Universidade Federal do Rio Grande
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica

Efeitos da sílica ativa e da cinza de fundo na penetrabilidade de cloretos em concretos com agregados reciclados

Dissertação de:
Rita de Cássia Taveira de Oliveira

Orientador:
Fábio Costa Magalhães

Abril de 2026

Dissertação - PPGEO – FURG

Rita de Cássia Taveira de Oliveira

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: 05/05/2026 17:10:31-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Crístofer Hood Marques
Coordenador do PPGEO

Banca examinadora:

gov.br Documento assinado digitalmente
FABIO COSTA MAGALHAES
Data: 15/04/2026 15:30:18-0300
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 16:04:44-0300
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 15:41:21-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

.....

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

Rio Grande, 15 de abril de 2026

O48e Oliveira, Rita de Cássia Taveira de.
Efeitos da sílica ativa e da cinza de fundo na penetrabilidade de cloretos em concretos com agregados reciclados / Rita de Cássia Taveira de Oliveira – 2026.
138 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Rio Grande/RS, 2026.
Orientador: Dr. Fábio Costa Magalhães.

1. de 3 a 5 palavras-chave: modelo 2. dissertação 3. PPGEO
I. Magalhães, Fábio Costa II. Título.

CDU 62(26)

Catalogação na Fonte: Bibliotecária Brenda Sequeira CRB10/1979

"É necessário que os médicos [...] compreendam o que é o homem, o que é a vida, o que é a saúde, e como o equilíbrio ou a harmonia entre os elementos a mantêm, enquanto sua desarmonia provoca sua ruína [...]. O mesmo se faz necessário no caso de um edifício doente, isto é, de um arquiteto-médico que compreenda o que é uma construção e as regras que regem sua correta execução."
(GALLUZZI, 1995, p. 238, tradução nossa).

LEONARDO DA VINCI

Agradecimentos

Esta dissertação é resultado de um longo caminho, que eu não teria conseguido percorrer sem a orientação e o apoio de muitas pessoas e instituições. A cada uma delas, registro o meu mais sincero agradecimento.

À minha casa acadêmica, a Universidade Federal do Rio Grande (FURG), por meio da Escola de Engenharia e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica (PPGEO), onde esta trajetória se consolidou, agradeço pela formação e pela oportunidade de desenvolver esta pesquisa. Sou igualmente grata à CAPES (Código de Financiamento 001), cujo apoio foi essencial para a viabilização do meu estudo.

Guardo com especial carinho a experiência de Mobilidade Acadêmica em Montevidéu, uma oportunidade única proporcionada pelo Programa de Apoio à Pós-Graduação (PROAP). Os dias na Universidad de la República (UDELAR) ampliaram meus horizontes e trouxeram novas perspectivas ao meu trabalho. Por isso, agradeço de coração à Maria Noel e à Patricia Vila, pela forma acolhedora como me receberam e pela valiosa partilha de conhecimento.

A etapa experimental desta pesquisa ganhou vida no Instituto Federal do Rio Grande do Sul (IFRS), e sou grata pelo apoio do Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção Civil (LEMCC) do Câmpus Rio Grande. Agradeço também aos colegas de laboratório, em especial ao bolsista Thiago e ao meu parceiro de mestrado, Leonardo Wiprich, pelas incontáveis horas de trabalho e pelas discussões que enriqueceram esta dissertação. Deixo um agradecimento à minha colega Pietra Meerssche, por todas as colaborações ao longo desta jornada.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Fábio Costa Magalhães, minha gratidão. Sua paciência e sua confiança no meu potencial me deram segurança para seguir em frente. Este trabalho carrega, também, parte da sua dedicação.

Aos membros da banca examinadora, Prof. Dr. Mauro Real, Prof. Dr. Leandro Pinheiro e Profª. Drª. Maria Noel, agradeço pela leitura atenta, pelas arguições pertinentes e por todas as contribuições que, sem dúvida, aprimoraram a qualidade final deste trabalho.

Por fim, agradeço ao meu alicerce. Ao meu namorado, Emanuel Rocha, por ser meu suporte fundamental durante todo esse período: pela paciência, pelo incentivo e por ter sido meu porto seguro nos anos presenciais da graduação, do mestrado e, inclusive, na mobilidade acadêmica. Sua parceria foi essencial.

Aos meus pais, Rosimeri e Elias, agradeço pelo amor, pelo apoio e por compreenderem as minhas ausências, sempre celebrando cada pequena conquista. E à minha avó Leda (*in memoriam*), deixo um agradecimento que carrego com especial ternura. Levo comigo sua presença, seu orgulho e o incentivo silencioso que sempre me impulsionou a continuar.

Às minhas gatinhas, Haley e Alie, deixo também meu carinho e minha gratidão. Haley esteve comigo durante a fase final deste mestrado, oferecendo companhia e conforto em dias particularmente difíceis, e sua presença foi muito importante nessa caminhada. À Alie, agradeço por continuar ao meu lado, trazendo leveza, afeto e acolhimento nos momentos em que mais precisei. De maneiras diferentes, as duas fizeram parte desta trajetória e deixaram, cada uma à sua forma, uma marca de amor neste trabalho e na minha vida.

Resumo

Rita de Cássia Taveira de Oliveira

Efeitos da sílica ativa e da cinza de fundo na penetrabilidade de cloretos em concretos com agregados reciclados

O concreto armado, embora essencial para a engenharia moderna, apresenta elevado impacto ambiental devido ao consumo intensivo de recursos naturais e às emissões associadas à produção de cimento Portland. Paralelamente, a crescente geração de resíduos da construção civil e de cinzas de termoelétricas reforça a necessidade de práticas construtivas mais sustentáveis, alinhadas aos princípios da economia circular. Nesse contexto, este trabalho avaliou a viabilidade técnica do uso de agregados reciclados mistos (ARM), cinza de fundo (CF) e sílica ativa (SA) no desempenho de durabilidade de concretos expostos a ambientes marinhos. Foram investigadas substituições de 50% e 100% do agregado natural por ARM, 25% de substituição parcial da areia natural por CF e 8% de substituição parcial do cimento por SA. A pesquisa envolveu caracterização dos materiais, dosagem e moldagem dos concretos, ensaios experimentais e análise probabilística de vida útil. Todos os concretos foram produzidos com relação água/aglomerante de 0,45 e avaliados quanto à resistência à compressão, absorção de água por capilaridade, resistividade elétrica e resistência à penetração de cloretos, com ênfase na migração de cloretos. A resistividade elétrica foi utilizada como indicador complementar, enquanto o coeficiente de migração de cloretos foi empregado como parâmetro de entrada na modelagem probabilística da vida útil por meio da abordagem DURACON. A análise considerou a variabilidade dos principais parâmetros do modelo, com destaque para o fator de envelhecimento do concreto (α), devido à elevada sensibilidade das previsões de longo prazo a esse parâmetro.Os resultados mostraram que o uso isolado de ARM reduziu a resistência mecânica e o desempenho de durabilidade. Em contrapartida, a incorporação conjunta de CF e SA mitigou significativamente esses efeitos, indicando melhoria da matriz cimentícia e da conectividade dos poros, com aumento da resistividade elétrica, redução da absorção capilar e menores coeficientes de migração de cloretos.De modo geral, as misturas ecoeficientes apresentaram elevados valores do fator de envelhecimento (α), baixa migração de cloretos e alta probabilidade de atingir vida útil superior a 50 anos, com desempenho comparável ou superior ao concreto de referência.Assim, verificou-se que a combinação proposta possibilita a obtenção de concretos reciclados com desempenho durável e potencial de aplicação em zonas costeiras e ambientes marinhos agressivos.

Palavras-chave: Agregado reciclado misto. Ambiente marinho. Cinza de fundo. Durabilidade. Íons cloreto. Probabilidade de falha. Sílica ativa.

Abstract

Rita de Cássia Taveira de Oliveira

Effects of silica fume and bottom ash on chloride penetrability in concrete with recycled aggregates

Reinforced concrete, although essential for modern engineering, has a high environmental impact due to the intensive consumption of natural resources and the emissions associated with Portland cement production. At the same time, the increasing generation of construction and demolition waste and thermoelectric ashes highlights the need for more sustainable construction practices aligned with circular economy principles. In this context, this study evaluated the technical feasibility of using mixed recycled aggregates (MRA), bottom ash (BA), and silica fume (SF) on the durability performance of concrete exposed to marine environments. Replacement levels of 50% and 100% of natural coarse aggregates by MRA, 25% replacement of natural fine aggregate by BA, and 8% replacement of cement by SF were investigated. The research involved material characterization, mix design, concrete production, experimental testing, and probabilistic service life analysis. All mixtures were produced with a water-to-binder ratio of 0.45 and evaluated in terms of compressive strength, capillary water absorption, electrical resistivity, and resistance to chloride ingress, with emphasis on chloride migration. Electrical resistivity was used as a complementary indicator, whereas the non-steady-state chloride migration coefficient was adopted as the input parameter for probabilistic service life modeling using the DURACON approach. The analysis considered the variability of key model parameters, with particular emphasis on the concrete aging factor (α), due to its high influence on long-term predictions. The results showed that the isolated use of MRA reduced both mechanical strength and durability performance. However, the combined incorporation of BA and SF significantly mitigated these effects, indicating improvements in the cementitious matrix and pore connectivity, with increased electrical resistivity, reduced capillary absorption, and lower chloride migration coefficients. Overall, eco-efficient mixtures exhibited high aging factor (α) values, low chloride migration, and a high probability of achieving a service life exceeding 50 years, with performance comparable to or better than the reference concrete. Therefore, the proposed combination enables the production of recycled concretes with adequate durability performance and potential application in coastal zones and aggressive marine environments.

Keywords: Mixed recycled aggregate. Marine environment. Bottom ash. Durability. Chloride ions. Probability of failure. Silica fume.

Sumário

Página

- **Lista de Figuras** **XI**
- **Lista de Tabelas** **XIV**
- **Lista de siglas** **XVI**
- **Lista de símbolos** **XVIII**

1 • Introdução **1**
1.1 • Considerações iniciais 1
1.2 • Objetivos 3
1.2.1 • Objetivo geral 3
1.2.2 • Objetivos específicos 3
1.3 • Delimitações 3
1.4 • Limitações 4
1.5 • Estrutura do trabalho 4

2 • Revisão bibliográfica **5**
2.1 • Uso de materiais reciclados para produção de concreto 5
2.1.1 • Agregados reciclados de resíduos da construção civil 5
2.1.2 • Cinza de fundo 11
2.1.3 • Sílica ativa 15
2.2 • Fatores dos materiais que interferem na penetração de cloretos . . 17
2.2.1 • Ação dos agentes ambientais na estrutura do concreto 17
2.2.2 • Corrosão das armaduras 23
2.2.3 • Mecanismos de transporte de cloretos 33
2.2.4 • Influência da penetração de íons cloreto no concreto 38
2.3 • Indicadores de durabilidade e projeto por desempenho 40
2.3.1 • Abordagem com base no desempenho 42
2.3.2 • Indicadores de durabilidade 44
2.3.3 • Modelagem matemática e probabilística para projetos de durabilidade 45
2.3.4 • Conceito de vida útil característica 46
2.3.5 • Confiabilidade estrutural 50
2.3.6 • Probabilidade de falha 54
2.3.7 • Modelo DURACON 58
2.3.8 • Fator de envelhecimento 60

3 • Metodologia **62**
3.1 • Aquisição dos insumos 63

3.2 • Separação e caracterização dos materiais 63
3.2.1 • Água 63
3.2.2 • Cimento Portland 64
3.2.3 • Sílica ativa 65
3.2.4 • Cinza de fundo 65
3.2.5 • Aditivo 67
3.2.6 • Agregados miúdos 67
3.2.7 • Agregados graúdos 68
3.3 • Tratamento dos materiais 71
3.3.1 • Dosagem 71
3.3.2 • Produção dos concretos 72
3.4 • Seleção das amostras 73
3.5 • Ensaios 73
3.5.1 • Caracterização Mecânica 74
3.5.2 • Indicadores de Durabilidade 75
3.6 • Análise probabilística 85
3.6.1 • Modelo 85
3.6.2 • Cálculo da probabilidade de corrosão 86

4 • Resultados e Discussão 88
4.1 • Caracterização Mecânica 88
4.1.1 • Resistência à compressão axial 88
4.2 • Análise probabilística 104
4.2.1 • Discussão geral dos resultados 116

5 • Conclusões 121
5.1 • Síntese das principais conclusões 121
5.1.1 • Influência dos materiais nas propriedades mecânicas 121
5.1.2 • Parâmetros de durabilidade 122
5.1.3 • Análise probabilística da vida útil 122
5.1.4 • Comparação e viabilidade 122
5.2 • Considerações finais 123
5.3 • Possibilidades de investigações futuras 123

• Referências 125

Lista de Figuras

Página

2 • Revisão bibliográfica

2.1 • Morfologia dos agregados moídos de concreto. 8
2.2 • Grãos da cinza de fundo. 13
2.3 • Grãos da cinza de fundo. 13
2.4 • Tamanho de grãos da cinza de fundo. 13
2.5 • Zona costeira do Brasil. 18
2.6 • Localização do município de Rio Grande/RS. 19
2.7 • Porcentagem de cloretos em função da distância do mar. 19
2.8 • Zonas de exposição no ambiente marinho. 21
2.9 • Estrutura do estudo de caso da Ilha dos Arvoredos. 22
2.10 • Concentração de cloretos nos pontos de análise da estrutura da Ilha dos Arvoredos. 23
2.11 • Corrosão das armaduras nas regiões do país. 24
2.12 • Corrosão eletroquímica na presença de cloretos. 25
2.13 • Representação de uma pilha de corrosão com um mesmo metal. . 25
2.14 • Corrosão na laje. 29
2.15 • Fissuras em um cais. 30
2.16 • Modelo de vida útil proposto por Tuutti. 31
2.17 • Estágios de vida útil de estruturas de concreto. 32
2.18 • Deteriorações induzidas pela corrosão. 32
2.19 • Interação das moléculas de água e a superfície dos poros. 34
2.20 • Raio dos poros em função da umidade relativa do ar. 35
2.21 • Representação da porosidade capilar do concreto. 35
2.22 • Fatores envolvidos no transporte nos poros. 38
2.23 • Ação da relação a/agl no coeficiente de difusão de cloretos. . . . 39
2.24 • Vida útil do concreto em função da temperatura. 39
2.25 • Fatores que afetam a penetração de cloretos no concreto. 41
2.26 • Projeto baseado em desempenho. 43
2.27 • Porcentagens da classificação dos modelos. 46
2.28 • Modelos mais citados. 46
2.29 • Modelos matemáticos de determinação de iniciação da corrosão pela ação de íons cloreto. 47
2.30 • Função densidade de probabilidade da vida útil e vida útil característica. 48
2.31 • Concentração de cloretos na profundidade da armadura em função da idade a partir da qual uma probabilidade pré-estabelecida de falha é admitida. 48
2.32 • Perfil de confiabilidade. 49

2.33 • P_f em função da margem de segurança. 51
2.34 • P_f em termos da variável normal padrão Y. 51
2.35 • Relação entre P_f e β. 52
2.36 • β com variáveis dependentes do tempo. 53
2.37 • Funcionamento do método de Monte Carlo. 55
2.38 • Amostragem por importância usando o ponto de projeto. 56
2.39 • Representação gráfica da função de desempenho. 57
2.40 • Representação gráfica do método FORM 57

3 • Metodologia
3.1 • Fluxograma da proposta metodológica. 62
3.2 • Curva granulométrica da cinza de fundo, areia fina e média. . . . 67
3.3 • Material misturado. 69
3.4 • Material separado. 69
3.5 • Curvas granulométricas dos agregados graúdos. 70
3.6 • Materiais utilizados na produção dos concretos: (a) agregados reciclados, (b) cinza de fundo e (c) sílica ativa. 71
3.7 • Consistência do traço e corpos de prova. 73
3.8 • Rompimento do corpo de prova. 74
3.9 • Ensaio de absorção de água por capilaridade. 75
3.10 • Dimensões da amostra para o ensaio da NT Build 492. 76
3.11 • Amostras para o ensaio da NT Build 492. 77
3.12 • Ensaio da NT Build 492. 77
3.13 • Medição da profundidade de penetração de cloretos. 79
3.14 • Rompimento e medição da profundidade de cloreto. 79
3.15 • Ensaio de resistividade superficial. 80
3.16 • Ensaio de resistividade superficial. 81
3.17 • Ensaio de resistividade elétrica volumétrica. 84
3.18 • Esquema do ensaio de resistividade elétrica volumétrica. 85

4 • Resultados e Discussão
4.1 • Resistência à compressão dos concretos investigados. 90
4.2 • Absorção de água por capilaridade dos concretos investigados. . . . 93
4.3 • Sorptividade dos concretos investigados. 93
4.4 • Coeficiente de migração. 96
4.5 • Resistividade superficial dos traços. 98
4.6 • Resistividade volumétrica dos traços. 99
4.7 • Coeficiente de migração e resistividades aos 28 dias. 101
4.8 • Coeficiente de migração e resistividades aos 56 dias. 101
4.9 • Coeficiente de migração e resistividades aos 180 dias. 101
4.10 • Relação entre a difusividade aparente de cloretos e o tempo para diferentes traços de concreto. 104
4.11 • Determinação do fator de envelhecimento (α) a partir da regressão linear em escala logarítmica. 105

4.12 • Evolução temporal da probabilidade de falha (P_f) para traços representativos no cenário local calibrado (C_s = 2,07%), com T = 18,26 °C e cobrimento fixo em 50 mm. A linha horizontal indica o critério de desempenho adotado na definição da vida útil característica (P_f = 10%). 108

4.13 • Evolução temporal da probabilidade de falha (P_f) para diferentes cobrimentos nos traços 0-0-0 e 100-25-8, no cenário local calibrado (C_s = 2,07%) e T = 18,26 °C. As linhas contínuas representam o traço de referência, enquanto as tracejadas representam o traço com 100 % de agregado reciclado e adições minerais. A linha horizontal indica o critério de desempenho adotado (P_f = 10%). 109

4.14 • Influência da temperatura na evolução da probabilidade de falha (P_f) para traços contrastantes no cenário local calibrado (C_s = 2,07%) e cobrimento fixo. A elevação da temperatura de 18,26 °C para 30 °C desloca as curvas para maiores probabilidades de falha em menores idades, sem alterar a hierarquia de desempenho entre os concretos. 112

Lista de Tabelas

Página

2 • Revisão bibliográfica
2.1 • Normas e recomendações para o uso de agregado reciclado. . . . 7
2.2 • Resumo das diferentes cinzas. 12
2.3 • Classes de Agressividade Ambiental (CAA). 20
2.4 • Fatores que influenciam o limite crítico de cloretos. 26
2.5 • Teor crítico de cloretos segundo alguns documentos. 28
2.6 • Relação dos valores de permeabilidade à água com a qualidade do concreto. 34
2.7 • Tipos de incertezas na análise estrutural. 50
2.8 • Índice de confiabilidade conforme a idade da estrutura. 54

3 • Metodologia
3.1 • Características do cimento. 64
3.2 • Propriedades gerais do cimento. 64
3.3 • Caracterização química do cimento (FRX). 65
3.4 • Características físicas e químicas da sílica ativa. 65
3.5 • Caracterização química da cinza de fundo (FRX). 66
3.6 • Características da cinza de fundo. 66
3.7 • Características do aditivo. 67
3.8 • Caracterização física das areias. 68
3.9 • Caracterização dos agregados graúdos. 70
3.10 • Consumo de materiais dos concretos investigados [kg/m^3]. 72
3.11 • Distribuição dos corpos de prova por tipo de ensaio. 72
3.12 • Tensão e tempo de duração do ensaio NT Build 492. 78
3.13 • Classificação quanto à difusividade. 79
3.14 • Probabilidade de corrosão conforme a resistividade elétrica. . . . 81
3.15 • Penetração de íons cloreto em função da resistividade elétrica. . . 82
3.16 • Valores mínimos de resistividade aos 28 dias conforme as classes. . . 82
3.17 • Possibilidade de penetração de cloretos baseada na resistividade elétrica (kΩ cm). 82
3.18 • Possibilidade de corrosão baseada na resistividade elétrica (kΩ cm). . 83
3.19 • Distribuições de probabilidade das variáveis na análise probabilística. 87

4 • Resultados e Discussão
4.1 • Resistência à compressão dos concretos investigados. 90
4.2 • Sorptividade dos concretos investigados. 91
4.3 • Classificação dos concretos quanto à difusividade. 96
4.4 • Coeficiente de migração em regime não estacionário dos concretos e respectivas classes de difusividade segundo Nilsson, Ngo e Gjørv, 1998. 96

4.5 • Resistividade elétrica superficial e volumétrica dos concretos (kΩ cm). 98
4.6 • Correlações entre resistividade elétrica e coeficiente de migração D_{nssm}. 102
4.7 • Coeficientes de correlação entre a resistividade elétrica e o coeficiente de difusão de cloretos segundo diversos autores. 102
4.8 • Resumo dos resultados de redução temporal da difusividade de cloretos. 103
4.9 • Vida útil característica a 18,26 °C e C_s = 2,07% (anos). 107
4.10 • Vida útil característica no cenário XS1 com T = 18,26 °C (anos). . 109
4.11 • Vida útil característica no cenário XS2 e T = 18,26 °C (anos). . . . 110
4.12 • Vida útil característica no cenário XS3 e T = 18,26 °C (anos). . . 110
4.13 • Vida útil característica no cenário C_s = 2,07% e T = 30 °C (anos). . . 111
4.14 • Vida útil característica no cenário XS1 e T = 30 °C (anos). . . . 112
4.15 • Vida útil característica no cenário XS2 e T = 30 °C (anos). 113
4.16 • Vida útil característica no cenário XS3 e T = 30 °C (anos). . . . 114

Lista de siglas

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRECON	Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição
ACI	American Concrete Institute
AR	Agregado reciclado
ASTM	American Society for Testing and Materials
BJH	Barrett–Joyner–Halenda
CAA	Classe de agressividade ambiental
CEB	Comité Euro-International du Béton
CF	Cinza de fundo
COV	Coeficiente de variação
CP	Cimento Portland
CP V-ARI	Cimento Portland de alta resistência inicial
CORSAN	Companhia Riograndense de Saneamento
DURACON	Software de modelagem probabilística para previsão da vida útil
ELS	Estado limite de serviço
ELU	Estado limite último
EN	European Standard
FHWA	Federal Highway Administration
FRX	Fluorescência de raios X
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
JIS	Japanese Industrial Standards
JSCE	Japan Society of Civil Engineers
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
NM	Norma Mercosul
NBR	Norma Brasileira
NT BUILD	Série de métodos de ensaio do Nordic Innovation Centre
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PIB	Produto Interno Bruto
RCA	Recycled concrete aggregate
RCD	Resíduo de construção e demolição
RILEM	International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures
SA	Sílica ativa

SCM	Supplementary cementitious materials
SSD	Saturated surface dry
UNE	Norma Española
VU	Vida útil
VUP	Vida útil de projeto
XS1	Classe de exposição marinha XS1
XS2	Classe de exposição marinha XS2
XS3	Classe de exposição marinha XS3
ZTI	Zona de transição interfacial

Lista de símbolos

α	fator de envelhecimento da difusividade
β	índice de confiabilidade
λ	parâmetro estatístico
μ	média
ρ	resistividade elétrica
ρ_s	resistividade elétrica superficial
ρ_v	resistividade elétrica volumétrica
σ	desvio-padrão
τ	variável temporal / parâmetro de ajuste, conforme contexto
ζ	parâmetro estatístico
a	parâmetro empírico de ajuste
A	área
C_0	concentração inicial
C_s	teor de cloretos na superfície do concreto
C_{cr}	teor crítico de cloretos para despassivação da armadura
$C(x, t)$	concentração de cloretos em função da profundidade e do tempo
D	coeficiente de difusão aparente de cloretos
D_0	coeficiente de difusão na idade de referência
D_{28}	coeficiente de difusão aos 28 dias
D_{56}	coeficiente de difusão aos 56 dias
D_{180}	coeficiente de difusão aos 180 dias
D_{nssm}	coeficiente de migração em regime não estacionário
e	espessura / erro
E	valor esperado
erf	função erro
f	função genérica / frequência, conforme contexto
f_c	resistência à compressão do concreto
f_{ck}	resistência característica à compressão do concreto
g	função de estado limite
h	tempo de exposição / altura
k	constante ou coeficiente empírico, conforme contexto
n	número de observações ou fator de envelhecimento em certos modelos
P_f	probabilidade de falha
R	resistência, no contexto probabilístico
R^2	coeficiente de determinação
S	solicitação, no contexto probabilístico
s	desvio-padrão amostral / sorptividade, conforme contexto
t	tempo

t_0	idade de referência
t_i	tempo de iniciação da corrosão
t_k	vida útil característica
T	temperatura
U	umidade relativa / variável aleatória padronizada, conforme contexto
V	volume
w/b	relação água/aglomerante
w/c	relação água/cimento
x	profundidade de penetração
x_c	cobrimento do concreto
x_d	profundidade de cloretos / profundidade crítica, conforme contexto

I Introdução

1.1 Considerações iniciais

O concreto armado é um dos materiais mais utilizados na engenharia contemporânea, devido à sua versatilidade, resistência e potencial de durabilidade. Contudo, sua produção em escala global está associada a impactos ambientais expressivos, sobretudo em razão das emissões de CO_2 relacionadas à fabricação do cimento Portland e do elevado consumo de recursos naturais não renováveis, como areia e brita (UNEP, 2024).

Além do custo ambiental na sua produção, a falta de durabilidade do concreto gera um passivo econômico gigantesco. A corrosão das armaduras, principal manifestação patológica em zonas de atmosfera marinha, impõe custos de reparo e manutenção que consomem uma parcela significativa do Produto Interno Bruto (PIB) de diversas nações. Conforme dados da World Corrosion Organization, no Brasil, em 2017, esses custos atingiram até 4,0 % do PIB (Felix, 2018), evidenciando a urgência de se desenvolver materiais de construção mais resilientes.

Globalmente, a geração de resíduos caminha para atingir $3{,}8 \times 10^9$ toneladas anuais até 2050 (Ferrante, Vitti, e Sassanelli, 2025). No Brasil, o desafio é igualmente monumental: apenas em 2023 foram geradas mais de 44 milhões de toneladas de Resíduos da Construção e Demolição (RCD) (ABREMA, 2024), um volume que pressiona os aterros e frequentemente leva ao descarte incorreto.

Em paralelo, setores como as usinas termoelétricas a carvão também agravam o quadro, produzindo grandes quantidades de cinzas que exigem destinação ambientalmente adequada. Apesar de leis brasileiras, a exemplo da Política Nacional de Resíduos Sólidos, indicarem a importância de reutilizar esses materiais, ainda estamos distantes dos objetivos traçados. Para enfrentar este duplo desafio — consumo de recursos e geração de resíduos — surge o paradigma da economia circular, definido como um modelo que visa manter os recursos em uso pelo maior tempo possível, maximizando sua eficiência e minimizando os resíduos. Tal abordagem não é apenas teórica: ela é base de iniciativas globais como os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU.

Em particular, o ODS 12, "Consumo e Produção Responsáveis", estabelece a necessidade de manejo ambientalmente adequado de todos os resíduos ao longo de seu ciclo de vida e de uma redução significativa de sua geração por meio da reutilização e reciclagem, princípio que vem sendo formalizado por normas recentes como a família ISO 59000 (Ferrante, Vitti, e Sassanelli, 2025). Entretanto, a incorporação de resíduos em materiais cimentícios não pode ser avaliada apenas sob a ótica ambiental. Para que essas soluções sejam tecnicamente viáveis, é essencial verificar se o uso de materiais

reciclados e subprodutos industriais preserva ou aprimora o desempenho mecânico e, sobretudo, a durabilidade do concreto em condições agressivas de exposição.

Na construção civil, a aplicação mais direta destes princípios é a reciclagem de RCD e de outros subprodutos industriais, como as cinzas de termoelétricas, para a produção de novos concretos. O uso de agregados reciclados na construção civil tem impulsionado pesquisas que buscam viabilizar tecnicamente essa alternativa e também garantir seu desempenho durável e sustentável em diferentes condições de exposição (Nguyen *et al.*, 2025). Estudos recentes demonstram que fatores como teor de substituição de agregado, razão água/aglomerante, adições minerais e estratégias de tratamento do agregado reciclado influenciam de maneira decisiva a durabilidade do concreto, principalmente frente a mecanismos de degradação como penetração de íons cloreto e carbonatação acelerada (Nguyen *et al.*, 2025 e Zhang e Zhao, 2025). Além disso, o uso de metodologias probabilísticas permite estimar a vida útil e, portanto, controlar a variabilidade do desempenho dos concretos reciclados, estabelecendo critérios para controle de qualidade e aceitação em obras de maior responsabilidade estrutural (Qin *et al.*, 2025; Yang *et al.*, 2025 e Zhang e Zhao, 2025).

Sabe-se que o desafio da durabilidade é intensificado em ambientes agressivos; dessa forma, discutir e integrar esses avanços ao contexto nacional amplia o horizonte técnico e científico para o uso racional de resíduos na construção e contribui para a consolidação de práticas mais responsáveis e resilientes no setor. Na extensa costa litorânea brasileira, as estruturas estão constantemente expostas a íons cloreto que podem iniciar o processo de corrosão da armadura e comprometer a vida útil da edificação (Meira, 2004). A cidade de Rio Grande/RS, onde este estudo se insere, é um exemplo emblemático dessa agressividade.

Um caso notável é o da Catedral de São Pedro que, em sua restauração na década de 1990, enfrentou o desafio de proteger suas alvenarias históricas da umidade e da alta salinidade. A solução adotada na época foi uma inovadora argamassa de saneamento que continha, entre seus componentes, cinza de carvão mineral. Uma análise recente, mais de duas décadas após a intervenção, concluiu que a argamassa foi um sucesso, cumprindo sua função de reter os íons cloreto em sua microestrutura porosa e proteger a edificação (Nunes, Gonçalves, e Tessaro, 2025). Este caso histórico não apenas reforça o potencial do uso de cinzas como estratégia durável para o controle de cloretos no contexto local, mas também serve como ponto de partida para investigações mais avançadas.

Embora a literatura já tenha demonstrado o potencial do uso de agregados reciclados, cinzas e sílica ativa em concretos mais sustentáveis, ainda permanecem lacunas quanto ao desempenho combinado desses materiais em ambientes marinhos agressivos, especialmente quando se utiliza agregado reciclado misto proveniente de fontes heterogêneas. Em particular, o comportamento sinérgico entre agregados graúdos de RCD, cinza de fundo (CF) em substituição ao agregado miúdo e sílica ativa (SA) como substituto parcial do cimento, sob ação de íons cloreto, ainda é pouco explorado. Nesse contexto, o presente trabalho busca contribuir para essa lacuna, avaliando

experimentalmente e por modelagem probabilística o potencial de durabilidade dessa composição.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar experimental e probabilisticamente a viabilidade do uso de agregados reciclados e cinza de fundo, combinados com sílica ativa, na produção de concretos com potencial de durabilidade em ambientes marinhos.

1.2.2 Objetivos específicos

- caracterizar os materiais constituintes e produzir concretos com diferentes teores de agregados reciclados, cinza de fundo e sílica ativa;
- avaliar a influência dessas substituições nas propriedades mecânicas e em indicadores de durabilidade, com ênfase na absorção capilar, resistividade elétrica e migração de cloretos;
- determinar parâmetros de entrada para análise probabilística de vida útil, com base nos resultados experimentais de transporte de cloretos; e
- estimar o potencial de durabilidade dos concretos estudados em diferentes cenários de exposição marinha, considerando a variabilidade dos materiais e as condições ambientais.

1.3 Delimitações

A presente pesquisa foi delineada com base em escolhas metodológicas específicas. A substituição do cimento Portland por sílica ativa foi analisada exclusivamente na proporção de 8 %, enquanto a substituição do agregado natural por agregado reciclado ocorreu nos teores de 50 % e 100 %. Todos os concretos foram produzidos com uma relação água/aglomerante (a/agl) única, fixada em 0,45.

No que tange à análise de durabilidade e vida útil, as delimitações foram as seguintes: o coeficiente de difusão foi avaliado apenas em regime não estacionário e a análise se restringiu ao período de iniciação da penetração de cloretos, não abrangendo a etapa de propagação da corrosão. A análise do efeito da temperatura foi delimitada a dois cenários isotérmicos: a temperatura média anual da região (18,26 °C) e uma condição mais severa de 30 °C, não sendo considerados modelos de variação térmica sazonal. Por fim, para a concentração superficial de cloretos (C_s), a análise probabilística foi circunscrita a quatro cenários específicos: um valor de referência local para a cidade de Rio Grande/RS (Guimarães, 2000) e três níveis de agressividade XS1, XS2 e XS3 (brando, moderado e severo), com base nos cenários adotados por fib Bulletin (2015).

1.4 Limitações

O estudo reconhece algumas limitações inerentes às suas escolhas metodológicas e ao seu escopo. A determinação do coeficiente de difusão por meio de um ensaio de migração acelerado, embora prática, constitui a primeira delas, pois os resultados podem não representar com total fidelidade o comportamento do concreto sob condições de exposição natural, introduzindo um grau de incerteza na extrapolação dos dados para a vida útil real.

Adicionalmente, a utilização de agregado reciclado misto, proveniente de um fornecedor comercial que processa RCD de múltiplas origens, também é um fator limitante. A heterogeneidade inerente desse material restringe a generalização dos resultados, uma vez que agregados de outras fontes poderiam apresentar desempenho distinto. Outra limitação reside na realização de todo o programa experimental em ambiente laboratorial, cujas condições controladas não replicam a variabilidade de uma obra real. Por fim, o escopo do programa experimental foi definido em função das restrições de tempo de uma dissertação de mestrado, o que restringiu o número de amostras e as idades de ensaio.

Apesar dessas limitações, o estudo fornece evidências relevantes sobre o comportamento de concretos com materiais reciclados em condições agressivas, contribuindo para a compreensão do seu potencial de aplicação em contextos reais de exposição marinha.

1.5 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos. O Capítulo 1 corresponde a esta introdução, na qual são apresentados o problema de pesquisa, os objetivos, as delimitações e as limitações do estudo. O Capítulo 2 reúne a revisão da literatura e aprofunda os conceitos teóricos essenciais à pesquisa. O Capítulo 3 descreve a metodologia experimental adotada. O Capítulo 4 apresenta e discute os resultados obtidos. Por fim, o Capítulo 5 reúne as conclusões, com a síntese dos principais achados e sugestões para trabalhos futuros. O documento é finalizado com as referências bibliográficas.

2 Revisão bibliográfica

Para entender a busca por novos materiais na construção civil, é preciso primeiro olhar para os responsáveis pelo problema: os componentes tradicionais do concreto. O primeiro é o cimento Portland. Ele é o aglomerante que une tudo, mas sua produção, que envolve a queima de calcário em altas temperaturas para criar o clínquer, é um dos processos industriais que mais emitem CO_2 no planeta (Neville e Brooks, 2013). O segundo é o volume massivo de agregados naturais, a areia e a brita. A extração implacável desses recursos de rios e pedreiras causa danos diretos a ecossistemas e consome um bem que não é infinito (Bauer, 2008). É por causa deste duplo custo ambiental (um químico, do cimento, e outro físico, dos agregados) que este capítulo se aprofunda no estado da arte, a fim de avaliar alternativas promissoras que buscam mitigar esses impactos.

2.1 Uso de materiais reciclados para produção de concreto

Esta parte do capítulo apresenta uma revisão sobre os principais materiais alternativos estudados nesta pesquisa: agregados reciclados, cinza de fundo e sílica ativa. São abordadas suas características técnicas, limitações e potenciais vantagens quando utilizados em substituição parcial aos materiais convencionais na produção de concreto exposto a zonas de atmosfera marinha. A análise foca especialmente nos impactos sobre propriedades relacionadas à durabilidade, como absorção de água, porosidade e resistência à penetração de íons cloreto.

2.1.1 Agregados reciclados de resíduos da construção civil

A norma NBR 15116 (ABNT, 2021), em vigor no Brasil, estabelece diretrizes para o uso de materiais reciclados na fabricação de concreto, promovendo uma forma mais consciente e segura do reaproveitamento dos resíduos provenientes da construção e demolição (RCD). Essa norma classifica os RCD em classes, sendo a classe A composta por materiais como cimento e rochas, que podem ser reaproveitados como agregados. Contudo, para fins estruturais, a norma permite apenas o uso de agregados reciclados de concreto (ARCO), restringindo sua quantidade a no máximo 20% em concretos usados em ambientes com níveis de agressividade I e II (ABNT, 2023).

É importante notar que esta regulamentação é a consolidação de um esforço normativo que se iniciou há quase duas décadas. Já em 2004, a ABNT publicou normas sobre o tema, como a NBR 15115, referente a procedimentos para execução de camadas de pavimentação, e a própria NBR 15116, que em sua primeira versão já estabelecia os requisitos para o uso de agregados reciclados em pavimentação e em concreto sem função estrutural (ABNT, 2004a,b). A existência dessas normas

desde 2004 demonstra que a utilização de agregados reciclados em aplicações de menor exigência é uma prática tecnicamente reconhecida no Brasil há bastante tempo, fornecendo a base de conhecimento para a atual discussão sobre a expansão de seu uso em concretos estruturais.

A regulamentação sobre o uso de agregados reciclados (AR) em concreto estrutural varia significativamente ao redor do mundo, refletindo duas abordagens principais: a prescritiva e a baseada em desempenho. Um resumo com as principais normas utilizadas em alguns países/regiões pode ser observado na tabela 2.1.

A abordagem prescritiva, mais conservadora, é adotada por muitas normas, como a brasileira NBR 15116 (ABNT, 2021), que limita a substituição do agregado graúdo a 20% em aplicações estruturais. Essa prática alinha-se ao cenário geral europeu e a diretrizes como a da Austrália (HB 155), que geralmente permitem taxas de substituição na faixa de 20% a 30% para requisitos de desempenho moderado.

Em contraste, a abordagem baseada em desempenho, adotada por países como Holanda (CROW-CUR 127:2021), China (GB/T 25177:2010) e Japão (JIS A 5021), é mais permissiva. Essas normativas admitem taxas de substituição muito mais elevadas, chegando a 100%, desde que os agregados reciclados atendam a rigorosos critérios de qualidade e sejam classificados em categorias de alto desempenho, tornando-os comparáveis aos agregados naturais.

Essa distinção é importante, pois a limitação conservadora no cenário nacional, embora vise garantir a segurança, pode restringir o potencial de sustentabilidade do material. Fica evidente que há um campo vasto para a pesquisa focada na abordagem por desempenho no Brasil. Em vez de seguir limites prescritivos, busca-se comprovar que concretos com teores mais elevados de AR podem atingir a durabilidade e a vida útil de projeto desejadas, especialmente quando otimizados com adições minerais, como a sílica ativa e a cinza de fundo, que são o foco deste trabalho.

Além da normativa, o entendimento do desempenho destes materiais passa pela sua microestrutura. A principal característica que distingue os agregados reciclados de RCD dos agregados naturais é a sua morfologia, caracterizada por uma forma mais angular e uma textura superficial notadamente rugosa, como ilustrado na figura 2.1 (Cantero *et al.*, 2020). Essa rugosidade deve-se à presença de uma camada de argamassa e pasta de cimento endurecida, remanescente do concreto original, aderida à superfície do agregado natural.

Essa camada de argamassa aderida é amplamente apontada como o principal fator que governa o comportamento do agregado reciclado, pois está associada à menor densidade, à maior porosidade e à maior absorção de água em comparação aos agregados naturais (Alkhteeb e Dawood, 2025). Do ponto de vista microestrutural, ela corresponde à antiga zona de transição interfacial (ZTI) do concreto original e contribui para a formação de múltiplas interfaces no novo concreto reciclado. Estudos mais detalhados indicam a presença de diferentes tipos de ZTIs, envolvendo o agregado original, a argamassa antiga e a nova matriz cimentícia, o que torna o sistema mais heterogêneo e mais suscetível ao desenvolvimento de regiões localmente frágeis (Wahab

Tabela 2.1: Normas e recomendações para o uso de agregado reciclado.

País / Região	**Norma**	**Síntese da recomendação**
Alemanha	DIN 4226-100	Tipos 1–3; densidade $\geq$ 2000 kg/m^3; até 45% em estrutural (Tipo 1).
Austrália	HB 155:2002	Máx. 30% de agregado graúdo; impurezas $\leq$ 1%; absorção $\leq$ 6%.
Brasil	ABNT NBR 15116:2021	Máx. 20% de ARCO em estrutural; foco na pureza do resíduo.
China	GB/T 25177:2010	Classes I–III; Classe I ($\geq$ 2,5 g/cm^3, abs. $\leq$ 3%) pode substituir até 100% do graúdo.
EUA	AASHTO MP 16 / ACI	Sem norma federal; LA $\leq$ 50%; perda em sulfato $\leq$ 18%; foco em aplicações não estruturais.
Europa	EN 206–1:2000	Requisitos gerais de desempenho; não prevê RA.
Europa	EN 12620:2008 (+A1)	Define categorias Rc, Rb, Ra; limites químicos; uso até 30%.
Holanda	CROW-CUR 127:2021	Abordagem por desempenho; absorção $\leq$ 5% para estrutural; até 100% graúdo e 60% miúdo.
Japão	JIS A 5021 (Classe H)	Classe H: densidade $\geq$ 2,5 g/cm^3, absorção $\leq$ 3%; permitido em concreto estrutural.
Portugal	LNEC (Especificação)[1]	Rc até 25% (C35/45–C40/50); Rb apenas em concreto não estrutural.
RILEM	121-DRG (1994)	Classificação pioneira por origem do resíduo (concreto vs. alvenaria).
Suíça	Regulamentação local[2] (SN EN 206 / SIA)	Permite uso em pré-moldados protendidos sob condições específicas.

[1] Especificação técnica elaborada pelo LNEC (*Laboratório Nacional de Engenharia Civil*), que funciona como documento de referência nacional.

[2] O SIA significa *Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein* em alemão, ou "Sociedade Suíça de Engenheiros e Arquitetos" em português. No caso dos agregados reciclados, a SIA adota a EN 206 (versão suíça, chamada SN EN 206) e publica prescrições adicionais sobre onde e como o RA pode ser usado.

Fonte: Sistematizada pela autora, a partir das normas indicadas.

et al., 2025).

Conforme descrito por Neville e Brooks (2013), a ZTI é, por natureza, uma região mais porosa e com maior concentração de microfissuras do que a pasta de cimento circundante. Assim, a presença dessas interfaces múltiplas no concreto com agregado reciclado tende a resultar em um compósito com microestrutura mais fraca e mais permeável (Thomas *et al.*, 2020). Esse efeito pode se refletir em reduções de densidade do agregado reciclado de concreto da ordem de 2% a 22% em comparação ao agregado natural (Antunes *et al.*, 2025). Ainda assim, a qualidade final do agregado reciclado depende também da qualidade do concreto de origem. Poon, Shui, e Lam (2004) observaram, por exemplo, ZTIs mais densas em agregados provenientes de concretos de alta performance.

Embora o foco desta dissertação não seja o comportamento em altas temperaturas, a literatura mostra que o agregado reciclado também pode apresentar respostas particulares em situações de incêndio. A maior permeabilidade e a rede de microfissuras pré-existentes podem favorecer o alívio da pressão de vapor, reduzindo o risco de lascamento explosivo; por outro lado, a presença adicional de argamassa aderida e de interfaces frágeis pode comprometer a estabilidade microestrutural durante o aquecimento. Assim, o comportamento final do concreto reciclado sob altas temperaturas depende do balanço entre esses efeitos, o que ajuda a explicar resultados por vezes contraditórios na literatura (Le e Bui, 2020 e Jiang *et al.*, 2025).

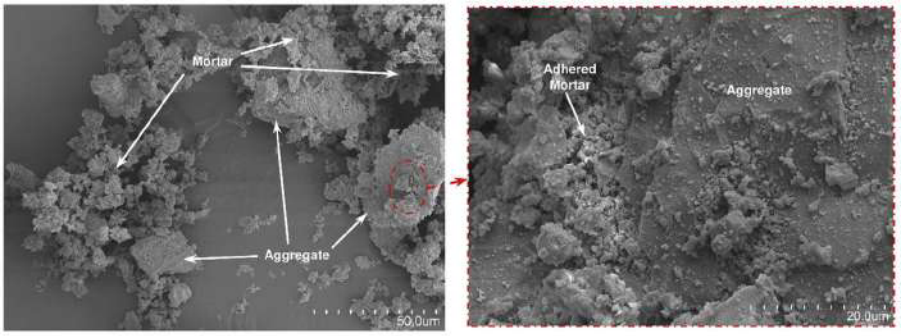


Figura 2.1: Morfologia dos agregados moídos de concreto.

Fonte: Cantero *et al.* (2020).

Contudo, a influência da resistência do concreto de origem (“concreto-pai”) é mais complexa do que aparenta. Uma revisão recente da literatura aponta para um efeito duplo e contraditório: por um lado, um concreto-pai de maior resistência gera uma argamassa residual de melhor qualidade, mais densa, o que beneficia as propriedades do agregado; por outro, essa mesma alta resistência dificulta a remoção da argamassa durante a britagem, resultando em um maior teor de argamassa aderida no produto final. Como a argamassa é inerentemente mais porosa que o agregado virgem, um maior teor dela pode aumentar a absorção de água e prejudicar outras propriedades. Esta dualidade ajuda a explicar a grande variabilidade de resultados encontrados na literatura sobre o tema (Chen *et al.*, 2025b).

A heterogeneidade dos agregados reciclados constitui um dos principais desafios técnicos para sua aplicação. Como discutido por Salles *et al.* (2021), essa heterogeneidade se traduz em maior porosidade intrínseca e em maior capacidade de absorção de água, aspecto amplamente reportado na literatura (Bravo *et al.*, 2015; Boudalia *et al.*, 2016; Xuan, Zhan, e Poon, 2017; Sasanipour, Aslani, e Taherinezhad, 2019; Berredjem, Arabi, e Molez, 2020; Cantero *et al.*, 2020; Mahmood, Khan, e Ayub, 2021 e Ma *et al.*, 2024). Enquanto agregados naturais graúdos costumam apresentar absorção na faixa de 1,0 % a 1,5 %, agregados reciclados de concreto frequentemente exibem valores mais elevados, podendo alcançar cerca de 5,0 %, a depender da origem e do processamento do resíduo (Verian, Ashraf, e Cao, 2018 e Antunes *et al.*, 2025).

Essa elevada absorção é particularmente crítica porque afeta diretamente a relação a/agl efetiva, a trabalhabilidade da mistura e, por consequência, as propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto. O problema torna-se ainda mais acentuado quando o RCD apresenta composição mista, com presença de materiais cerâmicos, argila ou outras impurezas. Agregados reciclados mistos, devido à sua natureza mais heterogênea, tendem a apresentar desempenho inferior ao dos agregados reciclados de concreto, com perdas mais pronunciadas de resistência e maior sensibilidade a problemas de durabilidade (Bravo *et al.*, 2015 e Antunes *et al.*, 2025).

A elevada absorção dos agregados reciclados introduz um desafio central ao projeto de misturas no estado fresco. A água de amassamento passa a ser disputada entre a pasta e o agregado, o que pode comprometer rapidamente a fluidez e a consistência do concreto. Embora a utilização dos agregados na condição saturada com superfície seca (SSD) possa reduzir esse efeito, sua aplicação prática em larga escala é limitada por dificuldades operacionais. Assim, estratégias como a adição de água de compensação e o controle rigoroso da umidade prévia do agregado são frequentemente apontadas como alternativas mais viáveis (Silva, de Brito, e Dhir, 2018). Ainda assim, a dinâmica de absorção não é linear: agregados muito secos podem produzir abatimento inicial artificialmente elevado antes da absorção efetiva da água, o que evidencia a importância do controle da condição de umidade no momento da dosagem (Poon, Shui, e Lam, 2004 e Silva, de Brito, e Dhir, 2018).

Esse comportamento afeta não apenas a trabalhabilidade, mas também outros fenômenos do estado fresco, como a exsudação. Souche *et al.* (2017) mostraram que o impacto do agregado reciclado sobre a exsudação depende do equilíbrio entre absorção e liberação de água pelo material, bem como da relação a/agl e das condições de secagem. Assim, o efeito do AR no concreto fresco não deve ser interpretado de forma absoluta, mas em função da interação entre a condição de umidade do agregado e as características do traço.

A necessidade de controlar essas variáveis tem impulsionado o desenvolvimento de métodos de dosagem mais robustos, que superem abordagens puramente empíricas. Nesse contexto, Zhang *et al.* (2025) propuseram modelos de dosagem que integram características microestruturais dos agregados, como porosidade aberta, a parâmetros reológicos, com o objetivo de prever de forma mais racional a quantidade ideal de água

e pasta.

