



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

# Concretos com agregados graúdos reciclados expostos ao ambiente marinho: avaliação de indicadores de durabilidade e análise probabilística da vida útil

Dissertação de:  
**Pietra Guasti Vande Meerssche**

Orientador:  
**Prof. Dr. Mauro de Vasconcellos Real**

Coorientadores:  
**Prof. Dr. Fábio Costa Magalhães**  
**Profa. Dra. María Noel Pereyra**

Novembro de 2025

# Concretos com agregados graúdos reciclados expostos ao ambiente marinho: avaliação de indicadores de durabilidade e análise probabilística da vida útil

**Pietra Guasti Vande Meerssche**

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.

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** ELIZALDO DOMINGUES DOS SANTOS  
Data: 02/12/2025 09:42:0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Elizaldo dos Santos

Coordenador do PPGEO/FURG

Banca examinadora:

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** MAURO DE VASCONCELLOS REAL  
Data: 02/12/2025 09:54:54-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Mauro de Vasconcellos Real

Orientador – PPGEO/FURG



**Maria Noel Pereyra Dominguez**

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** FABIO COSTA MAGALHAES  
Data: 02/12/2025 09:46:53-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Fábio Costa Magalhães

Coorientador – PPGEO/FURG

Firma electrónica avanzada, UY  
Firmado por: PATRICIA ELIZABET VILA GONZÁLEZ  
Documento: 24817F0F160380C16820E32AFF607E68  
Fecha: 04/12/2025 13:31  
Autoridad Certificadora del Ministerio del Interior

Profa. Dra. María Noel Pereyra Domínguez

Coorientadora – UdelaR

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** LIERCIO ANDRE ISOLDI  
Data: 02/12/2025 10:34:46-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Liércio André Isoldi

Membro Interno – PPGEO/FURG

Prof. M.Sc. Patricia Elizabet Vila González

Membro Externo – UdelaR



**Alice Elizabeth González Fernandez**

Prof. Dra. Alice Elizabeth González Fernández

Membro Externo – UdelaR

Rio Grande, 19 de novembro de 2025

M495c

Meerssche, Pietra Guasti Vande

Concretos com agregados graúdos reciclados expostos ao ambiente marinho: avaliação de indicadores de durabilidade e análise probabilística da vida útil /Pietra Guasti Vande Meerssche. – 2025.

111 f.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, 2025.

Orientador : Dr. Mauro de Vasconcellos Real

Coorientadores:Dr. Fábio Costa Magalhães, Dra. María Noel Pereyra

1. Engenharia Oceânica. 2. Agregados reciclados. 3. . Concreto. 4. Abordagem de desempenho probabilística. 5. Penetração de cloretos.. I. Real, Mauro de Vasconcellos. II. Magalhães, Fábio Costa. III.Pereyra, María Noel. IV. Título.

CDU 62(26)

# AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, aos meus pais, Monique e Pierre, por todo o apoio ao longo da minha trajetória acadêmica e pessoal.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Mauro de Vasconcellos Real, pela constante disponibilidade, pelo incentivo e pelo apoio que foram fundamentais para a realização deste trabalho.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Fábio Costa Magalhães, agradeço pela valiosa partilha de conhecimentos, pela disponibilidade e pelo suporte essencial durante a realização do programa experimental.

À Profa. Dra. María Noel Pereyra, minha coorientadora e diretora do *Instituto de Estructuras y Transporte* (IET), da *Facultad de Ingeniería* (FING) da *Universidad de la República* (UdelaR), agradeço pela inestimável oportunidade de intercâmbio, pelo apoio na realização dos ensaios e pelas suas contribuições ao longo do desenvolvimento desta pesquisa.

À técnica de laboratório, Caroline Aveiro Quadrado, minha gratidão pelo apoio prestado durante a realização dos ensaios.

Aos meus colegas de mestrado, agradeço pela companhia, pelo apoio e pela rica troca de experiências ao longo desta jornada.

Aos docentes do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica (PPGEO), agradeço pelos conhecimentos transmitidos.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS) e à Universidade Federal do Rio Grande (FURG), agradeço pelas oportunidades e experiências que me foram proporcionadas e que enriqueceram minha formação.

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

# RESUMO

Pietra Guasti Vande Meerssche

CONCRETOS COM AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS EXPOSTOS AO AMBIENTE MARINHO: AVALIAÇÃO DE INDICADORES DE DURABILIDADE E ANÁLISE PROBABILÍSTICA DA VIDA ÚTIL

A indústria da construção civil demanda grandes volumes de recursos naturais e energia, gerando, consequentemente, bilhões de toneladas de resíduos sólidos e sendo responsável por uma parcela significativa das emissões globais de CO<sub>2</sub>. Visando mitigar os impactos ambientais do setor, alternativas têm sido desenvolvidas para substituir os componentes tradicionais do concreto, dentre as quais se destaca o uso de agregados reciclados. Contudo, a aplicação desses materiais em concretos estruturais ainda é limitada, principalmente devido às incertezas relacionadas ao seu desempenho mecânico e de durabilidade. A corrosão das armaduras, induzida por íons cloretos, constitui o principal mecanismo de deterioração de estruturas de concreto armado em ambientes marinhos. Tal cenário demanda cuidados específicos quanto à qualidade do concreto de cobrimento para garantir a durabilidade da estrutura. Diversos modelos têm sido desenvolvidos para estimar a penetração de íons cloretos, sendo os mais frequentemente citados na literatura os modelos Duracon, *fib* (2006) e *Life-365*, os quais já foram empregados em documentos normativos e projetos voltados à durabilidade. Este trabalho apresenta uma avaliação experimental de misturas de concreto com substituição parcial de agregado graúdo natural por agregado graúdo reciclado de concreto, considerando níveis de substituição de 20%, 50%, 75% e 100%. Os agregados foram caracterizados quanto à sua granulometria, absorção de água e massa específica. Nos concretos produzidos, foram realizados ensaios para a determinação da absorção de água por capilaridade, das resistências à compressão axial e à tração por compressão diametral, da resistividade elétrica superficial e volumétrica, e dos coeficientes de difusão de cloretos nos estados estacionário e não estacionário. Para a estimativa da vida útil de estruturas de concreto expostas a ambientes marinhos, foram utilizadas as metodologias Duracon, *fib* (2006) e *Life-365*. Os resultados indicam que a substituição de até 20% do agregado graúdo natural por agregado reciclado proveniente de elementos estruturais pré-moldados não comprometeu significativamente as propriedades mecânicas e de durabilidade avaliadas, apresentando desempenho comparável ao do concreto convencional, inclusive nas estimativas de vida útil.

**Palavras-chave:** Agregados reciclados. Concreto. Abordagem de desempenho probabilística. Penetração de cloretos.

# ABSTRACT

Pietra Guasti Vande Meerssche

CONCRETE WITH RECYCLED COARSE AGGREGATES EXPOSED TO THE MARINE ENVIRONMENT: ASSESSMENT OF DURABILITY INDICATORS AND PROBABILISTIC SERVICE LIFE ANALYSIS

The civil construction industry demands large volumes of natural resources and energy, consequently generating billions of tons of solid waste and being responsible for a significant portion of global CO<sub>2</sub> emissions. Aiming to mitigate the environmental impacts of the sector, alternatives have been developed to replace the traditional components of concrete, among which the use of recycled aggregates stands out. However, the application of these materials in structural concrete is still limited, mainly due to uncertainties related to their mechanical and durability performance. Reinforcement corrosion, induced by chloride ions, constitutes the main deterioration mechanism of reinforced concrete structures in marine environments. This scenario demands specific care regarding the quality of the concrete cover to ensure the structure's durability. Several models have been developed to estimate chloride ion penetration, with the Duracon, *fib* (2006), and *Life-365* models being the most frequently cited in the literature, which have already been used in normative documents and durability-oriented projects. This work presents an experimental evaluation of concrete mixtures with partial replacement of natural coarse aggregate by recycled coarse concrete aggregate, considering replacement levels of 20%, 50%, 75%, and 100%. The aggregates were characterized in terms of their particle size distribution, water absorption, and specific gravity. On the produced concretes, tests were performed to determine water absorption by capillarity, axial compressive strength and splitting tensile strength, surface and bulk electrical resistivity, and chloride diffusion coefficients in steady-state and non-steady-state. For the service life estimation of concrete structures exposed to marine environments, the Duracon, *fib* (2006), and *Life-365* methodologies were used. The results indicate that the replacement of up to 20% of the natural coarse aggregate by recycled aggregate from precast structural elements did not significantly compromise the evaluated mechanical and durability properties, showing comparable performance to conventional concrete, including in the service life estimates.

**Keywords:** Recycled aggregates. Concrete. Probabilistic performance-based approach. Chloride penetration.

# SUMÁRIO

|                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Introdução .....                                                                         | 18 |
| 1.2. Objetivos .....                                                                        | 20 |
| 1.3. Delimitações.....                                                                      | 20 |
| 1.4. Estrutura do trabalho .....                                                            | 21 |
| 2. Revisão bibliográfica .....                                                              | 22 |
| 2.1. Conceitos básicos de durabilidade e vida útil .....                                    | 22 |
| 2.2. Durabilidade do concreto em ambiente marinho .....                                     | 24 |
| 2.2.1. Corrosão desencadeada por ataque de íons cloretos.....                               | 27 |
| 2.2.2. Mecanismos de transporte no concreto .....                                           | 27 |
| 2.3. Níveis de abordagem de projeto .....                                                   | 30 |
| 2.3.1. Abordagem de desempenho .....                                                        | 32 |
| 2.4. Conceitos de confiabilidade estrutural .....                                           | 35 |
| 2.4.1. Modelagem probabilística da vida útil .....                                          | 40 |
| 2.5. Concretos com agregados reciclados.....                                                | 41 |
| 2.5.1. Normas técnicas para uso de agregados reciclados .....                               | 43 |
| 2.5.2. Estado da arte sobre o desempenho do concreto com agregados reciclados.....          | 45 |
| 3. Metodologia .....                                                                        | 49 |
| 3.1. Programa experimental.....                                                             | 49 |
| 3.1.1. Materiais utilizados .....                                                           | 49 |
| 3.1.2. Concretos avaliados .....                                                            | 53 |
| 3.1.3. Concretagem, moldagem e cura .....                                                   | 53 |
| 3.2. Avaliação das propriedades dos concretos .....                                         | 55 |
| 3.2.1. Resistência à compressão axial.....                                                  | 55 |
| 3.2.2. Resistência à tração por compressão diametral.....                                   | 55 |
| 3.2.3. Absorção de água por capilaridade.....                                               | 56 |
| 3.2.4. Coeficiente de migração de cloretos no estado não estacionário .....                 | 58 |
| 3.2.5. Coeficiente de difusão de cloretos nos estados estacionário e não estacionário ..... | 62 |
| 3.2.6. Resistividade elétrica volumétrica .....                                             | 64 |
| 3.2.7. Resistividade elétrica superficial .....                                             | 66 |
| 3.3. Análise probabilística.....                                                            | 68 |
| 3.3.1. Modelo Duracon.....                                                                  | 68 |
| 3.3.2. Modelo <i>fib</i> (2006).....                                                        | 69 |
| 3.3.3. Modelo <i>Life-365</i> .....                                                         | 70 |
| 3.3.4. Função de estado limite e parâmetros de entrada para análise probabilística .....    | 71 |
| 4. Resultados .....                                                                         | 75 |
| 4.1. Resistência à compressão axial.....                                                    | 75 |

|                                                                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.2. Resistência à tração por compressão diametral .....                                                              | 76  |
| 4.3. Absorção de água por capilaridade.....                                                                           | 77  |
| 4.4. Coeficiente de migração de cloretos no estado não estacionário .....                                             | 79  |
| 4.5. Coeficiente de difusão de cloretos nos estados estacionário e não estacionário .....                             | 80  |
| 4.6. Avaliação dos métodos de ensaio para determinação do coeficiente de difusão de cloretos .                        | 83  |
| 4.7. Resistividade elétrica.....                                                                                      | 84  |
| 4.7.1. Resistividade elétrica volumétrica .....                                                                       | 84  |
| 4.7.2. Resistividade elétrica superficial .....                                                                       | 85  |
| 4.8. Correlação entre resistividade elétrica superficial e volumétrica .....                                          | 85  |
| 4.9. Correlação entre resistividade elétrica e o coeficiente de migração de cloretos no estado não estacionário ..... | 86  |
| 4.10. Análises probabilísticas.....                                                                                   | 87  |
| 4.10.1. Modelo Duracon.....                                                                                           | 87  |
| 4.10.2. Modelo <i>fib</i> (2006).....                                                                                 | 89  |
| 4.10.3. Modelo <i>Life-365</i> .....                                                                                  | 90  |
| 4.10.4. Estimativa de vida útil.....                                                                                  | 92  |
| 5. Conclusões .....                                                                                                   | 95  |
| 5.1. Principais conclusões.....                                                                                       | 95  |
| 5.2. Sugestões para trabalhos futuros.....                                                                            | 96  |
| Referências .....                                                                                                     | 98  |
| Apêndice A: Verificação dos softwares .....                                                                           | 107 |

# LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.1: Modelo de vida útil proposto por Tuutti (1989). Fonte: Ribeiro (2018).....                                                                                                                                                             | 23 |
| Figura 2.2: Modelo de vida útil proposto por Helene (1993). Fonte: Ribeiro (2018). ....                                                                                                                                                            | 23 |
| Figura 2.3: Zonas de agressividade às estruturas de concreto armado. Fonte: Bauer (2019). ....                                                                                                                                                     | 25 |
| Figura 2.4: Formas de ocorrência de cloretos na estrutura do concreto. Fonte: Ribeiro (2018). ....                                                                                                                                                 | 30 |
| Figura 2.5: Princípios do projeto baseado em desempenho. Fonte: Adaptado de Beushausen (2016).<br>.....                                                                                                                                            | 33 |
| Figura 2.6: Funções de densidade de probabilidade da capacidade resistente e das solicitações. Fonte:<br>Ang e Tang (2007) <i>apud</i> Magalhães (2018).....                                                                                       | 37 |
| Figura 2.7: Função de densidade de probabilidade da margem de segurança. Fonte: Ang e Tang<br>(2007) <i>apud</i> Magalhães (2018). ....                                                                                                            | 37 |
| Figura 2.8: Índice de confiabilidade e probabilidade de falha. Fonte: Adaptado de Real (2023)....                                                                                                                                                  | 38 |
| Figura 2.9: Representação gráfica do método FORM. Fonte: Adaptado de Sagrilo (1994). ....                                                                                                                                                          | 39 |
| Figura 2.10: Modelo esquemático do método de SMC considerando-se duas variáveis de entrada.<br>Fonte: Adaptado de Magalhães (2018). ....                                                                                                           | 39 |
| Figura 2.11: Função de densidade de probabilidade: (a) Não acumulada; (b) Acumulada. ....                                                                                                                                                          | 40 |
| Figura 3.1: Curvas granulométricas: (a) Areia fina; (b) Areia grossa. ....                                                                                                                                                                         | 51 |
| Figura 3.2: Curvas granulométricas: (a) Agregado gráúdo natural; (b) Agregado gráúdo reciclado. ....                                                                                                                                               | 53 |
| Figura 3.3: Moldagem dos corpos de prova. ....                                                                                                                                                                                                     | 54 |
| Figura 3.4: Esquemas de corte (dimensões em mm). ....                                                                                                                                                                                              | 54 |
| Figura 3.5: Determinação da resistência à compressão axial. ....                                                                                                                                                                                   | 55 |
| Figura 3.6: Determinação da resistência à tração por compressão diametral. ....                                                                                                                                                                    | 56 |
| Figura 3.7: Exemplo de gráfico de absorção capilar para três amostras. Fonte: Adaptado de IRAM<br>1871 (IRAM, 2021). ....                                                                                                                          | 58 |
| Figura 3.8: Esquema NT Build 492. Fonte: Adaptado de NT Build 492 (NORDTEST, 1999)....                                                                                                                                                             | 59 |
| Figura 3.9: Determinação do coeficiente de migração de cloretos no estado não estacionário. ....                                                                                                                                                   | 59 |
| Figura 3.10: Medição da profundidade de penetração de cloretos. Fonte: Adaptado de NT Build 492<br>(NORDTEST, 1999). ....                                                                                                                          | 60 |
| Figura 3.11: Determinação da profundidade de penetração dos íons cloretos. ....                                                                                                                                                                    | 61 |
| Figura 3.12: Esquema de ensaio proposto pela UNE 83987. Fonte: Adaptado da UNE 83987<br>(AENOR, 2012). ....                                                                                                                                        | 62 |
| Figura 3.13: Esquema do gráfico padrão obtido no ensaio de difusão de cloretos, bem como a<br>determinação do <i>time lag</i> ( $\tau$ ); e início ( $\Delta$ ) e fim ( $\circ$ ) do estado estacionário de difusão. Fonte: Ribeiro<br>(2018)..... | 64 |
| Figura 3.14: Determinação da resistividade elétrica volumétrica. ....                                                                                                                                                                              | 65 |
| Figura 3.15: Esquema do ensaio de resistividade elétrica volumétrica. Fonte: Adaptado de UNE<br>83988-1 (AENOR, 2008) <i>apud</i> IBRACON (2021). ....                                                                                             | 65 |

|                                                                                                                                                         |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 3.16: Esquema do ensaio de resistividade elétrica superficial. Fonte: Adaptado de AASHTO T 358 (AASHTO, 2015). .....                             | 67  |
| Figura 3.17: Marcação das amostras. Fonte: Adaptado de AASHTO T 358 (AASHTO, 2015). ....                                                                | 67  |
| Figura 3.18: Determinação da resistividade elétrica superficial. ....                                                                                   | 67  |
| Figura 4.1: Resistência à compressão axial. ....                                                                                                        | 75  |
| Figura 4.2: Resistência à tração por compressão diametral. ....                                                                                         | 76  |
| Figura 4.3: Capacidade de absorção de água por capilaridade das amostras. ....                                                                          | 77  |
| Figura 4.4: Curvas de absorção de água por capilaridade. ....                                                                                           | 78  |
| Figura 4.5: Coeficiente de migração de cloretos em estado não estacionário ao longo do tempo. ...                                                       | 79  |
| Figura 4.6: Variação da difusividade do concreto ao longo do tempo. ....                                                                                | 80  |
| Figura 4.7: Curvas de concentração no tempo. ....                                                                                                       | 81  |
| Figura 4.8: Evolução da concentração de cloreto na célula anódica para cada traço. ....                                                                 | 82  |
| Figura 4.9: Avaliação dos métodos de ensaio para determinar o coeficiente de difusão de cloretos. ...                                                   | 83  |
| Figura 4.10: Resistividade elétrica volumétrica. ....                                                                                                   | 84  |
| Figura 4.11: Correlação entre resistividade elétrica superficial e volumétrica. ....                                                                    | 86  |
| Figura 4.12: Correlação entre resistividade elétrica superficial e coeficiente de migração de cloretos. ....                                            | 86  |
| Figura 4.13: Correlação entre resistividade elétrica volumétrica e coeficiente de migração de cloretos. ....                                            | 87  |
| Figura 4.14: Probabilidade de falha calculada com base no modelo Duracon. ....                                                                          | 88  |
| Figura 4.15: Probabilidade de falha calculada com base no modelo <i>fib</i> (2006). ....                                                                | 89  |
| Figura 4.16: Probabilidade de falha calculada com base no modelo <i>Life</i> -365. ....                                                                 | 90  |
| Figura 4.17: Incerteza associada. ....                                                                                                                  | 91  |
| Figura 4.18: Vida útil estimada (em anos) para os diferentes traços de concreto, segundo os modelos Duracon, <i>Life</i> -365 e <i>fib</i> (2006). .... | 92  |
| Figura 4.19: $p_f$ calculada com base nos modelos Duracon, <i>fib</i> (2006) e <i>Life</i> -365. ....                                                   | 93  |
| Figura 5.1: Exemplo de análise realizada no software Duracon. Fonte: PIANC (2010). ....                                                                 | 107 |
| Figura 5.2: Resultados obtidos no software Duracon. ....                                                                                                | 108 |
| Figura 5.3: Exemplo de análise realizada no software <i>Life</i> -365. Fonte: Deiveegan <i>et al.</i> (2021). ...                                       | 109 |
| Figura 5.4: Resultados obtidos no software <i>Life</i> -365. ....                                                                                       | 110 |
| Figura 5.5: Exemplo de análise realizada com base no modelo <i>fib</i> (2006). Fonte: Papworth e Gehlen. (2016). ....                                   | 111 |
| Figura 5.6: Resultados obtidos no programa em linguagem Python para aplicação do modelo <i>fib</i> (2006). ....                                         | 111 |

# LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 2.1: Concentração média dos principais íons presentes na água do mar. Fonte: Ribeiro (2018).<br>.....                                                                        | 24 |
| Tabela 2.2: Níveis de abordagem para a concepção de estruturas de concreto duráveis. Fonte: Adaptado de Ribeiro (2018).<br>.....                                                    | 31 |
| Tabela 2.3: Principais métodos normatizados para avaliação da penetração de cloretos no concreto. Fonte: Adaptado de Yuan e Santhanam (2013).<br>.....                              | 34 |
| Tabela 2.4: Incertezas no processo de avaliação da confiabilidade. Fonte: Melchers e Beck (2018) <i>apud</i> Magalhães (2018).<br>.....                                             | 35 |
| Tabela 2.5: Modelos de vida útil para concreto armado. Fonte: Adaptado de Alexander (2018).<br>.....                                                                                | 41 |
| Tabela 3.1: Características físicas e químicas do cimento Portland. Fonte: Catálogo do fabricante (2021).<br>.....                                                                  | 50 |
| Tabela 3.2: Características físicas dos agregados miúdos.<br>.....                                                                                                                  | 51 |
| Tabela 3.3: Características físicas dos agregados graúdos. ....                                                                                                                     | 52 |
| Tabela 3.4: Consumo de materiais em $\text{kg/m}^3$ . ....                                                                                                                          | 53 |
| Tabela 3.5: Tensão e duração do ensaio. Fonte: Adaptado de NT Build 492 (NORDTEST, 1999).<br>.....                                                                                  | 60 |
| Tabela 3.6: Resistência à penetração de cloretos. Fonte: Adaptado de Nilsson <i>et al.</i> (1998) <i>apud</i> Gjrv (2014).<br>.....                                                | 61 |
| Tabela 3.7: Classificação do concreto quanto à penetração de íons cloretos com base na resistividade elétrica superficial. Fonte: Adaptado de AASHTO T 358 (AASHTO, 2015).<br>..... | 68 |
| Tabela 3.8: Parâmetros de entrada para o modelo Duracon. ....                                                                                                                       | 73 |
| Tabela 3.9: Parâmetros de entrada para o modelo <i>fib</i> (2006). ....                                                                                                             | 73 |
| Tabela 3.10: Parâmetros de entrada para o modelo <i>Life-365</i> .<br>.....                                                                                                         | 74 |
| Tabela 4.1: Parâmetros obtidos no ensaio de absorção capilar. ....                                                                                                                  | 78 |
| Tabela 4.2: Fator de envelhecimento dos concretos. ....                                                                                                                             | 80 |
| Tabela 4.3: Coeficiente de difusão aos 91 dias.<br>.....                                                                                                                            | 81 |
| Tabela 4.4: Resistividade elétrica superficial.<br>.....                                                                                                                            | 85 |

# LISTA DE SÍMBOLOS

## *Símbolos subscritos e sobrescritos*

|                     |                                                                                     |                                 |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| $\overline{\rho_c}$ | Média das medidas obtidas em resistividade elétrica volumétrica                     | $[\Omega \times m]$             |
| $\Delta\Phi_{ss}$   | Média das tensões efetivas medidas durante o período de estado estacionário         | $[V]$                           |
| $h_0$               | Altura inicial                                                                      | $[m]$                           |
| $h_1$               | Altura final                                                                        | $[m]$                           |
| $A_c$               | Área da seção transversal do corpo de prova sobre a qual atua a força de compressão | $[mm^2]$                        |
| $A_i$               | Área da seção transversal da amostra                                                | $[m^2]$                         |
| $C_{(x,t)}$         | Concentração de cloretos na profundidade $x_c$ após o tempo $t$                     | $[\%/massa \text{ de cimento}]$ |
| $C_0$               | Concentração inicial de cloretos no concreto                                        | $[\%/massa \text{ de cimento}]$ |
| $C_{S,\Delta x}$    | Concentração superficial substituta                                                 | $[\%/massa \text{ de cimento}]$ |
| $C_S$               | Concentração de cloretos na superfície do concreto                                  | $[\%/massa \text{ de cimento}]$ |
| $C_{cr}$            | Concentração crítica de cloretos                                                    | $[\%/massa \text{ de cimento}]$ |
| $C_i$               | Capacidade de absorção capilar da amostra                                           | $[g/m^2]$                       |
| $C_i(x)$            | Concentração iônica                                                                 | $[g/m^3]$                       |
| $C_{it}$            | Capacidade de absorção capilar da amostra no instante de leitura $t$                | $[g/m^2]$                       |
| $Cl^-$              | Quantidade de cloretos                                                              | $[mol]$                         |
| $D_0$               | Coefficiente de difusão determinado no tempo de referência $t_0$                    | $[m^2/s]$                       |
| $D_0$               | Coefficiente de migração de cloretos                                                | $[mm^2/anos]$                   |
| $D_{app,C}$         | Coefficiente aparente de difusão de cloretos                                        | $[mm^2/anos]$                   |
| $D_i$               | Coefficiente de difusão                                                             | $[m^2/s]$                       |
| $D_{ns}$            | Coefficiente de difusão de cloretos no estado não estacionário                      | $[cm^2/s]$                      |
| $D_{nssm}$          | Coefficiente de migração não estacionário                                           | $[m^2/s]$                       |
| $D_{nssm}(t_0)$     | Coefficiente de migração no estado não estacionário na idade $t_0$                  | $[m^2/s]$                       |
| $D_{nssm}(t)$       | Coefficiente de migração no estado não estacionário na idade $t$                    | $[m^2/s]$                       |
| $D_{ref}$           | Coefficiente de difusão no tempo $t_{ref}$                                          | $[m^2/s]$                       |
| $D_s$               | Coefficiente de difusão de cloretos no estado estacionário                          | $[cm^2/s]$                      |
| $E_A$               | Energia de ativação da difusão de cloretos                                          | $[kJ/mol]$                      |
| $F_R$               | Função de distribuição acumulada                                                    |                                 |
| $G_0$               | Grau de saturação no início do ensaio de absorção capilar                           | $[\%]$                          |
| $G_f$               | Grau de saturação ao final do ensaio de absorção capilar                            | $[\%]$                          |
| $J_{Cl}$            | Fluxo dos íons cloretos                                                             | $[mol/(s \times cm^2)]$         |

|            |                                                                                      |                                               |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| $J_i$      | Fluxo iônico                                                                         | $[\text{g}/\text{m}^2 \times \text{s}]$       |
| $K_h$      | Permeabilidade hidráulica                                                            | $[\text{m}/\text{s}]$                         |
| $M_0$      | Massa seca a 105 °C da amostra                                                       | $[\text{g}]$                                  |
| $M_{hit}$  | Massa úmida da amostra no instante de leitura                                        | $[\text{g}]$                                  |
| $M_{si}$   | Massa seca da amostra                                                                | $[\text{g}]$                                  |
| $M_w$      | Coefficiente de absorção de água                                                     | $[\text{m}/\text{s}^{0,5}]$                   |
| $P_f$      | Probabilidade de falha                                                               | $[\%]$                                        |
| $R_c$      | Resistência elétrica do concreto                                                     | $[\Omega]$                                    |
| $R_{c+sp}$ | Resistência elétrica do concreto somada à das esponjas                               | $[\Omega]$                                    |
| $R_{sp}$   | Resistência elétrica das esponjas                                                    | $[\Omega]$                                    |
| $S_{05i}$  | Coefficiente de absorção capilar de cada amostra em função da raiz quadrada do tempo | $[\text{g}/\text{m}^2 \times \text{s}^{1/2}]$ |
| $S_{05m}$  | Coefficiente de absorção capilar médio                                               | $[\text{g}/\text{m}^2 \times \text{s}^{1/2}]$ |
| $S_i$      | Coefficiente de absorção capilar de cada amostra em função da raiz quarta do tempo   | $[\text{g}/\text{m}^2 \times \text{s}^{1/4}]$ |
| $T_{real}$ | Temperatura do elemento estrutural ou do ar ambiente                                 | $[\text{K}]$                                  |
| $T_{ref}$  | Temperatura de teste padrão                                                          | $[\text{K}]$                                  |
| $V_a$      | Volume do anólito                                                                    | $[\text{L}]$                                  |
| $V_f$      | Vazão de escoamento do fluido                                                        | $[\text{m}^3/\text{s}]$                       |
| $b_e$      | Variável de regressão                                                                | $[\text{K}]$                                  |
| $c_{25}$   | Condutividade elétrica obtida a 25 °C                                                | $[\text{mS}/\text{m}]$                        |
| $c_T$      | Condutividade elétrica obtida à temperatura $T$                                      | $[\text{mS}/\text{m}]$                        |
| $f_c$      | Resistência à compressão axial                                                       | $[\text{Pa}]$                                 |
| $f_{ck}$   | Resistência característica à compressão                                              | $[\text{Pa}]$                                 |
| $f_{ct}$   | Resistência à tração                                                                 | $[\text{Pa}]$                                 |
| $f_s$      | Função densidade de probabilidade de $S$                                             |                                               |
| $k_c$      | Fator de cura                                                                        |                                               |
| $k_e$      | Parâmetro que introduz a influência da temperatura no processo de difusão            |                                               |
| $k_e$      | Variável de transferência ambiental                                                  |                                               |
| $k_f$      | Fator de forma                                                                       |                                               |
| $k_t$      | Parâmetro de transferência                                                           |                                               |
| $p_f$      | Probabilidade de falha                                                               | $[\%]$                                        |
| $t'$       | Idade do concreto quando exposto aos íons                                            | $[\text{anos}]$                               |
| $t_0$      | Tempo de referência                                                                  | $[\text{anos}]$                               |
| $t_d$      | Tempo correspondente a 0,9 $C_i$                                                     | $[\text{h}]$                                  |

|               |                                                |                                   |
|---------------|------------------------------------------------|-----------------------------------|
| $t_{ref}$     | Tempo de referência                            | [s]                               |
| $w_1$         | Água absorvida em um dado tempo $t_1$          | [m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ] |
| $x_c$         | Espessura do cobrimento                        | [mm]                              |
| $x_d$         | Valor médio das profundidades de penetração    | [mm]                              |
| $z_i$         | Valência da espécie iônica                     |                                   |
| $\mu_M$       | Valor esperado da margem de segurança          |                                   |
| $\mu_R$       | Valor esperado da capacidade de resistência    |                                   |
| $\mu_S$       | Valor esperado das solicitações                |                                   |
| $\rho_{scon}$ | Resistividade elétrica superficial do concreto | [ $\Omega \times m$ ]             |
| $\rho_{Vcon}$ | Resistividade elétrica volumétrica do concreto | [ $\Omega \times m$ ]             |
| $\rho_c$      | Resistividade elétrica do concreto             | [ $\Omega \times m$ ]             |
| $\sigma_M$    | Desvio padrão da margem de segurança           |                                   |
| $\sigma_R$    | Desvio padrão da capacidade resistente         |                                   |
| $\sigma_S$    | Desvio padrão das solicitações                 |                                   |

### ***Símbolos romanos***

|           |                                                                                       |                        |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| $dc/dt$   | Inclinação da parte linear do gráfico de concentração de cloretos <i>versus</i> tempo |                        |
| $A$       | Seção do meio poroso                                                                  | [m <sup>2</sup> ]      |
| $A(t)$    | Subfunção considerando o envelhecimento                                               |                        |
| $C$       | Concentração de cloretos                                                              | [mol/m <sup>3</sup> ]  |
| $C$       | Capacidade de absorção capilar do concreto                                            | [g/m <sup>2</sup> ]    |
| $Cl$      | Concentração inicial de cloretos no católito                                          | [mol/cm <sup>3</sup> ] |
| $D$       | Coefficiente de difusão                                                               | [m <sup>2</sup> /s]    |
| $D(T)$    | Coefficiente de difusão no tempo $t$ e temperatura $T$                                | [m <sup>2</sup> /s]    |
| $D(t)$    | Coefficiente de difusão de cloretos no concreto, dependente do tempo                  | [m <sup>2</sup> /s]    |
| $E(x)$    | Potencial elétrico aplicado                                                           | [V]                    |
| $F$       | Carga máxima                                                                          | [N]                    |
| $F$       | Constante de Faraday                                                                  | [J/(V×mol)]            |
| $G(x, t)$ | Função de estado limite                                                               |                        |
| $H$       | Altura da coluna d'água                                                               | [m]                    |
| $I$       | Corrente elétrica que circula pelo circuito                                           | [A]                    |
| $L$       | Altura das amostras                                                                   | [m]                    |
| $L$       | Comprimento da amostra                                                                | [m]                    |
| $L$       | Comprimento da linha de contato com a amostra                                         | [mm]                   |

|           |                                                                    |                     |
|-----------|--------------------------------------------------------------------|---------------------|
| $L$       | Espessura da amostra                                               | [mm]                |
| $M$       | Margem de segurança                                                |                     |
| $P$       | Probabilidade                                                      | [%]                 |
| $R$       | Capacidade de resistência                                          |                     |
| $R$       | Constante universal dos gases                                      | [J/(mol×K)]         |
| $R$       | Resistência elétrica                                               | [Ω]                 |
| $R(x, t)$ | Conjunto de mecanismos resistentes                                 |                     |
| $S$       | Área da face da amostra em que a esponja está localizada           | [m <sup>2</sup> ]   |
| $S$       | Área de seção transversal da amostra                               | [m <sup>2</sup> ]   |
| $S$       | Área superficial do corpo de prova exposta à solução de cloretos   | [cm <sup>2</sup> ]  |
| $S$       | Solicitações                                                       |                     |
| $S(x, t)$ | Conjunto de solicitações                                           |                     |
| $T$       | Temperatura                                                        | [K]                 |
| $T$       | Temperatura                                                        | [°C]                |
| $T$       | Temperatura absoluta                                               | [K]                 |
| $T$       | Temperatura média do anólito durante o ensaio                      | [K]                 |
| $T$       | Valor médio das temperaturas inicial e final na solução do anólito | [°C]                |
| $U$       | Energia de ativação do processo de difusão                         | [J/mol]             |
| $U$       | Valor absoluto da tensão aplicada                                  | [V]                 |
| $V$       | Diferença de potencial entre os eletrodos                          | [V]                 |
| $V$       | Velocidade de convecção                                            | [m/s]               |
| $V$       | Volume da célula catódica, com cloretos                            | [cm <sup>3</sup> ]  |
| $a/c$     | Relação água/cimento                                               |                     |
| $e$       | Espessura do corpo de prova                                        | [cm]                |
| $erf$     | Função de erro de Gauss                                            |                     |
| $exp$     | Função exponencial                                                 |                     |
| $g$       | Aceleração da gravidade                                            | [m/s <sup>2</sup> ] |
| $g(X)$    | Função de estado limite                                            |                     |
| $k$       | Coefficiente de permeabilidade ao ar                               | [m <sup>2</sup> ]   |
| $l$       | Altura do corpo de prova                                           | [m]                 |
| $l$       | Diâmetro do corpo de prova                                         | [m]                 |
| $n$       | Constante                                                          |                     |
| $s$       | Área de seção transversal do tubo capilar                          | [m <sup>2</sup> ]   |
| $t$       | Duração da absorção de água                                        | [s]                 |
| $t$       | Duração do ensaio                                                  | [h]                 |

|     |                                                                           |                                   |
|-----|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| $t$ | Tempo                                                                     | [s]                               |
| $t$ | Tempo necessário para que o líquido se desloque da altura $h_0$ até $h_1$ | [s]                               |
| $w$ | Água absorvida por unidade de área no tempo $t$                           | [m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ] |
| $x$ | Distância da face externa do material                                     | [m]                               |
| $z$ | Valência do íon cloreto                                                   |                                   |

### ***Símbolos gregos***

|               |                                                                                                                                 |                      |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| $\Delta x$    | Profundidade da zona de convecção                                                                                               | [mm]                 |
| $\Delta E$    | Média das tensões efetivas medidas nas duas faces do corpo de prova, durante o trecho correspondente ao estado não estacionário | [V]                  |
| $\Delta \phi$ | Campo elétrico normalizado                                                                                                      | [V/cm]               |
| $\alpha$      | Fator de envelhecimento do concreto                                                                                             |                      |
| $\beta$       | Índice de confiabilidade                                                                                                        |                      |
| $\gamma$      | Coefficiente de atividade do íon cloreto da solução catódica                                                                    |                      |
| $\mu$         | Viscosidade do ar na temperatura ambiente                                                                                       | [Pa×s]               |
| $\rho$        | Massa específica do fluido utilizado no tubo capilar                                                                            | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| $\tau$        | <i>Time lag</i>                                                                                                                 | [s]                  |
| $\varphi$     | Fator de aceleração do campo elétrico                                                                                           | [V/cm]               |

## LISTA DE SIGLAS

|         |                                                                                                          |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| AASHTO  | <i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>                                |
| ABNT    | Associação Brasileira de Normas Técnicas                                                                 |
| ABRECON | Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição                        |
| ACI     | <i>American Concrete Institute</i>                                                                       |
| AENOR   | <i>Asociación Española de Normalización y Certificación</i>                                              |
| ARCI    | Agregado Reciclado Cimentício                                                                            |
| ARCO    | Agregado Reciclado de Concreto                                                                           |
| ARM     | Agregado Reciclado Misto                                                                                 |
| ASTM    | <i>American Society for Testing and Materials</i>                                                        |
| CAPES   | Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior                                              |
| CEB     | <i>Comité Euro-International du Béton</i>                                                                |
| CNTL    | Centro Nacional de Tecnologias Limpas                                                                    |
| CONAMA  | Conselho Nacional do Meio Ambiente                                                                       |
| CPC     | Cimento Portland Composto                                                                                |
| FIB     | <i>fédération internationale du béton</i>                                                                |
| FING    | <i>Facultad de Ingeniería</i>                                                                            |
| FORM    | Método de Confiabilidade de Primeira Ordem                                                               |
| FURG    | Universidade Federal do Rio Grande                                                                       |
| HR      | <i>Hormigón Reciclado</i>                                                                                |
| IBRACON | Instituto Brasileiro do Concreto                                                                         |
| ICPA    | Instituto de Cimento Portland Argentino                                                                  |
| IET     | <i>Instituto de Estructuras y Transporte</i>                                                             |
| IFRS    | Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul                                 |
| INMET   | Instituto Nacional de Meteorologia                                                                       |
| IRAM    | <i>Instituto Argentino de Normalización y Certificación</i>                                              |
| ISO     | <i>International Organization for Standardization</i>                                                    |
| LEMCC   | Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção Civil                                                |
| NBR     | Norma Brasileira                                                                                         |
| NM      | Norma Mercosul                                                                                           |
| NT      | <i>Nordtest</i>                                                                                          |
| PIB     | Produto Interno Bruto                                                                                    |
| PNRS    | Política Nacional de Resíduos Sólidos                                                                    |
| PPGEO   | Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica                                                         |
| RCC     | Resíduos da Construção Civil                                                                             |
| RILEM   | <i>International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures</i> |
| SMC     | Simulação de Monte Carlo                                                                                 |
| SORM    | Método de Confiabilidade de Segunda Ordem                                                                |
| UDELAR  | <i>Universidad de la República</i>                                                                       |
| UNE     | <i>Una Norma Española</i>                                                                                |
| UNEP    | <i>United Nations Environment Programme</i>                                                              |

|      |                                              |
|------|----------------------------------------------|
| UNIT | <i>Instituto Uruguayo de Normas Técnicas</i> |
| VUP  | Vida Útil de Projeto                         |

# 1. Introdução

O concreto está entre os materiais mais consumidos no mundo, sobretudo devido à sua alta versatilidade, estando presente em diversas obras de engenharia e desempenhando papel significativo na economia global. Nos últimos anos, a durabilidade e a previsão de vida útil têm adquirido crescente relevância no projeto de estruturas de concreto armado. Segundo Beushausen (2016), essa tendência decorre do desempenho inadequado de durabilidade de muitas estruturas de concreto armado construídas nas últimas décadas. A falha dessas estruturas devido à durabilidade insuficiente tem causado grandes perdas sociais e econômicas. Prolongar a vida útil de projeto é, portanto, uma medida fundamental para a preservação de recursos, de energia e do meio ambiente (Xiao, 2018).

