise dos resultados obtidos no ensaio de migração de cloretos (NT Build 492) ao longo das idades de 7, 56 e 180 dias revela uma tendência consistente de redução dos coeficientes de penetração, evidenciando o avanço da hidratação e o refinamento progressivo da microestrutura do concreto. Observou-se que, enquanto nas idades iniciais (7 dias) os concretos ainda apresentavam maior permeabilidade devido à matriz em formação, aos 56 dias já se notava um decréscimo expressivo na migração de íons cloreto, que se acentuou ainda mais aos 180 dias. Esse comportamento confirma a influência positiva do tempo de cura sobre a durabilidade do material, especialmente em

misturas contendo adições pozolânicas e cristalizantes, que potencializam as reações secundárias de hidratação e diminuem a porosidade.

De modo geral, os traços CZ-RHS-45 e CZ-MK-45 se destacaram como os de melhor desempenho ao longo de todas as idades, atingindo, aos 180 dias, coeficientes de migração extremamente baixos ($0{,}52 \times 10^{-12}$ m²/s e $0{,}61 \times 10^{-12}$ m²/s, respectivamente), o que demonstra a elevada eficiência das combinações entre adições minerais e o aditivo cristalizante na mitigação da penetração de cloretos.

É importante ressaltar, ainda, que esses mesmos traços apresentaram desempenho mais expressivo neste ensaio do que na resistência à compressão axial, evidenciando que, embora nem sempre as misturas com múltiplas adições apresentem as maiores resistências mecânicas, elas se mostram particularmente eficazes na melhoria das propriedades de durabilidade, sobretudo no bloqueio à migração de agentes agressivos ao longo do tempo.

Nesse contexto, os resultados também permitem uma leitura mais ampla acerca da influência dos parâmetros de dosagem, indicando que a simples redução da relação água/aglomerante, embora relevante para o aumento da compacidade da matriz, não se mostrou tão determinante quanto a incorporação de adições minerais e aditivos específicos. Tal constatação é corroborada pelo fato de que o traço de referência com ag/agl = 0,45 apresentou desempenho inferior ao de diversas misturas com ag/agl = 0,55 quando associadas a materiais pozolânicos e ao aditivo cristalizante, evidenciando que a modificação da microestrutura por meio de reações pozolânicas e mecanismos de obstrução capilar exerce papel mais significativo na mitigação da migração de cloretos do que o ajuste isolado da relação água/aglomerante.

Fator de envelhecimento

O fator de envelhecimento apresentou ampla variação entre os traços analisados, com valores de α entre 0,184 e 1,578. O traço CZ-55 exibiu o menor valor ($\alpha = 0{,}184$), indicando uma evolução microestrutural mais lenta ao longo do tempo. Em contraste, o traço RHS-45 apresentou o maior valor ($\alpha = 1{,}578$), seguido de perto pelos traços CZ-MK-45 ($\alpha = 1{,}551$) e MK-45 ($\alpha = 1{,}131$), evidenciando uma acentuada redução temporal da difusividade nesses sistemas.

Essa aceleração na redução temporal da difusividade está associada ao refinamento progressivo da microestrutura, especialmente nos sistemas que incorporam materiais pozolânicos e combinações de adições. A presença de sílica ativa, metacaulim e outros constituintes reativos contribui para a formação adicional de produtos de hidratação, promovendo o preenchimento de poros e a redução da conectividade capilar. Esse comportamento resulta em uma matriz mais densa e menos

permeável ao longo do tempo, o que se reflete diretamente em maiores valores do fator de envelhecimento, como apresentado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1- Fator de envelhecimento (α) e coeficiente de determinação (R^2).
Fonte: Autor.

Traço (concreto)	**α**	$\boldsymbol{R^2}$
REF-45	0,918	0,9989
REF-55	0,474	0,9983
CZ-45	1,235	0,9944
CZ-55	0,184	0,9998
MK-45	1,131	0,9994
MK-55	0,458	0,8045
RHS-45	1,578	0,9949
RHS-55	0,425	0,7426
CZ-MK-45	1,551	0,9774
CZ-MK-55	0,767	0,9080
CZ-RHS-45	1,222	0,9696
CZ-RHS-55	0,345	0,9297

Modelos de previsão de vida útil baseados na difusão de cloretos são fortemente dependentes dos parâmetros de transporte adotados. A extrapolação de ensaios de curta duração para períodos prolongados introduz incertezas significativas, particularmente em parâmetros que governam a evolução temporal da difusividade, como o fator de envelhecimento α. Estudos baseados em modelagem difusiva e análise probabilística, como os de Maage *et al.* (1996), Engelund e Sørensen (1998), Kong *et al.* (2002), Lorensini (2006), Pradelle *et al.* (2017) e Angst (2018), indicam que α exerce influência significativa nas previsões em idades avançadas, de modo que pequenas variações em seu valor podem resultar em diferenças expressivas nas estimativas de vida útil. Assim, α deve ser interpretado como um parâmetro dependente da microestrutura do concreto e das características específicas de cada traço. Logo, os valores do fator de envelhecimento α, obtidos a partir da linearização dos coeficientes de migração em escala logarítmica, são apresentados na Figura 4.9. e na Figura 4.10.