A complexidade de gerir essas variáveis tem impulsionado a busca por métodos de dosagem mais robustos e com base teórica, que superem a tradicional abordagem de tentativa e erro. Pesquisas de vanguarda, como a de Zhang *et al.* (2025), propõem modelos universais de dosagem que integram as características microestruturais dos agregados, como a porosidade aberta e princípios de reologia, para prever a quantidade ideal de pasta e água. Essa abordagem teórica visa estabelecer uma relação direta entre as propriedades do material e o desempenho macroscópico do concreto, representando um passo fundamental para a aplicação comercial em larga escala do concreto totalmente reciclado

A presença de argamassa aderida e a maior fragilidade da microestrutura também se refletem nas propriedades mecânicas do concreto endurecido. A consequência mais frequentemente relatada é a redução da resistência à compressão, cuja magnitude depende da origem do agregado, da composição do resíduo e do teor de substituição. Uma síntese recente indica perdas de até 3,7% para cada 10% de substituição quando se utilizam agregados reciclados de concreto, 7% para agregados de tijolos e 5,7% para agregados mistos (Antunes *et al.*, 2025). Resultados experimentais como os de Amorim Junior *et al.* (2019) confirmam essa tendência em concretos com 50% e 100% de substituição do agregado natural por reciclado.

Outras propriedades mecânicas também tendem a ser afetadas. Padmini, Ramamurthy, e Mathews (2009) observaram reduções em resistência à tração, resistência à flexão e módulo de elasticidade em concretos com agregados reciclados, especialmente quando a fração reciclada apresenta granulometria mais fina. Revisões recentes reforçam que o módulo de elasticidade é frequentemente uma das propriedades mais sensíveis à incorporação de AR, devido à menor rigidez do agregado e à maior deformabilidade da argamassa aderida (Alkhteeb e Dawood, 2025).

Aliás, alguns estudos têm buscado correlacionar o desempenho do concreto com propriedades mensuráveis do próprio agregado reciclado. Omary, Ghorbel, e Wardeh (2016), por exemplo, propuseram relações entre a resistência do concreto e a resistência à fragmentação dos agregados, destacando a importância da qualidade mecânica do agregado como um dos fatores que governam o desempenho final do compósito.

Além do desempenho mecânico, a durabilidade constitui uma das principais preocupações associadas ao uso de agregados reciclados. A microestrutura mais porosa do concreto com AR favorece o ingresso de agentes agressivos e tende a aumentar a permeabilidade do sistema. Hansen (1986), *apud* Verian, Ashraf, e Cao (2018), já indicava que concretos com RCA podem apresentar permeabilidade de duas a cinco vezes superior à de concretos convencionais. Essa condição facilita a penetração de íons cloreto e, consequentemente, pode antecipar o início da corrosão das armaduras, como discutido por Thomas *et al.* (2013) e Palaniappan *et al.* (2024). Além disso, fenômenos como retração por secagem e fluência tendem a ser mais pronunciados em comparação ao concreto convencional (Verian, Ashraf, e Cao, 2018).

Esses desafios podem se intensificar em cenários de multirreciclagem. Estudos com agregados reciclados de segunda e terceira gerações mostram aumento progressivo da quantidade de argamassa aderida e da porosidade do material, com reflexos negativos sobre retração, permeabilidade e outros indicadores de desempenho (Thomas *et al.*, 2020; Silva, Evangelista, e de Brito, 2021 e Kovacs, Shamass, e Limbachiya, 2025). Ainda assim, a literatura também indica que, sob determinadas condições de projeto de mistura, controle de relação a/agl e ajuste granulométrico, o uso de agregados reciclados provenientes de múltiplos ciclos pode permanecer tecnicamente viável (Zhu *et al.*, 2019, 2020).

Abordagens complementares também vêm sendo exploradas na literatura, incluindo o uso de altos volumes de materiais cimentícios suplementares, cura por carbonatação acelerada, otimizações de ciclo de vida e aplicações em sistemas cimentícios alternativos. Embora esses estudos ampliem o horizonte de valorização dos agregados reciclados (Ahmed *et al.*, 2025; Song *et al.*, 2025; Traiyasut *et al.*, 2025 e Wang *et al.*, 2025), tais abordagens excedem o escopo principal desta dissertação, que se concentra no desempenho de concretos com cimento Portland expostos à ação de cloretos.

De modo geral, a literatura demonstra que o desempenho de concretos com agregados reciclados depende fortemente não apenas do teor de substituição, mas também da origem, composição e heterogeneidade do resíduo, bem como da capacidade da matriz cimentícia em compensar os efeitos adversos da argamassa aderida e das múltiplas zonas de transição interfacial. Essa questão é particularmente relevante no presente trabalho, no qual o agregado reciclado empregado é proveniente de empresa de beneficiamento e composto por material misto oriundo de diferentes demolições, condição que naturalmente implica maior heterogeneidade e reforça a necessidade de avaliação experimental cuidadosa.

2.1.2 Cinza de fundo

Além dos Resíduos da Construção e Demolição (RCD), a busca por uma construção mais sustentável também se volta para os grandes volumes de subprodutos industriais. Entre eles, destacam-se as cinzas provenientes da queima de carvão mineral em usinas termelétricas, cujo descarte em aterros representa um significativo risco ambiental (Cirino *et al.*, 2021). O aproveitamento desses resíduos na construção não é uma ideia nova, com registros de uso desde meados do século XX (Gambs, 1966, apud Nardi, 1975).

Essas cinzas são geralmente classificadas em dois tipos principais. A mais conhecida e estudada é a cinza volante (*fly ash*), composta por partículas finas que são captadas nos filtros dos gases de exaustão. O segundo tipo é a cinza de fundo (*bottom ash*), um material mais grosseiro e pesado que se acumula no fundo das caldeiras. Embora a cinza de fundo represente a menor parcela do total, cerca de 20% contra 80% da cinza volante (Haq, Padmanabhan, e Licciulli, 2014 e Lacerda, 2015), seu volume ainda é monumental.

Além das cinzas derivadas da queima de carvão, pesquisas recentes têm destacado também a cinza de fundo de biomassa (*Biomass Bottom Ash* – BBA). Apesar da origem distinta, a BBA apresenta comportamento semelhante em sua aplicação como adição ao concreto, especialmente no que se refere ao ganho de resistência a longo prazo (Rosales *et al.*, 2025). Na tabela 2.2 é apresentado um resumo dos tipos de cinza.

Tabela 2.2: Resumo das diferentes cinzas.

Tipo de cinza	Origem	Potencial em concreto
Cinza volante (FA)	Queima de carvão mineral em usinas termelétricas (partículas finas captadas nos filtros de gases).	Amplamente estudada; melhora resistência e durabilidade; reduz permeabilidade.
Cinza de fundo (BA)	Queima de carvão mineral em usinas termelétricas (material mais grosseiro acumulado no fundo das caldeiras).	Menos estudada; quando moída, pode melhorar resistência e reduzir penetração de cloretos (Le, Mai, e Ta, 2025).
Cinza de fundo de biomassa (BBA)	Queima de biomassa (resíduos agrícolas, florestais e industriais usados para geração de energia).	Estudos recentes mostram ganhos de resistência em idades avançadas e viabilidade como SCM (Rosales *et al.*, 2025).

Fonte: Sistematizada pela autora.

No caso específico da cinza de fundo de carvão, sua utilização em concreto depende fortemente de suas características físicas, químicas e mineralógicas. Em comparação com a cinza volante, a BA apresenta partículas mais grosseiras, mais pesadas e de morfologia mais irregular (Rohde *et al.*, 2006). Sua granulometria tende a se aproximar mais da de uma areia fina ou de um silte, o que a torna particularmente interessante em aplicações como substituto parcial do agregado miúdo ou como material de preenchimento fino.

A caracterização microestrutural permite compreender com maior precisão a morfologia da cinza de fundo e sua influência sobre o comportamento do concreto. Imagens de MEV, como as das figuras 2.2 e 2.3, mostram grãos de contorno irregular e, o mais importante, com uma superfície porosa e áspera (Rafieizonooz *et al.*, 2016 e Vieira *et al.*, 2022). Essa textura, visível em diferentes escalas de tamanho (figura 2.4), é a chave para entender o seu comportamento dentro do concreto.

O potencial da cinza de fundo como material cimentício suplementar está relacionado à sua possível reatividade pozolânica, embora essa reatividade seja, em geral,

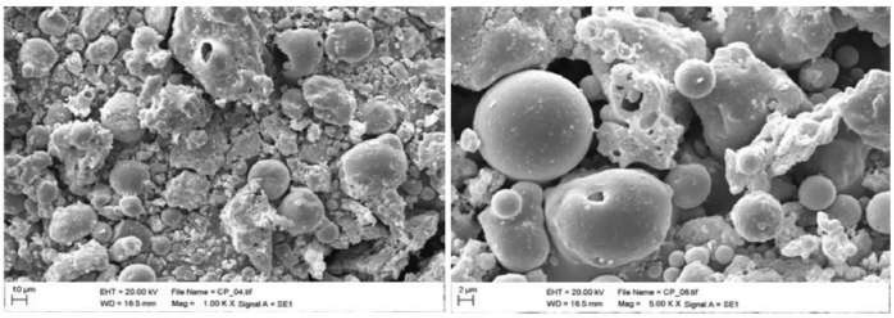


Figura 2.2: Grãos da cinza de fundo.
Fonte: Vieira *et al.* (2022).

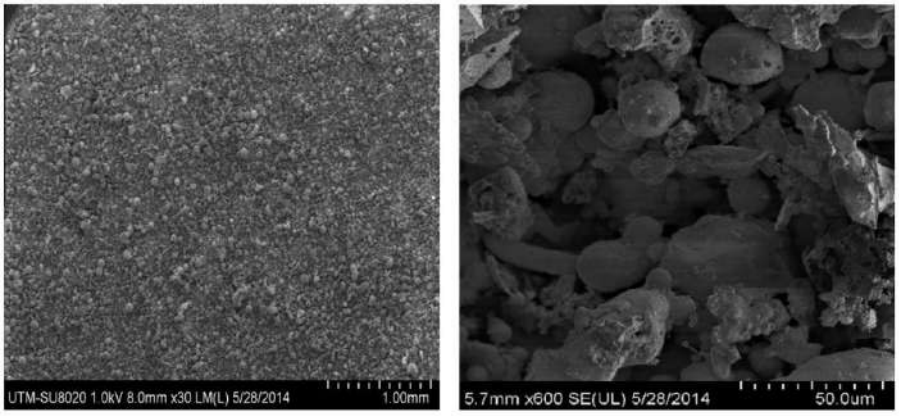


Figura 2.3: Grãos da cinza de fundo.
Fonte: Rafieizonooz *et al.* (2016).



Figura 2.4: Tamanho de grãos da cinza de fundo.
Fonte: Rafieizonooz *et al.* (2016).

inferior à da cinza volante. Isso se deve, entre outros fatores, à maior granulometria e ao menor teor de fase amorfa. Ainda assim, a literatura mostra que essa reatividade pode ser ativada ou intensificada por processamento adequado, especialmente por moagem, que aumenta a área específica e favorece as reações pozolânicas (Chindaprasirt e Rattanasak, 2010). Esse efeito foi observado experimentalmente por Le, Mai, e Ta (2025), que empregaram moagem prolongada da cinza de fundo para aumentar sua reatividade e viabilizar seu uso como SCM.

Entretanto, esse comportamento não pode ser generalizado para qualquer cinza

de fundo. Sua composição química e mineralógica varia significativamente em função da origem do carvão e das condições de combustão. Cirino *et al.* (2021), ao analisarem cinzas das usinas do Pecém/CE, verificaram que o elevado teor de enxofre e a presença de fases cristalinas como calcita impediram a classificação do material como pozolana segundo critérios normativos. Esse tipo de resultado evidencia que a viabilidade do uso da cinza de fundo depende de caracterização específica, não sendo adequada sua adoção com base apenas em generalizações da literatura.

No que se refere ao desempenho mecânico, a CF costuma apresentar contribuição mais tardia do que imediata. Em idades iniciais, substituições por cinza de fundo frequentemente resultam em resistências inferiores às do concreto de referência; em idades mais avançadas, contudo, a reação pozolânica e o rearranjo microestrutural podem compensar ou até superar esse comportamento inicial (Rafieizonooz *et al.*, 2016 e Kiruthiga *et al.*, 2025). Resultados de longo prazo reforçam esse potencial em determinados sistemas. Kiruthiga *et al.* (2025), por exemplo, relataram reatividade secundária significativa em concretos com 25% de substituição por cinza de fundo, com formação adicional de C–S–H e ganho expressivo de resistência após um ano de cura.

Estudos recentes também apontam a existência de um teor ótimo de substituição, que varia de acordo com o tipo de concreto, a finura da cinza e as demais variáveis do sistema (Pilar *et al.*, 2016; Kampai *et al.*, 2024 e Kiruthiga *et al.*, 2025). Em sistemas geopoliméricos, por outro lado, Xie e Ozbakkaloglu (2015) observaram desempenho inferior ao obtido com cinza volante, o que reforça que a resposta da BA depende do ligante e do ambiente químico do sistema.

Embora os efeitos sobre a resistência sejam relevantes, é no campo da durabilidade que a cinza de fundo tem despertado interesse crescente. Le, Mai, e Ta (2025) observaram que concretos com 30% de substituição por cinza de fundo moída atingiram uma carga passada de 619 Coulombs no ensaio ASTM C1202. Esse resultado classifica a penetrabilidade de cloretos como 'muito baixa', demonstrando um desempenho superior tanto ao concreto de referência (3758.2 Coulombs) quanto à mistura equivalente com cinza volante, que obteve 1017.7 Coulombs. Em consonância com esses resultados, Argiz, Moragues, e Menendez (2018) relataram menores coeficientes de migração e difusão de cloretos, bem como maiores valores de resistividade elétrica, em concretos com 25% de cinza de fundo, em comparação com teores equivalentes de cinza volante.

Segundo esses autores, parte desse desempenho pode estar associada ao teor de óxido de alumínio da cinza, que contribui para a retenção de cloretos por mecanismos físicos e químicos. Outros estudos também indicam benefícios complementares, como menor permeabilidade geral, menor perda de massa por corrosão e efeitos favoráveis sobre estabilidade dimensional (Rafieizonooz *et al.*, 2016 e Kampai *et al.*, 2024). Esses resultados são particularmente relevantes para o presente trabalho, que adota absorção capilar, resistividade elétrica e migração de cloretos como indicadores centrais do potencial de durabilidade.

O efeito da cinza de fundo sobre a trabalhabilidade do concreto fresco, por outro lado, permanece dependente das características específicas do material. Alguns estudos relatam redução da fluidez com o aumento do teor de cinza, atribuindo esse comportamento à maior área superficial e à maior demanda de água da cinza moída (Kiruthiga *et al.*, 2025). Outros autores, entretanto, observaram melhora da fluidez e até efeito retardador de pega, indicando que o comportamento reológico pode variar significativamente em função da finura, da forma das partículas e da origem da cinza (Costa *et al.*, 2023). Assim, a influência da BA na trabalhabilidade não deve ser tratada como propriedade intrínseca universal, mas como resposta dependente das características do resíduo e do sistema cimentício adotado.

Sob a ótica da sustentabilidade, a incorporação de cinza de fundo pode contribuir simultaneamente para a redução do consumo de matérias-primas, a valorização de resíduos industriais e a diminuição do impacto ambiental do concreto. Estudos recentes indicam reduções relevantes de custo e de emissões de CO_2 quando o material é empregado em teores adequados (Kampai *et al.*, 2024 e Kiruthiga *et al.*, 2025). Ainda assim, no contexto desta dissertação, o interesse principal recai menos sobre a viabilidade econômica direta e mais sobre a compreensão do papel técnico da cinza de fundo no desempenho de concretos expostos a cloretos.

Em síntese, a literatura indica que a cinza de fundo pode contribuir para o desempenho do concreto por mecanismos físicos associados ao preenchimento de vazios, ao rearranjo granular e à modificação da conectividade capilar, enquanto sua contribuição química depende fortemente de sua composição, finura e processamento. Essa distinção é central para o presente estudo, uma vez que a interpretação dos resultados de absorção, resistividade e migração de cloretos exige distinguir, sempre que possível, efeitos predominantemente físicos de eventuais contribuições pozolânicas.

Nesse contexto, a comparação com outras adições minerais torna-se particularmente relevante. Enquanto a contribuição da cinza de fundo depende fortemente da origem, da finura e do processamento do material, a sílica ativa apresenta comportamento mais consolidado na literatura como uma adição mineral de elevada reatividade, amplamente reconhecida por sua capacidade de refinar a microestrutura cimentícia e elevar a resistência ao transporte de agentes agressivos.

2.1.3 Sílica ativa

O uso de materiais pozolânicos para melhorar o desempenho de ligantes à base de cal e cimento possui longa trajetória histórica. Registros clássicos indicam que os romanos já empregavam misturas de cal com cinzas vulcânicas da região de Pozzuoli para produzir materiais com elevada durabilidade, utilizados em estruturas que permanecem preservadas até a atualidade (Morrison, 1970 e Pinto, 1971). Atualmente, esse comportamento é explicado pela atividade pozolânica desses materiais. Conforme a NBR 12653 (ABNT, 2015b), materiais pozolânicos são aqueles que, por apresentarem constituintes silicosos ou silicoaluminosos, reagem com o hidróxido de cálcio na presença de água, formando compostos cimentícios adicionais. Esse processo

contribui para o refinamento da microestrutura, para a redução da permeabilidade e para o aumento da resistência do concreto ao transporte de agentes agressivos, como os íons cloreto (Coimbra, Santos, e Morelli, 2002). No Brasil, o emprego de materiais pozolânicos também possui tradição consolidada, tendo sido historicamente adotado em obras de grande porte, como barragens (Priszkulnik, 1981).

A sílica ativa, foco desta seção, é um subproduto da indústria de silício metálico e ferrossilício, constituído majoritariamente por dióxido de silício (SiO_2) em estado amorfo. Sua elevada reatividade está associada justamente a esse caráter amorfo, bem como à sua altíssima finura. As partículas apresentam forma predominantemente esférica e dimensões muito inferiores às do cimento Portland, o que favorece sua atuação tanto física quanto química na matriz cimentícia (Shi *et al.*, 2012 e Neville, 2016). No contexto brasileiro, a sílica ativa é regulamentada pela NBR 13956-1 (ABNT, 2012a).

No concreto, a sílica ativa atua de forma simultânea por mecanismos físicos e químicos. Do ponto de vista físico, sua elevada finura favorece o preenchimento de vazios entre partículas maiores, contribuindo para uma matriz mais densa e compacta (Tutikian, Isaia, e Helene, 2011). Do ponto de vista químico, sua alta reatividade pozolânica promove a reação com o hidróxido de cálcio [$Ca(OH)_2$], resultando na formação adicional de gel C–S–H, principal responsável pela resistência e pela durabilidade do concreto (Neville, 2016).

O efeito combinado desses mecanismos se traduz em melhorias expressivas no desempenho do concreto. A literatura reporta reduções substanciais na penetração de cloretos com o uso de sílica ativa, podendo alcançar valores da ordem de 90% em determinadas condições (Wally *et al.*, 2021 e Henriques *et al.*, 2024). Conforme discutido por Neville (2016), esse comportamento decorre não de um simples bloqueio físico dos poros, mas do refinamento da rede porosa, que passa a apresentar caminhos mais tortuosos e menos conectados para o transporte de agentes agressivos. Em paralelo, a sílica ativa tende a melhorar a resistência mecânica, sobretudo à compressão, sem prejuízos relevantes a outras propriedades, como a resistência à tração (González-Fonteboa e Martínez-Abella, 2008).

Essa capacidade de refinamento microestrutural torna a sílica ativa particularmente relevante em concretos com agregados reciclados, nos quais a maior porosidade da argamassa aderida e a maior fragilidade da zona de transição interfacial (ZTI) tendem a comprometer o desempenho. Ao densificar a matriz e melhorar a qualidade da interface entre agregado e pasta (Sasanipour, Aslani, e Taherinezhad, 2019), a sílica ativa pode atuar como importante estratégia de mitigação da maior suscetibilidade ao transporte iônico normalmente associada ao uso de AR.

No contexto desta dissertação, a sílica ativa assume, portanto, papel estratégico, pois reúne dois efeitos particularmente relevantes para concretos com agregados reciclados: o refino físico da microestrutura, associado à sua elevada finura, e a reação pozolânica com o hidróxido de cálcio, que favorece a formação adicional de C–S–H. Esses mecanismos justificam sua adoção como uma das principais estratégias para

reduzir a permeabilidade e melhorar o potencial de durabilidade de concretos expostos a ambientes com cloretos.

2.2 Fatores dos materiais que interferem na penetração de cloretos

Esta parte do capítulo apresenta um pouco sobre a ação do ambiente na estrutura de concreto armado, os mecanismos de transporte de íons cloreto, a corrosão das armaduras e a influência da penetração de cloretos no concreto. São abordados artigos técnicos e limitações relacionadas à produção de concreto exposto a ambientes marinhos.

2.2.1 Ação dos agentes ambientais na estrutura do concreto

As estruturas de concreto estão continuamente expostas às condições ambientais do meio em que se inserem, de modo que sua durabilidade depende diretamente da intensidade e da natureza dos agentes de deterioração presentes. Fatores como umidade, temperatura, chuva, radiação solar e agentes químicos podem promover manifestações patológicas e comprometer o desempenho ao longo do tempo (Bertolini, 2010).

No Brasil, onde predominam condições climáticas tropicais e subtropicais, a combinação entre calor e elevada umidade favorece a intensificação de processos corrosivos e de outros mecanismos de deterioração (Filho, 2009). Entre os ambientes mais agressivos do país destacam-se as regiões costeiras, nas quais a presença de névoa salina ou maresia favorece o ingresso de íons cloreto no concreto (Meira, 2004). Por essa razão, a degradação de edificações em áreas litorâneas tende a ocorrer de forma mais acelerada do que em regiões do interior, exigindo medidas preventivas compatíveis com a vida útil pretendida.

A relevância do problema torna-se ainda mais evidente no contexto brasileiro, cuja extensa zona costeira concentra grande parcela da população e importantes infraestruturas urbanas e portuárias (IBGE, 2011). Nesses ambientes, a maresia atua como importante vetor de transporte de íons cloreto para a superfície do concreto. Um estudo realizado em Rio Grande/RS (figura 2.6) ilustra esse efeito de forma clara: Nunes (2006) mostraram que a concentração de cloretos na superfície do concreto pode ser mais de cinco vezes superior na orla marítima em comparação a pontos situados a cerca de 600 m do mar (figura 2.7).

Para lidar com essa agressividade de forma projetual, a norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2023) define as Classes de Agressividade Ambiental (CAA). Essa classificação, apresentada na tabela 2.3, orienta o projetista na escolha de concretos mais ou menos robustos, de acordo com o nível de risco de deterioração da estrutura em seu ambiente de serviço (ABNT, 2023).

Mas por que o concreto é tão vulnerável? A resposta está na sua essência: ele é um material poroso com composição interna complexa. A vulnerabilidade do concreto à ação dos agentes ambientais está diretamente associada à sua natureza porosa e à



Figura 2.5: Zona costeira do Brasil.

Fonte: IBGE (2011).

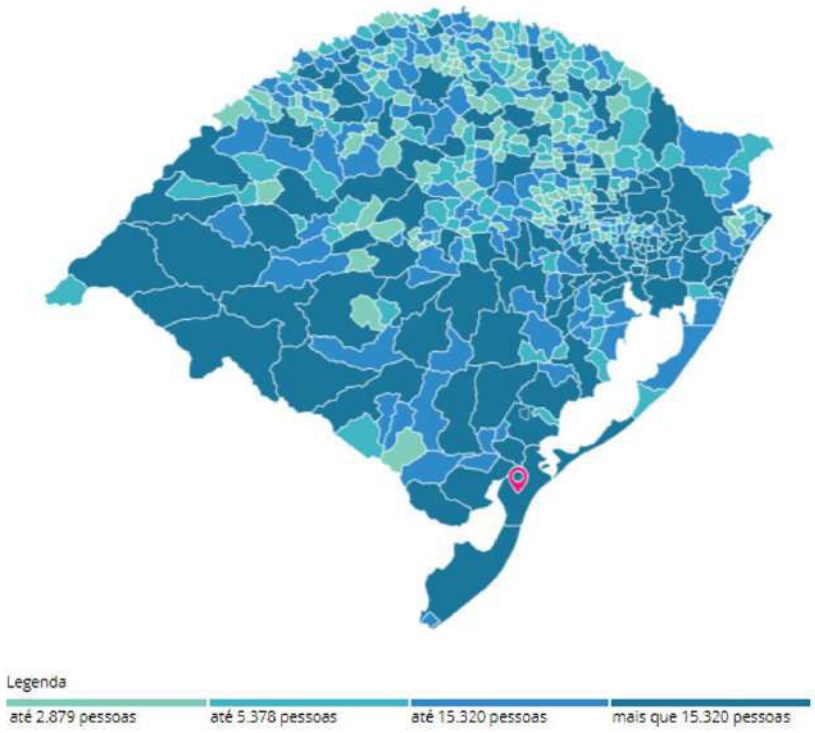


Figura 2.6: Localização do município de Rio Grande/RS.
Fonte: IBGE (2022).

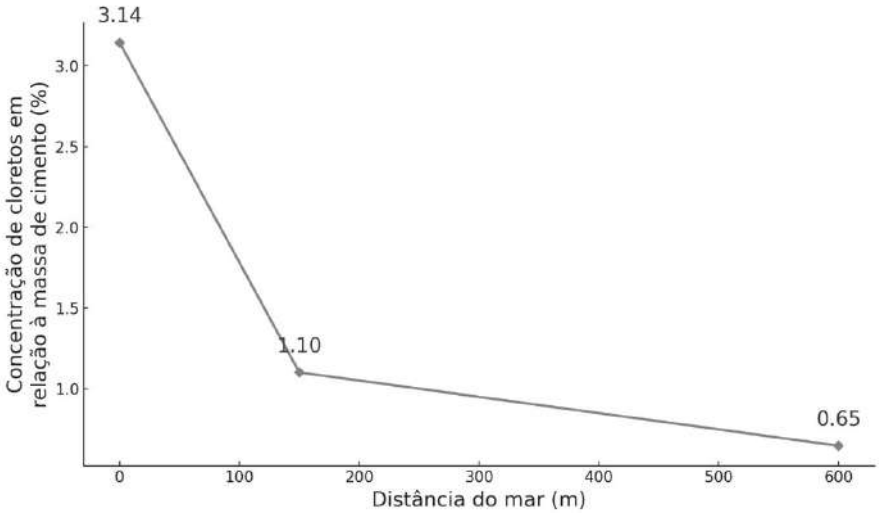


Figura 2.7: Porcentagem de cloretos em função da distância do mar.
Fonte: Sistematizada pela autora, a partir de Nunes (2006).

Tabela 2.3: Classes de Agressividade Ambiental (CAA).

Classe	Agressividade	Tipo de ambiente	Risco de deterioração
I	Fraca	Rural, submersa	Insignificante
II	Moderada	Urbana[1,2]	Pequeno
III	Forte	Marinha[1], industrial[1,2]	Grande
IV	Muito forte	Industrial[1,3], respingos de maré	Elevado

[1] Em ambientes internos secos, como salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de edifícios residenciais e comerciais, bem como em concreto revestido com argamassa e pintura, pode-se adotar uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima).
[2] Em regiões de clima seco, onde a umidade relativa do ar é $\leq 65\%$, ou em partes da estrutura protegidas da chuva em ambientes predominantemente secos, pode-se considerar uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima).
[3] Ambientes quimicamente agressivos incluem tanques industriais, instalações de galvanoplastia, processos de branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes e indústrias químicas.
Fonte: Sistematizada pela autora, a partir da ABNT (2023).

complexidade de sua microestrutura. A rede de poros e microfissuras atua como caminho para o ingresso de água e de substâncias dissolvidas, tornando possível o transporte de agentes agressivos, como os íons cloreto, para o interior da estrutura. Esse transporte pode ocorrer por diferentes mecanismos, entre os quais se destacam difusão, permeabilidade, absorção capilar, migração iônica e fenômenos eletrocinéticos, todos relevantes para a compreensão dos processos de deterioração e corrosão das armaduras (Bertolini, 2010).

No ambiente marinho, a intensidade da agressividade varia de acordo com a posição da estrutura em relação ao nível do mar e à ação das ondas. De acordo com Alexander e Nganga (2016), estruturas situadas em contato direto com o mar ou sob sua influência podem ser divididas em diferentes zonas de exposição, cada uma associada a mecanismos específicos de deterioração. Com base em Poulsen e Mejlbro (2005), destacam-se três zonas principais (figura 2.8):

- **Zona Atmosférica (ATM):** partes da estrutura localizadas acima do alcance da maré alta e das ondas. A agressividade depende da distância do mar e da exposição aos ventos que carregam a névoa salina.
- **Zona de Respingos (SPL):** faixa da estrutura sujeita a ciclos constantes de molhagem e secagem pela ação das marés e ondas. É geralmente considerada a zona de maior agressividade, pois combina alta concentração de cloretos com a disponibilidade de oxigênio, favorecendo a corrosão.
- **Zona Submersa (SUB):** partes da estrutura permanentemente submersas. Apresenta menor risco de corrosão devido à baixa disponibilidade de oxigênio, embora ainda esteja sujeita a outros tipos de ataques químicos.

Um estudo de caso relevante para a compreensão dessas zonas de exposição foi

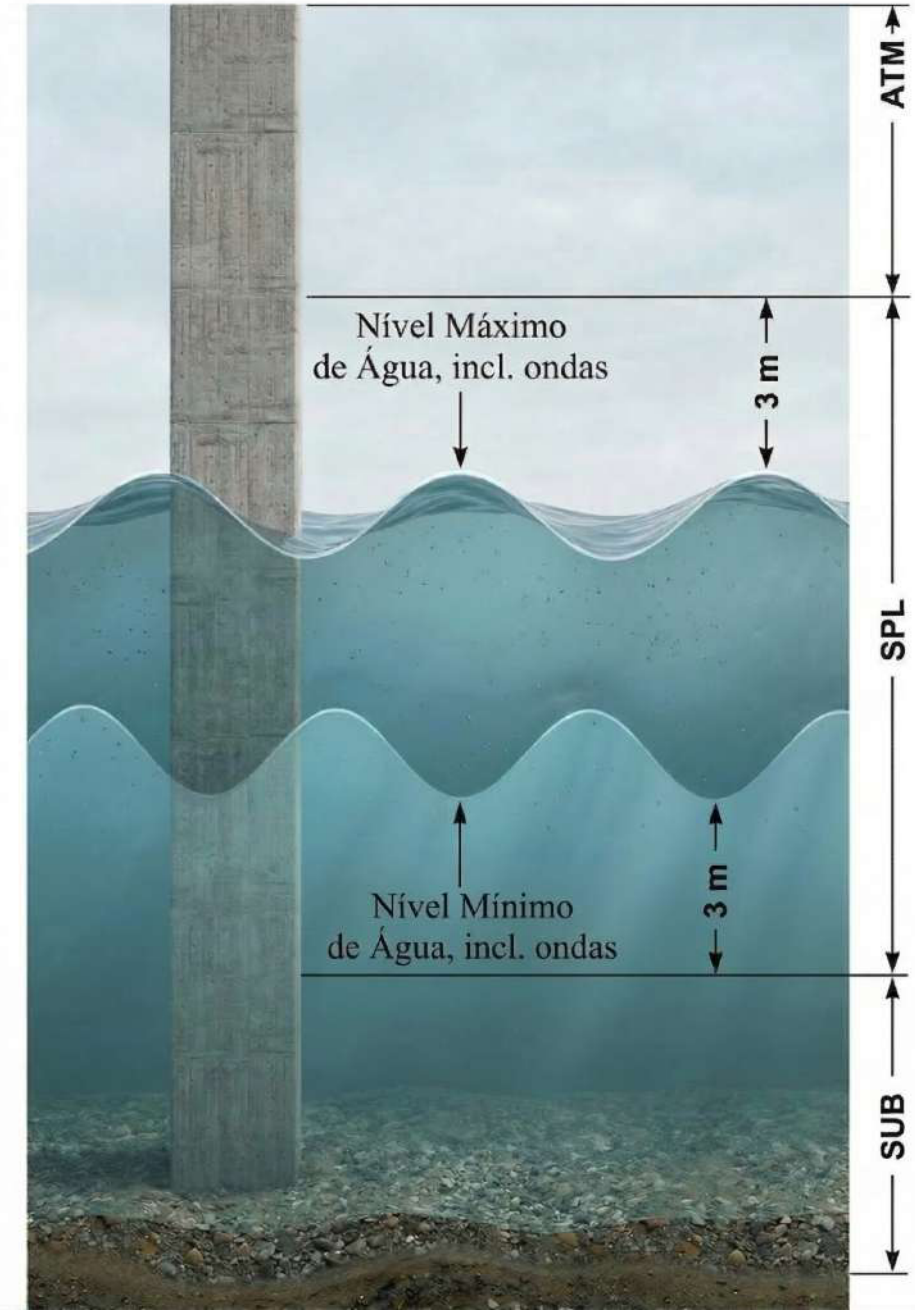


Figura 2.8: Zonas de exposição no ambiente marinho.

Fonte: Sistematizado pela autora, a partir de Poulsen e Mejlbro (2005).

conduzido por Balestra *et al.* (2017), na Ilha dos Arvoredos, no litoral paulista. A investigação mostrou variações significativas na concentração de cloretos em função da posição da estrutura nas zonas atmosférica, de respingos e de variação de maré, evidenciando a influência combinada da névoa salina, dos ciclos de molhagem e secagem e da orientação da estrutura em relação aos ventos predominantes. Esses resultados reforçam que a agressividade do ambiente marinho não é uniforme, mas depende da zona de exposição e das condições locais de serviço.

A figura 2.9 apresenta a estrutura analisada e a localização dos pontos de coleta nas diferentes zonas de exposição. Os resultados sintetizados na figura 2.10 mostram que o ponto situado na região de maior agressividade apresentou a maior concentração de cloretos, atingindo 3,143% da massa do concreto. Esse estudo ilustra, de forma prática, a importância de considerar a variabilidade espacial da exposição marinha no projeto de durabilidade.



Figura 2.9: Estrutura do estudo de caso da Ilha dos Arvoredos.
Fonte: Balestra *et al.* (2017).

Em conjunto, esses aspectos mostram que a ação dos agentes ambientais sobre o concreto depende tanto das características intrínsecas do material quanto das condições de exposição a que a estrutura está submetida. No caso de ambientes marinhos, a presença de cloretos, a disponibilidade de umidade e a variação entre zonas de exposição tornam indispensável a análise dos mecanismos de transporte e de deterioração associados ao ingresso desses agentes, tema aprofundado nas subseções seguintes.

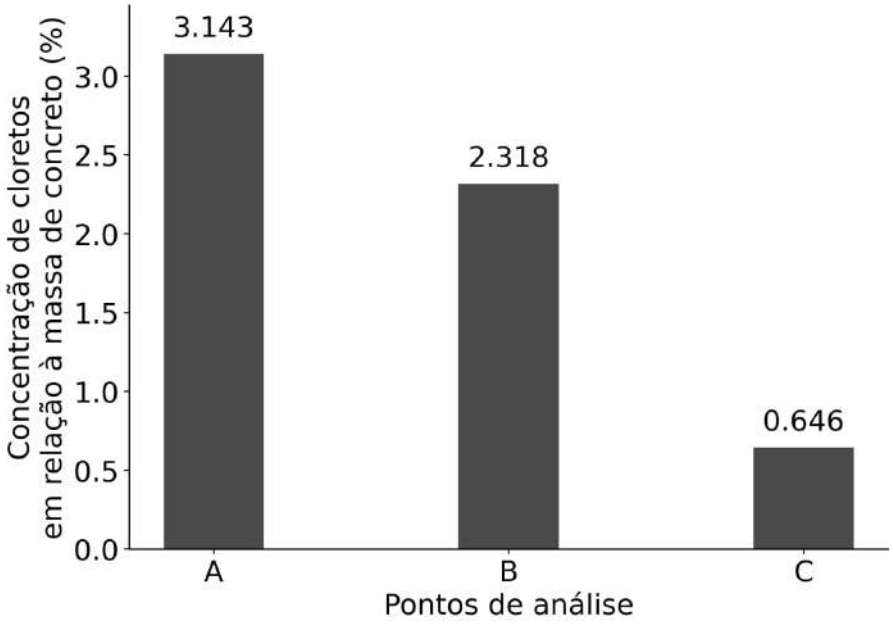


Figura 2.10: Concentração de cloretos nos pontos de análise da estrutura da Ilha dos Arvoredos.

Fonte: Sistematizada pela autora, a partir de Balestra *et al.* (2017).

2.2.2 Corrosão das armaduras

A corrosão é um dos principais problemas econômicos e tecnológicos associados à durabilidade de estruturas metálicas e de concreto armado. Em escala global, seus impactos representam custos da ordem de trilhões de dólares, consumindo parcela significativa do produto interno bruto mundial (Moreira *et al.*, 2024). No contexto da engenharia civil, esse fenômeno se manifesta de forma particularmente crítica na corrosão das armaduras do concreto armado. Apenas na China, por exemplo, os gastos associados à corrosão alcançaram 310 bilhões de dólares em 2015 (Hou *et al.*, 2017).

No Brasil, a corrosão das armaduras figura entre as principais manifestações patológicas das estruturas de concreto. O levantamento compilado por Meira (2017) indica a incidência disseminada do problema em todas as regiões do país (figura 2.11). Estudos regionais apontam a corrosão como responsável por cerca de 40% dos danos observados no Sul (Dal Molin, 1988) e por 64% no Nordeste (Andrade, 1997), evidenciando a relevância nacional do tema.

De forma simplificada, a corrosão do aço pode ser entendida como a tendência termodinâmica do metal de retornar a estados mais estáveis, próximos aos de seus compostos minerais de origem (Gentil, 1996). No concreto armado, entretanto, o aço conta com duas barreiras de proteção. A primeira é física, representada pelo cobrimento de concreto. A segunda é química, associada à elevada alcalinidade da solução dos poros da pasta cimentícia, que favorece a formação de uma película passivadora estável na superfície do aço. Esse processo, conhecido como passivação, torna a armadura protegida contra a corrosão enquanto as condições químicas do meio

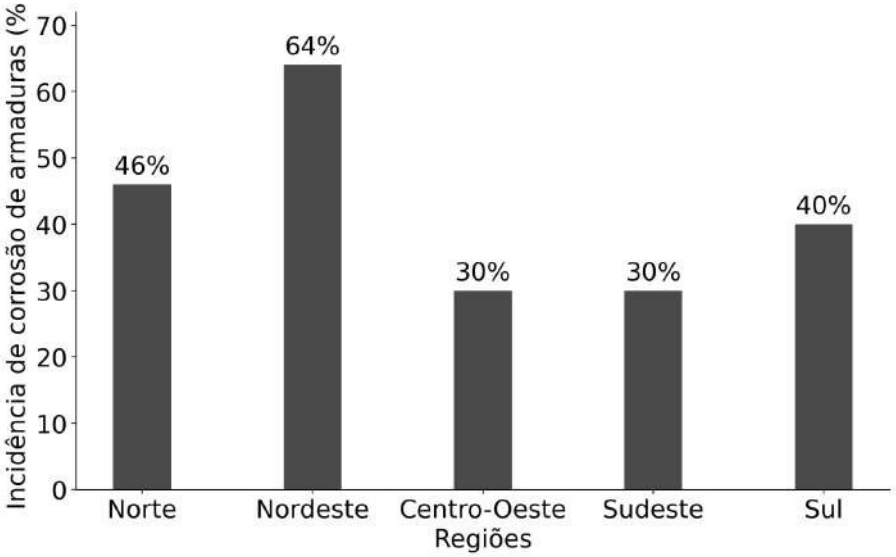


Figura 2.11: Corrosão das armaduras nas regiões do país.
Fonte: Sistematizado pela autora, a partir de Meira (2017).

permanecem favoráveis (Figueiredo e Meira, 2013).

Essa camada passivadora pode ser destruída principalmente por dois mecanismos: a carbonatação e a ação dos íons cloreto. Na carbonatação, o dióxido de carbono (CO_2) do ar penetra pelos poros do concreto e reage com os compostos alcalinos da matriz, reduzindo progressivamente o pH da solução dos poros. Quando a frente de carbonatação atinge a armadura e o pH cai a níveis insuficientes para manter a passivação, o aço torna-se suscetível à corrosão (Helene, 1986).

Em ambientes marinhos, contudo, o mecanismo mais relevante é o ataque por íons cloreto. Diferentemente da carbonatação, os cloretos podem romper a camada passiva localmente, mesmo em meios ainda altamente alcalinos, favorecendo a corrosão localizada por pites (Figueiredo e Meira, 2013). A importância desse mecanismo é amplamente reconhecida na literatura: uma revisão sistemática conduzida por Moreira *et al.* (2024) mostrou que 79,8% dos estudos sobre durabilidade analisados estavam voltados à corrosão induzida por cloretos, enquanto apenas 7,4% tinham foco principal na carbonatação.

Quando os cloretos rompem a camada passivadora, inicia-se o processo de corrosão eletroquímica da armadura. Esse processo envolve reações de oxidação e redução que ocorrem simultaneamente em regiões distintas do aço e depende da formação de uma célula eletroquímica, esquematizada na figura 2.12. Para que a corrosão eletroquímica se estabeleça, quatro elementos são necessários:

1. **Ânodo:** região da armadura onde ocorre a oxidação do ferro, com consequente dissolução do metal;
2. **Cátodo:** região na qual ocorre a reação de redução, sem perda direta de material metálico;

3. **Eletrólito:** a solução presente nos poros do concreto, que permite o transporte iônico;
4. **Ligação metálica:** a continuidade elétrica proporcionada pela própria barra de aço, permitindo o fluxo de elétrons entre ânodo e cátodo.

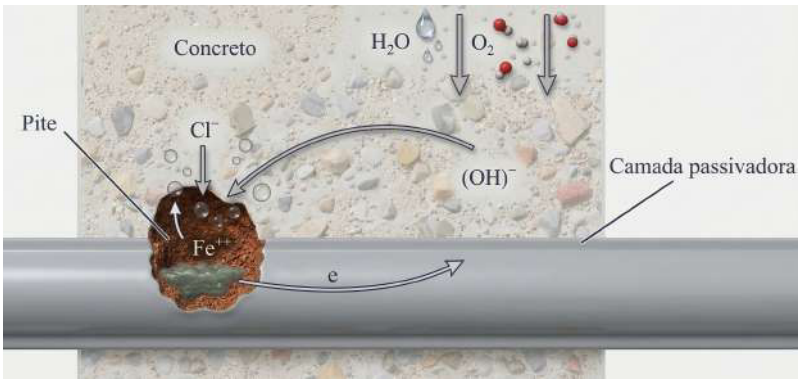


Figura 2.12: Corrosão eletroquímica na presença de cloretos.
Fonte: Sistematizado pela autora, a partir de Neville (2016).

O processo eletroquímico pode ser visualizado como um circuito, conforme ilustrado na figura 2.13. Na região anódica, o ferro metálico se dissolve, liberando elétrons que se deslocam pela própria armadura até a região catódica, onde são consumidos em reações de redução na presença de água e oxigênio (Meira, 2017). A velocidade do processo corrosivo depende, entre outros fatores, da resistividade elétrica do eletrólito e da disponibilidade de oxigênio. Por essa razão, a corrosão tende a ser mais intensa em condições intermediárias de umidade: em concretos muito secos, há falta de eletrólito suficiente; em concretos totalmente saturados, a disponibilidade de oxigênio para a reação catódica torna-se reduzida (Neville, 2016).

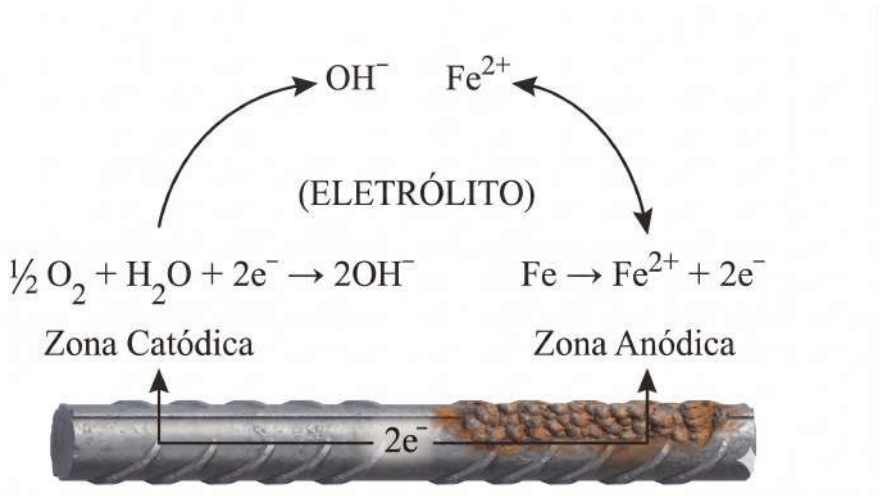


Figura 2.13: Representação de uma pilha de corrosão com um mesmo metal.
Fonte: Sistematizado pela autora, a partir de Meira (2017).

O ataque por cloretos é particularmente perigoso por seu caráter localizado e autocatalítico. Em vez de produzir corrosão uniforme em toda a superfície da armadura, os íons cloreto tendem a romper a camada passiva em pontos específicos, favorecendo a formação de pites. Nesses locais, os cloretos participam do processo de despassivação e podem ser posteriormente liberados, permanecendo disponíveis para desencadear novas reações em regiões adjacentes. Esse mecanismo contribui para a propagação acelerada da corrosão localizada e pode reduzir significativamente a seção resistente da armadura sem que haja perda de massa generalizada (Lima, 1996).

A despassivação da armadura ocorre quando a concentração de íons cloreto na interface aço–concreto atinge um valor mínimo capaz de romper a camada passivadora. Esse limiar é conhecido como teor crítico de cloretos. Embora um valor de referência frequentemente citado seja da ordem de 0,4% da massa de cimento (Helene, 1993 e Lima, 1996), a literatura não reconhece um valor universal para esse parâmetro.

A complexidade decorre do fato de que parte dos cloretos pode permanecer quimicamente combinada aos aluminatos da matriz cimentícia, não estando imediatamente disponível para atacar a película passiva. Nesse sentido, Gjørv (2015) reportam valores de teor crítico variando de 0,02% a 3,04% da massa de cimento. Essa ampla faixa reflete a influência de múltiplos fatores, como o pH da solução dos poros, o potencial eletroquímico do aço, as condições da interface aço–concreto e variáveis ambientais e materiais (Glass e Buenfeld, 1997, 2000 e Meira, 2017). A tabela 2.4 resume alguns dos principais fatores associados a essa variabilidade.

Tabela 2.4: Fatores que influenciam o limite crítico de cloretos.

Interface com o aço	**Fatores relacionados com o concreto**		**Fatores externos**
	Materiais cimentícios	**Barreira representada pelo concreto**	
Vazios ou falhas	Quantidade de C_3A	Cura	Quantidade de umidade
Oxidação prévia	pH	Relação a/agl	Variações de umidade
–	Cinza volante	Espessura do recobrimento	Concentração de oxigênio
–	Escória	–	Origem dos íons cloreto
–	Sílica ativa	–	Tipo de cátion que acompanha o cloreto
–	Quantidade de aglomerante	–	Temperatura

Fonte: Adaptada pela autora, a partir de Glass e Buenfeld (1997a) apud Meira (2017).

Frente a este cenário de incertezas, a tendência mundial das normas técnicas é adotar limites máximos conservadores, visando garantir a durabilidade na maioria dos casos. A tabela 2.5 apresenta um resumo dos limites recomendados por diferentes normas e documentos técnicos internacionais, observando-se uma distinção entre os

limites para concreto armado (CA) e concreto protendido (CP), sendo este último mais restritivo devido à sua maior vulnerabilidade à corrosão sob tensão. A forma de expressar o limite varia: é comum apresentar o valor em relação à massa de cimento, mas algumas normas utilizam a massa ou volume de concreto como referência. No Brasil, a NBR 6118 (ABNT, 2023) estabelece limites com base na CAA, buscando adequar o limite ao risco real de exposição da estrutura.

Tabela 2.5: Teor crítico de cloretos segundo alguns documentos.