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2023), os mecanismos de deterioração e envelhecimento das estruturas de concreto armado podem estar associados ao próprio concreto, às armaduras ou à estrutura como um todo. Dentre os mecanismos relativos ao concreto destacam-se a lixiviação por ação de águas puras, carbônicas agressivas, ácidas e outras, expansão por ação de águas ou solos que contenham ou estejam contaminados com sulfatos ou por ação de reações álcali-agregado. Os principais processos relacionados às armaduras envolvem a despassivação por carbonatação ou por ação de cloretos. Os mecanismos atuantes na estrutura global estão associados às ações mecânicas, movimentações de origem térmica, impactos, ações cíclicas, retração, fluência e relaxação, bem como as diversas ações que atuam sobre a estrutura.

Uma parcela significativa da população mundial encontra-se concentrada em regiões costeiras, onde se localizam construções de grande relevância econômica, como portos, marinas, estaleiros, parques eólicos, molhes, entre outros. Essas áreas são caracterizadas por elevada agressividade ambiental, devido à presença de íons cloretos, cuja ação sobre as estruturas de concreto armado promove a despassivação das armaduras, desencadeando o processo de corrosão e comprometendo a durabilidade dessas edificações (Magalhães, 2018).

Os íons cloretos presentes no concreto podem ter diversas origens e podem penetrar no material tanto durante a fase de produção quanto ao longo de sua vida útil. No concreto fresco, sua presença pode estar associada à utilização de água de amassamento ou agregados contaminados com cloretos. Já no concreto endurecido, os íons podem ser introduzidos por meio do contato direto com a água do mar ou água subterrânea, por meio da ação da maresia, aplicação de sais de degelo, entre outras fontes de contaminação externas (Ribeiro, 2018; Ehlen, 2020).

De acordo com a *National Association of Corrosion Engineers* (Nace International, 2016), o custo global da corrosão é estimado em aproximadamente US\$ 2,5 trilhões, o que corresponde a cerca de 3,4% do Produto Interno Bruto (PIB) mundial, conforme dados de 2013. No contexto brasileiro, Dotto (2012) destaca que, em razão da ausência de inspeções periódicas e de monitoramento sistemático das estruturas de concreto armado, os custos anuais com reparos são estimados em aproximadamente R\$ 800 milhões. Ainda segundo a autora, as intervenções corretivas geralmente ocorrem apenas quando a corrosão já se encontra em estágio avançado, o que implica em aumentos significativos nos custos de reabilitação estrutural.

Para além do ônus econômico direto, a necessidade recorrente de reparos e substituições de estruturas degradadas intensifica um dos principais desafios enfrentados pelo setor: seu elevado impacto ambiental. As atividades do setor da construção consomem quantidades significativas de recur-

sos naturais e geram aproximadamente 4,5 bilhões de toneladas de resíduos sólidos por ano, conhecidos como Resíduos da Construção Civil (RCC). Estima-se que 1% a 10% de cada material de construção adquirido sai do canteiro de obras como resíduo sólido. Além disso, cerca de 32 bilhões de toneladas de agregados naturais são extraídas anualmente (Bossink *et al.*, 1996; Marvila *et al.*, 2022). A indústria da construção civil é responsável por aproximadamente 25% a 40% do consumo global de energia. Os resíduos do setor representam entre 20% e 40% do total de resíduos sólidos urbanos, e o ruído gerado pelos canteiros de obras contribui para cerca de um terço da poluição sonora urbana. O setor é responsável ainda por 37% das emissões globais de CO<sub>2</sub>. A produção de cimento, sozinha, é responsável por aproximadamente 7% do total das emissões em todo o mundo (Xiao, 2018; UNEP, 2022).

Uma crise de fornecimento de areia, em rápido desenvolvimento, está emergindo em resposta à crescente demanda por materiais de construção no desenvolvimento de infraestrutura. Estima-se que o consumo global de areia para a construção civil aumentará em aproximadamente 45% entre 2020 e 2060. No entanto, nos últimos anos, certas regiões da China já experimentaram um esgotamento de agregados naturais mais rápido do que o esperado, o que consequentemente levou ao aumento dos custos de transporte de areia e cascalho (Bossink *et al.*, 1996; Xiao, 2018).

A magnitude dos impactos ambientais, sociais e econômicos do setor da construção civil, em constante expansão, evidencia a necessidade premente de adoção de práticas sustentáveis. O conceito de desenvolvimento sustentável, definido como o desenvolvimento que atende às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atender às suas próprias necessidades, foi formalizado na década de 1980, por meio do Relatório Brundtland (1987).

As questões relacionadas ao desenvolvimento sustentável na construção civil ganharam importância mundial nos últimos anos, em particular com a criação, em 1992, da Agenda 21 para o desenvolvimento sustentável, adotada por 178 países, incluindo o Brasil. Um dos artigos que serviu de contribuição para a Agenda 21, propõe uma agenda brasileira, a ser adotada por todos os segmentos da indústria e pelo governo, que inclui: a redução das perdas de materiais na construção; o aumento da reciclagem de resíduos como materiais de construção; a eficiência energética nas edificações; a conservação de água; a melhoria da qualidade do ar interno; a durabilidade e manutenção; a redução do déficit de habitações, infraestrutura e saneamento e a melhoria da qualidade do processo construtivo (Agopyan, 2011).

Neste contexto, diversas estratégias têm sido desenvolvidas e empregadas para reduzir o consumo de recursos naturais e os impactos do setor da construção, sendo uma dessas estratégias a substituição de agregados naturais por agregados reciclados na produção de concreto. A reciclagem de RCC para obtenção de agregados não apenas reduz a demanda por agregados naturais, mas também diminui o consumo de energia, os custos de transporte e, consequentemente, a emissão de gases poluentes (Pimentel *et al.*, 2020; Salles *et al.*, 2021). Na prática da engenharia, o uso de agregados reciclados de concreto permanece relativamente limitado. Os principais desafios associados à sua aplicação na construção civil estão relacionados à heterogeneidade dos materiais de origem, à falta de previsibilidade no desempenho reológico e mecânico do concreto e aos potenciais impactos em sua durabilidade.

Com o uso crescente de novas misturas de concreto, que incorporam diversos tipos de materiais cimentícios suplementares ou produtos reciclados, uma abordagem baseada no desempenho parece particularmente relevante para o projeto de durabilidade. Essa abordagem emprega indicadores de durabilidade, que são parâmetros derivados dos mecanismos de transporte de massa no concreto

ou dos mecanismos de deterioração e envelhecimento das estruturas. Além de fornecer informações sobre as características relacionadas às propriedades de durabilidade do material e permitir uma comparação quantitativa do potencial de durabilidade entre diferentes concretos, os indicadores de durabilidade podem ser idealmente utilizados como parâmetros de entrada em modelos de previsão de vida útil (Baroghel-Bouny *et al.*, 2009; Ribeiro, 2018; Wally *et al.*, 2022).

A previsão de vida útil das estruturas de concreto armado em ambiente marinho é comumente feita a partir da utilização de modelos de penetração de cloretos no concreto. Dentre esses modelos destacam-se o Duracon, *fib* (2006) e *Life-365*, resultantes de programas de pesquisa bem estruturados, presentes em textos normativos e pré-normativos, e usualmente aplicados ao projeto de durabilidade de estruturas de concreto armado em ambiente marinho (Wally *et al.*, 2022).

Diante da crescente demanda por soluções sustentáveis na construção civil e da necessidade de compreender o comportamento das estruturas produzidas com agregados reciclados em ambientes agressivos, o presente trabalho propõe-se a contribuir para o estudo da durabilidade dessas estruturas, quando expostas ao ambiente marinho. Além disso, busca-se avançar nas práticas de projeto baseadas em desempenho com a incorporação de métodos probabilísticos para a estimativa de vida útil das estruturas. Para isso, um programa experimental para obtenção de indicadores de durabilidade é conduzido e os resultados obtidos são utilizados em uma análise probabilística para estimativa da vida útil. Essa previsão é realizada com base nos modelos Duracon, *fib* (2006) e *Life-365*.

## 1.2. Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar o potencial de durabilidade de concretos produzidos com Agregados Reciclados de Concreto (ARCO), utilizados em substituição parcial aos agregados naturais nos teores de 20%, 50%, 75% e 100%. Além disso, busca-se estimar, de forma probabilística, a vida útil dessas estruturas em condições de exposição ao ambiente marinho, a partir dos indicadores de durabilidade obtidos em um programa experimental e da posterior aplicação desses resultados em modelos preditivos de vida útil baseados na penetração de íons cloretos.

Os objetivos específicos do estudo são os seguintes:

- Avaliar a influência do teor de substituição dos agregados naturais por ARCO no potencial de durabilidade do concreto, a partir de um conjunto específico de indicadores de durabilidade: resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, absorção de água por capilaridade, coeficientes de difusão de cloretos nos estados estacionário e não estacionário, coeficiente de migração de cloretos no estado não estacionário, resistividade elétrica superficial e volumétrica;
- Aplicar os modelos de penetração de cloretos – Duracon, *fib* (2006) e *Life-365*, para estimar de forma probabilística a vida útil dos concretos avaliados.

## 1.3. Delimitações

O trabalho apresenta as seguintes delimitações: a avaliação da substituição de agregados graúdos naturais por agregados graúdos reciclados de concreto está restrita aos teores de 20%, 50%, 75% e 100%; a produção dos concretos foi realizada com relações água/cimento variando entre 0,39 e 0,41;

foram empregados apenas ensaios acelerados para a análise da penetração de íons cloretos nos concretos; e os agregados reciclados utilizados são oriundos da britagem de um único tipo de concreto, proveniente de peças pré-fabricadas descartadas de uma indústria de pré-moldados.

Na modelagem probabilística da vida útil, apenas o período de iniciação da corrosão é considerado na análise, descartando-se o período de propagação da corrosão.

#### **1.4. Estrutura do trabalho**

O trabalho está dividido em 5 capítulos. O primeiro capítulo trata das considerações iniciais, onde são contextualizados os principais tópicos sobre o tema do trabalho, como a durabilidade, os mecanismos de deterioração e envelhecimento, a agressividade do ambiente marinho, os íons cloretos, a corrosão, os impactos do setor da construção civil, a sustentabilidade, os agregados reciclados, as abordagens de desempenho e os modelos de previsão de vida útil. Apresenta ainda os objetivos gerais e específicos, as delimitações do estudo e a estrutura do trabalho.

O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica aprofundada sobre os temas apresentados no capítulo 1, abrangendo os conceitos básicos de durabilidade e vida útil, modelos de vida útil, as classes de agressividade ambiental, a durabilidade do concreto em ambiente marinho, os mecanismos de transporte no concreto, os níveis de abordagem de projeto, os indicadores de durabilidade, os conceitos básicos de confiabilidade estrutural, a norma brasileira de agregado reciclado e o desempenho do concreto produzido com agregados reciclados.

O terceiro capítulo trata da metodologia empregada para a realização do programa experimental e da análise probabilística. Nesse capítulo são descritos os materiais utilizados na produção dos concretos, são apresentadas as características físicas dos agregados, são descritas as metodologias de ensaio, de cálculo e de interpretação de resultados adotada. Além disso, são apresentados os modelos Duracon, *fib* (2006) e *Life-365*, bem como os parâmetros de entrada necessários as suas aplicações.

No quarto capítulo são apresentados e discutidos os resultados do programa experimental – a resistência à compressão axial, a resistência à tração por compressão diametral, a absorção de água por capilaridade, o coeficiente de difusão de cloretos nos estados estacionário e não estacionário, o coeficiente de migração de cloretos no estado não estacionário, a resistividade elétrica superficial e volumétrica. Além disso, são apresentados e discutidos os resultados da análise probabilística para cada modelo de penetração de cloretos empregado.

Por fim, o capítulo 5 apresenta as considerações finais do trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

## 2. Revisão bibliográfica

Neste capítulo é apresentada uma revisão de literatura aprofundada sobre os temas associados ao trabalho. São abordados os conceitos básicos de durabilidade e vida útil, modelos de vida útil, as classes de agressividade ambiental, a durabilidade do concreto em ambiente marinho, os mecanismos de transporte no concreto, os níveis de abordagem de projeto, os indicadores de durabilidade, os conceitos básicos de confiabilidade estrutural, a norma brasileira de agregado reciclado e a durabilidade do concreto produzido com agregados reciclados.

### 2.1. Conceitos básicos de durabilidade e vida útil

A deterioração prematura das estruturas de concreto armado tem emergido como um dos desafios mais exigentes enfrentados pela indústria da construção civil. De acordo com Mehta e Monteiro (2008), em países industrialmente desenvolvidos, estimativas indicavam que cerca de 40% do total de recursos das indústrias da construção eram aplicados em reparo e manutenção de estruturas existentes e apenas 60% em novas instalações. Nesse sentido, o crescimento dos custos associados à reposição de estruturas e a maior ênfase no custo do ciclo de vida em detrimento do custo inicial, forçaram os engenheiros a darem maior atenção às questões de durabilidade.

Em 1986, por exemplo, estimativas indicavam que o custo para o reparo de pontes de concreto armado com problemas de corrosão, nos Estados Unidos, era de aproximadamente 24 bilhões de dólares, com um acréscimo anual de 500 milhões de dólares. Problemas de durabilidade semelhantes, bem como despesas extensas, também foram relatados em diversos outros países ao longo dos anos (Gjørsv, 2014). Nos últimos anos, estimativas apontam que as atividades relacionadas à avaliação, reparo e restauração de estruturas representam 35% do volume total de trabalho no setor de construção, com tendência de crescimento (García-Alonso *et al.*, 2007).

A NBR 6118 (ABNT, 2023) define durabilidade como a capacidade de uma estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e pelo contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto. De acordo com o *Committee 201* (ACI, 2016), a durabilidade de uma estrutura será determinada pelo projeto, detalhamento e execução do concreto para resistir à ação de intempéries, ataque químico, abrasão e outros processos de deterioração ao longo de sua vida útil pretendida.

A vida útil de uma estrutura, segundo a NBR 15575 (ABNT, 2021), pode ser definida como o período em que um edifício e/ou seus sistemas se prestam às atividades para as quais foram projetados e construídos, com atendimento aos níveis de desempenho previstos na norma, considerando a periodicidade e a correta execução dos processos de manutenção especificados no respectivo manual de uso, operação e manutenção.

Diversos modelos de vida útil foram propostos ao longo dos anos. Um modelo simplificado, sob o ponto de vista da corrosão das armaduras, foi proposto por Tuutti (1989) e é apresentado na Figura 2.1.

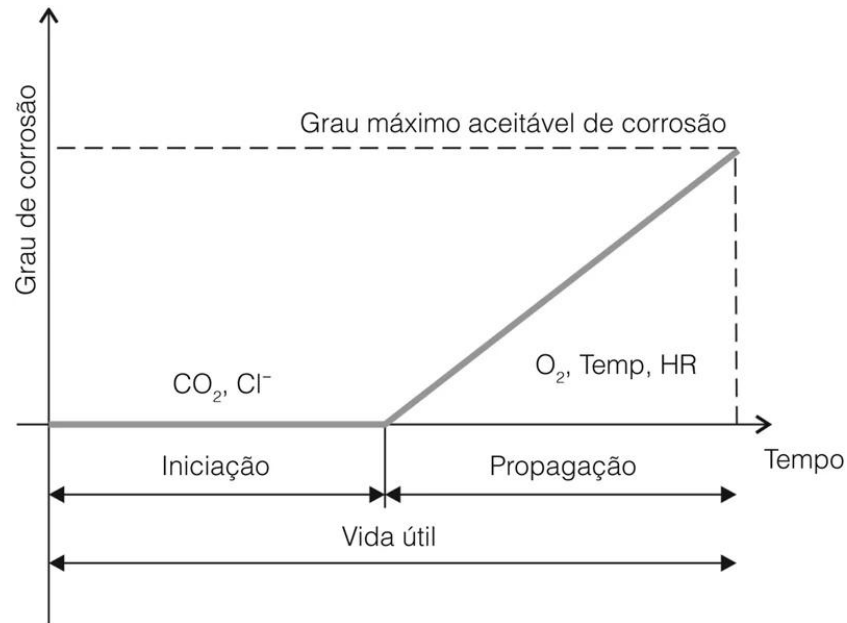


Figura 2.1: Modelo de vida útil proposto por Tuutti (1989).

Fonte: Ribeiro (2018).

Neste modelo, a vida útil pode ser dividida em dois períodos: o período de iniciação da corrosão e o período de propagação. O período de iniciação é definido como o tempo em que os agentes agressivos – como o  $\text{CO}_2$  e íons cloretos, levam para atravessar o cobrimento, atingir a armadura e provocar a sua despassivação; e o período de propagação é definido como o tempo em que a deterioração evolui até chegar a uma condição inaceitável, sendo influenciada por fatores como a disponibilidade de oxigênio, a temperatura ambiente e a umidade relativa (Ribeiro, 2018).

No modelo proposto por Helene (1993), a vida útil global de uma determinada estrutura pode ser subdividida em quatro partes, conforme apresentado na Figura 2.2.

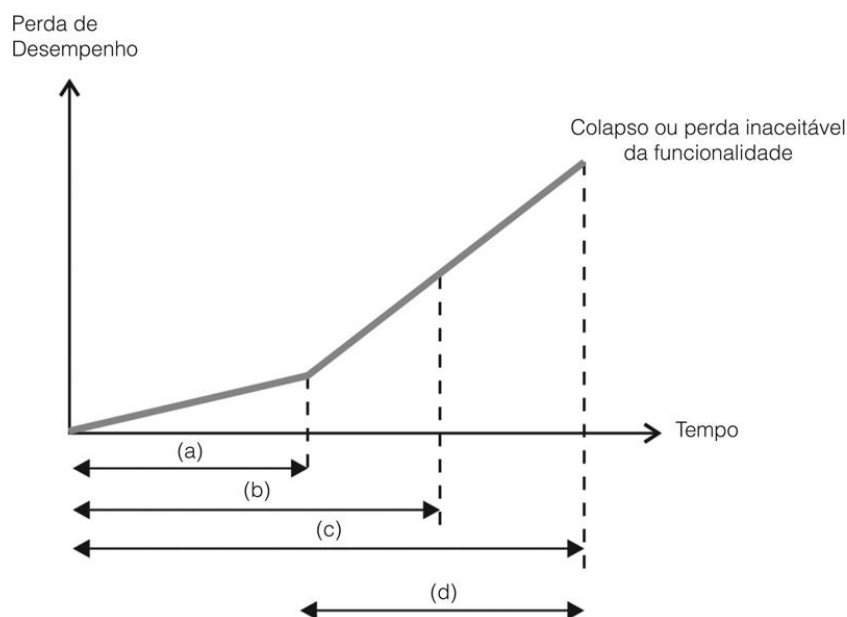


Figura 2.2: Modelo de vida útil proposto por Helene (1993).

Fonte: Ribeiro (2018).

Ribeiro (2018, p.38) descreve cada período:

- (a) Vida útil de projeto: nesta etapa, também conhecida como período de iniciação, os agentes agressivos, tais como cloretos,  $\text{CO}_2$  e sulfatos, ainda estão penetrando através da rede de poros do cobrimento, sem causar danos efetivos à estrutura. A vida útil de projeto para estruturas de concreto convencionais é de 50 anos, podendo-se estender para 100 anos (pontes) ou 200 anos (barragens).
- (b) Vida útil de serviço ou de utilização: os efeitos dos agentes agressivos começam a se manifestar, como a fissuração do concreto por ataque químico ou manchas consequentes da corrosão das armaduras. Essa vida útil é difícil de determinar, pois varia em função de cada caso. Ao passo que algumas estruturas não admitem determinadas manifestações, como manchas e eflorescências, outras só serão levadas em consideração quando chegam a níveis que possam comprometer a funcionalidade ou a segurança das estruturas.
- (c) Vida útil total: corresponde ao período de tempo que vai até à ruptura e ao colapso parcial ou total da estrutura. Nesse momento, a estrutura está condenada ou os custos de reparo são demasiadamente elevados.
- (d) Vida útil residual: envolve parte das vidas úteis de serviço e total, após a vida útil de projeto, correspondendo ao período de tempo no qual a estrutura será capaz de desenvolver as suas funções, contado após uma inspeção e/ou intervenção.

Como base para o projeto de durabilidade, esforços devem ser feitos para obter o melhor controle possível da penetração de íons cloretos durante o período de iniciação, antes que qualquer corrosão comece. Em um estágio inicial de dano visual, isso representa apenas um problema de custo e manutenção, entretanto, com a provável evolução dos danos, o problema torna-se tecnicamente mais difícil de se resolver, com altos custos de reparo e de difícil controle da segurança (GjØrv, 2014).

## 2.2. Durabilidade do concreto em ambiente marinho

Os ambientes marinhos estão entre os cenários mais agressivos à durabilidade do concreto armado. As estruturas expostas aos agentes presentes na água do mar podem ser submetidas a ataques químicos e físicos, que serão abordados nessa seção. Considerando que os oceanos ocupam até 80% da superfície terrestre, um número expressivo de estruturas está diretamente ou indiretamente exposto à influência desse meio (Neville, 2016; Ribeiro, 2018; Mehta e Monteiro, 2008).

A água do mar apresenta uma composição química razoavelmente uniforme, com concentração em torno de 3,5% de sais solúveis em sua massa (Ribeiro, 2018). Entre os íons presentes, os cloretos são os que se apresentam em maior concentração, conforme ilustrado na Tabela 2.1.

| Íons                           | Teores médios |
|--------------------------------|---------------|
| Sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) | 2.800 mg/L    |
| Cloreto ( $\text{Cl}^-$ )      | 20.000 mg/L   |
| Magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ )  | 1.400 mg/L    |
| Sódio ( $\text{Na}^+$ )        | 11.000 mg/L   |

Tabela 2.1: Concentração média dos principais íons presentes na água do mar.  
Fonte: Ribeiro (2018).

Dentre os mecanismos de deterioração do concreto armado associados ao ambiente marinho, o principal é a despassivação das armaduras por ação de íons cloretos, seguida pela corrosão generalizada do aço. A presença e a intensidade das diversas formas de deterioração dependem da posição do concreto em relação ao nível da água do mar. Com o objetivo de melhor descrever esses mecanismos atuantes nas estruturas, diversos autores e normas técnicas apresentam o ambiente marinho em zonas distintas, como ilustrado na Figura 2.3 (Bauer, 2019).

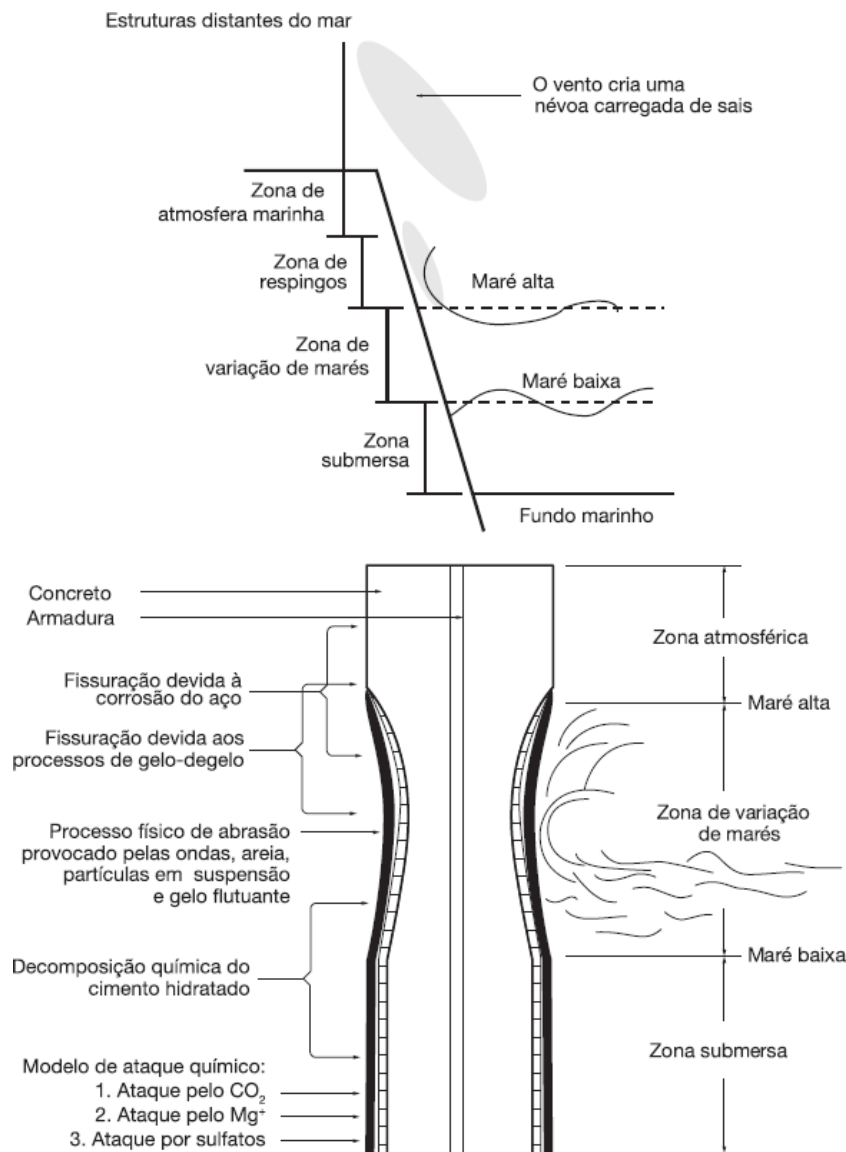


Figura 2.3: Zonas de agressividade às estruturas de concreto armado.

Fonte: Bauer (2019).

Bauer (2019, p. 484) descreve as principais zonas de exposição e suas respectivas características de degradação:

- Zona de atmosfera marinha:** nesta região, a estrutura recebe, apesar de não estar em contato com a água do mar, uma quantidade razoável de sais, capazes de produzir depósitos salinos na superfície, onde se produzem ciclos de molhagem e secagem. Os

ventos podem carregar os sais na forma de partículas sólidas ou como gotas de solução salina contendo vários outros constituintes. A quantidade de sais presente vai diminuindo em função da distância do mar, sofrendo influência da velocidade e direção dos ventos predominantes.

- b) Zona de respingos: é a região na qual ocorre a ação direta do mar, resultante das ondas e respingos. Os danos mais significativos são produzidos por corrosão das armaduras pelos íons cloretos e por erosão, em virtude das ondas.
- c) Zona de variação de marés: nesta região, limitada pelos níveis máximo e mínimo alcançados pelas marés, o concreto pode encontrar-se sempre saturado, dependendo das condições climatológicas, e com uma crescente concentração de sais. A degradação acontece em função da ação dos sais agressivos (ataque químico), corrosão de armaduras (presença de cloretos), ação das ondas e outras substâncias em suspensão (abrasão) e microrganismos.
- d) Zona submersa: trata-se da região em que a estrutura de concreto encontra-se permanentemente submersa. A degradação acontece pela ação de sais agressivos (sulfato e magnésio) e pela ação de microrganismos, que, em casos extremos, podem gerar a corrosão biológica das armaduras.

Helene (1999) destaca que a velocidade de corrosão em atmosfera marinha, compreendendo as regiões ao ar livre, sobre o mar e perto da costa, pode ser da ordem de 30 a 40 vezes superior à que ocorre em atmosfera pura.

Nesse contexto, diversas estratégias foram desenvolvidas para prolongar a vida útil de estruturas de concreto armado expostas a íons cloretos. Segundo Ehlen (2020), destacam-se o uso de concreto de baixa permeabilidade, inibidores químicos de corrosão, revestimentos protetores nas armaduras (como os de epóxi ou galvanizados), armaduras resistentes à corrosão (como as de aço inoxidável), armaduras não ferrosas (como as de plásticos reforçados com fibra), membranas ou selantes impermeabilizantes aplicados à superfície exposta do concreto, proteção catódica e combinações entre essas alternativas.

A NBR 6118 (ABNT, 2023) subdivide a agressividade ambiental em quatro classes:

- Classe I: de fraca agressividade, comum em ambiente rural ou submerso, com risco insignificante de deterioração da estrutura;
- Classe II: de moderada agressividade, comum em ambiente urbano, com pequeno risco de deterioração da estrutura;
- Classe III: de forte agressividade, comum em ambiente marinho e industrial, com grande risco de deterioração da estrutura;
- Classe IV: de agressividade muito forte, comum em zonas de respingos de maré e ambiente industrial, com elevado risco de deterioração da estrutura.

A NBR 6118 (ABNT, 2023) não correlaciona as classes de agressividade ambiental com o teor de cloretos presente na atmosfera; no entanto, Vilasboas (2013) *apud* Nilson *et al.* (2019) classificou as classes de agressividade ambiental em relação às concentrações de cloreto da seguinte forma:

- Classe I: 0-60 mg/(m<sup>2</sup>×d);
- Classe II: 60-300 mg/(m<sup>2</sup>×d);
- Classe III: 300-1.500 mg/(m<sup>2</sup>×d);
- Classe IV: acima de 1.500 mg/(m<sup>2</sup>×d).

### 2.2.1. Corrosão desencadeada por ataque de íons cloretos

As armaduras inseridas nos componentes estruturais de concreto estão, em princípio, protegidas e passivadas contra o risco de corrosão. Essa proteção é proporcionada pelo concreto de cobrimento, que forma uma barreira física ao ingresso de agentes externos, e principalmente por uma proteção química conferida pela alta alcalinidade da solução aquosa presente nos poros do concreto. A corrosão pode ser entendida como a interação destrutiva de um material com o meio ambiente, como resultado de reações deletérias de natureza química ou eletroquímica, associadas ou não a ações físicas ou mecânicas de deterioração (Ribeiro, 2018).

Gentil (2022, p. 259) afirma que a corrosão eletroquímica do aço empregado nas armaduras pode apresentar, principalmente, as seguintes formas:

- a) Corrosão uniforme: é a da armadura em toda sua extensão, quando exposta ao meio corrosivo.
- b) Corrosão puntiforme: é a da armadura com desgaste localizado sob a forma de pites ou alvéolos.
- c) Corrosão intergranular: é a que se processa entre os grãos da rede cristalina do material metálico. Quando as armaduras são submetidas a solicitações mecânicas, podem sofrer fratura frágil, perdendo o material toda condição de utilização.
- d) Corrosão transgranular: é a que se processa intragrãos da rede cristalina, levando também à fratura quando houver solicitação mecânica.
- e) Fragilização pelo hidrogênio: é a corrosão ocasionada por hidrogênio atômico que, difundindo-se para o interior do aço da armadura, possibilita a fragilização com consequente perda de ductibilidade e possível fratura da armadura.

A corrosão das armaduras conduz à formação de óxidos/hidróxidos de ferro, produtos de corrosão avermelhados, pulverulentos e porosos, denominados ferrugem. O processo só ocorre se coexistirem as seguintes condições: a presença de eletrólito, uma diferença de potencial, a presença de oxigênio e podem existir agentes agressivos (Helene, 1999).

Ferreira (2004) destaca que os fatores que influenciam o processo de corrosão das armaduras no concreto podem ser classificados em duas categorias: fatores externos e fatores internos. Os fatores externos estão relacionados a disponibilidade de oxigênio e umidade no nível das armaduras, umidade relativa, temperatura, carbonatação e penetração de gases poluentes ácidos ao nível das armaduras, penetração de ânions agressivos no nível das armaduras, correntes de fuga e ação bacteriana. Os fatores internos, por sua vez, estão relacionados a composição do cimento, presença de impurezas nos agregados, presença de impurezas na água de mistura e cura, aditivos, relação água/cimento (a/c), teor de cimento, granulometria dos agregados, espessura da camada de cobrimento, composição química e estrutura do aço das armaduras e pH da água presente nos poros do concreto.

Uma discussão mais aprofundada sobre esses mecanismos pode ser encontrada em obras de referência como Helene (1999), Ribeiro (2018) e Gentil (2022).

### 2.2.2. Mecanismos de transporte no concreto

O conhecimento dos mecanismos de transporte de massa no concreto é de fundamental importância, visto que esses processos são responsáveis pela entrada de agentes agressivos e, portanto, estão fortemente relacionados com a durabilidade do material.

Ainda que os mecanismos de transporte possam ocorrer simultaneamente, é necessário compreender os princípios por trás de cada mecanismo de forma individual, para que seja possível fornecer diretrizes adequadas na determinação dos métodos apropriados para quantificar a resistência do concreto (Kessy, 2013).

Nesse contexto, serão apresentadas definições acerca dos principais mecanismos de transporte de massa envolvidos no período de iniciação da corrosão no concreto: a permeabilidade, absorção, migração e difusão.

### ***Permeabilidade***

A permeabilidade é definida como o fluxo de um fluido devido a um gradiente de pressão, sendo caracterizada pela facilidade com que um fluido atravessa um sólido poroso sob uma diferença de pressão (Ribeiro, 2018). Outra definição para a permeabilidade é a facilidade com a qual líquidos ou gases podem se movimentar através do concreto (Neville, 2013).

A permeabilidade à água é expressa como um coeficiente de permeabilidade,  $K_h$ , obtido pela lei de Darcy para um escoamento laminar, estacionário e não turbulento através de um meio poroso (Ribeiro, 2018):

$$V_f = \frac{K_h \cdot A \cdot H}{L} \quad (2.1)$$

onde  $V_f$  é a vazão de escoamento do fluido [ $\text{m}^3/\text{s}$ ],  $K_h$  é a permeabilidade hidráulica [ $\text{m/s}$ ],  $A$  é a seção do meio poroso [ $\text{m}^2$ ],  $H$  é a altura da coluna d'água [ $\text{m}$ ] e  $L$  é o comprimento da amostra [ $\text{m}$ ].

A permeabilidade ao gás do concreto é definida como uma propriedade que caracteriza a facilidade com que o gás sob pressão passa através do concreto. A permeabilidade ao gás é geralmente aceita como uma propriedade relacionada à durabilidade do concreto, uma vez que serve para avaliar a performance do concreto frente à penetração de gás carbônico e oxigênio, responsáveis pela despassivação e corrosão das armaduras (Beushausen, 2016).

Uma das metodologias empregadas para a determinação da permeabilidade aos gases no concreto é a de Thenoz (1969), dada por:

$$k = \frac{\mu \cdot s \cdot \ln(h_0/h_1) \cdot l}{\rho \cdot g \cdot S \cdot t} \quad (2.2)$$

onde  $k$  é o coeficiente de permeabilidade ao ar [ $\text{m}^2$ ],  $\mu$  é a viscosidade do ar na temperatura ambiente [ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ],  $s$  é a área da seção transversal do tubo capilar [ $\text{m}^2$ ],  $h_0$  é a altura inicial [ $\text{m}$ ],  $h_1$  é a altura final [ $\text{m}$ ],  $l$  é altura do corpo de prova [ $\text{m}$ ],  $\rho$  é a massa específica do fluido utilizado no tubo capilar [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  $g$  é a aceleração da gravidade [ $\text{m}/\text{s}^2$ ],  $S$  é a área de seção transversal da amostra [ $\text{m}^2$ ] e  $t$  é o tempo necessário para que o líquido desloque-se da altura  $h_0$  até  $h_1$  [ $\text{s}$ ].

### ***Absorção capilar***

A absorção capilar é definida como o escoamento de um fluido devido a um gradiente de umidade. Uma outra definição para esse mecanismo é o transporte de líquidos devido à tensão superficial atuante nos poros capilares do concreto. É considerada um bom indicativo da porosidade do

concreto e, conseqüentemente, da resistência perante à penetração de agentes agressivos diluídos (Ribeiro, 2018). A absorção de água por capilaridade no concreto é um dos fatores mais difíceis de serem controlados e pode ser considerada um fenômeno que ocorre rapidamente (Helene, 1993).

No concreto não saturado, a taxa de entrada de água ou outros líquidos é amplamente controlada pela absorção capilar, que pode ser expressa da seguinte forma (Beushausen, 2016):

$$w = w_1 \cdot \left(\frac{t}{t_1}\right)^n = M_w \cdot t^n \quad (2.3)$$

onde  $w$  é a água absorvida por unidade de área no tempo  $t$  [ $\text{m}^3/\text{m}^2$ ],  $w_1$  é a água absorvida em um dado tempo  $t_1$  [ $\text{m}^3/\text{m}^2$ ],  $t$  é a duração da absorção de água [s],  $n$  é igual a 0,5 e  $M_w$  é o coeficiente de absorção de água [ $\text{m}/\text{s}^{0,5}$ ].

### ***Migração***

A migração iônica é o processo de transporte que ocorre quando existe um potencial elétrico que possibilita o deslocamento dos íons presentes, para que se neutralize o efeito da diferença de potencial (Ribeiro, 2018).

O processo de migração iônica foi amplamente estudado e diversas metodologias de ensaios foram desenvolvidas para determinar de forma acelerada o coeficiente de migração de cloretos no concreto. Andrade (1993) propôs a utilização da equação de Nernst-Planck, utilizada no mecanismo de transporte em eletrólitos, para modelar o fenômeno da migração, dada por:

$$-J_i(x) = D_i \cdot \frac{\partial C_i(x)}{\partial x} + \frac{z_i \cdot F}{R \cdot T} \cdot D_i \cdot C_i \cdot \frac{\partial E(x)}{\partial x} + C_i \cdot V(x) \quad (2.4)$$

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

### ***Difusão***

A difusão é o processo de transporte de substâncias de um meio para outro devido a uma diferença de potencial químico, muitas vezes de concentração. A difusão é um processo espontâneo de transporte de massa por efeito de gradientes de concentração, proporcionado por dois diferentes meios em contato íntimo por meio dos quais a substância se difunde para igualar as concentrações. Os dois principais agentes agressivos que comprometem as armaduras do concreto, os íons cloretos e o dióxido de carbono, têm a sua penetração controlada por esse fenômeno (Ribeiro, 2018).

A primeira lei de Fick foi empregada por Collepardi (1970) para descrever a entrada de cloretos no concreto. Entretanto, a primeira lei não considerava a dependência do tempo no processo de difusão, apenas a dependência do espaço. A segunda lei de difusão de Fick foi então obtida a partir da aplicação da lei de conservação de massa na primeira, dada por (Ferreira, 2004):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2.5)$$

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

A aplicação das leis de difusão de Fick para descrever os processos de transporte no concreto baseia-se no pressuposto simplificado de que o concreto é homogêneo, isotrópico e inerte (Tang, 1996 *apud* Ferreira, 2004).

### **Transporte de cloretos**

Os mecanismos de transporte de cloretos, que penetram no concreto, são fenômenos muito complexos, envolvendo difusão, absorção capilar, pressão hidrostática, convecção, migração, entre outros, acompanhados de ligação física e química (Beushausen, 2016).

No concreto úmido, o transporte dos íons cloretos é comumente assumido como sendo governado por um processo de difusão que obedece a lei de difusão de Fick. No entanto, é frequentemente observado em ensaios de laboratório um comportamento de difusão que não pode ser explicado pelas leis de Fick. Além disso, para uma mesma concentração de íons cloretos, uma mudança no tipo de solução salina externa pode afetar significativamente a taxa de entrada dos íons cloretos no concreto (Zhang e Gjrv, 1996).