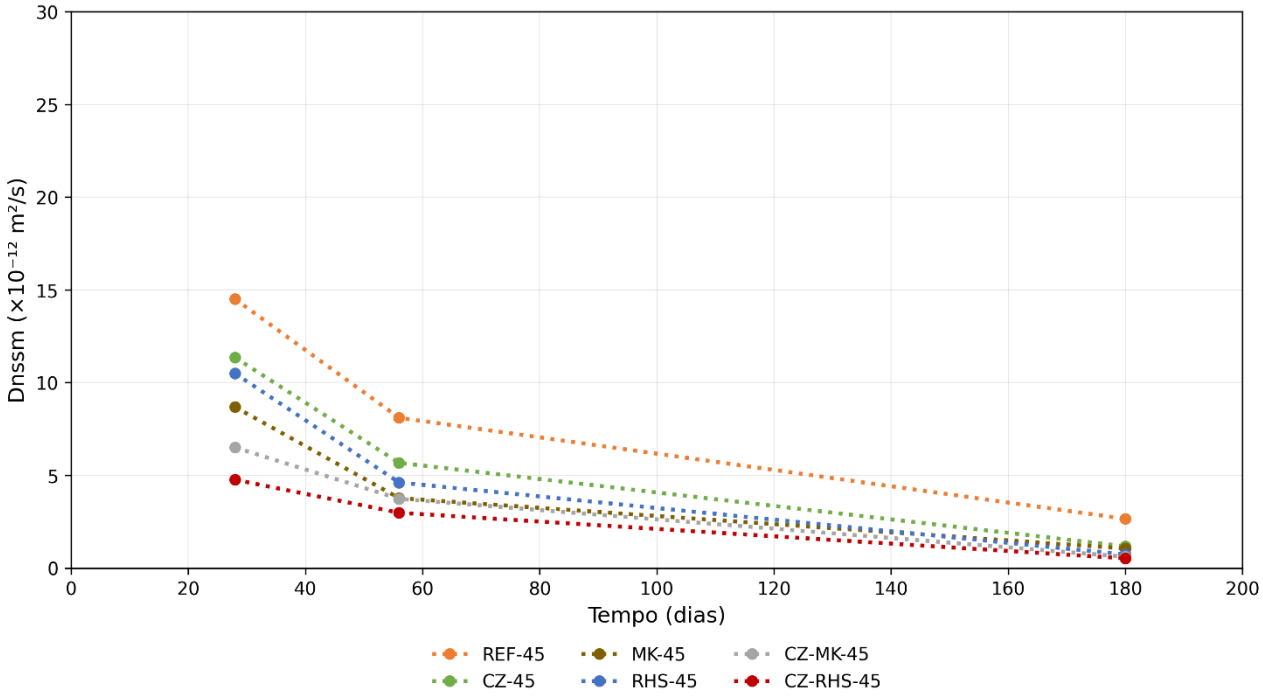


Figura 4.9 - Fator de envelhecimento (α) obtido a partir da linearização dos coeficientes de migração em escala logarítmica para todas as misturas analisadas.

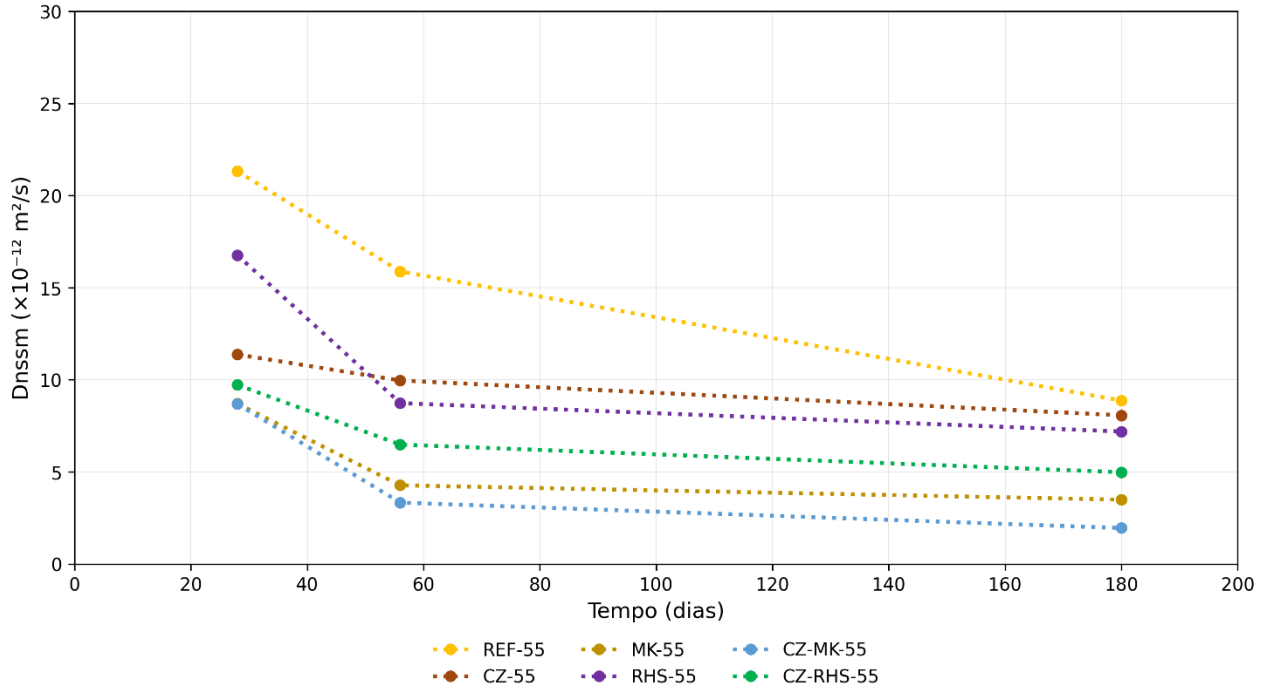


Figura 4.10 - Fator de envelhecimento (α) obtido a partir da linearização dos coeficientes de migração em escala logarítmica para todas as misturas analisadas.

Os valores de α obtidos para os concretos de referência (REF-45 e REF-55), iguais a 0,918 e

0,474, respectivamente, situam-se em torno das faixas reportadas na literatura para concretos sem adições minerais, que tipicamente apresentam valores de α entre aproximadamente 0,2 e 0,6 (Gjørv, 2008; Alexander e Thomas, 2015). Observa-se, entretanto, que o valor obtido para o traço REF-45 é significativamente superior ao intervalo usualmente reportado, sugerindo um comportamento atípico possivelmente associado a particularidades da microestrutura desenvolvida. Para os traços contendo cristalizante (CZ-45 e CZ-55), observa-se comportamento contrastante, com α elevado para CZ-45 (1,235) e significativamente reduzido para CZ-55 (0,184), indicando forte influência da composição e da estrutura de poros inicial na evolução temporal da difusividade.

As misturas contendo metacaulim (MK-45 e MK-55) apresentaram valores intermediários de α (1,131 e 0,458), coerentes com o comportamento típico de sistemas com materiais pozolânicos, que tendem a promover refinamento microestrutural progressivo. Já os traços com RHS (RHS-45 e RHS-55) exibiram comportamento bastante distinto entre si, com α elevado para RHS-45 (1,578) e moderado para RHS-55 (0,425), reforçando a influência combinada entre tipo de adição e parâmetros de dosagem.

Para os sistemas com combinações de adições, observa-se, de modo geral, um aumento significativo nos valores de α, especialmente nos traços CZ-MK-45 (1,551) e CZ-RHS-45 (1,222), indicando efeito sinérgico entre os materiais na promoção do refinamento da microestrutura. No entanto, para as versões com maior relação água/aglomerante (CZ-MK-55 e CZ-RHS-55), os valores de α (0,767 e 0,345) são reduzidos, evidenciando que o benefício das adições pode ser parcialmente limitado por uma matriz inicial mais porosa.

Cabe destacar que, embora existam diversas recomendações na literatura para valores típicos de α em concretos convencionais e com adições minerais, ainda não há consenso normativo específico para sistemas que combinam múltiplos materiais cimentícios suplementares ou resíduos. Dessa forma, a determinação experimental do fator de envelhecimento torna-se essencial para representar adequadamente o comportamento de cada mistura, especialmente em estudos voltados à durabilidade e à modelagem probabilística da vida útil.

Sob a perspectiva de projeto, a verificação do atendimento a diferentes horizontes de vida útil é particularmente sensível ao valor de α, uma vez que esse parâmetro governa a taxa de redução da difusividade ao longo do tempo. No modelo adotado, α atua de forma contínua ao longo de todo o período de análise, implicando uma redução progressiva do coeficiente de migração. Assim, a escolha e a correta determinação desse parâmetro são fundamentais para garantir previsões mais realistas e confiáveis do desempenho a longo prazo das estruturas de concreto.