País / Região	Norma	Tipo de Concreto / Condição	Teor Crítico de Cloretos	Referência	Observações
Brasil	NBR 12655 (ABNT, 2015)	CP CA – (condições severas) CA – (condições brandas/secas)	$\leq 0{,}05\,\%$ $\leq 0{,}15\,\%$ $\leq 0{,}40\,\%$	–	Limites conforme classe de agressividade ambiental de acordo com a NBR 6118:2023.
Europa	EN 206:2013 e A2:2021	CP CA	$\leq 0{,}10 - 0{,}20\,\%$ $\leq 0{,}20 - 0{,}40\,\%$	–	Dependem da classe de exposição.
Suíça	*fib Bulletin* 34 (FSC, 2006)	CP	$\leq 0{,}20\,\%$	–	Limite único para estruturas protendidas.
Espanha	EHE-08 (CPH, 2011)	CA CP CP	$\leq 0{,}60\,\%$ $\leq 0{,}30\,\%$ $\leq 0{,}10\,\%$	Cloretos totais (% massa de cimento)	Ambientes marinhos e urbanos.
China	Hong Kong Building Depart. (HKBD, 2016)	CA (cimento resistente a sulfato) CA (cimento Portland rápido)	$\leq 0{,}20\,\%$ $\leq 0{,}35\,\%$	–	Variável conforme tipo de cimento.
EUA	ACI 318-19 (ACI, 2019)	Concreto com cloretos ambiente normal ambiente seco	$\leq 0{,}15\,\%$ $\leq 0{,}30\,\%$ $\leq 1{,}00\,\%$	–	Limites diferenciados por ambiente e tipo estrutural.
EUA	ACI 318-19 (ACI, 2019)	Concreto com cloretos ambiente normal ambiente seco	$\leq 0{,}15\,\%$ $\leq 0{,}30\,\%$ $\leq 1{,}00\,\%$	–	Limites diferenciados por ambiente e tipo estrutural.
	ACI Committee 222 (ACI, 2002)	CP CA úmido CA seco	$\leq 0{,}08\,\%^{1} \leq 0{,}06\,\%^{2}$ $\leq 0{,}10\,\%^{1} \leq 0{,}08\,\%^{2}$ $\leq 0{,}20\,\%^{1} \leq 0{,}15\,\%^{2}$	[1] Totais [2] Livres (% massa de cimento)	Diferencia limites por condição úmida/seca e tipo de cloreto.
Inglaterra	BS 8110-1 (BSI, 1997)	CA / CP	$\leq 0{,}10\,\%$	Cloretos totais (% massa de cimento)	Valor único de referência.
Nova Zelândia	NZS 3101 (NZS, 2006)	CP CA úmido CA seco	$\leq 0{,}02\,\%$ $\leq 0{,}03\,\%$ $\leq 0{,}07\,\%$	Cloretos totais (% massa de concreto)	Expressa limites em relação à massa total de concreto.
Japão	JSCE-15 (JSCE, 2010)	Geral	$\leq 1{,}20\ \mathrm{kg/m^3}$	Cloretos totais (% massa de concreto)	Limite absoluto por volume de concreto.

Fonte: Adaptado pela autora a partir de Figueiredo (2005), Meira (2017), ACI (2002, 2008), ABNT (2015), EN 206-1 (2000), fib (2006), CPH (2011), HKBD (2016), BSI (1997), NZS (2006), JSCE (2010).

Além das propriedades intrínsecas do concreto, fatores externos e a origem dos cloretos também influenciam de forma decisiva o início da corrosão. Os cloretos podem estar presentes internamente, oriundos de materiais contaminados, como água de amassamento ou agregados (Magalhães, 2018), ou podem penetrar a partir do ambiente externo. No caso dos cloretos externos, a geometria da peça exerce papel importante, pois regiões de canto ou arestas podem ficar expostas ao ingresso a partir de múltiplas direções, como ilustrado na figuras 2.14 e 2.15. Além disso, ciclos de molhagem e secagem tendem a concentrar cloretos próximos à superfície. Em situações nas quais há ação simultânea de carbonatação e cloretos, o teor crítico necessário para a despassivação pode tornar-se extremamente baixo (Poulsen e Mejlbro, 2005).



Figura 2.14: Corrosão na laje.
Fonte: Poulsen e Mejlbro (2005).

Para descrever a evolução da deterioração por corrosão, a engenharia recorre a modelos de vida útil. A abordagem clássica proposta por Tuutti (1982) divide o processo em duas fases principais, conforme ilustrado na figura 2.16:

1. **Período de iniciação:** corresponde ao tempo que os agentes agressivos (como os cloretos) levam para penetrar através do cobrimento do concreto e alcançar a superfície da armadura em concentração suficiente para quebrar a camada passiva. Durante esta fase, não há dano aparente na estrutura.
2. **Período de propagação:** inicia-se após a despassivação da armadura. Nesta fase, a corrosão está ativa e o dano começa a se manifestar (manchas, fissuras, desplacamento), progredindo até que a estrutura atinja um estado limite de serviço ou segurança.

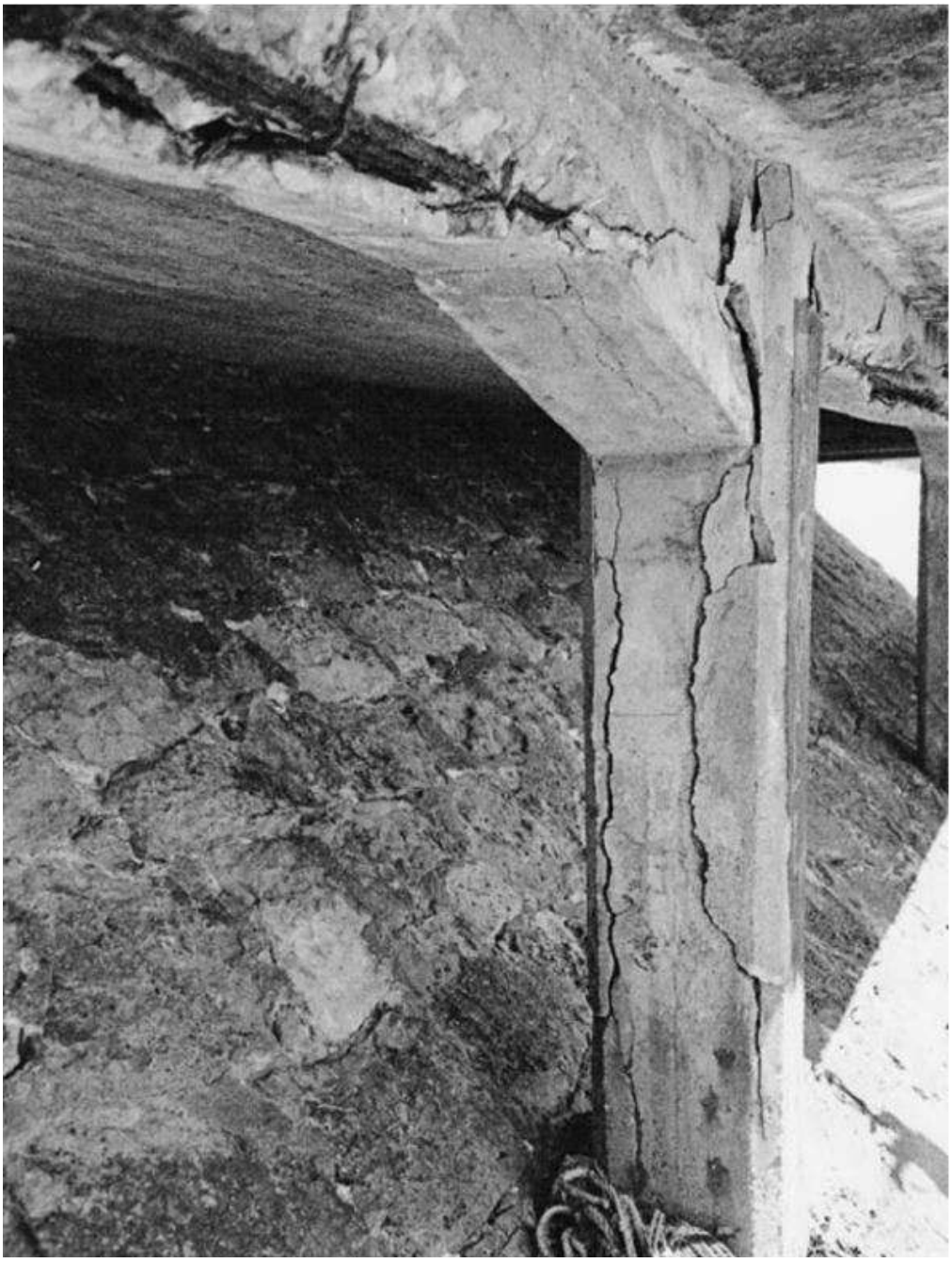


Figura 2.15: Fissuras em um cais.
Fonte: Poulsen e Mejlbro (2005).

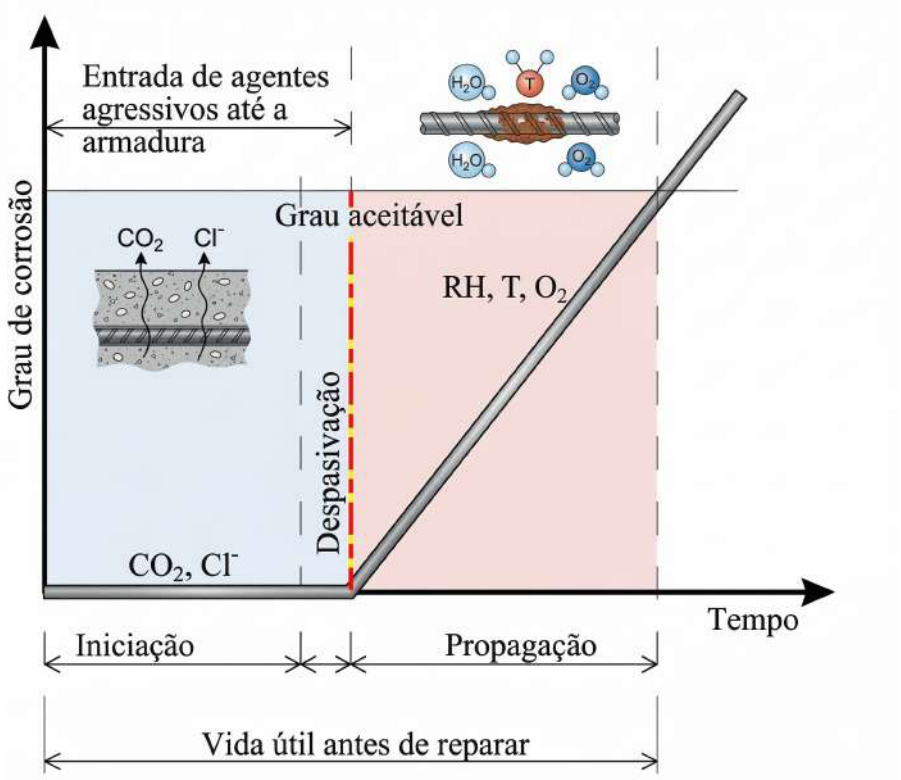


Figura 2.16: Modelo de vida útil proposto por Tuutti.
Fonte: Sistematizada pela autora, a partir de Tuutti (1982) e Meira (2017).

Com base nesse modelo clássico, autores como Helene (1993) e Meira (2017) refinaram a conceituação da vida útil, distinguindo diferentes estágios do desempenho estrutural ao longo do tempo (figura 2.17):

- **Vida útil de projeto:** corresponde, em geral, ao período de iniciação, isto é, o tempo até o início da corrosão. É o período em que a estrutura deve se manter sem danos significativos.
- **Vida útil de serviço:** período que se estende até o surgimento das primeiras manifestações patológicas visíveis, como fissuração, descamação e delaminação (figura 2.18), quando intervenções de manutenção se tornam necessárias.
- **Vida útil total:** intervalo de tempo em que ocorre redução significativa da seção da armadura e/ou perda de aderência, podendo levar à ruptura parcial ou total da estrutura.
- **Vida útil residual:** período em que a estrutura será capaz de funcionar após vistoria e/ou intervenção.

No contexto desta dissertação, a corrosão induzida por cloretos é adotada como o principal mecanismo de deterioração de interesse, uma vez que ela controla a fase de iniciação da corrosão em ambientes marinhos e fundamenta tanto a interpretação dos ensaios experimentais quanto a modelagem probabilística de vida útil apresentada nas seções posteriores.

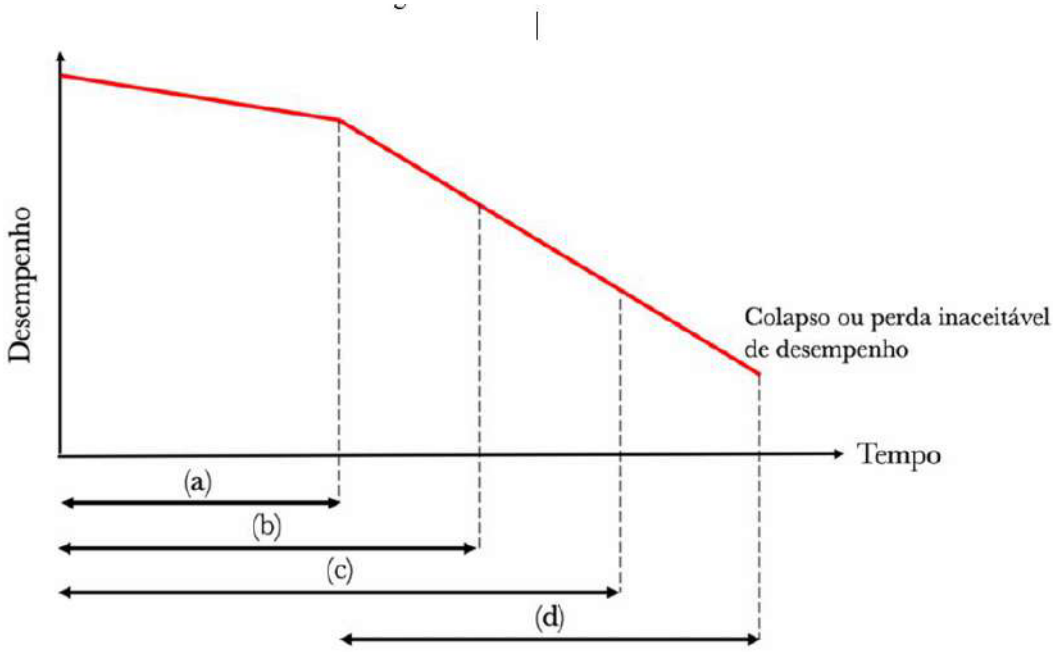


Figura 2.17: Estágios de vida útil de estruturas de concreto.
Fonte: Helene (1993).

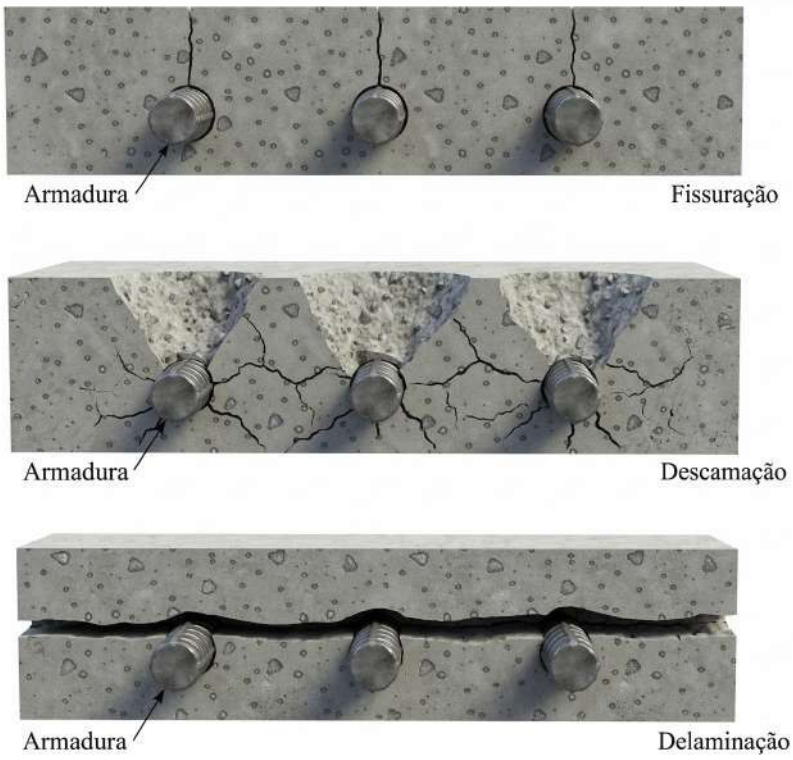


Figura 2.18: Deteriorações induzidas pela corrosão.
Fonte: Neville (2016).

2.2.3 Mecanismos de transporte de cloretos

O ingresso de íons cloreto no concreto está diretamente associado à natureza porosa e heterogênea da matriz cimentícia. Embora o concreto apresente aparência maciça em escala macroscópica, sua microestrutura é formada por uma rede de poros e microfissuras que pode permitir a entrada e o transporte de água e de espécies iônicas agressivas para o interior do material.

A velocidade e a predominância de cada mecanismo de transporte dependem de diversos fatores, entre os quais se destacam a relação água/aglomerante, o grau de hidratação da pasta, a qualidade da zona de transição interfacial (ZTI), a conectividade da rede porosa e o grau de saturação do concreto (*Zhang & Zhang*, 2014 apud IBRACON e ALCONPAT, 2020). Em termos gerais, os cloretos podem penetrar no concreto por meio de diferentes mecanismos, entre os quais se destacam a permeabilidade, a absorção capilar, a difusão, a migração iônica e a convecção. A compreensão desses processos é fundamental para interpretar o desempenho de concretos expostos a ambientes marinhos e para justificar a escolha dos ensaios adotados nesta dissertação.

Permeabilidade

A permeabilidade corresponde ao transporte de um fluido através do concreto sob ação de um gradiente de pressão hidráulica. Esse mecanismo pode representar uma via relevante para a entrada de cloretos, especialmente em regiões fissuradas ou em concretos com elevada conectividade porosa (Poulsen e Mejlbro, 2005). A facilidade com que esse fluxo ocorre depende, em grande medida, da continuidade da rede de poros da pasta cimentícia.

Essa conectividade depende diretamente da relação a/agl e, crucialmente, do grau de hidratação do cimento (IBRACON e ALCONPAT, 2020). À medida que a hidratação avança, a permeabilidade da pasta de cimento é drasticamente reduzida. A evolução é notável: Helene (1993) demonstra que uma pasta com 28 dias de cura pode ser até um milhão de vezes menos permeável do que a mesma pasta com apenas um dia, evidenciando o impacto da cura na durabilidade.

Contudo, quando os agregados são adicionados para formar o concreto, a permeabilidade do compósito tende a aumentar em relação à da pasta pura. Isso ocorre devido à formação da ZTI ao redor dos agregados, uma região de microestrutura mais frágil e porosa. A tabela 2.6 relaciona valores de permeabilidade à água com a qualidade do concreto.

Absorção capilar

A absorção capilar corresponde ao ingresso de água no concreto sob ação de gradientes de umidade e das forças capilares desenvolvidas no interior dos poros. Trata-se de um mecanismo particularmente importante em concretos parcialmente saturados, nos quais a sucção capilar favorece a entrada de soluções agressivas pela superfície exposta (IBRACON e ALCONPAT, 2020).

Tabela 2.6: Relação dos valores de permeabilidade à água com a qualidade do concreto.

Permeabilidade (m/s)	Permeabilidade	Qualidade
$< 10^{-12}$	Baixa	Boa
10^{-12} a 10^{-10}	Média	Média
$> 10^{-10}$	Alta	Pobre

Fonte: Sistematizado pela autora, a partir de CEB (1989).

Esse fenômeno decorre da interação entre a água e as superfícies internas dos poros capilares. A figura 2.19 ilustra essa interação em escala microscópica, evidenciando a adesão das moléculas de água às paredes dos poros (Bertolini, 2010). A intensidade da sucção capilar depende fortemente do tamanho e da distribuição dos poros: quanto menores os poros, maior tende a ser a força capilar associada ao transporte do fluido.

A condensação capilar também desempenha papel importante nesse contexto. Como indicado na figura 2.20, poros mais finos podem permanecer preenchidos por água mesmo em condições de umidade relativa inferiores à saturação completa. Após o endurecimento do material cimentício, coexistem regiões com poros saturados, películas de água adsorvida e volumes contendo vapor e ar aprisionado, conforme representado na figura 2.21 (*Stanish et al.*, 2000 apud IBRACON e ALCONPAT, 2020). Em termos práticos, esse mecanismo é crítico porque permite o ingresso de água contaminada com cloretos a partir da superfície exposta ou do solo, transportando agentes agressivos para o interior da estrutura.

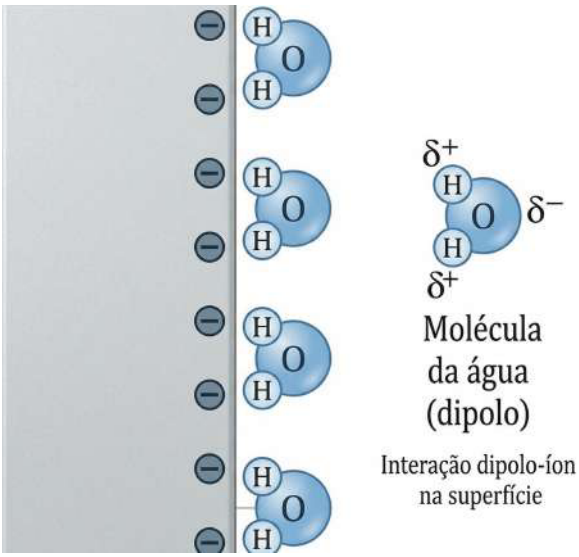


Figura 2.19: Interação das moléculas de água e a superfície dos poros.

Fonte: Sistematizado pela autora, a partir de Bertolini (2010).

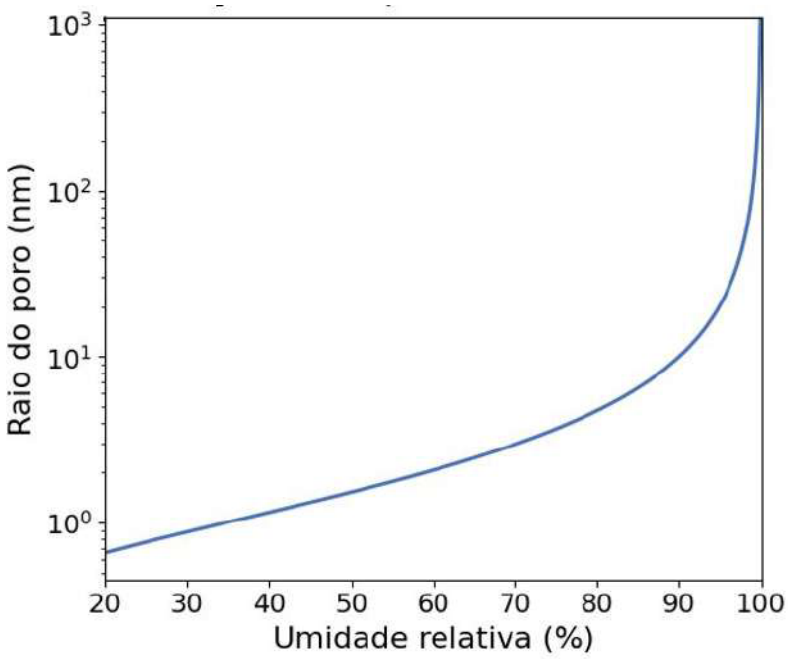


Figura 2.20: Raio dos poros em função da umidade relativa do ar.

Fonte: Sistematizado pela autora.

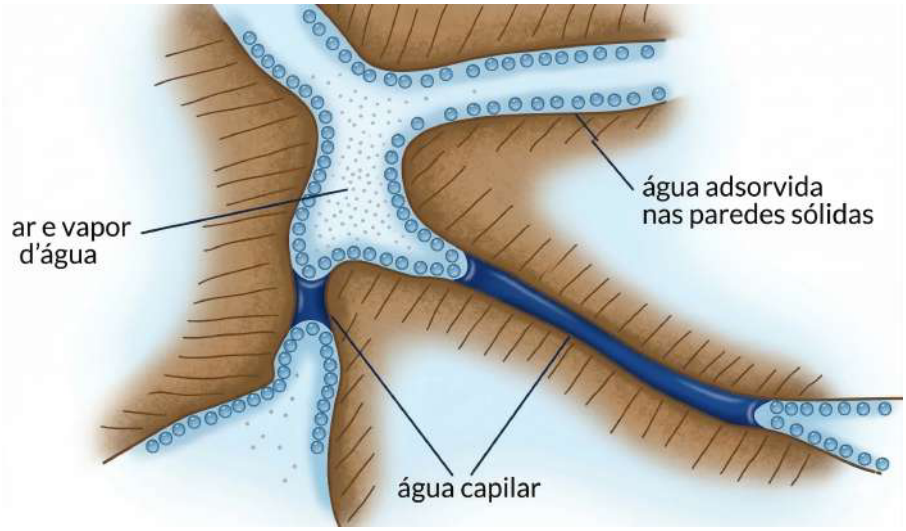


Figura 2.21: Representação da porosidade capilar do concreto.

Fonte: Sistematizado pela autora, a partir de Fusco, 2008 apud IBRACON e ALCONPAT, 2020.

Migração iônica

A migração iônica é definida como o movimento de íons impulsionado por um gradiente de potencial elétrico. Nesse processo, os íons se deslocam em resposta a um gradiente de potencial elétrico, o que pode acelerar o transporte de cloretos em determinadas condições de exposição. Esse mecanismo é relevante em estruturas sujeitas a correntes elétricas dispersas, como túneis de metrô, onde a migração dos íons pode acelerar a corrosão das armaduras ao direcioná-los para as zonas anódicas (Poulsen e Mejlbro, 2005).

O fluxo total de uma espécie iônica pode ser descrito pela equação de Nernst–Planck, que contempla as contribuições de difusão, migração elétrica e convecção (Poulsen e Mejlbro, 2005 e IBRACON e ALCONPAT, 2020):

$$\mathbf{J}_i(x) = -D_i \frac{\partial C_i(x)}{\partial x} - \frac{z_i F}{RT} D_i C_i(x) \frac{\partial E(x)}{\partial x} + C_i(x)\,\mathbf{V}(x), \tag{2.1}$$

em que $\mathbf{J}_i$ é o fluxo da espécie iônica i; D_i é o coeficiente de difusão da espécie i; $C_i(x)$ é a concentração da espécie i em função da profundidade x; z_i é a valência da espécie i; F é a constante de Faraday; R é a constante universal dos gases; T é a temperatura absoluta (K); $E(x)$ é o potencial elétrico em função de x; e $\mathbf{V}(x)$ é o campo de velocidade de convecção (advecção).

A equação (2.1) pode ser interpretada como:

$$\text{Fluxo total} = \text{difusão} + \text{migração elétrica} + \text{convecção}. \tag{2.2}$$

Com o objetivo de acelerar a determinação de parâmetros de transporte iônico em materiais cimentícios, Andrade (1993) desenvolveram métodos baseados na aplicação de elevada diferença de potencial elétrico (DDP). De acordo com Andrade (1993), quando a DDP é suficientemente elevada (tipicamente entre 10 e 15 V), a contribuição da difusão pode ser considerada desprezível. Além disso, ao assumir a ausência de gradientes de pressão e umidade, a parcela convectiva é eliminada. Dessa forma, a equação de Nernst–Planck pode ser simplificada para:

$$\mathbf{J}_i(x) = -\frac{z_i F}{RT} D_i C_i(x) \frac{\partial E(x)}{\partial x}. \tag{2.3}$$

Difusão iônica

A difusão é caracterizada pelo movimento de íons impulsionado por um gradiente de concentração, descrevendo o deslocamento de partículas de regiões de maior para menor concentração, em direção ao equilíbrio. Este é um processo natural e espontâneo, que ocorre independentemente de fluxos de água ou intervenções externas (Poulsen e Mejlbro, 2005 e IBRACON e ALCONPAT, 2020). Em concreto, trata-se do principal mecanismo de ingresso de cloretos em estruturas saturadas ou submersas.

Matematicamente, a difusão é descrita pelas Leis de Fick. A Primeira Lei de Fick (estado estacionário) é dada por:

$$J = -D_s \frac{\partial C}{\partial x}, \tag{2.4}$$

em que J é o fluxo de cloretos e D_s é o coeficiente de difusão no estado estacionário.

A Segunda Lei de Fick (estado não estacionário), mais comum em estruturas reais, é expressa por:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{ns} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \tag{2.5}$$

em que D_{ns} é o coeficiente de difusão no estado não estacionário. Nesse regime, a concentração varia no tempo e na profundidade, e o transporte pode ocorrer simultaneamente à fixação parcial de cloretos na matriz cimentícia (IBRACON e ALCONPAT, 2020).

Uma solução analítica amplamente utilizada para a equação (2.5), assumindo meio semi-infinito e concentração superficial constante, é dada por:

$$C(x, t) = C_s \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_{ns}\, t}}\right)\right], \tag{2.6}$$

em que $C(x, t)$ é a concentração de cloretos à profundidade x no tempo t; C_s é a concentração superficial; e erf é a função erro.

O coeficiente de difusão, em especial D_{ns}, é um dos principais parâmetros usados na estimativa de vida útil de estruturas frente ao ingresso de cloretos. Sua magnitude depende de fatores como porosidade, relação água/aglomerante, composição química, umidade e temperatura (Helene, 1993 e IBRACON e ALCONPAT, 2020). Além disso, a matriz cimentícia pode reduzir o transporte efetivo de cloretos por mecanismos de fixação química, como a formação de sal de Friedel a partir de aluminatos, e por adsorção física em sua estrutura porosa (IBRACON e ALCONPAT, 2020).

Convecção

A convecção corresponde ao transporte de cloretos associado ao movimento do fluido no interior do concreto, normalmente induzido por gradientes de umidade. Diferentemente dos mecanismos puramente difusivos ou eletroquímicos, a convecção envolve o deslocamento da solução porosa e pode desempenhar papel relevante em situações nas quais há ciclos de secagem e umedecimento (Poulsen e Mejlbro, 2005). Durante esses ciclos, a água tende a migrar para regiões mais secas, promovendo a redistribuição dos íons cloreto e, em certos casos, favorecendo sua concentração em zonas próximas à superfície ou à armadura.

A interação entre a convecção e os demais mecanismos de transporte no interior da rede porosa pode ser visualizada no fluxograma apresentado na figura 2.22 (Bertolini, 2010).

Considerando o foco desta dissertação na exposição a cloretos em ambiente

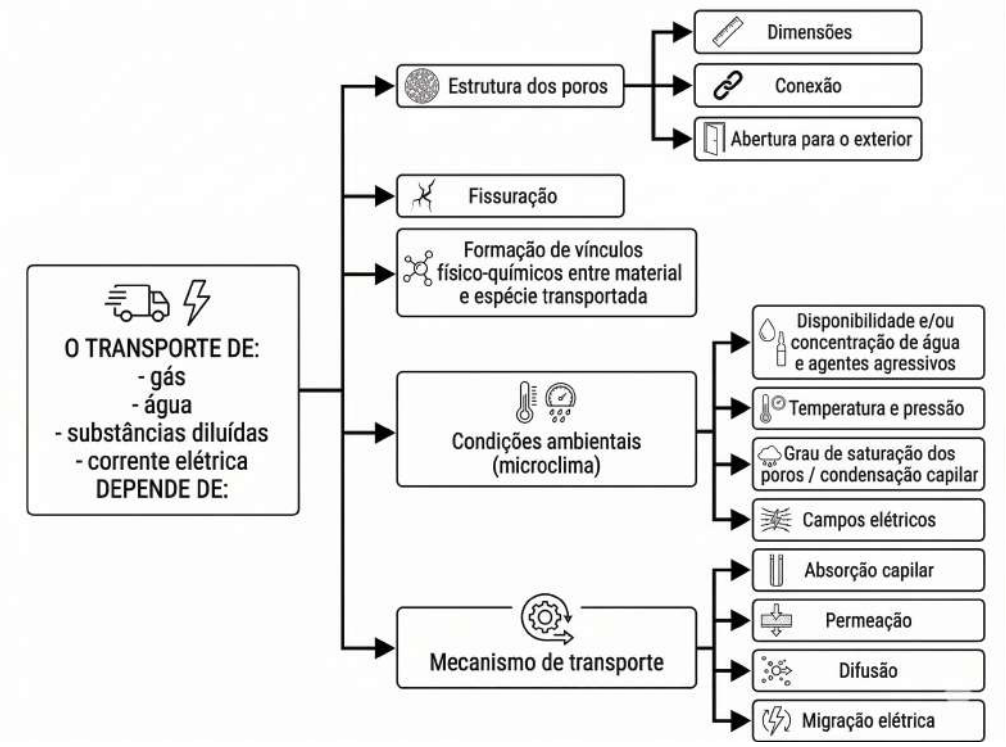


Figura 2.22: Fatores envolvidos no transporte nos poros.
Fonte: Sistematizada pela autora, a partir de Bertolini (2010).

marinho, os mecanismos de transporte mais relevantes são aqueles associados ao ingresso de água e íons pela rede porosa do concreto, em especial a absorção capilar, a difusão e a migração iônica (Ribeiro, 2018). Por essa razão, os ensaios de absorção, resistividade elétrica e migração de cloretos adotados neste estudo constituem indicadores complementares e apropriados para a avaliação do potencial de durabilidade dos concretos investigados, além de fornecerem parâmetros relevantes para a interpretação do transporte de agentes agressivos e para a modelagem probabilística desenvolvida posteriormente.

2.2.4 Influência da penetração de íons cloreto no concreto

A resistência do concreto à penetração de íons cloreto depende de um conjunto de fatores relacionados à composição da mistura, à qualidade da microestrutura formada e às condições de exposição. Trata-se, portanto, de um fenômeno multifatorial, no qual variáveis como relação água/aglomerante, tipo de ligante, uso de materiais cimentícios suplementares, qualidade da cura e características dos agregados influenciam diretamente o transporte iônico e, consequentemente, a durabilidade.

Entre esses fatores, a relação a/agl e o uso de materiais cimentícios suplementares (SCMs) assumem papel central. Reduções na relação a/agl tendem a produzir matrizes menos porosas e com menor conectividade capilar, dificultando a entrada e o transporte de cloretos (Helene, 1993 e Bertolini, 2010), como ilustra a figura 2.23.

Um exemplo dessa melhoria pode ser observado no estudo de longa duração

conduzido por Silvestro, Romano, e Dal Molin (2020), em Tramandaí/RS, no qual a combinação entre baixa relação a/agl e uso de sílica ativa resultou no melhor desempenho em termos de redução da entrada de cloretos. O impacto do uso de SCMs sobre a vida útil também é expressivo. A figura 2.24, elaborada com base em dados de Gjørv (2015) e discutida por Figueirôa (2024), evidencia que concretos produzidos com cimentos contendo elevadas proporções de escória podem apresentar vida útil substancialmente superior à de concretos com cimento Portland comum sob as mesmas condições térmicas, destacando a relevância do tipo de ligante no controle da penetração de cloretos.

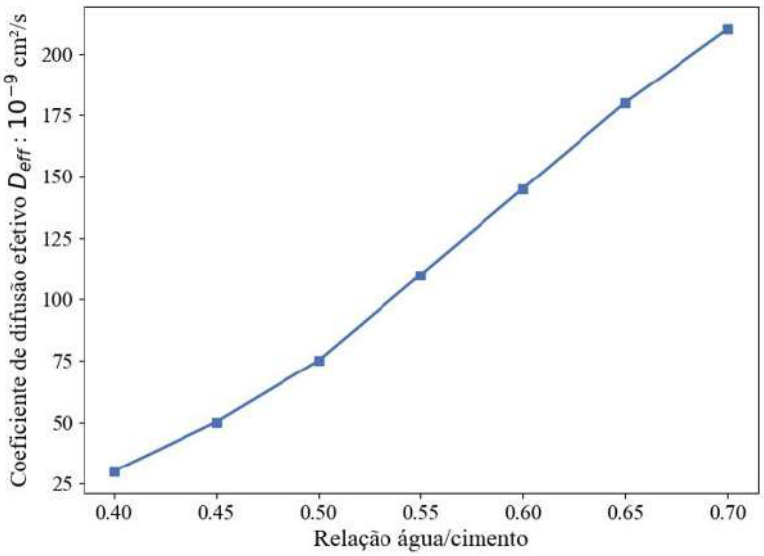


Figura 2.23: Ação da relação a/agl no coeficiente de difusão de cloretos.

Fonte: Sistematizada pela autora, a partir de Macdonald e Northwood (1995) apud Magalhães, 2018.

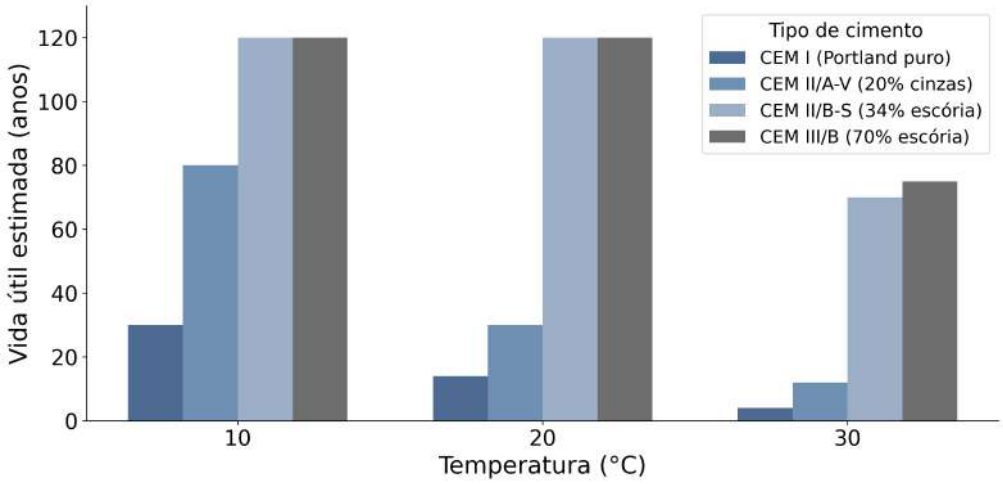


Figura 2.24: Vida útil do concreto em função da temperatura.

Fonte: Sistematizada pela autora, a partir dos dados de Gjørv, 2015 apud Figueirôa, 2024.

Para avaliar a eficácia da matriz cimentícia como barreira ao transporte iônico, a resistividade elétrica do concreto tem sido cada vez mais utilizada como indicador de durabilidade. Em termos gerais, concretos com maior resistividade tendem a oferecer maior resistência à movimentação de íons na solução dos poros, o que os torna menos suscetíveis à penetração de cloretos. Nesse contexto, Real, Bogas, e Pontes (2015) destacam que a resistência à compressão, isoladamente, não constitui um indicador adequado da resistência ao ingresso de cloretos, uma vez que concretos com elevada resistência mecânica podem ainda assim apresentar desempenho insatisfatório em termos de durabilidade. A resistividade, por sua vez, fornece leitura mais diretamente relacionada à mobilidade iônica e ao potencial de transporte de agentes agressivos.

Outros fatores também exercem influência relevante sobre o ingresso de cloretos, entre eles a qualidade dos agregados empregados. No caso de agregados reciclados, por exemplo, de Brito *et al.* (2016) observaram que a qualidade intrínseca do material pode ser mais determinante para o desempenho do concreto do que a proporção isolada de substituição. Essa observação reforça a importância de analisar a penetração de cloretos como resultado da interação entre diferentes variáveis de composição e exposição.

A relevância prática dessa abordagem integrada é evidenciada por estudos de falhas prematuras em estruturas reais. Figueirôa (2024), por exemplo, descrevem o caso de uma ponte situada em zona de respingos de maré que, associada a cobrimento insuficiente e concreto inadequado para a agressividade do ambiente, apresentou corrosão severa em apenas 13 anos. Esse exemplo ilustra os riscos decorrentes da subestimação da agressividade ambiental e da inadequada especificação do concreto para estruturas expostas a cloretos.

De modo geral, a resistência à penetração de cloretos deve ser compreendida como resultado da interação entre múltiplos fatores, incluindo composição dos materiais, relação a/agl, uso de adições minerais, condições de cura, qualidade dos agregados e condições ambientais de exposição. Essa visão integrada é sintetizada por Wally (2019) no fluxograma apresentado na figura 2.25, que evidencia o caráter multifatorial do transporte de cloretos no concreto.

Assim, no contexto desta pesquisa, a penetração de cloretos é adotada como o principal mecanismo de degradação de interesse, uma vez que ela controla a fase de iniciação da corrosão das armaduras e constitui a base tanto da avaliação experimental quanto da modelagem probabilística de vida útil desenvolvida posteriormente.

2.3 Indicadores de durabilidade e projeto por desempenho

Esta seção apresenta a lógica da abordagem com base no desempenho aplicada à durabilidade de estruturas de concreto, bem como os principais indicadores utilizados para avaliar o comportamento do material em ambientes agressivos. São discutidos conceitos normativos, parâmetros mensuráveis de durabilidade, métodos de ensaio e suas principais vantagens e limitações no contexto de concretos expostos a ambientes



Figura 2.25: Fatores que afetam a penetração de cloretos no concreto.

Fonte: Sistematizada pela autora.

marinhos.

2.3.1 Abordagem com base no desempenho

A durabilidade constitui um dos objetivos centrais do projeto de estruturas de concreto. Contudo, sua definição evoluiu ao longo do tempo, passando de uma noção essencialmente qualitativa para uma abordagem baseada em critérios mensuráveis e verificáveis (Cascudo, 2015). Normas como a NBR 15575 definem durabilidade como a capacidade da estrutura de cumprir suas funções ao longo de um determinado período, sob condições previstas de uso e manutenção (*ABNT* 2013). Essa definição evidencia a distinção entre Vida Útil de Projeto (VUP), correspondente ao período previsto em projeto, e Vida Útil (VU) efetiva, que depende também de fatores como manutenção, execução e agressividade real do ambiente.

Tradicionalmente, a engenharia tem recorrido à abordagem prescritiva para tentar assegurar a durabilidade das estruturas. Nesse modelo, normas como a NBR 6118 e a NBR 12655 estabelecem requisitos mínimos para os materiais e para o detalhamento da estrutura, incluindo limites para relação água/aglomerante, teores de cloretos, cobrimento nominal e classe do concreto (ABNT, 2015a, 2023). A premissa subjacente é que o atendimento a esses requisitos conduz, de forma indireta, ao desempenho esperado em serviço. Entretanto, esse método não mede diretamente a capacidade real do concreto de resistir aos mecanismos de degradação, assumindo tal desempenho a partir de prescrições gerais. Em ambientes severos, essa simplificação pode ser insuficiente, como ilustrado pelo estudo de caso descrito por Figueirôa (2024), no qual uma ponte em zona de maré apresentou degradação severa em apenas 13 anos, apesar de atender aos critérios normativos vigentes à época.

Como alternativa à rigidez da abordagem prescritiva, destaca-se a abordagem com base no desempenho. Nessa filosofia, define-se inicialmente o nível de desempenho requerido para a estrutura — por exemplo, limitar a penetração de cloretos ao longo de uma determinada vida útil — e, a partir disso, utilizam-se ensaios, indicadores e modelos para verificar se a solução proposta atende a esse requisito (Beushausen *et al.*, 2016). Essa abordagem, ilustrada na figura 2.26, permite maior flexibilidade na escolha de materiais, favorece a incorporação de soluções inovadoras e possibilita uma estimativa mais realista da vida útil, uma vez que se baseia em propriedades efetivamente mensuráveis do concreto.

Um exemplo representativo dessa abordagem é apresentado por Moro, Keßler, e Torrent (2025), que propuseram um fluxograma de decisão para seleção de concretos simultaneamente duráveis e sustentáveis. Ao analisar vinte formulações, os autores mostraram que a resistência à penetração de cloretos foi mais sensível à composição da mistura, especialmente ao uso de cimentos com escória, do que à variação isolada da espessura de cobrimento. Esse resultado reforça a limitação de abordagens estritamente prescritivas e evidencia o potencial da abordagem por desempenho para evitar tanto soluções insuficientes quanto superdimensionamentos desnecessários, conciliando vida útil e impacto ambiental.

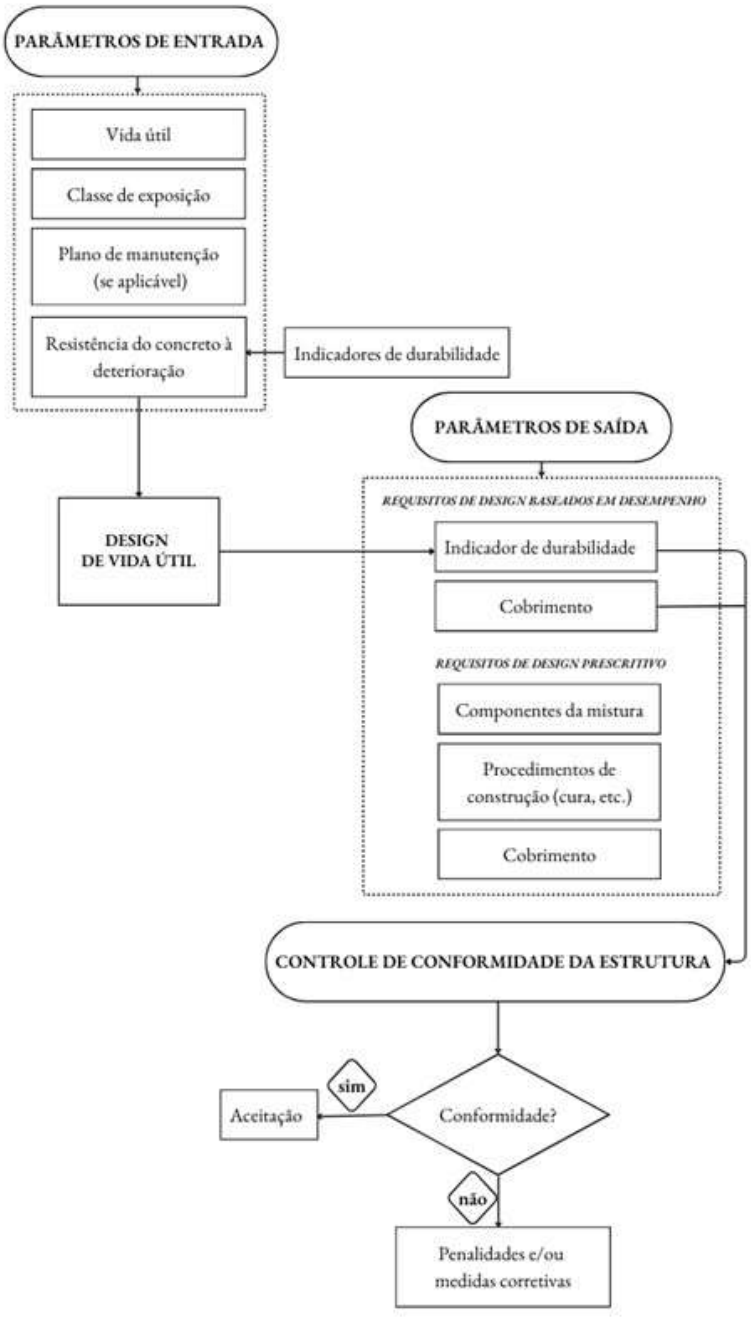


Figura 2.26: Projeto baseado em desempenho.

Fonte: Sistematizada pela autora, a partir de Beushausen *et al.*, 2016.

2.3.2 Indicadores de durabilidade

A abordagem com base no desempenho depende da utilização de indicadores de durabilidade, isto é, propriedades mensuráveis do concreto capazes de refletir sua resistência aos mecanismos de degradação ao longo do tempo. Esses indicadores fornecem uma base quantitativa para avaliação do material, superando a lógica exclusivamente prescritiva (Beushausen *et al.*, 2016).

Nesse contexto, é importante distinguir entre potencial de durabilidade e desempenho real em serviço. O potencial de durabilidade corresponde ao comportamento máximo esperado do material, geralmente determinado em laboratório sob condições controladas de produção e cura. O desempenho real, por sua vez, depende também das condições de execução, manutenção e exposição ambiental às quais a estrutura estará submetida ao longo de sua vida útil.

A literatura destaca diversos parâmetros como indicadores-chave de durabilidade. No caso do ataque por cloretos, o coeficiente de difusão ou migração de cloretos assume papel central. Outro indicador fundamental é a resistividade elétrica, por sua relação com a mobilidade iônica e com o risco de corrosão. Também são amplamente utilizados parâmetros como resistência à carbonatação, absorção capilar e resistência a ciclos de gelo–degelo e ao ataque por sulfatos, todos associados, em diferentes graus, à qualidade da microestrutura e à durabilidade do concreto (Wally, 2019).

Como a obtenção desses indicadores em condições naturais de exposição demanda longos períodos de observação, a engenharia utiliza amplamente métodos de ensaio acelerados. Ensaios como os de migração iônica permitem estimar, em escala de dias ou semanas, propriedades que em campo estariam associadas a processos de longa duração, fornecendo dados úteis para modelos de previsão de vida útil (Wally, Magalhães, e Silva Filho, 2020).