De acordo com Ribeiro (2018), existem fatores que influenciam no transporte de cloretos no concreto, tais como a relação a/c (porosidade), composição química e finura do cimento, teor de argamassa e a presença de adições minerais, como sílica ativa, metacaulim, cinzas volantes, entre outros. Além dos fatores relacionados às características do concreto, existem também os fatores relacionados à composição da solução salina externa (Zhang e Gjrv, 1996).

Existem três tipos de ocorrência de cloretos na estrutura do concreto: quimicamente ligado ao aluminato tricálcico ( $\text{C}_3\text{A}$ ), adsorvido na superfície dos poros e sob a forma de íons livres. Das três formas de ocorrência, apresentadas na Figura 2.4, apenas os cloretos livres podem destruir a camada passivadora e desencadear o processo de corrosão (Gjrv, 2014; Ribeiro, 2018).

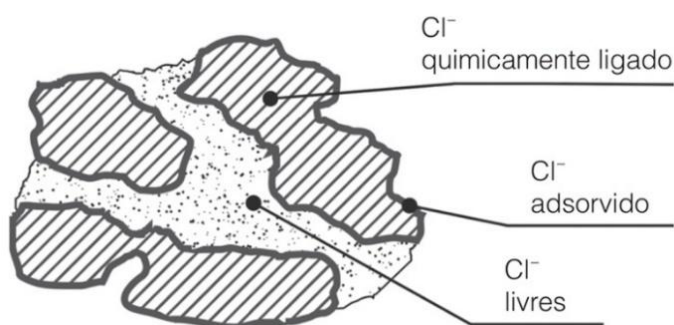


Figura 2.4: Formas de ocorrência de cloretos na estrutura do concreto.

Fonte: Ribeiro (2018).

### **2.3. Níveis de abordagem de projeto**

Em termos da concepção estrutural, podem-se distinguir quatro níveis de abordagem visando cumprir os critérios de Vida Útil de Projeto (VUP). Esses níveis foram organizados e propostos por Cascudo (2017 *apud* Ribeiro, 2018) e são apresentados na Tabela 2.2.

| Níveis  | Tipos de abordagem                                                                                                                                                                                                                                    |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Nível 1 | Abordagem prescritiva: consumo mínimo de cimento, relação $a/c$ máxima, cobrimento mínimo, $f_{ck}$ mínimo, tipo de cimento, entre outros. Adequado para VUP $\leq 50$ anos.                                                                          |
| Nível 2 | Abordagem mista: utiliza os indicadores de durabilidade, tais como: coeficientes de permeabilidade à água e aos gases, difusividade de cloretos, resistividade elétrica, entre outros. Adequado para VUP entre 50 e 100 anos.                         |
| Nível 3 | Abordagem de desempenho determinística: emprega modelos preditivos de vida útil (modelos de carbonatação, penetração de cloretos). Modelos mais simples (Leis de Fick) ou mais complexos. Modelos determinísticos. Adequado para VUP $\geq 100$ anos. |
| Nível 4 | Abordagem de desempenho probabilística: emprega modelos preditivos de vida útil mais sofisticados. Modelos probabilísticos ou semiprobabilísticos. Adequado para VUP $\geq 100$ anos.                                                                 |

Tabela 2.2: Níveis de abordagem para a concepção de estruturas de concreto duráveis.

Fonte: Adaptado de Ribeiro (2018).

Algumas considerações sobre as abordagens apresentadas na Tabela 2.2 são destacadas por Ribeiro (2018, p. 40):

- a) Nível 1 – Abordagem prescritiva: nesse tipo de abordagem são utilizados métodos prescritivos, baseados em recomendações que visam aprimorar a qualidade do concreto por meio da melhoria de parâmetros de dosagem ou por meio de procedimentos executivos adequados que propiciem facilidade executiva no transporte, lançamento e adensamento do concreto, além da adoção de parâmetros e definições de projeto. Tais prescrições surgem a partir do uso consagrado de materiais, produtos ou procedimentos, por meio do controle de parâmetros ou propriedades básicas; em outras palavras, originam-se de experiências prévias, a partir de análises empíricas. É aplicável a valores de VUP máximas de 50 anos para estruturas de concreto armado e sempre deve existir, não sendo excludente em relação a eventuais abordagens de desempenho empregadas no projeto.
- b) Nível 2 – Abordagem mista: nesse tipo de abordagem, além dos métodos prescritivos, são propostos no projeto e considerados na especificação do concreto alguns parâmetros de desempenho (indicadores de durabilidade), que devem ser efetivamente controlados na produção/execução da estrutura de concreto. É aplicável a VUP entre 50 e 100 anos.
- c) Nível 3 – Abordagem de desempenho (determinística): nesse tipo de abordagem são empregados modelos preditivos de vida útil (modelos determinísticos), como forma de estimar a VUP da estrutura. É baseado nos mecanismos de transporte de massa (gases e íons) através da microestrutura porosa do concreto (permeabilidade, absorção capilar, difusão e migração). Os modelos determinísticos propostos na literatura podem ser de natureza empírica, ou mais complexos, que incorporam mecanismos físico-químicos. É normalmente aplicado para VUP mínima de 100 anos.
- d) Nível 4 – Abordagem de desempenho (probabilística): nesse tipo de abordagem também são empregados modelos preditivos de vida útil ao nível do projeto, entretanto, esses modelos são probabilísticos ou semiprobabilísticos. Essa abordagem se propõe a levar em conta a variabilidade dos fenômenos de degradação que ocorrem nos materiais, representando uma variável pela lei de distribuição de seus valores possíveis

(densidade de probabilidade das variáveis aleatórias). É aplicável para projetos em que se requer, geralmente, uma VUP mínima de 100 anos.

A abordagem de desempenho tem ganhado relevância no contexto da durabilidade do concreto, sendo amplamente promovida e discutida na literatura internacional. A maioria das abordagens de projeto tendem a ser prescritivas, no entanto, percebe-se cada vez mais que esta abordagem é restritiva e dificulta a inovação, ao mesmo tempo que nem sempre produz estruturas de concreto duráveis. Nesse sentido, há um movimento em direção a especificações baseadas em desempenho, nas quais o desempenho desejado da estrutura em suas várias etapas de construção e operação é claramente especificado sem restringir desnecessariamente os materiais, métodos ou técnicas de construção. Embora a NBR 6118 (ABNT, 2014) mencione a abordagem baseada no desempenho, não são indicados métodos de ensaio nem valores de referência que possibilitem a verificação e validação dos requisitos de durabilidade propostos (Sell Junior *et al.*, 2021; Alexander, 2016).

Em paralelo, as avaliações da estimativa de vida útil baseadas em abordagens determinísticas, apesar do grande número de modelos propostos, frequentemente apresentam pouca precisão em virtude das incertezas envolvidas em todo o processo de deterioração. Neste sentido, os modelos probabilísticos se apresentam como um importante mecanismo capaz de representar de forma mais realística todos os parâmetros envolvidos (Magalhães, 2018).

A introdução de materiais alternativos, como os agregados reciclados, desafia as abordagens prescritivas tradicionais, evidenciando a necessidade de métodos mais robustos. Portanto, uma abordagem de desempenho probabilística representa o caminho mais adequado e confiável para avaliar a durabilidade do concreto armado produzido com esse material, sobretudo em ambientes agressivos.

### 2.3.1. Abordagem de desempenho

Segundo Beushausen (2016), o princípio do projeto baseado no desempenho e controle de qualidade para a durabilidade do concreto tem sido objeto de esforços significativos de pesquisa em todo o mundo há mais de 25 anos e a literatura relata muitos exemplos de implementação bem-sucedida. O projeto de durabilidade baseado no desempenho envolve a avaliação das propriedades materiais relevantes de um concreto específico por meio de experimentos, modelagem analítica, modelagem numérica ou experiência, a fim de prever a resistência do concreto contra a deterioração por um determinado período e sob determinadas condições de exposição ambiental. A Figura 2.5 apresenta os princípios do projeto baseado em desempenho.

Nesse tipo de abordagem, conforme apresentado na seção anterior, são utilizados os indicadores de durabilidade do concreto, que podem ser definidos como propriedades mensuráveis do material, utilizados para avaliar a capacidade do concreto de resistir a ambientes agressivos. São exemplos de indicadores de durabilidade do concreto: o coeficiente de permeabilidade à água e aos gases, o coeficiente de carbonatação acelerada, o coeficiente de difusão de cloretos, a resistividade elétrica, a porosidade, a absorção de água, a resistência característica à compressão, entre outros. Em termos de projeto de durabilidade, a escolha dos indicadores a serem avaliados dependerá do tipo de mecanismo de deterioração preponderante no ambiente em que a estrutura será construída.

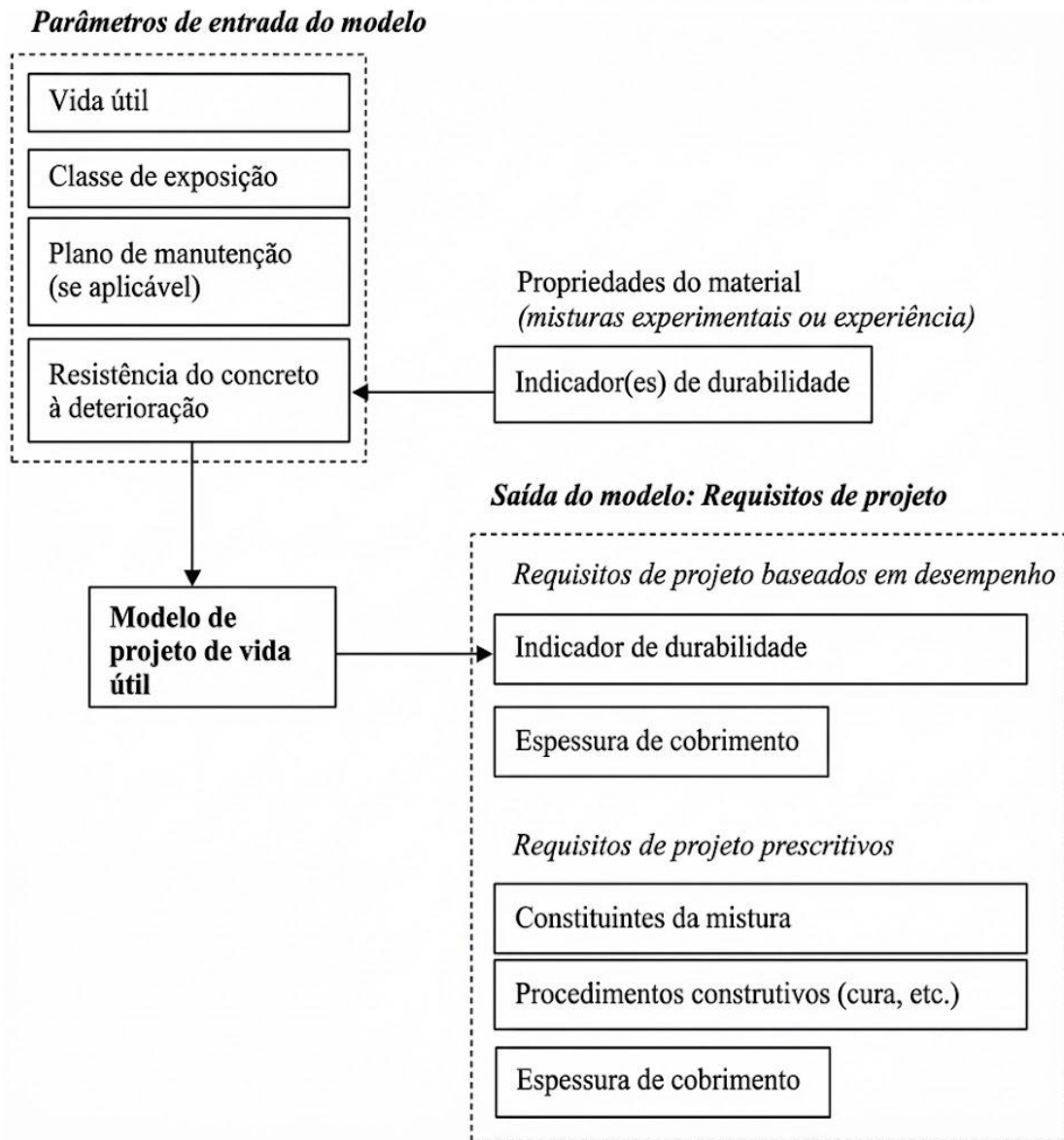


Figura 2.5: Princípios do projeto baseado em desempenho.

Fonte: Adaptado de Beushausen (2016).

De acordo com Ribeiro (2018), os indicadores de durabilidade, se adequadamente selecionados em face da classe de agressividade ambiental e dos diferentes agentes agressivos presentes (microclima ou especificidade do ambiente agressivo), certamente contribuirão de forma efetiva para o controle dos mecanismos de transporte que possibilitam a chegada de agentes agressivos ao concreto, iniciando ou desencadeando problemas patológicos na estrutura.

Em ambientes marinhos, por exemplo, a penetrabilidade de cloretos no concreto é comumente avaliada e faz parte do conjunto de indicadores de durabilidade. Os métodos de ensaio para avaliar a penetração de cloretos no concreto podem variar de acordo com a base teórica utilizada, tipo de parâmetro avaliado, entre outros. A Tabela 2.3 apresenta um resumo dos principais métodos normatizados para essa avaliação.

| Base teórica             | Método de ensaio                                                      | Parâmetro avaliado                                               | Duração      | Referência                 |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|--------------|----------------------------|
| 2ª Lei de Fick           | Imersão em solução de NaCl                                            | Coeficiente de difusão aparente                                  | > 35 dias    | NT Build 443<br>ASTM C1556 |
|                          | Aplicação de corrente elétrica em sistema com NaCl e NaOH             | Coeficiente de difusão no estado não estacionário                | Semanas      | NT Build 355               |
| Equação de Nernst-Planck | Aplicação de corrente elétrica em sistema com NaCl e NaOH             | Coeficiente de migração no estado não estacionário               | 6 a 96 horas | NT Build 492               |
|                          | Aplicação de corrente elétrica em sistema com NaCl e H <sub>2</sub> O | Coeficiente de difusão no estado estacionário e não estacionário | Dias         | UNE 83987                  |
| Outros                   | Aplicação de corrente elétrica em sistema com NaCl e NaOH             | Resistência à penetração de cloretos                             | 6 horas      | ASTM C1202<br>AASHTO T277  |
|                          | Exposição de uma face da amostra à solução de NaCl                    | Perfil de cloretos                                               | > 90 dias    | AASHTO T259                |

Tabela 2.3: Principais métodos normatizados para avaliação da penetração de cloretos no concreto.

Fonte: Adaptado de Yuan e Santhanam (2013).

Outro indicador de durabilidade comumente utilizado em abordagens de projeto com base no desempenho, para estruturas expostas ao ambiente marinho, é a resistividade elétrica do concreto, e o seu inverso, a condutividade elétrica do concreto, que são propriedades características que servem para avaliar a durabilidade do concreto tanto em ambiente de carbonatação quanto em ambientes ricos em cloretos (IBRACON, 2021). A resistividade elétrica do concreto atua como forma de medida indireta da conectividade dos poros do concreto, uma vez que define a capacidade deste em permitir a transferência de íons através da sua microestrutura (Azarsa e Gupta, 2017).

Sengul (2014) conduziu um estudo com um grupo de misturas de concreto e identificou uma forte correlação entre os coeficientes de difusão de cloretos, obtidos conforme o ensaio descrito na NT Build 492 (NORDTEST, 1999), e as resistividades elétricas mensuradas conforme o ensaio descrito na ASTM C1760 (ASTM, 2012), em diversas idades de ensaio e com condições semelhantes de umidade e temperatura. De acordo com o autor, a relação experimental entre a difusividade e a resistividade confirma que a resistividade elétrica do concreto pode ser utilizada como um indicador de durabilidade, além de servir para o controle de qualidade e para a classificação rápida de concretos. Assim, a difusividade dos íons cloreto poderia ser estimada de forma indireta a partir de medições de resistividade elétrica.

Diferentes métodos de ensaio podem ser empregados para a determinação da resistividade elétrica, cujo valor é dependente das condições de ensaio, como o tipo de corrente aplicada (contínua ou alternada), tensão nominal fornecida, frequência, geometria da amostra, espaçamento dos eletrodos, efeito de borda, temperatura, presença de armaduras e método de medida. Em relação a configuração do ensaio, os métodos mais comuns são o método direto (volumétrico) e o método dos quatro pontos (superficial), ambos adotados no programa experimental do trabalho.

Parâmetros associados ao concreto, tais como relação água-cimento (a/c), umidade da amostra, presença de contaminantes, tamanho e tipo de agregado, idade e tipo de cura empregada, tipo de cimento e presença de adições minerais, são fatores de influência na avaliação da resistividade elétrica

do concreto. Diversos autores buscaram estudar essa influência (Hughes *et al.*, 1985; Sengul, 2014; Medeiros-Junior *et al.*, 2019; Ghosh e Tran, 2015; Medeiros-Junior e Lima, 2016).

## 2.4. Conceitos de confiabilidade estrutural

A confiabilidade estrutural é um conceito fundamental na Engenharia Civil, que busca quantificar a segurança de uma estrutura ao longo de sua vida útil. Esse campo lida com as incertezas inerentes às variáveis de projeto, como as cargas, as propriedades dos materiais e os modelos de análise estrutural. Em uma análise de confiabilidade, os métodos probabilísticos são aplicados para estimar a probabilidade de falha de uma estrutura, considerando a variabilidade e a aleatoriedade dos parâmetros envolvidos. Segundo Melchers e Beck (2018), as incertezas presentes no projeto de sistemas de engenharia podem ser classificadas de acordo com a Tabela 2.4.

| Incerteza       | Descrição                                                                                                                             |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Decisão         | Caracteriza-se quanto à verificação de que determinado estado limite foi alcançado. Define a ocorrência ou não do fenômeno analisado. |
| Fenomenológicas | Diz respeito a situações não previstas e/ou não corretamente mensuradas.                                                              |
| Modelo          | Consequência das aproximações teóricas do comportamento real do fenômeno através de modelos teóricos.                                 |
| Previsão        | Envolve a previsão de um determinado estado do elemento analisado em um tempo futuro.                                                 |
| Físicas         | Refere-se à aleatoriedade dos materiais, geometria e dimensões dos elementos e à avaliação das solicitações impostas.                 |
| Fatores Humanos | Decorrente de falhas ocorridas nas fases de projeto, execução ou utilização da estrutura.                                             |
| Estatísticas    | Associadas ao processo de previsão da distribuição de probabilidades das variáveis aleatórias envolvidas.                             |

Tabela 2.4: Incertezas no processo de avaliação da confiabilidade.

Fonte: Melchers e Beck (2018) *apud* Magalhães (2018).

No projeto de estruturas de concreto armado, os requisitos de segurança, desempenho e durabilidade devem ser atendidos, caso contrário, considera-se que a estrutura atingiu um estado limite. A probabilidade de que determinado estado limite seja atingido pode ser determinada a partir de uma análise baseada nos conceitos de confiabilidade.

De acordo com a NBR 8681 (ABNT, 2004), os estados limites de uma estrutura são estados a partir dos quais a estrutura apresenta um desempenho inadequado às finalidades da construção. Eles podem ser estados limites últimos ou estados limites de serviço. Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2023), os estados limites últimos estão relacionados ao colapso da estrutura, ou a qualquer outra forma de ruína estrutural, que determine a paralisação do uso da estrutura. Os estados limites de serviço são aqueles relacionados ao conforto do usuário e à durabilidade, aparência e boa utilização das estruturas, seja em relação aos usuários, seja em relação às máquinas e aos equipamentos suportados pelas estruturas.

Para qualquer dimensionamento estrutural, é necessário estabelecer os efeitos combinados

das solicitações externas e a resistência necessária para suportá-las. Nesse sentido, uma função de estado limite, na sua forma mais simples, pode ser escrita da seguinte forma (Ferreira, 2006):

$$G(x, t) = R(x, t) - S(x, t) \quad (2.6)$$

onde  $R(x, t)$  representa o conjunto de mecanismos resistentes,  $S(x, t)$  o conjunto de solicitações,  $x$  representa o vetor das variáveis básicas do problema e  $t$  o tempo.

No contexto de uma análise de durabilidade para estruturas de concreto armado em ambiente marinho, no qual o principal mecanismo de deterioração é a corrosão devido ao ataque de íons cloretos, o conjunto  $R(x, t)$  pode representar a resistência à penetração de cloretos e  $S(x, t)$  pode representar o conjunto dos efeitos combinados das cargas de cloreto e das condições de temperatura.

O objetivo da análise de confiabilidade é garantir o evento  $(R > S)$  durante toda a vida útil da estrutura. Esta garantia somente é possível em termos de probabilidade, ou seja,  $P(R > S)$ . Desde que  $R$  e  $S$  sejam funções com distribuições de probabilidade conhecidas, contínuas e estatisticamente independentes, a probabilidade de falha  $P_f$  pode ser determinada da seguinte forma (Ang e Tang, 2007):

$$P_f = \int_0^{\infty} F_R(r) f_S(s) ds \quad (2.7)$$

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

O problema fundamental da confiabilidade também pode ser formulado em termos da variável margem de segurança  $M$ , dada por (Beck, 2019):

$$M = R - S \quad (2.8)$$

Valores negativos para a margem de segurança correspondem à falha, valores positivos à segurança e um valor nulo à situação limite. Admitindo-se que as variáveis  $R$  e  $S$  sejam contínuas, estatisticamente independentes e com distribuição normal de probabilidades, o valor esperado da margem de segurança pode ser definido da seguinte forma (Beck, 2019):

$$\mu_M = \mu_R - \mu_S \quad (2.9)$$

O desvio padrão da margem de segurança  $\sigma_M$  é dado por (Beck, 2019):

$$\sigma_M = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \quad (2.10)$$

onde  $\sigma_R$  é o desvio padrão da capacidade resistente e  $\sigma_S$  é o desvio padrão das solicitações.

A Figura 2.6 apresenta as funções de densidade de probabilidade e os parâmetros da capacidade resistente e das solicitações.

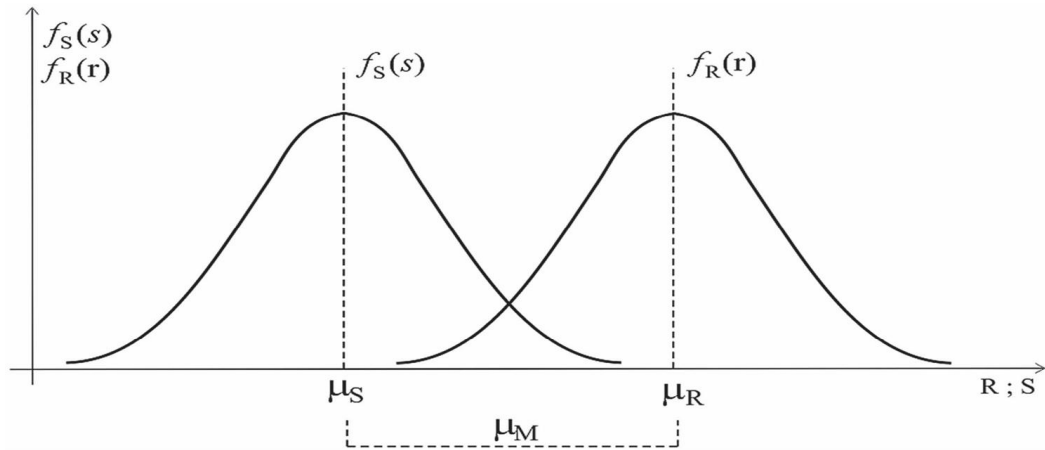


Figura 2.6: Funções de densidade de probabilidade da capacidade resistente e das solicitações.

Fonte: Ang e Tang (2007) *apud* Magalhães (2018).

A função de densidade de probabilidade da margem de segurança é apresentada na Figura 2.7.

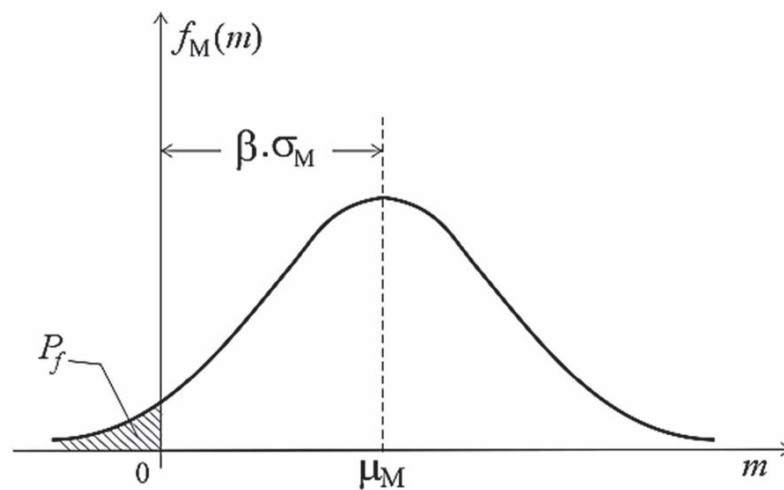


Figura 2.7: Função de densidade de probabilidade da margem de segurança.

Fonte: Ang e Tang (2007) *apud* Magalhães (2018).

O índice de confiabilidade é a margem de segurança expressa em unidades de desvio padrão, dado por (Beck, 2019):

$$\beta = \frac{\mu_M}{\sigma_M} \quad (2.11)$$

A probabilidade de falha pode ser determinada em função do índice de confiabilidade, dada por (Beck, 2019):

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (2.12)$$

Nos códigos atuais para confiabilidade de estruturas, um nível máximo de probabilidade de falha de 10% no estado limite de serviço é frequentemente especificado (Gjørv, 2014).

Como pode ser observado na Figura 2.8, quanto maior o índice de confiabilidade, menor a probabilidade de falha da estrutura. O índice de confiabilidade é, portanto, uma medida de segurança da estrutura (Real, 2023).

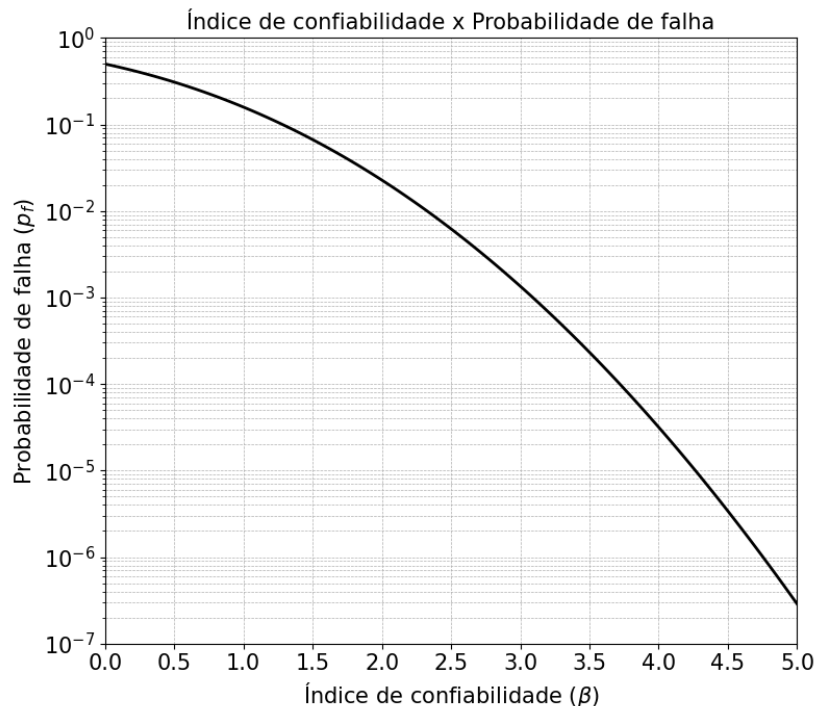


Figura 2.8: Índice de confiabilidade e probabilidade de falha.

Fonte: Adaptado de Real (2023).

A determinação da probabilidade de falha de um sistema é um processo complexo, pois envolve uma série de variáveis aleatórias com seus respectivos parâmetros estatísticos, o que geralmente requer a utilização de softwares. Para essa avaliação, existem métodos matemáticos consolidados, como o Método de Confiabilidade de Primeira Ordem (FORM) e a Simulação de Monte Carlo (SMC), que serão tratados brevemente a seguir. Uma discussão mais aprofundada sobre os métodos pode ser encontrada em Beck (2019).

### ***Método de Confiabilidade de Primeira Ordem (FORM)***

No Método de Confiabilidade de Primeira Ordem (FORM), as variáveis aleatórias podem ter uma distribuição de probabilidade qualquer, desde que matematicamente definida. Essas variáveis devem então ser transformadas em variáveis não correlacionadas de distribuição normal equivalente, através de um método como a Transformação de Rosenblatt.

Simplificadamente, a determinação do índice de confiabilidade pelo método FORM parte da identificação das variáveis aleatórias envolvidas no problema, como as propriedades dos materiais, dimensões e cargas. Deve-se então estabelecer a função de estado limite ou superfície de falha, que separa o domínio de falha do domínio de segurança. Por um processo de linearização, aproxima-se a função de estado limite por uma superfície no ponto mais provável de falha (ponto de projeto). O índice de confiabilidade é igual a distância mínima do ponto de projeto à origem no espaço transformado das variáveis normalizadas. A Figura 2.9 apresenta graficamente o método FORM.

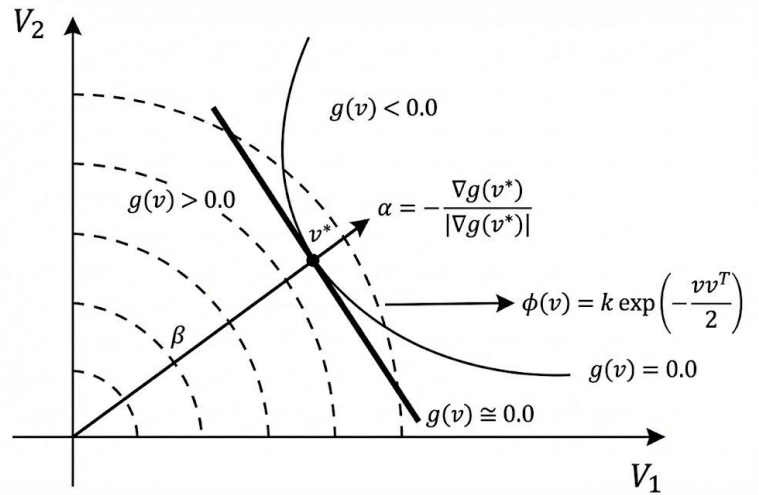


Figura 2.9: Representação gráfica do método FORM.

Fonte: Adaptado de Sagrilo (1994).

### ***Simulação de Monte Carlo (SMC)***

A Simulação de Monte Carlo (SMC) é uma técnica numérica versátil que permite a solução de problemas complexos em inúmeras áreas, tais como: engenharia, administração, matemática, física, medicina, entre outros. Em engenharia de estruturas, a SMC é aplicável tanto à problemas lineares quanto não-lineares, estáticos ou dinâmicos (Beck, 2019).

Usando as distribuições de probabilidade assumidas dos parâmetros de entrada, esse método seleciona aleatoriamente entradas para o modelo e calcula a saída. Isso é repetido até que um histograma suficiente de dados de saída seja obtido, e então, a partir de uma análise estatística das diversas respostas do sistema, pode-se determinar a probabilidade de falha. O método permite trabalhar com funções de estado limite bastantes complexas, entretanto, exige um grande tempo de processamento para probabilidades de falha muito pequenas e sistemas grandes (Bentz, 2003; Beck, 2019).

A Figura 2.10 apresenta um modelo esquemático do processo de simulação de Monte Carlo onde a função de falha é definida pela função  $g(X) = 0$ .

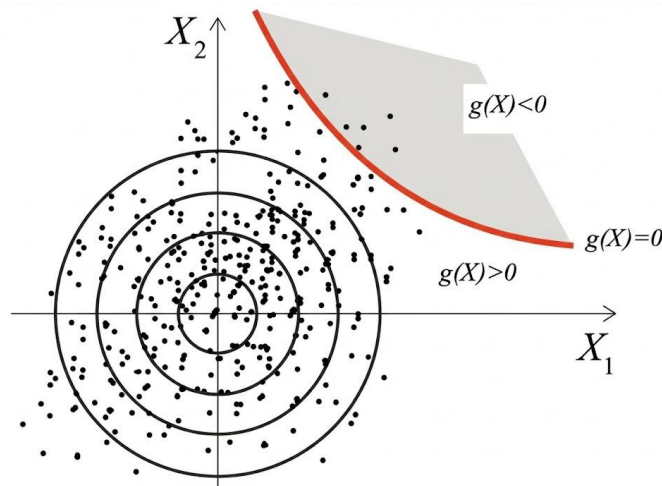


Figura 2.10: Modelo esquemático do método de SMC considerando-se duas variáveis de entrada.

Fonte: Adaptado de Magalhães (2018).

### 2.4.1. Modelagem probabilística da vida útil

A modelagem probabilística da vida útil de estruturas de concreto armado expostas a cloretos envolve uma série de parâmetros de entrada, os quais possuem suas próprias distribuições de probabilidade. Existem diferentes métodos para a modelagem do período de iniciação da corrosão, e cada um gera como resultado uma função de densidade de probabilidade desse período, bem como a respectiva função de densidade de probabilidade acumulada.

As principais variáveis de entrada empregadas na modelagem probabilística da vida útil de estruturas de concreto armado sob a ação de cloretos são: a profundidade de cobrimento, a concentração superficial de cloretos, a concentração crítica de cloretos, o coeficiente de migração ou difusão de cloretos, a temperatura do ambiente e o fator de envelhecimento do concreto. Essas variáveis podem assumir diferentes tipos de distribuição e parâmetros estatísticos. Dessa forma, devem ser obtidos valores de referência para estimativas, a serem utilizados na impossibilidade de se obter uma caracterização mais precisa para as variáveis em estudo (Bentz, 2003; Gjorv, 2014; Ehlen, 2020).

Conforme o modelo de vida útil proposto por Tuutti (1982) – apresentado na seção 2.1 – a vida útil de uma estrutura de concreto armado sujeita à corrosão pode ser dividida em dois períodos: o período de iniciação da corrosão e o período de propagação. No período de iniciação ocorre a penetração de agentes agressivos como os íons cloretos e dióxido de carbono, responsáveis pela despassivação das armaduras. O período de propagação depende da disponibilidade de oxigênio, da temperatura, umidade, entre outros fatores. Diversos modelos, como o Duracon, *fib* (2006) e *Life-365*, concentram a análise de incerteza no período de iniciação. A vida útil total pode ser estimada como a soma desses dois períodos.

A função de densidade de probabilidade do período de iniciação, bem como a respectiva função de densidade de probabilidade acumulada geralmente são estimadas ano a ano, até o fim do período de análise. A interpretação correta dessas curvas é fundamental para definir qualquer tipo de vida útil probabilística: a vida útil média, a vida útil mais provável e a vida útil característica. A Figura 2.11 apresenta as curvas hipotéticas de distribuição de probabilidade do período de iniciação de um elemento estrutural em concreto armado.

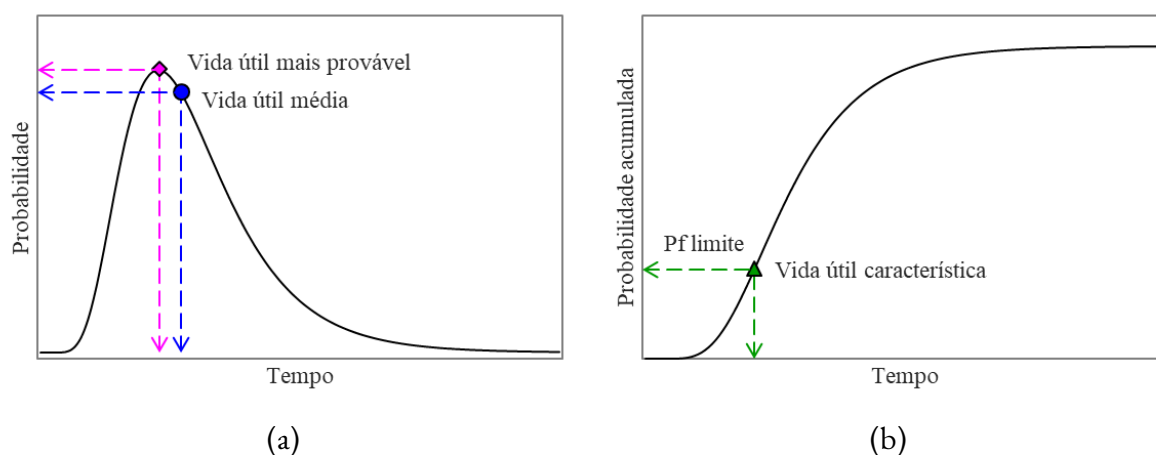


Figura 2.11: Função de densidade de probabilidade: (a) Não acumulada; (b) Acumulada.

Na curva de distribuição de probabilidade – Figura 2.11 (a) – a vida útil mais provável é a vida útil que tem a maior probabilidade de ocorrência. Na mesma figura, a vida útil média corresponde à média de todas as vidas úteis que a estrutura pode experimentar, em outras palavras, é a vida útil que apresenta uma probabilidade de 50% de ser ultrapassada ou superada (Ehlen, 2020).

A vida útil característica pode ser determinada a partir da curva de distribuição de probabilidade acumulada – Figura 2.11 (b) – ao considerar uma certa probabilidade de falha admissível. De forma análoga a análise sobre a resistência característica à compressão do concreto, a vida útil característica é uma idade tal que existe uma probabilidade pré-estabelecida de se obter vidas úteis inferiores à mesma.

Diversos modelos de vida útil de estruturas de concreto armado existem em diferentes partes do mundo, desenvolvidos em resposta às condições locais onde são aplicados. A maioria deles abrange tanto a difusão de cloretos quanto o ingresso de dióxido de carbono no concreto. Entre os exemplos notáveis estão o modelo europeu Duracrete (1998) e o norte-americano *Life-365* (2005) (Alexander, 2018). A Tabela 2.5 apresenta um resumo de alguns dos principais modelos de vida útil disponíveis para a modelagem do ingresso de íons cloretos.

| Modelo                 | Características                                                                                                                                        | Referência                                                                                         |
|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Life-365</i>        | Modelo de difusão de cloretos. Baseado na Lei de Fick. Semi-probabilístico. Oferece análise de custo do ciclo de vida.                                 | Software gratuito:<br><a href="http://www.life-365.org">www.life-365.org</a>                       |
| Stadium                | Modelo multi-iônico. Baseado na equação de Nernst-Planck. Calcula a taxa de ingresso de cloretos e a iniciação da corrosão. Totalmente probabilístico. | Software proprietário:<br><a href="http://www.simcotechnologies.com">www.simcotechnologies.com</a> |
| <i>fib Bulletin 34</i> | Baseado na segunda lei de Fick. Trata principalmente do ingresso de cloretos e da carbonatação. Totalmente probabilístico.                             | Boletim <i>fib</i> :<br><a href="http://www.fib-international.org">www.fib-international.org</a>   |
| Concrete Works         | Baseado na Lei de Fick. Prevê a resistência do concreto, o ingresso de cloretos e a fissuração térmica.                                                | Software gratuito:<br><a href="http://www.txdot.gov">www.txdot.gov</a>                             |
| ClinConc               | Modelo de difusão de cloretos.                                                                                                                         | Tang Luping (2008)                                                                                 |

Tabela 2.5: Modelos de vida útil para concreto armado.

Fonte: Adaptado de Alexander (2018).