4.4. Resistividade elétrica volumétrica (Bulk)

Os resultados do ensaio de resistividade elétrica volumétrica para os concretos produzidos contendo as adições sílica de casca de arroz (RHS), metacaulim (MK) e cristalizante (CZ), aos 28 dias de idade das amostras, são apresentados na Figura 4.11.

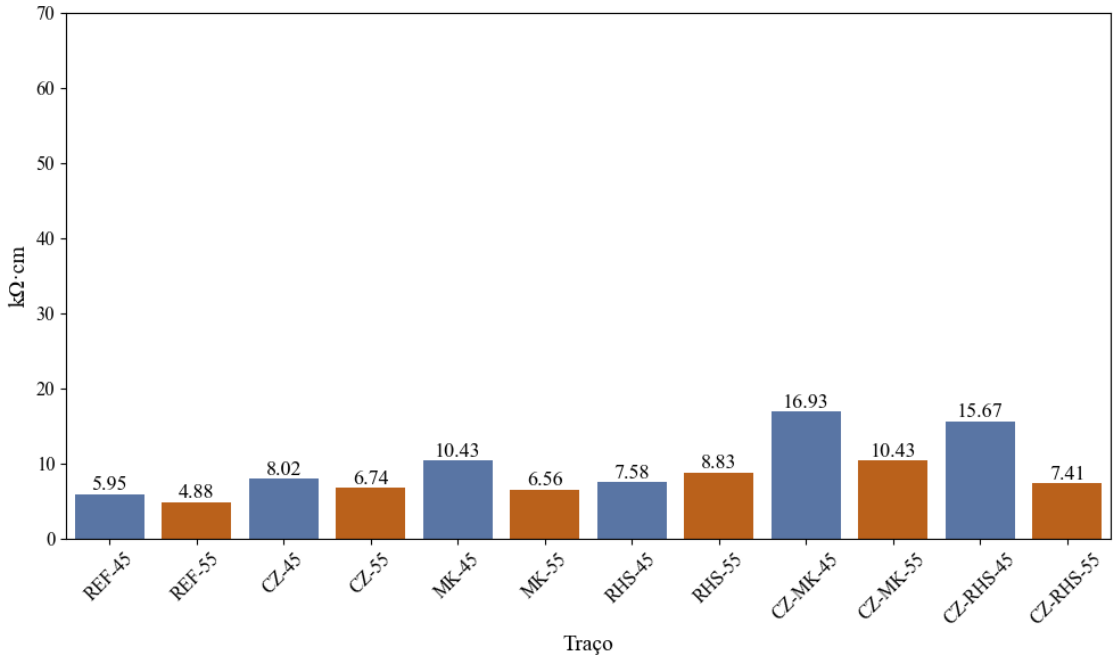


Figura 4.11 - Resistividade elétrica volumétrica aos 28 dias (Fonte: Autor).

Aos 28 dias de idade, os resultados do ensaio de resistividade elétrica volumétrica indicam variações importantes na capacidade dos concretos em resistir à migração de cloretos. De forma geral, valores mais altos de resistividade estão relacionados a matrizes cimentícias mais densas e menos permeáveis, sinalizando um desempenho potencialmente superior em termos de durabilidade.

Os traços com menor relação água/aglomerante (0,45) apresentaram, em sua maioria, resistividades mais elevadas, refletindo o benefício da menor porosidade promovida pela redução da água na mistura. O traço REF-45 atingiu 5,95 kΩ·cm, enquanto REF-55 ficou em 4,88 kΩ·cm, o que confirma essa tendência.

Entre os traços com adições isoladas, o metacaulim (MK) se destacou novamente, com MK-45 alcançando 10,43 kΩ·cm, o maior valor entre os traços com adição única, demonstrando sua contribuição para o refinamento da microestrutura. O cristalizante (CZ) também obteve bons resultados: CZ-45 registrou 8,02 kΩ·cm, superando o RHS-45, que atingiu 7,58 kΩ·cm, embora o CZ-55 tenha obtido desempenho ligeiramente inferior (6,74 kΩ·cm) ao do RHS-55 (8,83 kΩ·cm), contrariando, nesse caso, a tendência observada para o cristalizante (CZ).

Dentre as combinações, a associação entre cristalizante e metacaulim (CZ-MK-45) apresentou

o maior valor geral de resistividade (16,93 kΩ·cm), evidenciando uma sinergia altamente favorável entre essas adições. A combinação CZ-RHS-45 também demonstrou desempenho elevado, com 15,67 kΩ·cm, o que reforça a eficiência da interação entre cristalizante e sílica de casca de arroz. Os traços mistos com relação 0,55 apresentaram resistividades mais baixas, como esperado, com CZ-MK-55 em 10,43 kΩ·cm e CZ-RHS-55 em 7,41 kΩ·cm.

A seguir, a Figura 4.12 destaca os valores da resistividade elétrica volumétrica dos traços avaliados aos seus 56 dias de idade.

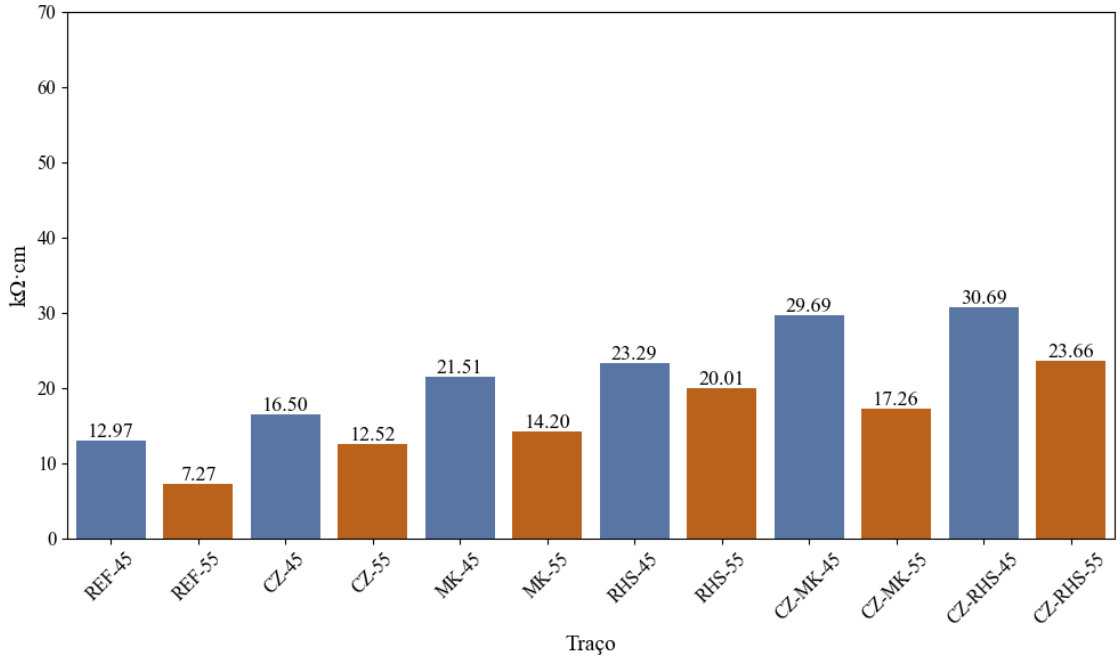


Figura 4.12 - Resistividade elétrica volumétrica aos 56 dias (Fonte: Autor).