Um exemplo prático é o estudo de Sell Junior *et al.* (2021), no qual diferentes ensaios acelerados, como NT Build 492 (NORDTEST, 1999), UNE 83987 (UNE, 2012) e ASTM C1556 (ASTM, 2022b), foram utilizados para avaliar a eficácia da sílica ativa na redução da difusão de cloretos. Os autores destacam, contudo, que um bom desempenho em um único indicador de durabilidade não deve ser interpretado como justificativa para flexibilizar outros parâmetros de projeto, como a espessura de cobrimento. A durabilidade depende da ação conjunta de múltiplos mecanismos de proteção e, portanto, requer avaliação integrada.

No contexto desta dissertação, a abordagem com base no desempenho é particularmente relevante porque permite interpretar os concretos estudados não apenas a partir de prescrições normativas, mas com base em indicadores mensuráveis de durabilidade, como absorção capilar, resistividade elétrica e migração de cloretos. Esses parâmetros formam a base experimental para a análise comparativa dos traços e para a modelagem probabilística de vida útil desenvolvida posteriormente.

2.3.3 Modelagem matemática e probabilística para projetos de durabilidade

A previsão da vida útil de estruturas de concreto expostas a ambientes agressivos depende da utilização de modelos matemáticos capazes de representar, ainda que de forma simplificada, os mecanismos de deterioração ao longo do tempo. De modo geral, esses modelos podem ser classificados em três abordagens principais: determinística, probabilística e semiprobabilística (Dal Molin *et al.*, 2016).

A abordagem determinística constitui o ponto de partida clássico. Nela, os parâmetros de entrada são representados por valores únicos, geralmente médios, e o resultado obtido é uma única estimativa de vida útil. Modelos baseados nessa lógica, como o de Collepardi, Marcialis, e Turriziani (1970), são amplamente utilizados por sua simplicidade e facilidade de aplicação. Contudo, sua principal limitação consiste em desconsiderar a variabilidade inerente aos materiais, à execução e às condições ambientais, o que reduz sua capacidade de representar o comportamento real das estruturas (Gjørv, 2015 e Figueirôa, 2024).

Em contraste, a abordagem probabilística busca incorporar explicitamente essas incertezas. Em vez de tratar os parâmetros de entrada como valores fixos, essa abordagem os representa por distribuições estatísticas, permitindo estimar não apenas uma vida útil média, mas a probabilidade de falha ao longo do tempo. Essa perspectiva é mais compatível com as exigências contemporâneas de segurança, confiabilidade e durabilidade (Pugliese e Di Sarno, 2022 e Moreira *et al.*, 2024). Ainda assim, sua aplicação depende da disponibilidade de bases de dados consistentes para caracterização estatística dos parâmetros envolvidos, o que ainda representa uma limitação prática relevante (Magalhães, 2018).

A revisão sistemática conduzida por Lopes, Oliveira, e Cascudo (2022) oferece um panorama representativo do estado da arte da modelagem da penetração de cloretos. Ao analisar 40 modelos relevantes, os autores os classificaram quanto à abordagem adotada (determinística, probabilística ou semiprobabilística) e quanto à sua natureza (empírica, analítica ou numérica), como sintetizado na figura 2.27. A maior parte dos modelos identificados baseia-se, de algum modo, na Segunda Lei de Fick, frequentemente com adaptações para incorporar variáveis dependentes do tempo, como a evolução do coeficiente de difusão $D(t)$ e da concentração superficial de cloretos $C_s(t)$, parâmetros importantes para simulações mais realistas.

A figura 2.28 apresenta os modelos mais recorrentes na literatura, evidenciando aqueles mais consolidados na comunidade científica. Muitos desses desenvolvimentos procuram superar limitações de formulações clássicas, incluindo modelos derivados de iniciativas amplamente difundidas, como o DuraCrete e as recomendações da *fib* (Gjørv, 2015).

De forma complementar, Magalhães (2018) sistematizam diferentes modelos matemáticos voltados à previsão do início da corrosão induzida por cloretos, conforme apresentado na figura 2.29. No contexto desta dissertação, a modelagem probabilística é particularmente adequada por permitir incorporar a variabilidade dos parâmetros de entrada associados ao transporte de cloretos, ao cobrimento, à concentração superficial

e às condições ambientais. Essa abordagem é especialmente relevante em concretos com materiais reciclados, cuja heterogeneidade tende a ser superior à dos concretos convencionais.

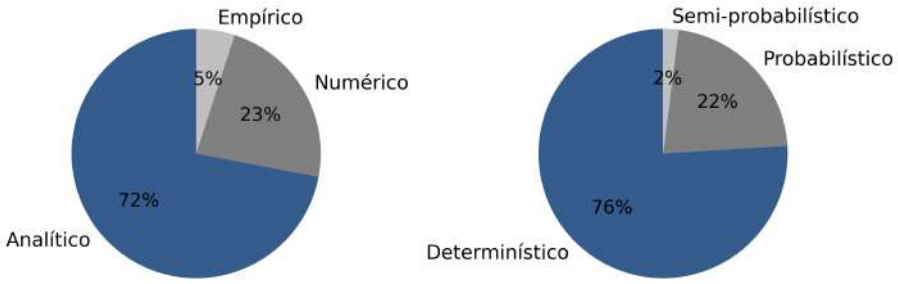


Figura 2.27: Porcentagens da classificação dos modelos.

Fonte: Sistematizada pela autora, a partir de Lopes, Oliveira, e Cascudo (2022).

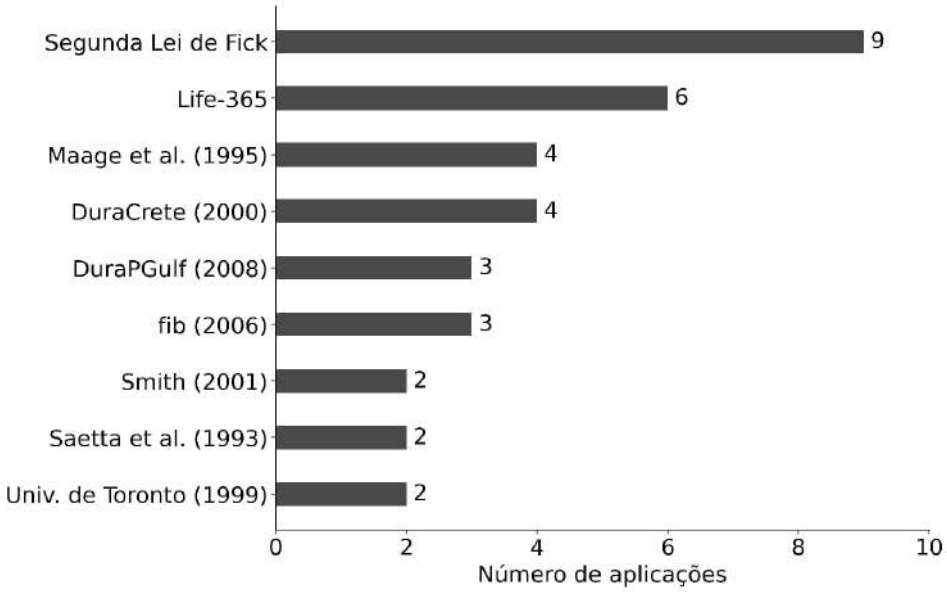


Figura 2.28: Modelos mais citados.

Fonte: Sistematizada pela autora, a partir dos dados de Lopes, Oliveira, e Cascudo (2022).

2.3.4 Conceito de vida útil característica

Na abordagem probabilística, a vida útil de uma estrutura não é tratada como valor único e fixo, mas como uma variável aleatória. Isso decorre do fato de que os parâmetros que controlam a deterioração — como difusividade, cobrimento, concentração superficial de cloretos e teor crítico — apresentam variabilidade intrínseca, refletindo incertezas associadas aos materiais, à execução e às condições de exposição (Magalhães, 2018).

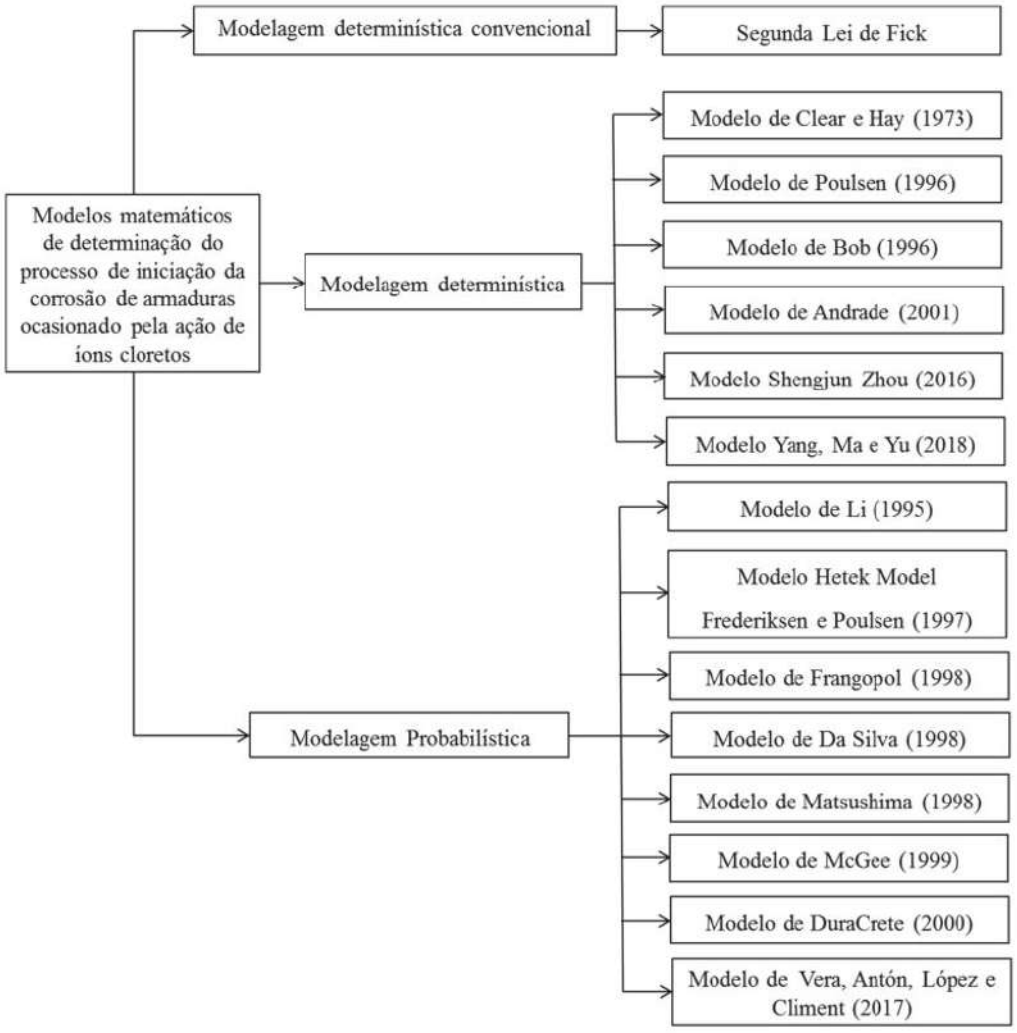


Figura 2.29: Modelos matemáticos de determinação de iniciação da corrosão pela ação de íons cloreto.

Fonte: Magalhães (2018).

Para lidar com essa variabilidade, a engenharia de durabilidade recorre ao conceito de valor característico. De modo análogo ao uso da resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}), a vida útil característica (t_k) representa o tempo associado a uma probabilidade de falha previamente admissível. Em outras palavras, trata-se do período para o qual apenas uma pequena parcela de falhas é estatisticamente admitida.

A figura 2.30 ilustra a distinção entre a vida útil média ($t_{médio}$) e a vida útil característica (t_k), esta última adotada como referência mais conservadora para o projeto. A figura 2.31 complementa essa interpretação ao mostrar, para diferentes probabilidades de falha admissíveis, a idade em que a concentração de cloretos na profundidade da armadura atinge o teor crítico. Assim, t_k passa a representar o valor característico de vida útil correspondente ao nível de risco previamente aceito em projeto (Magalhães, 2018).

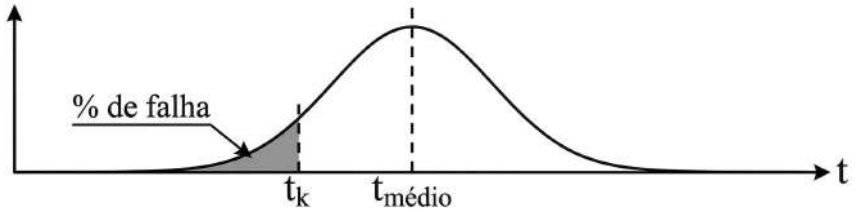


Figura 2.30: Função densidade de probabilidade da vida útil e vida útil característica.

Fonte: Sistematizada pela autora, a partir de Magalhães (2018).

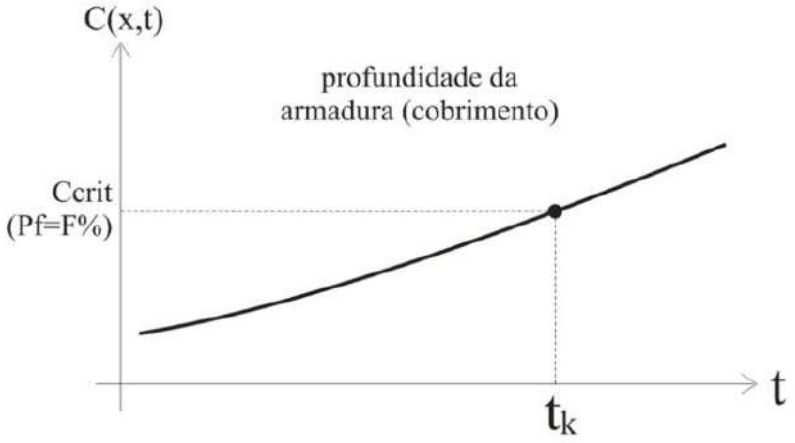


Figura 2.31: Concentração de cloretos na profundidade da armadura em função da idade a partir da qual uma probabilidade pré-estabelecida de falha é admitida.

Fonte: Magalhães (2018).

A definição do estado limite associado à falha é central nessa interpretação. A NBR 6118, em consonância com normas internacionais como a EN 1990 (CEN, 2002), distingue dois níveis principais: o Estado Limite de Serviço (ELS), relacionado ao desempenho da estrutura em condições normais de uso, e o Estado Limite Último

(ELU), associado à segurança estrutural frente a ações extremas (ABNT, 2023). No contexto da durabilidade por corrosão, Lorensini (2006) associam o ELS ao início da fissuração do cobrimento, enquanto o ELU está ligado à perda significativa de seção da armadura, com comprometimento da segurança.

Um exemplo prático discutido por Dal Molin *et al.* (2016) ilustra a relevância da variabilidade dos parâmetros de projeto. Para uma estrutura com vida útil de projeto de 50 anos, a abordagem determinística indicou a necessidade de um concreto com resistência de 40 MPa e cobrimento de 40 mm. Entretanto, ao considerar a variabilidade do cobrimento, o mesmo estudo mostrou que uma diferença de apenas 10 mm nessa espessura poderia deslocar a previsão de vida útil para um intervalo entre 26 e 82 anos. Esse resultado evidencia a sensibilidade do desempenho à variabilidade de execução e reforça a necessidade de análises probabilísticas para incorporar o risco desde a fase de projeto.

O término da vida útil de serviço não deve ser entendido como um evento único, mas como parte de uma sequência progressiva de deterioração. Lorensini (2006) e Magalhães (2018) descrevem esse processo por meio de um modelo em seis fases (figura 2.32), no qual a entrada de cloretos conduz ao início da corrosão, seguida do surgimento de fissuras, evolução dessas fissuras e posterior desplacamento do cobrimento. Esse encadeamento detalha, em termos práticos, os eventos que compõem o período de propagação do modelo clássico de Tuutti.

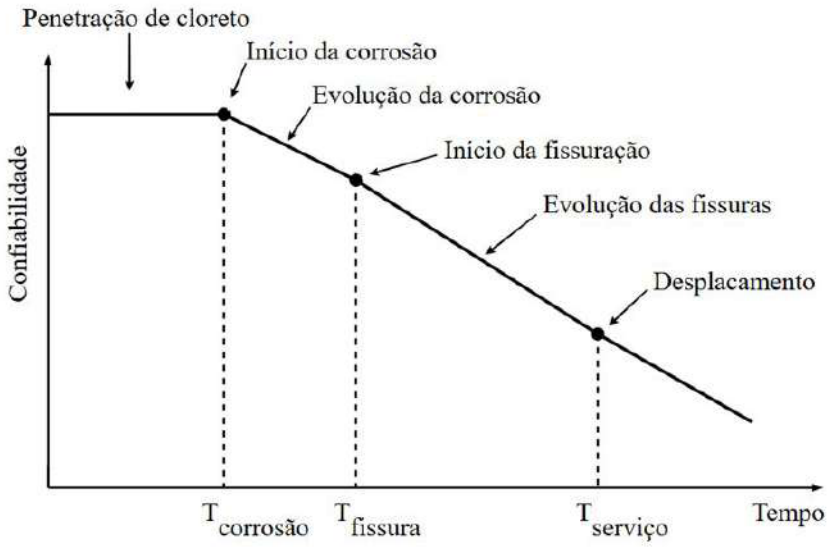


Figura 2.32: Perfil de confiabilidade.

Fonte: Sistematizada pela autora, a partir de Thoft-Christensen (2001).

No presente trabalho, a vida útil característica é associada à fase de iniciação da corrosão induzida por cloretos, adotando-se um critério probabilístico para o atingimento do teor crítico na profundidade da armadura. Essa definição é coerente com o enfoque do modelo empregado e com a lógica de projeto baseada no desempenho

adotada ao longo da dissertação.

2.3.5 Confiabilidade estrutural

A abordagem probabilística aplicada à durabilidade está fundamentada no conceito de confiabilidade estrutural, entendido como o uso de métodos probabilísticos para quantificar a segurança e o desempenho de um sistema frente às incertezas que afetam seu comportamento ao longo do tempo (Magalhães, 2014). Em termos gerais, a confiabilidade pode ser interpretada como a probabilidade de a estrutura satisfazer os requisitos de desempenho estabelecidos, isto é, de não atingir um estado de falha durante sua vida útil.

A necessidade dessa abordagem decorre do reconhecimento de que os sistemas de engenharia estão sujeitos a diferentes fontes de incerteza, relacionadas aos materiais, às ações, aos modelos de cálculo, às condições ambientais, à execução e até a fatores humanos (Beck, 2019). A tabela 2.7 apresenta os principais tipos de incerteza considerados em análises de confiabilidade.

Tabela 2.7: Tipos de incertezas na análise estrutural.

Tipo de incerteza	**Descrição**
Decisão	Avaliação sobre se um determinado estado limite foi atingido, sendo responsável por determinar a ocorrência ou não do fenômeno analisado.
Fenomenológica	Eventos imprevistos ou não quantificados corretamente.
Modelo	Limitações do modelo matemático ao representar o fenômeno real.
Previsão	Incerteza associada à estimativa de um estado futuro do elemento estrutural, considerando o tempo como variável de influência.
Física	Corresponde à variabilidade natural dos materiais, das dimensões dos componentes e das ações aplicadas.
Fatores humanos	Erros de projeto, execução ou uso.
Estatística	Incertezas na estimativa das distribuições de probabilidade das variáveis.

Fonte: Sistematizada pela autora, a partir de Melchers e Beck (2018).

O problema fundamental da confiabilidade estrutural pode ser formulado a partir da comparação entre a resistência do sistema (R) e a solicitação ou demanda atuante (S). Em termos conceituais, a estrutura permanece em condição segura enquanto sua resistência superar a solicitação, isto é, enquanto houver margem de segurança positiva.

De acordo com Beck (2019), essa condição pode ser expressa por meio da variável margem de segurança M, definida por:

$$M = R - S \tag{2.7}$$

A falha ocorre quando $M \leq 0$. Como R e S estão sujeitos a incertezas, a própria margem de segurança também deve ser tratada como variável aleatória. Nesse caso, a

probabilidade de falha (P_f) corresponde à probabilidade de a margem de segurança assumir valores menores ou iguais a zero, conforme:

$$P_f = P(M \leq 0) = \int_{-\infty}^{0} f_M(m)\, dm = F_M(0) \tag{2.8}$$

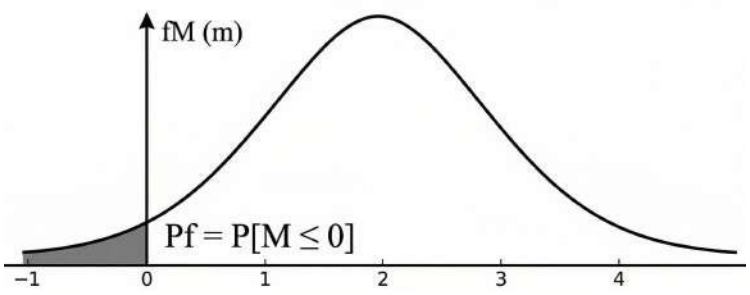


Figura 2.33: P_f em função da margem de segurança.
Fonte: Sistematizada pela autora.

Determinação do índice de confiabilidade (β)

Para quantificar a segurança de forma padronizada, utiliza-se o índice de confiabilidade, representado por β. Esse parâmetro expressa a distância, em número de desvios padrão, entre o valor médio da margem de segurança e o ponto de falha ($M = 0$). A figura 2.34 ilustra geometricamente esse conceito.

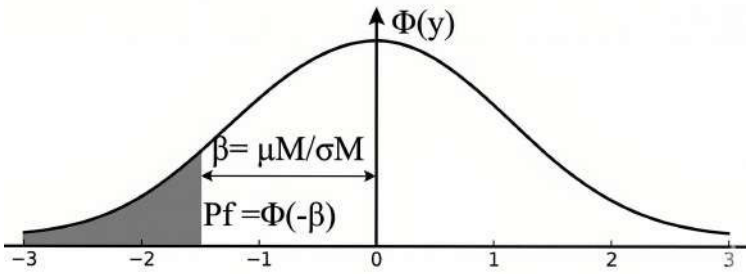


Figura 2.34: P_f em termos da variável normal padrão Y.
Fonte: Sistematizada pela autora.

Valores mais elevados de β estão associados a menores probabilidades de falha e, portanto, a níveis mais altos de segurança. Assumindo que R e S sigam distribuições normais, o índice β, originalmente formulado por Cornell (1969), pode ser obtido a partir dos parâmetros estatísticos da margem de segurança. Seus parâmetros, o valor médio (μ_M) e o desvio padrão (σ_M), podem ser determinados por:

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

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

em que μ_M é o valor esperado da função margem de segurança; μ_R é o valor médio da resistência; μ_S é o valor médio das solicitações; σ_M é o desvio padrão de M; σ_R é o desvio padrão de R; e σ_S é o desvio padrão de S.

Para utilizar as tabelas de probabilidade, a variável M é transformada em uma variável normal padrão Y (com média zero e desvio padrão um), conforme:

$$Y = \frac{M - \mu_M}{\sigma_M} \tag{2.11}$$

O Índice de Confiabilidade (β) corresponde à distância, em número de desvios padrão, entre o ponto médio da margem de segurança e o ponto de falha ($M = 0$). É definido por:

$$\beta = \frac{\mu_M}{\sigma_M} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \tag{2.12}$$

A partir do índice β, a probabilidade de falha (P_f) pode ser calculada diretamente usando a função de distribuição acumulada da normal padrão (Φ), conforme:

$$P_f = \Phi\left(-\frac{\mu_M}{\sigma_M}\right) = \Phi(-\beta) \tag{2.13}$$

A figura 2.35 ilustra a relação direta entre β e P_f, evidenciando como pequenos aumentos no índice de confiabilidade representam reduções exponenciais na probabilidade de falha, o que é de extrema relevância para a análise de segurança (Magalhães, 2018).

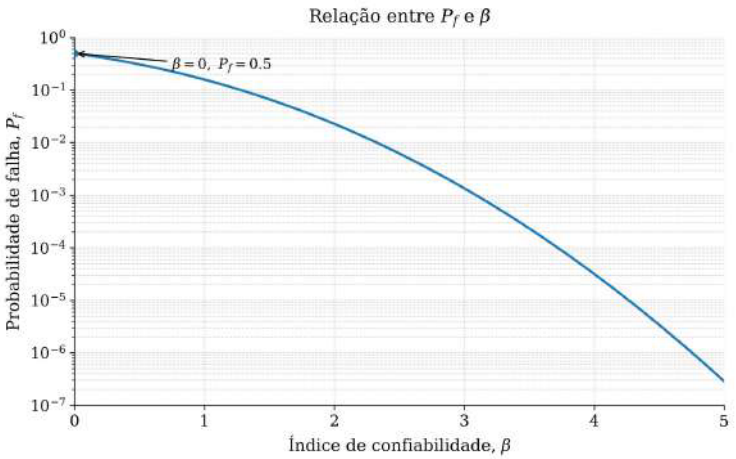


Figura 2.35: Relação entre P_f e β.

Fonte: Sistematizada pela autora.

No contexto da durabilidade, a análise de confiabilidade incorpora explicitamente a dependência temporal dos parâmetros envolvidos. Em estruturas sujeitas ao ingresso de cloretos, a resistência $R(x, t)$ pode ser interpretada como a capacidade do concreto de retardar a chegada dos cloretos à profundidade da armadura, enquanto a solicitação $S(t)$ representa a ação progressiva do ambiente agressivo ao longo do tempo.

À medida que a penetração de cloretos avança, a margem de segurança tende a se reduzir, assim como o índice de confiabilidade β, conforme esquematizado na figura 2.36. Nesse contexto, o fim da vida útil é associado ao instante em que a confiabilidade atinge um nível mínimo admissível.

Essa interpretação possui desdobramentos práticos na literatura técnica e nos códigos de projeto. Gjørv (2015), por exemplo, sugerem uma probabilidade de falha máxima admissível de 10% como referência geral para o início da corrosão. De forma complementar, normas como a EN 1990 (CEN, 2002) estabelecem valores-alvo para o índice de confiabilidade β, variáveis conforme o estado limite considerado e o horizonte de vida útil de projeto, como indicado na tabela 2.8.

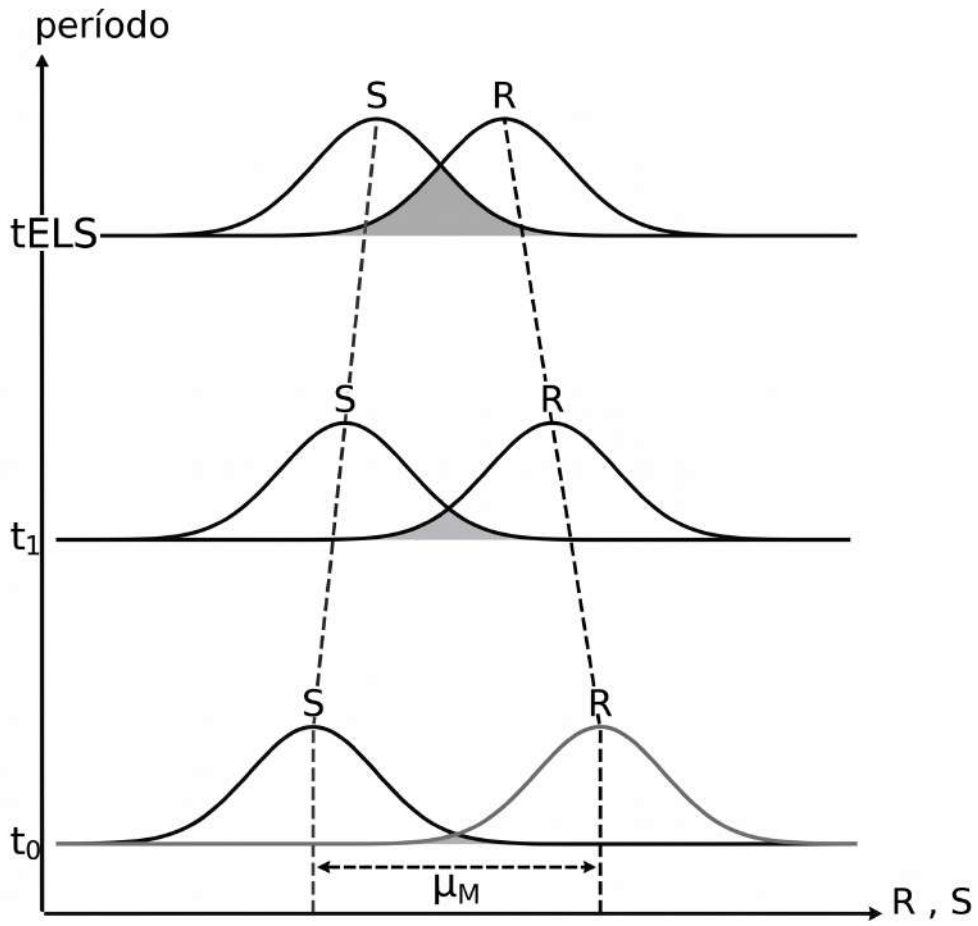


Figura 2.36: β com variáveis dependentes do tempo.
Fonte: Sistematizada pela autora, a partir de Gjørv (2015).

De forma complementar, normas como a EN 1990 (CEN, 2002) estabelecem valores alvo para o índice de confiabilidade (β) que a estrutura deve atender, como os apresentados na tabela 2.8, que variam conforme o estado limite e a vida útil de projeto.

Tabela 2.8: Índice de confiabilidade conforme a idade da estrutura.

Estado limite	1 ano	50 anos
Último (ELU)	4,7	3,8
De serviço (ELS)	2,9	1,5

Fonte: EN 1990 (CEN, 2002).

No presente trabalho, a análise de confiabilidade é aplicada ao problema da iniciação da corrosão induzida por cloretos, de modo que a probabilidade de falha e o índice de confiabilidade passam a ser interpretados em função da chance de o teor crítico ser atingido na profundidade da armadura ao longo do tempo.

2.3.6 Probabilidade de falha

Para estimar a probabilidade de falha P_f e, consequentemente, o índice de confiabilidade (β) de uma estrutura, é necessário compreender as características das variáveis envolvidas. A engenharia utiliza métodos computacionais avançados, entre os quais se destacam a Simulação de Monte Carlo e o Método de Confiabilidade de Primeira Ordem (FORM).

Método de simulação de Monte Carlo

A simulação de Monte Carlo é um método numérico de natureza probabilística amplamente utilizado para estimar a probabilidade de falha de sistemas sujeitos a múltiplas variáveis aleatórias. Em essência, o método consiste em gerar um grande número de realizações aleatórias das variáveis de entrada com base em suas distribuições de probabilidade e, para cada uma delas, avaliar a condição de falha ou segurança do sistema (Rubinstein, 1981 e Rubinstein e Kroese, 2008).

Ao final do processo, a probabilidade de falha é estimada pela razão entre o número de simulações em que a condição de falha é satisfeita e o número total de simulações realizadas (figura 2.37). Em problemas de engenharia, essa abordagem é particularmente útil para avaliar sistemas complexos, nos quais as incertezas dos parâmetros de entrada exercem influência significativa sobre a resposta final (Ang e Tang, 1975).

O método se baseia na construção de um modelo analítico ou computacional capaz de representar o comportamento do sistema sob análise, incorporando uma ou mais variáveis aleatórias. A repetição de grande número de simulações permite obter uma distribuição de respostas, posteriormente tratada por técnicas estatísticas (Real, 2000).

Existe uma relação entre o número de simulações necessárias para uma representação mais precisa do fenômeno analisado por meio da Simulação de Monte Carlo e a probabilidade de falha considerada admissível. A equação (2.14) apresenta essa

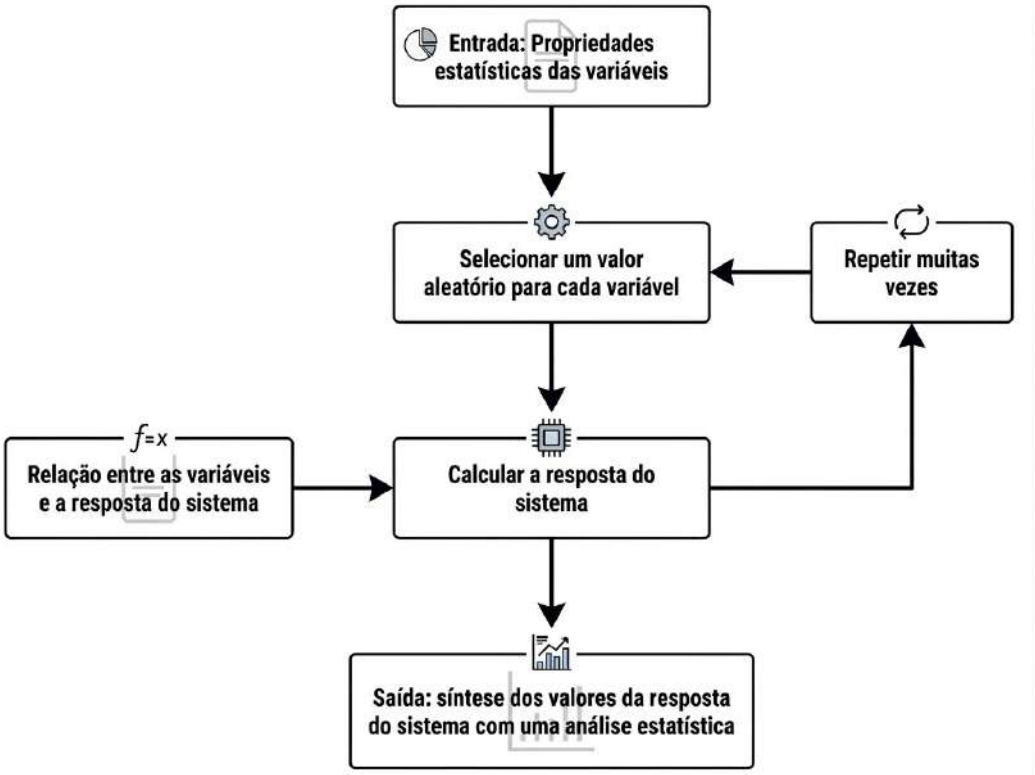


Figura 2.37: Funcionamento do método de Monte Carlo.
Fonte: Sistematizada pela autora, a partir de Grant et al. (1978) apud Real (2000).

relação (Haldar e Mahadevan, 2000):

$$\varepsilon_{\%} = \sqrt{\frac{1 - P_f}{N\,P_f}} \times 200 \tag{2.14}$$

em que $\varepsilon_{\%}$ é o percentual de erro admitido; P_f é a probabilidade de falha; e N é o número de simulações.

Amostragem por importância no método de simulação de Monte Carlo

Entre as estratégias utilizadas para aumentar a eficiência da simulação de Monte Carlo, destaca-se a amostragem por importância. Nessa técnica, as amostras não são geradas de forma uniforme em todo o domínio probabilístico, mas concentradas em regiões mais relevantes para a ocorrência da falha, reduzindo o número de simulações pouco informativas (Beck, 2019). Essa abordagem pode diminuir a variância dos resultados e tornar a estimativa da probabilidade de falha mais eficiente, desde que a função de amostragem seja adequadamente escolhida.

Do ponto de vista matemático, a técnica baseia-se na substituição da densidade original do problema por uma densidade auxiliar de amostragem, com posterior correção por pesos estatísticos. A figura 2.38 ilustra essa lógica de concentração das amostras em regiões mais prováveis de falha. Segundo Magalhães (2018), os valores

médios das variáveis de importância podem ser associados ao ponto mais provável de falha obtido pelo método FORM.

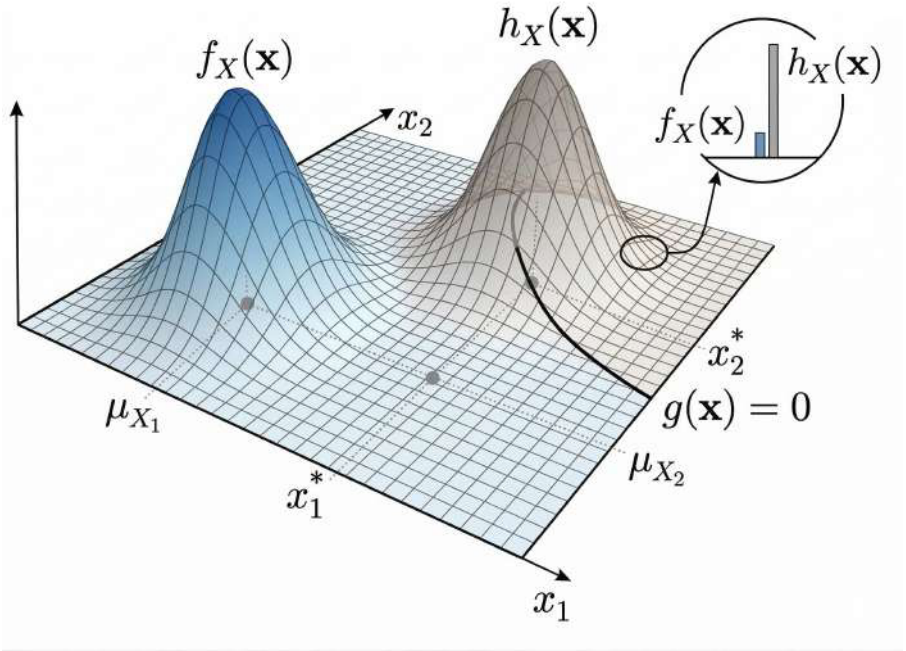


Figura 2.38: Amostragem por importância usando o ponto de projeto.
Fonte: Sistematizada pela autora, a partir de Beck (2019).

Método de confiabilidade de primeira ordem (FORM)

O método de confiabilidade de primeira ordem (FORM, *First Order Reliability Method*) constitui uma alternativa semiprobabilística para estimar a probabilidade de falha e o índice de confiabilidade. Diferentemente da simulação de Monte Carlo, que depende de grande número de amostras aleatórias, o FORM busca identificar diretamente o ponto mais provável de falha no espaço das variáveis normalizadas, denominado ponto de projeto (Magalhães, 2014 e Beck, 2019).

Nesse método, a condição de falha é expressa por meio de uma função de desempenho $g(\mathbf{X})$, cuja superfície $g(\mathbf{X}) = 0$ separa os domínios de segurança e de falha. O índice de confiabilidade β corresponde à menor distância entre a origem do espaço normal padrão e essa superfície, conforme ilustrado nas figuras 2.39 e 2.40. Além de estimar a confiabilidade, o FORM também permite identificar a contribuição relativa das variáveis de entrada por meio dos cossenos diretores α, o que o torna útil para análises de sensibilidade.

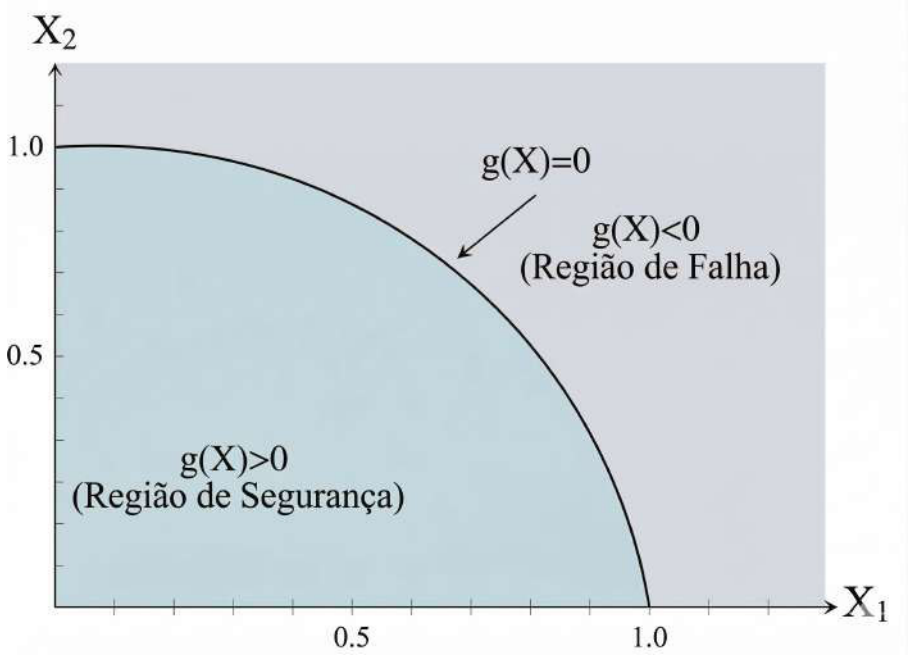


Figura 2.39: Representação gráfica da função de desempenho.
Fonte: Sistematizada pela autora, a partir de Magalhães (2014).

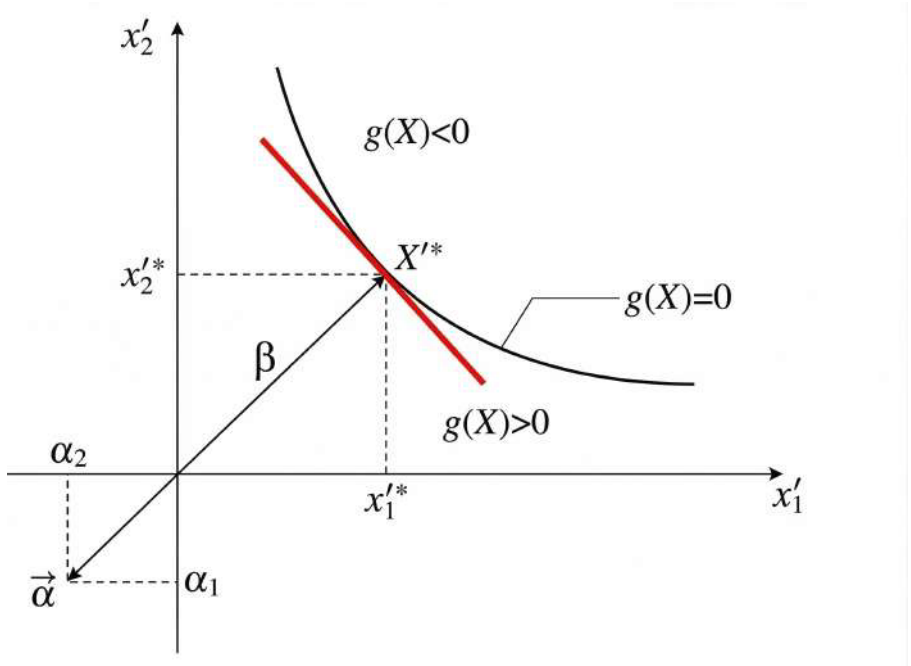


Figura 2.40: Representação gráfica do método FORM
Fonte: Sistematizada pela autora, a partir de Sagrilo (1994).

2.3.7 Modelo DURACON

O DURACON é um modelo matemático de base probabilística voltado à estimativa da vida útil de estruturas de concreto em relação ao início da corrosão induzida por íons cloreto. Sua formulação combina uma solução analítica baseada no transporte de cloretos com técnicas de simulação probabilística, permitindo incorporar explicitamente a variabilidade de parâmetros como concentração superficial de cloretos, espessura de cobrimento, coeficiente de difusão e teor crítico de cloretos. O modelo consolidou-se como uma das abordagens práticas mais reconhecidas para avaliação de durabilidade em estruturas expostas a ambientes agressivos, especialmente em obras marítimas e portuárias (DURACRETE Project, 1999 e Gjørv, 2015).

O projeto DURACON foi iniciado em 2000 no âmbito do Programa Ibero-americano de Ciência e Tecnologia para o Desenvolvimento (CYTED), com o objetivo de relacionar a durabilidade de diferentes concretos às condições climáticas predominantes em países ibero-americanos (CYTED, 1998). A iniciativa envolveu a exposição de corpos de prova armados e não armados a atmosferas marinhas e urbanas em diferentes países, com monitoramento do desempenho ao longo do tempo e comparação com estruturas reais, permitindo a construção de uma base experimental para calibração e validação de modelos de previsão de vida útil.

A validação e aplicação deste tipo de abordagem não é apenas teórica. No Brasil, a participação no projeto incluiu quatro estações de envelhecimento natural, entre elas uma localizada em Rio Grande/RS. Em paralelo, desenvolveu-se a rede DURAR (Rede Brasileira de Estações de Envelhecimento Natural), voltada ao monitoramento do efeito do clima brasileiro sobre a deterioração de materiais e elementos construtivos. Esses programas contribuíram para a obtenção de dados experimentais relevantes para a validação de modelos de durabilidade e para o avanço da pesquisa nacional na área (Dal Molin *et al.*, 2016).

Do ponto de vista conceitual, o DURACON combina a formulação analítica clássica do transporte de cloretos com a simulação de Monte Carlo, permitindo tratar a vida útil não como um valor único, mas como uma variável associada a uma probabilidade de falha. Essa abordagem probabilística utiliza indicadores diretamente relacionados aos mecanismos de transporte no concreto e aos processos de degradação, favorecendo avaliações mais realistas do desempenho ao longo do tempo (Gjørv, 2015 e Dal Molin *et al.*, 2016).

A base científica do DURACON está associada à Segunda Lei de Fick, aplicada à penetração de cloretos em concretos expostos a ambientes agressivos. A formulação original, proposta por Collepardi, Marcialis, e Turriziani (1970, 1972), foi posteriormente refinada por autores como Takewaka e Matsumoto (1988) e Tang e Gulikers (2007), que incorporaram a dependência temporal do coeficiente de difusão. No DURACON, essa formulação é ampliada para considerar também a influência da temperatura, tornando a análise mais compatível com condições reais de exposição.

Assim, a concentração de cloretos na profundidade da armadura pode ser estimada por:

$$C(x,t) = C_s \left[1 - \text{erf}\left(\frac{x_c}{2\sqrt{D(t)\,t}}\right)\right] \tag{2.15}$$

em que $C(x, t)$ é a concentração de cloretos à profundidade x após um tempo t (%); C_s é a concentração superficial de cloretos (%); erf é a função erro de Gauss; x_c é a profundidade (mm); $D(t)$ é o coeficiente de difusão aparente (mm^2/ano); e t é o tempo (anos).

O coeficiente de difusão de cloretos no concreto é dependente do tempo e pode ser obtido por:

$$D(t) = \frac{D_0}{1-\alpha}\left[\left(1+\frac{t'}{t}\right)^{1-\alpha} - \left(\frac{t'}{t}\right)^{1-\alpha}\right]\left(\frac{t_0}{t}\right)^{\alpha} k_e \tag{2.16}$$

em que D_0 é o coeficiente de difusão determinado no tempo de referência; t' é a idade do concreto quando exposto aos íons; α é o fator de envelhecimento do concreto; e k_e introduz a influência da temperatura no processo de difusão.

O parâmetro k_e é obtido por:

$$k_e = \exp\left[\frac{E_A}{R}\left(\frac{1}{293} - \frac{1}{273+T}\right)\right] \tag{2.17}$$

em que exp é a função exponencial; E_A é a energia de ativação da difusão de cloretos; R é a constante universal dos gases; e T é a temperatura (°C).

Com base nisso, a falha ocorre quando a concentração de cloretos na profundidade da armadura ultrapassa o teor crítico de cloretos, C_{cr}. A função de estado limite é:

$$g(x,t) = C_{cr} - C(x,t) \tag{2.18}$$

ou seja, quando $g(x, t) > 0$, a estrutura está segura quanto ao estado limite de despassivação; por outro lado, quando $g(x, t) \leq 0$, a estrutura atingiu o estado limite de despassivação, caracterizando uma situação de falha.

Nesse caso, a probabilidade de falha do sistema pode ser expressa como:

$$p_f = P\Big(C(x,t) \geq C_{cr}\Big) \tag{2.19}$$

Para resolver a função de estado limite considerando as incertezas associadas aos parâmetros de entrada, o DURACON emprega a simulação de Monte Carlo. O procedimento consiste em gerar repetidas realizações aleatórias para variáveis como C_s, D_0, x_c e C_{cr}, de acordo com suas distribuições de probabilidade. Como resultado, obtém-se não uma única previsão de vida útil, mas a evolução da probabilidade de falha da estrutura ao longo do tempo, definida pela condição $g(x, t) \leq 0$.

No contexto desta dissertação, o DURACON é adotado como ferramenta de modelagem probabilística da fase de iniciação da corrosão, permitindo integrar os re-

sultados experimentais obtidos para os concretos estudados aos parâmetros de entrada do modelo e avaliar o efeito de diferentes cenários de exposição.

2.3.8 Fator de envelhecimento

A resistência do concreto à penetração de cloretos não permanece constante ao longo do tempo. À medida que as reações de hidratação e, quando presentes, as reações pozolânicas evoluem, ocorre refinamento progressivo da microestrutura, com redução da porosidade e da permeabilidade. Esse comportamento é quantificado pelo fator de envelhecimento (*aging factor*), usualmente representado por m ou α, parâmetro empírico que descreve a taxa de redução do coeficiente de difusão de cloretos ao longo do tempo.