## 2.5. Concretos com agregados reciclados

O setor da construção civil é um dos maiores consumidores de recursos naturais do planeta, sendo responsável por cerca de 20% a 50% do total consumido pela sociedade. Além disso, as atividades do setor geram aproximadamente 4,5 bilhões de toneladas de resíduos sólidos por ano, representando entre 20% e 40% do total dos resíduos sólidos urbanos (CNTL, 2007; Xiao, 2018; Marvila *et al.*, 2022).

A disposição inadequada dos Resíduos da Construção Civil (RCC) constitui um problema de saneamento urbano, visto que favorece a proliferação de vetores nocivos à saúde, o agravamento de enchentes, a obstrução parcial de vias públicas e a degradação do ambiente urbano. A reutilização dos resíduos nas próprias obras ou o emprego de agregados reciclados pode contribuir significativamente para a redução do consumo de recursos naturais, dos custos da construção e do volume de resíduos gerados (Iglecias *et al.*, 2023).

Vários países têm reconhecido os impactos negativos do consumo intensivo de matérias-primas pelo setor da construção civil e, em resposta, estabeleceram políticas públicas e regulamentações para incentivar o uso de agregados reciclados na produção de concreto. Entre esses países destacam-

se: China, Hong Kong, Alemanha, Japão, Portugal, Espanha, Reino Unido, Austrália e Nova Zelândia (Nanya *et al.*, 2021). No entanto, no Brasil, estima-se que apenas 20% dos RCC sejam reutilizados (Miranda, 2009 *apud* Júnior, 2019), o que demonstra um grande potencial ainda inexplorado.

Estudos como o de McGinnis *et al.* (2017), realizados nos Estados Unidos, indicam que o uso de ARCO pode reduzir em até 50% o impacto ambiental associado à produção de concreto, em comparação com os agregados naturais. Os autores também destacam que os ARCO podem ser comercializados por um custo aproximadamente igual ao dos agregados naturais.

Em relação à geração de resíduos nos canteiros de obras, Bossink e Brouwers (1996) estimaram que entre 1% e 10% (em massa) dos materiais de construção adquiridos se transformam em resíduos sólidos, com uma média de 9%. Os materiais avaliados, em ordem de maior porcentagem de descarte, foram: argamassas, telhas, placas de pedra, tijolos sílico-calcários, estacas, concreto e elementos sílico-calcários — todos compostos, em maior ou menor grau, por agregados naturais.

Projeções indicam que a demanda global por agregados poderá crescer 45% até o ano de 2060. Em algumas regiões da China, essa demanda crescente já tem provocado escassez de agregados, elevando significativamente os custos de transporte de materiais como areia e pedra (Zhong, 2023; Xiao, 2018).

A reciclagem dos RCC para uso como agregados na produção de concreto apresenta benefícios expressivos, como a redução do consumo de agregados naturais e de energia, a diminuição dos custos logísticos e a redução da emissão de gases poluentes. Entre os principais benefícios destacam-se: aumento da vida útil dos aterros sanitários, redução da disposição irregular de resíduos, economia de recursos naturais não renováveis, minimização dos impactos ambientais da construção civil e estímulo à criação de novas cadeias produtivas, promovendo geração de emprego e renda (Pimentel *et al.*, 2020; Salles *et al.*, 2021).

É importante esclarecer as diferenças entre os conceitos de reutilização, reciclagem e beneficiamento no contexto dos RCC. Segundo a Resolução nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2002), reutilização refere-se à reaplicação do resíduo sem que este sofra qualquer tipo de transformação. A reciclagem, por sua vez, consiste no reaproveitamento do resíduo após este ter sido submetido a algum tipo de transformação. Por fim, o beneficiamento corresponde ao conjunto de operações e/ou processos destinados a conferir ao resíduo as características necessárias para que ele possa ser utilizado como matéria-prima ou produto.

No Brasil, estima-se a existência de aproximadamente 360 usinas de reciclagem de agregados, das quais cerca de um terço são de caráter público e dois terços pertencentes à iniciativa privada. Dentre elas, 320 estão registradas junto à Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição (Abrecon), conforme dados de 2020 (Abrecon, 2020).

A legislação brasileira referente ao gerenciamento de resíduos sólidos é relativamente recente. Apenas em 2002 foi publicada a Resolução nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos Resíduos da Construção Civil (RCC). Posteriormente, em 2010, foi instituída a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), por meio da Lei nº 12.305/2010, com vistas à gestão integrada e ao gerenciamento ambientalmente adequado de resíduos sólidos no país. Em virtude disso, o manejo dos resíduos ainda ocorre de forma inadequada, o que implica problemas de ordem econômica, social e principalmente ambiental (Silva, 2012 *apud* Menezes e Salles, 2019).

A PNRS estabelece como objetivos: a não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos; incentivo à indústria da reciclagem, tendo em vista fomentar o uso de matérias-primas e insumos derivados de materiais recicláveis e reciclados (Brasil, 2010).

A Resolução CONAMA nº 307/2002 classifica os RCC da seguinte forma:

- Classe A – são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como: (a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem; (b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto; (c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meio-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras.
- Classe B – são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras, embalagens vazias de tintas imobiliárias e gesso;
- Classe C – são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação;
- Classe D – são resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde (BRASIL, 2002).

### 2.5.1. Normas técnicas para uso de agregados reciclados

No Brasil, a normatização técnica relativa ao uso de agregados reciclados provenientes de resíduos da construção civil é relativamente recente. A primeira norma voltada a essa temática foi publicada em 2004, com escopo restrito a aplicações em obras de pavimentação. Essa norma contempla o uso de agregados reciclados em camadas de reforço do subleito, sub-base, base e revestimento primário de pavimentos.

A normatização voltada ao emprego de agregados reciclados em concretos e argamassas de cimento Portland é ainda mais recente. Trata-se da NBR 15116 (ABNT, 2021), que estabelece, pela primeira vez, critérios técnicos para a utilização desses materiais em concretos com função estrutural. Tal avanço contribui de maneira significativa para o fortalecimento de práticas sustentáveis no setor da construção civil.

A NBR 15116 (ABNT, 2021) estabelece os requisitos para a produção e recepção de agregados reciclados miúdos e graúdos, oriundos do beneficiamento dos RCC Classe A, e ainda inclui misturas entre agregados naturais e reciclados – sendo aplicáveis à produção de argamassas e concretos de cimento Portland. A norma também apresenta os métodos de ensaio necessários à verificação dos requisitos estabelecidos para os agregados reciclados, bem como diretrizes para sua utilização. Os agregados reciclados são classificados, segundo a norma, em três subclasses:

- Agregado Reciclado Cimentício (ARCI): constituído predominantemente por materiais cimentícios diversos (concretos, argamassas, blocos pré-moldados de concreto etc.), podendo incluir teores reduzidos de cerâmica vermelha;

- Agregado Reciclado de Concreto (ARCO): constituído predominantemente por resíduos de concreto;
- Agregado Reciclado Misto (ARM): constituído por uma mistura de materiais cimentícios (concretos, argamassas, blocos pré-moldados de concreto etc.) e materiais cerâmicos (blocos e telhas de cerâmica vermelha etc.).

Dentre essas subclasses, somente o ARCO é recomendado para uso em concretos de cimento Portland estruturais. A norma estabelece limites para diversos parâmetros que impactam diretamente a qualidade e o desempenho dos agregados reciclados. Entre os principais requisitos, destacam-se:

- Materiais indesejáveis: fragmentos de natureza orgânica – como madeiras, plásticos, betume e materiais carbonizados, e de natureza inorgânica – como vidro, vidrados cerâmicos e gesso, com métodos de análise descritos em anexos da norma;
- Argila em torrões e sulfatos, com ensaios normatizados pela ABNT NBR 7218;
- Cloretos, com limites diferenciados para concreto simples, armado e protendido, com ensaios normatizados pela ABNT NBR 9917;
- Absorção de água, com limites específicos para as subclasses ARCO, ARCI e ARM, avaliados segundo as normas ABNT NBR 16917 (agregado graúdo) e ABNT NBR 16916 (agregado miúdo);
- Teor de finos ( $< 0,075$  mm), com limites distintos de acordo com a exposição ao desgaste superficial, determinado conforme a ABNT NBR NM 46.

Segundo a norma, para concretos estruturais, a substituição de agregados naturais por agregados reciclados deve ser limitada a 20% da massa total de agregados, sendo aplicável a concretos pertencentes às classes de agressividade I e II da NBR 6118 (ABNT, 2014). Dessa forma, a norma não prevê aplicações em concretos estruturais submetidos a ambientes marinhos. Em aplicações sem função estrutural, a substituição pode atingir até 100%. Além disso, a norma recomenda a pré-molhagem dos agregados reciclados, a fim de ajustar propriedades reológicas do concreto, como trabalhabilidade, consistência e perda de abatimento.

No cenário internacional, observa-se que outras normas técnicas também impõem limites semelhantes quanto ao uso de agregados reciclados em concretos estruturais. Segundo Campos *et al.* (2018), destacam-se os exemplos:

- A norma alemã DIN 4226-100:2002 permite a substituição de até 25% do volume de agregados naturais (miúdos e graúdos) por agregados reciclados em concretos da classe C30/37;
- A norma portuguesa E 417:2009 restringe a substituição de agregados graúdos naturais por reciclados a no máximo 25%, para concretos da classe C40/50;
- A norma suíça SIA 2030:2010 permite a substituição de até 25% da fração graúda e 20% da fração miúda dos agregados naturais por agregados reciclados em concretos da classe C25/30.

O novo código estrutural espanhol (Espanha, 2021) também estabelece diretrizes específicas para a utilização de agregados reciclados na produção de concreto. Para aplicação em concreto estrutural, o código não contempla porcentagens de substituição superiores a 20% em peso sobre o teor total de agregado graúdo. Para o emprego em concreto armado, a resistência característica não deve

ser superior a 40 MPa. Recomenda ainda que este seja obtido a partir de fontes controladas, especificamente de concretos estruturais sadios, ou de concretos de elevada resistência, excluindo materiais provenientes de estruturas com patologias ou de natureza distinta do concreto.

### 2.5.2. Estado da arte sobre o desempenho do concreto com agregados reciclados

De acordo com Xiao (2018), houve um avanço significativo nas pesquisas e técnicas sobre concreto com agregados reciclados nos últimos anos. No entanto, o autor ressalta que os estudos sobre as propriedades dos materiais e o comportamento estrutural ainda são limitados. As principais lacunas identificadas envolvem os métodos de dosagem (projeto da mistura), a durabilidade, o projeto de durabilidade, a resistência ao fogo e a capacidade de suporte e deformação.

Os Agregados Reciclados de Concreto (ARCO) apresentam algumas desvantagens em relação aos agregados naturais, decorrentes da presença de argamassa residual aderida à sua superfície. Essa característica resulta em maior porosidade, menor massa específica, maior capacidade de absorção de água e menor resistência à abrasão e compressão. Além disso, a incorporação de ARCO na mistura gera um aumento na quantidade de zonas de transição interfacial (Aguilar *et al.*, 2007; Gomes *et al.*, 2019; Salles *et al.*, 2021).

Por essas razões, o uso de ARCO em concretos estruturais ainda se mostra bastante restrita na prática de engenharia. Os principais desafios relacionados à sua utilização envolvem a heterogeneidade dos resíduos de origem, a baixa previsibilidade do desempenho reológico e mecânico do concreto, bem como os possíveis impactos adversos sobre sua durabilidade.

A resistência mecânica do concreto reciclado tende a ser inferior à do convencional, mas isso depende da qualidade do agregado. Pimentel *et al.* (2020) explicam que, quanto maior a resistência do concreto original que gerou o resíduo, melhor será a qualidade do agregado e menor será o impacto negativo nas propriedades do novo concreto.

Apesar dessa tendência de queda na resistência, há estudos que mostram bons resultados. Otsuki *et al.* (2003) observaram melhorias nas resistências mecânica, à penetração de íons cloretos e à carbonatação ao utilizar métodos específicos de mistura e uma alta relação água/cimento. Salles *et al.* (2021) também relataram melhorias na resistência à carbonatação, proporcional à quantidade de agregados naturais substituídos por agregados reciclados.

Isso demonstra que o desempenho do concreto reciclado depende muito dos métodos de dosagem e produção empregados. Fatores como o teor de substituição, a pré-saturação dos agregados, a relação água/cimento (a/c) e o uso de adições minerais ou aditivos químicos são determinantes (Salles *et al.*, 2021). Estratégias como a pré-saturação e tratamentos com silicato de sódio ou sílica ativa têm se mostrado eficazes para melhorar as propriedades mecânicas (Bui *et al.*, 2017; Ferreira *et al.*, 2011; Tam *et al.*, 2007; Tam *et al.*, 2005).

A durabilidade em ambientes agressivos é um dos pontos mais críticos. Thomas *et al.* (2013) afirmam que é difícil comparar resultados na literatura em razão da heterogeneidade dos agregados reciclados, bem como os diferentes tipos de mistura que podem ser produzidas com o material. Yu e Lin (2020) reforçam que ainda não existem fórmulas suficientemente precisas para prever a resistência à penetração de cloretos nesses concretos.

Diversos estudos experimentais avaliaram o desempenho de concreto com agregados reciclados:

- Menezes e Salles (2019) avaliaram concretos com 30% e 50% de substituição do agregado gráúdo natural por ARCO, originado da trituração de fragmentos de corpos de prova com  $f_{ck}$  de 30 MPa. Os resultados da resistência à compressão axial mostraram um comportamento não linear: o traço com 30% de substituição apresentou uma redução de 33,91% em relação à referência, enquanto o traço com 50% teve uma redução menor, de 16,75%. Ainda assim, os autores destacam que ambas as resistências finais permaneceram próximas à resistência de dosagem. Adicionalmente, a resistência à tração por compressão diametral manteve-se dentro da faixa considerada típica, situando-se entre 7% e 10% da resistência à compressão.
- Arredondo-Rea *et al.* (2019) avaliaram concretos com substituição de agregados miúdos e gráúdos naturais por ARCO, nos teores de 20%, 30%, 60% e 100%. Foram realizados ensaios para a determinação da resistividade elétrica e da taxa de corrosão do aço. Os resultados indicaram que as propriedades mensuradas não foram significativamente afetadas nos concretos com substituição de até 30% dos agregados gráúdos ou 20% dos agregados miúdos.
- Júnior *et al.* (2019) avaliaram concretos com diferentes relações a/c e diferentes teores de substituição dos agregados gráúdos naturais por ARCO. Foram realizados ensaios para a determinação da porosidade aparente, absorção capilar, resistência à compressão, coeficiente de difusão de cloretos e resistividade elétrica. Os resultados indicaram que o uso de ARCO contribuiu para o aumento da porosidade aparente e da absorção capilar, além de reduzir a resistência à compressão dos concretos. A estimativa de vida útil, calculada com base na segunda lei de Fick, apontou uma redução de aproximadamente 40% para concretos com relação a/c igual a 0,35 e substituição total dos agregados (100%), e de até 22% para concretos com substituição parcial (50%), considerando-se a exposição ao ambiente marinho e cobrimento de 40 mm.
- Pimentel *et al.* (2020) avaliaram concretos produzidos com 30% de substituição de agregado gráúdo natural por ARCO, ARCI e ARCI tratado. Foram realizados ensaios de caracterização física e mecânica, bem como ensaios de permeabilidade ao ar, penetração e migração de cloretos e determinação da profundidade de carbonatação. O concreto com ARCO apresentou comportamento semelhante ao concreto de referência. O concreto com ARCI apresentou boas propriedades mecânicas, entretanto, resultados inferiores nos ensaios de durabilidade foram obtidos. Já o concreto com ARCI tratado apresentou resultados inferiores ao concreto com ARCI, indicando que o tratamento proposto pelos autores não foi adequado.
- Nanya *et al.* (2021) avaliaram concretos produzidos com 30%, 50%, 70% e 100% de substituição de agregado gráúdo natural por ARCO. Foram realizados ensaios de resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade, imersão em água, teor de vazios, massa específica, absorção de água por capilaridade, resistividade elétrica, profundidade de penetração de íons cloretos, carbonatação acelerada e um ensaio avaliando o efeito sinérgico da penetração de íons dióxido de carbono e cloretos. Os resultados indicaram que os parâmetros dos concretos produzidos com até 50% de substituição, atenderam aos requisitos de desempenho. Os concretos com os teores de 30% e 50% de substituição foram considerados adequados para uso estrutural.
- Silva *et al.* (2021) avaliaram concretos produzidos com ARCO resultantes de múltiplos ciclos de reciclagem. Foram produzidos concretos com 25% e 100% de substituição dos agregados gráúdos naturais por ARCO e foram avaliados até três ciclos de reciclagem. Foram realizados ensaios de absorção de água, massa específica, índice de forma, abrasão de LA, absorção por

imersão e capilaridade, carbonatação e penetração de cloretos. Os resultados indicaram que a qualidade das propriedades do ARCO tende a diminuir com o aumento dos ciclos de reciclagem, entretanto, apresenta um comportamento assintótico, ou seja, a redução do desempenho tende a diminuir com o aumento dos ciclos. Contudo, os autores observaram que apenas três ciclos de reciclagem não foram suficientes para alcançar a estabilização.

- Salles *et al.* (2021) avaliaram a influência da segregação das diversas frações que compõe os agregados reciclados. Os resultados indicaram que a segregação não é necessária, uma vez que os concretos elaborados com diferentes teores de substituição dos agregados naturais (0%, 25%, 50% e 100%) e produzidos com diferentes tipos de agregados reciclados (cimentícios, cerâmicos e a mistura de ambos) apresentaram comportamentos semelhantes entre si.
- Mahmood *et al.* (2022) avaliaram concretos produzidos com substituição de agregado gráúdo natural por ARCO, nos teores de 30%, 50%, 70% e 100%. Foram realizados ensaios de potencial de meia célula, permeabilidade hidráulica, arrancamento, absorção de água por capilaridade e carbonatação aos 28, 90, 180, 365 e 720 dias. Os resultados mostraram que o concreto com 30% de substituição apresentou desempenho semelhante ao concreto de referência, sendo ambos considerados adequados para uso estrutural.

Revisões recentes trazem novas perspectivas para a área:

- Em sua revisão sobre o equilíbrio entre desempenho mecânico e sustentabilidade, Lu (2024) destaca o uso de ARCO como uma alternativa transformadora para mitigar o consumo de agregados naturais e para a gestão de RCC. A análise, que abrange perspectivas econômicas, sociais e ambientais, identifica o teor de substituição como um fator crítico para o desempenho do concreto final, concluindo, com base em dados de propriedades mecânicas e desempenho econômico, especificações nacionais, normas e diretrizes, que o nível de 20% representa a taxa de substituição ideal. Embora a faixa de substituição de 20% a 30% seja amplamente validada por normas internacionais, o estudo ressalta que os níveis atuais de substituição ainda são insuficientes para um progresso significativo no desenvolvimento sustentável, demandando avanços nas técnicas de processamento, atualização de normas e maior colaboração da indústria e do governo para superar barreiras técnicas.
- Wang *et al.* (2024) realizaram uma revisão sobre a resistência à penetração de cloretos em concretos produzidos com agregados gráúdos reciclados, com ênfase nas técnicas de aprimoramento de desempenho e na previsão da vida útil dessas estruturas. O estudo confirmou que métodos de aprimoramento ou remoção da argamassa antiga podem melhorar a resistência à penetração de cloretos em 15–30%. As conclusões indicam que a vida útil estimada das estruturas de concreto reciclado diminui com o aumento do nível de substituição dos agregados, porém os tratamentos de aprimoramento são eficazes em mitigar essa redução. Por fim, os autores apontam a necessidade de desenvolver métodos de projeto de durabilidade para estruturas de concreto reciclado, com tratamentos de aprimoramento, expostas a ambientes marinhos.
- Zhao *et al.* (2024) realizaram uma revisão crítica sobre a aplicação de algoritmos de aprendizado de máquina (*machine learning*) na previsão das propriedades do concreto reciclado, destacando a limitação das fórmulas empíricas e estatísticas tradicionais. O estudo destacou que o desempenho mecânico e de durabilidade do concreto reciclado é afetado por diversos fatores, que incluem a relação água/cimento ( $a/c$ ), o nível de substituição dos agregados, a

idade e as condições de cura. Os autores concluem que, embora a aplicação de modelos de aprendizado de máquina para prever as propriedades mecânicas do concreto reciclado esteja relativamente madura, existem poucas aplicações para prever a sua durabilidade. Aponta-se, por fim, a necessidade de mais pesquisas sobre a aplicação de modelos de aprendizado de máquina para o projeto ideal de concreto reciclado, com o objetivo de atender aos requisitos atuais de engenharia na indústria da construção.

- Prasittisopin *et al.* (2025) realizaram uma revisão sistemática abrangente sobre o ARCO, analisando suas propriedades mecânicas, durabilidade e impactos ambientais sob perspectivas tecnológicas, ecológicas e econômicas. O estudo quantifica que, para cada 1% de aumento no nível de substituição, ocorre uma redução na resistência à compressão do concreto de 0,1913% para o agregado graúdo reciclado e 0,2418% para o agregado miúdo reciclado. No entanto, os autores enfatizam que essas limitações podem ser atenuadas por dosagens otimizadas, técnicas de tratamento aprimoradas — como a mineralização de CO<sub>2</sub> e revestimentos superficiais — e o uso de MCS, como metacaulim e sílica ativa. Por fim, a pesquisa destaca o papel crucial do ARCO na redução da pegada de carbono e no fomento à economia circular, sugerindo a integração futura da avaliação do ciclo de vida com tecnologias digitais, como BIM, *digital twins* e *machine learning*, para alinhar as práticas construtivas aos objetivos de desenvolvimento sustentável.

Diante do exposto, fica evidente a necessidade de mais estudos sobre o concreto estrutural com ARCO, considerando os diferentes métodos de dosagem e produção. A compreensão aprofundada desses aspectos permitirá estimar com maior precisão o comportamento do material em diferentes condições de exposição, promovendo sua aplicação mais segura e eficiente nos canteiros de obras, com potencial para gerar concretos de alto desempenho e diversos benefícios ambientais, econômicos e sociais.

### 3. Metodologia

Este capítulo descreve a metodologia empregada no desenvolvimento deste trabalho. Inicialmente, apresenta-se o programa experimental realizado, no qual são detalhadas as características dos materiais utilizados na produção dos concretos, a dosagem dos concretos e os procedimentos de ensaio voltados à avaliação das propriedades mecânicas e de durabilidade dos concretos.

Os agregados foram caracterizados quanto à sua granulometria, absorção de água e massa específica. Nos concretos produzidos, foram realizados ensaios para a determinação da absorção de água por capilaridade, da resistência à compressão axial, da resistência à tração por compressão diametral, da resistividade elétrica superficial, da resistividade elétrica volumétrica, dos coeficientes de difusão nos estados estacionário e não estacionário e do coeficiente de migração no estado não estacionário.

Os resultados dos ensaios de migração de cloretos foram posteriormente utilizados como parâmetro de entrada na análise probabilística. Além disso, são apresentados os modelos de transporte de cloretos utilizados para estimar a vida útil.

Os concretos foram produzidos no *Instituto de Estructuras y Transporte* (IET), vinculado à *Facultad de Ingeniería* (FING) e *Universidad de la República* (UdelaR), localizado em Montevideo, Uruguai. A caracterização dos agregados graúdos e miúdos, bem como a realização de parte dos ensaios nos concretos – ensaios de resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e absorção de água por capilaridade – foram realizadas também no IET.

Os demais ensaios – migração e difusão de cloretos, resistividade elétrica superficial e volumétrica – foram realizados no Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção Civil (LEMCC), vinculado ao Instituto Federal do Rio Grande do Sul (IFRS), localizado em Rio Grande – RS, Brasil.

#### 3.1. Programa experimental

##### 3.1.1. Materiais utilizados

###### *Água*

Para a produção dos corpos de prova de concreto, foi utilizada água potável fornecida pela empresa estatal uruguaia *Obras Sanitarias Del Estado* (OSE). Em geral, é a água que se utiliza para a produção de concretos no país.

###### *Cimento Portland*

Para a produção dos concretos deste estudo, foi utilizado um cimento Portland composto (CPC 40) disponível comercialmente no Uruguai. As propriedades deste cimento atendem aos requisitos da norma UNIT 20 (UNIT, 2022). De acordo com o catálogo do fabricante, o material contém pequenas quantidades de gesso, fíler calcário e pozolana. No contexto normativo brasileiro, este cimento apresenta características equivalentes às do cimento Portland composto com material pozo-lânico (CP II-Z 40), conforme os requisitos da NBR 16697 (ABNT, 2018).

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

| Requisitos físicos            |                                    | Unidade                | Requisito UNIT 20 |             | CPC 40   |
|-------------------------------|------------------------------------|------------------------|-------------------|-------------|----------|
|                               |                                    |                        | Mínimo            | Máximo      |          |
| Finura                        | Retido na peneira 75 $\mu\text{m}$ | %                      | —                 | 15          | —        |
|                               | Retido na peneira 45 $\mu\text{m}$ | %                      |                   |             | 4,3      |
|                               | Superfície específica (Blaine)     | $\text{m}^2/\text{kg}$ | 250               | —           | 371      |
| Tempo de pega                 | Inicial                            | Minutos                | 60                | —           | 178      |
| Resistência à com-<br>pressão | 1 dia                              | MPa                    | —                 | —           | 15       |
|                               | 2 dias                             | MPa                    | 10                | —           | 26       |
|                               | 7 dias                             | MPa                    | —                 | —           | 38       |
|                               | 28 dias                            | MPa                    | 40                | 60          | 48       |
| Expansão em autoclave         |                                    | %                      | —                 | 0,8         | 0,01     |
| Pasta de consistência normal  |                                    | %                      | —                 | —           | 28,8     |
| Requisitos químicos           |                                    |                        |                   |             |          |
| Resíduo insolúvel             |                                    | %                      | —                 | $\leq 35$   | 2,3      |
| Óxido de magnésio             |                                    | %                      | —                 | $\leq 14,5$ | 2,9      |
| Perda por calcinação          |                                    | %                      | —                 | —           | 7,3      |
| Anidrido sulfúrico            |                                    | %                      | —                 | 3,5         | 3,0      |
| Sulfetos                      |                                    | %                      | —                 | 0,5         | $< 0,01$ |
| Cloretos                      |                                    | %                      | —                 | 0,1         | 0,003    |

Tabela 3.1: Características físicas e químicas do cimento Portland.

Fonte: Catálogo do fabricante (2021).

### *Aditivo plastificante*

Foi utilizado um aditivo superplastificante com o objetivo de melhorar a trabalhabilidade dos concretos e manter fixa a relação a/c. De acordo com o catálogo do fabricante, o produto apresenta massa específica de  $1,1 \text{ g/cm}^3$ . A dosagem adotada foi de 0,85% em relação à massa de cimento.

### *Agregado miúdo*

Como agregados miúdos, foram utilizadas areias de distintas granulometrias. A areia fina é proveniente da Ciudad del Plata, localizada no Departamento de San José, Uruguai. A areia grossa é proveniente de Paso de Pache, localizado no Departamento de Canelones, Uruguai.

A determinação da composição granulométrica dos agregados miúdos e graúdos foi realizada de acordo com os procedimentos descritos na norma UNIT-NM 248 (UNIT, 2002). No contexto normativo brasileiro, a NBR 17054 (ABNT, 2022) estabelece o método de ensaio para a determinação da composição granulométrica de agregados miúdos e graúdos.

A determinação da absorção de água e da densidade na condição saturada superfície seca dos agregados miúdos e graúdos foi realizada de acordo com os procedimentos descritos na UNIT-ISO 20290-1 (UNIT, 2021). No contexto normativo brasileiro, a determinação da absorção de água e da densidade na condição saturada superfície seca dos agregados miúdos pode ser realizada de acordo

com os métodos de ensaio estabelecidos na NBR 16916 (ABNT, 2021) e NBR 16917 (ABNT, 2021), respectivamente.

As características físicas das areias utilizadas encontram-se na Tabela 3.2. As curvas granulométricas das areias fina e grossa são apresentadas na Figura 3.1.

| Peneiras<br>(mm)                                                    | Areia fina |                    | Areia grossa |                    |
|---------------------------------------------------------------------|------------|--------------------|--------------|--------------------|
|                                                                     | % Retido   | % Retido Acumulado | % Retido     | % Retido Acumulado |
| 12,5                                                                | 0,00       | 0,00               | 1,53         | 1,53               |
| 9,5                                                                 | 0,00       | 0,00               | 2,98         | 4,50               |
| 6,3                                                                 | 0,14       | 0,14               | 4,72         | 9,23               |
| 4,75                                                                | 0,13       | 0,26               | 3,43         | 12,66              |
| 2,36                                                                | 1,20       | 1,46               | 16,09        | 28,75              |
| 1,18                                                                | 5,25       | 6,71               | 25,53        | 54,28              |
| 0,6                                                                 | 15,81      | 22,52              | 29,22        | 83,50              |
| 0,3                                                                 | 38,64      | 61,17              | 13,76        | 97,25              |
| 0,15                                                                | 34,13      | 95,30              | 1,87         | 99,12              |
| < 0,15                                                              | 4,70       | 100,00             | 0,88         | 100,00             |
| Total                                                               | 100,00     | -                  | 100,00       | -                  |
| Propriedades                                                        |            |                    |              |                    |
| Módulo de finura                                                    | 1,87       |                    | 3,80         |                    |
| Dimensão máxima característica [mm]                                 | 2,36       |                    | 9,50         |                    |
| Absorção de água [%]                                                | 0,55       |                    | 0,44         |                    |
| Densidade na condição saturada superfície seca [g/cm <sup>3</sup> ] | 2,58       |                    | 2,62         |                    |

Tabela 3.2: Características físicas dos agregados miúdos.

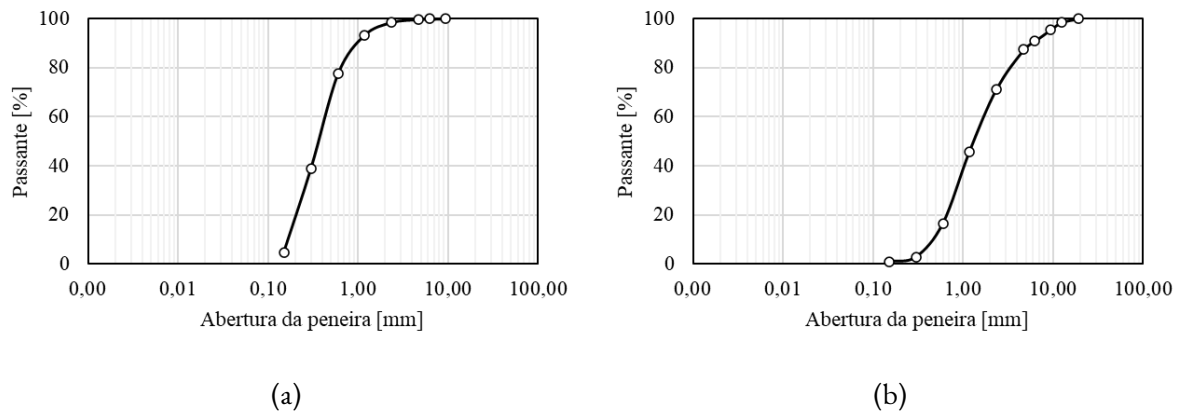


Figura 3.1: Curvas granulométricas: (a) Areia fina; (b) Areia grossa.

### *Agregado graúdo*

Como agregados graúdos, foram utilizados brita natural e ARCO.

A brita natural é proveniente de Las Piedras, localizada no Departamento de Canelones, Uruguai. Trata-se de uma pedra amplamente utilizada no sul do país, que é encontrada nas pedreiras com certo grau de desintegração, necessitando apenas de classificação granulométrica e lavagem. Embora seja considerado um bom agregado, por essa característica, não é comumente utilizado para concretos de resistências muito altas, sendo seu uso habitual em concretos de até 40 MPa.

O ARCO, por sua vez, foi obtido a partir da britagem de um único tipo de concreto, oriundo de peças pré-fabricadas descartadas por uma indústria de pré-moldados uruguiaia. O processamento desse material foi realizado pela empresa RCD *Reciclaje*, localizada na cidade de Montevideú, Departamento de Montevideú, Uruguai.

As características físicas dos agregados graúdos utilizados encontram-se apresentadas na Tabela 3.3. As curvas granulométricas correspondentes aos agregados graúdos natural e reciclado são mostradas na Figura 3.2.

| Peneiras                                                            | Agregado graúdo reciclado |                    | Agregado graúdo natural |                    |
|---------------------------------------------------------------------|---------------------------|--------------------|-------------------------|--------------------|
| (mm)                                                                | % Retido                  | % Retido Acumulado | % Retido                | % Retido Acumulado |
| 31,5                                                                | 0,48                      | 0,48               | 0,00                    | 0,00               |
| 25                                                                  | 5,25                      | 5,73               | 1,72                    | 1,72               |
| 19                                                                  | 26,11                     | 31,83              | 12,56                   | 14,28              |
| 12,5                                                                | 50,65                     | 82,49              | 34,63                   | 48,91              |
| 9,5                                                                 | 12,40                     | 94,89              | 24,99                   | 73,90              |
| 6,3                                                                 | 3,10                      | 98,00              | 20,09                   | 93,98              |
| 4,75                                                                | 0,69                      | 98,69              | 3,39                    | 97,37              |
| 2,36                                                                | 0,58                      | 99,27              | 1,31                    | 98,68              |
| 1,18                                                                | 0,16                      | 99,43              | 0,48                    | 99,17              |
| 0,6                                                                 | 0,09                      | 99,52              | 0,27                    | 99,43              |
| 0,3                                                                 | 0,12                      | 99,65              | 0,20                    | 99,63              |
| 0,15                                                                | 0,17                      | 99,82              | 0,16                    | 99,80              |
| < 0,15                                                              | 0,18                      | 100,00             | 0,20                    | 100,00             |
| Total                                                               | 100,00                    | -                  | 100,00                  | -                  |
| Propriedades                                                        |                           |                    |                         |                    |
| Módulo de finura                                                    | 7,23                      |                    | 6,82                    |                    |
| Dimensão máxima característica [mm]                                 | 31,5                      |                    | 25                      |                    |
| Absorção de água [%]                                                | 6,84                      |                    | 1,37                    |                    |
| Densidade na condição saturada superfície seca [g/cm <sup>3</sup> ] | 1,83                      |                    | 2,57                    |                    |

Tabela 3.3: Características físicas dos agregados graúdos.

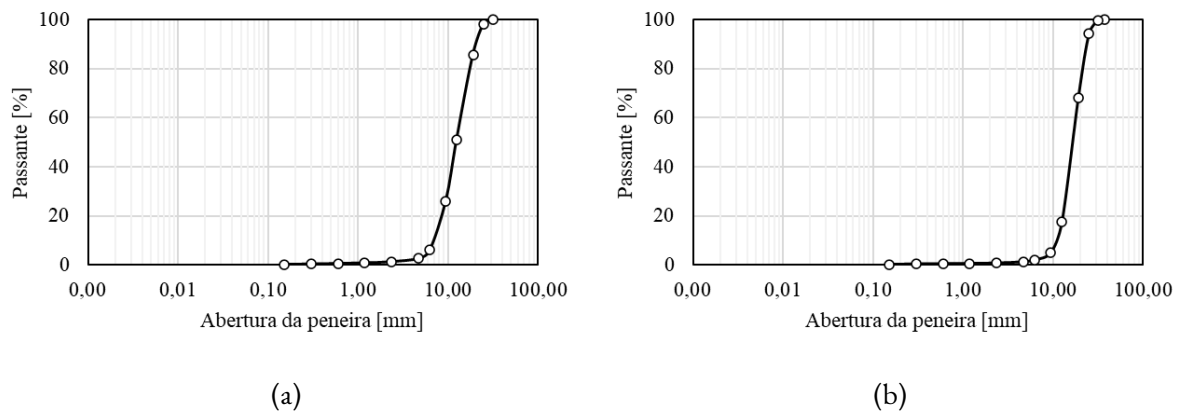


Figura 3.2: Curvas granulométricas: (a) Agregado graúdo natural; (b) Agregado graúdo reciclado.

### 3.1.2. Concretos avaliados

Utilizou-se como método de dosagem o método do Instituto de Cimento Portland Argentino (ICPA, 2022). Adotou-se o valor de  $120 \pm 10$  mm para o abatimento dos concretos. A Tabela 3.4 apresenta as misturas produzidas e o consumo de materiais para a produção de  $1 \text{ m}^3$  de concreto. O nome REF se refere a mistura de referência, sem a utilização de agregado reciclado. As demais misturas são identificadas pelo número que indica a porcentagem de substituição do agregado natural por ARCO (20%, 50%, 75% e 100%), seguido da sigla “HR”, que significa *Hormigón Reciclado* (concreto reciclado).

| Nome   | a/c  | Cimento | Agregado miúdo |              | Agregado graúdo |           |
|--------|------|---------|----------------|--------------|-----------------|-----------|
|        |      |         | Areia fina     | Areia grossa | Natural         | Reciclado |
| REF    | 0,39 | 410     | 343,34         | 516,66       | 952,65          | -         |
| 20 HR  | 0,39 | 410     | 343,34         | 516,66       | 762,12          | 169,39    |
| 50 HR  | 0,41 | 410     | 341,64         | 511,51       | 469,72          | 415,98    |
| 75 HR  | 0,41 | 410     | 341,64         | 511,51       | 234,86          | 623,97    |
| 100 HR | 0,41 | 410     | 344,90         | 510,01       | -               | 838,56    |

Tabela 3.4: Consumo de materiais em  $\text{kg/m}^3$ .

### 3.1.3. Concretagem, moldagem e cura

As misturas foram produzidas em betoneira de eixo inclinado. Para cada traço, foram moldados 16 corpos de prova cilíndricos, com dimensões de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. A Figura 3.3 apresenta uma mistura logo após os processos de concretagem e moldagem. A etapa de concretagem foi realizada de acordo com os procedimentos da UNIT-NM 79 (UNIT, 1998) e a moldagem de acordo com os procedimentos da UNIT-ISO 1920-3 (UNIT, 2019). No contexto normativo brasileiro, a NBR 5738 (ABNT, 2015) prescreve o procedimento para moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos de concreto.

Os corpos de prova foram desmoldados entre 24 e 48 h após a moldagem, devidamente identificados, transferidos para um tanque de cura com solução saturada de hidróxido de cálcio a  $20 \pm 2$  °C e mantidos nessas condições até as idades de realização dos ensaios.



Figura 3.3: Moldagem dos corpos de prova.

Para os ensaios de determinação do coeficiente de migração de cloretos no estado não estacionário, os corpos de prova foram seccionados em três amostras com espessura de 50 mm, com descarte de 25 mm em nas extremidades. Para os ensaios de determinação dos coeficientes de difusão nos estados estacionário e não estacionário, os corpos de prova foram seccionados em cinco amostras com espessura de 30 mm, com descarte de 25 mm nas extremidades. Para os ensaios de absorção de água por capilaridade, os corpos de prova foram seccionados em uma amostra com espessura de 50 mm, com descarte de 30 mm na extremidade inferior e 120 mm na extremidade correspondente à face de enchimento do molde. Os esquemas de corte dos corpos de prova estão ilustrados na Figura 3.4.