Aos 56 dias de idade, os resultados do ensaio de resistividade elétrica volumétrica evidenciam uma evolução significativa no desempenho dos concretos em termos de resistência à migração de íons agressivos, especialmente cloretos. De modo geral, os valores de resistividade aumentaram consideravelmente em comparação aos resultados obtidos aos 28 dias, o que é esperado diante do avanço da hidratação e da consolidação da microestrutura da matriz cimentícia com o tempo de cura.

Entre os traços com adições isoladas, o metacaulim (MK) manteve sua posição de destaque, com MK-45 atingindo 21,51 kΩ·cm, indicando um refinamento microestrutural contínuo e expressivo. A sílica de casca de arroz (RHS) também teve ganho notável, com RHS-45 chegando a 23,29 kΩ·cm — valor que supera até mesmo o obtido para o traço CZ-45 (16,50 kΩ·cm).

Entre os traços com adições mistas, novamente se destacam CZ-MK-45 e CZ-RHS-45, com resistividades de 29,69 kΩ·cm e 30,69 kΩ·cm, respectivamente, apresentando os maiores valores de toda a série. Já os traços mistos com ag/agl 0,55 — CZ-MK-55 (17,26 kΩ·cm) e CZ-RHS-55 (23,66

kΩ·cm), embora apresentem valores inferiores aos de suas versões com menor ag/agl, ainda assim mantêm desempenho elevado, destacando-se entre os traços com maior teor de água.

Logo, a Figura 4.13 destaca os valores da resistividade elétrica volumétrica dos traços aos seus 180 dias de vida.

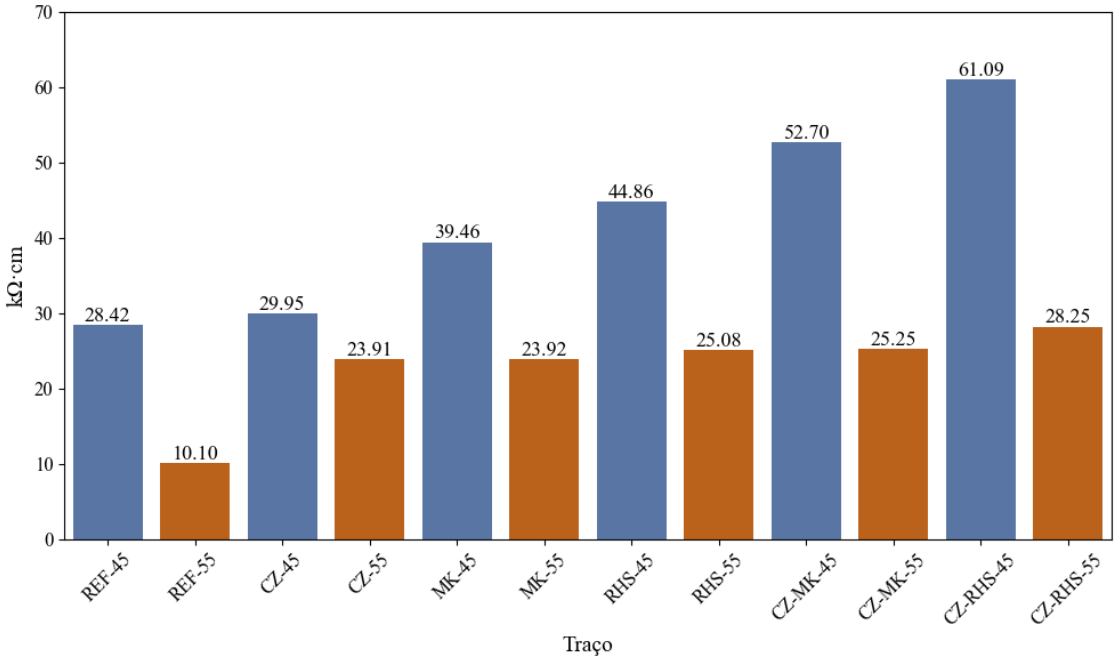


Figura 4.13 - Resistividade elétrica volumétrica aos 180 dias (Fonte: Autor).

Entre os traços avaliados aos 180 dias de vida, destaca-se o CZ-RHS-45, que apresentou o maior valor de resistividade (61,09 kΩ·cm), seguido por CZ-MK-45 (52,70 kΩ·cm) e RHS-45 (44,86 kΩ·cm). Esses resultados indicam que as combinações envolvendo adições pozolânicas e o aditivo cristalizante foram altamente eficazes na melhoria da resistividade elétrica, o que está diretamente relacionado a uma menor permeabilidade e, portanto, maior durabilidade frente a ambientes agressivos.

De modo geral, o ensaio aos 180 dias confirma a tendência observada em idades anteriores, com destaque para as misturas CZ-RHS-45 e CZ-MK-45, que se consolidam como as mais resistentes à condução elétrica, refletindo a excelência de suas microestruturas quanto à durabilidade potencial.

A análise dos resultados de resistividade elétrica volumétrica ao longo das idades de 7, 56 e 180 dias evidencia um crescimento contínuo e consistente dos valores obtidos. Nas idades iniciais, as resistividades ainda eram modestas devido à elevada umidade interna e à formação incompleta dos produtos de hidratação; contudo, aos 56 e, especialmente, aos 180 dias, observou-se um aumento expressivo, indicando um concreto mais compacto e resistente à condução elétrica.

Vale citar, ainda, a elevada eficiência da combinação entre adições minerais e o aditivo cristalizante na melhoria das propriedades elétricas e de durabilidade do concreto. Eficiência essa que não foi observada no ensaio de resistência à compressão axial.