O conceito de fator de envelhecimento é componente central de modelos modernos de previsão de vida útil, como os recomendados pela *fib* (FIB, 2006). Sua formulação geral pode ser expressa pela equação (2.20):

$$D_{\text{nssm}}(t) = D_{\text{nssm,ref}} \left(\frac{t_{\text{ref}}}{t} \right)^{\alpha} \tag{2.20}$$

em que $D_{\text{nssm}}(t)$ é o coeficiente de difusão de cloretos no tempo t; $D_{\text{nssm,ref}}$ é o coeficiente de difusão de cloretos em um tempo de referência t_{ref}; e α é o fator (expoente) de envelhecimento.

Valores mais elevados de α indicam redução mais rápida da difusividade ao longo do tempo e, consequentemente, maior potencial de aumento da vida útil. Esse parâmetro é fortemente influenciado pelo tipo de aglomerante. Concretos contendo adições minerais, como cinza volante e escória de alto-forno, tendem a apresentar valores de α superiores aos de concretos produzidos apenas com cimento Portland, devido à continuidade das reações pozolânicas e ao consequente refinamento da rede porosa (Papadakis, 2000).

Embora o conceito de fator de envelhecimento esteja bem estabelecido para concretos convencionais, sua aplicação direta a concretos com agregados reciclados (AR) permanece incerta. A presença de argamassa antiga aderida ao agregado e a formação de múltiplas zonas de transição interfacial conferem ao concreto reciclado uma microestrutura mais complexa que a do concreto convencional. Essa condição pode alterar a evolução da rede porosa e a cinética das reações de hidratação tardias, influenciando o valor do fator de envelhecimento. Além disso, a maior absorção de água dos agregados reciclados pode favorecer mecanismos de cura interna, modificando a evolução temporal da difusividade.

Nesse contexto, a adoção de valores genéricos de α, como os recomendados no *fib Bulletin* 34 para concretos convencionais, pode conduzir a previsões imprecisas de vida útil quando se trata de concretos com AR. Por essa razão, a determinação experimental do fator de envelhecimento para os concretos estudados nesta dissertação é considerada fundamental para uma avaliação mais realista da durabilidade.

Neste trabalho, a determinação do fator de envelhecimento baseou-se na meto-

dologia proposta por Tang (1996) e consolidada na norma NT BUILD 492 (NORDTEST, 1999). O coeficiente D_{nssm} foi determinado experimentalmente nas idades de 28, 56 e 180 dias para cada traço de concreto. Para o cálculo de α, a equação (2.20) foi linearizada mediante aplicação de logaritmos, resultando na equação (2.21).

$$\log\left(D_{\text{nssm}}(t)\right) = \log\left(D_{\text{nssm,ref}}\right) - \alpha \log\left(\frac{t_{\text{ref}}}{t}\right) \tag{2.21}$$

Nessa forma, a equação assume a expressão de uma relação linear do tipo $y = a + bx$, na qual α corresponde ao valor absoluto do coeficiente angular obtido por regressão linear em gráfico log–log de D_{nssm} em função do tempo. No âmbito do modelo DURACON, o fator de envelhecimento assume papel central, pois controla a evolução temporal do coeficiente de difusão e, consequentemente, influencia diretamente a estimativa probabilística da vida útil. Sua determinação experimental para os traços estudados constitui, portanto, etapa essencial desta dissertação.

3 Metodologia

Este capítulo detalha o percurso experimental desta pesquisa, cujas etapas foram estruturadas de forma sequencial, conforme ilustra o fluxograma da figura 3.1.

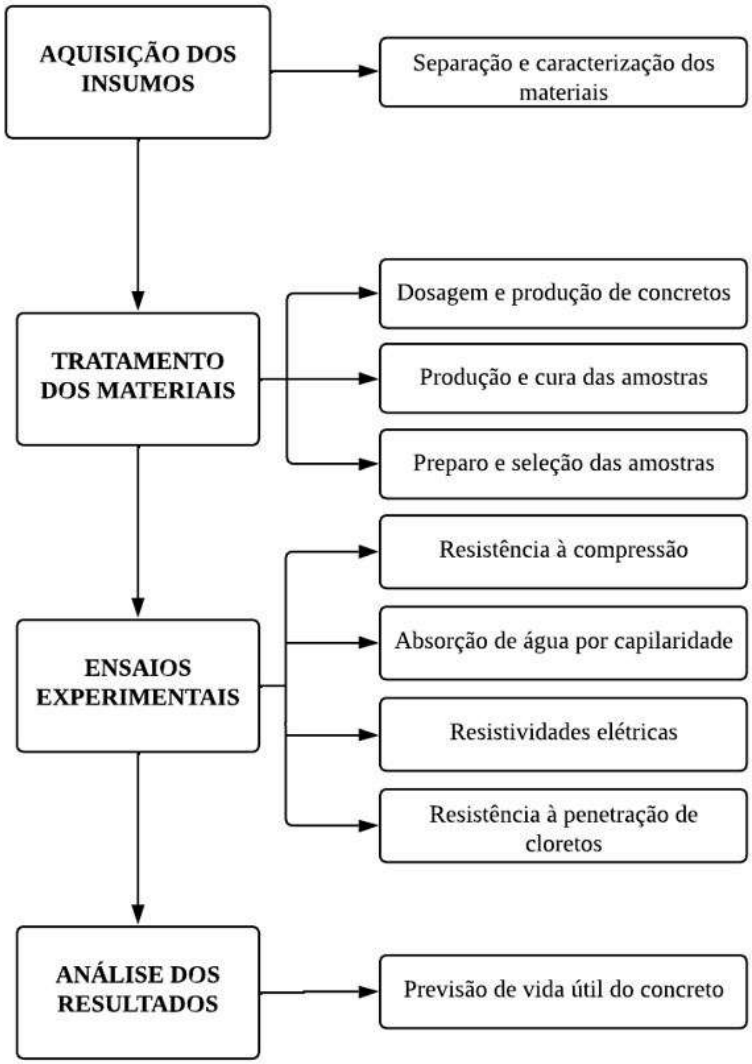


Figura 3.1: Fluxograma da proposta metodológica.

Fonte: Sistematizado pela autora.

O programa iniciou-se com a aquisição e caracterização dos insumos, seguida pelo tratamento dos materiais e pela dosagem e produção dos diferentes traços de concreto, culminando na moldagem e cura dos corpos de prova.

A terceira fase consistiu na execução dos ensaios experimentais, focados tanto na resistência à compressão quanto em indicadores de durabilidade-chave, como a absorção de água, resistividade elétrica e volumétrica, a resistência à penetração de

cloretos, bem como a determinação do coeficiente de migração de cloretos em regime não estacionário. Os valores obtidos para esse coeficiente serão utilizados como dado de entrada na etapa de análise de confiabilidade para estimar a vida útil dos concretos estudados. A quarta fase contemplará a análise de todos os resultados obtidos nos ensaios, além da previsão de vida útil do concreto.

3.1 Aquisição dos insumos

Para a realização dos ensaios experimentais necessários neste estudo, foram adquiridos insumos selecionados de acordo com os objetivos propostos.

Os agregados reciclados graúdos foram fornecidos pela empresa Soluções em Beneficiamento de Resíduos (SBR), localizada em sua filial de Canoas/RS. A SBR é uma empresa licenciada pelos órgãos ambientais federais, estaduais e municipais, incluindo o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). Além disso, a empresa possui certificação pelo Programa de Qualidade da ABRECON, o que assegura a qualidade dos produtos e serviços fornecidos.

Foi realizada uma solicitação de doação desses materiais, sendo cedidos um total de 300 kg de agregados reciclados graúdos misturados. A coleta do material foi realizada diretamente na unidade de Canoas. Esses agregados são provenientes do processamento de Resíduos da Construção e Demolição (RCD) e consistem em uma mistura de três frações distintas:

- areia reciclada, obtida a partir da fragmentação e peneiramento de resíduos cimentícios e cerâmicos;
- pedrisco reciclado, resultante do processamento de fragmentos de concreto e alvenaria;
- brita 1 reciclada, obtida a partir da trituração de blocos de concreto e outros materiais rígidos.

A cinza pesada utilizada no estudo é proveniente do Polo Petroquímico de Triunfo/RS. Os demais materiais empregados foram obtidos pelo Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção Civil (LEMCC) do Instituto Federal do Rio Grande do Sul (IFRS).

3.2 Separação e caracterização dos materiais

3.2.1 Água

A água utilizada para o amassamento dos concretos foi potável, proveniente do sistema de abastecimento público da cidade de Rio Grande/RS, fornecida pela Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN).

3.2.2 Cimento Portland

O aglomerante empregado neste estudo foi o cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI) conforme especificado pela NBR 16697 (ABNT, 2018a), equivalente ao Tipo III da C150 (ASTM, 2022a), amplamente disponível no comércio.

Diferentemente de outros tipos, o CP V-ARI é composto predominantemente por clínquer, apresentando teores mínimos de adições minerais, o que favorece análises mais controladas dos efeitos de materiais suplementares, como, neste caso, a sílica ativa. A escolha por esse tipo de cimento se deve à sua elevada pureza e à capacidade de proporcionar ganho rápido de resistência nas idades iniciais, característica particularmente vantajosa em aplicações estruturais.

As propriedades como área superficial, volume de poros e diâmetro médio das partículas do cimento Portland são apresentadas na tabela 3.1, as propriedades gerais na tabela 3.2 e a caracterização química, realizada por fluorescência de raios X (FRX), na tabela 3.3.

Tabela 3.1: Características do cimento.

Propriedades	**Cimento**
Área superficial – BET (m^2/g)	2,4053
Volume total de poros – BJH (cm^3/g)	0,01033
Tamanho médio dos poros – BJH (Å)	163,242

Fonte: Sistematizado pela autora.

Tabela 3.2: Propriedades gerais do cimento.

Propriedade	**Resultado**	**Limite NBR 16697:2018**
Massa específica (g/cm^3)	3,14	–
Finura — retido na #200 (%)	0,11	$\leq$ 10,00
Finura — retido na #325 (%)	1,63	–
Área específica Blaine (cm^2/g)	5078,00	$\geq$ 2800,00
Resistência à compressão — 1 dia (MPa)	27,00	14,00
Resistência à compressão — 3 dias (MPa)	37,00	$\geq$ 24,00
Resistência à compressão — 7 dias (MPa)	42,00	$\geq$ 35,00
Resistência à compressão — 28 dias (MPa)	48,00	$\geq$ 41,00
Teores químicos — MgO (%)	4,10	–
Teores químicos — SO_3 (%)	4,18	$\leq$ 4,00
Teores químicos — perda ao fogo (%)	4,10	$\leq$ 8,50

Fonte: Sistematizado pela autora, a partir dos dados do fabricante.

Tabela 3.3: Caracterização química do cimento (FRX).

Propriedades	Cimento (%)
SiO_2	13,86
K_2O	1,73
CaO	62,08
Fe_2O_3	3,63
MnO	0,16
MgO	7,97
Al_2O_3	5,00
TiO_2	0,36

Fonte: Sistematizado pela autora.

3.2.3 Sílica ativa

As características físicas e químicas da sílica ativa, utilizada como substituição parcial de cimento Portland na composição do concreto, são apresentadas na tabela 3.4.

Tabela 3.4: Características físicas e químicas da sílica ativa.

Propriedade	Sílica ativa
Massa específica (g/cm^3)	2,22
Superfície específica (m^2/g)	18,30
Diâmetro médio dos grãos (μm)	4,60
Teores químicos (%)	
SiO_2	88,32
K_2O	6,14
CaO	4,35
Fe_2O_3	0,68
MnO	0,39
Cu_2O	0,053
Rb_2O	0,04
SrO	0,032

Fonte: Sistematizado pela autora, a partir dos dados do fabricante.

3.2.4 Cinza de fundo

A cinza de fundo, também conhecida como cinza pesada, utilizada no estudo como substituição parcial da areia fina, é proveniente da queima de carvão mineral no Polo Petroquímico de Triunfo/RS. Para avaliar seu desempenho, foi aplicado o método de Chapelle Modificado NBR 15895 (ABNT, 2010), com o objetivo de verificar o

potencial de fixação de hidróxido de cálcio. O ensaio indicou que a cinza apresenta índice de atividade pozolânica (PAI) igual a zero. Em razão desse resultado, a cinza de fundo foi empregada nos concretos como substituto dos agregados miúdos naturais, e não como adição mineral.

A caracterização química da cinza pesada foi realizada por fluorescência de raios X (FRX), sendo os resultados apresentados na tabela 3.5. As características gerais, com resultados obtidos por meio de ensaios conforme as normas NM 248 (ABNT, 2003), NM 45 (ABNT, 2006) e NM 52(ABNT, 2009), estão na tabela 3.6. A curva granulométrica da cinza de fundo é apresentada em conjunto com a da areia fina e a da areia média na figura 3.2.

Tabela 3.5: Caracterização química da cinza de fundo (FRX).

Propriedades	**Cinza de fundo (%)**
SiO_2	60,16
K_2O	1,69
CaO	3,78
Fe_2O_3	8,13
MnO	0,08
MgO	0,59
Al_2O_3	19,16
TiO_2	1,29

Fonte: Sistematizado pela autora.

Tabela 3.6: Características da cinza de fundo.

Peneiras (mm)	**% Retido**	**% Retido acumulado**
4,75	0,00	0,00
2,36	7,64	7,64
1,18	8,51	16,15
0,60	9,38	25,52
0,30	12,68	38,20
0,15	18,45	56,66
< 0,15	43,34	100,00
Total	100,00	
Módulo de finura	1,44	
Dimensão máx. (mm)	2,36	
Massa específica (g/cm^3)	1,84	

Fonte: Sistematizado pela autora.

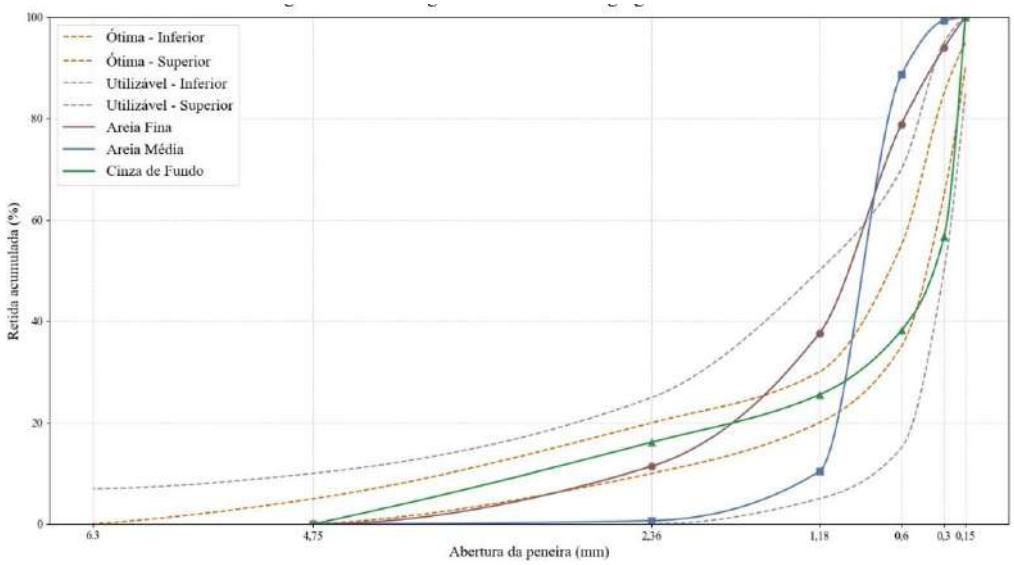


Figura 3.2: Curva granulométrica da cinza de fundo, areia fina e média.

Fonte: Sistematizado pela autora.

3.2.5 Aditivo

Recorreu-se ao uso de aditivo plastificante com alto poder de dispersão e melhora nas resistências iniciais e finais, SILICON PLAST 408 (TECNOSIL, 2022), sempre que foi necessário melhorar a trabalhabilidade do concreto. O aditivo é classificado como redutor de água tipo 1 (RA1) e atende aos requisitos da norma NBR 11768 (ABNT, 2019). As características são apresentadas na tabela 3.7.

Tabela 3.7: Características do aditivo.

Característica	**Descrição**
Aspecto físico	Líquido viscoso
Cor	Castanho escuro
Dosagem	0,4 a 1,0 %
Densidade a 20 °C	1,10 a 1,14 g/cm^3
Teor de cloretos	Isento de cloretos

Fonte: Sistematizado pela autora, a partir dos dados do fabricante (TECNOSIL, 2022).

3.2.6 Agregados miúdos

Foram empregadas areias com duas diferentes faixas granulométricas como agregado miúdo, com o objetivo de obter concretos com melhor empacotamento das partículas, promovendo maior coesão na mistura. Ambas as areias estão disponíveis no comércio local e são utilizadas em obras da região. As propriedades físicas desses materiais estão listadas na tabela 3.8, com resultados obtidos por meio de ensaios conforme as normas

NM 248 (ABNT, 2003), NM 45 (ABNT, 2006) e NM 52 (ABNT, 2009).

Tabela 3.8: Caracterização física das areias.

Peneiras (mm)	Areia fina		Areia média	
	% Retido	% Retido acum.	% Retido	% Retido acum.
4,75	0,00	0,00	0,00	0,00
2,36	0,00	0,00	2,01	2,01
1,18	0,67	0,67	9,40	11,41
0,60	9,70	10,37	26,17	37,58
0,30	78,26	88,63	41,28	78,86
0,15	10,70	99,33	15,10	93,96
< 0,15	0,67	100,00	6,04	100,00
Total	100,00		100,00	
Módulo de finura	1,98		2,24	
Dimensão máx. (mm)	2,36		2,36	
Massa específica (g/cm^3)	2,67		2,65	

Fonte: Sistematizado pela autora.

As curvas granulométricas da areia fina e da areia média, com os limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo de acordo com NBR 7211 (ABNT, 2022), são apresentadas na figura 3.2.

3.2.7 Agregados graúdos

Para o desenvolvimento do trabalho foram utilizados agregados graúdos naturais e reciclados. Inicialmente, os materiais reciclados foram submetidos a um processo de separação (figura 3.3), no qual foram removidas manualmente as impurezas presentes. Em seguida, os agregados passaram por peneiramento, manual e mecânico, utilizando peneiras de diferentes malhas, o que permitiu a separação das partículas por granulometria e a remoção da areia (figura 3.4). Esse procedimento garantiu a obtenção de um material mais limpo e com distribuição granulométrica adequada, permitindo seu uso como agregado graúdo nas misturas de concreto. Além disso, os agregados reciclados foram pré-molhados, como recomenda a NBR 6118 (ABNT, 2023), para ajuste das propriedades reológicas, como trabalhabilidade e consistência.

O agregado graúdo natural empregado foi a brita 1, material comumente disponível no comércio local. As propriedades físicas desse agregado estão listadas na tabela 3.9, enquanto sua distribuição granulométrica é ilustrada na figura 3.5.



Figura 3.3: Material misturado.
Fonte: Sistematizado pela autora.



Figura 3.4: Material separado.
Fonte: Sistematizado pela autora.

Tabela 3.9: Caracterização dos agregados graúdos.

Peneiras (mm)	Agregado graúdo natural		Agregado graúdo reciclado	
	% Retido	% Retido acum.	% Retido	% Retido acum.
25	0,00	0,00	0,00	0,00
19	34,13	34,13	0,00	0,00
12,5	43,54	77,68	85,20	85,20
9,5	22,32	100,00	14,80	100,00
< 9,5	0,00	100,00	0,00	100,00
Total	100,00		100,00	
Módulo de finura	5,12		4,85	
Dimensão máx. (mm)	19		19	

Fonte: Sistematizado pela autora.

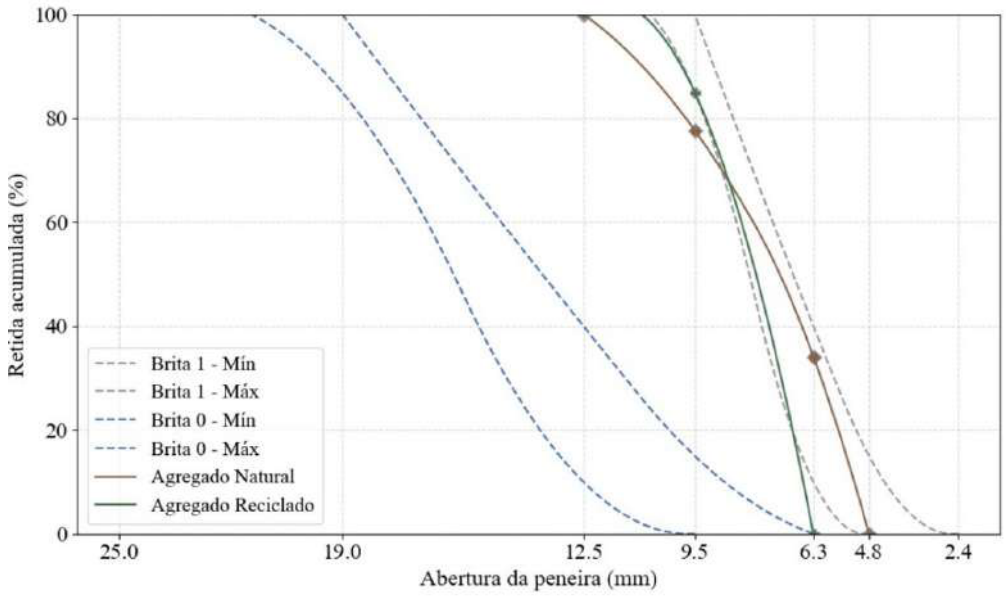


Figura 3.5: Curvas granulométricas dos agregados graúdos.

Fonte: Sistematizado pela autora.

3.3 Tratamento dos materiais

De acordo com o fluxograma, para a realização dos ensaios experimentais necessários para este estudo, foi realizada a dosagem do concreto, definindo as relações de materiais e porcentagens de substituição utilizadas.

3.3.1 Dosagem

Neste estudo, agregados graúdos naturais foram substituídos por agregados de concreto reciclados, enquanto a cinza de fundo foi utilizada como substituição parcial dos agregados miúdos. A substituição por cinza de fundo foi realizada em proporções de 0 e 25 %, em relação à massa total de areia (areia fina e areia média). Os agregados reciclados graúdos foram empregados em níveis de substituição de 50 % e 100 %. A sílica ativa foi incorporada em teores de 0 e 8 %, em substituição parcial ao cimento. Os materiais utilizados neste estudo são apresentados na figura 3.6.



Figura 3.6: Materiais utilizados na produção dos concretos: (a) agregados reciclados, (b) cinza de fundo e (c) sílica ativa.

Fonte: Sistematizado pela autora.

Foram dosados doze traços de concreto utilizando o método IPT/EPUSP (Helene, 1993), com relação a/agl fixa em 0,45 no Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção Civil (LEMCC). A notação dos traços segue a ordem: teor de agregado reciclado, teor de cinza de fundo e teor de sílica ativa. Por exemplo, o traço 50–0–0 corresponde a 50 % de substituição por agregado reciclado, 0 % de cinza de fundo e 0 % de sílica ativa.

A tabela 3.10 apresenta a composição em kg/m^3.

Tabela 3.10: Consumo de materiais dos concretos investigados [kg/m^3].

Traço	Cimento	Areia fina	Areia média	Cinza de fundo	Brita natural	Brita reciclada	Água	Sílica ativa
0–0–0	401	219	511	0	1051	0	182	0
50–0–0	401	219	511	0	525	525	182	0
100–0–0	401	219	511	0	0	1051	182	0
0–25–0	401	36,5	511	182,5	1051	0	182	0
50–25–0	401	36,5	511	182,5	525	525	182	0
100–25–0	401	36,5	511	182,5	0	1051	182	0
0–25–8	368,9	36,5	511	182,5	1051	0	182	32,1
50–25–8	368,9	36,5	511	182,5	525	525	182	32,1
100–25–8	368,9	36,5	511	182,5	0	1051	182	32,1
0–0–8	368,9	219	511	0	1051	0	182	32,1
50–0–8	368,9	219	511	0	525	525	182	32,1
100–0–8	368,9	219	511	0	0	1051	182	32,1

Fonte: Sistematizado pela autora.

3.3.2 Produção dos concretos

Para a produção dos concretos, cada mistura foi testada por abatimento do tronco de cone conforme a NBR 16889 (ABNT, 2020). Foi adotado o valor de (120 ± 10) mm para o abatimento dos concretos. Após essa etapa, moldaram-se 12 corpos de prova para cada composição, os quais foram curados em tanque de cura, de acordo com as recomendações da NBR 5738 (ABNT, 2016). Posteriormente, foi feita a identificação (figura 3.7), o preparo e a seleção de amostras para cada ensaio definido. A moldagem de 12 corpos de prova para cada composição foi definida para permitir a avaliação tanto das propriedades mecânicas quanto da durabilidade do material. Os corpos de prova foram distribuídos entre ensaios destrutivos e não destrutivos, considerando a reutilização das amostras quando aplicável. Os ensaios de resistência à compressão e de migração de cloretos são realizados de forma destrutiva, enquanto os ensaios de resistividade elétrica e absorção capilar foram conduzidos de forma não destrutiva. A distribuição dos corpos de prova por tipo de ensaio é apresentada na Tabela 3.11.

Tabela 3.11: Distribuição dos corpos de prova por tipo de ensaio.

Ensaio	Quantidade de CPs	Idades avaliadas	Tipo
Resistência à compressão	6	7, 28 e 180 dias	Destrutivo
Migração de cloretos	3	28, 56 e 180 dias	Destrutivo
Resistividade elétrica	3	28, 56 e 180 dias	Não destrutivo
Absorção capilar	3	28 dias	Não destrutivo

Fonte: Sistematizado pela autora.

Destaca-se que, nos ensaios não destrutivos, os mesmos corpos de prova pude-



Figura 3.7: Consistência do traço e corpos de prova.
Fonte: Sistematizado pela autora.

ram ser utilizados em mais de uma idade de avaliação, razão pela qual o número de utilizações experimentais não corresponde necessariamente ao número total de corpos de prova moldados.

3.4 Seleção das amostras

Especialmente para o ensaio de migração de cloretos, faz-se necessário maior cuidado na seleção das amostras, devido à heterogeneidade intrínseca do concreto. A variação local na proporção entre agregado graúdo e argamassa pode influenciar significativamente os resultados, dificultando a comparação direta entre corpos de prova.

Neste estudo, a seleção das amostras foi realizada por meio de análise visual qualitativa, buscando identificar regiões mais representativas e homogêneas da microestrutura do concreto. Foram evitadas áreas com elevada concentração de agregado graúdo, vazios aparentes ou segregação, de modo a reduzir a variabilidade associada à distribuição dos constituintes.

Essa abordagem, embora simplificada, está alinhada com recomendações da literatura, que destacam a importância de selecionar regiões com composição mais uniforme para ensaios de durabilidade, especialmente aqueles relacionados ao transporte de íons no concreto (IBRACON e ALCONPAT, 2020).

A adoção desse critério contribui para aumentar a comparabilidade entre os resultados, ainda que não envolva a quantificação direta do teor de brita por métodos sistemáticos.

3.5 Ensaios

Nesta seção, são apresentados os ensaios empregados para avaliar o desempenho dos concretos produzidos.

Foram definidos: (i) resistência à compressão axial, para caracterização mecânica; (ii) absorção de água por capilaridade (sorptividade), resistividade elétrica superficial e volumétrica e coeficiente de migração de cloretos em regime não estacionário, como

indicadores de durabilidade associados aos mecanismos de transporte no concreto e à exposição ao ambiente marinho.

3.5.1 Caracterização Mecânica

Resistência à compressão axial

A resistência à compressão foi determinada aos 7, 28 e 180 dias, conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018b). Para cada idade, dois corpos de prova foram retificados (fresados) a fim de garantir faces planas e paralelas e, em seguida, submetidos à ruptura em máquina de compressão (figura 3.8).



Figura 3.8: Rompimento do corpo de prova.
Fonte: Sistematizado pela autora.

A resistência à compressão foi calculada pela equação (3.1):

$$f_c = \frac{F}{A_c} \tag{3.1}$$

em que f_c é a resistência à compressão (MPa); F é a carga de ruptura (N); e A_c é a área da seção transversal do corpo de prova (mm^2).

3.5.2 Indicadores de Durabilidade

Nesta subseção, são apresentados os ensaios empregados como indicadores de durabilidade, associados ao transporte de íons cloreto e à resposta elétrica do concreto, os quais se relacionam ao risco de corrosão em ambiente marinho.

Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade foi utilizada neste estudo como um indicador complementar de durabilidade, por permitir a avaliação indireta da conectividade dos poros e da facilidade de transporte de fluidos no concreto. O ensaio foi realizado aos 28 dias, conforme a CPC 11.2 e a NBR 9779 (RILEM, 1982 e ABNT, 2012c).

Para cada mistura, foram utilizados três corpos de prova, inicialmente secos em estufa a (105 ± 5) °C por 24 horas, ou até constância de massa. Após o resfriamento à temperatura ambiente, determinou-se a massa seca (m_s).

Na sequência, os corpos de prova foram posicionados sobre suportes em recipiente com água, mantendo-se o nível de água a (5 ± 1) mm acima da face inferior das amostras. A execução do ensaio é ilustrada na figura 3.9. Durante o ensaio, a massa das amostras foi registrada após 3, 6, 24, 48 e 72 horas de contato com a água. Após cada pesagem, os corpos de prova foram imediatamente reposicionados no recipiente, de modo a garantir a continuidade do processo de absorção capilar.



Figura 3.9: Ensaio de absorção de água por capilaridade.
Fonte: Sistematizado pela autora.

A absorção de água por capilaridade foi calculada conforme a equação (3.2):

$$C = \frac{m_t - m_s}{A} \tag{3.2}$$

em que C é a absorção acumulada de água por capilaridade (g cm^{-2}), m_t é a massa da amostra no instante t (g), m_s é a massa seca (g) e A é a área da seção transversal em contato com a água (cm^2).

A partir dos valores de absorção acumulada, foi construída a relação entre C e a raiz quadrada do tempo de ensaio ($\sqrt{t}$). A sorptividade foi determinada como o coeficiente angular da região aproximadamente linear dessa relação.

A sorptividade é expressa em g cm^{-2} h$^{-1/2}$ e representa a taxa de absorção capilar do material, sendo empregada como indicador indireto da conectividade dos poros e da facilidade de transporte de fluidos no concreto.

Coeficiente de migração no regime não estacionário (NT Build 492)

O ensaio de migração de cloretos (NT Build 492) foi adotado como principal método para avaliação da durabilidade, por representar diretamente os mecanismos de transporte de íons cloreto no concreto. Para executar o ensaio acelerado de migração/difusão de cloretos no regime não estacionário, foram utilizadas três amostras com diâmetro (d) de 100 mm e altura (h) de 50 mm. A figura 3.10 retrata as dimensões das amostras necessárias para esse ensaio e a figura 3.11 mostra amostras já cortadas. A determinação do coeficiente de migração no regime não estacionário segue as especificações da norma NT Build 492 (NORDTEST, 1999). Entre os métodos de ensaio para verificar a difusão/migração de cloretos, este é um dos que exigem menos tempo, com duração que pode variar entre 6 e 96 horas, dependendo das características do concreto.

Aos 28 dias, as amostras (figura 3.12) foram inicialmente submetidas a uma tensão de 30 V, ajustada conforme a corrente medida, o que também determina a duração do ensaio (tabela 3.12). Após a migração iônica, as amostras foram rompidas diametralmente e aplicou-se uma solução de $AgNO_3$ 0,1 M para verificar a profundidade de penetração de cloretos.

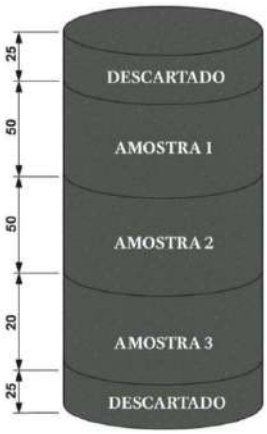


Figura 3.10: Dimensões da amostra para o ensaio da NT Build 492.

Fonte: NT Build 492 NORDTEST, 1999.

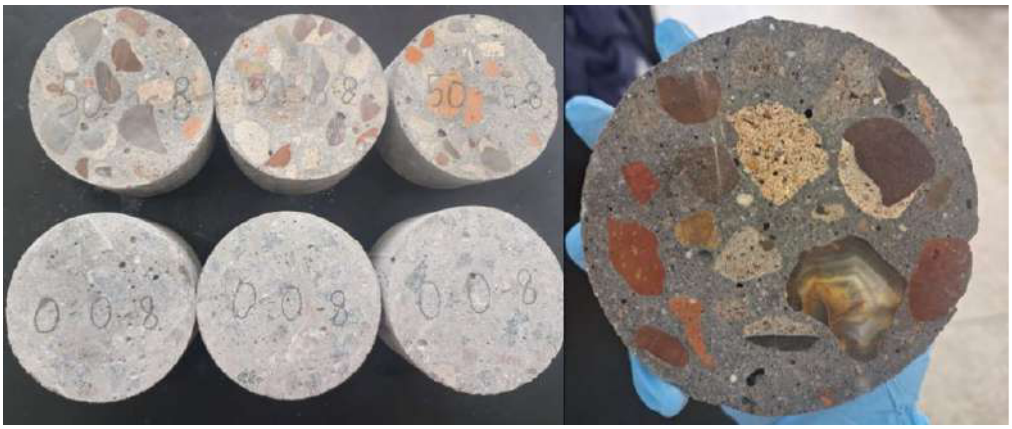


Figura 3.11: Amostras para o ensaio da NT Build 492.
Fonte: Sistematizado pela autora.



Figura 3.12: Ensaio da NT Build 492.
Fonte: Sistematizado pela autora.

A profundidade de penetração de cloretos foi determinada em sete pontos distintos para cada amostra, utilizando um paquímetro. Na figura 3.13 observa-se a orientação recomendada pela norma para a determinação da profundidade média de penetração de cloretos nas amostras. A figura 3.14 apresenta a sequência de fotos, do rompimento da amostra à medição da profundidade de penetração de cloretos.

Tabela 3.12: Tensão e tempo de duração do ensaio NT Build 492.

Corrente inicial I_0 a 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

Fonte: NORDTEST, 1999.

Por fim, o coeficiente de migração em regime não estacionário (D_{nssm}) é calculado conforme a equação (3.3):

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

em que D_{nssm} é o coeficiente de migração em regime não estacionário ($\times 10^{-12}$ m^2/s); U é o valor absoluto da tensão aplicada (V); T é a média entre as temperaturas inicial e final medidas na solução anódica (°C); L é a espessura da amostra (mm); x_D é o valor médio da penetração de cloretos (mm); e t é a duração do ensaio (h).

A NT Build 492 (NORDTEST, 1999) não fornece uma classificação para a difusividade do concreto com base nos valores de D_{nssm}. No entanto, a tabela 3.13 apresenta uma classificação proposta por Nilsson, Ngo, e Gjørv, 1998.

Tabela 3.13: Classificação quanto à difusividade.

D_{nssm} ($\times 10^{-12}$ **m²/s**)	**Difusividade do concreto**
> 15	Alta
10–15	Moderada
5–10	Baixa
2,5–5	Muito baixa
< 2,5	Desprezível

Fonte: Adaptado de Nilsson, Ngo, e Gjørv (1998).

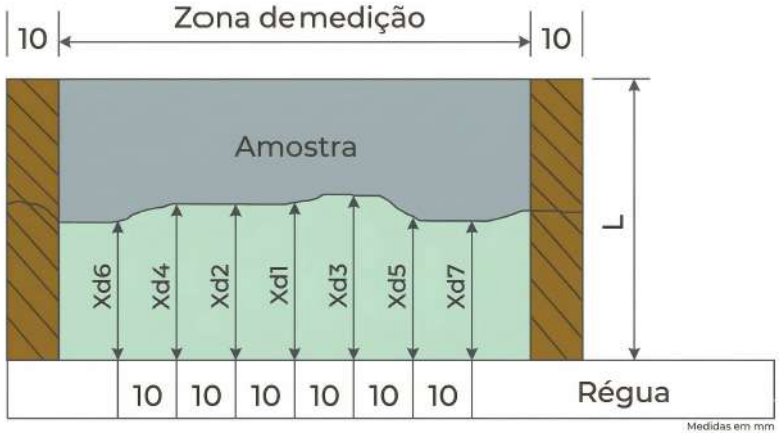


Figura 3.13: Medição da profundidade de penetração de cloretos.
Fonte: Sistematizada pela autora, a partir de NORDTEST, 1999.



Figura 3.14: Rompimento e medição da profundidade de cloreto.
Fonte: Sistematizado pela autora.

Resistividade elétrica superficial (método de Wenner)

O ensaio para determinação da resistividade elétrica superficial, conhecido como método dos quatro pontos ou método de Wenner, é padronizado pela norma americana T 358 (AASHTO, 2015). O ensaio seguiu a Prática Recomendada pelo IBRACON, 2021 e a norma americana para resistividade elétrica superficial pelo método dos quatro pontos. Na figura 3.15 pode-se observar uma ilustração do ensaio.

Esse método envolve a aplicação de uma diferença de potencial elétrico entre dois eletrodos. Para a realização do ensaio, foram utilizados dois corpos de prova cilíndricos, com diâmetro (d) de 100 mm e altura (h) de 200 mm, completamente saturados, a fim de minimizar o impacto da variação de umidade nas medições obtidas, conforme estabelecido pelas normas.

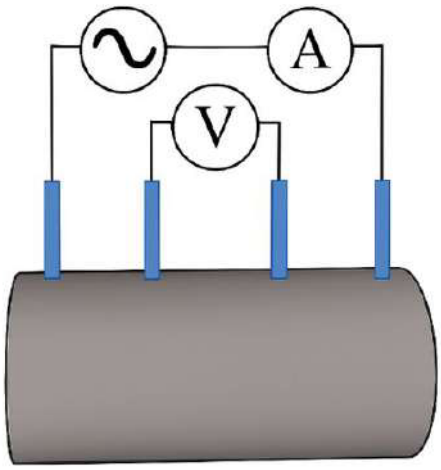


Figura 3.15: Ensaio de resistividade superficial.
Fonte: Sistematizado pela autora.

O ensaio é realizado colocando quatro eletrodos em contato direto com a superfície do concreto. Os corpos de prova são posicionados em um suporte para evitar sua rotação, e uma sonda é colocada longitudinalmente nas posições angulares de 0°, 90°, 180° e 360° (figura 3.16). Durante o teste, uma corrente elétrica é aplicada entre os dois eletrodos externos, enquanto a diferença de potencial é medida pelos eletrodos internos. A resistividade elétrica superficial do concreto é determinada pela média das quatro medições realizadas em cada corpo de prova, conforme a equação (3.4).

$$\rho_{Scon} = \rho_c \cdot k_c \cdot k_f \tag{3.4}$$

em que ρ_{Scon} é a resistividade elétrica superficial do concreto (Ω m); k_c é o fator de cura, igual a 1 para cura em câmara úmida ou imersão em água e 1,1 para cura em imersão em água saturada de $Ca(OH)_2$; k_f é o fator de forma, igual a 0,571; e ρ_c é a média das resistividades elétricas do concreto obtidas nas duas amostras.

Um dos modelos de vida útil que utiliza a resistividade elétrica superficial do concreto, desenvolvido por Andrade (2004 apud Santos, 2006), considera como parâ-

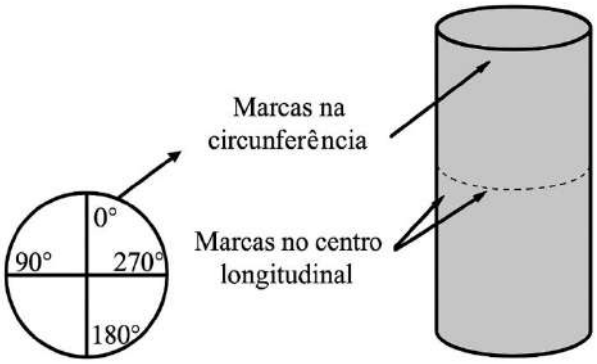


Figura 3.16: Ensaio de resistividade superficial.
Fonte: Sistematizado pela autora.

metros principais a resistividade do concreto saturado, sua porosidade, a capacidade de combinação de cloretos e as condições ambientais às quais a estrutura estará exposta. Esse modelo permite avaliar o risco de corrosão em estruturas de concreto armado com base nos valores de resistividade obtidos.

Os resultados dos ensaios de resistividade elétrica foram interpretados conforme os limites propostos no Boletim 192 (CEB, 1989), que classifica o risco de corrosão em função dos valores medidos (tabela 3.14).

Tabela 3.14: Probabilidade de corrosão conforme a resistividade elétrica.

Resistividade do concreto (kΩ cm)	Risco de corrosão
> 20	Negligenciável
10 a 20	Baixa
5 a 10	Alta
< 5	Muito alta

Fonte: Adaptada pela autora, a partir da CEB (1989).

Ademais, a norma T 358 (AASHTO, 2015) fornece uma tabela (tabela 3.15) que relaciona a resistividade elétrica com a penetração de íons cloreto.

Segundo Andrade (2004 apud Santos, 2006), existem valores aceitáveis de resistividade elétrica que variam conforme a agressividade do ambiente ao qual a estrutura de concreto está exposta. A tabela 3.16 apresenta essas faixas, contemplando três classes relacionadas à ação de cloretos. Os valores correspondem à resistividade elétrica medida em corpos de prova de concretos novos, saturados, com 28 dias de idade, e indicam os níveis mínimos exigidos para diferentes classes de exposição.

Na prática recomendada pelo IBRACON, 2021, são apresentadas tabelas que relacionam a resistividade elétrica a diferentes mecanismos de deterioração do concreto. A tabela 3.17 destaca os valores associados à possibilidade de penetração de íons cloreto, com base em diferentes referências da literatura. Já a tabela 3.18 apresenta valores

Tabela 3.15: Penetração de íons cloreto em função da resistividade elétrica.

Penetração de íons cloreto	Resistividade elétrica (kΩ cm)
Alta	< 12
Moderada	12–21
Baixa	21–37
Muito baixa	37–254
Desprezível	> 254

Nota: Cilindro 100 mm × 200 mm. Espaçamento das pontas da sonda de Wenner a = 1,5.
Fonte: Adaptada pela autora, a partir da AASHTO (2015).

Tabela 3.16: Valores mínimos de resistividade aos 28 dias conforme as classes.

Ação de cloretos — classes	Resistividade mínima requerida (kΩ cm)
Estrutura exposta à atmosfera	10
Estrutura submersa	15
Estrutura na região de maré	20

Fonte: Adaptada pela autora, a partir de Andrade, 1998 apud Santos, 2006.

relacionados à probabilidade de ocorrência de corrosão, também fundamentados em diversos estudos.

Tabela 3.17: Possibilidade de penetração de cloretos baseada na resistividade elétrica (kΩ cm).

Referência	Muito alta	Alta	Moderada	Baixa	Muito baixa	Despre-zível
AASHTO (2015)	–	< 12	12 a 21	21 a 37	37 a 254	> 254
FM 5-578 (2004)	–	< 12	12 a 21	21 a 37	37 a 254	> 254
FHWA-KS-14-15 (Kansas Department, 2015)	–	< 7	7 a 13	13 a 24,3	24,3 a 191	> 191
Ghosh e Quang (2015)	–	< 18	16 a 26	28 a 50	50 a 343	> 343
Sengul (2014)	< 5	5 a 7,5	7,5 a 15	15 a 35	> 35	–

Fonte: Adaptada pela autora, a partir de IBRACON, 2021.

Tabela 3.18: Possibilidade de corrosão baseada na resistividade elétrica (kΩ cm).

Referência	Muito alta	Alta	Moderada	Baixa	Muito baixa	Desprezível
RILEM TC 154-EMC (2000)	–	< 10	10 a 50	50 a 100	–	> 100
COST 509 (1997)	–	< 10	10 a 50	50 a 100	–	> 100
CEB 192 (1988)	–	< 5	5 a 10	10 a 20	> 20	–
Azarsa e Gupta (2017)	–	< 6,7	6,7 a 11,7	11,7 a 20,6	20,6 a 141,1	> 141,1
Song et al. (2007)	–	< 5	5 a 10	10 a 20	–	> 20
PROCEQ (2017)	–	< 10	10 a 50	50 a 100	–	> 100
Morris et al. (2002)	–	< 10	–	–	> 30	–
Ghosh e Quang (2015)	–	< 10	10 a 50	50 a 100	–	> 100
Bungey (1989)	< 5	5 a 10	10 a 20	> 20	–	–
Andrade e Alonso (2001)	–	< 10	10 a 50	50 a 100	–	100 a 200
Yu, Li e Chen (2017)	–	< 10	10 a 20	20 a 100	–	> 100
Cavalier e Vassie (1994)	–	< 5	5 a 12	> 12	–	–
Hope, Ip e Manning (1985)	–	< 6,5	6,5 a 8,5	> 8,5	–	–
Andrade e Alonso (1996)	–	< 10	10 a 100	> 100	–	–
Smith et al. (2004)	–	< 8	8 a 12	> 12	–	–
Polder (2001)	< 10	10 a 50	–	50 a 100	–	> 100
Balestra et al. (2019)	< 5	15 a 20	20 a 55	55 a 80	–	> 80

Fonte: Adaptada pela autora, a partir de IBRACON, 2021.

Resistividade elétrica volumétrica

Esse método é denominado resistividade elétrica volumétrica porque avalia a resistividade das camadas internas do concreto, refletindo as propriedades elétricas do seu volume e não apenas de sua superfície. No Brasil, o procedimento para medição da resistividade elétrica volumétrica do concreto está definido na NBR 9204 (ABNT, 2012b) e também na prática recomendada para determinação da resistividade elétrica em corpos de prova de concreto (IBRACON, 2021).

O ensaio seguiu a Prática Recomendada do (IBRACON, 2021). Foram utilizados dois corpos de prova saturados de cada traço. Inicialmente, duas esponjas umedecidas foram introduzidas entre os eletrodos metálicos, e uma massa de 2 kg foi posicionada sobre o conjunto. Uma diferença de potencial elétrico foi imposta ao sistema e a corrente gerada foi medida. Em seguida, o mesmo procedimento foi realizado com o corpo de prova posicionado entre as esponjas (figuras 3.17 e 3.18).

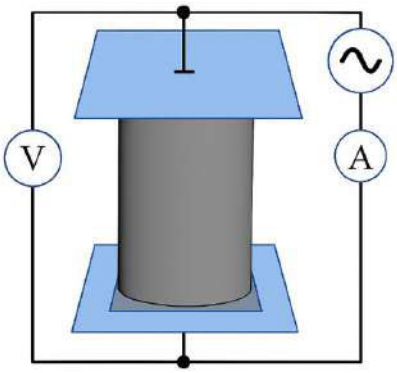


Figura 3.17: Ensaio de resistividade elétrica volumétrica.
Fonte: Sistematizado pela autora.

A resistência elétrica é calculada, de acordo com a Lei de Ohm, pela equação (3.5):

$$R = \frac{V}{I} \tag{3.5}$$

em que 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).

A resistência elétrica do concreto é obtida pela equação (3.6):

$$R_c = R_{(c+sp)} - R_{sp} \tag{3.6}$$

em que 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 (3.7):

$$\rho_c = R_c \cdot \frac{S}{L} \tag{3.7}$$

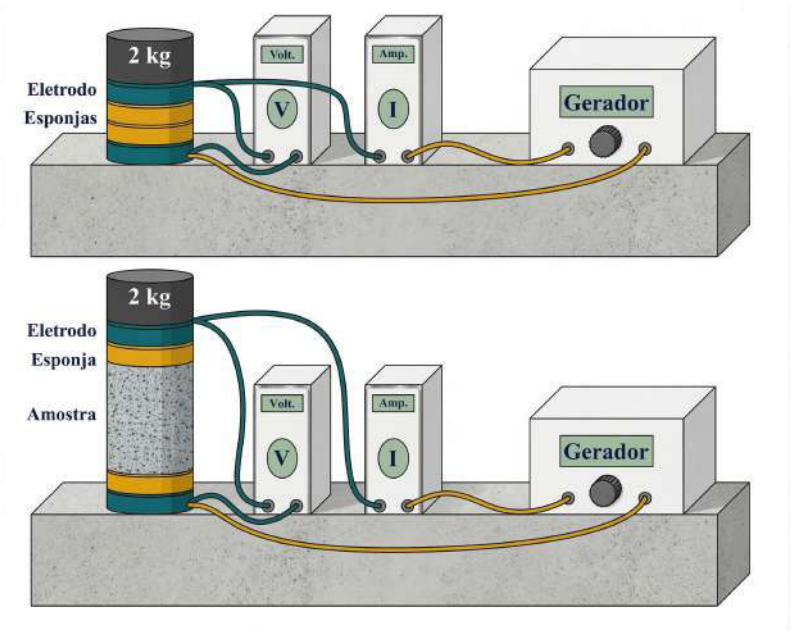


Figura 3.18: Esquema do ensaio de resistividade elétrica volumétrica.
Fonte: Sistematizado pela autora, a partir de IBRACON (2021).

em que ρ_c é a resistividade elétrica do concreto (Ω m); S é a área da face da amostra em que a esponja está localizada (m^2); e L é a altura das amostras (m).