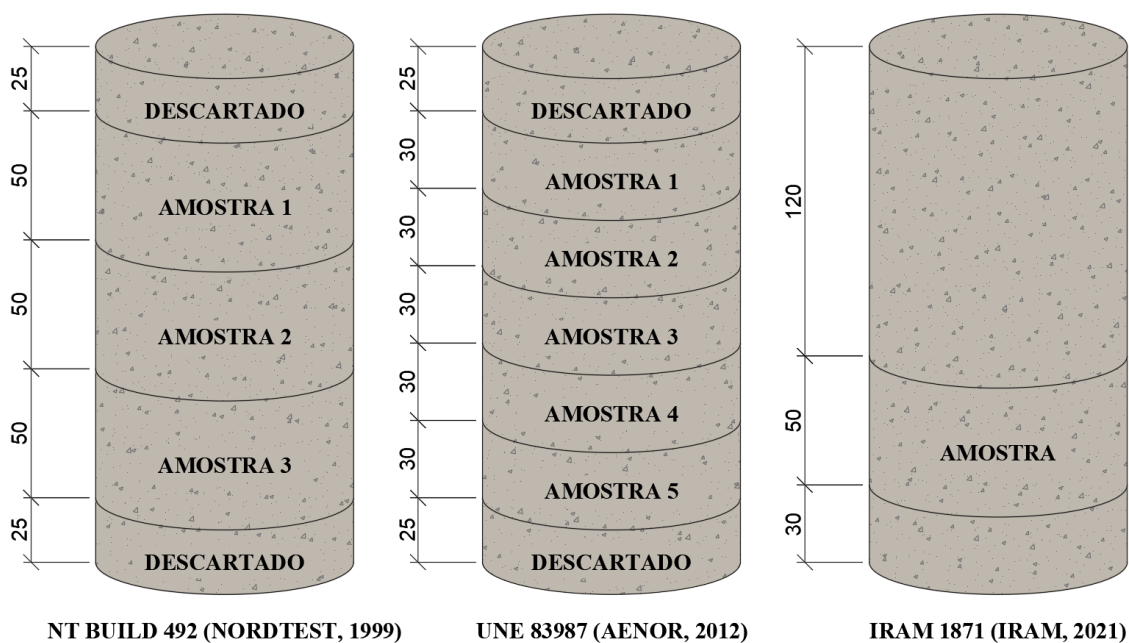


Figura 3.4: Esquemas de corte (dimensões em mm).

## 3.2. Avaliação das propriedades dos concretos

### 3.2.1. Resistência à compressão axial

A resistência à compressão axial dos corpos de prova de concreto foi determinada de acordo com os procedimentos e equações da UNIT-ISO 1920-4 (UNIT, 2020). No contexto normativo brasileiro, a determinação da resistência à compressão pode ser realizada de acordo com o método de ensaio estabelecido na NBR 5739 (ABNT, 2018).

Para cada traço, foi ensaiado um corpo de prova na idade de 7 dias, e três corpos de prova em cada uma das idades de 28 e 56 dias, completamente saturados. Inicialmente, as amostras foram limpas e secas, e suas dimensões e massas foram registradas. Em seguida, cada corpo de prova foi posicionado de forma centralizada no prato inferior da máquina de ensaio. A carga foi aplicada de forma contínua até a ruptura do corpo de prova, e a força máxima alcançada foi registrada. A Figura 3.5 apresenta a realização do ensaio.



Figura 3.5: Determinação da resistência à compressão axial.

A resistência à compressão axial  $f_c$  foi determinada da seguinte forma:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (4.1)$$

onde  $F$  é a carga máxima [N] e  $A_c$  é a área da seção transversal do corpo de prova sobre a qual atua a força de compressão [mm<sup>2</sup>].

### 3.2.2. Resistência à tração por compressão diametral

A resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova de concreto foi determinada de acordo com os procedimentos e equações da UNIT-ISO 1920-4 (UNIT, 2020). No contexto normativo brasileiro, a determinação da resistência à tração por compressão diametral pode ser realizada de acordo com o método de ensaio estabelecido na NBR 7222 (ABNT, 2011).

Para a realização do ensaio, foram utilizados três corpos de prova de cada mistura, completamente saturados. Os ensaios foram realizados aos 28 dias de idade. Inicialmente, as amostras foram limpas e secas. Em seguida, cada corpo de prova foi posicionado de forma centralizada na máquina de ensaio. A carga foi aplicada de forma contínua até a ruptura do corpo de prova, e a força máxima alcançada foi registrada. A Figura 3.6 apresenta a realização do ensaio.



Figura 3.6: Determinação da resistência à tração por compressão diametral.

A resistência à tração por compressão diametral  $f_{ct}$  foi determinada da seguinte forma:

$$f_{ct} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot L \cdot l} \quad (4.2)$$

onde  $F$  é a carga máxima [N],  $L$  é o comprimento da linha de contato com a amostra [mm] e  $l$  é o diâmetro do corpo de prova [mm].

### 3.2.3. Absorção de água por capilaridade

A capacidade e o coeficiente de absorção de água por capilaridade dos concretos endurecidos foram determinados conforme os procedimentos e equações estabelecidos pela norma IRAM 1871 (IRAM, 2021). No contexto normativo brasileiro, a determinação da absorção de água por capilaridade pode ser realizada de acordo com o método de ensaio estabelecido na NBR 9779 (ABNT, 2012).

De acordo com a IRAM 1871 (IRAM, 2021), a capacidade de absorção corresponde à capacidade máxima de água que uma amostra é capaz de absorver por capilaridade através de sua base de contato com a água. Já o coeficiente de absorção capilar é definido como um parâmetro que expressa a taxa de absorção de água por capilaridade ao longo do tempo, sendo também referido como velocidade de absorção capilar.

Para a realização do ensaio foram utilizadas três amostras de cada traço com dimensões de 50 mm de altura e 100 mm de diâmetro, obtidas a partir do corte dos corpos de prova moldados. O procedimento de ensaio iniciou-se com a determinação da área da seção transversal das amostras, a partir da medição dos seus respectivos diâmetros. Posteriormente, as superfícies laterais das amostras

foram impermeabilizadas, de modo a evitar a absorção de água em áreas não consideradas nos cálculos.

Subsequentemente, as amostras foram submersas em água por 72 h, após esse período, foram pesadas e tiveram sua massa saturada registrada. Em seguida, as amostras foram secas em estufa ( $50 \pm 2$ ) °C e os pesos foram registrados a cada ( $24 \pm 1$ ) h, até que a diferença entre duas pesagens consecutivas fosse inferior a 0,1% da última medição. As amostras foram resfriadas em temperatura ambiente e sua massa seca foi registrada. Posteriormente, as amostras foram introduzidas no recipiente de ensaio com uma lâmina de água de ( $3 \pm 1$ ) mm.

Cada amostra foi retirada do recipiente em intervalos de tempo pré-determinados e as pesagens foram realizadas em: 15 min, 30 min, 45 min, 1 h, 1,5 h, 2 h, 3 h, 4 h, 5 h, 6 h, 24 h, 48 h e, subsequentemente, a cada ( $24 \pm 1$ ) h, até que a variação de massa da amostra entre duas medições consecutivas fosse inferior a 0,1%.

Para cada amostra  $i$ , nos instantes de leitura  $t$ , se determinou o incremento de massa por unidade de área da seção transversal, dado por:

$$C_{it} = \frac{M_{hit} - M_{si}}{A_i} \quad (4.3)$$

onde  $C_{it}$  é a capacidade de absorção capilar da amostra no instante de leitura [ $\text{g}/\text{m}^2$ ],  $M_{hit}$  é a massa úmida da amostra no instante de leitura [g],  $M_{si}$  é a massa seca da amostra [g] e  $A_i$  é a área da seção transversal da amostra [ $\text{m}^2$ ].

A determinação desse parâmetro foi feita até que a variação de massa entre duas determinações sucessivas de massa úmida fosse inferior a 0,1%. A capacidade de absorção capilar da amostra ( $C_i$ ) corresponde ao tempo ( $t$ ) em que essa condição foi verificada. A capacidade de absorção capilar do concreto ( $C$ ) [ $\text{g}/\text{m}^2$ ] foi calculada como a média das capacidades de absorção capilar das amostras da série de ensaios  $C_i$  [ $\text{g}/\text{m}^2$ ].

Após a conclusão do ensaio de absorção capilar, as amostras foram submetidas à secagem em estufa, mantida a uma temperatura de ( $105 \pm 2$ ) °C, durante 48 h. Em seguida, as amostras foram retiradas da estufa e deixadas em resfriamento até atingirem a temperatura ambiente. Concluído esse processo, as amostras foram pesadas novamente. O grau de saturação das amostras no início e ao final do ensaio foi determinado como segue:

$$G_0 = \frac{M_{si} - M_0}{M_0} \cdot 100 \quad (4.4)$$

onde  $G_0$  é o grau de saturação no início do ensaio de absorção capilar [%],  $M_{si}$  é a massa seca a 50 °C da amostra ( $i$ ) [g] e  $M_0$  é a massa seca a 105 °C da amostra [g].

$$G_f = \frac{M_{hi} - M_0}{M_0} \cdot 100 \quad (4.5)$$

onde  $G_f$  é o grau de saturação ao final do ensaio de absorção capilar [%], quando a capacidade de absorção capilar  $C_i$  é atingida [%],  $M_{hi}$  é a massa úmida da amostra no instante de leitura em que a capacidade de absorção capilar  $C_i$  é atingida [g] e  $M_0$  é a massa seca a 105 °C da amostra [g].

O coeficiente de absorção capilar de cada amostra de ensaio foi determinado da seguinte forma:

$$S_{05i} = 0,0743 \cdot t_d^{-0,1879} \cdot S_i \quad (4.6)$$

onde  $S_{05i}$  é o coeficiente de absorção capilar de cada amostra em função da raiz quadrada do tempo  $[g/m^2 \times s^{1/2}]$ ,  $t_d$  é o tempo correspondente a  $0,9 \cdot C_i$  [h] e  $S_i$  é o coeficiente de absorção capilar de cada amostra em função da raiz quarta do tempo  $[g/m^2 \times s^{1/4}]$ .

O coeficiente de absorção capilar médio ( $S_{05m}$ ) foi calculado como a média aritmética dos valores de  $S_{05i}$ .

A Figura 3.7 apresenta um exemplo de gráfico de absorção capilar para três amostras.

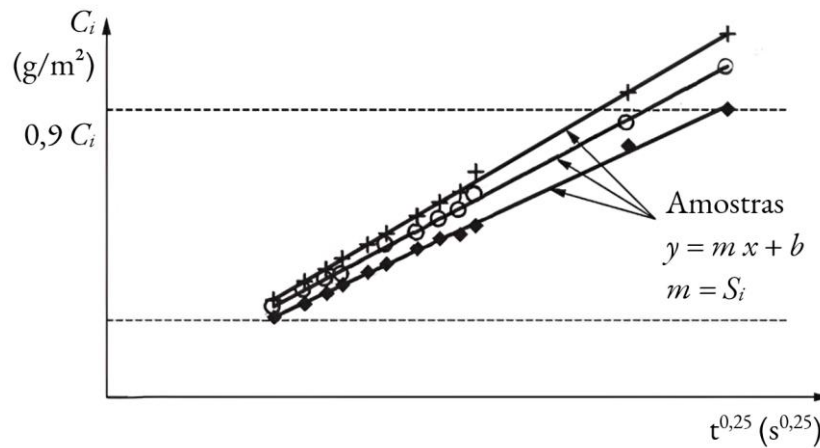


Figura 3.7: Exemplo de gráfico de absorção capilar para três amostras.

Fonte: Adaptado de IRAM 1871 (IRAM, 2021).

Como pode-se observar na Figura 3.7,  $S_i$  é o coeficiente angular da reta obtida por meio de ajuste por mínimos quadrados do conjunto de pontos. Esse ajuste foi realizado individualmente para cada amostra.

### 3.2.4. Coeficiente de migração de cloretos no estado não estacionário

A determinação do coeficiente de migração de íons cloretos no estado não estacionário foi realizada com base no método de ensaio e nas equações estabelecidas na NT Build 492 (NORDTEST, 1999). No contexto normativo brasileiro, ainda não existe um método de ensaio para avaliar e quantificar o transporte de cloretos no concreto. O método de ensaio estabelecido na NT Build se destaca por sua fácil e rápida execução, apresentando bons índices de repetibilidade e reprodutividade (Cascudo *et al.*, 2022).

Para a realização do ensaio, foram utilizadas três amostras com dimensões de 50 mm de altura e 100 mm de diâmetro, de cada mistura, completamente saturadas. Os ensaios foram realizados nas idades de 56, 91, 180 e 365 dias. O método consiste na aplicação de um potencial elétrico externo sobre a amostra, com o objetivo de induzir a migração dos íons cloretos através do material. A Figura 3.8 apresenta o esquema do ensaio. O compartimento “e” contém solução de NaCl a 10% e o compartimento “b” contém solução de NaOH a 0,3 M.

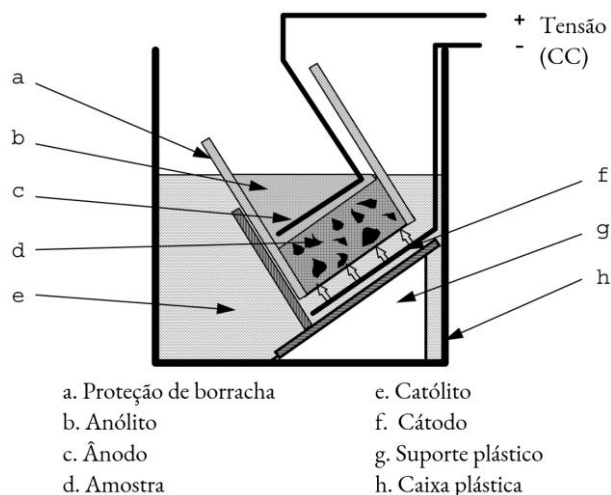


Figura 3.8: Esquema NT Build 492.

Fonte: Adaptado de NT Build 492 (NORDTEST, 1999).

A Figura 3.9 apresenta a realização do ensaio.



Figura 3.9: Determinação do coeficiente de migração de cloretos no estado não estacionário.

Previamente à realização do ensaio, as amostras foram submetidas a um processo de saturação em solução de hidróxido de cálcio. Embora a NT Build 492 (NORDTEST, 1999) recomende a utilização de câmara a vácuo para essa etapa, a saturação por imersão em solução de hidróxido de cálcio é recomendada pela norma ASTM C1556 (ASTM, 2016). Tal procedimento tem como objetivo evitar que a penetração dos íons cloreto ocorra por absorção capilar. Após o processo de saturação e com as amostras devidamente posicionadas nos dispositivos de ensaio, aplicou-se uma tensão elétrica de 30 V, sendo registrada a corrente inicial. Com base no valor dessa corrente, procedeu-se ao ajuste da tensão aplicada e à definição da duração do ensaio, conforme os critérios estabelecidos na Tabela 3.5.

Após transcorrido o tempo estabelecido para o ensaio, as amostras foram seccionadas axialmente, e uma solução de nitrato de prata ( $\text{AgNO}_3$ ) a 0,1 M foi pulverizada sobre a superfície exposta de uma das metades. A profundidade de penetração dos íons cloreto foi determinada de acordo com o esquema apresentado na Figura 3.10.

| Corrente inicial $I_{30V}$<br>(com 30 V) (mA) | Tensão aplicada $U$<br>(depois do ajuste) (V) | Possível nova corrente<br>inicial $I_0$ (mA) | Duração do ensaio $t$<br>(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                            |

Tabela 3.5: Tensão e duração do ensaio.  
Fonte: Adaptado de NT Build 492 (NORDTEST, 1999).

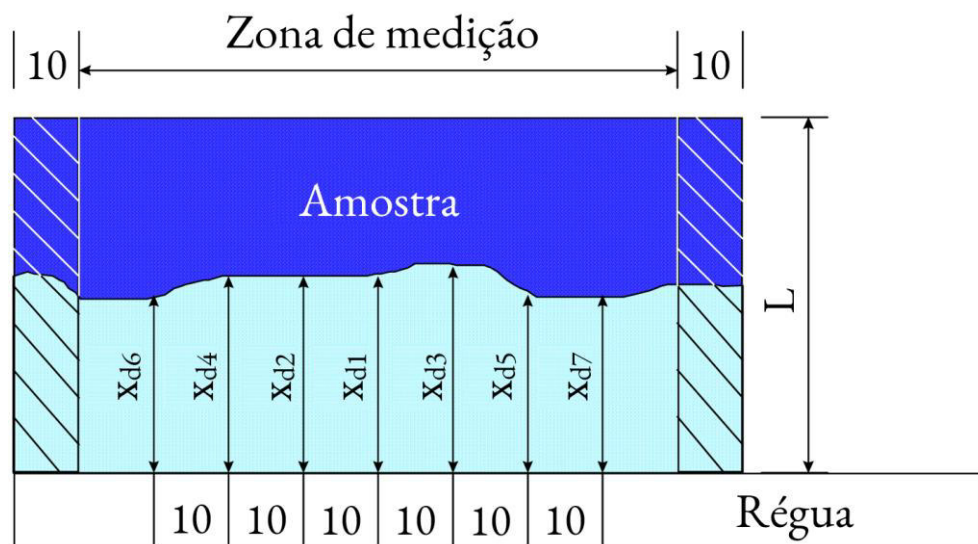


Figura 3.10: Medição da profundidade de penetração de cloretos.  
Fonte: Adaptado de NT Build 492 (NORDTEST, 1999).

A Figura 3.11 apresenta o aspecto das amostras após a aplicação da solução de nitrato de prata, sendo possível observar a profundidade de penetração dos íons cloretos, identificada pela região de coloração mais clara na superfície da amostra.



Figura 3.11: Determinação da profundidade de penetração dos íons cloretos.

A partir da profundidade de penetração dos íons cloretos, determinou-se o coeficiente de migração de cloretos no estado não estacionário, dado por:

$$D_{nssm} = \frac{0,0239 \cdot (273 + T) \cdot L}{(U - 2) \cdot t} \cdot \left( x_d - 0,0238 \cdot \sqrt{\frac{(273 + T) \cdot L \cdot x_d}{U - 2}} \right) \quad (3.1)$$

onde  $D_{nssm}$  é o coeficiente de migração não estacionário [ $10^{-12} \times \text{m}^2/\text{s}$ ],  $U$  é o valor absoluto da tensão aplicada [V],  $T$  é o valor médio das temperaturas inicial e final na solução do anólito [ $^{\circ}\text{C}$ ],  $L$  é a espessura da amostra [mm],  $x_d$  é o valor médio das profundidades de penetração [mm] e  $t$  é a duração do ensaio [h].

A resistência do concreto à penetração de íons cloretos pode ser avaliada com base no coeficiente de migração no estado não estacionário, obtido por meio do ensaio descrito na NT Build 492 (NORDTEST, 1999). Uma proposta de classificação encontra-se na Tabela 3.6.

| Difusividade de cloretos<br>$D_{nssm}$ [ $10^{-12} \times \text{m}^2/\text{s}$ ] | Resistência à penetração de cloretos |
|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| > 15                                                                             | Baixa                                |
| 10-15                                                                            | Moderada                             |
| 5-10                                                                             | Alta                                 |
| 2,5-5                                                                            | Muito alta                           |
| < 2,5                                                                            | Extremamente alta                    |

Tabela 3.6: Resistência à penetração de cloretos.

Fonte: Adaptado de Nilsson *et al.* (1998) *apud* Gjrv (2014).

O fator de envelhecimento dos concretos, fundamental para as previsões de vida útil, foi determinado com base nos coeficientes de migração aos 56, 91, 180 e 365 dias. O parâmetro reflete a redução da difusividade decorrente do refinamento da microestrutura do concreto, seja pela hidratação contínua do aglomerante, reações pozolânicas de adições minerais, entre outros fatores, e pode ser estimado da seguinte forma (Taffese *et al.*, 2024; Wally *et al.*, 2023):

$$D_{nssm}(t) = D_{nssm}(t_0) \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^\alpha \quad (3.2)$$

onde  $D_{nssm}(t)$  é o coeficiente de migração no estado não estacionário na idade  $t$  [ $\times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s],  $D_{nssm}(t_0)$  é o coeficiente de migração no estado não estacionário na idade  $t_0$  (= 56 dias) [ $\times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s] e  $\alpha$  é o fator de envelhecimento do concreto.

### 3.2.5. Coeficiente de difusão de cloretos nos estados estacionário e não estacionário

A determinação dos coeficientes de difusão de cloretos nos estados estacionário e não estacionário foi realizada com base no método de ensaio e nas equações estabelecidas pela norma UNE 83987 (AENOR, 2012). Trata-se de um método acelerado, também conhecido como Método Multirregime. Para a realização do ensaio, foram utilizadas três amostras com dimensões de 30 mm de altura e 100 mm de diâmetro, de cada mistura, completamente saturadas. Os ensaios foram realizados aos 91 dias de idade.

Nessa metodologia, a amostra de concreto é posicionada entre duas soluções: uma contendo água destilada e a outra, uma solução de cloreto de sódio. Aplica-se uma diferença de potencial de 12 V através da amostra, induzindo a migração dos íons cloretos em direção ao eletrodo positivo. O aumento da concentração de cloretos no compartimento anólito é monitorado por meio da medição da condutividade elétrica da solução. A Figura 3.12 apresenta o esquema de ensaio.

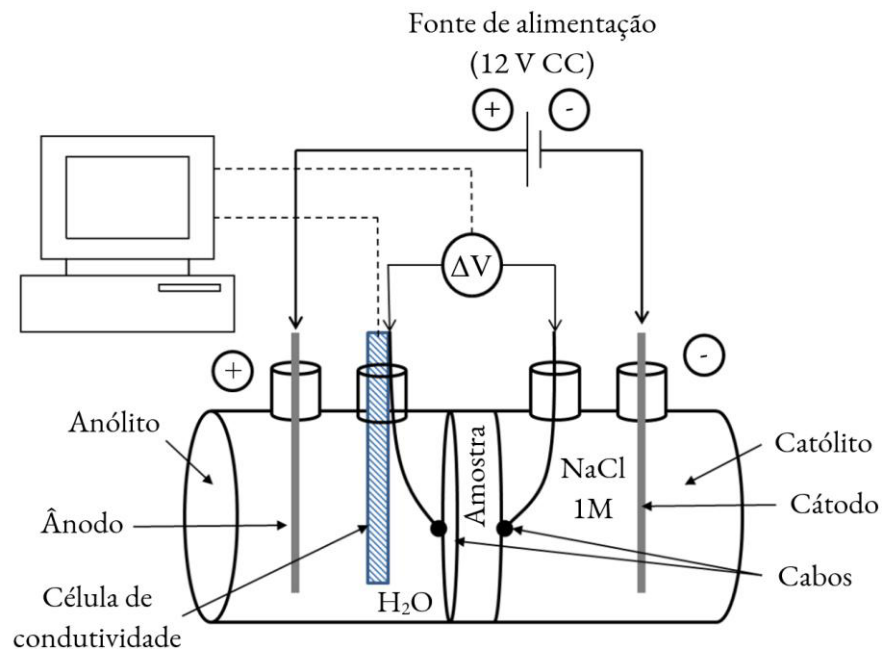


Figura 3.12: Esquema de ensaio proposto pela UNE 83987.

Fonte: Adaptado da UNE 83987 (AENOR, 2012).

A condutividade elétrica é um parâmetro que depende da temperatura. Desse modo, na ausência de uma célula de condutividade com correção automática, os valores obtidos devem ser corrigidos. A correção para a temperatura de referência foi feita da seguinte forma:

$$c_{25} = c_T + 0,0217 \cdot (25 - T) \cdot c_T \quad (3.3)$$

onde  $c_{25}$  é a condutividade elétrica obtida a 25 °C [mS/cm],  $c_T$  é a condutividade elétrica obtida à temperatura  $T$  [mS/cm] e  $T$  é a temperatura [°C].

A quantidade de cloretos no anólito, a partir dos valores de condutividade à temperatura de referência, é dada por:

$$Cl^- = 10^{-3} \cdot [-1,71 + (11,45 \cdot c_{25})] \cdot V_a \quad (3.4)$$

onde  $Cl^-$  é a quantidade de cloretos [mol],  $c_{25}$  é a condutividade elétrica obtida a 25 °C [mS/cm] e  $V_a$  é o volume do anólito [L].

O coeficiente de difusão de cloretos no estado estacionário foi determinado da seguinte forma:

$$D_s = \frac{J_{Cl} \cdot R \cdot T \cdot e}{z \cdot F \cdot Cl \cdot \gamma \cdot \Delta\Phi_{ss}} \quad (3.5)$$

onde  $D_s$  é o coeficiente de difusão de cloretos no estado estacionário [cm<sup>2</sup>/s],  $J_{Cl}$  é o fluxo dos íons cloretos [mol/(s×cm<sup>2</sup>)],  $R$  é a constante dos gases perfeitos [1,9872 cal/mol×K],  $T$  é a temperatura média do anólito durante o ensaio [K],  $e$  é a espessura do corpo de prova [cm],  $z$  é a valência do íon cloreto [1],  $F$  é a constante de Faraday [23.060 cal/Veq],  $Cl$  é a concentração inicial de cloretos no católito [mol/cm<sup>3</sup>],  $\gamma$  é o coeficiente de atividade do íon cloreto da solução catódica [0,657] e  $\Delta\Phi_{ss}$  é a média das tensões efetivas medidas durante o período de estado estacionário [V].

O fluxo dos íons cloretos é dado por:

$$J_{Cl} = \frac{V}{S} \cdot \frac{dC}{dt} \quad (3.6)$$

onde  $V$  é o volume da célula catódica, com cloretos [cm<sup>3</sup>],  $S$  é a área superficial do corpo de prova exposta à solução de cloretos [cm<sup>2</sup>] e  $dc/dt$  é a inclinação da parte linear do gráfico de concentração de cloretos *versus* tempo.

Durante a realização do ensaio, observa-se, inicialmente, um período em que a quantidade de cloretos que migra para a célula anódica (contendo água destilada) é insignificante. Esse intervalo é denominado *time lag* e corresponde ao tempo necessário para que os íons cloretos atravessem a amostra e promovam sua saturação, seja por meio de processos de adsorção ou pela formação do sal de Friedel (cloroaluminatos de sódio). Esse parâmetro é fundamental para a determinação do coeficiente de difusão no estado não estacionário. Após esse período, o fluxo de íons cloretos se torna constante, o que corresponde ao período estacionário de difusão. O *time lag* é obtido por meio da interseção entre o prolongamento da reta que caracteriza o estado estacionário e o eixo do tempo, de acordo com o esquema da Figura 3.13 (Ribeiro, 2018).

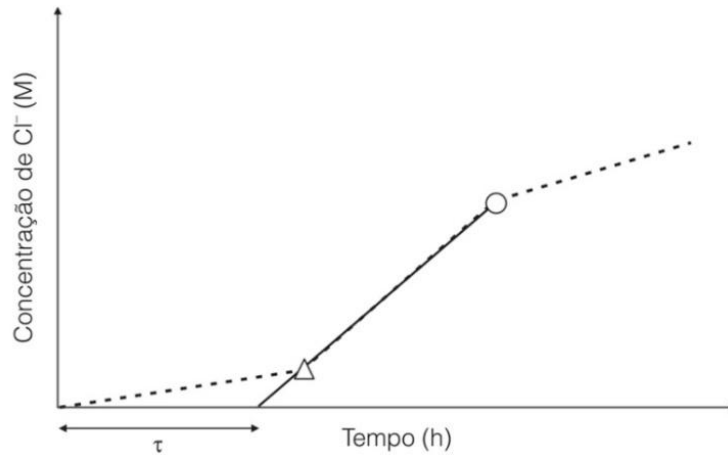


Figura 3.13: Esquema do gráfico padrão obtido no ensaio de difusão de cloretos, bem como a determinação do *time lag* ( $\tau$ ); e início ( $\Delta$ ) e fim ( $\circ$ ) do estado estacionário de difusão.

Fonte: Ribeiro (2018).

O coeficiente de difusão de cloretos no estado não estacionário foi determinado da seguinte forma:

$$D_{ns} = \frac{e^2}{2 \cdot \tau \cdot \varphi} \quad (3.7)$$

onde  $D_{ns}$  é o coeficiente de difusão de cloretos no estado não estacionário [ $\text{cm}^2/\text{s}$ ],  $e$  é a espessura do corpo de prova [cm],  $\tau$  é o *time lag* [s] e  $\varphi$  é o fator de aceleração do campo elétrico [V/cm], dado por:

$$\varphi = \frac{z \cdot F}{R \cdot T} \cdot \Delta\phi \quad (3.8)$$

onde  $z$  é a valência do íon cloreto [1],  $F$  é constante de Faraday [23060 cal/Veq],  $R$  é a constante dos gases perfeitos [1,9872 cal/mol $\times$ K],  $T$  é a temperatura média do anólito durante o ensaio [K] e  $\Delta\phi$  é o campo elétrico normalizado [V/cm], dado por:

$$\Delta\phi = \frac{\Delta E}{e} \quad (3.9)$$

onde  $\Delta E$  é a média das tensões efetivas medidas nas duas faces do corpo de prova, durante o trecho correspondente ao estado não estacionário [V] e  $e$  é a espessura do corpo de prova [cm].

### 3.2.6. Resistividade elétrica volumétrica

A determinação da resistividade elétrica volumétrica foi realizada com base no método de ensaio e nas equações estabelecidas pela norma UNE 83988-1 (AENOR, 2008). No contexto normativo brasileiro, a determinação da resistividade elétrica volumétrica pode ser realizada de acordo com o método de ensaio estabelecido na NBR 9204 (ABNT, 2012). É importante ressaltar que esse

método apresenta uma limitação significativa devido à necessidade de eletrodos constituídos de mercúrio metálico líquido, material que tem sua aplicação cada vez mais restrita por problemas de contaminação e descarte (IBRACON, 2021).

O método direto baseia-se na aplicação de um campo elétrico nas bases de um corpo de prova de concreto completamente saturado. Os ensaios foram realizados aos 182 dias. Para a realização do ensaio, foram utilizados dois corpos de prova de cada mistura, completamente saturados. Inicialmente, duas esponjas umedecidas foram introduzidas entre os eletrodos de metal e uma massa de 2 kg foi posicionada acima do conjunto. Uma corrente foi aplicada no sistema e a diferença de potencial foi registrada após a estabilização. Posteriormente, o mesmo procedimento foi repetido, dessa vez com o corpo de prova posicionado entre as esponjas. As Figuras 3.14 e 3.15 apresentam a realização e o esquema do ensaio, respectivamente.



Figura 3.14: Determinação da resistividade elétrica volumétrica.

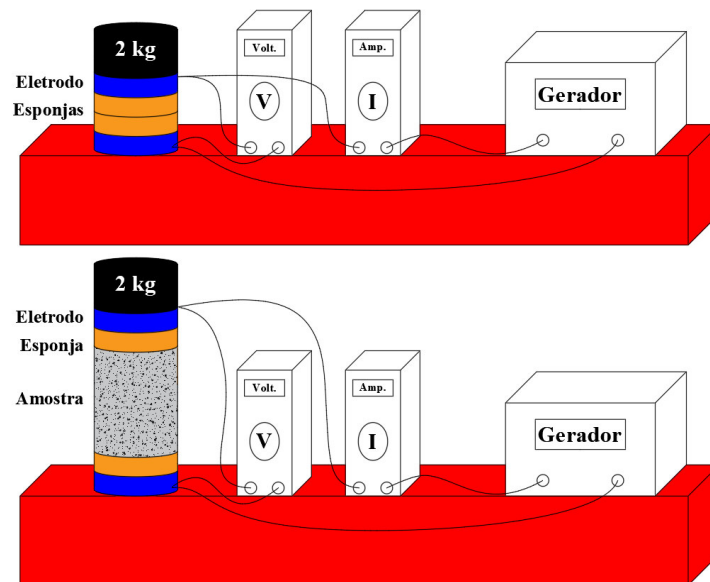


Figura 3.15: Esquema do ensaio de resistividade elétrica volumétrica.

Fonte: Adaptado de UNE 83988-1 (AENOR, 2008) *apud* IBRACON (2021).

A resistência elétrica foi determinada com base na Lei de Ohm, dada por:

$$R = \frac{V}{I} \quad (3.10)$$

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

A resistência elétrica do concreto foi calculada da seguinte forma:

$$R_c = R_{c+sp} - R_{sp} \quad (3.11)$$

onde  $R_c$  é a resistência elétrica do concreto [ $\Omega$ ],  $R_{c+sp}$  é a resistência elétrica do concreto somada à das esponjas [ $\Omega$ ] e  $R_{sp}$  é a resistência elétrica das esponjas [ $\Omega$ ].

A resistividade elétrica do concreto foi determinada como segue:

$$\rho_c = R_c \cdot \frac{S}{L} \quad (3.12)$$

onde  $\rho_c$  é a resistividade elétrica do concreto [ $\Omega \times m$ ],  $R_c$  é a resistência elétrica do concreto [ $\Omega$ ],  $S$  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 em números inteiros, representando uma média das duas medidas feitas em cada corpo de prova, como segue:

$$\rho_{vcon} = \overline{\rho_c} \cdot k_c \quad (3.13)$$

onde  $\rho_{vcon}$  é a resistividade elétrica volumétrica do concreto [ $\Omega \times m$ ],  $\overline{\rho_c}$  é a média das medidas obtidas [ $\Omega \times m$ ] e  $k_c$  é o fator de cura, igual a 1,1 para condição de cura imersa em água saturada de hidróxido de cálcio.

### 3.2.7. Resistividade elétrica superficial

A determinação da resistividade elétrica superficial foi realizada com base nos procedimentos de ensaio e nas equações estabelecidas na norma AASHTO T 358 (AASHTO, 2015). No contexto normativo brasileiro, ainda não existe um método de ensaio para determinar a resistividade elétrica superficial do concreto. O método proposto pela AASHTO T 358 (AASHTO, 2015) apresenta como principais vantagens a portabilidade do equipamento e a possibilidade de aplicação direta na superfície das estruturas. Essa característica elimina a necessidade de extração de testemunhos para ensaios laboratoriais, configurando-se como uma técnica não destrutiva que facilita a realização de medições *in loco* (IBRACON, 2021).

O método adotado consiste na medição da resistividade elétrica do concreto por meio de um arranjo de quatro sondas do tipo Wenner. Os ensaios foram realizados aos 182 dias. Neste método, uma corrente elétrica é aplicada nos dois pinos externos da sonda e a diferença de potencial resultante entre os dois pinos internos é medida. A partir dos valores da corrente elétrica aplicada e da diferença de potencial mensurada, calcula-se a resistência elétrica do concreto com base na Lei de Ohm. Por fim, conhecendo o espaçamento entre os pinos e as dimensões da amostra, é possível calcular a resistividade elétrica do concreto.

Para a realização do ensaio, foram utilizados dois corpos de prova de cada mistura, completamente saturados. A Figura 3.16 ilustra o esquema de ensaio. Inicialmente, cada corpo de prova foi posicionado em um suporte para evitar a sua rotação. Em seguida, a sonda foi posicionada e foram realizadas as medições de resistência elétrica na amostra, em pontos equidistantes, conforme a Figura 3.17. A Figura 3.18 apresenta a realização do ensaio.

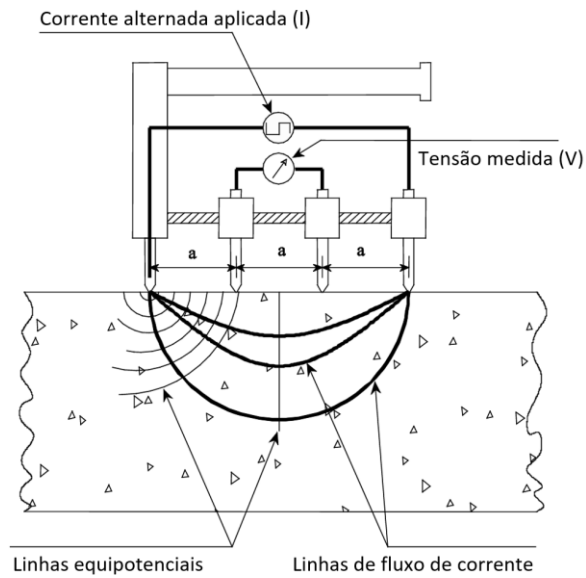


Figura 3.16: Esquema do ensaio de resistividade elétrica superficial.  
 Fonte: Adaptado de AASHTO T 358 (AASHTO, 2015).

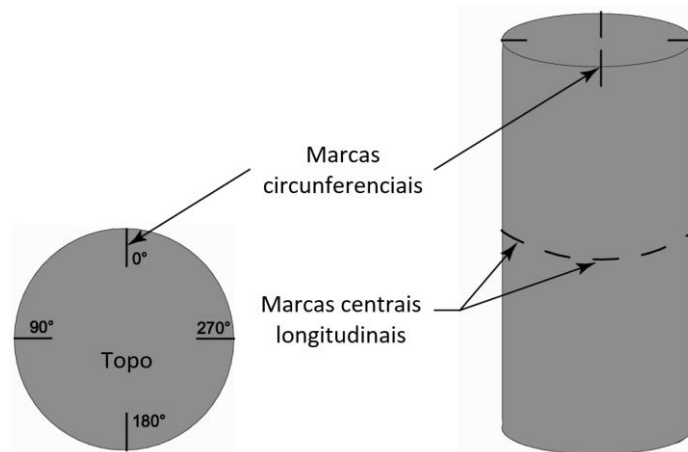


Figura 3.17: Marcação das amostras.  
 Fonte: Adaptado de AASHTO T 358 (AASHTO, 2015).



Figura 3.18: Determinação da resistividade elétrica superficial.

A resistividade elétrica superficial do concreto foi determinada da seguinte forma:

$$\rho_{Scon} = \overline{\rho}_c \cdot k_c \cdot k_f \quad (3.14)$$

onde  $\rho_{Scon}$  é resistividade elétrica superficial do concreto [ $\Omega \times m$ ],  $\overline{\rho}_c$  é a média das oito medidas de resistividade elétrica, feitas em cada corpo de prova [ $\Omega \times m$ ],  $k_c$  é o fator de cura, igual a 1,1 para condição de cura imersa em água saturada de hidróxido de cálcio,  $k_f$  o fator de forma, igual a 0,571 para espaçamento entre pontas da sonda igual 38 mm e dimensões do corpo de prova iguais a 20 cm na altura e 10 cm no diâmetro.

Com base nos resultados obtidos de resistividade elétrica superficial, avaliou-se qualitativamente a penetração de íons cloretos no concreto, de acordo com a Tabela 3.7.

| Penetração de íons cloretos | Resistividade elétrica superficial     |                                        |
|-----------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
|                             | Cilindro de 100 x 200 mm               | Cilindro de 150 x 300 mm               |
|                             | [ $k\Omega \times cm$ ]<br>a = 1,5 pol | [ $k\Omega \times cm$ ]<br>a = 1,5 pol |
| Alta                        | < 12                                   | < 9,5                                  |
| Moderada                    | 12-21                                  | 9,5-16,5                               |
| Baixa                       | 21-37                                  | 16,5-29                                |
| Muito Baixa                 | 37-254                                 | 29-199                                 |
| Insignificante              | >254                                   | >199                                   |

a = Espaçamento entre as pontas da sonda de Wenner

Tabela 3.7: Classificação do concreto quanto à penetração de íons cloretos com base na resistividade elétrica superficial.

Fonte: Adaptado de AASHTO T 358 (AASHTO, 2015).

### 3.3. Análise probabilística

#### 3.3.1. Modelo Duracon

Para a análise probabilística da vida útil, adotou-se o modelo Duracon, apresentado por Gjørv (2014). Esse modelo representa um avanço em relação ao modelo inicialmente proposto pelo projeto europeu DuraCrete (2000) e tem como objetivo principal a avaliação da durabilidade de estruturas de concreto armado expostas a ambientes marinhos. O modelo pode ser utilizado tanto para o projeto de durabilidade de novas estruturas quanto para a avaliação da necessidade de manutenção das existentes.