4.5. Resistividade elétrica superficial (método de Wenner)

Os resultados do ensaio de resistividade elétrica superficial para os concretos produzidos contendo as adições sílica de casca de arroz (RHS), metacaulim (MK) e cristalizante (CZ), aos 28 dias de idade das amostras, são apresentados na Figura 4.14

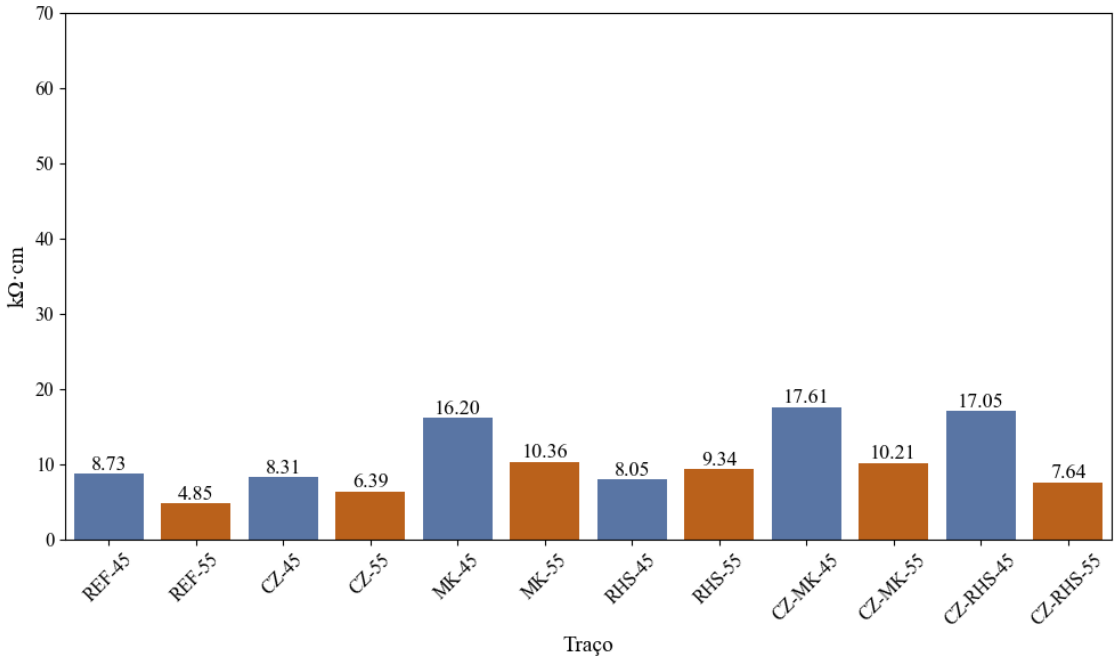


Figura 4.14 - Resistividade elétrica superficial aos 28 dias (Fonte: Autor).

Aos 28 dias de idade dos concretos, os resultados obtidos no ensaio de resistividade elétrica superficial, realizado pelo método de Wenner, evidenciam diferenças marcantes entre os diversos traços. De maneira geral, os concretos com ag/agl 0,45 apresentaram valores superiores de resistividade superficial em comparação àqueles com ag/agl 0,55, indicando menor porosidade e, portanto, uma maior resistência à penetração de agentes agressivos, como os íons cloreto. O traço de referência REF-45 apresentou resistividade de 8,73 kΩ·cm, superando consideravelmente sua contraparte com ag/agl 0,55 (REF-55), que obteve apenas 4,85 kΩ·cm.

Entre as adições isoladas, o metacaulim (MK) destacou-se como a mais eficiente, especialmente no traço MK-45, que atingiu 16,20 kΩ·cm, revelando elevada resistência elétrica superficial e, por consequência, menor conectividade porosa. Já a combinação mista CZ-MK-45 foi a que apresentou o melhor desempenho entre todos os traços analisados, com resistividade de 17,61

kΩ·cm. Esse valor reforça a sinergia entre o cristalizante e o metacaulim na melhora da durabilidade do concreto, especialmente quando aplicados em conjunto sob uma baixa relação ag/agl.

O melhor desempenho observado para os traços contendo a combinação de adições pode estar associado a um efeito sinérgico entre os diferentes mecanismos de modificação da microestrutura do concreto. Enquanto as adições pozolânicas, como a sílica de casca de arroz e o metacaulim, promovem o refinamento da rede de poros por meio da reação pozolânica e da formação adicional de C-S-H, o aditivo cristalizante contribui para a obstrução de capilares remanescentes através da formação de produtos cristalinos insolúveis. A atuação simultânea desses mecanismos resulta em uma matriz cimentícia mais densa e menos permeável, reduzindo o transporte de íons cloreto e, consequentemente, aumentando a durabilidade potencial do material

A seguir, a Figura 4.15 demonstra os valores da resistividade elétrica superficial dos traços avaliados aos seus 56 dias de idade.

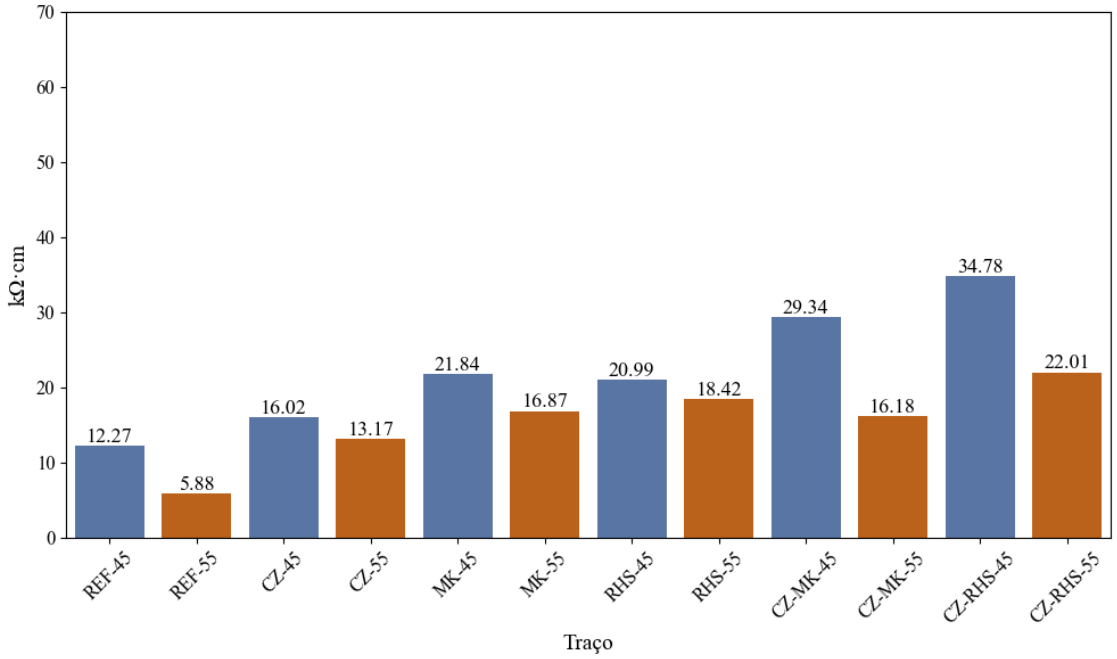


Figura 4.15 - Resistividade elétrica superficial aos 56 dias (Fonte: Autor).

Aos 56 dias de idade dos concretos, os resultados do ensaio de resistividade demonstram uma evolução significativa em comparação aos valores observados aos 28 dias.

As adições minerais contribuíram de forma notável para o aumento da resistividade, com destaque especial para o metacaulim (MK). O traço MK-45 alcançou 21,84 kΩ·cm, sendo a melhor adição individual, enquanto sua versão com ag/agl 0,55 (MK-55) apresentou também um valor elevado, de 16,87 kΩ·cm.