A resistividade elétrica volumétrica do concreto é expressa como a média das duas medidas feitas em cada corpo de prova, de acordo com a equação (3.8):

$$\rho_{\mathrm{Vcon}} = \rho_c \cdot k_c \tag{3.8}$$

em que ρ_{Vcon} é a resistividade elétrica volumétrica do concreto (Ω m); ρ_c é a média das duas medidas (Ω m); e k_c é o fator de cura, igual a 1,1 para cura em imersão em água saturada de $Ca(OH)_2$.

3.6 Análise probabilística

3.6.1 Modelo

Para realizar a análise probabilística da penetração de íons cloreto e estimar a vida útil das composições de concreto estudadas, foi adotado o modelo matemático Duracon. Conforme detalhado na seção 2.3 desta revisão bibliográfica, este modelo, proposto por Gjørv, 2015, tem como base a solução da Segunda Lei de Fick e utiliza a Simulação de Monte Carlo para incorporar as incertezas dos parâmetros de entrada. A sua aplicação permite uma avaliação de durabilidade baseada em critérios de confiabilidade, sendo uma ferramenta consolidada e validada para ambientes marinhos.

3.6.2 Cálculo da probabilidade de corrosão

A estimativa da probabilidade de corrosão foi realizada com o intuito de avaliar a vida útil dos concretos produzidos neste estudo. Para isso, foram utilizados os coeficientes de difusão D_0 determinados experimentalmente para cada mistura, conforme descrito na seção 3.5.2.

A análise considerou estruturas com cobrimentos nominais da armadura de 40 mm e 50 mm, conforme as recomendações da NBR 6118 ABNT, 2023 para as classes de agressividade ambiental III e IV, respectivamente. Também foram adotados valores de 60 mm e 70 mm, com base em experiências relatadas por Gjørv, 2015 para estruturas em ambientes marinhos agressivos na costa da Noruega.

A concentração superficial de cloretos (C_S) utilizada foi aquela determinada por Guimarães, 2000 em uma estrutura real situada em zona de névoa salina intensa (PS–ZTN) na cidade de Rio Grande/RS. Apesar da variabilidade associada ao valor de C_S ser frequentemente debatida, os dados de Guimarães vêm sendo amplamente adotados como referência por diversos autores em análises de vida útil de estruturas de concreto, como Andrade (2001), Possan e Andrade (2014), Magalhães (2018), e Wally (2019).

Adicionalmente, para avaliar a sensibilidade do modelo a diferentes níveis de agressividade, foram incorporados os cenários propostos pelo *fib Bulletin* 76 (2015), considerando três níveis distintos de exposição: 1,00% (agressividade branda), 2,00% (moderada) e 4,00% (alta/severa). A inclusão desses valores permite verificar o desempenho das misturas sob um espectro mais amplo de condições de contaminação por cloretos.

A temperatura ambiente considerada foi de aproximadamente 18,26 °C, correspondente à média anual registrada pelo INMET em 2024 para a cidade de Rio Grande/RS, de acordo com a estação A802. O uso da temperatura média anual é recomendado por Gjørv (2015) no contexto do modelo de penetração de cloretos utilizado. Para simular um cenário mais agressivo e avaliar o impacto de condições térmicas mais severas, foi considerada uma segunda temperatura constante de 30 °C. Este valor pode representar condições típicas de verão ou uma projeção conservadora de aumento de temperatura, permitindo avaliar a sensibilidade do modelo a variações térmicas que aceleram o processo de degradação.

Um resumo dos parâmetros empregados na análise probabilística, juntamente com suas respectivas distribuições de probabilidade, é apresentado na tabela 3.19. A probabilidade de falha P_f foi calculada ano a ano, de 1 a 200 anos. Com base nos resultados da análise probabilística, também é possível estimar a vida útil característica (t_k) das estruturas expostas às condições ambientais adotadas.

Tabela 3.19: Distribuições de probabilidade das variáveis na análise probabilística.

Parâmetro de entrada	Unidade	Referência	Distribuição	Média	COV	ζ	λ
Coeficiente de difusão (D_0)	m^2/s	D_{nssm} 28 dias	Normal	–	0,10	–	–
Cobrimento nominal (x_c)	mm	NBR 6118 ABNT (2023)	Normal	40	0,10	–	–
				50			
		Gjørv (2015)		60			
				70			
Concentração superficial (C_S)[1]	%	Guimarães (2000)	Lognormal	2,07	0,23	0,2270	0,7018
		fib 76 (fib Bulletin, 2015)		1,00	0,45	0,4294	−0,0922
				2,00	0,20	0,1980	0,6735
				4,00	0,45	0,4394	1,2941
Temperatura (T)	°C	INMET (2024)[2]	Normal	18,26	0,20	–	–
		Autora		30			
Fator de envelhecimento (α)	–	Dados do ensaio	Normal	α	0,20	–	–
Concentração crítica (C_{CR})[1]	%	RILEM (1994)	Normal	0,40	0,15	–	–

[1]Percentual em relação à massa de cimento.
[2]Valor aproximado da temperatura média em Rio Grande/RS (estação A802) durante 2024; o uso da temperatura média anual é recomendado por Gjørv (2015, p. 107).
Fonte: Sistematizado pela autora.

4 Resultados e Discussão

Neste capítulo, os resultados são analisados com ênfase no coeficiente de migração de cloretos (D_{nssm}), obtido pelo ensaio NT Build 492, considerado o principal parâmetro para avaliação da durabilidade frente à penetração de íons cloreto. Os ensaios de absorção capilar e resistividade elétrica são utilizados como indicadores complementares, permitindo a interpretação indireta da microestrutura e dos mecanismos de transporte no concreto.

4.1 Caracterização Mecânica

4.1.1 Resistência à compressão axial

A análise da resistência à compressão revelou a influência das diferentes composições de concreto ao longo do tempo. Os resultados indicam que tanto o teor de substituição de agregados quanto a incorporação de adições minerais exercem papel determinante no desempenho mecânico das misturas. Observa-se que a evolução da resistência até 180 dias não segue um comportamento uniforme, evidenciando a complexidade das interações entre os materiais constituintes.

Conforme apresentado na Tabela 4.1 e na Figura 4.1, a substituição do agregado natural pelo reciclado impactou negativamente a resistência mecânica. O traço de referência (0-0-0) alcançou 45,93 MPa aos 28 dias e 51,41 MPa aos 180 dias. Em comparação, as misturas com 50 % (50-0-0) e 100 % (100-0-0) de agregado reciclado apresentaram resistências de 37,58 MPa e 32,97 MPa aos 28 dias e 47,14 MPa e 35,93 MPa aos 180 dias, respectivamente.

Essa redução, mais acentuada na substituição total, está associada à maior porosidade e à heterogeneidade dos agregados reciclados, devido à presença de argamassa antiga aderida. A perda de desempenho mecânico está diretamente relacionada à fragilidade da zona de transição interfacial (ZTI), conforme discutido por Evangelista e de Brito (2007, 2010) e Dimitriou, Savva, e Petrou (2018). Adicionalmente, Bravo *et al.* (2015) destacam que esse efeito pode ser intensificado sob condições térmicas elevadas.

Para contextualizar os resultados obtidos, é apropriado compará-los com estudos experimentais envolvendo agregados reciclados. Nesse sentido, os valores de resistência à compressão observados nesta pesquisa aos 28 dias, entre 30 MPa e 57 MPa, mostram-se compatíveis com a faixa reportada por Evangelista e de Brito (2007, 2010), Dimitriou, Savva, e Petrou (2018), e Fonseca, Ribeiro Junior, e Barbosa (2018). Esses estudos indicam que o desempenho mecânico depende não apenas do teor de substituição, mas também da qualidade do agregado reciclado e da capacidade da matriz cimentícia em compensar a heterogeneidade introduzida.

Adicionalmente, Antunes *et al.* (2025) reportaram reduções médias de aproximadamente 5,7% na resistência para cada 10% de substituição por agregados reciclados. Sob essa perspectiva, os concretos desta pesquisa apresentaram desempenho comparativamente favorável, uma vez que o traço 100-0-0 mostrou redução global da ordem de 28% em relação à referência, equivalente a cerca de 2,8% por cada 10% de substituição.

A incorporação de cinza de fundo (CF) mostrou-se uma estratégia eficaz para otimizar a matriz cimentícia, especialmente nas primeiras idades. O destaque foi o traço 0-25-0, que atingiu 56,84 MPa aos 28 dias, superando o traço de referência. Esse comportamento sugere atuação predominante do efeito fíler, promovendo melhor empacotamento das partículas e densificação inicial da matriz, em linha com Sharma, Bhartiya, e Das (2026).

No entanto, na análise de longo prazo, alguns traços apresentaram pequenas variações na resistência aos 180 dias. O traço 0-25-0 variou de 56,84 MPa para 51,72 MPa, enquanto o traço 100-25-0 variou de 35,65 MPa para 34,63 MPa. Essas variações devem ser interpretadas com cautela, podendo estar associadas à variabilidade experimental e à dispersão estatística dos resultados, não indicando necessariamente degradação do material.

Essa interpretação é consistente com Magalhães (2014), que destaca a influência de fatores como calibração de equipamentos, preparo dos corpos de prova e variabilidade operacional nos resultados experimentais de resistência.

Um ponto relevante emerge ao comparar os resultados com estudos envolvendo resíduos finos distintos. Rosales *et al.* (2025) observaram ganhos de resistência em idades avançadas ao utilizar cinza de fundo de biomassa como substituto da areia, atribuindo esse comportamento à reatividade tardia do material. No presente estudo, esse comportamento não foi observado de forma consistente, sugerindo que o efeito da cinza de fundo depende fortemente de sua origem, composição e função na mistura.

Nesse contexto, o traço intermediário 50-25-0 apresentou comportamento mais estável, com aumento de resistência de 42,28 MPa para 43,79 MPa, indicando possível interação favorável entre 50 % de agregado reciclado e 25 % de cinza de fundo.

A sílica ativa (SA) contribuiu significativamente para o refinamento microestrutural e para a estabilidade da resistência ao longo do tempo. Esse efeito está associado à reação pozolânica, que promove a formação adicional de C–S–H e a densificação da matriz cimentícia, conforme relatado por Papadakis (2000), Dimitriou, Savva, e Petrou (2018), e Sasanipour, Aslani, e Taherinezhad (2019).

Em síntese, os resultados demonstram que a incorporação de adições minerais constitui estratégia eficaz para mitigar os efeitos negativos associados ao uso de agregados reciclados. A cinza de fundo destacou-se pelo ganho de resistência inicial, enquanto a sílica ativa contribuiu para maior estabilidade e desempenho a longo prazo. Apesar das variações observadas, todos os concretos atenderam aos requisitos mínimos estabelecidos pela NBR 6118 (ABNT, 2023), confirmando a viabilidade técnica das formulações e reforçando a importância de uma abordagem baseada em desempenho.

Tabela 4.1: Resistência à compressão dos concretos investigados.

Traço	7 dias [MPa]	28 dias [MPa]	180 dias [MPa]
0–0–0	36,70	45,93	51,41
50–0–0	30,59	37,58	47,14
100–0–0	23,55	32,97	35,93
0–25–0	41,78	56,84	51,72
50–25–0	34,19	42,28	43,79
100–25–0	27,42	35,65	34,63
0–25–8	28,89	47,50	50,89
50–25–8	21,61	34,97	41,01
100–25–8	37,16	40,52	39,21
0–0–8	37,03	43,17	51,01
50–0–8	35,99	36,23	48,47
100–0–8	27,78	30,23	31,40

Fonte: Sistematizado pela autora.

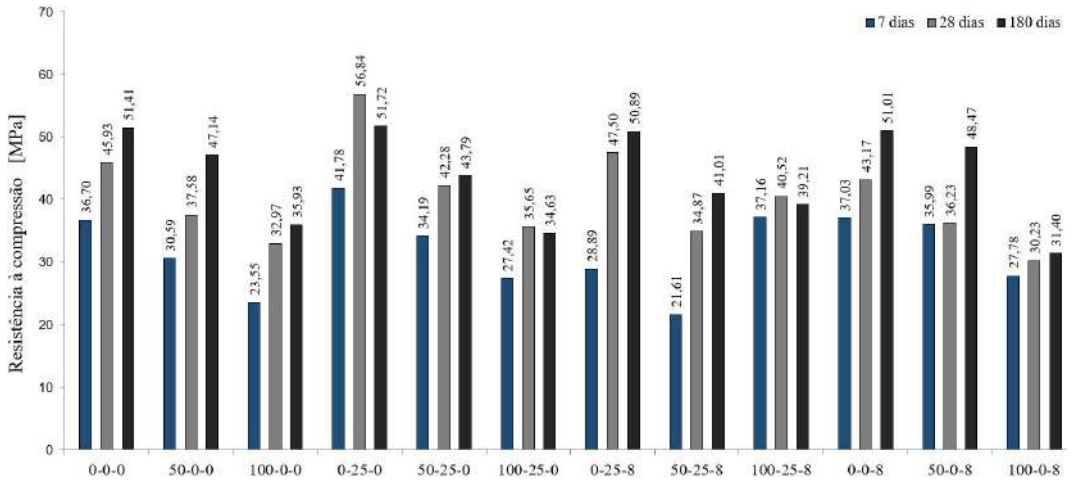


Figura 4.1: Resistência à compressão dos concretos investigados.

Fonte: Sistematizado pela autora.

Absorção de água por capilaridade

A análise da absorção de água por capilaridade, quantificada pela sorptividade, foi utilizada como parâmetro complementar na avaliação da durabilidade, permitindo inferir a conectividade da rede de poros superficiais e sua influência nos mecanismos de transporte. Os resultados revelaram interações complexas entre AR, CF e SA, mostrando que a sorptividade não depende apenas da porosidade total, mas também da forma como os poros se encontram distribuídos e conectados.

A Tabela 4.2 e os gráficos apresentados nas figuras 4.2 e 4.3 apresentam os valores médios de sorptividade obtidos para os diferentes traços.

Tabela 4.2: Sorptividade dos concretos investigados.

Traço	Sorptividade [g cm^{-2} h$^{-1/2}$]
0–0–0	7,13
50–0–0	4,71
100–0–0	8,50
0–25–0	10,15
50–25–0	4,01
100–25–0	2,90
0–25–8	4,96
50–25–8	6,21
100–25–8	4,04
0–0–8	6,27
50–0–8	6,48
100–0–8	5,87

Fonte: Sistematizado pela autora.

O comportamento dos traços contendo apenas CF foi um dos mais contraintuitivos do estudo. Contrariando a tendência observada nos ensaios de migração e resistividade, o traço 0-25-0 apresentou a maior sorptividade de todas as misturas (10,15 g cm^{-2} h$^{-1/2}$). Em contrapartida, o traço 100-25-0 (com 100 % de AR) registrou a menor sorptividade de todo o estudo (2,90 g cm^{-2} h$^{-1/2}$).

Para interpretar os resultados de sorptividade, é útil priorizar estudos experimentais originais que avaliaram parâmetros diretamente ligados ao transporte de água e à qualidade da rede porosa. Nesse sentido, Russo *et al.* (2025) mostraram que a incorporação de agregado reciclado pode afetar negativamente parâmetros associados à durabilidade, como absorção e transporte, em função da maior heterogeneidade e da presença de fases mais porosas no compósito. Essa tendência é coerente com os resultados aqui obtidos para os traços sem adições minerais: ao comparar 0-0-0 com 100-0-0, observa-se aumento da sorptividade de 7,13 g cm^{-2} h$^{-1/2}$ para 8,50 g cm^{-2} h$^{-1/2}$, indicando que o agregado reciclado favoreceu uma rede de poros capilares mais ativa e conectada.

O desempenho do traço 100-25-0 (2,90 g cm^{-2} h$^{-1/2}$), com a menor sorptividade

do estudo , indica uma possível atuação sinérgica entre a CF e o AR. Nesse caso, o efeito fíler da cinza de fundo parece ter contribuído para o preenchimento de vazios e para a descontinuidade dos capilares associados à argamassa aderida do agregado reciclado, de modo que o mecanismo de bloqueio físico superou o efeito isolado da maior porosidade do AR e resultou em concreto de baixa capilaridade.

Esse resultado aparentemente paradoxal pode ser explicado pela influência das adições minerais na microestrutura. A interpretação da absorção capilar requer cautela, pois o refinamento da rede porosa pode, em certos casos, elevar a sucção capilar ao favorecer a formação de capilares mais finos e ativos, sem que isso represente necessariamente maior permeabilidade global (Teodoro, 2016 e Wally, 2019). Em contrapartida, uma redução expressiva da sorptividade sugere que, além do refinamento, ocorreu efetiva descontinuidade da conectividade entre poros, condição mais favorável à durabilidade. Como não foram realizadas análises microestruturais diretas, essa interpretação deve ser entendida como hipótese explicativa consistente com a literatura e com o comportamento combinado dos demais indicadores de durabilidade, e não como demonstração direta do mecanismo atuante.

À luz dessa teoria, o traço 0-25-0 pode ter tido sua microestrutura refinada de modo a aumentar a quantidade de poros capilares finos e contínuos, potencializando a sucção de água. Já no traço 100-25-0, o mesmo efeito fíler atuou para bloquear e desconectar a rede de poros inerente à argamassa aderida do agregado reciclado.

Conforme esperado e em linha com Poon, Shui, e Lam (2004) e Verian, Ashraf, e Cao (2018), a presença de agregado reciclado tende a aumentar a absorção de água devido à argamassa aderida e à microestrutura mais porosa. O traço 100-0-0 apresentou sorptividade elevada (8,50 g cm^{-2} $h^{-1/2}$). Curiosamente, o traço 50-0-0 (4,71 g cm^{-2} $h^{-1/2}$) teve desempenho melhor que a referência (7,13 g cm^{-2} $h^{-1/2}$), indicando possível interação de empacotamento benéfica nesse nível de substituição.

A sílica ativa, de modo geral, contribuiu para reduzir a sorptividade, como esperado de seu efeito pozolânico de refino de poros. Por exemplo, ao comparar 100-0-0 (8,50 g cm^{-2} $h^{-1/2}$) e 100-0-8 (5,87 g cm^{-2} $h^{-1/2}$), observa-se melhora. Entretanto, nos traços ternários, embora 100-25-8 (4,04 g cm^{-2} $h^{-1/2}$) tenha apresentado baixo valor, não superou 100-25-0 (2,90 g cm^{-2} $h^{-1/2}$), sugerindo que, para capilaridade, o mecanismo físico de bloqueio de poros da CF no concreto com AR foi tão eficaz que a adição do refino químico da SA não trouxe benefício adicional.

Em suma, os resultados da absorção capilar destacam que a durabilidade superficial é governada pela conectividade dos poros, e não apenas pela porosidade total. A descoberta mais significativa foi o efeito sinérgico entre a cinza de fundo e o agregado 100 % reciclado, que produziu o concreto com a menor taxa de absorção de água. Esse achado é de grande importância prática, pois demonstra que a combinação inteligente de um resíduo (AR) com um subproduto industrial (CF) pode gerar compósito de desempenho superior.

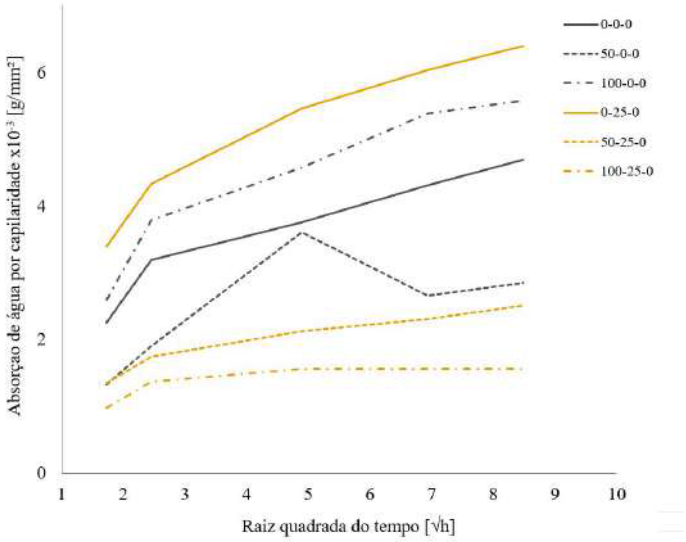


Figura 4.2: Absorção de água por capilaridade dos concretos investigados.
Fonte: Sistematizado pela autora.

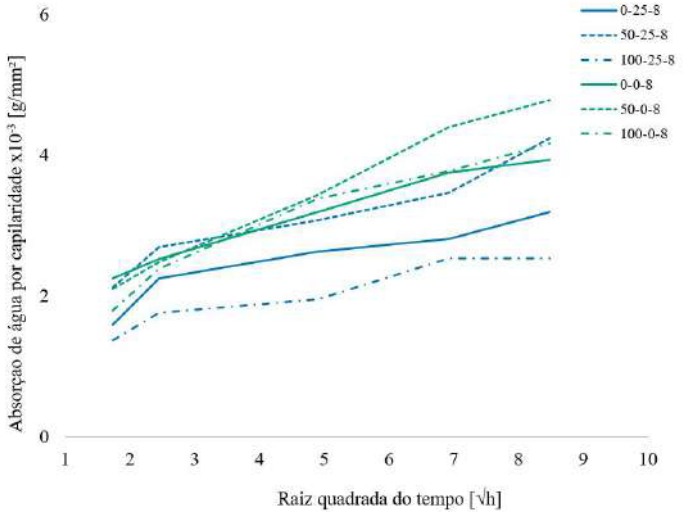


Figura 4.3: Sorptividade dos concretos investigados.
Fonte: Sistematizado pela autora.

Coeficiente de migração no regime não estacionário

O coeficiente de migração de cloretos (D_{nssm}) foi adotado como o principal indicador de durabilidade neste estudo, por representar diretamente os mecanismos de transporte de íons cloreto no interior do concreto. Esse parâmetro é amplamente empregado em modelos de previsão de vida útil baseados na segunda lei de Fick, constituindo a base para a análise do desempenho frente à penetração de agentes agressivos. Os resultados do ensaio de migração de cloretos (NT Build 492) evidenciam a influência significativa das diferentes composições do concreto na sua durabilidade potencial. Conforme os dados apresentados na Tabela 4.3 e na figura 4.4, todos os traços exibiram uma redução progressiva do coeficiente de migração (D_{nssm}) ao longo do tempo, de 28 a 180 dias. Este comportamento geral indica a continuidade do processo de hidratação e o refinamento da microestrutura em todas as amostras, tornando a matriz cimentícia menos permeável com o avanço da idade. Contudo, a magnitude dessa melhoria e o desempenho final variaram drasticamente em função da presença de agregado reciclado (AR) e das adições minerais.

A influência negativa do AR na resistência à penetração de cloretos foi inequívoca. Comparando os traços de referência, observa-se aumento progressivo da difusividade com o teor de AR. Aos 28 dias, o coeficiente passou de 8,80 para 13,14 ($\times 10^{-12} m^2/s$) entre os traços 0-0-0 e 100-0-0, respectivamente.

Essa tendência se manteve aos 180 dias, quando os traços com 50% e 100% de AR permaneceram classificados apenas como de "Baixa" difusividade, segundo os critérios de Nilsson, Ngo, e Gjørv (1998), enquanto o traço de referência atingiu a classe "Muito Baixa".

Esse comportamento está em consonância com estudos experimentais originais sobre concretos com agregados reciclados, que relacionam o aumento do transporte de cloretos à porosidade da argamassa aderida, à maior absorção do agregado e à presença de ZTI mais frágeis e múltiplas (Evangelista e de Brito, 2010; Thomas *et al.*, 2013 e Russo *et al.*, 2025).

Analisando especificamente os traços com 25% de adição de cinza de fundo, observa-se um comportamento relevante no conjunto de resultados. O traço 0-25-0, que combina CF com agregado natural, emergiu como um dos compósitos de maior desempenho, atingindo coeficiente final de apenas $0{,}83 \times 10^{-12} m^2/s$. De acordo com a Tabela 4.3, este valor se classifica como difusividade "Desprezível" e demonstra o altíssimo potencial da cinza de fundo para o refinamento de poros quando não há interferência de um agregado de menor qualidade.

Um dado particularmente curioso é a taxa de evolução deste traço. O 0-25-0 apresentou a maior redução percentual de difusividade entre todos os concretos analisados, com queda de $-85{,}88\%$ entre 28 e 180 dias. Isso indica transformação de uma matriz inicialmente moderada em uma estrutura de baixíssima permeabilidade em idades avançadas.

A influência do agregado reciclado fica clara ao comparar os três traços da série: à medida que o teor de AR aumenta, o coeficiente final também se eleva (0,83 $\rightarrow$

2,60 → 4,82). Isso sugere que, embora a CF seja muito eficaz, seu efeito benéfico é parcialmente consumido para compensar a maior porosidade e a ZTI mais frágil introduzidas pelo agregado reciclado. Ainda assim, a adição de 25% de CF foi suficiente para elevar todos os traços a um novo patamar de durabilidade. Mesmo o concreto com 100% de agregado reciclado (100-25-0) saltou de uma classificação final "Baixa" (no traço 100-0-0) para "Muito Baixa", indicando que a cinza de fundo pode constituir uma estratégia eficaz para o desenvolvimento de concretos mais duráveis, mesmo com o uso integral de agregados reciclados.

É importante ressaltar que a melhoria observada na durabilidade dos concretos com CF, especialmente a redução na penetração de cloretos, parece estar associada predominantemente à contribuição física da adição para a microestrutura. Em primeiro lugar, a CF pode atuar por efeito fíler, promovendo empacotamento granular mais denso e reduzindo a porosidade capilar. Em segundo lugar, suas partículas podem favorecer a nucleação de produtos de hidratação e a formação de uma matriz menos conectada, dificultando fisicamente o transporte de íons cloreto. Esse tipo de interpretação é coerente com estudos que discutem o papel de materiais finos no refinamento microestrutural e na mitigação do transporte de agentes agressivos (Papadakis, 2000; Ribeiro, Labrincha, e Morelli, 2012 e Sharma, Bhartiya, e Das, 2026).

A incorporação conjunta de CF com SA também promoveu redução drástica na permeabilidade. A sílica ativa demonstrou ser eficaz, como visto no traço 0-0-8, já que aos 28 dias apresentou baixo coeficiente (4,07) e evoluiu para a classe "Desprezível" aos 180 dias (1,27).

A combinação de CF e SA resultou em concretos de alto desempenho. Os traços 0-25-8, 50-25-8 e 100-25-8 alcançaram os menores coeficientes ao final do período, todos classificados como "Desprezível". O traço 0-25-8 foi o destaque, com valor final de apenas $0{,}72 \times 10^{-12} m^2/s$, indicando matriz extremamente refinada. Esse comportamento sugere atuação complementar entre o efeito físico de preenchimento e o refino adicional da matriz promovido pela sílica ativa, interpretação coerente com a literatura sobre materiais cimentícios suplementares e transporte de cloretos (Papadakis, 2000; Ribeiro, Labrincha, e Morelli, 2012 e Gjørv, 2015). A análise da taxa de redução do coeficiente de migração sugere cinética de atividade pozolânica tardia. O traço 50-25-8 apresentou a maior redução percentual entre 28 e 180 dias (−76,54%), seguido de perto por 0-25-8 (−73,33%). Por outro lado, os traços com menor redução percentual foram majoritariamente aqueles sem adições minerais (50-0-0 e 100-0-0), sugerindo que, na ausência de adições, o refinamento da rede de poros é mais lento e depende principalmente da hidratação do cimento.

Sintetizando os resultados aos 180 dias, de acordo com a Tabela 4.3, observa-se segmentação do desempenho. A classificação proposta por Nilsson, Ngo, e Gjørv (1998) comprova o potencial das adições minerais não apenas para mitigar os efeitos negativos do AR, mas para elevar o concreto a um patamar superior de durabilidade. É importante ponderar, como alertam Ferreira, Jalali, e Gjørv (2004) e Silvestro e Dal Molin (2018), que ensaios acelerados como o NT Build 492 são excelentes para

Tabela 4.3: Classificação dos concretos quanto à difusividade.

D_{nssm} ($\times 10^{-12}$ **m²/s**)	**Difusividade do concreto**
> 15	Alta
10 – 15	Moderada
5 – 10	Baixa
2,5 – 5	Muito baixa
< 2,5	Desprezível

Fonte: Nilsson, Ngo, e Gjørv (1998).

Tabela 4.4: Coeficiente de migração em regime não estacionário dos concretos e respectivas classes de difusividade segundo Nilsson, Ngo, e Gjørv, 1998.

Traço	**D28** [$\times 10^{-12}$ m²/s]	**D56** [$\times 10^{-12}$ m²/s]	**D180** [$\times 10^{-12}$ m²/s]	**Classe de difusividade**
0–0–0	8,80	6,97	3,35	Muito baixa
50–0–0	12,40	11,31	6,58	Baixa
100–0–0	13,14	12,98	8,20	Baixa
0–25–0	5,88	3,28	1,50	Desprezível
50–25–0	9,44	4,64	2,60	Muito baixa
100–25–0	14,83	7,68	4,82	Muito baixa
0–25–8	2,70	1,77	0,72	Desprezível
50–25–8	4,22	1,79	0,99	Desprezível
100–25–8	6,45	5,28	1,38	Desprezível
0–0–8	4,07	1,91	1,27	Desprezível
50–0–8	4,24	3,50	1,90	Desprezível
100–0–8	4,94	3,66	2,59	Muito baixa

Fonte: Sistematizado pela autora.

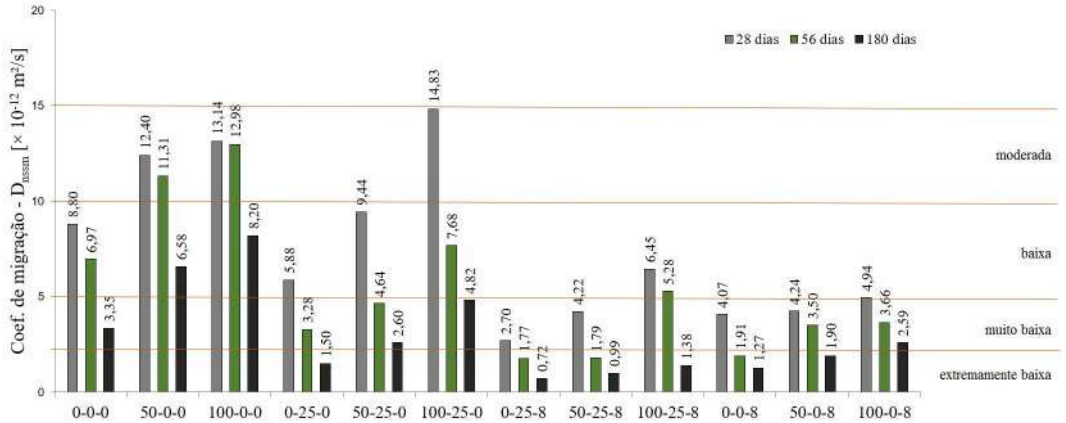


Figura 4.4: Coeficiente de migração.

Fonte: Sistematizado pela autora.

comparação entre traços, mas os valores absolutos podem diferir das condições reais de serviço. Ainda assim, a diferença de performance entre os grupos é significativa e valida as conclusões sobre a eficácia das composições.

No geral, os ensaios de migração mostraram reduções expressivas no coeficiente de penetração de cloretos em misturas com SA e CF. Esse comportamento está de acordo com trabalhos que mostram que a presença de materiais cimentícios suplementares e a escolha do ligante exercem influência direta sobre o refinamento da rede porosa e, consequentemente, sobre o transporte de cloretos (Papadakis, 2000; Ribeiro, Labrincha, e Morelli, 2012; Gjørv, 2015 e Fanton, Lima, e Ribeiro, 2021).Esse resultado assume papel central no presente trabalho, uma vez que os coeficientes de difusão inicial e os fatores de envelhecimento derivados desse ensaio foram utilizados como parâmetros de entrada na modelagem probabilística de vida útil, reforçando a importância do ensaio de migração como base para a análise de durabilidade.

Apesar de Le, Mai, e Ta (2025) terem utilizado método diferente (ASTM C1202, carga passada em Coulombs), suas conclusões qualitativas convergem: a cinza de fundo contribui para microestrutura mais densa e maior resistência à penetração de cloretos, seja por refino físico da rede de poros (nesta pesquisa) ou por reatividade aumentada após moagem (no estudo citado).

Resistividade elétrica superficial e volumétrica

A resistividade elétrica foi utilizada neste estudo como um indicador complementar de durabilidade, permitindo avaliar indiretamente a conectividade dos poros e a mobilidade iônica no concreto, em associação aos resultados obtidos no ensaio de migração de cloretos. As resistividades elétricas superficiais podem ser observadas na figura 4.5 e na tabela 4.5. O maior valor de resistividade elétrica superficial foi observado na mistura com presença de cinza de fundo e sílica ativa (0-25-8), seguido pela amostra contendo apenas sílica ativa (0-0-8).

As resistividades elétricas volumétricas podem ser observadas nas figura 4.6 e na tabela 4.5. A maior resistividade elétrica volumétrica obtida foi apresentada pela mistura com presença de cinza de fundo e sílica ativa (0-25-8), como também foi observado na resistividade elétrica superficial.

A resistividade elétrica, importante indicador indireto da microestrutura e da durabilidade do concreto, foi avaliada pelos métodos superficial e volumétrico. Conforme observado, ambos os ensaios apresentaram boa concordância e revelaram tendências semelhantes. Em todos os traços, houve aumento consistente da resistividade entre 28 e 180 dias, refletindo refinamento contínuo da rede de poros devido à hidratação do cimento e à ação das adições minerais.

Um dos resultados mais expressivos foi o aumento da resistividade com a incorporação de SA e CF. A sílica ativa, em particular, demonstrou ser o agente mais eficaz para aumentar a resistência ao transporte iônico. O traço 0-0-8 (apenas com SA) atingiu resistividade superficial de 98 kΩ cm aos 180 dias, valor mais de quatro vezes superior ao da referência (0-0-0).

Tabela 4.5: Resistividade elétrica superficial e volumétrica dos concretos (kΩ cm).

Traço	Superficial			Volumétrica		
	28 dias	56 dias	180 dias	28 dias	56 dias	180 dias
0–0–0	6,58	12,18	21,60	5,56	11,89	22,91
50–0–0	5,92	13,99	40,50	6,71	13,06	29,74
100–0–0	5,12	11,76	27,25	4,89	11,75	25,07
0–25–0	11,71	26,20	73,62	9,40	25,61	63,80
50–25–0	7,36	19,03	58,21	7,70	18,37	46,00
100–25–0	7,07	16,80	38,56	6,66	15,14	34,47
0–25–8	37,29	73,47	156,56	31,78	66,63	126,07
50–25–8	17,43	39,03	94,72	16,22	38,06	85,24
100–25–8	11,71	39,92	96,12	19,05	34,99	77,15
0–0–8	37,63	56,22	97,98	30,95	48,81	71,80
50–0–8	18,48	29,02	45,16	16,62	28,24	44,04
100–0–8	13,71	25,12	39,13	13,88	27,48	48,05

Fonte: Sistematizado pela autora.

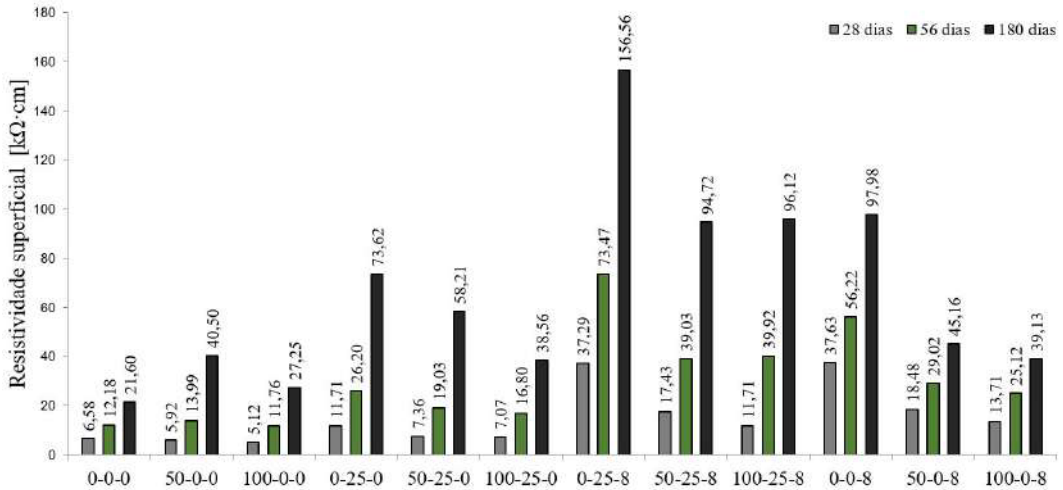


Figura 4.5: Resistividade superficial dos traços.

Fonte: Sistematizado pela autora.

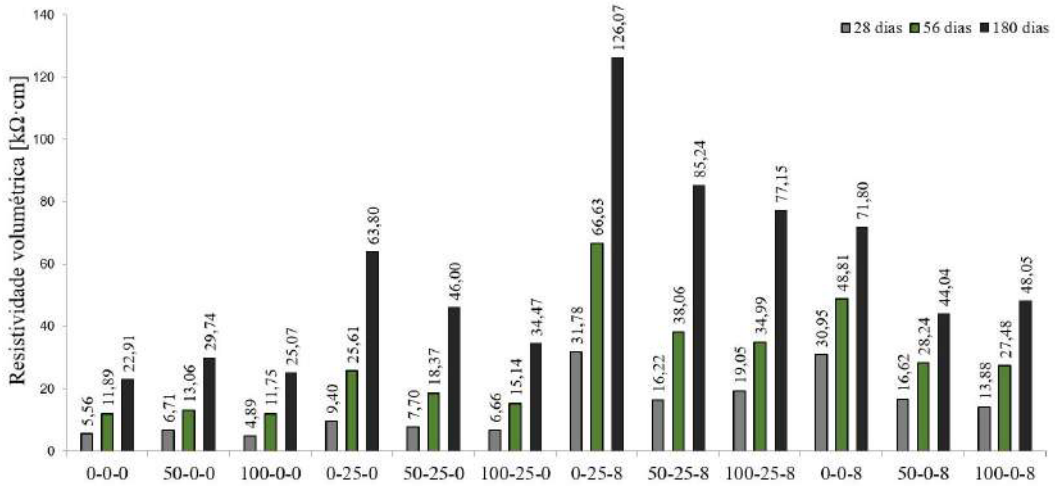


Figura 4.6: Resistividade volumétrica dos traços.

Fonte: Sistematizado pela autora.

A combinação de sílica ativa e cinza de fundo produziu os concretos de mais alto desempenho. O traço 0-25-8 destacou-se com 156,56 kΩ cm, o maior valor do estudo. Os traços 50-25-8 (94,72 kΩ cm) e 100-25-8 (96,12 kΩ cm) também se posicionaram entre os melhores. Esses resultados indicam a eficácia dessas adições na formação de uma microestrutura mais densa e com menor conectividade de poros, em consonância com observações reportadas por Medeiros-Junior (2014), Sengul (2014), Dimitriou, Savva, e Petrou (2018), e Sasanipour, Aslani, e Taherinezhad (2019), que também registraram aumentos expressivos de resistividade em concretos com agregados reciclados e materiais cimentícios suplementares.

Quanto à cinza de fundo, os resultados de resistividade aqui obtidos indicam que sua incorporação contribuiu para uma matriz significativamente menos favorável ao transporte iônico. Enquanto a referência 0-0-0 atingiu 21,60 kΩ cm aos 180 dias, a mistura 0-25-0 alcançou 73,62 kΩ cm, evidenciando microestrutura mais refinada e menos conectada. Esse tipo de resposta é coerente com estudos que relacionam o aumento da resistividade elétrica à redução da porosidade conectada, ao aumento da tortuosidade e à menor difusividade de cloretos (Mostardeiro Neto, 2011 e Andrade, 2026).

A influência do agregado reciclado na resistividade mostrou-se complexa. Em idades jovens (28 dias), os traços com AR e sem adições (50-0-0 e 100-0-0) apresentaram valores ligeiramente inferiores ao de referência, indicando maior facilidade de transporte iônico, conforme descrito por Omary, Ghorbel, e Wardeh (2016), Verian, Ashraf, e Cao (2018), e Le e Bui (2020). Contudo, em idades avançadas (180 dias), o comportamento foi menos linear, com o traço 50-0-0 apresentando valor elevado (40,50 kΩ cm). Independentemente dessa variação, ficou claro que os traços contendo apenas AR não atingiram o patamar dos concretos com adições minerais, reforçando que a qualidade da pasta é o fator dominante para alta resistividade.

De forma complementar, a interpretação dos valores de resistividade elétrica à luz

dos critérios apresentados na metodologia reforça a superioridade dos traços com adições minerais. Considerando as faixas do Boletim 192 do CEB para probabilidade de corrosão (Tabela 3.14), os intervalos propostos pela AASHTO T 358 para resistência à penetração de cloretos (Tabela 3.15) e os valores mínimos discutidos por Andrade para concretos expostos a cloretos (Tabela 3.16), observa-se que os concretos contendo sílica ativa e cinza de fundo enquadraram-se, de modo geral, nas classes mais favoráveis, enquanto os traços sem adições apresentaram desempenho relativamente inferior. Essa interpretação está em consonância com os resultados de migração de cloretos, reforçando que o aumento da resistividade esteve associado à menor mobilidade iônica e, portanto, à maior resistência ao ingresso de agentes agressivos.

Correlações

De forma consistente com os resultados obtidos no ensaio de migração de cloretos, a resistividade elétrica mostrou-se um indicador complementar eficaz da durabilidade. Observou-se correlação inversa estatisticamente significativa: os traços que apresentaram os maiores valores de resistividade elétrica (como 0-25-8, 0-0-8 e 100-25-8) foram os mesmos que registraram os menores coeficientes de migração, sendo classificados com difusividade desprezível à penetração de cloretos.

Essa correspondência reforça a validade da resistividade elétrica como ferramenta não destrutiva e confiável para estimar o desempenho do concreto frente ao ingresso de cloretos em ambientes agressivos. Em linhas gerais, concretos com maiores resistividades tendem a apresentar menor mobilidade iônica e, portanto, menor suscetibilidade ao transporte de cloretos, interpretação compatível com a literatura técnica e experimental sobre o tema (Trocónis de Rincón, 2006; Silvestro e Dal Molin, 2018 e Andrade, 2026). Os resultados obtidos demonstram que a otimização da matriz cimentícia com adições foi a estratégia mais eficaz para garantir simultaneamente alta resistividade e baixa permeabilidade a cloretos.

No geral, observou-se correlação inversa entre os dados de resistividade elétrica (superficial e volumétrica) e o coeficiente de migração de cloretos, com associações negativas estatisticamente significativas ($p < 0{,}05$) e ajustes lineares de magnitude moderada, com R^2 variando de 0,50 a 0,59. As resistividades volumétricas apresentaram melhores ajustes em ambas as idades, especialmente aos 28 dias ($R^2 = 0{,}59$, $p = 0{,}0035$), sugerindo maior sensibilidade na avaliação da durabilidade nessa fase inicial.

Os coeficientes de correlação linear de Pearson (r) variaram entre $-0{,}67$ e $-0{,}76$, como pode ser observado na Tabela 4.6 e nos gráficos (figuras 4.7 a 4.9), demonstrando que concretos com maior resistividade apresentam menor capacidade de transporte iônico. A faixa cinza representa o intervalo de confiança de 95% da regressão linear, indicando a incerteza associada à estimativa do modelo.

No estudo desenvolvido por Sengul (2014), foram investigados fatores que influenciam a resistividade elétrica do concreto, concluindo que tanto condições ambientais quanto características da mistura afetam esse parâmetro. Além disso, foi apresentada

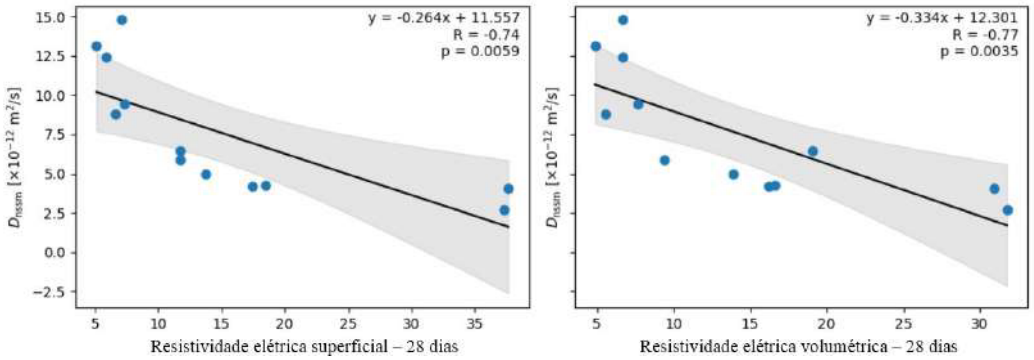


Figura 4.7: Coeficiente de migração e resistividades aos 28 dias.

Fonte: Sistematizado pela autora.

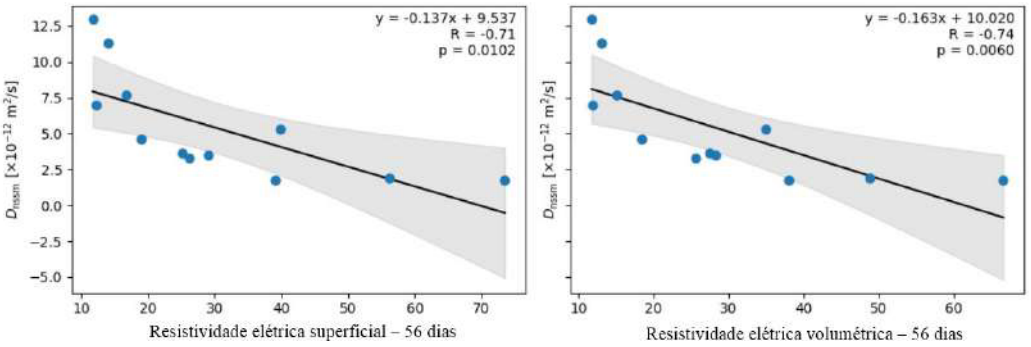


Figura 4.8: Coeficiente de migração e resistividades aos 56 dias.

Fonte: Sistematizado pela autora.

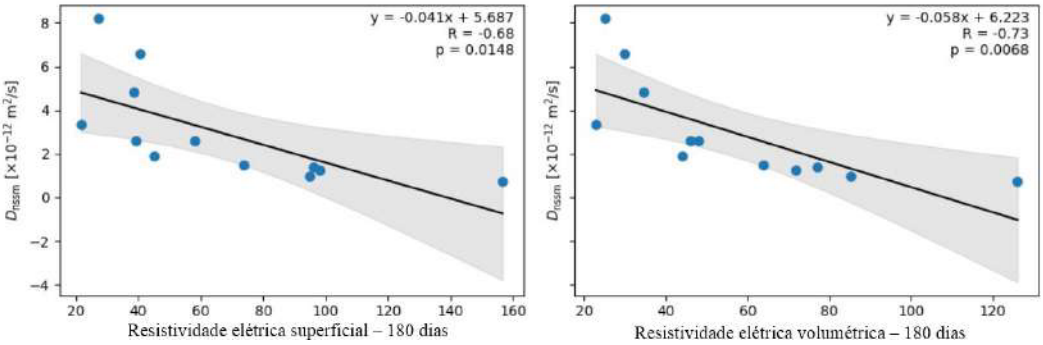


Figura 4.9: Coeficiente de migração e resistividades aos 180 dias.

Fonte: Sistematizado pela autora.

Tabela 4.6: Correlações entre resistividade elétrica e coeficiente de migração D_{nssm}.

Comparação	Equação de regressão	r	R^2
Resis. sup. 28d × D_{nssm} 28d	$D = -0{,}2643\rho + 11{,}5571$	−0,7402	0,5479
Resis. sup. 56d × D_{nssm} 56d	$D = -0{,}1369\rho + 9{,}5367$	−0,7065	0,4991
Resis. sup. 180d × D_{nssm} 180d	$D = -0{,}0410\rho + 5{,}6874$	−0,6810	0,4638
Resis. vol. 28d × D_{nssm} 28d	$D = -0{,}3335\rho + 12{,}3014$	−0,7684	0,5904
Resis. vol. 56d × D_{nssm} 56d	$D = -0{,}1631\rho + 10{,}0199$	−0,7394	0,5467
Resis. vol. 180d × D_{nssm} 180d	$D = -0{,}0575\rho + 6{,}2235$	−0,7320	0,5358

forte correlação entre resistividade elétrica e difusividade de íons cloreto, mostrando boa concordância entre valores estimados e experimentais.