O Duracon baseia-se na solução analítica da segunda lei de Fick para a difusão, permitindo a estimativa da concentração de cloretos no interior do concreto ao longo do tempo, como segue:

$$C_{(x,t)} = C_S \cdot \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x_c}{2 \cdot \sqrt{D(t) \cdot t}} \right) \right] \quad (3.15)$$

onde  $C_{(x,t)}$  é a concentração de cloretos na profundidade  $x_c$  após o tempo  $t$  [%/massa de cimento],  $C_S$  é a concentração de cloretos na superfície do concreto [%/massa de cimento],  $\operatorname{erf}$  é a função erro

de Gauss,  $x_c$  é a espessura do cobrimento [mm] e  $D(t)$  é o coeficiente de difusão de cloretos dependente do tempo [ $\text{m}^2/\text{s}$ ], dado por:

$$D(t) = \frac{D_0}{1-\alpha} \cdot \left[ \left(1 + \frac{t'}{t}\right)^{1-\alpha} - \left(\frac{t'}{t}\right)^{1-\alpha} \right] \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^\alpha \cdot k_e \quad (3.16)$$

onde  $D_0$  é o coeficiente de difusão determinado no tempo de referência  $t_0$  [ $\text{m}^2/\text{s}$ ],  $t'$  é a idade do concreto quando exposto aos íons [anos],  $\alpha$  é o fator de envelhecimento do concreto e  $k_e$  é um parâmetro que introduz a influência da temperatura no processo de difusão, dado por:

$$k_e = \exp \left[ \frac{E_A}{R} \cdot \left( \frac{1}{293} - \frac{1}{273 + T} \right) \right] \quad (3.17)$$

onde  $\exp$  é a função exponencial,  $E_A$  é a energia de ativação da difusão de cloretos [kJ/mol],  $R$  é a constante universal dos gases [J/(mol×K)] e  $T$  é a temperatura [°C].

A partir da estimativa da concentração de cloretos no interior do concreto ao longo do tempo, é possível realizar o cálculo da probabilidade de falha associada à despassivação da armadura. É fundamental ressaltar que a aplicação do modelo Duracon parte de um conjunto de simplificações e suposições. Gjrv (2014) destaca as seguintes considerações, que devem ser levadas em conta na análise dos resultados:

- 1) Embora a difusão seja um mecanismo de transporte predominante através de cobrimentos espessos em ambientes marinhos úmidos, apenas um modelo de difusão unidimensional muito simples para o cálculo das taxas de penetração de cloretos é aplicado;
- 2) O comportamento de difusão de íons cloretos no concreto é também um processo de transporte muito mais complexo do que o que pode ser descrito pela segunda lei de difusão de Fick;
- 3) Em condições mais realistas em campo, existem outros mecanismos de transporte para a penetração de cloretos além da difusão pura;
- 4) A caracterização da resistência do concreto à penetração de cloretos é baseada em um teste de migração rápida, onde a penetração de cloretos é muito diferente do que ocorre em condições normais em campo.

### 3.3.2. Modelo *fib* (2006)

Para a análise probabilística da vida útil, adotou-se também o modelo para a corrosão induzida por cloretos apresentado no *fib Model Code for Service Life Design* (2006). O modelo *fib* (2006) baseia-se também na segunda lei de Fick para a difusão e supõe o concreto não fissurado. A concentração de cloretos no interior do concreto ao longo do tempo é estimada da seguinte forma:

$$C_{(x,t)} = C_0 + (C_{S,\Delta x} - C_0) \cdot \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x_c - \Delta x}{2 \cdot \sqrt{D_{app,C} \cdot t}} \right) \right] \quad (3.18)$$

onde  $C_{(x,t)}$  é a concentração de cloretos no concreto a uma profundidade  $x$  (superfície da estrutura localizada em  $x = 0$  m) e no tempo  $t$  [%/massa de cimento],  $C_0$  é a concentração inicial de cloretos no concreto [%/massa de cimento],  $C_{S,\Delta x}$  é a concentração de cloretos a uma profundidade  $\Delta x$  e em um

determinado ponto no tempo  $t$  [%/ massa de cimento],  $erf$  é a função de erro de Gauss,  $x_c$  é a espessura do cobrimento [mm],  $\Delta x$  é a profundidade da zona de convecção [mm],  $D_{app,C}$  é o coeficiente aparente de difusão de cloretos [mm<sup>2</sup>/anos] e  $t$  é o tempo [anos].

A zona de convecção ( $\Delta x$ ) corresponde à camada superficial do concreto, que é exposta a frequentes mudanças de umedecimento e subsequente evaporação. Nessa região, o transporte de cloretos não é controlado principalmente pela difusão, o que faz com que o comportamento de penetração de cloretos se desvie do comportamento ideal de difusão descrito pela segunda lei de Fick. Desse modo, a segunda lei de Fick é aplicada a partir da zona de convecção ( $x \geq \Delta x$ ) com uma concentração superficial substituta ( $C_{S,\Delta x}$ ).

O coeficiente aparente de difusão de cloretos é dado por:

$$D_{app,C} = k_e \cdot D_0 \cdot k_t \cdot A(t) \quad (3.19)$$

onde  $k_e$  é variável de transferência ambiental,  $D_0$  é coeficiente de migração de cloretos [mm<sup>2</sup>/anos],  $k_t$  é o parâmetro de transferência [1] e  $A(t)$  é a subfunção considerando o envelhecimento.

A variável de transferência ambiental é dada por:

$$k_e = \exp \left[ b_e \cdot \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{real}} \right) \right] \quad (3.20)$$

onde  $b_e$  é variável de regressão [K],  $T_{ref}$  é a temperatura de teste padrão [293 K] e  $T_{real}$  é a temperatura do elemento estrutural ou do ar ambiente [K].

A subfunção considerando o envelhecimento é dada por:

$$A(t) = \left( \frac{t_0}{t} \right)^\alpha \quad (3.21)$$

onde  $t_0$  é o ponto de referência no tempo [anos] e  $\alpha$  é o fator de envelhecimento do concreto.

### 3.3.3. Modelo *Life-365*

Para a análise probabilística da vida útil, adotou-se também o modelo *Life-365*. Esse modelo prevê o período de iniciação assumindo que a difusão é o mecanismo de transporte de cloretos dominante. Considera ainda a suposição de que não há fissuras no concreto e que a segunda lei de Fick é equação diferencial governante. O coeficiente de difusão de cloretos é função tanto do tempo quanto da temperatura, e a seguinte relação é utilizada para levar em conta as mudanças na difusão dependentes do tempo (Ehlen, 2020):

$$D(t) = D_{ref} \cdot \left( \frac{t_{ref}}{t} \right)^\alpha \quad (3.22)$$

onde  $D(t)$  é o coeficiente de difusão no tempo  $t$  [m<sup>2</sup>/s],  $D_{ref}$  é o coeficiente de difusão no tempo de referência  $t_{ref}$  (28 dias) [m<sup>2</sup>/s] e  $\alpha$  é o fator de envelhecimento do concreto.

A seguinte relação é utilizada para considerar as mudanças na difusão dependentes da temperatura (Ehlen, 2020):

$$D(T) = D_{ref} \cdot \exp \left[ \frac{U}{R} \cdot \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (3.23)$$

onde  $D(T)$  é o coeficiente de difusão no tempo  $t$  e temperatura  $T$ ,  $D_{ref}$  é o coeficiente de difusão no tempo  $t_{ref}$  (28 dias) e temperatura  $T_{ref}$  (293 K) [ $\text{m}^2/\text{s}$ ],  $U$  é a energia de ativação do processo de difusão [35000 J/mol],  $R$  é a constante universal dos gases [J/mol×K] e  $T$  é a temperatura absoluta [K].

O modelo *Life-365* assume que a redução no coeficiente de difusão com o tempo ocorre apenas até 25 anos. Após esse período, assume-se que o coeficiente de difusão varia apenas com a temperatura.

No software *Life-365*, a modelagem probabilística do período de iniciação é realizada com base em Bentz (2003). A distribuição das cinco variáveis de entrada é assumida como normalmente distribuída. Para calcular a probabilidade de falha, é utilizada uma Simulação de Monte Carlo (SMC) modificada e determinística, que possui um número predefinido de etapas (Ehlen, 2020):

- 1) O período de iniciação é estimado para os valores médios dos parâmetros de entrada;
- 2) Para cada uma das variáveis de entrada específicas – coeficiente de difusão, concentração superficial de cloretos, fator de envelhecimento do concreto, concentração crítica de cloretos e profundidade de cobrimento – são estimados cinco períodos de iniciação adicionais, onde cada período é ajustado individualmente em 10%.
- 3) Os resultados dos passos 2 e 1 são utilizados para estimar a derivada do período de iniciação em relação a cada uma das cinco variáveis. Esse processo determina a sensibilidade do período de iniciação a variações em cada uma das variáveis.
- 4) Os resultados do passo 3 são utilizados para estimar um único parâmetro de variabilidade, semelhante a um desvio padrão, para uma variação lognormal assumida do período de iniciação, onde o valor médio dessa distribuição é obtido da análise determinística no passo 1 e a variabilidade dessa distribuição assumida é determinada a partir dos resultados dos passos 2 e 3.

### 3.3.4. Função de estado limite e parâmetros de entrada para análise probabilística

Com base nos modelos apresentados, e tomando a despassivação da armadura como estado limite de durabilidade, a seguinte função de estado limite pode ser estabelecida:

$$g(X) = C_{cr} - C_{(x,t)} \quad (3.24)$$

onde  $g(X)$  indica a função de estado limite,  $C_{cr}$  é a concentração crítica de cloretos [%/massa de cimento] e  $C_{(x,t)}$  é a concentração de cloretos na profundidade  $x_c$  após o tempo  $t$  [%/massa de cimento].

Quando  $g(X) > 0$ , a estrutura é considerada segura em relação ao estado limite de despassivação, por outro lado, quando  $g(X) \leq 0$ , a estrutura atingiu o estado limite de durabilidade.

Neste caso, a probabilidade de falha pode ser entendida como a probabilidade de atingir o estado limite de despassivação da armadura, como segue:

$$p_f = P(C_{(x,t)} \geq C_{cr}) \quad (3.25)$$

É importante destacar que não há um consenso na literatura quanto ao valor a ser adotado para a probabilidade de falha limite. Tal incerteza pode resultar em estimativas significativamente divergentes da vida útil de uma mesma estrutura, mesmo quando submetida a condições de exposição idênticas. Neste trabalho, optou-se por adotar o valor de 10% para a probabilidade de falha limite.

A estimativa da probabilidade de falha foi realizada considerando estruturas de concreto com espessura média de cobrimento ( $x_c$ ) igual a 40 mm, conforme as recomendações da NBR 6118 (ABNT, 2023), para a Classe de Agressividade Ambiental III, correspondente à condição de ambiente marinho.

Os coeficientes de migração de cloretos, medidos aos 56 dias, foram tomados como  $D_0$  nos modelos Duracon e *fib* (2006), e como  $D_{ref}$  no modelo *Life-365*. Os fatores de envelhecimento do concreto, apresentados na seção 4.4, foram considerados por meio do parâmetro  $\alpha$ .

O valor médio para a concentração superficial de cloretos ( $C_s$ ) foi definido com base no *fib Bulletin 76* (CEB, 2015), correspondente à classe de exposição XS1 – exposição à nevoa salina, sem contato direto com a água do mar.

O valor médio para a concentração crítica de cloretos ( $C_{cr}$ ) foi selecionado com base nas diretrizes propostas na recomendação RILEM (1994).

A temperatura ( $T$ ) utilizada nas simulações corresponde à média anual registrada na cidade de Rio Grande – RS, de acordo com dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

O coeficiente de variação (CV) dos parâmetros de entrada foi determinado conforme os valores sugeridos por Gjorv (2015). As distribuições de probabilidade das variáveis aleatórias foram adotadas conforme as recomendações específicas de cada modelo. A única exceção refere-se à variável  $C_s$ , para a qual foi empregada uma distribuição lognormal, em substituição à distribuição normal sugerida pelo *fib Model Code for Service Life Design* (2006), uma vez que, para o valor de CV adotado, a distribuição normal resulta em valores negativos de concentração superficial de cloretos, o que é fisicamente inadmissível.

### ***Parâmetros de entrada para o modelo Duracon***

Foram realizadas  $10^6$  simulações no software Duracon. A probabilidade de falha foi calculada ano a ano, para um período de análise ( $t$ ) de 100 anos. O tempo de referência ( $t_0$ ) e a idade do concreto quando exposto aos íons ( $t'$ ) foram tomados como 56 dias, idade na qual  $D_0$  foi determinado. Os parâmetros de entrada utilizados no modelo estão organizados na Tabela 3.8.

| Parâmetro | Unidade                               | Distribuição   | Média                                      | CV   | Referência                    |
|-----------|---------------------------------------|----------------|--------------------------------------------|------|-------------------------------|
| $C_{cr}$  | %/massa de cimento                    | Normal         | 0,40                                       | 0,15 | RILEM (1994)                  |
| $C_S$     | %/massa de cimento                    | Normal         | 1,00                                       | 0,45 | <i>fib Bulletin</i> 76 (2015) |
| $x_C$     | mm                                    | Normal         | 40,00                                      | 0,10 | NBR 6118 (2023)               |
| $D_0$     | $10^{-12} \times \text{m}^2/\text{s}$ | Normal         | $D_{\text{nssm},56\text{d}}$<br>(Fig. 4.5) | 0,10 | Este estudo                   |
| $T$       | °C                                    | Normal         | 18,00                                      | 0,20 | INMET                         |
| $t_0$     | dias                                  | Determinística | 56,00                                      | -    | Este estudo                   |
| $t'$      | dias                                  | Determinística | 56,00                                      | -    | Este estudo                   |
| $\alpha$  | -                                     | Normal         | $\alpha$<br>(Tabela 4.2)                   | 0,20 | Este estudo                   |

Tabela 3.8: Parâmetros de entrada para o modelo Duracon.

### ***Parâmetros de entrada para o modelo fib (2006)***

Foram realizadas  $10^6$  simulações no programa desenvolvido em linguagem Python para aplicação do modelo *fib* (2006). A probabilidade de falha foi calculada ano a ano, para um período de análise ( $t$ ) de 100 anos. Os parâmetros de entrada utilizados no modelo estão organizados na Tabela 3.9.

| Parâmetro  | Unidade                               | Distribuição                 | Média                                      | CV    | Referência                    |
|------------|---------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------------|-------|-------------------------------|
| $C_{cr}$   | %/massa de cimento                    | Beta<br>a = 0,20<br>b = 2,00 | 0,40                                       | 0,15  | RILEM (1994)                  |
| $C_0$      | %/massa de cimento                    | Determinística               | 0,00                                       | -     | Este estudo                   |
| $C_S$      | %/massa de cimento                    | Lognormal                    | 1,00                                       | 0,45  | <i>fib Bulletin</i> 76 (2015) |
| $x_C$      | mm                                    | Normal                       | 40,00                                      | 0,10  | NBR 6118 (2023)               |
| $\Delta x$ | mm                                    | Determinística               | 0,00                                       | -     | <i>fib Bulletin</i> 34 (2006) |
| $D_0$      | $10^{-12} \times \text{m}^2/\text{s}$ | Normal                       | $D_{\text{nssm},56\text{d}}$<br>(Fig. 4.5) | 0,10  | Este estudo                   |
| $k_t$      | -                                     | Determinística               | 1,00                                       | -     | <i>fib Bulletin</i> 34 (2006) |
| $b_e$      | K                                     | Normal                       | 4.800,00                                   | 0,146 | <i>fib Bulletin</i> 34 (2006) |
| $T_{ref}$  | °C                                    | Determinística               | 20,00                                      | -     | Este estudo                   |
| $T_{real}$ | °C                                    | Normal                       | 18,00                                      | 0,20  | INMET                         |
| $t_0$      | dias                                  | Determinística               | 56,00                                      | -     | Este estudo                   |
| $\alpha$   | -                                     | Beta<br>a = 0,00<br>b = 1,00 | $\alpha$<br>(Tabela 4.2)                   | 0,20  | Este estudo                   |

Tabela 3.9: Parâmetros de entrada para o modelo *fib* (2006).

Conforme discutido nas seções anteriores, a presença de cloretos no concreto pode estar associada tanto à penetração a partir do ambiente quanto à contaminação dos materiais constituintes, como agregados, cimento ou água de amassamento, especialmente em regiões marinhas. Esse aspecto requer atenção especial no uso ARCO, uma vez que estes provêm de estruturas preexistentes suscetíveis à contaminação prévia. A existência de cloretos nesses agregados constitui um ponto crítico, pois eventuais cloretos livres presentes nos poros do agregado poderiam interagir quimicamente com a nova matriz cimentícia. No entanto, neste estudo, devido à ausência de informações sobre o histórico de exposição dos ARCO e à não realização de medições diretas do teor de cloretos, adotou-se a premissa de uma concentração inicial de cloretos nula (0%/massa de cimento).

### ***Parâmetros de entrada para o modelo Life-365***

No software *Life-365*, as concentrações de cloretos devem ser expressas em percentual em relação a massa de concreto. Dessa forma, as concentrações de cloretos foram convertidas para essa unidade, conforme o diagrama apresentado por GjØrv (2014). Outro aspecto relevante refere-se ao tempo de referência ( $t_{ref}$ ) que, conforme o padrão adotado pelo software, corresponde a 28 dias. Os valores ajustados dos parâmetros de entrada utilizados nas simulações, incluindo as variáveis convertidas, estão apresentados na Tabela 3.10.

| Parâmetro | Unidade                               | Distribuição   | Média                        | COV  | Referência                    |
|-----------|---------------------------------------|----------------|------------------------------|------|-------------------------------|
| $C_{cr}$  | %/massa de concreto                   | Normal         | 0,07                         | 0,15 | RILEM (1994)                  |
| $C_s$     | %/massa de concreto                   | Normal         | 0,17                         | 0,45 | <i>fib Bulletin</i> 76 (2015) |
| $x_c$     | mm                                    | Normal         | 40,00                        | 0,10 | NBR 6118 (2023)               |
| $D_{ref}$ | $10^{-12} \times \text{m}^2/\text{s}$ | Normal         | $D_{nssm,56d}$<br>(Fig. 4.5) | 0,10 | Este estudo                   |
| $T$       | °C                                    | Determinística | 18,00                        | -    | INMET                         |
| $t_{ref}$ | dias                                  | Determinística | 28,00                        | -    | Padrão do <i>Life-365</i>     |
| $\alpha$  | -                                     | Normal         | $\alpha$<br>(Tabela 4.2)     | 0,20 | Este estudo                   |

Tabela 3.10: Parâmetros de entrada para o modelo *Life-365*.

A probabilidade de falha foi calculada ano a ano, para um período de análise ( $t$ ) de 100 anos. Embora seja possível estipular o tempo, em anos, para a que a concentração superficial de cloretos atinja o seu valor máximo, essa previsão não foi realizada. Desse modo, a concentração superficial de cloretos no concreto é admitida constante ao longo do tempo, como nos modelos *Duracon* e *fib*. Outra simplificação refere-se à temperatura. No *Life-365*, é possível estabelecer as médias mensais de temperatura, entretanto, adotou-se a média anual. Essas decisões foram realizadas com o intuito de garantir uniformidade e possibilidade de comparação entre os diferentes modelos.

## 4. Resultados

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

### 4.1. Resistência à compressão axial

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial, realizados aos 7, 28 e 56 dias, estão apresentados na Figura 4.1.

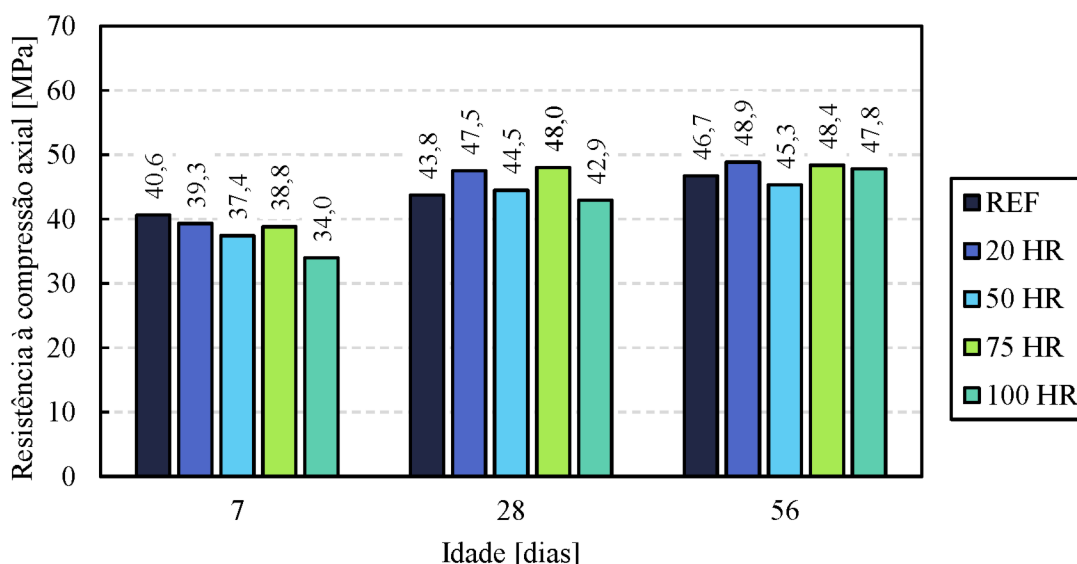


Figura 4.1: Resistência à compressão axial.

Com base nos dados apresentados na Figura 4.1, observa-se que a resistência à compressão das misturas contendo ARCO apresenta-se bastante próxima a do concreto de referência, com reduções inferiores a 8% aos 7 dias, com exceção do traço com 100% de substituição – redução de aproximadamente 16%. Já aos 28 e 56 dias, as reduções permaneceram abaixo de 2% e 3%, respectivamente, considerando todos os traços produzidos com ARCO. Ressalta-se ainda que, a partir dos 28 dias, as reduções nos valores de resistência à compressão nos concretos com agregados reciclados, foram inferiores a 1,5 MPa.

Tal comportamento pode ser atribuído à origem dos agregados reciclados empregados. Em geral, o concreto proveniente de elementos pré-moldados possui qualidade superior em comparação ao concreto moldado *in loco*, em função do controle de qualidade mais rigoroso dos processos de dosagem, moldagem e cura. Consequentemente, os agregados reciclados oriundos desses elementos tendem a apresentar maior resistência mecânica. Resultados similares foram observados por diversos autores na literatura (Fiol *et al.*, 2020; Santos *et al.*, 2019; Santos *et al.*, 2020).

## 4.2. Resistência à tração por compressão diametral

Os resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, realizados aos 28 dias, estão apresentados na Figura 4.2.

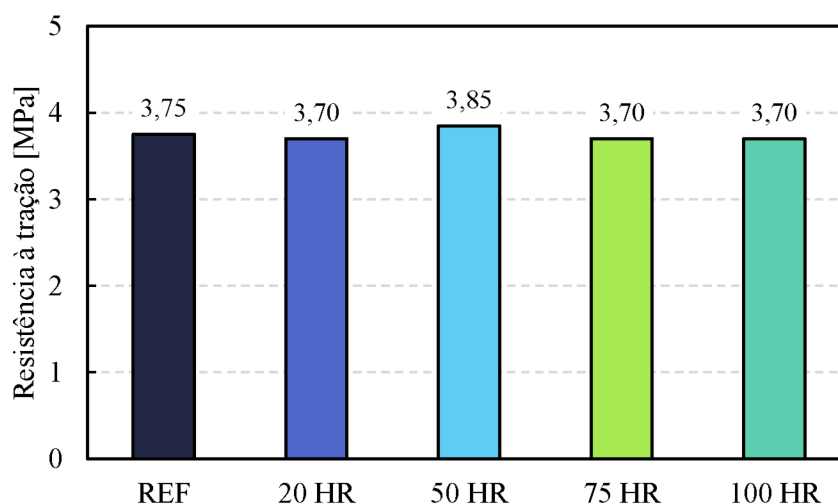


Figura 4.2: Resistência à tração por compressão diametral.

Com base nos dados apresentados na Figura 4.2, observa-se que a resistência à tração das misturas contendo ARCO apresenta-se bastante próxima a do concreto de referência, com variações inferiores a 2,7%.

Resultados similares foram observados por Salles *et al.* (2021), que avaliaram concretos com substituição de agregado gráúdo natural por agregado gráúdo reciclado, nos teores de 25%, 50% e 100%. Os autores observaram que as resistências à tração dos concretos produzidos com agregados reciclados apresentaram variações inferiores a 8% aos 28 dias, em relação ao concreto de referência.

Os resultados também são similares aos observados por Gao *et al.* (2020), que avaliaram concretos com substituição de agregado gráúdo natural por agregado gráúdo reciclado, nos teores de 50%, 70% e 100%. Os autores observaram que as resistências à tração dos concretos produzidos com agregados reciclados apresentaram variações inferiores a 12% aos 28 dias, em relação ao concreto de referência.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), a relação entre a resistência à tração e a resistência à compressão do concreto situa-se na faixa de 7% a 11%, podendo variar em função de diversos fatores, como o tipo de agregado utilizado, a presença de aditivos e adições, a relação água/cimento, a idade da cura, entre outros. No presente estudo, os valores obtidos para essa relação situaram-se entre 8% e 9%, permanecendo, portanto, dentro da faixa considerada típica para concretos convencionais.

Ressalta-se que as variações nos valores de resistência à tração entre os diferentes traços analisados, foram inferiores a 0,5 MPa. Tal diferença pode ser considerada pouco significativa quando se leva em conta a precisão do ensaio, uma vez que as variações de resistência observadas entre corpos de prova de um mesmo traço podem ultrapassar esse valor.

É importante ressaltar que os traços REF e 20 HR apresentam relações água/cimento (a/c) inferiores às dos demais traços avaliados (Tabela 3.4). Ainda que ensaios específicos para a determinação da porosidade não tenham sido realizados neste estudo, é estabelecido na literatura que o aumento da relação a/c eleva a porosidade da pasta de cimento. Esse fator impacta diretamente tanto o

desempenho mecânico quanto a durabilidade dos concretos, por estar associada a facilidade de penetração de agentes agressivos.

### 4.3. Absorção de água por capilaridade

A Figura 4.3 apresenta a evolução da capacidade de absorção capilar das amostras ao longo do tempo ( $C_{it}$ ) para cada traço de concreto analisado. Na Figura 4.3, são indicados os coeficientes de absorção capilar ( $S_i$ ) das amostras.

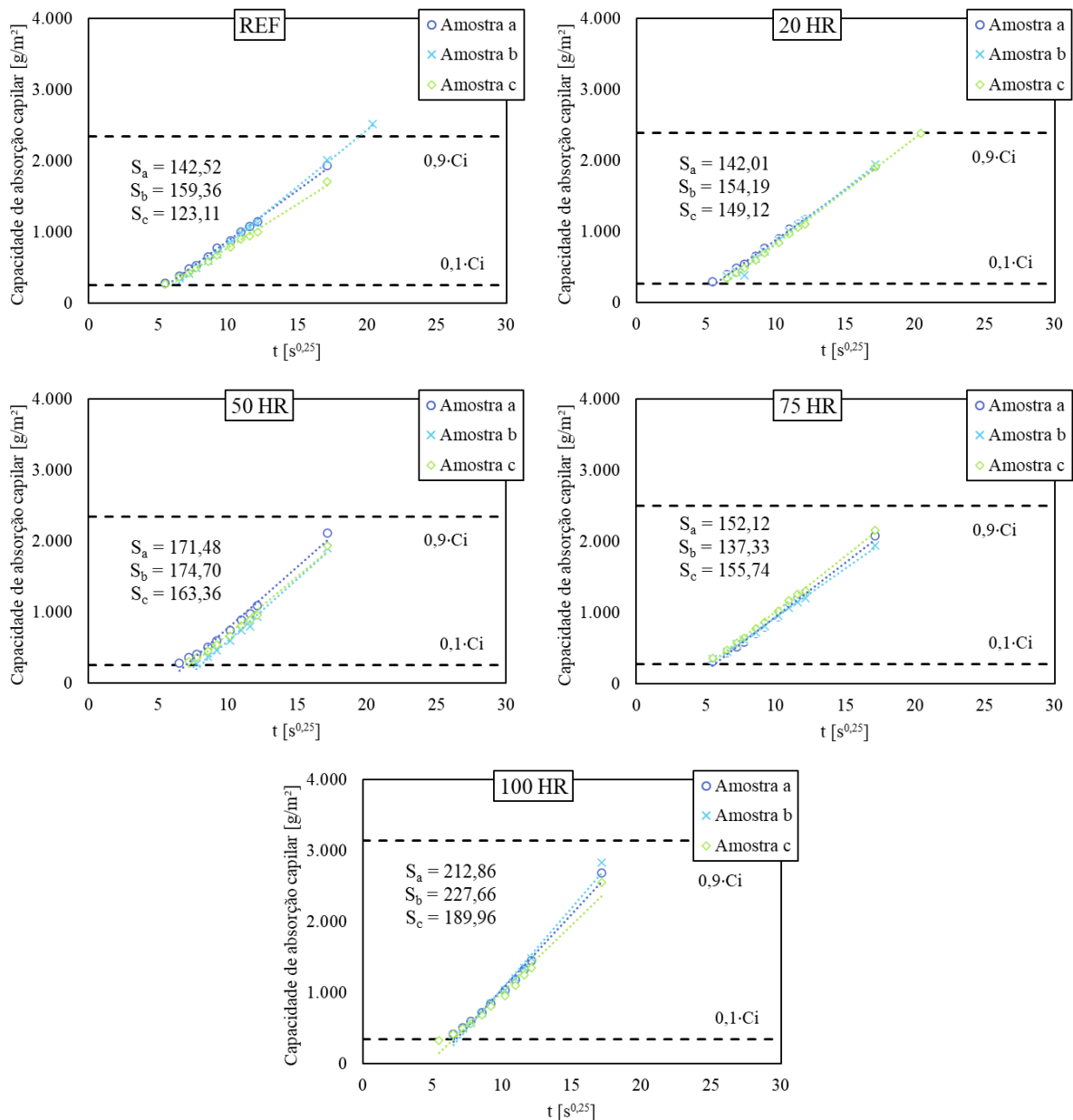


Figura 4.3: Capacidade de absorção de água por capilaridade das amostras.

A Figura 4.4 apresenta a evolução da absorção capilar média para os diferentes traços de concreto. Com o objetivo de facilitar a visualização dos dados, foram representados apenas os resultados correspondentes ao intervalo de tempo entre 3 e 96 h de ensaio.

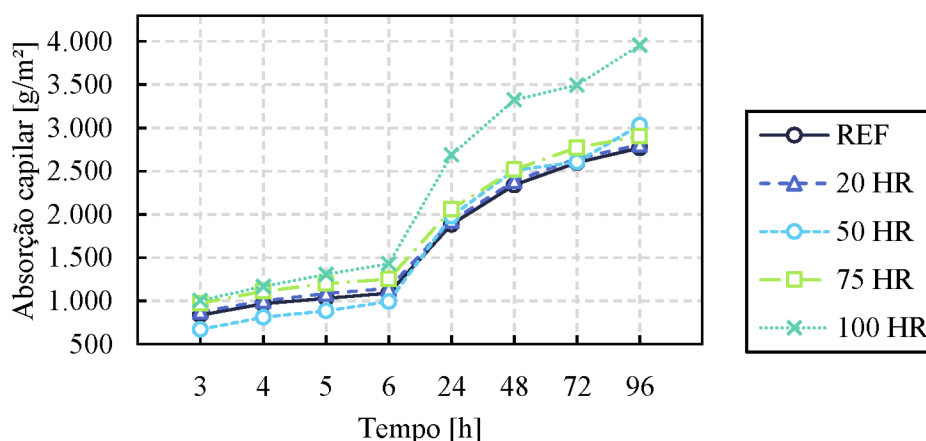


Figura 4.4: Curvas de absorção de água por capilaridade.

Os parâmetros derivados do ensaio – capacidade de absorção capilar do concreto ( $C$ ), grau de saturação inicial ( $G_0$ ), grau de saturação final ( $G_f$ ) e coeficiente de absorção capilar médio ( $S_{05m}$ ) – estão apresentados na Tabela 4.1. Todos os valores correspondem à média dos resultados obtidos para três amostras de cada traço.

| Parâmetro | Unidade                              | REF      | 20 HR    | 50 HR    | 75 HR    | 100 HR   |
|-----------|--------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $C$       | $\text{g/m}^2$                       | 2.597,40 | 2.648,33 | 2.606,06 | 2.773,70 | 3.492,91 |
| $G_0$     | %                                    | 1,93     | 2,13     | 2,58     | 2,54     | 2,69     |
| $G_f$     | %                                    | 4,22     | 4,43     | 4,99     | 5,03     | 5,98     |
| $S_{05m}$ | $\text{g/m}^2 \times \text{s}^{1/2}$ | 4,71     | 4,94     | 5,65     | 4,94     | 6,99     |

Tabela 4.1: Parâmetros obtidos no ensaio de absorção capilar.

Os dados apresentados na Figura 4.4 e na Tabela 4.1 evidenciam o impacto da substituição de agregados naturais por ARCO nos parâmetros associados à absorção de água por capilaridade. O traço com 20% de substituição (20 HR) apresentou variações pouco significativas em relação ao concreto de referência (REF), sugerindo que, em baixos teores, a presença de ARCO gera um efeito aceitável sob o ponto de vista da durabilidade.

Nos traços intermediários, o comportamento variou. No 50 HR, os aumentos mais expressivos ocorreram no grau de saturação inicial (34%), final (18%) e no coeficiente de absorção capilar médio (20%). No 75 HR, os graus de saturação também subiram (31% e 19%, respectivamente). Em ambos os traços, a capacidade de absorção capilar apresentou acréscimos menos significativos: inferiores a 1% no 50 HR e próximos a 7% no 75 HR.

O impacto mais significativo foi observado no traço com 100% de substituição (100 HR). A capacidade de absorção capilar aumentou de 2.597,40  $\text{g/m}^2$  (REF) para 3.492,91  $\text{g/m}^2$ , um aumento de 34%. Da mesma forma, os graus de saturação inicial e final aumentaram (39% e 42%, respectivamente) e o coeficiente de absorção capilar médio elevou-se em 48%.

Estes resultados podem ser atribuídos à maior porosidade da argamassa residual aderida à superfície dos agregados reciclados, a qual contribui para o aumento da densidade e do comprimento dos capilares na matriz cimentícia. Desse modo, a microestrutura mais porosa favorece a penetração de água por capilaridade (Gomes e De Brito, 2009). Contudo, nota-se que os resultados não seguem

uma tendência linear em função do teor de substituição. Variações mais acentuadas ocorreram nos extremos (0% e 100%), enquanto os teores intermediários (50% e 75%) apresentaram comportamentos menos uniformes. Isso indica que a simples redução no teor de substituição não garante melhora proporcional de desempenho, exigindo uma análise criteriosa da dosagem a ser adotada.

#### 4.4. Coeficiente de migração de cloretos no estado não estacionário

Os resultados obtidos nos ensaios para a determinação do coeficiente de migração de cloretos no estado não estacionário ( $D_{nssm}$ ), realizados aos 56, 91, 180 e 365 dias, são apresentados na Figura 4.5.

Com base nos dados apresentados na Figura 4.5, observa-se que, em geral, o aumento do teor de substituição de agregado natural por agregado reciclado levou a um aumento na difusividade do concreto, corroborando a tendência observada nos resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade. Esse comportamento também é relatado na literatura e pode estar relacionado ao aumento da porosidade do concreto e das zonas de transição interfaciais devido à natureza do agregado reciclado (Nanya *et al.*, 2021; Neves e De Brito, 2022).

É importante ressaltar, no entanto, que os coeficientes de migração de cloretos em concretos que contêm agregados reciclados são bastante semelhantes aos do concreto de referência. Em muitos casos, especialmente nas idades de 180 e 365 dias, a variação na difusividade entre concretos com e sem agregados reciclados é menor do que as variabilidades inerentes à produção de concreto e ao método de ensaio realizado – ou seja, a variação entre duas misturas distintas é menor do que a variabilidade observada entre amostras da mesma mistura.

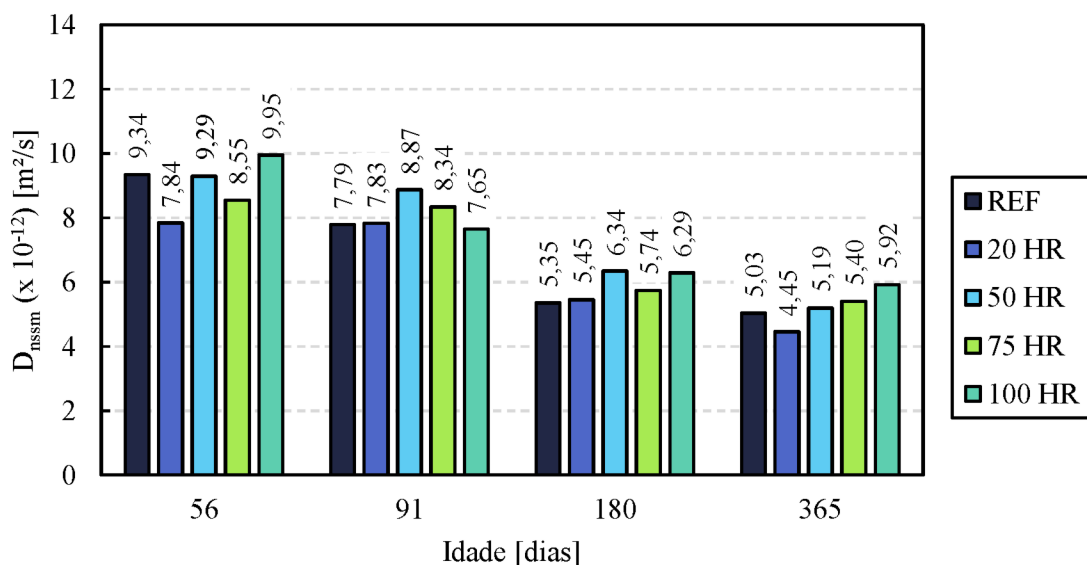


Figura 4.5: Coeficiente de migração de cloretos em estado não estacionário ao longo do tempo.

Conforme a classificação proposta por Nilsson *et al.* (1998), apresentada na Tabela 3.6, todos os traços avaliados apresentariam alta resistência à penetração de íons cloretos. A única exceção é o traço 20 HR, o qual, aos 365 dias de idade, seria classificado como de resistência muito alta. Entretanto, ainda que todos os traços tenham obtido a mesma classificação, a discrepância entre os valores

dos coeficientes de migração de cloretos em estado não estacionário pode acarretar previsões de vida útil significativamente diferentes.