No que se refere às adições mistas, a combinação CZ-RHS-45 destacou-se com um valor de

34,78 kΩ·cm, superando todos os demais traços, inclusive o CZ-MK-45, que havia tido o melhor resultados aos 28 dias. Assim, aos 56 dias, a adição individual com melhor resultado foi novamente o metacaulim (MK-45), enquanto a combinação mista mais eficaz foi CZ-RHS-45, que apresentou o maior valor de resistividade elétrica superficial entre todos os traços testados.

Logo, a Figura 4.16 demonstra os valores da resistividade elétrica superficial dos traços avaliados aos seus 180 dias de idade.

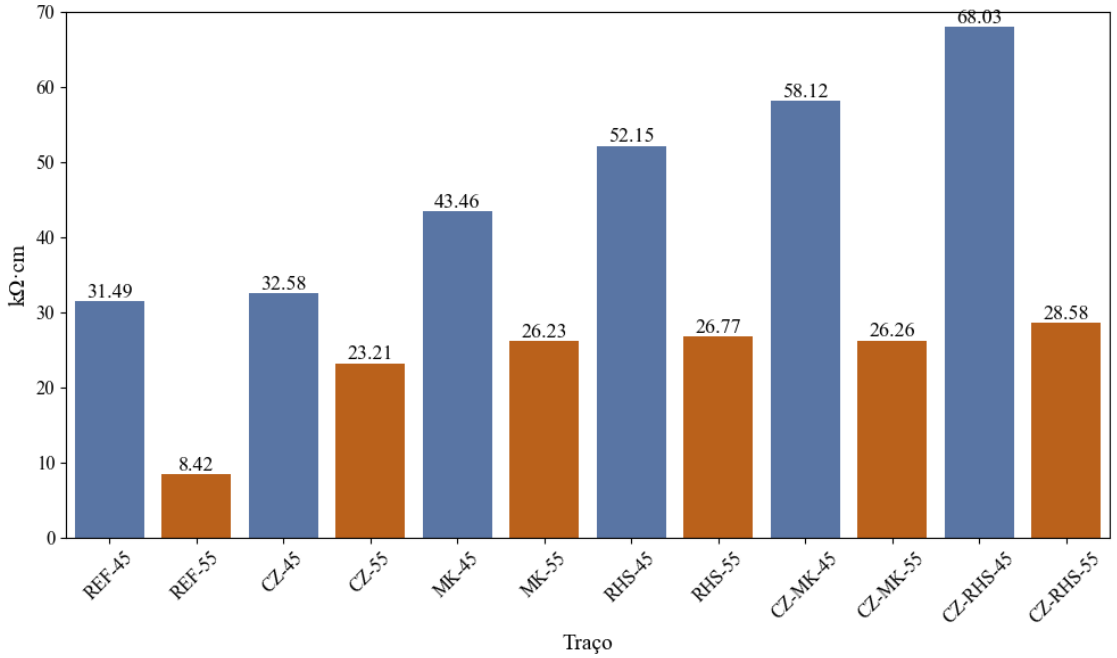


Figura 4.16 - Resistividade elétrica superficial aos 180 dias (Fonte: Autor).

Aos 180 dias de idade, os resultados indicam um aumento expressivo dos valores para a maioria dos traços, confirmando a evolução da hidratação e o consequente refinamento da microestrutura do concreto com o tempo.

Entre os traços avaliados, o CZ-RHS-45 apresentou o maior valor de resistividade (68,03 kΩ·cm), seguido pelo CZ-MK-45 (58,12 kΩ·cm) e RHS-45 (52,15 kΩ·cm), demonstrando, então, que a combinação entre adições minerais e aditivo cristalizante foi, mais uma vez, altamente benéfica para a melhora do desempenho elétrico superficial.

Ao analisar os resultados do ensaio de resistividade elétrica superficial ao longo das três idades (7, 56 e 180 dias), observa-se uma evolução contínua dos valores em praticamente todos os traços. De modo geral, os traços contendo adições minerais combinadas com o aditivo cristalizante apresentaram os melhores desempenhos ao longo do tempo.

Em comparação com os demais ensaios, nota-se que essas mesmas combinações, embora nem sempre tenham se destacado na resistência à compressão axial, apresentaram desempenho

superior em termos de durabilidade elétrica, evidenciando que o refinamento microestrutural obtido com o uso conjunto das adições e do cristalizante exerce influência mais expressiva sobre as propriedades de transporte do que sobre a resistência mecânica.

4.6. Vida útil característica

Para interpretação dos resultados sob a ótica de projeto, adotaram-se como referências de desempenho as vidas úteis-alvo de 50 anos, para estruturas correntes, e 100 anos, para obras de maior relevância, como pontes e estruturas especiais. Assim, os resultados foram analisados tanto de forma comparativa, permitindo hierarquizar o desempenho entre os diferentes traços de concreto, quanto sob a perspectiva de verificação, avaliando o atendimento (ou não) a esses patamares de durabilidade. Logo, a Tabela 4.2 apresenta os resultados para cobrimento de 50 mm.

Tabela 4.2 - Vida útil característica (em anos).
Fonte: Autor.

Traço (concreto)	$\boldsymbol{C_S = 2.00\%\ (18°C)}$ **50 mm**	$\boldsymbol{C_S = 4.00\%\ (18°C)}$ **50 mm**
REF-45	83,7	20,9
REF-55	2.3	1,4
CZ-45	> 150	> 150
CZ-55	3,9	1,4
MK-45	> 150	> 150
MK-55	9.8	5,0
RHS-45	> 150	> 150
RHS-55	2,7	1,6
CZ-MK-45	> 150	> 150
CZ-MK-55	74,5	25,3
CZ-RHS-45	> 150	> 150
CZ-RHS-55	5,1	2,2

Observa-se, de forma geral, um contraste significativo entre os diferentes traços, especialmente quando comparados os concretos com maior teor de substituição e aqueles com composição mais convencional. No cenário menos agressivo ($C_S = 2{,}00\%$), diversas formulações apresentaram vida útil superior ao horizonte de análise adotado (>150 anos), indicando elevada

resistência à penetração de cloretos e atraso significativo no processo de despassivação das armaduras. Esse comportamento é observado, por exemplo, nas misturas REF-45, CZ-45, MK-45, RHS-45, CZ-MK-45 e CZ-RHS-45.

Por outro lado, algumas misturas apresentaram desempenho bastante inferior, não atingindo sequer o patamar mínimo de 50 anos. Destacam-se, nesse sentido, os traços REF-55 (2,3 anos), CZ-55 (3,9 anos), MK-55 (9,8 anos) e RHS-55 (2,7 anos), evidenciando maior vulnerabilidade à difusão de cloretos. Esse comportamento pode estar associado a características microestruturais menos refinadas, como maior conectividade de poros e menor eficiência na redução da difusividade iônica.