Polder e Peelen (2002), Medeiros-Junior (2014), Sengul (2014), e Dimitriou, Savva, e Petrou (2018) apontam a resistividade elétrica como indicador indireto confiável da durabilidade frente à penetração de íons cloreto. Destaca-se o efeito positivo da SA e da CF, que promoveram maiores resistividades.

Além disso, diversas pesquisas investigam a correlação entre resistividade elétrica e difusividade do concreto frente à ação de íons cloreto (Tabela 4.7). Em vários desses estudos, bem como nos resultados obtidos neste trabalho, observa-se bom coeficiente de correlação, reforçando o potencial da resistividade elétrica como método de monitoramento da penetração de cloretos.

Tabela 4.7: Coeficientes de correlação entre a resistividade elétrica e o coeficiente de difusão de cloretos segundo diversos autores.

Autores	Coeficiente de determinação
Tong e Gjørv (2001)	r^2 = 0,98
Polder e Peelen (2002)	r^2 = 0,60
Santos (2006)	r^2 = 0,92
Medeiros-Junior et al. (2014)	r^2 = 0,83
Andrade et al. (2014)	r^2 = 0,38
Sengul (2014)	r^2 = 0,97
Presuel, Liu e Paredes (2015)	r^2 = 0,84–0,89
Real (2015)	r^2 = 0,87
Noort, Hunger e Spiesz (2016)	r^2 = 0,88
Autora	r^2 = 0,49–0,59

Fonte: Sistematizado pela autora, a partir do IBRACON (2021).

Também foi observado que não houve correlação significativa entre a resistência à compressão e os parâmetros de durabilidade avaliados (resistividade elétrica e coeficiente de migração de cloretos).

Fator de envelhecimento

O fator de envelhecimento (α) representa a taxa de redução temporal da difusividade de cloretos no concreto, sendo um parâmetro fundamental em modelos de previsão de vida útil baseados na segunda lei de Fick. Valores mais elevados de α indicam maior refinamento progressivo da microestrutura ao longo do tempo, refletindo uma melhoria contínua das propriedades de transporte.

Para a determinação de α, foram construídos gráficos em escala logarítmica, considerando $\log(D_{nssm})$ em função de $\log(t)$. A inclinação da regressão linear desses gráficos corresponde ao valor de α para cada traço analisado. Os resultados obtidos são apresentados nas figuras 4.10 e 4.11, enquanto a tabela 4.8 resume os valores de α e os coeficientes de determinação (R^2).

Tabela 4.8: Resumo dos resultados de redução temporal da difusividade de cloretos.

Traço	**Fator de envelhecimento α**	**R^2**
0–0–0	0,530	0,9692
50–0–0	0,353	0,9183
100–0–0	0,268	0,8364
0–25–8	0,717	0,9892
50–25–8	0,751	0,9591
100–25–8	0,862	0,9434
0–25–0	0,734	0,9949
50–25–0	0,672	0,9442
100–25–0	0,583	0,8665
0–0–8	0,597	0,9140
50–0–8	0,441	0,9697
100–0–8	0,342	0,9877

Fonte: Sistematizado pela autora.

De modo geral, observa-se que os valores de α variaram significativamente entre os traços, evidenciando a forte influência da composição do concreto na evolução temporal da difusividade. Os elevados valores de R^2 indicam bom ajuste das regressões lineares, conferindo confiabilidade à determinação experimental do parâmetro.

A análise do efeito do teor de substituição por agregados reciclados (AR) revelou comportamento não uniforme. Para a maioria dos grupos, verificou-se uma tendência de redução de α com o aumento do teor de AR, sugerindo que maiores níveis de substituição podem comprometer a taxa de melhoria da durabilidade ao longo do tempo. Esse comportamento está associado à maior porosidade e à presença de argamassa aderida no AR, fatores que dificultam o refinamento progressivo da microestrutura, conforme discutido por Tang (1996) e Vieira e Dal Molin (2004).

Por outro lado, a incorporação de cinza de fundo (CF) e sílica ativa (SA) demonstrou influência positiva sobre o fator de envelhecimento. A CF, embora não apresente

atividade pozolânica significativa, atua principalmente por efeito fíler, promovendo melhor empacotamento das partículas e redução da porosidade. Já a SA contribui por meio de reações pozolânicas, formando produtos adicionais de hidratação que refinam a microestrutura da matriz cimentícia.

Uma exceção relevante foi observada no grupo que combina CF e SA (traços 0-25-8, 50-25-8 e 100-25-8), no qual o aumento do teor de AR esteve associado a um incremento do fator de envelhecimento (α). Embora esse comportamento contrarie a tendência geral observada nos demais grupos, sua magnitude deve ser interpretada com cautela. Ainda assim, os resultados sugerem que, nessa combinação específica de materiais, pode ter ocorrido uma interação favorável que contribuiu para o refinamento progressivo da microestrutura ao longo do tempo. Essa interpretação é compatível com discussões da literatura sobre a possível contribuição da água previamente absorvida pelo agregado reciclado na continuidade das reações de hidratação Dimitriou, Savva, e Petrou (2018), embora tal mecanismo não tenha sido diretamente avaliado neste estudo.

As figuras 4.10 e 4.11 ilustram graficamente o comportamento descrito, evidenciando a redução progressiva da difusividade com o tempo e as diferenças entre os traços analisados.

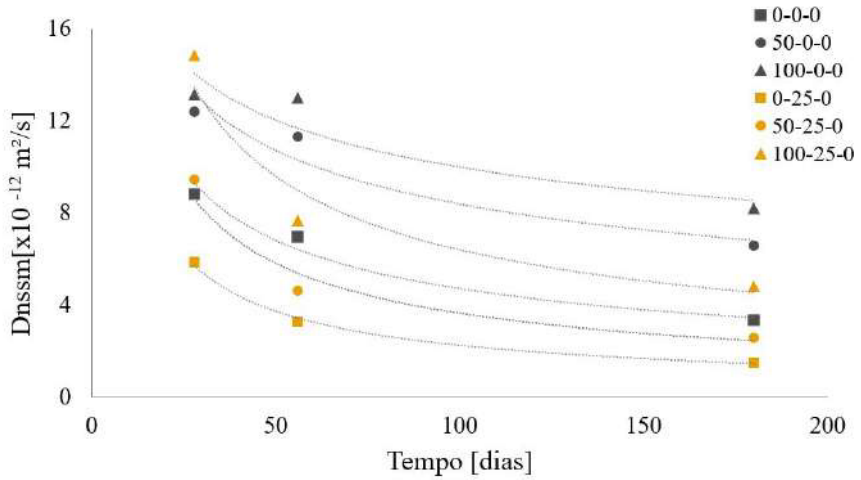


Figura 4.10: Relação entre a difusividade aparente de cloretos e o tempo para diferentes traços de concreto.

Fonte: Sistematizado pela autora.

4.2 Análise probabilística

Modelo

Antes da análise dos resultados, é importante destacar a natureza probabilística das estimativas obtidas. Diferentemente de um modelo determinístico, que forneceria uma única previsão de vida útil, o Duracon, ao empregar Simulação de Monte Carlo,

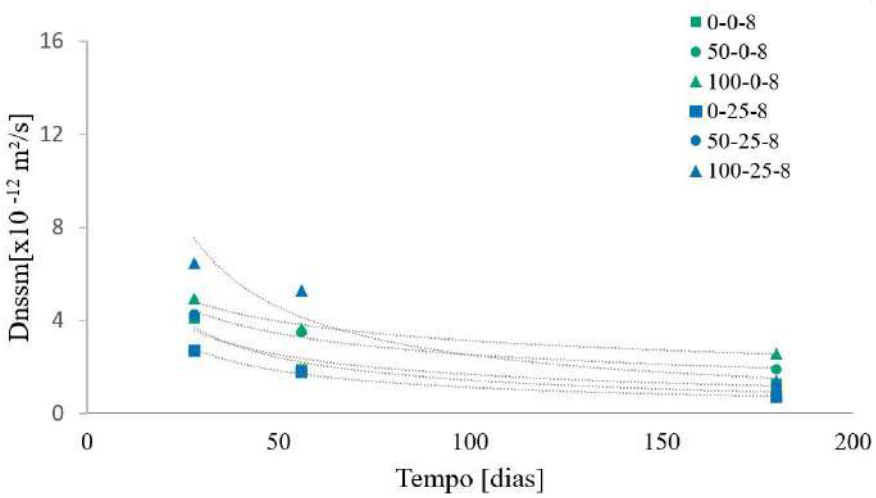


Figura 4.11: Determinação do fator de envelhecimento (α) a partir da regressão linear em escala logarítmica.

Fonte: Sistematizado pela autora.

fornece a evolução temporal da probabilidade de falha. Assim, os resultados apresentados não devem ser interpretados como a idade exata de falha da estrutura, mas como a idade em que é atingido o critério de desempenho adotado. Neste trabalho, esse critério corresponde à idade em que a probabilidade de falha atinge 10% para o início da corrosão (Ferreira, 2004; Lopes, Oliveira, e Cascudo, 2022 e Moro, Keßler, e Torrent, 2025), em consonância com a formulação clássica da confiabilidade estrutural proposta por Cornell (1969), com a abordagem de projeto de durabilidade apresentada por Gjørv (2015) e com o próprio método implementado no Duracon. Os parâmetros de difusão utilizados no modelo foram obtidos a partir do ensaio de migração de cloretos (NT Build 492), previamente apresentado, reforçando a consistência entre a caracterização experimental e a modelagem probabilística adotada.

Essa abordagem é particularmente adequada porque incorpora as incertezas associadas às variáveis de entrada e se alinha à filosofia de projeto baseado em desempenho e confiabilidade discutida na literatura (Magalhães, 2018 e Beck, 2019). Além disso, a coerência física dos resultados, expressa pela resposta sistemática da vida útil às variações de agressividade ambiental, cobrimento e temperatura, reforça a adequação do modelo para representar o fenômeno de penetração de cloretos e para comparar o desempenho relativo dos concretos estudados.

A relevância de incorporar tais incertezas pode ser ilustrada pelos resultados de Dal Molin *et al.* (2016), que mostram que uma variação de apenas 10 mm no cobrimento executado pode deslocar significativamente a vida útil efetiva de uma estrutura, reforçando a pertinência do tratamento probabilístico.

No Duracon, a probabilidade de falha é estimada a partir da solução da 2ª Lei de Fick, combinada com Simulação de Monte Carlo, considerando a variabilidade dos parâmetros que governam o transporte de cloretos até a profundidade da armadura. A falha é definida quando a concentração de cloretos atinge o teor crítico (C_{cr}) na

posição do aço. Como esperado, a precisão estatística da estimativa aumenta com o número de simulações N.

Análise de sensibilidade dos parâmetros de entrada

Para compreender a influência de cada variável no potencial de durabilidade, realizou-se uma análise de sensibilidade avaliando o efeito isolado da agressividade ambiental (via C_s), da espessura de cobrimento (x_c) e da temperatura.

Foram adotados parâmetros consistentes com a literatura e com as recomendações normativas. O cobrimento foi considerado em quatro níveis (40 mm, 50 mm, 60 mm e 70 mm), com variabilidade estatística representada por distribuição normal e coeficiente de variação igual a 0,10. Os coeficientes de difusão inicial D_0 e os fatores de envelhecimento α foram obtidos experimentalmente para cada traço, sendo adotados COV iguais a 0,10 e 0,20, respectivamente. O teor crítico de cloretos (C_{cr}) foi fixado em 0,40% em massa de cimento, com distribuição normal e COV igual a 0,15, conforme indicado por RILEM (1994) e Gjørv (2015).

O teor superficial de cloretos (C_s) foi estabelecido a partir de quatro cenários de exposição. Três deles foram definidos com base no *fib Bulletin 76* (fib Bulletin, 2015), representando condições normativas de exposição marinha: XS1 = 1,00%, XS2 = 2,00% e XS3 = 4,00%. Adicionalmente, foi considerado um cenário local calibrado, com C_s = 2,07%, obtido a partir do estudo de Guimarães (2000). Embora os valores de C_s = 2,00% e C_s = 2,07% sejam próximos, ambos foram mantidos separadamente por representarem um cenário normativo de referência e um cenário ajustado à realidade local. A cada cenário foi associado um coeficiente de variação específico. Foram também consideradas duas temperaturas médias de exposição: 18,26 °C, correspondente à média local, e 30 °C, adotada como condição mais severa, ambas com COV = 0,20. O horizonte de análise foi limitado a 200 anos e, para cada cenário, foram realizadas 10^6 simulações.

Esses parâmetros definem a base da modelagem implementada no Duracon e permitem avaliar, de forma consistente, a influência das condições de exposição e das propriedades do concreto sobre a vida útil estimada.

Resultados para a temperatura de referência (18,26 °C)

Esta seção apresenta os resultados das simulações de vida útil, baseadas nos coeficientes de difusão e fatores de envelhecimento obtidos experimentalmente a partir do ensaio de migração de cloretos. A temperatura de referência de 18,26 °C, correspondente à média anual da região de Rio Grande/RS, foi adotada como base para a análise comparativa do desempenho dos concretos.

Desempenho no cenário local calibrado (C_s = 2,07%)

A influência do cobrimento (x_c) foi avaliada para todos os traços considerando C_s = 2,07%. A Tabela 4.9 apresenta a vida útil característica (t_k), definida como a idade

em que P_f = 10%. De modo geral, os concretos contendo sílica ativa e/ou cinza de fundo apresentaram maior durabilidade. Em diversos casos, o critério de P_f = 10% não foi atingido dentro do horizonte de 200 anos. Nesses casos, o resultado deve ser interpretado apenas como indicativo de que o critério P_f = 10% não foi alcançado dentro da janela temporal adotada. Assim, não se infere a idade exata de falha além desse limite, mas apenas que o concreto apresentou desempenho superior ao horizonte de análise considerado.

Tabela 4.9: Vida útil característica a 18,26 °C e C_s = 2,07% (anos).

Traço	40 mm	50 mm	60 mm	70 mm
0–0–0	6,80	14,39	26,62	44,92
0–0–8	35,96	85,84	168,12	> 200
0–25–0	44,28	119,77	> 200	> 200
0–25–8	> 200	> 200	> 200	> 200
50–0–0	2,16	4,03	6,69	10,30
50–0–8	14,51	28,79	50,38	80,86
50–25–0	11,93	29,10	60,78	113,73
50–25–8	116,62	> 200	> 200	> 200
100–0–0	1,43	2,81	4,50	6,72
100–0–8	7,08	13,89	23,03	35,33
100–25–0	3,45	7,54	14,43	25,08
100–25–8	122,12	> 200	> 200	> 200

Fonte: Sistematizado pela autora.

A Figura 4.12 apresenta a evolução temporal da probabilidade de falha para traços representativos no cenário local calibrado, considerando temperatura de referência e cobrimento fixo em 50 mm. Observa-se clara separação entre os concretos sem adições e aqueles contendo sílica ativa e/ou cinza de fundo. O traço 100-0-0 apresenta crescimento muito acelerado de P_f, atingindo rapidamente valores próximos de 100%, enquanto os concretos com adições minerais mantêm probabilidades de falha inferiores ao critério de 10% ao longo de praticamente todo o horizonte analisado. O comportamento do traço de referência 0-0-0 situa-se em posição intermediária, confirmando visualmente as tendências já observadas nas tabelas de vida útil característica.

De forma complementar, a Figura 4.13 evidencia a forte influência do cobrimento sobre a evolução temporal de P_f, bem como a interação entre cobrimento e composição do concreto. No traço de referência 0-0-0, o aumento do cobrimento desloca progressivamente o cruzamento com o critério P_f = 10% para idades mais elevadas, mas não impede o crescimento expressivo da probabilidade de falha ao longo do horizonte de análise. Em contraste, o traço 100-25-8 mantém P_f substancialmente inferior à do traço de referência e, para a maior parte dos cobrimentos analisados, inferior ao limite de 10%, mesmo para menores cobrimentos, confirmando que a

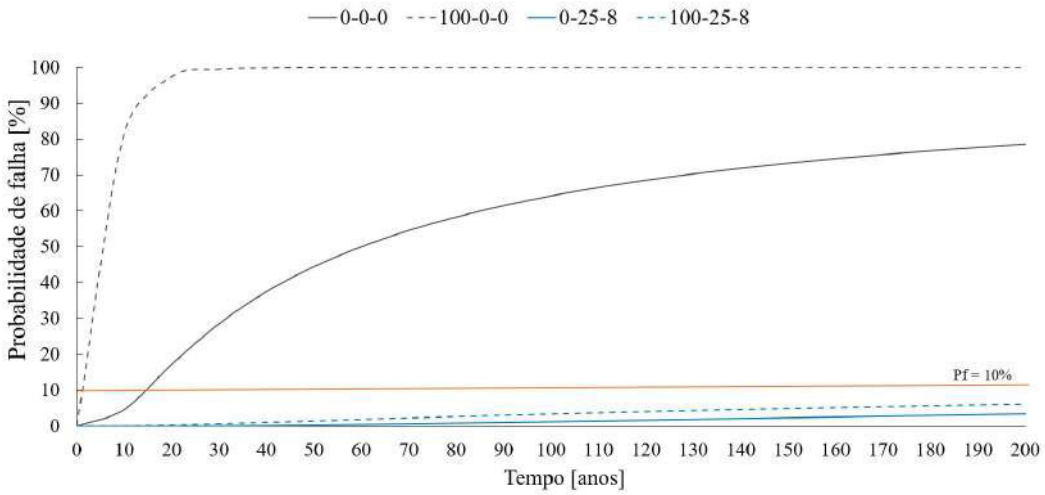


Figura 4.12: Evolução temporal da probabilidade de falha (P_f) para traços representativos no cenário local calibrado (C_s = 2,07%), com T = 18,26 °C e cobrimento fixo em 50 mm. A linha horizontal indica o critério de desempenho adotado na definição da vida útil característica (P_f = 10%).

Fonte: Sistematizado pela autora.

melhoria da composição do concreto apresenta influência mais significativa sobre a durabilidade do que o aumento isolado do cobrimento.

Desempenho no cenário de exposição XS1 (C_s = 1,00%)

A sensibilidade da vida útil à variação do cobrimento também foi investigada para o cenário XS1. A Tabela 4.10 reúne os resultados correspondentes. Em comparação com o cenário local calibrado e com os cenários mais agressivos, nota-se maior frequência de valores superiores a 200 anos, sobretudo para misturas com adições minerais. Nos casos em que $t_k > 200$, o resultado indica apenas que o critério de desempenho (P_f = 10%) não foi atingido dentro do horizonte temporal adotado.

Desempenho no cenário de exposição XS2 (C_s = 2,00%)

No cenário XS2, a tendência geral observada em XS1 é mantida, porém com redução consistente da vida útil em todos os traços. A Tabela 4.11 mostra que o número de casos com $t_k > 200$ diminui, sobretudo nos concretos sem adições minerais. Ainda assim, o efeito benéfico do aumento do cobrimento e da incorporação de sílica ativa e cinza de fundo permanece evidente.

Desempenho no cenário de exposição XS3 (C_s = 4,00%)

Sob o cenário XS3, os resultados mostram redução adicional da vida útil característica, refletindo a maior severidade imposta pelo teor superficial de cloretos. Mesmo assim, os concretos com sílica ativa e/ou cinza de fundo continuam apresentando desempenho superior ao concreto de referência e aos traços produzidos apenas com

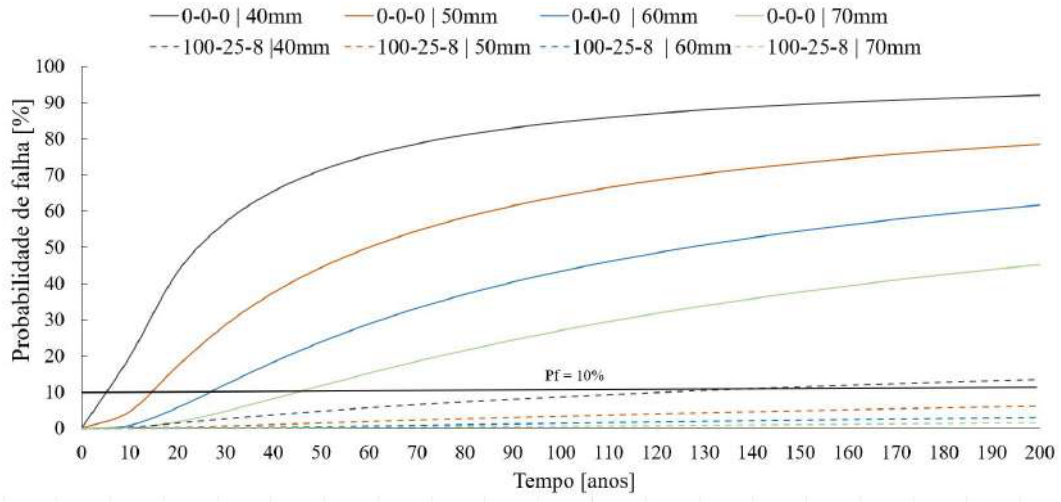


Figura 4.13: Evolução temporal da probabilidade de falha (P_f) para diferentes cobrimentos nos traços 0-0-0 e 100-25-8, no cenário local calibrado (C_s = 2,07%) e T = 18,26 °C. As linhas contínuas representam o traço de referência, enquanto as tracejadas representam o traço com 100 % de agregado reciclado e adições minerais. A linha horizontal indica o critério de desempenho adotado (P_f = 10%).

Fonte: Sistematizado pela autora.

Tabela 4.10: Vida útil característica no cenário XS1 com T = 18,26 °C (anos).

Traço	40 mm	50 mm	60 mm	70 mm
0–0–0	21,45	47,49	90,98	157,55
0–0–8	151,91	> 200	> 200	> 200
0–25–0	> 200	> 200	> 200	> 200
0–25–8	> 200	> 200	> 200	> 200
50–0–0	5,14	9,72	16,41	25,58
50–0–8	41,24	84,17	150,42	> 200
50–25–0	35,86	138,08	> 200	> 200
50–25–8	> 200	> 200	> 200	> 200
100–0–0	3,48	6,23	10,04	15,04
100–0–8	18,14	34,27	57,61	89,37
100–25–0	11,30	26,33	52,79	95,14
100–25–8	> 200	> 200	> 200	> 200

Fonte: Sistematizado pela autora.

Tabela 4.11: Vida útil característica no cenário XS2 e T = 18,26 °C (anos).

Traço	40 mm	50 mm	60 mm	70 mm
0–0–0	6,57	13,97	25,96	43,84
0–0–8	36,77	83,88	164,65	> 200
0–25–0	46,86	127,13	> 200	> 200
0–25–8	> 200	> 200	> 200	> 200
50–0–0	2,09	3,89	6,47	9,99
50–0–8	14,07	27,98	49,14	78,98
50–25–0	11,53	28,38	59,30	111,74
50–25–8	114,46	> 200	> 200	> 200
100–0–0	1,45	2,70	4,36	6,50
100–0–8	7,22	13,43	22,31	34,28
100–25–0	3,32	7,34	14,05	24,59
100–25–8	119,28	> 200	> 200	> 200

Fonte: Sistematizado pela autora.

agregado reciclado e cimento Portland. Em especial, os maiores cobrimentos mantêm papel importante na redução do avanço da frente de cloretos.

Tabela 4.12: Vida útil característica no cenário XS3 e T = 18,26 °C (anos).

Traço	40 mm	50 mm	60 mm	70 mm
0–0–0	3,05	6,44	11,92	20,11
0–0–8	15,78	36,11	70,72	125,46
0–25–0	17,18	46,14	103,40	> 200
0–25–8	82,88	> 200	> 200	> 200
50–0–0	1,00	2,06	3,34	5,24
50–0–8	6,95	13,81	24,44	38,97
50–25–0	4,68	11,32	23,49	44,12
50–25–8	40,54	112,73	> 200	> 200
100–0–0	1,00	1,43	2,26	3,58
100–0–8	3,82	7,09	11,77	18,09
100–25–0	1,49	3,27	6,18	10,77
100–25–8	34,81	117,42	> 200	> 200

Fonte: Sistematizado pela autora.

Análise da influência da temperatura (30 °C)

Nesta subseção, avalia-se o efeito do aumento da temperatura para 30 °C, mantendo-se as mesmas combinações de composição, cobrimento e agressividade ambiental. Essa comparação permite isolar o efeito térmico sobre a vida útil estimada e quantificar sua influência relativa em cada cenário de exposição.

Impacto da temperatura no cenário local calibrado (C_s = 2,07%)

Com o aumento da temperatura para 30 °C no cenário local calibrado, observa-se aceleração clara da probabilidade de falha e redução da vida útil característica em todos os traços. A hierarquia de desempenho, contudo, permanece preservada: as misturas com sílica ativa e/ou cinza de fundo continuam se destacando em relação aos concretos sem adições, enquanto os traços com altos teores de agregado reciclado e sem materiais complementares apresentam os menores tempos para P_f = 10%. Esse comportamento está associado ao aumento da mobilidade iônica em temperaturas mais elevadas, o que acelera o transporte de cloretos na matriz cimentícia, conforme previsto pela relação de Arrhenius.

Tabela 4.13: Vida útil característica no cenário C_s = 2,07% e T = 30 °C (anos).

Traço	40 mm	50 mm	60 mm	70 mm
0–0–0	2,72	5,70	10,48	17,60
0–0–8	11,41	31,03	60,53	106,69
0–25–0	11,70	31,38	71,06	142,67
0–25–8	68,37	179,51	> 200	> 200
100–0–0	1,00	1,31	2,21	3,29
100–0–8	3,47	6,45	10,70	16,42
100–25–0	1,33	2,87	5,41	9,33
100–25–8	27,60	90,81	> 200	> 200
50–0–0	1,03	1,84	3,10	4,76
50–0–8	6,24	12,33	21,55	34,58
50–25–0	4,06	9,65	19,91	36,93
50–25–8	33,26	91,03	> 200	> 200

Fonte: Sistematizado pela autora.

A Figura 4.14 apresenta o efeito da temperatura sobre a evolução da probabilidade de falha para traços contrastantes, mantendo fixos o cenário local calibrado e o cobrimento em 50 mm. Observa-se que a elevação da temperatura de 18,26 °C para 30 °C acelera o crescimento de P_f em ambos os concretos, reduzindo a vida útil característica estimada. Apesar disso, a hierarquia de desempenho entre os traços permanece preservada, indicando que a composição do concreto continua sendo determinante mesmo sob condição térmica mais severa.

Impacto da temperatura no cenário XS1

No cenário XS1, a elevação da temperatura também produz redução sistemática da vida útil. Apesar disso, vários traços com adições minerais continuam apresentando valores bastante elevados, inclusive superiores ao horizonte de 200 anos em alguns casos, sobretudo para maiores cobrimentos. A comparação com os resultados a 18,26 °C confirma a forte influência térmica sobre o processo de difusão dos cloretos.

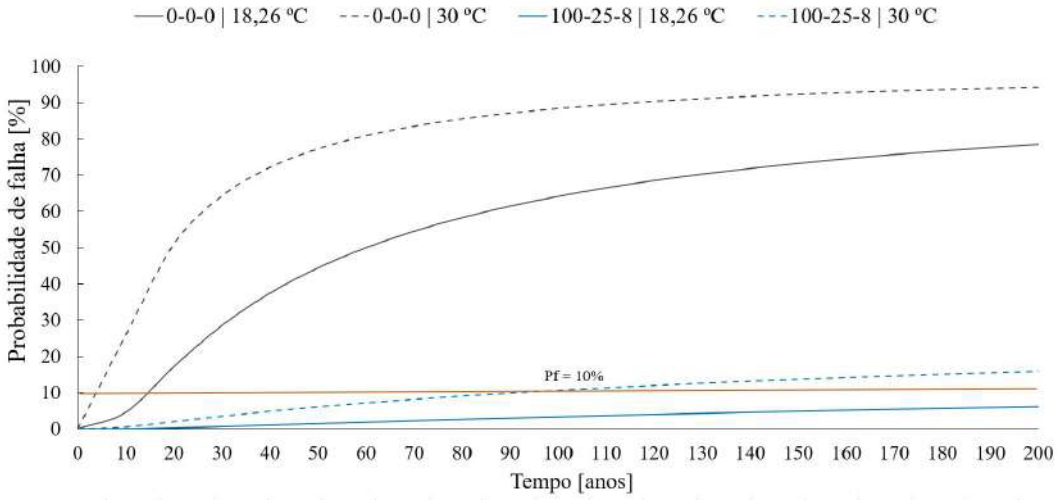


Figura 4.14: Influência da temperatura na evolução da probabilidade de falha (P_f) para traços contrastantes no cenário local calibrado (C_s = 2,07%) e cobrimento fixo. A elevação da temperatura de 18,26 °C para 30 °C desloca as curvas para maiores probabilidades de falha em menores idades, sem alterar a hierarquia de desempenho entre os concretos.

Fonte: Sistematizado pela autora.

Tabela 4.14: Vida útil característica no cenário XS1 e T = 30 °C (anos).

Traço	40 mm	50 mm	60 mm	70 mm
0–0–0	8,04	17,66	33,77	58,47
0–0–8	51,33	128,67	> 200	> 200
0–25–0	> 200	> 200	> 200	> 200
0–25–8	> 200	> 200	> 200	> 200
100–0–0	1,68	3,04	4,86	7,27
100–0–8	8,25	15,54	26,11	40,52
100–25–0	4,04	9,21	18,31	32,87
100–25–8	> 200	> 200	> 200	> 200
50–0–0	2,35	4,40	7,40	11,51
50–0–8	17,00	34,63	62,00	101,39
50–25–0	15,80	41,28	91,11	177,82
50–25–8	> 200	> 200	> 200	> 200

Fonte: Sistematizado pela autora.

Impacto da temperatura no cenário XS2

No cenário XS2 a 30 °C, o efeito combinado do maior teor superficial de cloretos com a temperatura elevada reduz de maneira importante a vida útil projetada. Mesmo assim, os concretos com adições minerais mantêm desempenho relativamente superior, especialmente para cobrimentos de 60 mm e 70 mm.

Tabela 4.15: Vida útil característica no cenário XS2 e T = 30 °C (anos).

Traço	40 mm	50 mm	60 mm	70 mm
0–0–0	2,35	4,95	9,19	15,55
0–0–8	12,02	27,49	54,20	96,34
0–25–0	12,45	33,37	75,53	151,77
0–25–8	60,88	162,72	> 200	> 200
50–0–0	1,00	1,58	2,70	4,18
50–0–8	5,45	10,86	19,12	30,86
50–25–0	3,47	8,35	17,42	32,68
50–25–8	29,21	81,45	189,70	> 200
100–0–0	1,00	1,20	1,97	2,91
100–0–8	3,06	5,67	9,43	14,52
100–25–0	1,16	2,47	4,70	8,16
100–25–8	23,74	80,08	> 200	> 200

Fonte: Sistematizado pela autora.

Impacto da temperatura no cenário XS3

No cenário XS3 a 30 °C, obtêm-se os menores valores de vida útil de toda a análise. Nessa condição, os concretos sem adições e com maior teor de agregado reciclado tornam-se extremamente vulneráveis, enquanto os traços com sílica ativa e/ou cinza de fundo mantêm melhor desempenho relativo. Mesmo sob essa combinação severa, o aumento do cobrimento continua sendo uma estratégia eficaz para ampliar a durabilidade estimada.

EEm termos comparativos, a hierarquia de desempenho entre os traços permaneceu praticamente preservada em todos os cenários analisados, indicando que a composição do concreto exerce influência sistemática sobre a vida útil estimada. Por outro lado, o aumento da temperatura e da agressividade ambiental (C_s) desloca consistentemente as curvas para menores idades características, evidenciando que o desempenho final resulta da interação entre a qualidade intrínseca do material e as condições de exposição.

Tabela 4.16: Vida útil característica no cenário XS3 e T = 30 °C (anos).

Traço	40 mm	50 mm	60 mm	70 mm
0–0–0	1,00	2,31	4,05	7,13
0–0–8	5,11	11,78	22,36	41,15
0–25–0	4,66	12,17	27,25	54,30
0–25–8	22,54	59,68	133,25	> 200
50–0–0	1,00	1,00	1,51	2,20
50–0–8	2,67	5,35	9,44	15,16
50–25–0	1,46	3,39	6,93	12,89
50–25–8	10,44	28,62	66,12	134,85
100–0–0	1,00	1,00	1,00	1,55
100–0–8	1,63	3,01	4,98	7,64
100–25–0	1,00	1,14	2,11	3,60
100–25–8	7,22	23,15	62,39	146,45

Fonte: Sistematizado pela autora.

Discussão dos resultados

A análise probabilística desenvolvida reflete diretamente os resultados experimentais obtidos no ensaio de migração de cloretos, que constituiu a base para a definição dos parâmetros de entrada do modelo.

Influência da agressividade ambiental no cenário local calibrado (C_s = 2,07%)

A análise da vida útil estimada para o cenário local calibrado evidencia a forte interação entre qualidade do concreto, espessura de cobrimento (x_c) e temperatura (T). Em todos os traços, o aumento do cobrimento resultou em prolongamento consistente da vida útil característica, confirmando o papel do cobrimento como barreira física ao ingresso de cloretos.

A comparação entre 18,26 °C e 30 °C mostra que a elevação da temperatura compromete significativamente a durabilidade estimada. Essa redução é sistemática em todos os traços e está de acordo com o efeito descrito pelo modelo de Arrhenius, segundo o qual o aumento da temperatura acelera o transporte iônico e antecipa o atingimento do teor crítico de cloretos na profundidade da armadura.

Os traços contendo sílica ativa e cinza de fundo (0–25–8, 50–25–8 e 100–25–8) apresentaram, de forma consistente, as maiores vidas úteis estimadas. Mesmo sob 30 °C, esses concretos mantiveram desempenho muito superior ao dos concretos sem adições, sobretudo para cobrimentos de 60 mm e 70 mm. Esse comportamento sugere que a combinação entre o efeito físico da cinza de fundo e o refino microestrutural promovido pela sílica ativa é altamente eficaz para reduzir a difusividade aos cloretos, compensando inclusive os efeitos adversos associados ao uso de agregados reciclados. O traço 0–25–0 também apresentou desempenho bastante favorável, superando o concreto de referência em praticamente todas as combinações de cobrimento e

temperatura.

Em contraste, os concretos produzidos apenas com agregado reciclado e cimento Portland (100–0–0 e 50–0–0) apresentaram as menores projeções de vida útil. O traço 100–0–0, em particular, exibiu vidas úteis reduzidas mesmo para cobrimentos mais elevados, indicando maior vulnerabilidade quando utilizado sem materiais complementares capazes de refinar a estrutura porosa.

Influência da agressividade ambiental nos cenários XS1, XS2 e XS3

A comparação entre os cenários XS1, XS2 e XS3 evidencia redução progressiva da vida útil à medida que aumenta a agressividade ambiental. Para uma mesma composição e para um mesmo cobrimento, a elevação de C_s intensifica o gradiente de concentração e acelera a penetração dos íons cloreto, reduzindo o tempo necessário para atingir $P_f = 10\%$. Em todos os cenários, observa-se também que a vida útil aumenta com o cobrimento e diminui com a temperatura.

No cenário XS1, diversos traços com adições minerais apresentaram vidas úteis superiores ao horizonte de análise, principalmente para cobrimentos mais elevados. Em XS2, essa tendência ainda se mantém, mas com redução clara do número de casos em que $t_k > 200$. Já em XS3, os efeitos da agressividade tornam-se mais pronunciados, de modo que apenas as misturas de melhor desempenho, associadas a maiores cobrimentos, mantêm vidas úteis elevadas.

Influência da espessura de cobrimento (x_c)

A espessura de cobrimento confirmou sua função como uma das variáveis mais relevantes na previsão de vida útil. Em todos os cenários analisados, o incremento de x_c resultou em aumento consistente da idade correspondente a $P_f = 10\%$, embora a magnitude desse ganho varie conforme a composição, a temperatura e a agressividade ambiental. Em cenários mais severos, o benefício do cobrimento permanece evidente, mas tende a ser parcialmente limitado pela maior intensidade do transporte iônico.

Influência da temperatura (T)

A elevação da temperatura de serviço compromete de forma significativa a vida útil estimada. Comparando 18,26 °C e 30 °C, observa-se redução expressiva da idade correspondente a $P_f = 10\%$ em todas as composições estudadas, com intensidade dependente do traço, do cobrimento e da agressividade ambiental. Apesar dessa redução, a hierarquia de desempenho é preservada: concretos com sílica ativa e/ou cinza de fundo e maiores cobrimentos continuam apresentando as maiores durabilidades relativas.

Desempenho dos concretos com adições minerais e agregados reciclados

Os resultados confirmam a tendência de redução de desempenho com o aumento do teor de agregado reciclado quando não são empregadas adições minerais, especial-

mente nos traços 100–0–0 e 50–0–0, comportamento associado à maior porosidade e à maior heterogeneidade da ZTI, em concordância com Evangelista e de Brito (2007), Thomas *et al.* (2013), e de Brito *et al.* (2016). Em contrapartida, a incorporação de sílica ativa promove ganhos expressivos, associados ao refino microestrutural e à redução da difusividade.

Observou-se ainda superioridade projetada dos traços com adições combinadas (0–25–8, 50–25–8 e 100–25–8), evidenciando a ação complementar entre a sílica ativa e a cinza de fundo, em linha com a interpretação proposta por Papadakis (2000). As simulações no Duracon quantificaram esse benefício em termos de décadas adicionais de vida útil estimada.

Por fim, a realização de 10^6 simulações conferiu boa estabilidade estatística às estimativas obtidas, sendo esse número compatível com a literatura de confiabilidade estrutural e durabilidade baseada em probabilidade (Ferreira, 2004 e Melchers e Beck, 2018).

Esses resultados confirmam que a avaliação da durabilidade deve ser conduzida de forma integrada, combinando ensaios experimentais representativos dos mecanismos de transporte com modelagem probabilística. Nesse contexto, o ensaio de migração de cloretos mostrou-se fundamental para a definição dos parâmetros do modelo, enquanto a análise probabilística permitiu quantificar o desempenho dos concretos em diferentes condições de exposição.

4.2.1 Discussão geral dos resultados

Nesse contexto, destaca-se que o coeficiente de migração de cloretos (D_{nssm}) constitui o parâmetro mais representativo do desempenho frente à penetração de íons cloreto, uma vez que está diretamente associado aos mecanismos físicos de transporte no concreto. Por outro lado, os resultados de absorção capilar e resistividade elétrica devem ser interpretados como indicadores indiretos, relacionados à conectividade dos poros e à qualidade da microestrutura da matriz cimentícia.

A dosagem de concretos com agregados reciclados (AR) envolve desafios específicos, principalmente em razão da maior porosidade e da maior absorção de água desses materiais em comparação aos agregados naturais (Evangelista e de Brito, 2007 e de Brito *et al.*, 2016). Essas características tendem a afetar tanto o comportamento no estado fresco quanto o desempenho mecânico e a durabilidade no estado endurecido, sendo esta última particularmente crítica em ambientes agressivos. A complexidade desse sistema é tal que estudos recentes, como o de Zhang e Zhao (2025), vêm propondo metodologias de dosagem baseadas em parâmetros reológicos e microestruturais, com o objetivo de tornar mais previsível o comportamento de concretos com elevadas taxas de substituição por AR.

De forma geral, os resultados experimentais deste trabalho revelaram uma interação complexa entre os constituintes da mistura, com efeitos distintos sobre a resistência à compressão e sobre a durabilidade frente à penetração de cloretos. No que se refere à resistência à compressão, observou-se, em concordância com a literatura

Evangelista e de Brito (2007) e de Brito *et al.* (2016), que a substituição do agregado natural por AR (traços 50-0-0 e 100-0-0) resultou em redução da resistência em todas as idades avaliadas. Esse comportamento é compatível com a hipótese de que a menor qualidade da zona de transição interfacial (ZTI), a presença de pasta antiga aderida e a maior heterogeneidade do material reciclado tenham contribuído para a redução da resistência observada.

A incorporação isolada de cinza de fundo (CF) como substituição parcial da areia natural (traço 0-25-0) mostrou efeito claramente benéfico sobre a resistência, superando inclusive o concreto de referência (0-0-0). Esse resultado sugere contribuição importante do efeito fíler e do empacotamento de partículas. Em contraste, a sílica ativa (SA) empregada isoladamente (traços com final -8, sem CF) apresentou resposta menos consistente em termos de resistência aos 28 dias. Esse comportamento, embora não esperado, pode estar relacionado a fatores como dificuldades de dispersão da sílica ativa, aumento da demanda de água ou limitações no processo de mistura, hipóteses que exigiriam investigação específica para confirmação. Quando CF e SA foram combinadas em concretos com AR, observou-se recuperação parcial do desempenho mecânico. O traço 100-25-8, por exemplo, apresentou resistência aos 28 dias de 40,52 MPa, superior à do traço 100-0-0 (32,97 MPa), embora ainda inferior à do concreto de referência (45,93 MPa). Isso indica que, do ponto de vista mecânico, as adições e substituições estudadas mitigam, mas não eliminam completamente, os efeitos negativos associados ao uso de AR.

Esse comportamento é coerente com resultados reportados por Jan *et al.* (2025), que observaram ganhos de resistência em concretos com agregados reciclados ao empregar ligantes mais reativos, embora com composição distinta da utilizada neste estudo. Apesar das diferenças entre os sistemas, ambos os trabalhos convergem ao mostrar que estratégias de refinamento microestrutural podem compensar parcialmente a menor qualidade da ZTI e melhorar o desempenho global do concreto reciclado.

O comportamento misto observado na resistência também é compatível com a interpretação de Alnezami *et al.* (2025), que destacam a existência de efeitos não lineares em misturas multicomponentes com resíduos. Em sistemas dessa natureza, o desempenho final depende do balanço entre os efeitos positivos do refinamento granulométrico e da densificação microestrutural e os efeitos negativos decorrentes da maior porosidade e heterogeneidade introduzidas pelos agregados reciclados. Nesse contexto, a aparente redução de resistência aos 180 dias em alguns traços deve ser interpretada com cautela, sendo mais plausivelmente atribuída à variabilidade experimental e ao controle tecnológico do que a uma degradação intrínseca do material, conforme discutido com base em Magalhães (2014).

Em relação à durabilidade frente à penetração de cloretos, a análise foi conduzida principalmente com base nos resultados do ensaio de migração (NT Build 492), enquanto os ensaios de absorção capilar e resistividade elétrica foram empregados como suporte interpretativo dos mecanismos de transporte e da conectividade dos poros. A sílica ativa, em particular, mostrou elevada eficácia, em linha com seu conhecido papel

no refino microestrutural, na redução da conectividade dos poros e na diminuição da permeabilidade aparente (Shi *et al.*, 2012; Neville, 2016 e Henriques *et al.*, 2024). Esse contraste entre resposta mecânica e resposta de durabilidade constitui um dos principais achados deste trabalho, pois mostra que ganhos modestos em resistência não impedem melhorias expressivas no desempenho frente ao transporte de cloretos.

Nesses casos, a vida útil estimada não apenas compensou o efeito negativo associado ao uso de AR, mas em diversos cenários superou a do concreto de referência, inclusive sob condições mais severas de exposição e temperatura. Esse comportamento indica efeito complementar entre a SA, que atua no refinamento da matriz cimentícia, e a CF, que contribui por empacotamento físico e redução da conectividade capilar. Em conjunto, esses mecanismos resultaram em menores parâmetros de transporte e, consequentemente, em maior resistência à penetração de cloretos, em concordância com a interpretação de Papadakis (2000) e Thomas *et al.* (2013).

Esse tipo de resposta também encontra respaldo em estudos recentes. Ortiz-Lozano *et al.* (2025), por exemplo, verificaram que concretos com 100% de agregados mistos reciclados podem apresentar desempenho de durabilidade comparável ao de concretos convencionais quando o processo de mistura e o controle da condição dos agregados são adequadamente conduzidos.

Assim como neste estudo, Al-Kroom et al. (2025) também observaram que, em traços mais densos, a combinação de sílica ativa e nanosílica melhora a durabilidade e a resistência à penetração de cloretos. Resultados semelhantes foram reportados por Montazeri *et al.* (2025), que verificaram reduções expressivas no coeficiente de migração de cloretos e evidências de redução da rede capilar em concretos com cinza da casca de arroz. Embora a natureza do material cimentício suplementar seja distinta da empregada neste estudo, ambos os trabalhos convergem ao indicar que a incorporação de materiais finos reativos ou de efeito fíler pode reduzir a conectividade capilar e melhorar a resistência ao transporte iônico.

Em linha semelhante, Chen *et al.* (2025a) observaram que a combinação de adições minerais em concretos de matriz mais densa resultou em reduções substanciais no coeficiente aparente de difusão de cloretos, reforçando a importância do refino microestrutural como mecanismo central de durabilidade em meios ricos em sais. Em conjunto, esses estudos corroboram a interpretação de que o principal mecanismo de melhoria observado nesta pesquisa está associado à refinamento da estrutura porosa, com consequente redução dos parâmetros de transporte e aumento da vida útil projetada.

Em termos mais amplos, os estudos citados convergem para um mesmo mecanismo dominante: a melhoria da durabilidade está fortemente associada ao refinamento microestrutural da matriz e da ZTI. Seja por efeito pozolânico, seja por efeito fíler, a redução da conectividade capilar leva a menores coeficientes de transporte e, portanto, a maiores vidas úteis projetadas. Essa convergência é particularmente importante porque mostra que, mesmo quando os ganhos em resistência mecânica são modestos, a melhoria microestrutural ainda pode ser suficiente para elevar de

forma significativa o desempenho frente à penetração de cloretos.

Os resultados desta pesquisa reforçam essa interpretação, indicando que o desempenho do concreto frente à penetração de agentes agressivos está diretamente ligado à microestrutura da matriz cimentícia e, em particular, à qualidade da zona de transição interfacial (ZTI). A absorção capilar e a resistividade elétrica, tomadas como indicadores indiretos de permeabilidade e transporte iônico, evidenciaram a maior vulnerabilidade dos concretos com elevados teores de AR, confirmando que a presença de argamassa aderida intensifica a conectividade dos poros e reduz a resistência ao transporte de cloretos.

Em contrapartida, a incorporação de sílica ativa e cinza de fundo demonstrou efeito sinérgico na melhoria do desempenho de durabilidade, promovendo redução da absorção, aumento da resistividade elétrica e elevação do fator de envelhecimento (α). Esses resultados indicam que o uso de adições minerais contribui para o refinamento progressivo da microestrutura e para a redução da conectividade capilar, mecanismos diretamente associados ao aumento da durabilidade a longo prazo.

Esse comportamento também se refletiu na resistência mecânica, onde as perdas observadas nos traços com altos teores de AR foram parcialmente compensadas pelo uso combinado de SA e CF. Ainda que não tenha havido recuperação total da resistência em relação ao concreto de referência, os resultados obtidos demonstram a viabilidade técnica da produção de concretos estruturais com agregados reciclados de primeira geração. Observa-se, por exemplo, que o traço 100-0-0 atingiu resistência à compressão de 32,97 MPa aos 28 dias, valor compatível com diversas aplicações estruturais, embora inferior aos 45,93 MPa do traço de referência. Esse resultado reforça que a limitação mecânica não inviabiliza o uso do material, especialmente quando o desempenho de durabilidade é considerado de forma integrada.

Também merece destaque o fato de que os coeficientes de migração utilizados neste trabalho foram determinados pela NT Build 492 NORDTEST (1999), procedimento amplamente empregado em estudos recentes. Embora esse ensaio represente um regime não estacionário de transporte, os valores obtidos apresentam ordem de grandeza compatível com outros parâmetros de transporte reportados na literatura, permitindo comparações físicas coerentes entre diferentes investigações. Assim, mesmo sob diferentes metodologias experimentais, a tendência geral permanece a mesma: a densificação da matriz cimentícia e da ZTI é o fator decisivo para a mitigação da penetração de cloretos.

Por fim, a análise probabilística mostrou que a combinação entre sílica ativa e cinza de fundo foi altamente eficaz em mitigar, e em muitos casos reverter, o efeito adverso do uso de AR sobre a vida útil estimada. A realização de 10^6 simulações conferiu boa estabilidade estatística às estimativas, sendo compatível com a literatura de confiabilidade estrutural e durabilidade baseada em probabilidade (Ferreira, 2004 e Melchers e Beck, 2018).