Com base nos coeficientes de migração medidos experimentalmente, o fator de envelhecimento de cada um dos concretos avaliados foi calculado. A Figura 4.6 mostra o ajuste dos coeficientes apresentados na Figura 4.5 à função exponencial apresentada na seção 3.2.4. Esse ajuste é utilizado para determinar o fator de envelhecimento de cada um dos concretos produzidos, os quais são apresentados na Tabela 4.2, em conjunto com o coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

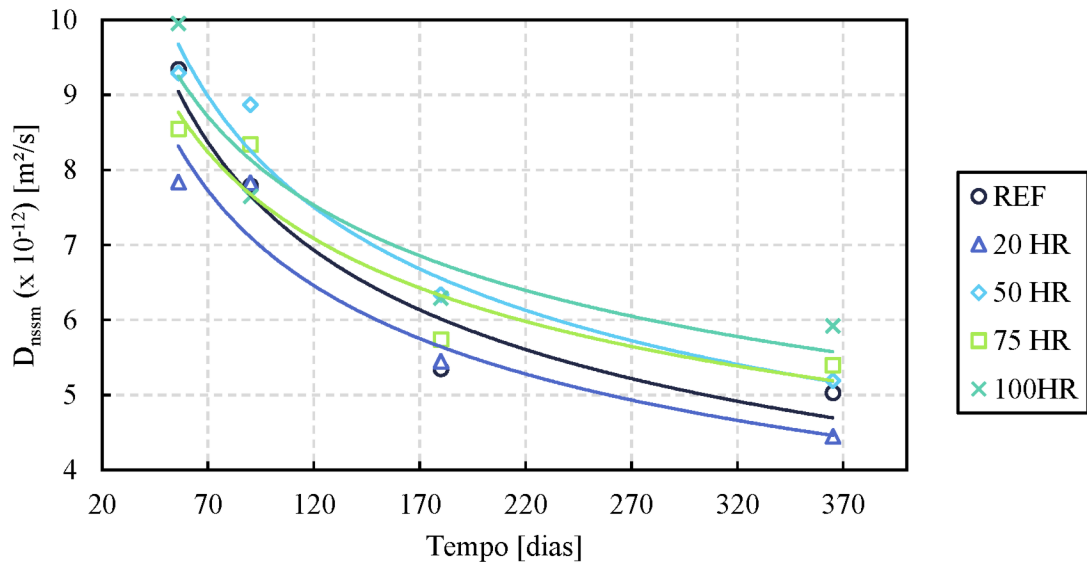


Figura 4.6: Variação da difusividade do concreto ao longo do tempo.

| Traço | $\alpha$ | $R^2$  |
|-------|----------|--------|
| REF   | 0,350    | 0,9509 |
| 20 HR | 0,332    | 0,9110 |
| 50 HR | 0,334    | 0,9519 |
| 75 HR | 0,280    | 0,8958 |
| 100HR | 0,270    | 0,8990 |

Tabela 4.2: Fator de envelhecimento dos concretos.

Dessa forma, os valores relativamente baixos dos fatores de envelhecimento, observados na Tabela 4.2, estão associados, principalmente, ao tipo de cimento utilizado nos concretos e à idade em que foram realizadas as primeiras análises de difusividade de cloretos, aos 56 dias. Nesse estágio, se espera que uma parcela significativa das reações de hidratação do cimento já tenha se desenvolvido.

#### 4.5. Coeficiente de difusão de cloretos nos estados estacionário e não estacionário

A Figura 4.7 mostra a evolução da concentração de cloretos na célula anódica ao longo do tempo. A Tabela 4.3 apresenta os valores de *time-lag*, fluxo de íons, coeficiente de difusão em estado estacionário e não estacionário dos concretos produzidos.

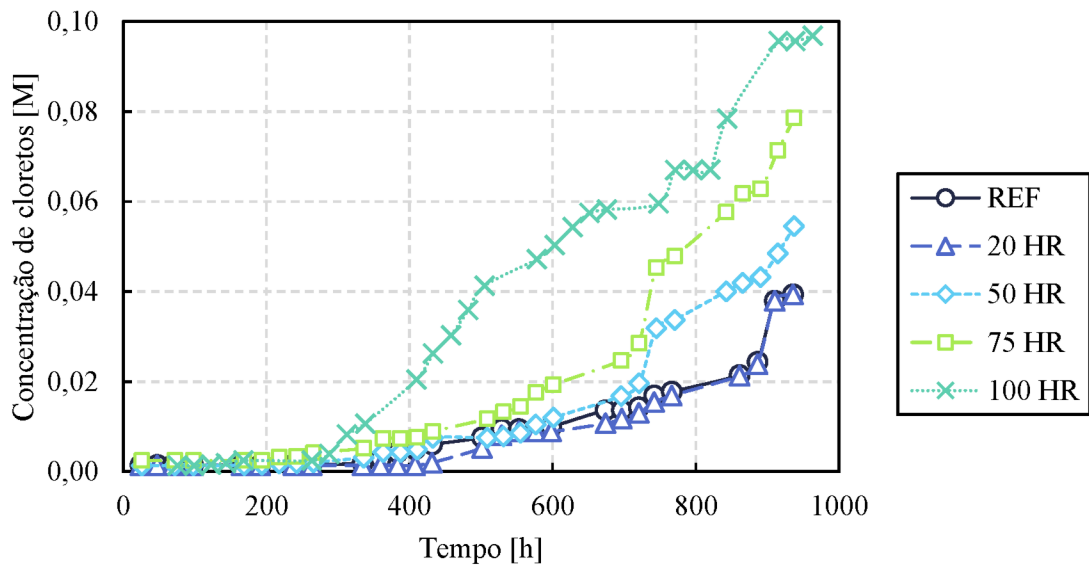


Figura 4.7: Curvas de concentração no tempo.

| Traço  | <i>Time-lag</i><br>[h] | Fluxo de íons<br>[ $10^{-6} \times \text{mol}/(\text{m}^2 \times \text{s})$ ] | $D_s$<br>[ $10^{-12} \times \text{m}^2/\text{s}$ ] | $D_{ns}$<br>[ $10^{-12} \times \text{m}^2/\text{s}$ ] |
|--------|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| REF    | 300                    | 2,16                                                                          | 0,41                                               | 2,63                                                  |
| 20 HR  | 375                    | 2,49                                                                          | 0,47                                               | 2,10                                                  |
| 50 HR  | 250                    | 1,97                                                                          | 0,37                                               | 3,16                                                  |
| 75 HR  | 200                    | 2,51                                                                          | 0,47                                               | 3,94                                                  |
| 100 HR | 250                    | 7,51                                                                          | 1,41                                               | 3,16                                                  |

Tabela 4.3: Coeficiente de difusão aos 91 dias.

Observa-se na Figura 4.7 que quanto maior o teor de substituição, maior a concentração final de cloretos ao final do ensaio. Embora as curvas não expressem diretamente os coeficientes de difusão no estado estacionário e não estacionário, a análise da evolução da concentração de cloretos permite inferir comparativamente sobre a resistência dos concretos à penetração de íons. Nesse caso, quanto mais atenuada for a curva, maior será a dificuldade imposta pelo concreto à passagem dos íons cloretos (Sell Junior *et al.*, 2021). A Figura 4.8 mostra a evolução da concentração de cada traço.

Com base nos dados apresentados na Tabela 4.3, observa-se que os concretos não apresentaram comportamentos uniformes. Em relação ao fluxo de íons cloretos, observa-se que o traço com 50% de substituição apresentou um fluxo menor que o concreto de referência, indicando um desempenho ligeiramente superior. Os traços com 20% e 75% de substituição tiveram um fluxo ligeiramente maior, indicando um desempenho ligeiramente inferior. O traço com 100% de substituição apresentou o pior desempenho, com um fluxo mais de 3 vezes superior ao do concreto de referência.

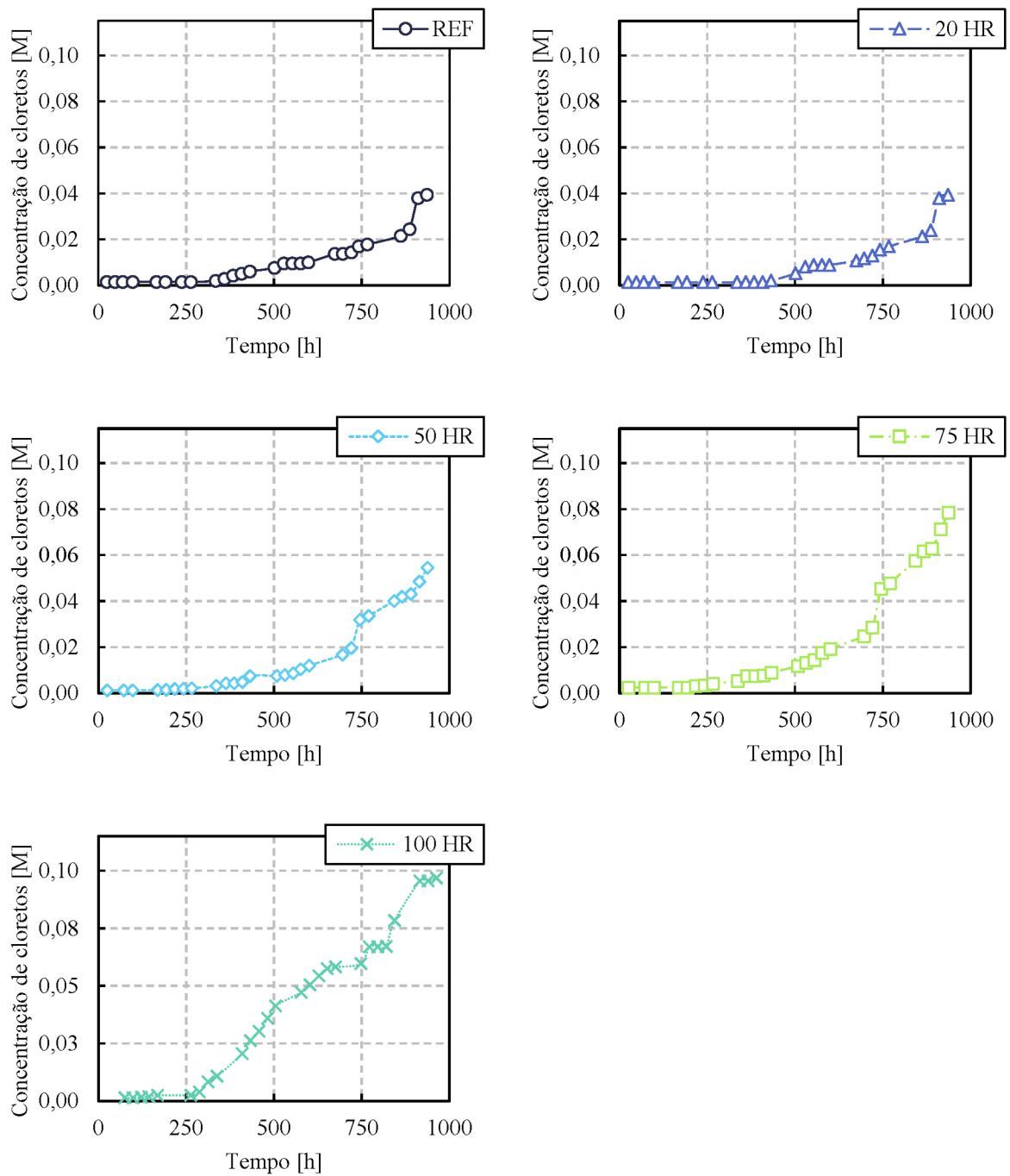


Figura 4.8: Evolução da concentração de cloreto na célula anódica para cada traço.

O coeficiente de difusão de cloretos no estado estacionário ( $D_s$ ) seguiu a mesma tendência do fluxo de íons cloretos. O traço 50 HR foi o único que apresentou desempenho superior ao concreto de referência, apresentando o menor  $D_s$ . Os traços 20 HR e 75 HR apresentaram valores idênticos para  $D_s$ , ligeiramente superiores ao traço REF, indicando um desempenho ligeiramente inferior. No entanto, o traço 100 HR mostrou o pior desempenho, com um coeficiente 3,4 vezes maior que o traço REF.

Um comportamento distinto foi observado nos resultados do coeficiente de difusão de cloretos no estado não estacionário ( $D_{ns}$ ). O traço 20 HR foi o único que apresentou um coeficiente

menor que o traço REF, indicando o melhor desempenho nessa avaliação. Todos os outros traços (50 HR, 75 HR e 100 HR) apresentaram valores de  $D_{ns}$  superiores ao traço REF, indicando um pior desempenho.

Os resultados indicam que a substituição total dos agregados naturais pode comprometer significativamente o desempenho do concreto, enquanto teores intermediários parecem apresentar um desempenho comparável ou até superior ao concreto produzido somente com agregados naturais, dependendo do parâmetro avaliado.

#### 4.6. Avaliação dos métodos de ensaio para determinação do coeficiente de difusão de cloretos

Os resultados obtidos para o coeficiente de difusão de cloretos aos 91 dias, determinados conforme as metodologias estabelecidas nas normas NT Build 492 (NORDTEST, 1999) e UNE 83987 (AENOR, 2012) são apresentados na Figura 4.9.

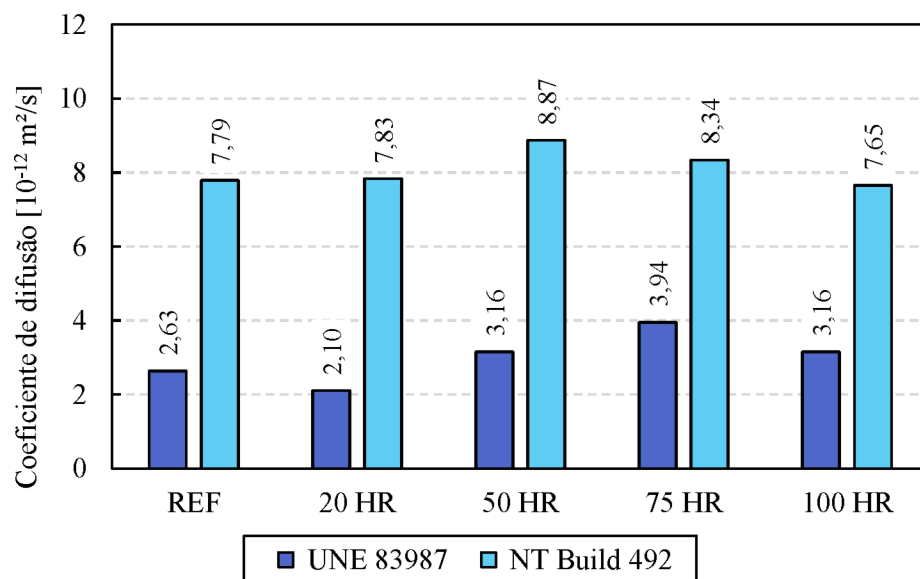


Figura 4.9: Avaliação dos métodos de ensaio para determinar o coeficiente de difusão de cloretos.

Com base nos dados apresentados na Figura 4.9, observa-se que existe uma discrepância significativa entre os valores obtidos pelas duas metodologias para todos os traços avaliados. Os resultados obtidos conforme a NT Build 492 (NORDTEST, 1999) são entre 2,1 e 3,7 vezes maiores que os da UNE 83987 (AENOR, 2012), dependendo do traço avaliado. Resultados similares foram observados por Sell Junior (2020), que relatou coeficientes superiores através da NT Build 492, variando conforme a composição do traço avaliado.

Além dessa diferença, as duas metodologias mostram tendências de comportamento diferentes em relação ao teor de substituição dos agregados. Pela norma UNE 83987 o melhor desempenho foi obtido pelo traço 20 HR, enquanto o pior desempenho foi o do traço 75 HR. Pela norma NT Build 492, o melhor desempenho foi obtido pelo traço 100 HR, enquanto o pior desempenho foi o do traço 50 HR.

Dessa forma, a escolha da metodologia de ensaio não influencia apenas a magnitude dos resultados, mas também a própria avaliação do desempenho entre os diferentes traços de concreto.

Como apresentado, um concreto pode ser considerado o de melhor desempenho por um método e ter desempenho intermediário em outro, o que demonstra a importância de entender qual método está sendo utilizado para avaliar o desempenho do concreto.

Como destacado por Sell Junior *et al.* (2021), a discrepância entre os resultados provenientes de diferentes metodologias de avaliação da difusividade é um aspecto a ser considerado. A consideração de valores muito baixos de difusividade pode levar os projetistas a superestimar a durabilidade do concreto, resultando em decisões técnicas que reduzem exigências quanto a outros parâmetros fundamentais, como a profundidade da camada de cobrimento. Tal abordagem pode comprometer o desempenho e a vida útil da estrutura ao longo do tempo.

## 4.7. Resistividade elétrica

### 4.7.1. Resistividade elétrica volumétrica

Os resultados dos ensaios de resistividade elétrica volumétrica, realizados aos 182 dias, são apresentados na Figura 4.10.

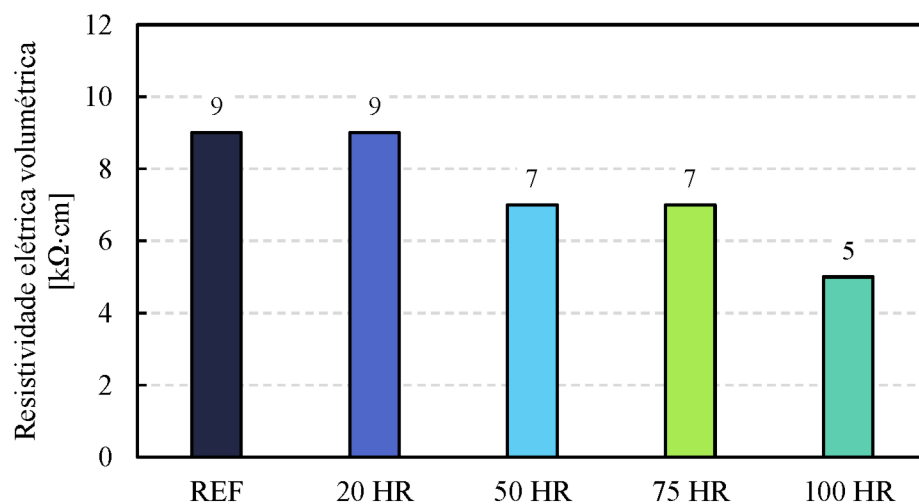


Figura 4.10: Resistividade elétrica volumétrica.

Com base nos dados apresentados na Figura 4.10, observa-se que a influência do teor de substituição na resistividade elétrica volumétrica não foi linear. Uma substituição baixa (20%) resultou em um desempenho idêntico ao do traço de referência. Contudo, teores de substituição iguais ou superiores a 50% causaram uma redução significativa na resistividade elétrica do concreto. Os traços 50 HR, 75 HR e 100 HR apresentaram reduções de cerca de 22%, 22% e 44%, respectivamente, indicando um aumento no risco de corrosão.

#### 4.7.2. Resistividade elétrica superficial

Os resultados dos ensaios de resistividade elétrica superficial, realizados aos 182 dias, são apresentados na Tabela 4.4. Os valores de resistividade foram obtidos a partir da média de oito medições realizadas em cada corpo de prova, sendo utilizados dois corpos de prova por traço. A classificação quanto à suscetibilidade à penetração de íons cloreto foi realizada conforme os critérios estabelecidos na Tabela 3.7, com base na norma AASHTO T 358 (AASHTO, 2015).

| Traço  | Resistividade elétrica superficial<br>[kΩ×cm] | Penetração de íons cloretos<br>(ver Tabela 3.7) |
|--------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| REF    | 14,5                                          | Moderada                                        |
| 20 HR  | 11,4                                          | Alta                                            |
| 50 HR  | 10,6                                          | Alta                                            |
| 75 HR  | 11,1                                          | Alta                                            |
| 100 HR | 9,3                                           | Alta                                            |

Tabela 4.4: Resistividade elétrica superficial.

Com base nos dados apresentados na Tabela 4.4, observa-se, de forma similar aos resultados observados no ensaio de resistividade elétrica volumétrica, que a influência do teor de substituição na resistividade elétrica superficial não foi linear. O traço REF apresentou o melhor desempenho e o traço com 100% de substituição (100 HR) o pior. Os traços com agregados reciclados – 20 HR, 50 HR, 75 HR e 100 HR, apresentaram reduções de cerca de 22%, 27%, 24% e 36%, respectivamente.

Tal comportamento também foi relatado por Nanya *et al.* (2021) e Singh e Singh (2016). Ressalta-se que todos os traços apresentaram valores abaixo do limite de 21 kΩ×cm (ver Tabela 3.7), o que indica um maior risco de despassivação devido à penetração de íons cloretos.

#### 4.8. Correlação entre resistividade elétrica superficial e volumétrica

A Figura 4.11 apresenta a correlação entre os resultados de resistividade elétrica superficial e volumétrica, obtidos aos 182 dias, para cada um dos traços analisados. É importante destacar que diversos estudos na literatura têm reportado coeficientes de determinação  $R^2$  mais elevados, indicando uma correlação linear mais significativa entre essas mesmas variáveis. Cabe destacar que os valores dos coeficientes de determinação podem variar conforme a idade do concreto no momento da medição da resistividade. Ghosh e Tran (2015), por exemplo, relataram coeficientes de determinação variando entre 0,57 a 0,82 para diferentes idades do concreto: 7, 14, 28, 56, 91 e 161 dias.

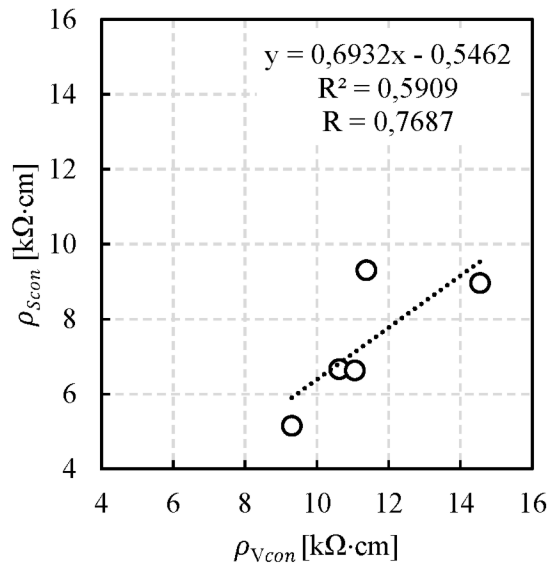


Figura 4.11: Correlação entre resistividade elétrica superficial e volumétrica.

#### 4.9. Correlação entre resistividade elétrica e o coeficiente de migração de cloretos no estado não estacionário

A Figura 4.12 apresenta a correlação entre os resultados de resistividade elétrica superficial e coeficiente de migração de cloretos no estado não estacionário. Como esperado, quanto maior a resistividade elétrica, menor o coeficiente de migração de cloretos. Em diversos estudos, os resultados obtidos mostram que há uma boa correlação entre os dois parâmetros. Resultados similares de  $R^2$  foram relatados por Aragão (2024), ao comparar resultados de resistividade elétrica superficial e coeficiente de migração de cloretos, obtidos com os mesmos métodos deste trabalho e em concretos com 180 dias de idade.

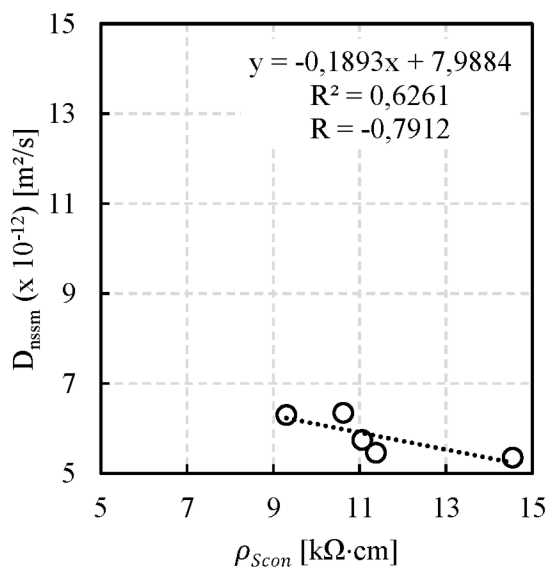


Figura 4.12: Correlação entre resistividade elétrica superficial e coeficiente de migração de cloretos.

A Figura 4.13 apresenta a correlação entre os resultados de resistividade elétrica volumétrica e coeficiente de migração de cloretos no estado não estacionário. Resultados similares de R foram relatados por Sengul (2014), ao comparar resultados de resistividade elétrica volumétrica e coeficiente de migração de cloretos, obtidos em diversas idades e traços de concreto.

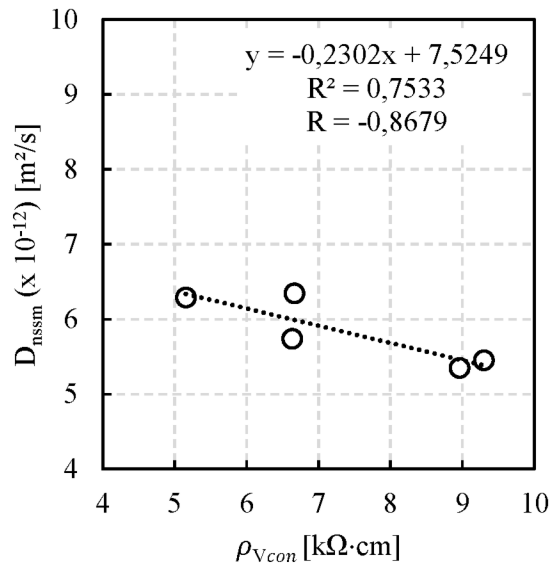


Figura 4.13: Correlação entre resistividade elétrica volumétrica e coeficiente de migração de cloretos.

#### 4.10. Análises probabilísticas

Nessa seção são apresentados os resultados obtidos a partir das simulações realizadas com os softwares Duracon e *Life-365*, bem como com o programa desenvolvido em linguagem *Python* para aplicação do modelo *fib* (2006). A evolução da probabilidade de falha acumulada,  $p_f$  [%], é representada graficamente para cada traço e modelo considerado. Os resultados obtidos são analisados de forma comparativa, com ênfase nas estimativas de vida útil. Por fim, são apresentados os gráficos da evolução da probabilidade de falha acumulada para cada traço individualmente, considerando os três modelos utilizados, com o objetivo de avaliar integralmente os resultados obtidos.

##### 4.10.1. Modelo Duracon

Os resultados obtidos a partir das simulações realizadas com o software Duracon são apresentados na Figura 4.14. A verificação do software é apresentada no Apêndice A. Ressalta-se que, nas análises probabilísticas, foi adotada uma probabilidade de falha igual a 10% como critério limite para a estimativa da vida útil das estruturas.

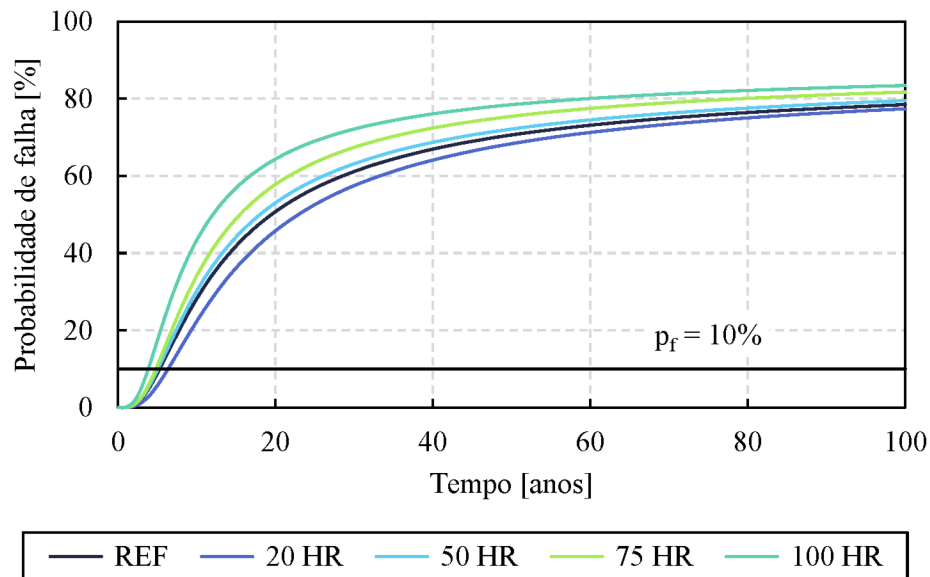


Figura 4.14: Probabilidade de falha calculada com base no modelo Duracon.

Com base nos dados apresentados na Figura 4.14, verifica-se que não houve variações significativas nas estimativas de vida útil entre os diferentes traços avaliados. Embora tenha sido observada uma redução no tempo estimado até a despassivação das armaduras nos concretos produzidos com maiores teores de substituição de agregados naturais por reciclados (50%, 75% e 100%) – atribuída ao aumento dos coeficientes de migração de cloretos, o comportamento geral permaneceu semelhante ao obtido para o concreto de referência. Aos 100 anos, a probabilidade de falha calculada para todos os traços situa-se entre 77% e 83%.

Esse comportamento pode estar relacionado à origem dos agregados reciclados utilizados, provenientes da demolição de elementos de concreto pré-moldado, geralmente produzidos com materiais de qualidade superior e com controle de qualidade mais rigoroso, o que pode ter contribuído para um desempenho comparável ao do concreto de referência.

Destaca-se que, apesar de as diferenças entre os traços não se evidenciarem claramente nos resultados gerados pelo modelo Duracon, a composição do concreto exerce influência significativa nas estimativas de vida útil. Os traços estudados foram produzidos sem quaisquer adições minerais, excetuando-se as pequenas adições presentes no cimento Portland, para melhoria de suas propriedades físicas e mecânicas.

Outro aspecto relevante para a interpretação dos resultados diz respeito à definição dos parâmetros de entrada nas análises probabilísticas. Como apontado por Ferreira (2004), a agressividade ambiental, representada pela concentração superficial de cloretos ( $C_s$ ), apresenta alta variabilidade e depende, entre outros fatores, da localização da estrutura e de sua orientação em relação aos ventos e chuvas predominantes. Essa variabilidade pode ser significativa mesmo em diferentes pontos de um mesmo elemento estrutural.

Ainda segundo Ferreira (2004), a determinação da concentração superficial de cloretos pode ser aprimorada pela medição em estruturas próximas e pela aplicação de expressões empíricas disponíveis na literatura, sendo possível adotar um coeficiente de variação em torno de 10% quando não houver medições diretas. No presente estudo, entretanto, foi utilizado um coeficiente de variação de

45% para a  $C_s$ , valor relativamente elevado, o que contribui para a redução das estimativas de vida útil obtidas.

A forte influência do coeficiente de variação da  $C_s$  na estimativa da concentração de cloretos no interior do concreto foi destacada por Wally *et al.* (2022). Desse modo, a combinação entre o elevado coeficiente de variação adotado para  $C_s$  e a ausência de adições minerais nos traços avaliados pode justificar, em grande parte, as estimativas reduzidas de vida útil obtidas nas simulações.

#### 4.10.2. Modelo *fib* (2006)

Os resultados obtidos a partir das simulações realizadas com o programa desenvolvido em linguagem Python para aplicação do modelo *fib* (2006), são apresentados na Figura 4.15. A verificação do programa é apresentada no Apêndice A.

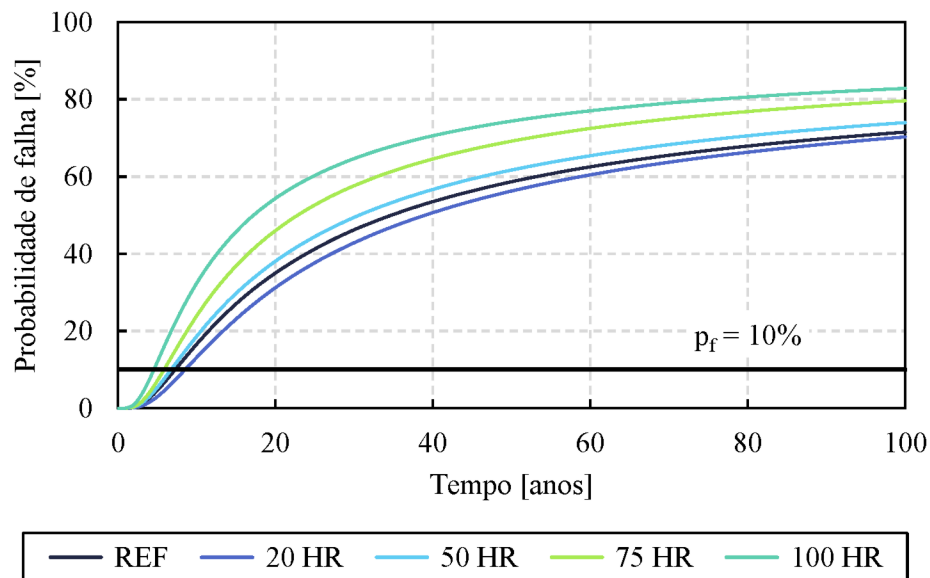


Figura 4.15: Probabilidade de falha calculada com base no modelo *fib* (2006).

Conforme ilustrado na Figura 4.15, observa-se que, assim como no modelo Duracon, a substituição de agregado natural por reciclado não resultou em variações significativas nas estimativas de vida útil para os traços de concreto analisados. Aos 100 anos, a probabilidade de falha calculada para todos os traços situa-se entre 70% e 83%, bastante próxima à obtida pelo modelo Duracon.

No entanto, os resultados evidenciam uma distinção quantitativa entre os modelos. A dispersão das estimativas de vida útil em relação ao concreto de referência foi ligeiramente superior no modelo *fib*. Para este modelo, a variação absoluta da vida útil apresentada pelos traços foi de 1,48 anos, enquanto no modelo Duracon foi de 0,81 anos. Desse modo, os resultados sugerem que o modelo *fib* demonstra uma sensibilidade um pouco maior à incorporação dos agregados reciclados sob as condições de contorno estabelecidas.

#### 4.10.3. Modelo *Life-365*

Os resultados obtidos a partir das simulações realizadas com o software *Life-365* são apresentados na Figura 4.16. A verificação do software é apresentada no Apêndice A.

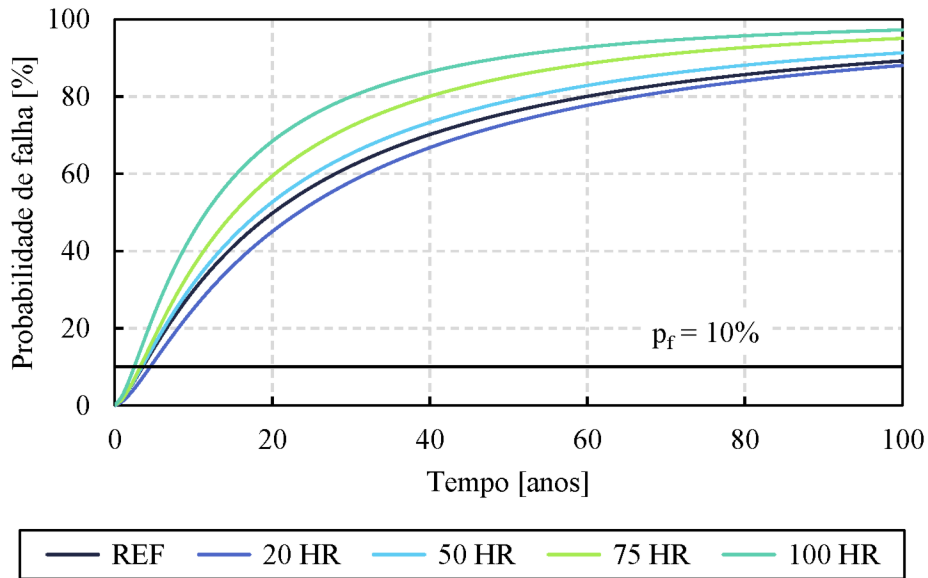


Figura 4.16: Probabilidade de falha calculada com base no modelo *Life-365*.

As simulações realizadas com o software *Life-365*, cujos resultados são apresentados na Figura 4.16, revelam um comportamento distinto dos modelos previamente analisados. Observa-se que, de modo geral, as estimativas de vida útil para todos os traços foram inferiores às apresentadas pelos modelos *Duracon* e *fib*. Aos 100 anos, a probabilidade de falha calculada para todos os traços situa-se entre 88% e 92%.

O software *Life-365* realiza a análise dos parâmetros de entrada utilizados para determinar o período de iniciação da corrosão, determinando a contribuição relativa de cada parâmetro para a incerteza associada aos resultados. A Figura 4.17 apresenta a distribuição dessas contribuições para os concretos produzidos. Observa-se que a variável com maior influência, considerando a média de todos os traços, é a concentração superficial ( $C_s$ ), responsável por cerca de 75% da contribuição. Em seguida, destacam-se a concentração crítica de cloretos ( $C_{cr}$ ), com 11% e o fator de envelhecimento do concreto ( $\alpha$ ), com cerca de 10,0%. A espessura de cobrimento ( $x_c$ ) e coeficiente de difusão ( $D_{ref}$ ) apresentaram contribuições menores, de aproximadamente 4% e 1%, respectivamente.

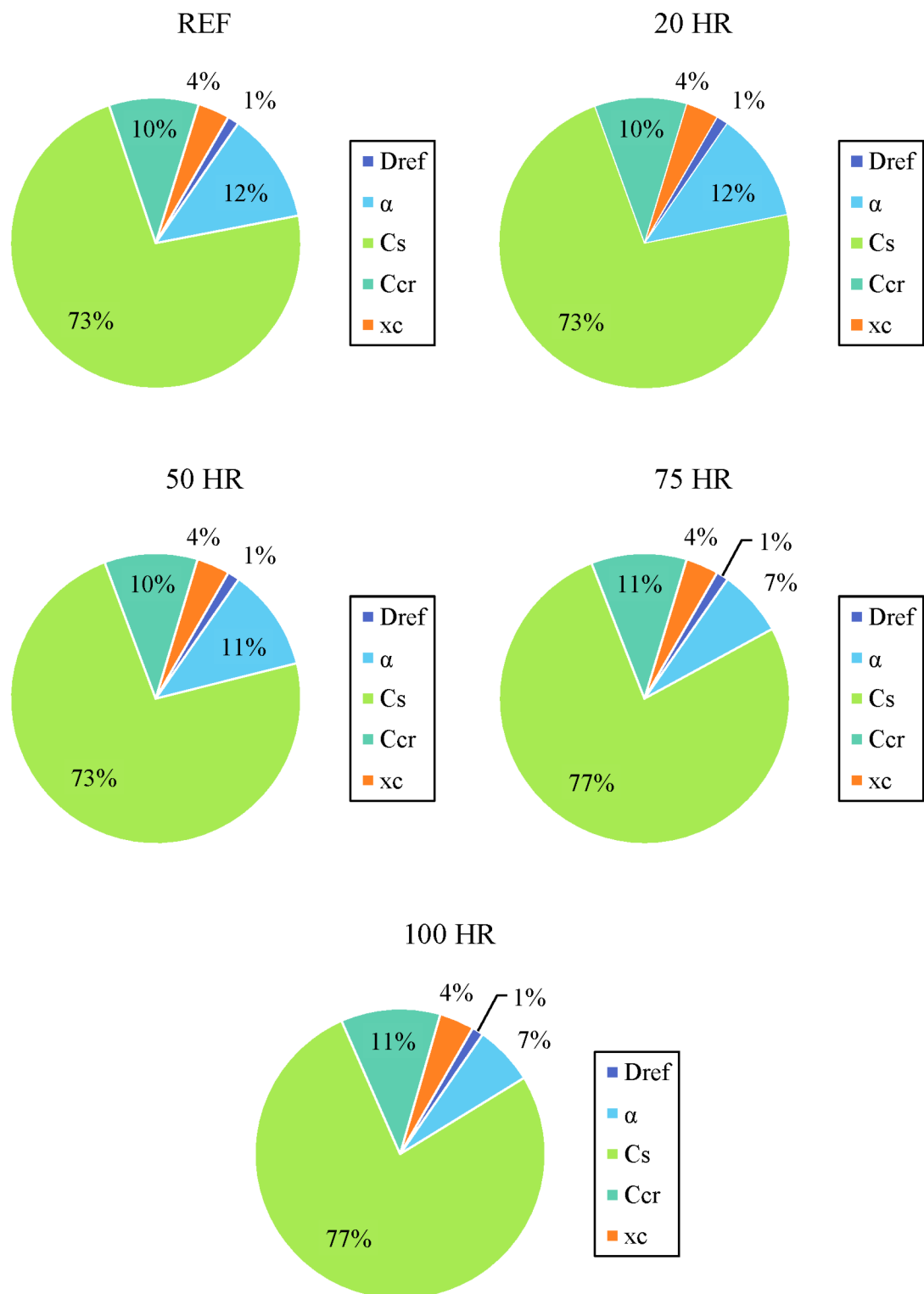


Figura 4.17: Incerteza associada.