No cenário mais severo ($C_S = 4{,}00\%$), observa-se uma redução generalizada da vida útil em todas as misturas, como esperado em função do aumento do gradiente de concentração de cloretos. Ainda assim, algumas formulações mantiveram desempenho elevado, não atingindo o critério de falha dentro do horizonte de análise (>150 anos), como nos casos de CZ-45, MK-45, RHS-45, CZ-MK-45 e CZ-RHS-45, indicando maior robustez frente a condições agressivas quando comparados com o traço REF-45 que atingiu uma probabilidade de falha acima de 10% aos 20,9 anos de idade.

Em contraste, diversas misturas apresentaram desempenho crítico nesse cenário, com vidas úteis bastante reduzidas. Exemplos incluem REF-55 (1,4 anos), CZ-55 (1,4 anos), RHS-55 (1,6 anos) e CZ-RHS-55 (2,2 anos), evidenciando alta suscetibilidade à penetração de cloretos. Mesmo misturas com desempenho intermediário no cenário menos agressivo, como CZ-MK-55 (25,3 anos) e MK-55 (5,0 anos), não atingem o patamar de 50 anos sob maior severidade, reforçando a influência decisiva da concentração superficial de cloretos na durabilidade.

Do ponto de vista de atendimento às metas de projeto, para cobrimento de 50 mm, verifica-se que, no cenário ($C_S = 2.00\%$), apenas as misturas com desempenho mais elevado (em geral aquelas com resultados superiores a 50 anos, incluindo diversas com vida útil superior a 150 anos) atendem ao critério de 50 anos, sendo ainda mais restrito o atendimento ao patamar de 100 anos. Já no cenário ($C_S = 4.00\%$), o atendimento ao critério de 50 anos torna-se significativamente limitado, sendo observado apenas nas misturas com desempenho excepcional (>150 anos), enquanto nenhuma das formulações com valores explícitos inferiores a esse limite atende aos requisitos usuais de projeto.

De forma geral, os resultados evidenciam que a durabilidade do concreto frente à ação de cloretos é fortemente dependente tanto da composição do material quanto da severidade do ambiente de exposição. A presença de traços com desempenho superior mesmo em condições agressivas sugere a eficácia de determinadas combinações de materiais na redução da difusividade e no refinamento da microestrutura, retardando o ingresso de íons cloreto. Por outro lado, misturas com desempenho inferior destacam a importância do controle rigoroso da composição e da qualidade do concreto,

especialmente em estruturas expostas a ambientes marinhos.

No conjunto, a análise probabilística confirma que, para cobrimento mínimo de 50 mm, o atendimento a requisitos de vida útil em ambientes com elevada concentração de cloretos pode ser limitado, sendo necessária a adoção de estratégias adicionais de projeto como, por exemplo, a otimização da composição do concreto ou aumento do seu cobrimento para, assim, garantir níveis adequados de durabilidade ao longo do tempo.

Por fim, cabe ressaltar que os resultados apresentados nesta seção correspondem a estimativas obtidas a partir de modelagem probabilística, estando, portanto, sujeitos às hipóteses adotadas e às incertezas inerentes aos parâmetros de entrada do modelo. Nesse sentido, as vidas úteis indicadas não devem ser interpretadas como valores absolutos ou determinísticos, mas sim como referências para análise comparativa e apoio à tomada de decisão em projeto. Variáveis como a variabilidade dos materiais, condições reais de exposição, execução e manutenção das estruturas podem influenciar significativamente o desempenho ao longo do tempo, de modo que os valores obtidos devem ser devidamente relativizados e compreendidos dentro do contexto e das limitações do modelo empregado.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos objetivos propostos e nos dados obtidos ao longo desta pesquisa, é possível afirmar que o estudo contribuiu para a compreensão da durabilidade potencial do concreto frente à penetração de agentes agressivos - íons cloreto. Tendo em vista a extensa faixa litorânea brasileira e a crescente demanda por construções duráveis e de baixo custo de manutenção, a avaliação do desempenho do concreto em ambientes de elevada agressividade se mostra não apenas relevante, mas essencial para o desenvolvimento de práticas construtivas mais eficientes e sustentáveis.

Foram abordados aspectos centrais ligados à avaliação do concreto em suas idades iniciais, com foco na penetração de cloretos, um dos principais mecanismos de degradação de estruturas de concreto armado. Por meio da realização de ensaios acelerados, buscou-se antecipar o comportamento do concreto frente à ação deletéria de agentes agressivos, bem como analisar o impacto do uso de adições minerais como a sílica de casca de arroz (RHS) e o metacaulim (MK), além do aditivo cristalizante (CZ), sobre as propriedades de transporte do concreto endurecido. Observou-se que tais materiais, isoladamente ou em combinação, podem influenciar de maneira expressiva a durabilidade do concreto, sendo sua efetividade dependente, entre outros fatores, da relação água/aglomerante adotada.

Adicionalmente, foi discutida a relevância da abordagem baseada no desempenho como alternativa à tradicional abordagem prescritiva, ainda amplamente utilizada nos projetos estruturais. Os resultados evidenciaram que concretos que atendem aos mesmos parâmetros normativos podem apresentar desempenhos bastante distintos no que diz respeito à durabilidade, reforçando a importância da adoção de critérios baseados no comportamento real do material frente às condições de exposição.

Finalmente, pode-se afirmar que a análise dos resultados obtidos neste estudo reforça a necessidade de se avaliar a durabilidade do concreto de maneira mais ampla, integrando abordagens experimentais e probabilísticas, bem como valorizando o uso de materiais suplementares que contribuam para o aumento da vida útil das estruturas.

5.1. Principais conclusões

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a sensibilidade dos métodos de avaliação da penetrabilidade de cloretos frente às variações nos parâmetros de dosagem de concretos com diferentes composições, considerando especialmente a influência da relação água/aglomerante, da incorporação de adições minerais e do uso de aditivo cristalizante. Com base nos resultados obtidos,

verificou-se que os parâmetros de dosagem exerceram influência significativa sobre os indicadores relacionados à durabilidade do concreto, especialmente sobre o coeficiente de migração de cloretos e a resistividade elétrica, evidenciando a capacidade desses métodos em representar as alterações microestruturais promovidas pelas diferentes composições analisadas.

A partir dos resultados experimentais e das análises desenvolvidas, é possível estabelecer, ainda, as seguintes conclusões:

(a) Inicialmente, verifica-se que os parâmetros de dosagem do concreto exercem influência direta e significativa sobre a penetrabilidade de cloretos. Concretos com menor relação água/aglomerante e com a presença de materiais pozolânicos apresentaram, de forma geral, menor mobilidade iônica, evidenciando uma microestrutura mais densa e menos permeável.

(b) Ademais, a utilização combinada de adições minerais e aditivo cristalizante tende a promover um desempenho superior em termos de resistência à penetração de cloretos quando comparada à utilização isolada desses materiais. Esse comportamento pode ser interpretado a partir da atuação complementar desses constituintes na modificação da microestrutura do concreto: enquanto as adições minerais contribuem para o refinamento da rede de poros e redução da conectividade capilar, o aditivo cristalizante atua no bloqueio de caminhos preferenciais de transporte, resultando em um efeito sinérgico na limitação da mobilidade de íons agressivos.