Em síntese, os resultados indicam que, embora a substituição total de agregados naturais por reciclados ainda imponha limitações ao desempenho mecânico, o desem-

penho frente à penetração de cloretos pode ser substancialmente melhorado por meio da seleção adequada de adições minerais e do refinamento da matriz cimentícia. Nesse contexto, o coeficiente de migração de cloretos (D_{nssm}) mostrou-se o parâmetro mais importante para avaliação da durabilidade, enquanto os ensaios de absorção capilar e resistividade elétrica contribuíram de forma complementar para a interpretação dos mecanismos de transporte e da evolução microestrutural do concreto. A utilização estratégica de sílica ativa e cinza de fundo mostrou-se capaz de produzir concretos com vida útil estimada igual ou superior à do concreto de referência, reforçando a viabilidade técnica dessa abordagem para estruturas expostas a ambientes marinhos.

5 Conclusões

Este trabalho teve como objetivo central avaliar, experimental e probabilisticamente, a viabilidade técnica de concretos produzidos com agregados reciclados (AR), cinza de fundo (CF) em substituição parcial da areia fina e sílica ativa (SA) como substituto parcial do cimento, com foco na durabilidade frente à penetração de cloretos.

A análise integrada dos resultados experimentais, associada à comparação com a literatura, permitiu identificar os principais efeitos do uso de agregados reciclados (AR), sílica ativa (SA) e cinza de fundo (CF) sobre o desempenho mecânico e a durabilidade dos concretos. Verificou-se que a substituição integral por AR comprometeu essas propriedades, comportamento associado à maior heterogeneidade do material, à presença de argamassa aderida e à formação de zonas de transição interfacial mais frágeis.

Por outro lado, a incorporação de SA e CF mostrou-se eficaz em mitigar esses efeitos, promovendo melhorias nos parâmetros de transporte e na evolução microestrutural do concreto, com impacto direto sobre a durabilidade frente à penetração de cloretos.

Dentro das delimitações estabelecidas (8 % de SA, 50 %/100 % de AR, 25 % de CF, *a/agl* = 0,45, ensaios e cenários específicos), as principais conclusões são apresentadas a seguir.

5.1 Síntese das principais conclusões

5.1.1 Influência dos materiais nas propriedades mecânicas

- A substituição de agregado natural por agregado reciclado (50 % e 100 %) resultou em reduções na resistência à compressão e no módulo de elasticidade, confirmando o impacto negativo do AR nessas propriedades.
- A cinza de fundo (25 % como substituto da areia) elevou a resistência à compressão, superando o concreto de referência, o que sugere predominância de efeito fíler no empacotamento da matriz.
- A sílica ativa (8 % como substituto do cimento) não demonstrou impacto consistentemente positivo na resistência à compressão aos 28 dias, embora seus benefícios microestruturais tenham sido observados nos parâmetros de durabilidade.
- A combinação de AR, CF e SA (por exemplo, 100-25-8) melhorou as propriedades mecânicas em relação ao concreto puramente reciclado (100-0-0), mas não recuperou integralmente os níveis do concreto de referência (0-0-0), indicando compensação parcial.

- A variabilidade observada, incluindo a aparente queda de resistência aos 180 dias, reforça a importância do controle experimental e sugere influência do processo de ensaio e da dispersão dos resultados, mais do que degradação intrínseca do material.

5.1.2 Parâmetros de durabilidade

- Os coeficientes de difusão/migração de cloretos e os fatores de envelhecimento, determinados via ensaio de migração não estacionário, mostraram forte dependência da composição do concreto.
- As adições minerais, especialmente a sílica ativa e sua combinação com a cinza de fundo, foram altamente eficazes em reduzir os coeficientes de transporte de cloretos e aumentar o fator de envelhecimento, indicando refinamento significativo da microestrutura e maior resistência à penetração iônica ao longo do tempo.
- Os concretos com agregado reciclado sem adições apresentaram os coeficientes de difusão/migração mais elevados, confirmando maior potencial de permeabilidade.

5.1.3 Análise probabilística da vida útil

- A simulação com o modelo Duracon via Monte Carlo (10^6 iterações), focada na iniciação da corrosão (P_f = 10%), permitiu quantificar o impacto probabilístico das variáveis na durabilidade estimada.
- Fatores externos mostraram-se determinantes: o aumento do cobrimento (x_c) prolongou a vida útil estimada, enquanto a elevação da temperatura (T) e da concentração superficial de cloretos (C_s) a reduziram de forma acentuada.
- A análise para as condições locais de Rio Grande (C_s = 2,07%) forneceu estimativas específicas de durabilidade, destacando a sensibilidade dos concretos à temperatura e ao cobrimento nesse ambiente.

5.1.4 Comparação e viabilidade

- Em termos de durabilidade estimada frente a cloretos, os concretos com adições minerais, particularmente a combinação de CF e SA, apresentaram desempenho superior ao concreto de referência, mesmo quando continham 100 % de AR.
- A abordagem combinada (AR+CF+SA) demonstrou ser tecnicamente viável para produzir concretos com elevado potencial de durabilidade em ambientes agressivos, compensando de forma expressiva a maior permeabilidade associada ao AR, embora a recuperação da resistência mecânica tenha sido apenas parcial.
- Considerando que o agregado reciclado empregado foi proveniente de empresa de beneficiamento e composto por material misto de demolição, os resultados

evidenciam que, mesmo sob condição de origem não controlada e maior heterogeneidade, é possível obter concretos com bom desempenho de durabilidade mediante adequada seleção de adições minerais e otimização da mistura.

- Dentro das limitações do estudo (ensaio acelerado, AR misto, escala laboratorial e foco na fase de iniciação da corrosão), os resultados indicam que a utilização de AR em concretos duráveis é possível, desde que acompanhada de caracterização adequada dos materiais e de formulação compatível com o ambiente de exposição.

5.2 Considerações finais

Os resultados obtidos neste trabalho demonstram que a avaliação do desempenho de concretos com agregados reciclados deve ser conduzida de forma integrada, considerando não apenas as propriedades mecânicas, mas principalmente os mecanismos de transporte e a durabilidade ao longo do tempo.

A incorporação de agregados reciclados, de forma isolada, resultou em redução do desempenho mecânico e aumento da suscetibilidade à penetração de cloretos. No entanto, a utilização combinada de sílica ativa e cinza de fundo mostrou-se eficaz em mitigar esses efeitos, promovendo refinamento microestrutural, redução da conectividade capilar e melhoria significativa dos parâmetros de transporte.

A integração entre os resultados experimentais e a modelagem probabilística de vida útil evidenciou que o desempenho dos concretos está fortemente condicionado à interação entre composição do material e condições de exposição, especialmente temperatura, cobrimento e concentração superficial de cloretos.

Destaca-se que, mesmo com o uso de agregados reciclados de origem heterogênea, foi possível obter concretos com elevado potencial de durabilidade, desde que associada à utilização adequada de adições minerais. Esse resultado reforça a viabilidade técnica da produção de concretos mais sustentáveis para aplicação em ambientes agressivos, como o ambiente marinho da região de Rio Grande/RS.

Por fim, conclui-se que a abordagem adotada, baseada na combinação entre caracterização experimental e modelagem probabilística, constitui uma ferramenta sólida para avaliação da durabilidade de concretos sustentáveis, contribuindo para o avanço de práticas alinhadas aos princípios da economia circular e da engenharia baseada em desempenho.

5.3 Possibilidades de investigações futuras

Com base nos resultados obtidos e reconhecendo as delimitações e limitações inerentes a este estudo (como o uso de agregado reciclado misto sem controle de origem, teores fixos de adições minerais, a realização de ensaios de durabilidade acelerados em laboratório e o foco exclusivo na fase de iniciação da corrosão), identificam-se diversas oportunidades para aprofundar o conhecimento sobre concretos sustentáveis. As

seguintes linhas de pesquisa são sugeridas:

- **Análise de diferentes tipos de resíduos:** investigar o desempenho de agregados reciclados de origem controlada (apenas de concreto) e cinzas de fundo de outras fontes que possam apresentar reatividade pozolânica, avaliando como a composição química desses resíduos impacta a durabilidade.
- **Variação dos teores de adições minerais:** realizar análise paramétrica com diferentes percentuais de substituição (CF e SA), buscando otimizar a dosagem para encontrar o balanço ideal entre desempenho técnico, custo e impacto ambiental.
- **Estudos de longa duração e exposição natural:** validar os modelos de previsão de vida útil por meio de exposição natural em ambiente marinho, comparando desempenho acelerado com degradação real ao longo dos anos.
- **Análise da fase de propagação da corrosão:** monitorar o comportamento das armaduras após a despassivação, avaliando a taxa de corrosão (fase de propagação) e a influência das adições minerais nessa etapa.
- **Modelagem numérica e análise probabilística avançada:** desenvolver modelos mais complexos incorporando variáveis adicionais (por exemplo, heterogeneidade do AR e efeito de cura interna), e aplicar métodos como FORM e/ou simulações de Monte Carlo com estratégias avançadas para refinar estimativas de vida útil e probabilidade de falha.

Referências

AASHTO (2015). *AASHTO T 358-15: Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. Washington: AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS.

ABNT (2013). Norma técnica. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT (2003). *ABNT NBR NM 248:2003: Agregados — Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.

ABNT (2004a). *ABNT NBR 15115:2004: Agregados reciclados de resíduos da construção civil — Execução de camadas de pavimentação — Procedimentos*. Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.

ABNT (2004b). *ABNT NBR 15116:2004: Agregados reciclados de resíduos da construção civil — Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural — Requisitos*. Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.

ABNT (2006). *ABNT NBR NM 45:2006: Agregados — Determinação da massa unitária e do volume de vazios*. Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.

ABNT (2009). *ABNT NBR NM 52:2009: Agregado miúdo — Determinação da massa específica e massa específica aparente*. Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.

ABNT (2010). *ABNT NBR 15895:2010: Materiais pozolânicos — Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado — Método Chapelle modificado*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT (2012a). *NBR 13956: Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta*. Rio de Janeiro: ABNT.

ABNT (2012b). *NBR 9204: Concreto endurecido — Determinação da resistividade elétrica volumétrica — Método de ensaio*. Rio de Janeiro: ABNT.

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

ABNT (2015a). *ABNT NBR 12655: Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação — Procedimento*. Terceira edição. Versão corrigida em 06 fev. 2015. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT (2015b). *NBR 12653: Materiais pozolânicos — Requisitos*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

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

ABNT (2018a). *ABNT NBR 16697:2018: Cimento Portland — Requisitos*. Versão de julho de 2018. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT (2018b). *NBR 5739: Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro: ABNT.

ABNT (2019). *ABNT NBR 11768-1: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland — Parte 1: Requisitos*. Primeira edição. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT (2020). *NBR 16889: Concreto — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. Rio de Janeiro: ABNT.

ABNT (2021). *ABNT NBR 15116:2021: Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland — Requisitos e métodos de ensaio*. Publicada em 06/2021. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT (2022). *ABNT NBR 7211: Agregados para concreto — Requisitos*. Quarta edição. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT (2023). *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento*. Rio de Janeiro: ABNT.

ABREMA (2024). *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2024*. URL: https://www.abrema.org.br/panorama/ (acesso em 13/09/2025).

Ahmed, W., C. Ye, G. Lu, S. T. Ng, G. Liu, e Y. Wang (2025). "Low-carbon concrete comprising high-volume pozzolan and recycled aggregate: evaluating mechanical performance, microstructure, environmental impact, and cost efficiency". Em: *Journal of Cleaner Production* 518, p. 145796. DOI: 10.1016/j.jclepro.2025.145796.

Alexander, M. G. e G. Nganga (2016). "Introduction: importance of marine concrete structures and durability design". Em: *Marine Concrete Structures — Design, Durability and Performance*. Elsevier, pp. 1–13.

Alkhteeb, L. e M. B. Dawood (2025). "The effect of recycled aggregate on properties of concrete: A review". Em: *Hybrid Advances* 11, p. 100535. DOI: 10.1016/j.hybadv.2025.100535.

Alnezami, S. *et al.* (2025). "Synergistic effects of treated municipal solid waste incineration bottom ash, coarse recycled concrete aggregates and fly ash on the mechanical and fresh-state properties of concrete". Em: *Journal of Building Engineering* 113, p. 114056. DOI: 10.1016/j.jobe.2025.114056.

Amorim Junior, N. S., G. A. O. Silva, C. M. R. Dias, e D. V. Ribeiro (2019). "Concrete containing recycled aggregates: Estimated lifetime using chloride migration test". Em: *Construction and Building Materials* 222, pp. 108–118. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.136.

Andrade, C. (1993). "Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements". Em: *Cement and Concrete Research* 23, pp. 724–742.

Andrade, C. (2026). "Valores de resistividade do concreto para as classes de resistência ao cloreto". Em: *Revista ALCONPAT* 16.1, pp. 99–110. DOI: 10.21041/ra.v16i1.976.

Andrade, J. J. O. (1997). "Durabilidade das Estruturas de Concreto Armado: Análises das Manifestações Patológicas nas Estruturas no Estado de Pernambuco". Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Diss. de mestr. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Andrade, J. J. O. (2001). "Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão das armaduras: iniciação por cloretos". Tese (Doutorado). Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Ang, A. H.-S. e W. H. Tang (1975). *Probability Concepts in Engineering Planning and Design: Basic Principles*. 1ª ed. Vol. 1. John Wiley & Sons. 409 p.

Antunes, A. *et al.* (2025). "A comprehensive review of sustainable use of construction and demolition waste as recycled aggregates in the production of concrete - Properties, mix design and on-site applications". Em: *Construction and Building Materials* 482, p. 141733. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.141733.

Argiz, C., A. Moragues, e E. Menendez (2018). "Use of ground coal bottom ash as cement constituent in concretes exposed to chloride environments". Em: *Journal of Cleaner Production* 170, pp. 25–33. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.09.117.

ASTM (2022a). *ASTM C150/C150M-22: Standard Specification for Portland Cement*. West Conshohocken, PA: ASTM International.

ASTM (2022b). *ASTM C1556-22: Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion*. Approved in 2022. West Conshohocken, PA: ASTM International.

Balestra, C. E. T., M. G. Lima, R. A. Medeiros-Junior, e A. J. A. E. Monteiro (2017). "Parâmetros ambientais e materiais que afetam a penetração de cloretos em estruturas de concreto — Estudo de caso da Ilha dos Arvoredos". Em: *REEC — Revista Eletrônica de Engenharia Civil* 13.1, pp. 01–11. URL: https://revistas.ufg.br/reec/article/view/43054 (acesso em 26/02/2026).

Bauer, L. A. F. (2008). *Materiais de construção 1*. 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC.

Beck, A. T. (2019). *Confiabilidade e segurança das estruturas*. Rio de Janeiro: Elsevier.

Berredjem, L., N. Arabi, e L. Molez (2020). "Mechanical and durability properties of concrete based on recycled coarse and fine aggregates produced from demolished concrete". Em: *Construction and Building Materials* 246, p. 118421. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118421.

Bertolini, L. (2010). *Materiais de Construção, Patologia, Reabilitação, Prevenção*. São Paulo: Oficina de Textos.

Beushausen, H. *et al.* (2016). "Principles of the Performance-Based Approach for Concrete Durability". Em: *Performance-based Specifications and Control of Concrete Durability: State-of-the-Art Report RILEM TC 230-PSC*. Ed. por H. Beushausen e L. F. Luco. New York: Springer, pp. 107–131. DOI: 10.1007/978-94-017-7309-6_5.

Boudalia, S., D. E. Kerdal, K. Ayed, B. Abdulsalam, e A. M. Solimane (2016). "Performance of self-compacting concrete incorporating recycled concrete fines and aggregate

exposed to sulphate attack". Em: *Construction and Building Materials* 124, pp. 705–713. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.058.

Bravo, M., J. de Brito, J. Pontes, e L. Evangelista (2015). "Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants". Em: *Construction and Building Materials* 77, pp. 357–369. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.103.

de Brito, J., J. Ferreira, J. Pacheco, D. Soares, e M. Guerreiro (2016). "Structural, material, mechanical and durability properties and behaviour of recycled aggregates concrete". Em: *Journal of Building Engineering* 6, pp. 1–16. DOI: 10.1016/j.jobe.2016.02.003.

fib Bulletin (2015). *fib Bulletin No. 76: Benchmarking of deemed-to-satisfy provisions in standards — Durability of reinforced concrete structures exposed to chlorides*. Lausanne: Fédération Internationale du Béton (fib).

Cantero, B., M. Bravo, J. de Brito, I. F. Saez del Bosque, e C. Medina (2020). "Mechanical behaviour of structural concrete with ground recycled concrete cement and mixed recycled aggregate". Em: *Journal of Cleaner Production* 275, p. 122913. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122913.

Cascudo, O. (2015). "Requisitos de projeto, normalização e execução para estruturas com longa vida útil – Personalidade Entrevistada". Em: *Revista Concreto e Construções* 79, pp. 26–40.

CEB (1989). *Bulletin d'information No. 192*. Boletim 192. Comité Euro-International du Béton (CEB).

CEN (2002). *EN 1990: Eurocode — Basis of structural design*. Brussels: Comité Européen de Normalisation.

Chen, X., L. Zhang, H. Yu, H. Ma, H. Qiao, L. Yang, H. Fan, e Q. Du (2025a). "Mechanical performance and durability evolution of high-performance concrete components exposed to western salt lake environment". Em: *Construction and Building Materials* 490, p. 142582. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.142582.

Chen, Y., C. Chen, Z. Cai, P. Zhu, R. Liu, e H. Liu (2025b). "Effect of strength of parent concrete on utilization of recycled aggregate concrete: A review". Em: *Journal of Building Engineering* 103, p. 112187. DOI: 10.1016/j.jobe.2025.112187.

Chindaprasirt, P. e U. Rattanasak (2010). "Utilization of blended fluidized bed combustion (FBC) ash and pulverized coal combustion (PCC) fly ash in geopolymer". Em: *Waste Management* 30.4, pp. 667–672. DOI: 10.1016/j.wasman.2009.09.040.

Cirino, M. A. G., A. E. B. Cabral, D. A. A. Silva, e K. N. H. Sampaio (2021). "Caracterização e avaliação da atividade pozolânica das cinzas provenientes da queima de carvão mineral das termelétricas do Pecém, Ceará, Brasil". Em: *Matéria (Rio J.)* 26.4, e13090. DOI: 10.1590/S1517-707620210004.1390.

Coimbra, M. A., W. N. d. Santos, e M. R. Morelli (2002). "Recuperação de resíduos inorgânicos para a construção civil". Em: *Cerâmica* 48.306.

Collepardi, M., A. Marcialis, e R. Turriziani (1970). "Kinetics of Penetration of Chloride Ions in Concrete". Em: *L'Industria Italiana del Cemento* 4, pp. 157–164.

Collepardi, M., A. Marcialis, e R. Turriziani (1972). "Penetration of Chloride Ions into Cement Pastes and Concretes". Em: *Journal of the American Ceramic Society* 55.10, pp. 534–535.

Cornell, C. A. (1969). "A probability-based structural code". Em: *ACI Journal* 66, pp. 974–985.

Costa, H. N., R. Argonz, A. E. B. Cabral, e R. E. F. Q. Nogueira (2023). "Comportamento no estado fresco e no estado endurecido de pastas de cimentos álcali-ativados de cinza volante e de cinza pesada e suas características microestruturais". Em: *Ambiente Construído* 23.3, pp. 203–223. DOI: 10.1590/s1678-86212023000300683.

CYTED (1998). *Manual de Inspección, Evaluación y Diagnostico de corrosión en estructuras de hormigón armado*. 2ª ed. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. Subprograma XV: Corrosión/Impacto Ambiental sobre Materiales.

Dal Molin, D. C. C. (1988). "Fissuras em estruturas de concreto armado: análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no estado do Rio Grande do Sul". Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Diss. de mestr. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. URL: https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/15655/000011437.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Dal Molin, D. C. C. *et al.* (2016). "Contribuição à previsão da vida útil de estruturas de concreto". Em: *Avaliação de desempenho de tecnologias construtivas inovadoras: materiais e sustentabilidade*. Ed. por C. d. S. Kazmierczak e M. M. Fabricio. [recurso eletrônico]. [Porto Alegre]: ANTAC.

Dimitriou, G., P. Savva, e M. F. Petrou (2018). "Enhancing mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete". Em: *Construction and Building Materials* 158, pp. 228–235. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.137.

DURACRETE Project (1999). *Models for environmental actions on concrete structures*. Project report. The European Union — Brite EuRam III.

Evangelista, L. e J. de Brito (2007). "Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates". Em: *Cement and Concrete Composites* 29.5, pp. 397–401. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2006.12.004.

Evangelista, L. e J. de Brito (2010). "Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates". Em: *Cement and Concrete Composites* 32.1, pp. 9–14. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2009.09.005.

Fanton, T., R. C. A. d. Lima, e F. M. Ribeiro (2021). "Corrosão por ação de cloretos em estruturas de concreto armado: uma análise das publicações da última década". Em: *Concreto & Construções* 103, pp. 61–66. DOI: 10.4322/1809-7197.2021.103.0006.

Felix, E. F. (2018). "Modelagem da Deformação do Concreto Armado Devido à Formação dos Produtos de Corrosão". Dissertação (Mestrado). São Carlos: Universidade de São Paulo (USP), Escola de Engenharia de São Carlos. 162 p.

Ferrante, M., M. Vitti, e C. Sassanelli (2025). "The evolution of circular economy performance assessment: A systematic literature review". Em: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 217, p. 115757. DOI: 10.1016/j.rser.2025.115757.

Ferreira, M., S. Jalali, e O. E. Gjørv (2004). "Probabilistic assessment of the durability performance of concrete structures". Em: *Engenharia Civil — Universidade do Minho* 21, pp. 39–48.

Ferreira, R. M. (2004). "Probability-Based Durability Analysis of Concrete Structures in Marine Environment". PhD Thesis. Guimarães, Portugal: University of Minho.

FIB (2006). *Bulletin No. 34: Model Code for Service Life Design*. Lausanne: FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON.

Figueiredo, E. P. e G. Meira (2013). *Corrosão das armaduras das estruturas de concreto*. Rel. técn. Boletim Técnico. Mérida: ALCONPAT, pp. 1–29.

Figueirôa, J. d. P. (2024). "Discussão sobre recomendações adicionais na ABNT NBR 6118:2023 para projeto de estruturas de concreto em ambiente de severa agressividade (respingos de maré)". Em: *Concreto e Construções – Inspeção e Manutenção* 116. out./dez. Disponível em: https://www.ibracon.org.br, pp. 50–55.

Filho, A. C. (2009). *Panorama da edificação sob a ótica da patologia*. Conexão AEC. URL: http://www.aecweb.com.br/cont/a/panorama-da-edificacao-sob-a-otica-da-patologia_1276 (acesso em 15/04/2024).

Fonseca, T. D. d. S., L. U. Ribeiro Junior, e L. F. Barbosa (2018). "Análise da viabilidade técnica da incorporação de agregados reciclados em concreto". Em: *Holos*. DOI: 10.14295/holos.v18i1.12035.

Gentil, V. (1996). *Corrosão*. 3ª ed. Rio de Janeiro: LTC.

Gjørv, O. E. (2015). *Projeto da Durabilidade de Estruturas de Concreto em Ambientes de Severa Agressividade*. Tradução: Leda Maria M. D. Beck. Supervisão técnica: Enio Pazini e Paulo Helene. São Paulo: Oficina de Textos.

Glass, G. K. e N. R. Buenfeld (1997). "The presentation of the chloride threshold level for corrosion of steel in concrete". Em: *Corrosion Science* 39.5, pp. 1001–1013. DOI: 10.1016/S0010-938X(97)00009-7. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010938X97000097.

Glass, G. K. e N. R. Buenfeld (2000). "The inhibitive effects of electrochemical treatment applied to steel in concrete". Em: *Corrosion Science* 42, pp. 923–927.

González-Fonteboa, B. e F. Martínez-Abella (2008). "Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume: materials and mechanical properties". Em: *Building and Environment* 43, pp. 429–437. DOI: 10.1016/j.buildenv.2007.01.008.

Guimarães, A. T. C. (2000). "Vida útil de estruturas de concreto armado em ambientes marítimos". Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo (USP).

Haldar, A. e S. Mahadevan (2000). *Probability, Reliability and Statistical Methods in Engineering Design*. New York: John Wiley & Sons.

Haq, E. U., S. K. Padmanabhan, e A. Licciulli (2014). "Synthesis and characteristics of fly ash and bottom ash based geopolymers — A comparative study". Em: *Ceramics International* 40.2, pp. 2965–2971.

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

Helene, P. (1993). "Contribuição ao Estudo da Corrosão em Armaduras de Concreto Armado". Tese (Doutorado). São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP).

Henriques, R. L., P. B. Athayde, A. G. Magalhães, T. A. Magalhães, e F. V. Andrade (2024). "Chloride ion penetration resistance in concretes produced with recycled fine aggregates and silica fume". Em: *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais* 17.2, e17207. DOI: 10.1590/S1983-41952024000200007.

Hou, B., X. Li, X. Ma, C. Du, D. Zhang, M. Zheng, W. Xu, D. Lu, e F. Ma (2017). "The cost of corrosion in China". Em: *npj Materials Degradation* 1.4, pp. 1–10. DOI: 10.1038/s41529-017-0005-2. URL: http://dx.doi.org/10.1038/s41529-017-0005-2.

IBGE (2011). *Atlas geográfico das zonas costeiras e oceânicas do Brasil*. Convênio: Comissão Interministerial para Recursos do Mar. Rio de Janeiro: IBGE, p. 173.

IBGE (2022). *Brasil/Rio Grande do Sul/Rio Grande — Panorama: População*. Mapa da população, Censo 2022. URL: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/rio-grande/panorama (acesso em 29/07/2023).

IBRACON (2021). *Procedimento de determinação da resistividade elétrica em corpos de prova e testemunhos de concreto*. CT IBRACON/ALCONPAT 702 — Procedimentos para Ensaios de Avaliação da Durabilidade das Estruturas de Concreto. São Paulo: IBRACON.

IBRACON e ALCONPAT (2020). *Difusão e migração de cloretos. Comitê Técnico IBRACON/ALCONPAT 702: Procedimentos para Ensaios de Avaliação da Durabilidade das Estruturas de Concreto. Sub-Comitê 01 — Difusão e Migração de Cloretos*. São Paulo: IBRACON/ALCONPAT.

Jan, A., L. Ferrari, R. Neves, E. Franzoni, e J. de Brito (2025). "Durability and rheological properties of concrete with recycled fine and coarse aggregates and LC3". Em: *Construction and Building Materials* 498, p. 143993. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.143993.

Jiang, Y., V. W. Y. Tam, C. Jiang, e K. N. Le (2025). "A review on mechanical properties and durability of recycled coarse aggregate concrete exposed to elevated temperatures". Em: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 217, p. 115730. DOI: 10.1016/j.rser.2025.115730.

Kampai, C., P. Miao, P. Chindasiriphan, W. Tangchirapat, e P. Jongvivatsakul (2024). "Durability properties of high-strength concrete with high-volume bottom ash as a substitute for cement and fine aggregate". Em: *Construction and Building Materials* 457, p. 139401. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.139401.

Kiruthiga, P., N. Dave, S. Shahabuddin, e R. Guduru (2025). "Development of sustainable concrete with pulverized coal bottom ash for low cost and carbon emission". Em: *Construction and Building Materials* 462, p. 139949. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.139949.

Kovacs, R., R. Shamass, e V. Limbachiya (2025). "Multi-recycling of different concrete products: Effects on recycled aggregate's physical characteristics and compressive strength". Em: *Journal of Building Engineering* 113, p. 114004. DOI: 10.1016/j.jobe.2025.114004.

Lacerda, L. V. (2015). "Síntese e caracterização de zeólita tipo sodalita obtida a partir de cinzas volantes de carvão mineral utilizado na usina termoelétrica de Candiota-RS". Diss. de mestr. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 54.

Le, H.-B. e Q.-B. Bui (2020). "Recycled aggregate concretes — A state-of-the-art from the microstructure to the structural performance". Em: *Construction and Building Materials* 257, p. 119522. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119522.

Le, T. H., D. L. Mai, e T. H. Ta (2025). "Effects of fly ash and ground bottom ash from thermal power plants on workability, compressive strength and durability of high performance fine-grained concrete". Em: *Applications in Engineering Science* 24, p. 100261. DOI: 10.1016/j.apples.2025.100261.

Lima, M. G. (1996). "Inibidores de corrosão — Avaliação da eficiência frente à corrosão de armaduras provocada por cloretos". Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, p. 174.

Lopes, R. C., A. M. d. Oliveira, e O. Cascudo (2022). "Modelos preditivos de vida útil de estruturas de concreto sujeitas à iniciação da corrosão de armaduras por cloretos: revisão sistemática da literatura — Parte 2". Em: *Matéria (Rio de Janeiro)* 27.2. DOI: 10.1590/1517-7076-RMAT-2022-44823.

Lorensini, R. V. (2006). "Análise probabilística da deterioração de estruturas em concreto armado". Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais.

Ma, W., B. Lv, Y. Wang, L. Huang, L. Yan, e B. Kasal (2024). "Freeze-thaw, chloride penetration and carbonation resistance of natural and recycled aggregate concrete containing rice husk ash as replacement of cement". Em: *Journal of Building Engineering*, p. 108889. DOI: 10.1016/j.jobe.2024.108889.

Magalhães, F. C. (2014). "A problemática dos concretos não conformes e sua influência na confiabilidade de pilares de concreto armado". Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Magalhães, F. C. (2018). "Proposição de um modelo para penetração de íons cloreto em concreto: estudos dos parâmetros intervenientes e análise probabilística". Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Mahmood, W., A.-R. Khan, e T. Ayub (2021). "Mechanical and durability properties of concrete containing recycled concrete aggregates". Em: *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering* 46, pp. 2111–2130. DOI: 10.1007/s40996-021-00692-x.

Medeiros-Junior, R. A. (2014). "Estudo da resistividade do concreto para proposta de modelagem de vida útil – Corrosão das armaduras devido à penetração de cloretos". Tese (Doutorado em Engenharia de Infraestrutura Aeroportuária). São José dos Campos, SP: Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), p. 243.

Meira, G. R. (2004). "Agressividade por cloretos em zona de atmosfera marinha frente ao problema da corrosão em estruturas de concreto armado". Tese (Doutorado). Santa Catarina: Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Meira, G. R. (2017). *Corrosão de armaduras em estruturas de concreto: fundamentos, diagnóstico e prevenção*. João Pessoa: IFPB, p. 130.

Melchers, R. E. e A. T. Beck (2018). *Structural Reliability Analysis and Prediction*. Hoboken, NJ: Wiley.

Montazeri, P., O. Bamshad, M. Aghililotf, e P. Singh (2025). "Mechanical and durability-based life cycle assessment of rice husk ash containing concrete". Em: *Case Studies in Construction Materials* 23, e05241. DOI: 10.1016/j.cscm.2025.e05241.

Moreira, L. S., T. N. Bittencourt, H. Carvalho, e M. M. Futai (2024). "Probabilistic assessment of corroded concrete structures — systematic literature review". Em: *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais* 17.4, e17408. DOI: 10.1590/S1983-41952024000400008.

Moro, F., S. Keßler, e R. Torrent (2025). "Performance-based concept for the selection of sustainable concretes exposed to chlorides". Em: *Structural Concrete*. Received: 22 June 2024; Revised: 7 January 2025; Accepted: 12 March 2025. DOI: https://doi.org/10.1002/suco.70056Digital.

Morrison, R. E. (1970). *A review of ash specifications*. In: Ash Utilization. National Ash Association.

Mostardeiro Neto, C. Z. (2011). "Absorção capilar e resistividade elétrica de concretos compostos com cinza de casca de arroz de diferentes teores de carbono grafítico". Diss. de mestr. Santa Maria, RS, Brasil: Universidade Federal de Santa Maria.

Nardi, J. V. (1975). "Estabilização de areia com cal e cinza volante; efeito do cimento como aditivo e de brita na mistura". Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Neville, A. M. (2016). *Propriedades do Concreto*. Trad.: Ruy Alberto Cremonini. Porto Alegre: Bookman.

Neville, A. M. e J. J. Brooks (2013). *Tecnologia do Concreto*. 2ª ed. Bookman.

Nguyen, T.-D., R. Cherif, P.-Y. Mahieux, P. Turcry, e E. Bastidas-Arteaga (2025). "A review on deterioration mechanisms, durability prediction and enhancement techniques for recycled aggregate concrete". Em: *Cleaner Materials* 16, p. 100306. DOI: 10.1016/j.clema.2025.100306.

Nilsson, L., M. H. Ngo, e O. Gjørv (1998). "High-performance repair materials for concrete structures in the Port of Gothenburg". Em: *Proceedings of the 2nd International Conference on Concrete under Severe Conditions: Environment and Loading*, pp. 1193–1198.

NORDTEST (1999). *NT Build 492: Concrete, Mortar and Cement-based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Non-steady-state Migration Experiments*. Espoo: NORDTEST.

Nunes, J. L. O. (2006). "Intensidade de Ataque de Cloretos: Considerações sobre a Distância do Concreto em Relação à Água do Mar". Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica). Rio Grande, RS: Fundação Universidade Federal do Rio Grande.

Nunes, J. L. O., M. R. F. Gonçalves, e A. B. Tessaro (2025). "Análise de íons cloreto na argamassa de restauração da Catedral de São Pedro". Em: *Ambiente Construído* 25, e135328. DOI: 10.1590/s1678-86212025000100793.

Omary, S., E. Ghorbel, e G. Wardeh (2016). "Relationships between recycled concrete aggregates characteristics and recycled aggregates concretes properties". Em: *Construction and Building Materials* 108, pp. 163–174. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.01.042.

Ortiz-Lozano, J. A., A. de la Fuente, F. Mena-Sebastiá, A. Aguado, e I. Segura (2025). "Durability of steel-fiber-reinforced self-compacted concrete with 100% recycled mixed aggregates". Em: *Case Studies in Construction Materials* 23, e05366. DOI: 10.1016/j.cscm.2025.e05366.

Padmini, A. K., K. Ramamurthy, e M. S. Mathews (2009). "Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete". Em: *Construction and Building Materials* 23.2, pp. 829–836. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2008.03.006.

Palaniappan, P., G. Velu, T. Somasundaram, e V. Murugesan (2024). "A comparative study of sustainable mix incorporating recycled aggregates". Em: *Matéria (Rio de Janeiro)* 29.3. Acesso em: 22 jan. 2025. DOI: 10.1590/1517-7076-RMAT-2024-0284.

Papadakis, V. G. (2000). "Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress". Em: *Cement and Concrete Research* 30, pp. 291–299. DOI: 10.1016/S0008-8846(99)00249-5.

Pilar, R., R. A. Schankoski, A. J. Dal Moro, e W. L. Repette (2016). "Avaliação de pastas de cimento Portland contendo cinza pesada moída". Em: *Matéria (Rio de Janeiro)* 21.1. Acesso em: 28 jan. 2025, pp. 92–104. DOI: 10.1590/S1517-707620160001.0009.

Pinto, S. (1971). "Estabilização de areia com cal e cinza volante". Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Polder, R. B. e W. H. A. Peelen (2002). "Characterization of chloride transport and reinforcement corrosion in concrete under cyclic wetting and drying by electrical resistivity". Em: *Cement and Concrete Composites* 24, pp. 427–435.

Poon, C. S., Z. H. Shui, e L. Lam (2004). "Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates". Em: *Construction and Building Materials* 18, pp. 461–468. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2004.03.005.

Possan, E. e J. J. O. Andrade (2014). "Markov Chains and reliability analysis for reinforced concrete structure service life". Em: *Materials Research* 17, pp. 593–602.

Poulsen, E. e L. Mejlbro (2005). *Diffusion of Chloride in Concrete: Theory and Application*. 1ª ed. Boca Raton: CRC Press, p. 480.

Priszkulnik, S. (1981). *Pozolanas para aglomerantes de construção civil*. Coletânea de trabalhos sobre pozolanas e cimentos pozolânicos. São Paulo: ABCP.

Pugliese, F. e L. Di Sarno (2022). "Probabilistic structural performance of RC frames with corroded smooth bars subjected to near- and far-field ground motions". Em: *Journal of Building Engineering* 49. maio, p. 104008. DOI: 10.1016/j.jobe.2022.104008.

Qin, J., Y. Geng, Y.-C. Chang, H. Zhang, e Y.-Y. Wang (2025). "Probabilistic model for compressive strength of recycled aggregate concrete accounting for uncertainty of recycled aggregates from different sources". Em: *Construction and Building Materials* 479, p. 141485. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.141485.

Rafieizonooz, M., J. Mirza, M. R. Salim, M. W. Hussin, e E. Khankhaje (2016). "Investigation of coal bottom ash and fly ash in concrete as replacement for sand and cement". Em: *Construction and Building Materials* 116. Acesso em: 10 fev. 2025, pp. 15–24. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.080.

Real, M. V. (2000). "Análise probabilística de estruturas de concreto armado, sob estado plano de tensão, através do Método dos Elementos Finitos". Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Real, S., J. A. Bogas, e J. Pontes (2015). "Chloride migration in structural lightweight aggregate concrete produced with different binders". Em: *Construction and Building Materials* 98. Acesso em: 15 jan. 2025, pp. 425–436. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.080.

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

Ribeiro, D. V., J. A. Labrincha, e M. R. Morelli (2012). "Effect of the addition of red mud on the corrosion parameters of reinforced concrete". Em: *Cement and Concrete Research* 42.1, pp. 124–133. DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.09.002.

RILEM (1982). "CPC 11.2 Absorption of water by concrete by capillarity". Em: *RILEM Recommendations for the Testing and Use of Construction Materials*. Ed. por RILEM Technical Committees. Recomendação CPC 11.2 (1982). Compilada no volume de 1994. London: E&FN Spon, pp. 34–35.

RILEM (1994). "Draft recommendation for repair strategies for concrete structures damaged by reinforcement corrosion". Em: *Materials and Structures* 27, pp. 415–436. DOI: 10.1007/BF02473446.

Rohde, G. M., O. Zwonok, F. Chies, e N. I. W. Silva (2006). *Cinzas de carvão fóssil no Brasil — Aspectos técnicos e ambientais*. Vol. 1. Porto Alegre: CIENTEC.

Rosales, M. *et al.* (2025). "Sustainable concrete manufactured with mixed recycled aggregate and biomass bottom ash, replacing aggregate and cement to a high percentage". Em: *Case Studies in Construction Materials* 22, e04785. DOI: 10.1016/j.cscm.2025.e04785.

Rubinstein, R. (1981). *Simulation and the Monte Carlo Method*. New York: John Wiley & Sons.

Rubinstein, R. e D. Kroese (2008). *Simulation and the Monte Carlo Method*. 2ª ed. Wiley Series in Probability and Statistics. Hoboken: Wiley.

Russo, N., A. Filippi, M. Carsana, F. Lollini, e E. Redaelli (2025). "Impact of RAP as recycled aggregate on durability-related parameters of structural concrete". Em: *Materials and Structures* 58, p. 53. DOI: 10.1617/s11527-025-02582-4.

Sagrilo, L. V. S. (1994). "Análise da confiabilidade estrutural utilizando os métodos analíticos FORM e SORM". Tese (Doutorado em Engenharia). Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ.

Salles, P. V., C. L. Gomes, F. S. J. Poggiali, e C. d. S. Rodrigues (2021). "A importância da segregação do agregado reciclado na resistência e na durabilidade do concreto estrutural". Em: *Ambiente Construído* 21.3, pp. 177–196. DOI: 10.1590/s1678-86212021000300545.

Santos, L. (2006). "Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto". Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil). Brasília: Universidade de Brasília (UnB), p. 178.

Sasanipour, H., F. Aslani, e J. Taherinezhad (2019). "Effect of silica fume on durability of self-compacting concrete made with waste recycled concrete aggregates". Em: *Construction and Building Materials*. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.324. URL: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095006181931997X.

Sell Junior, F. K., G. B. Wally, F. R. Teixeira, e F. C. Magalhães (2021). "Experimental assessment of accelerated test methods for determining chloride diffusion coefficient in concrete". Em: *IBRACON Structures and Materials Journal* 14, e14407.

Sengul, O. (2014). "Use of electrical resistivity as an indicator for durability". Em: *Construction and Building Materials* 73, pp. 434–441. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.077.

Sharma, K., R. Bhartiya, e S. K. Das (2026). "Sustainable mortars using overburden-derived M-sand and coal bottom ash: Mechanical properties, durability and life cycle assessment". Em: *Construction and Building Materials* 506, p. 144937. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.144937.

Shi, X., N. Xie, K. Fortune, e J. Gong (2012). "Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview". Em: *Construction and Building Materials* 30, pp. 125–138. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.12.038.

Silva, R. V., J. de Brito, e R. K. Dhir (2018). "Fresh-state performance of recycled aggregate concrete: A review". Em: *Construction and Building Materials* 178, pp. 19–31. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.149.

Silva, S., L. Evangelista, e J. de Brito (2021). "Durability and shrinkage performance of concrete made with coarse multi-recycled concrete aggregates". Em: *Construction and Building Materials* 272, p. 121645. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121645.

Silvestro, L. e D. C. C. Dal Molin (2018). "Avaliação de modelos para previsão de vida útil de estruturas de concreto armado localizadas em ambientes com cloretos". Em: *PATORREB*.

Silvestro, L., F. S. Romano, e D. C. C. Dal Molin (2020). "Penetração de cloretos em concretos expostos em zona de atmosfera marinha por um período de 9 anos". Em: *Ambiente Construído* 21.1. Acesso em: 4 jul. 2024, pp. 101–118.

Song, Y., J. Wang, Y. Huang, J. Wang, Y. Weng, R. Ma, K. S. H. Pang, e S. Ruan (2025). "Effects of varying grades/pretreatments of recycled aggregates on the development of pore structures and ITZs within reactive magnesia cement (RMC) concrete". Em: *Cement and Concrete Research* 190, p. 107782. DOI: 10.1016/j.cemconres.2025.107782.

Souche, J.-C., P. Devillers, M. Salgues, e E. Garcia Diaz (2017). "Influence of recycled coarse aggregates on permeability of fresh concrete". Em: *Cement and Concrete Composites* 83, pp. 394–404. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2017.08.002.

Takewaka, K. e S. Matsumoto (1988). "Quality and Cover Thickness of Concrete Based on the Estimation of Chloride Penetration in Marine Environments". Em: *Proceedings of the Second International Conference on Concrete in Marine Environment*. Ed. por V. M. Malhotra. ACI SP 109, pp. 381–400.

Tang, L. (1996). "Chloride Transport in Concrete: Measurement and Prediction". Tese de dout. Gothenburg, Sweden: Chalmers University of Technology.

Tang, L. e J. Gulikers (2007). "On the Mathematics of Time-Dependent Apparent Chloride Diffusion Coefficient in Concrete". Em: *Cement and Concrete Research* 37.4, pp. 589–595.

TECNOSIL (2022). *Sílica Ativa*. Acesso em: mar. 2025. URL: https://www.tecnosilbr.com.br/silica-ativa/ (acesso em 01/03/2025).

Teodoro, R. (2016). "Avaliação das características de diferentes metacaulins e sua influência na estrutura interna do concreto e em propriedades ligadas à durabilidade". Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Goiás.

Thoft-Christensen, P. (2001). *What happens with reinforced concrete structures when the reinforcement corrodes*. Rel. técn. Technical report. Aalborg: Department of Building Technology e Structural Engineering, Aalborg University.

Thomas, C., J. de Brito, A. Cimentada, e J. A. Sainz-Aja (2020). "Macro- and micro-properties of multi-recycled aggregate concrete". Em: *Journal of Cleaner Production* 245, p. 118843. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118843.

Thomas, C., J. Setién, J. A. Polanco, P. Alaejos, e M. Sánchez de Juan (2013). "Durability of recycled aggregate concrete". Em: *Construction and Building Materials* 40, pp. 1054–1065. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.106.

Traiyasut, C. *et al.* (2025). "Performance of natural rubber latex modified bottom ash-based geopolymer stabilized recycled concrete aggregate as a pavement base material". Em: *Cleaner Engineering and Technology* 29, p. 101080. DOI: 10.1016/j.clet.2025.101080.

Trocónis de Rincón, O. (2006). "Durability of concrete structures: DURACON, an iberoamerican project. Preliminary results". Em: *Building and Environment* 41.7, pp. 952–962. DOI: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.

04.005. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132305001472.

Tutikian, B. F., G. C. Isaia, e P. Helene (2011). "Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho". Português. Em: *Concreto: Ciência e Tecnologia*. Ed. por G. C. Isaia. IBRACON.

Tuutti, K. (1982). *Corrosion of Steel in Concrete*. Rel. técn. Stockholm: Swedish Cement e Concrete Research Institute, pp. 17–21.

UNE (2012). *UNE 83987: Determinación de los coeficientes de difusión de los iones cloruro en el hormigón endurecido — Método multirégimen*. Asociación Española de Normalización.

UNEP (2024). *Relatório de Status Global para Edificações e Construção: rumo a edificações com emissões líquidas zero e resilientes*. Nairobi: UNEP. URL: https://www.unep.org/pt-br/resources/relatorios/relatorio-de-status-global-para-edificacoes-e-construcao (acesso em 30/03/2025).

Verian, K. P., W. Ashraf, e Y. Cao (2018). "Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production". Em: *Resources, Conservation & Recycling* 133, pp. 30–49. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.02.005.

Vieira, G. L. e D. C. C. Dal Molin (2004). "Viabilidade técnica da utilização de concretos com agregados reciclados de resíduos de construço e demolição". Em: *Ambiente Construído* 4.4, pp. 47–63.

Vieira, M., G. Pereira, F. Pacheco, M. L. d. S. Marques, R. Christ, e R. C. E. Modolo (2022). "Assessment of the impact of adding fly ash and coal bottom ash to an advanced cement-based composite matrix". Em: *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais* 15.5. Acesso em: 10 fev. 2025, e15506. DOI: 10.1590/S1983-41952022000500006.

Wahab, S. *et al.* (2025). "Influence of acetic acid treated recycled concrete aggregates on the rheological and mechanical properties of self-compacting concrete: Experiments and machine learning". Em: *Construction and Building Materials* 491, p. 142770. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.142770.

Wally, G. B. (2019). "Vida útil de concretos produzidos com utilização de sílica ativa e metacaulim frente ao ataque por cloretos: indicadores de durabilidade e análise probabilística". Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica). Rio Grande: Universidade Federal do Rio Grande, p. 117.

Wally, G. B., F. C. Magalhães, F. K. Sell Junior, F. R. Teixeira, e M. d. V. Real (2021). "Estimating service life of reinforced concrete structures with binders containing silica fume and metakaolin under chloride environment: durability indicators and probabilistic assessment". Em: *Materials and Structures*. Published online 14 Apr. 2021. DOI: 10.1617/s11527-021-01698-7.

Wally, G. B., F. C. Magalhães, e L. C. P. d. Silva Filho (2020). "Conceitos e aspectos da abordagem com base no desempenho na avaliação da durabilidade de estruturas de concreto armado expostas a ambientes agressivos". Em: *Concreto & Construções* 100. Acesso em: 20 maio 2024, pp. 81–85. DOI: 10.4322/1809-7197.2020.100.0006.

Wang, S. *et al.* (2025). "Investigation on the influence of early carbonation curing on the mechanical strength and microstructure of pervious concrete with recycled aggregates and PC-CSA binders". Em: *Construction and Building Materials* 495, p. 143638. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.143638.

Xie, T. e T. Ozbakkaloglu (2015). "Behavior of low-calcium fly and bottom ash-based geopolymer concrete cured at ambient temperature". Em: *Ceramics International* 41.4, pp. 5945–5958. DOI: 10.1016/j.ceramint.2015.01.031.

Xuan, D., B. Zhan, e C. S. Poon (2017). "Durability of recycled aggregate concrete prepared with carbonated recycled concrete aggregates". Em: *Cement and Concrete Composites* 84, pp. 214–221. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2017.09.015.

Yang, Y., H. Feng, Z. Yin, W. Zhao, Z. Yan, e Y. Zhang (2025). "Probabilistic insights into recycled aggregate variability via Bayesian-Copula: Implications for cleaner production and quality control". Em: *Journal of Cleaner Production* 530, p. 146842. DOI: 10.1016/j.jclepro.2025.146842.

Zhang, X. *et al.* (2025). "Research on mix design of fully recycled concrete based on the pore characteristics and rheological principles of recycled aggregates". Em: *Results in Engineering* 27, p. 107067. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.107067.

Zhang, Z. e X.-Y. Zhao (2025). "Uncertainty-aware prediction of chloride resistance in recycled aggregate concrete exposed to marine conditions". Em: *Case Studies in Construction Materials* 23, e05464. DOI: 10.1016/j.cscm.2025.e05464.

Zhu, P., Y. Hao, H. Liu, X. Wang, e L. Gu (2020). "Durability evaluation of recycled aggregate concrete in a complex environment". Em: *Journal of Cleaner Production*. Published online 10 Nov. 2020, p. 122569. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122569.

Zhu, P., Y. Hao, H. Liu, D. Wei, S. Liu, e L. Gu (2019). "Durability evaluation of three generations of 100% repeatedly recycled coarse aggregate concrete". Em: *Construction and Building Materials*. Published online 20 Jun. 2019, pp. 442–450. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.203.