(c) No que se refere à sensibilidade dos métodos de ensaio avaliados, observou-se que a resposta das técnicas varia de forma significativa conforme a composição do concreto. Os ensaios baseados em absorção capilar, resistividade elétrica (tanto volumétrica quanto superficial) e coeficiente de migração de cloretos demonstraram elevada capacidade de captar as variações introduzidas nos diferentes traços, apresentando-se como ferramentas eficazes para a avaliação da durabilidade sob a ótica da penetrabilidade de íons cloreto.

(d) Por outro lado, os resultados do ensaio de resistência mecânica à compressão axial — que não se configura como indicador de durabilidade do concreto — evidenciam baixa sensibilidade às alterações nos parâmetros de dosagem associadas ao transporte de íons. Assim, sua aplicação deve se restringir à avaliação do desempenho mecânico do material, não sendo adequada para inferências diretas sobre sua durabilidade em ambientes agressivos.

(e) As análises também evidenciaram a existência de correlações consistentes entre os diferentes indicadores de durabilidade utilizados. Em especial, verificou-se que concretos com maiores valores de resistividade elétrica tendem a apresentar menores coeficientes de migração de cloretos e menores taxas de absorção capilar, confirmando a relação direta entre a

microestrutura do material e a sua capacidade de resistir à penetração de agentes agressivos.

(f) Outro aspecto relevante observado refere-se ao fato de que concretos pertencentes à mesma classe de resistência mecânica podem apresentar desempenhos significativamente distintos quanto à durabilidade. Esse resultado reforça a limitação da abordagem prescritiva tradicional, baseada exclusivamente em parâmetros como resistência à compressão e relação água/cimento, evidenciando a necessidade da incorporação de indicadores de desempenho na avaliação da durabilidade do concreto.

(g) No âmbito da análise probabilística, os resultados demonstraram que a consideração das variabilidades associadas aos parâmetros de entrada influencia de forma expressiva a estimativa da vida útil das estruturas. Nesse contexto, a vida útil passa a ser interpretada como uma variável aleatória, e não como um valor determinístico único, sendo mais adequadamente representada por meio da vida útil característica associada a uma probabilidade de falha preestabelecida.

(h) Dessa forma, verifica-se que a aplicação de métodos probabilísticos constitui uma ferramenta fundamental para a avaliação da durabilidade de estruturas de concreto armado, permitindo uma análise mais realista do comportamento ao longo do tempo e contribuindo para a tomada de decisões mais seguras em projeto.

(i) Por fim, os resultados obtidos ao longo deste estudo reforçam a importância da adoção de abordagens baseadas no desempenho em complemento a metodologia prescritiva. Tal mudança de paradigma se mostra essencial para o desenvolvimento de estruturas mais duráveis, especialmente em ambientes agressivos, como aqueles sujeitos à ação de cloretos.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

(a) Expandir a análise experimental para outros métodos de avaliação da durabilidade do concreto, incluindo ensaios de difusão em regime natural, permeabilidade ao ar e à água, bem como técnicas eletroquímicas avançadas;

(b) Investigar a influência de diferentes tipos de aglomerantes e combinações de adições minerais na microestrutura do concreto;

(c) Aperfeiçoar os modelos probabilísticos, com melhor caracterização das variáveis de entrada;

(d) Estudar de forma mais aprofundada o fator de envelhecimento do concreto e sua influência na difusividade.

6. REFERÊNCIAS

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 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.

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12653: **Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro**, 2014 (corrigida em 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. 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. NM 248: **Agregados – Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.

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.

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.

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.

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.

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

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., 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.

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.

FALADE, A. A., AGBOOLA, S. A., ISHAQ, S. A., MOHAMMED, A. J., SHABI, M. O., MUSA, A. K. Effects of metakaolin as a pozzolanic material on chloride ingress in concrete. **NIPES Journal of Science and Technology Research**, 6 (4), 2024.

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.

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.

FOLIĆ, R., ZENUNOVIĆ, D., BRUJIĆ, Z. Effects of carbonation and chloride ingress on the durability of concrete structures. **Journal of the Serbian Chemical Society**, 89 (5), p. 729–742, 2024.

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.

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

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., 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.

HOMAYOONMEHR, R., RAMEZANIANPOUR, A. A., MOODI, F., RAMEZANIANPOUR, A. M., GEVAUDAN, J. P. A review on the effect of metakaolin on the chloride binding of concrete, mortar, and paste specimens. **Sustainability**, 14 (22), 15022, 2022.

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.

JIN, M., GAO, S., JIANG, L., CHU, H., LU, M., ZHI, F. F. Degradation of concrete with addition of mineral admixture to free chloride ion penetration under the effect of carbonation. **Corrosion Science**, 138 (1), p. 42-53, 2018. doi.org/10.1016/j.corsci.2018.04.004.

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.

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.

SELL JUNIOR, F. K.; WALLY, G. B.; TEIXEIRA, F. R.; MAGALHÃES, F. C. (2021). Experimental assessment of accelerated test methods for determining chloride diffusion coefficient in concrete. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, [S. L.], v. 14, n. 4, p. 200-212. Disponível em: <https://old.scielo.br/scielo.php?Script=sci_arttext&pid=S1983-41952021000400200>. Acesso em: 18 de setembro de 2024.

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.

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.

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, 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.

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

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.

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.

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.

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.

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

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.

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.

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.

WALLY, G. B.; MAGALHÃES, F. C.; SELL JUNIOR, F. K.; TEIXEIRA, F. R.; REAL, M. de V. (2021). Estimating service life of reinforced concrete structures with binders containing silica fume and metakaolin under chloride environment: durability indicators and probabilistic

assessment. **Materials and Structures**. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-021-01698-7>. Acesso em: 18 de setembro de 2024.

WALLY, G. B.; MAGALHÃES, F. C.; SILVA FILHO, L. C. P. DA (2020). **An overview of international trends in specifying durable concretes. Journal of Building Engineering**, [S. L.], n. 100, p. 81-85. Disponível em: <https://www-periodicos-capes-gov-br.ezl.periodicos.capes.gov.br/index.php/acervo/buscador.html?Task=detalhes&source=&id=W4226476536>. Acesso em: 18 de setembro de 2024.

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.

XUE, Q., ZHENG, T. Y., WANG, J., ZHANG, J. J., XIA, W., CUI, S. A. **Study on chloride permeability and chloride ion transport of fiber-reinforced cementitious composite repair system**. Buildings, 15 (6), 975, 2025.

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.

YUAN, Y., NIU, K., TIAN, B., LI, L., JI, J., FENG, Y. **Effect of metakaolin on the microstructural and chloride ion transport properties of concrete in ocean wave splashing zones**. Materials, 16 (1), 7, 2023.

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.