#### 4.10.4. Estimativa de vida útil

Os resultados da estimativa de vida útil, obtidos por meio da análise probabilística com base nos modelos Duracon, *Life-365* e *fib* (2006), são apresentados na Figura 4.18. A evolução temporal da probabilidade de falha para os diferentes traços de concreto estudados é apresentada na Figura 4.19.

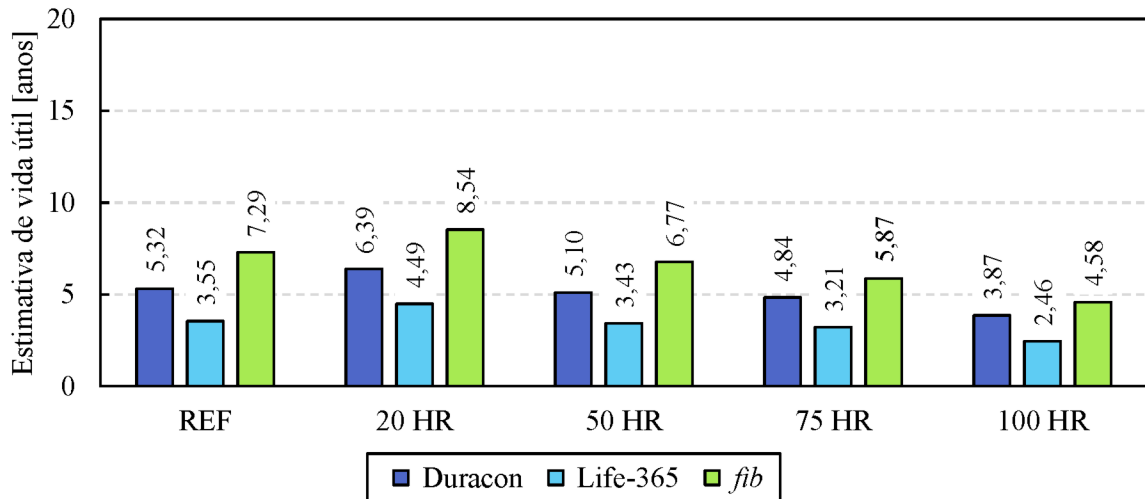


Figura 4.18: Vida útil estimada (em anos) para os diferentes traços de concreto, segundo os modelos Duracon, *Life-365* e *fib* (2006).

Com base nos dados apresentados na Figura 4.18, observa-se que o modelo *Life-365* apresenta as menores estimativas de vida útil, para todos os traços analisados, enquanto o modelo *fib* fornece as maiores estimativas. O modelo Duracon, por sua vez, apresenta valores intermediários, mais próximos aos obtidos pelo modelo *fib*.

Nota-se ainda que o modelo *fib* apresenta variações mais acentuadas entre os traços, sugerindo uma maior sensibilidade às mudanças nas propriedades do concreto. Em contrapartida, os modelos Duracon e *Life-365* mantêm uma tendência mais constante e conservadora, com menor variação nas estimativas conforme as modificações nos traços. A maior sensibilidade do modelo *fib* pode estar associada a utilização de distribuições de probabilidade mais complexas, como a distribuição beta para a concentração crítica e fator de envelhecimento do concreto e a distribuição lognormal para a concentração superficial de cloretos.

Considerando as estimativas de vida útil, os resultados sugerem que substituições de até 20% do agregado natural por agregado reciclado podem ser vantajosas do ponto de vista da durabilidade, enquanto teores superiores podem comprometer o desempenho, sendo necessário uma avaliação mais aprofundada para aplicação segura em estruturas de concreto armado submetidas a ambientes marinhos.

É importante salientar que as ligeiras diferenças observadas entre os modelos analisados podem ser atribuídas às premissas adotadas por cada metodologia, bem como à forma como os parâmetros de entrada são interpretados e incorporados nas análises. De acordo com Ehlen (2020), as abordagens empregadas pelos distintos modelos disponíveis variam consideravelmente, o que pode resultar em variações significativas nas respectivas soluções produzidas.

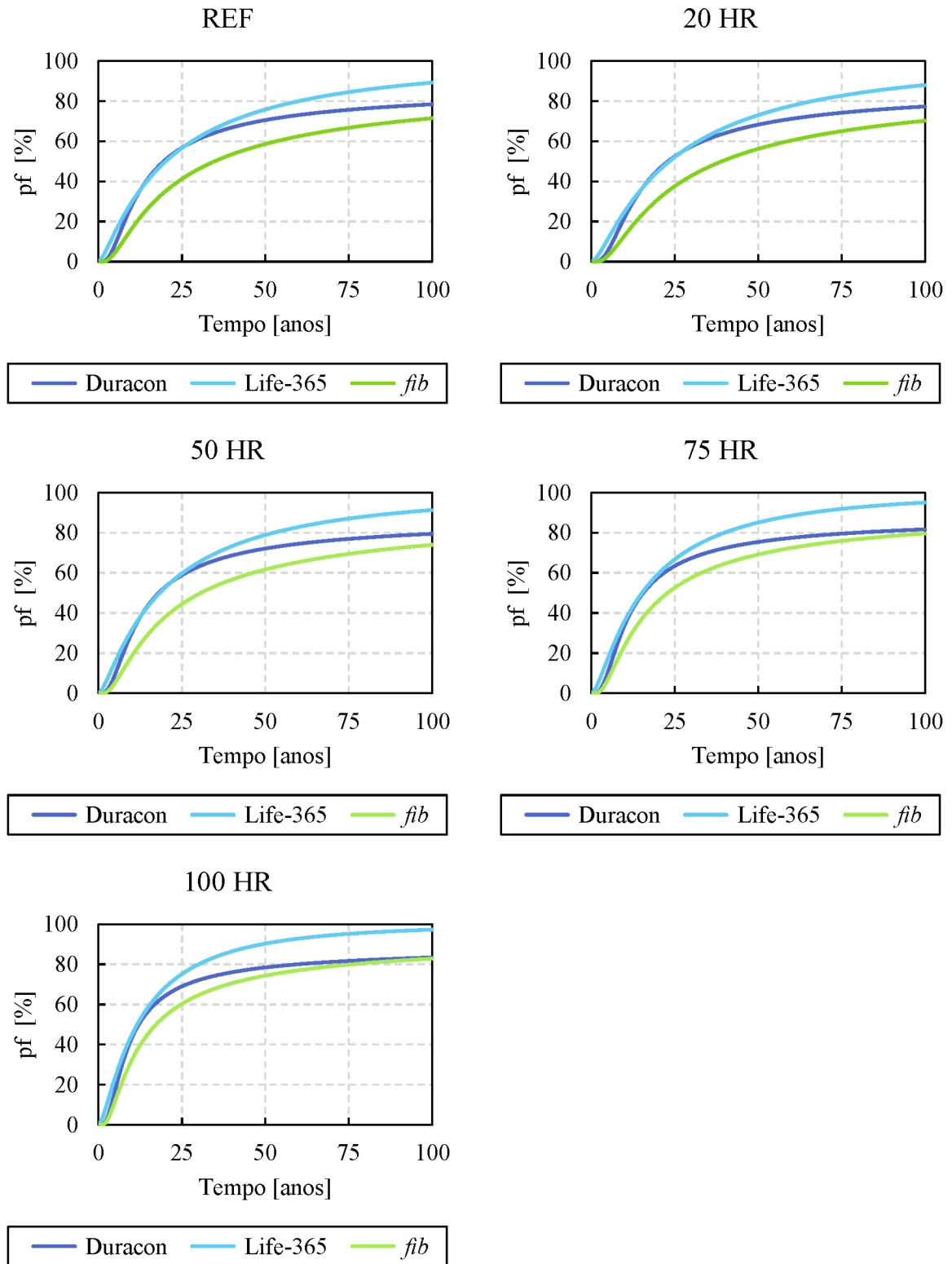


Figura 4.19:  $p_f$  calculada com base nos modelos Duracon, *fib* (2006) e *Life-365*.

Conforme discutido por Gjrrv (2014), as estimativas de vida útil não devem ser interpretadas como o período real de serviço da estrutura. No entanto, esses resultados podem servir de base para comparar alternativas técnicas e selecionar soluções mais adequadas, considerando o desempenho esperado da estrutura frente ao ambiente e a vida útil requerida.

Dessa forma, a escolha do modelo a ser adotado no projeto de durabilidade deve ser feita de maneira criteriosa, avaliando os riscos associados tanto a modelos muito otimistas, que podem superestimar o desempenho da estrutura em serviço – resultando em necessidades de intervenções prematuras, como a modelos conservadores, que podem acarretar em custos mais elevados para a construção das estruturas.

Para ambientes agressivos, como os ambientes marinhos, a definição mais precisa possível dos parâmetros de entrada nos modelos de degradação é essencial para garantir estimativas de vida útil confiáveis. Em síntese, os resultados obtidos evidenciam que as estimativas de vida útil são significativamente influenciadas pela escolha do modelo de penetração de íons cloretos, e, principalmente, pelos cenários de exposição considerados.

Por fim, destaca-se que os concretos deste estudo foram produzidos sem adições minerais suplementares, restringindo-se àquelas já presentes no cimento Portland utilizado. A incorporação desses materiais tenderia a refinar a microestrutura do concreto, reduzindo os coeficientes de difusão de íons cloretos e, conseqüentemente, elevando as estimativas de vida útil. Da mesma forma, não foram consideradas estratégias adicionais de proteção, como inibidores ou armaduras resistentes à corrosão. Tal delimitação justifica-se pelo objetivo do programa experimental, focado na determinação do coeficiente de difusão e fator de envelhecimento dos concretos. Outro aspecto relevante nas análises probabilísticas refere-se ao coeficiente de variação adotado para a concentração superficial de cloretos. Ressalta-se que a incerteza associada a esse parâmetro poderia ser reduzida mediante a realização de ensaios de campo para uma caracterização mais precisa.

## 5. Conclusões

Conclui-se que a incorporação de ARCO impacta o desempenho do material, elevando a absorção de água, acelerando a difusividade de íons cloretos, reduzindo a resistividade elétrica e as estimativas de vida útil, efeitos que se tornam mais pronunciados em teores de substituição superiores a 20%. Este resultado indica que, apesar dos conhecidos benefícios ambientais, sociais e econômicos, a aplicação de ARCO em concretos estruturais expostos a ambientes agressivos exige uma avaliação criteriosa para não comprometer a durabilidade e a vida útil projetada.

Cabe ressaltar que o agregado graúdo natural utilizado na produção dos concretos deste estudo apresenta qualidade inferior à do agregado natural de origem, presente na composição dos ARCO. Essa diferença qualitativa pode justificar o desempenho equivalente ou superior observado no traço com 20% de substituição (20 HR), uma vez que a introdução de um agregado reciclado contendo rocha de melhor qualidade compensou eventuais fragilidades na microestrutura do concreto.

Diante desses resultados, o estudo reforça a importância da adoção de abordagens de projeto baseadas no desempenho como ferramenta complementar às exigências prescritivas. A integração de indicadores de durabilidade com modelos probabilísticos de vida útil mostra-se, portanto, um caminho essencial não apenas para garantir a segurança de estruturas com materiais reciclados, mas também para fornecer os subsídios técnicos necessários à futura evolução das normas de projeto.

### 5.1. Principais conclusões

Com base nos resultados obtidos a partir do programa experimental e das análises probabilísticas realizadas em concretos com substituições parciais e totais (20%, 50%, 75% e 100%) do agregado natural por ARCO, destacam-se as seguintes conclusões:

- 1) Em relação às propriedades mecânicas, avaliadas por meio dos ensaios de resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral, observou-se que os concretos produzidos com ARCO apresentaram desempenho semelhante ao do concreto de referência. A relação entre ambas as resistências permaneceu dentro da faixa considerada típica para concretos convencionais. De modo geral, os resultados evidenciam o potencial do uso de ARCO como alternativa viável aos agregados naturais, considerando apenas o desempenho mecânico.
- 2) Os resultados dos ensaios de absorção de água por capilaridade evidenciaram o impacto significativo da substituição total dos agregados naturais por ARCO nessa propriedade. Os resultados indicam que, para baixos teores de substituição (20%), o impacto sobre a absorção capilar pode ser considerado reduzido e aceitável sob o ponto de vista da durabilidade, dependendo das condições de exposição da estrutura.
- 3) Em relação aos coeficientes de migração de íons cloretos, e considerando o nível de precisão dos ensaios realizados, os concretos produzidos com ARCO apresentaram desempenho semelhante ao do concreto de referência.
- 4) A avaliação da resistividade elétrica apresentou resultados distintos entre as metodologias, mas com uma tendência geral de piora do desempenho com o aumento da substituição. No

ensaio de resistividade elétrica superficial, todos os traços com ARCO apresentaram desempenho inferior ao concreto de referência. No ensaio de resistividade elétrica volumétrica, o traço com 20% de substituição apresentou desempenho idêntico ao concreto de referência.

- 5) Em relação à análise probabilística da vida útil, os resultados indicam que a substituição de até 20% do agregado graúdo natural por ARCO pode ser uma alternativa viável para garantir o desempenho adequado de estruturas de concreto armado expostas ao ambiente marinho. No entanto, teores superiores a este podem comprometer a durabilidade, exigindo avaliações mais aprofundadas para aplicação segura. As diferenças observadas entre os modelos ressaltam a importância de uma escolha criteriosa, considerando os riscos associados a modelos muito otimistas ou conservadores. Nesse sentido, é fundamental a definição mais precisa possível dos parâmetros de entrada nos modelos, especialmente em ambientes agressivos, para obtenção de maior confiabilidade nas estimativas geradas. Destaca-se que essas estimativas não representam a vida útil real da estrutura, mas servem como uma ferramenta valiosa para comparar alternativas técnicas, selecionar soluções adequadas e planejar as manutenções necessárias nas estruturas.
- 6) Os resultados obtidos neste estudo evidenciam as limitações das abordagens de projeto puramente prescritivas para concretos produzidos com ARCO. Além disso, demonstram que a adoção de uma abordagem de desempenho probabilística constitui um caminho mais realista e confiável para garantir o desempenho adequado de estruturas de concreto armado expostas ao ambiente marinho.
- 7) Atualmente, o desempenho relacionado à durabilidade de estruturas de concreto armado produzidas com agregados reciclados ainda não é plenamente compreendido. Nesse contexto, evidencia-se a necessidade de novos programas experimentais que subsidiem o desenvolvimento de novas normas técnicas. Tais diretrizes devem contemplar metodologias de dosagem que considerem a heterogeneidade dos agregados reciclados, a aplicação de pré-tratamentos, a análise de múltiplos ciclos de reciclagem, bem como a incorporação de adições minerais e não minerais na mistura. Essas ações são fundamentais para a consolidação de práticas mais sustentáveis no setor da construção civil.

## 5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Com o objetivo de ampliar os estudos sobre o desempenho e a durabilidade de estruturas de concreto armado produzidas com agregados reciclados de concreto, apresentam-se, a seguir, algumas sugestões para análises futuras:

- a) Realizar a determinação da penetração de íons cloretos em concretos expostos a condições naturais, estabelecendo uma correlação entre os resultados obtidos e aqueles provenientes de ensaios acelerados;
- b) Realizar a análise paramétrica dos modelos de penetração de cloretos;
- c) Produzir concretos com diferentes relações água/cimento, tipos de cimento e adições minerais (como metacaulim, cinza da casca de arroz, sílica ativa, entre outras), visando à obtenção de coeficientes de difusão mais representativos de uma gama ampliada de traços;
- d) Avaliar outros indicadores de durabilidade, como a permeabilidade ao ar;
- e) Realizar estimativas de vida útil considerando faixas distintas de temperatura, diferentes profundidades de cobrimento e níveis variados de agressividade ambiental;

- f) Realizar a estimativa de custos do ciclo de vida de estruturas de concreto armado produzidas com agregados reciclados expostas a cloretos, considerando uma ou mais estratégias para aumentar a sua vida útil;
- g) Avaliar o custo-benefício da utilização de agregados reciclados de concreto em diferentes teores, especialmente em ambientes agressivos.

## Referências

- ABRECON. **Pesquisa setorial ABRECON 2020**: a reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil. São Paulo: ABRECON, 2022.
- ACI COMMITTEE 201. **ACI PRC-201.2-16**: Guide to Durable Concrete. Detroit: American Concrete Institute, 2016.
- AGOPYAN, V. **O desafio da sustentabilidade na construção civil**. São Paulo: Editora Blucher, 2011.
- AGUILAR, J. R.; MENDOZA, D. N. Caracterización del hormigón elaborado con áridos reciclados producto de la demolición de estructuras de hormigón. **Materiales de Construcción**, v. 57, n. 288, p. 5-15, 2007.
- ALEXANDER, M. G. **Marine Concrete Structures**. [S. l.]: Woodhead Publishing, 2016.
- ALEXANDER, M. G. Service life design and modelling of concrete structures – background, developments, and implementation. **Revista ALCONPAT**, v. 8, n. 3, p. 246-260, 2018.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T 259**: standard method of test for resistance of concrete to chloride ion penetration. Washington, DC, 2002.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T 277**: standard method of test for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. Washington, DC, 2023.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T 358**: standard method of test for surface resistivity indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. Washington, DC, 2015.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1202**: standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. West Conshohocken: ASTM International, 2012.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1556**: standard test method for determining the apparent chloride diffusion coefficient of cementitious mixtures by bulk diffusion. West Conshohocken: ASTM International, 2016.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1760**: standard test method for bulk electrical conductivity of hardened concrete. West Conshohocken: ASTM International, 2012.
- ANDRADE, C. Calculation of diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements. **Cement and Concrete Research**, v. 23, n. 3, p. 724-742, maio 1993.
- ANG, A. H. S.; TANG, W. H. **Probability Concepts in Engineering Planning and Design**: Vol. 2: Decision, Risk, and Reliability. New York: John Wiley & Sons, 1984.
- ANG, A. H. S.; TANG, W. H. **Probability Concepts in Engineering**: Emphasis on Applications to Civil and Environmental Engineering. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007.
- ARAGÃO, T. V. **Influência da cinza de fundo como substituto do agregado miúdo em concretos produzidos com e sem metacaulim**: efeitos em propriedades relacionadas à penetração de cloretos. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2024.
- ARAÚJO, J. M. **Curso de Concreto Armado**. 3. ed. Rio Grande: Dunas, 2010.

- ARREDONDO-REA, S. P. et al. Durability Parameters of Reinforced Recycled Aggregate Concrete: Case Study. **Applied Sciences**, v. 9, n. 617, 2019.
- ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN. **UNE 83987**: determinación de los coeficientes de difusión de los iones cloruro en el hormigón endurecido – método multiregimen. Madrid, 2012.
- ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN. **UNE 83988-1**: durabilidad del hormigón: métodos de ensayo: determinación de la resistividad eléctrica: parte 1: método directo (método de referencia). Madrid, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: concreto: procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: concreto e argamassa: determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: agregados para concreto: especificação. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7218**: agregados: determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: concreto e argamassa: determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681**: ações e segurança nas estruturas: procedimento. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9204**: concreto endurecido: determinação da resistividade elétrica-volumétrica: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779**: argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9917**: agregados para concreto: determinação de sais, cloretos e sulfatos solúveis. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10786**: concreto endurecido: determinação do coeficiente de permeabilidade à água. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15116**: agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland: requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**: edificações habitacionais: desempenho. Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: cimento Portland: requisitos. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16916**: agregado miúdo: determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16917**: agregado graúdo: determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17054**: agregados: determinação da composição granulométrica: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 46**: agregados: determinação do material fino que passa através da peneira 75 micrometro, por lavagem. Rio de Janeiro, 2011.
- AZARSA, P.; GUPTA, R. Electrical Resistivity of Concrete for Durability Evaluation: A Review. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2017, maio 2017.
- BAROGHEL-BOUNY, V. et al. Easy assessment of durability indicators for service life prediction or quality control of concretes with high volumes of supplementary cementitious material. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, p. 832-847, 2011.
- BAROGHEL-BOUNY, V.; NGUYEN, T. Q.; DANGLA, P. Assessment and prediction of RC structure service life by means of durability indicators and physical/chemical models. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, p. 522-534, 2009.
- BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção**: Vol. 1. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.
- BECK, A. T. **Confiabilidade e segurança das estruturas**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2019.
- BENTZ, E. C. Probabilistic Modeling of Service Life for Structures Subjected to Chlorides. **ACI Materials Journal**, v. 100, n. 5, set. 2003.
- BERREDJEM, L.; ARABI, N.; MOLEZ, L. Mechanical and durability properties of concrete based on recycled coarse and fine aggregates produced from demolished concrete. **Construction and Building Materials**, v. 246, 118421, 2020.
- BEUSHAUSEN, H.; LUCO, L. F. **Performance-Based Specifications and Control of Concrete Durability**. New York: Springer, 2016.
- BICZÓK, I. **La corrosión del hormigón y su protección**. Bilbao: Urmo Ediciones, 1981.
- BOSSINK, B. A. G.; BROUWERS, H. J. H. Construction Waste: Quantification and Source Evaluation. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 122, n. 1, p. 55-60, mar. 1996.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, n. 136, p. 95-96, 17 jul. 2002.
- BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, n. 147, p. 3, 2 ago. 2010.
- BUI, N. K.; SATOMI, T.; TAKAHASHI, H. Improvement of mechanical properties of recycled aggregate concrete based on a new combination method between recycled aggregate and natural aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 148, p. 376-385, 2017.
- CAMPOS, R. S. et al. Influência dos agregados reciclados nas propriedades reológicas e mecânicas do concreto autoadensável. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 1, p. e-11964, 2018.
- CASCUDO, O. **Vida útil das estruturas de concreto e abordagem baseada no desempenho**. Goiânia: UFG, 2017. Notas de aula.
- CASCUDO, O.; LOPES, R. C.; OLIVEIRA, A. M. Métodos de transporte de cloretos em concreto: uma análise crítica e comparativa. **Concreto & Construções**, São Paulo, n. 108, p. 53-59, out./dez. 2022.
- CASTELLOTE, M.; ANDRADE, C.; ALONSO, C. Measurement of the steady and non-steady-state chloride diffusion coefficients in a migration test by means of monitoring the conductivity

- in the anolyte chamber. Comparison with natural diffusion tests. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 10, p. 1411-1420, 2001.
- CENTRO NACIONAL DE TECNOLOGIAS LIMPAS (CNTL). **Produção mais limpa em edificações**. Porto Alegre: SENAI/RS, 2007.
- COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. Benchmarking of deemed-to-satisfy provisions in standards: Durability of reinforced concrete structures exposed to chlorides. **fib Bulletin**, n. 76, 2015.
- DEIVEEGAN, A.; JAYADURGALAKSHMI, M.; UDHAYA KUMAR, T. Service Life Prediction of Concrete Structure Using Life-365 Software. **Turkish Journal of Computer and Mathematics Education**, v. 12, n. 2, p. 1816-1826, 2021.
- DOTTO, J. M. R. <sup>3</sup>**Ataque por íons de cloreto custa R\$ 800 milhões por ano ao Brasil**. [Entrevista cedida a] Altair Santos. Massa Cinzenta, 1 ago. 2012.
- EHLEN, M. A. **Life-365™ Service Life Prediction Model™ and Computer Program for Predicting the Service Life and Life-Cycle Cost of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides**. 2020.
- ESPANHA. Real Decreto 470/2021, de 29 de junio, por el que se aprueba el Código Estructural. **Boletín Oficial del Estado**, Madrid, n. 190, p. 97664-99452, 10 ago. 2021.
- FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. **Model Code for Service Life Design**. Lausanne: fib, 2006.
- FERREIRA, L.; BRITO, J.; BARRA, M. Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on the mechanical strength and durability of structural concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 42, p. 617-627, 2011.
- FERREIRA, M. R. Optimização da vida útil de estruturas de betão armado. **4ª Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas**, Lisboa, 2006.
- FERREIRA, R. M. **Probability-based durability analysis of concrete structures in marine environment**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Guimarães, 2004.
- FIOL, F. et al. Influence of Recycled Precast Concrete Aggregate on Durability of Concrete's Physical Processes. **Applied Sciences**, v. 10, n. 20, out. 2020.
- GAO, C. et al. Mechanical properties of recycled aggregate concrete modified by nano-particles. **Construction and Building Materials**, v. 241, 2020.
- GARCÍA-ALONSO, M.C. et al. Corrosion behaviour of new stainless steels reinforcing bars embedded in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 10, p. 1463-1471, out. 2007.
- GENTIL, V. **Corrosão**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2022.
- GHOSH, P.; TRAN, Q. Composites Influence of parameters on surface resistivity of concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 62, p. 134–145, 2015.
- GHOSH, P.; TRAN, Q. Correlation between bulk and surface resistivity of concrete. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 9, p. 119–132, 2015.
- GJØRV, O. E. **Durability Design of Concrete Structures in Severe Environments**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2014.
- GJØRV, O. E. Durability of Concrete Structures. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 36, p. 151–172, 2011.

- GOMES, C. L.; POGGIALI, F. S. J. A.; CABRAL, R. Concretos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição e adições minerais: uma análise bibliográfica. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 2, 2019.
- GOMES, M.; DE BRITO, J. Structural concrete with incorporation of coarse recycled concrete and ceramic aggregates: durability performance. **Materials and Structures**, v. 42, p. 663–675, jul. 2009.
- HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993
- HELENE, P. R. L. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. 4. <sup>7</sup>ed. São Paulo: PINI, 1999.
- HELENE, P. R. L. Introdução da durabilidade no projeto das estruturas de concreto. **Ambiente Construído**, São Paulo, v. 1, n. 2, p. 45–57, 1997.
- HUGHES, B. P.; SOLEIT, A. K. O.; BRIERLEY, R. W. New technique for determining the electrical resistivity of concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 37, n. 133, p. 243-248, 1985.
- ICPA. **Diseño racional de mezclas de hormigón - método ICPA**. Buenos Aires: Instituto del Cemento Portland Argentino, [2022].
- IGLECIAS, P. et al. **Proteção ao Meio Ambiente no Brasil: Passado, Presente e Futuro: Estudos em Homenagem a Patrícia Iglecias**. São Paulo: Almedina, 2023.
- INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO (IBRACON). **Procedimento de determinação da resistividade elétrica em corpos de prova e testemunhos de concreto**. São Paulo: IBRACON, 2021.
- INSTITUTO URUGUAYO DE NORMAS TÉCNICAS. **UNIT 20**: cementos pórtland para uso general: definiciones y requisitos. Montevideo: UNIT, 2022.
- INSTITUTO URUGUAYO DE NORMAS TÉCNICAS. **UNIT ISO 1920-3**: ensayos de hormigón: parte 3: elaboración y curado de probetas de ensayo. Montevideo: UNIT, 2019.
- INSTITUTO URUGUAYO DE NORMAS TÉCNICAS. **UNIT ISO 1920-4**: ensayos de hormigón: parte 4: resistencia del hormigón endurecido. Montevideo: UNIT, 2020.
- INSTITUTO URUGUAYO DE NORMAS TÉCNICAS. **UNIT ISO 20290-1**: agregados para hormigón: métodos de ensayo de las propiedades mecánicas y físicas: parte 1. Montevideo: UNIT, 2021.
- INSTITUTO URUGUAYO DE NORMAS TÉCNICAS. **UNIT NM 79**: hormigón: preparación de hormigón en laboratorio. Montevideo: UNIT, 1998.
- INSTITUTO URUGUAYO DE NORMAS TÉCNICAS. **UNIT NM ISO 248**: agregados: determinación de la composición granulométrica. Montevideo: UNIT, 2002.
- JÚNIOR, J. S. K.; FERREIRA, F. G. S.; FILHO, F. M. A. Influência dos agregados reciclados miúdo e graúdo nas propriedades mecânicas do concreto autoadensável. **Revista Principia**, João Pessoa, v. 62, e7684, 2025.
- JÚNIOR, N. S. A. et al. Concrete containing recycled aggregates: Estimated lifetime using chloride migration test. **Construction and Building Materials**, v. 222, p. 108-118, 2019.
- KESSY, J. G. **Durability specifications for structural concrete**: an international comparison. 2013. Dissertation (Master's degree in Civil Engineering) – Faculty of Engineering and the Built Environment, University of Cape Town, Cape Town, 2013.
- KONG, J. S. et al. Reliability Analysis of Chloride Penetration in Saturated Concrete. **Probabilistic Engineering Mechanics**, v. 17, n. 3, p. 305–315, 2002.

- LÓPEZ S. P. Durabilidad del hormigón en ambiente marino. **Cuadernos Intemac**, Madrid, n. 31, 1998.
- LU, L. Optimal Replacement Ratio of Recycled Concrete Aggregate Balancing Mechanical Performance with Sustainability: A Review. **Buildings**, v. 14, n. 7, jul. 2024.
- MAGALHÃES, F. C. **Proposição de um modelo para a penetração de íons cloreto em concreto**: estudo dos parâmetros intervenientes e análise probabilística. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.
- MAHMOOD, W.; KHAN, A. R.; AYUB, T. Mechanical and Durability Properties of Concrete Containing Recycled Concrete Aggregates. **Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering**, v. 46, p. 2111–2130, 2022.
- MARVILA, M. et al. Recycled Aggregate: A Viable Solution for Sustainable Concrete Production. **Materials**, v. 15, n. 15, jul. 2022.
- MCGINNIS, M. J. et al. Quantified sustainability of recycled concrete aggregates. **Magazine of Concrete Research**, v. 69, n. 23, 2017.
- MEDEIROS-JUNIOR, R. A.; LIMA, M. G. Electrical resistivity of unsaturated concrete using different types of cement. **Construction and Building Materials**, v. 107, p. 11–16, 2016.
- MEDEIROS-JUNIOR, R. A. et al. Electrical resistivity of concrete exposed to chlorides and sulfates. **ACI Materials Journal**, v. 116, n. 3, p. 119–130, 2019.
- MEHTA, P. K. Performance of concrete in marine environment. **ACI Publication SP-65**. Detroit: American Concrete Institute, 1980.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. 3. ed. São Paulo: Pini, 2008.
- MELCHERS, R. E.; BECK, A. T. **Structural Reliability Analysis and Prediction**. 3. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2018.
- MENEZES, M. F. S.; SALES, A. T. C. Agregado graúdo reciclado de concreto em substituição ao agregado natural na produção de concreto estrutural. **Encontro Nacional de Aproveitamento de Resíduos na Construção**, 6., p. 185–196, 2019.
- MIRANDA, L. F. R.; ANGULO, S. C.; CARELI, É. D. A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008. **Ambiente Construído**, v. 9, n. 1, p. 57–71, 2009.
- NACE INTERNATIONAL. **IMPACT Report**. Houston: National Association of Corrosion Engineers, 2016.
- NANYA, C. S.; FERREIRA, F. G. S.; CAPUZZO, V. M. S. Mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 26, n. 4, e13073, abr. 2021.
- NEVES, R.; DE BRITO, J. Estimated service life of ordinary and high-performance reinforced recycled aggregate concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 46, e103769, abr. 2022.
- NEVILLE, A. Consideration of durability of concrete structures: Past, present, and future. **Materials and Structures**, v. 34, p. 114–118, 2001.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.
- NEVILLE, A. M. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- NILSSON, L.; NGO, M.H.; GJØRV; O.E. High-Performance Repair Materials for Concrete Structures in the Port of Gothenburg. **Proceedings of the Second International Conference on Concrete under Severe Conditions**. London: E & FN Spon, 1998.

- NOGUEIRA, H. A. T. **Avaliação da confiabilidade de pilares curtos em concreto armado projetados segundo a NBR 6118:2003**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.
- NORDTEST. **NT BUILD 355**: concrete, mortar and cement based repair materials: chloride diffusion coefficient from migration cell experiments. Espoo: Nordtest, 1997.
- NORDTEST. **NT BUILD 443**: concrete, hardened: accelerated chloride penetration. Espoo: Nordtest, 1995.
- NORDTEST. **NT BUILD 492**: concrete, mortar and cement-based repair materials: chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments. Espoo: Nordtest, 1999.
- NORMA ARGENTINA. **IRAM 1871**: hormigón: método de ensayo para la determinación de la capacidad y el coeficiente de succión capilar de agua del hormigón endurecido. Buenos Aires: IRAM, 2021.
- OTSUKI, N.; MIYAZATO, S.; YODSUDJAI, W. Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 15, n. 5, p. 443-451, 2003.
- PAPWORTH, F.; GEHLEN, C. National and international code based deterministic and full probabilistic modelling to describe reliability of various Australasian marine structures. **FIB SYMPOSIUM**, Cape Town, 2016.
- PEREIRA, V. M. **Permeabilidade ao ar do concreto**. Campinas, 2011.
- PIANC. **Duraconme – Quick Userguide**. Belgium: PIANC, 2010.
- PIMENTEL, L. L. et al. Concrete produced with recycled aggregate: a durability analysis for structural use. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 13, n. 6, p. e13613, 2020.
- PINTO, S. A.; MACHADO, S. L.; RIBEIRO, D. V. Correlation between diffusion coefficient values of chloride ions obtained through column and ion migration tests in cementitious matrices with varying contents of silica fume and mortar. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 15, n. 3, p. e15307, 2022.
- PRASITTISOPIN, L. et al. Concrete Mix Design of Recycled Concrete Aggregate (RCA): Analysis of Review Papers, Characteristics, Research Trends, and Underexplored Topics. **Resources**, v. 14, n. 2, fev. 2025.
- REAL, M. V. **Confiabilidade em Engenharia**. Rio Grande: PPGEQ/FURG, 2023. Notas de aula.
- REAL, M. V.; WALLY, G. B.; MAGALHÃES, F. C. A Python program for probabilistic service life assessment of reinforced concrete structures under chloride penetration. **Anais do 64º Congresso Brasileiro do Concreto**. Rio Grande, 2023.
- RIBEIRO, D. V. **Corrosão e degradação em estruturas de concreto**: teoria, controle e técnicas de análise e intervenção. 2. ed. Rio de Janeiro: GEN, 2018.
- RILEM. Draft recommendation for repair strategies for concrete structures damaged by reinforcement corrosion. **Materials and Structures**, v. 27, 1994.
- SAGRILO, L. V. S. **Análise da confiabilidade estrutural utilizando os métodos analíticos FORM e SORM**. 1994. Tese (Doutorado em Engenharia) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1994.
- SALLES, P. V. et al. A importância da segregação do agregado reciclado na resistência e na durabilidade do concreto estrutural. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 21, n. 3, p. 177-196, jul./set. 2021.

- SANTOS, S. A.; DA SILVA, P. R.; DE BRITO, J. Durability evaluation of self-compacting concrete with recycled aggregates from the precast industry. **Magazine of Concrete Research**, v. 71, n. 24, dez. 2019.
- SANTOS, S. A.; DA SILVA, P. R.; DE BRITO, J. Mechanical Performance Evaluation of Self-Compacting Concrete with Fine and Coarse Recycled Aggregates from the Precast Industry. **Materials**, v. 10, n. 8, ago. 2017.
- SELL JUNIOR, F. K. **Análise dos procedimentos de avaliação do potencial de durabilidade das estruturas de concreto com base na determinação do coeficiente de difusão de cloretos**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2020.
- SELL JUNIOR, F. K. et al. Experimental assessment of accelerated test methods for determining chloride diffusion coefficient in concrete. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 14, n. 4, p. e14407, 2021.
- SENGUL, O. Use of electrical resistivity as an indicator for durability. **Construction and Building Materials**, v. 73, p. 434–441, 2014.
- SILVA, S.; EVANGELISTA, L.; DE BRITO, J. Durability and shrinkage performance of concrete made with coarse multi-recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 272, 121645, 2021.
- SINGH, N.; SINGH, S. P. Carbonation resistance and microstructural analysis of low and high volume fly ash self compacting concrete containing recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 127, p. 828–842, 2016.
- SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto**. São Paulo: Pini, 1998.
- TAFFESE, W. Z. et al. Concrete aging factor prediction using machine learning. **Materials Today Communications**, v. 40, p. 109527, ago. 2024.
- TAKEWAKA, K.; MASTUMOTO, S. Quality and Cover Thickness of Concrete Based on the Estimation of Chloride Penetration in Marine Environments. **Proceedings of the Second International Conference on Concrete in Marine Environment**, ACI SP 109, p. 381–400, 1988.
- TAM, V. W. Y.; GAO, X. F.; TAM, C. M. Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. **Cement and Concrete Research**, v. 35, p. 1195–1203, 2005.
- TAM, V. W. Y.; TAM, C.M.; WANG, Y. Optimization on proportion for recycled aggregate in concrete using two-stage mixing approach. **Construction and Building Materials**, v. 21, p. 1928–1939, 2007.
- TANG, L.; GULIKERS, J. On the Mathematics of Time-Dependent Apparent Chloride Diffusion Coefficient in Concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 4, p. 589–595, 2007.
- TANG, L.; NILSSON, L. O. Service life prediction for concrete structures under seawater by a numerical approach. **Durability of Building Materials and Components 7**, London: Routledge, p. 97–106, 1996.
- TESSARO, A. B.; SÁ, J. S. DE.; SCREMIN, L. B. Quantificação e classificação dos resíduos procedentes da construção civil e demolição no município de Pelotas, RS. **Ambiente Construído**, v. 12, n. 2, p. 121–130, abr. 2012.
- THENOZ, B. Mesure de la perméabilité et de la porosité des roches très compactes. **G.R.A.S.**, v. 243, p. 289–291, 1964.

- THOMAS, C. et al. Durability of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 40, 2013.
- TITELLO, E. P. **Análise da confiabilidade de vigas de concreto armado reforçado com fibras de aço com relação aos esforços transversais**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.
- TUUTTI, K. **Corrosion of Steel in Concrete**. Stockholm: Cement and Concrete Research Institute, 1982. Report 4-82.
- UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector**. Nairobi: UNEP, 2022.
- VILASBOAS, J. M. L. **Estudo dos mecanismos de transporte de cloretos no concreto, suas inter-relações e influência na durabilidade de edificações na cidade do Salvador-BA**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2013.
- WALLY, G. B. et al. 6-month evaluation of concrete aging factor using chloride migration test: effects of binder type and w/b ratio. **Materialia**, v. 30, p. 101841, ago. 2023.
- WALLY, G. B. **Vida útil de concretos produzidos com utilização de sílica ativa e metacaulim frente ao ataque por cloretos: indicadores de durabilidade e análise probabilística**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2019.
- WALLY, G. B.; MAGALHÃES, F. C.; REAL, M. V. On factors affecting probabilistic service life modeling of concrete structures under marine environments. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 15, n. 6, p. e15605, 2022.
- WANG, Y.; LIAO, J.; ZHANG, B. A Review of Chloride Penetration of Recycled Concrete with Enhancement Treatment and Service Life Prediction. **Materials**, v. 17, n. 6, mar. 2024.
- WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT. **Our common future**. Oxford: Oxford University Press, 1987.
- XIAO, J. **Recycled Aggregate Concrete Structures**. Berlin: Springer, 2018.
- YU, Y.; LIN, L. Modeling and predicting chloride diffusion in recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 264, 2020.
- YUAN, Q.; SANTHANAM, M. Test methods for chloride transport in concrete. **Performance of cement-based materials in aggressive aqueous environments**, v. 10. Netherlands: Springer, 2013.
- ZHANG, T.; GJØRV, O. E. Diffusion behavior of chloride ions in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 6, p. 907-917, 1996.
- ZHAO, Z. et al. Prediction of properties of recycled aggregate concrete using machine learning models: A critical review. **Journal of Building Engineering**, v. 90, ago. 2024.
- ZHONG, X. **Sheltering 10 billion people in a warming and resource-scarce world: challenges and opportunities**. 2023. Tese (Doutorado) – Institute of Environmental Sciences (CML), Faculty of Science, Leiden University, 2023.

# Apêndice A: Verificação dos softwares

---

D U R A C O N

Durability of Concrete Structures in Marine Environment

Release v2.3 - August 2009

Department of Civil Engineering - University of Minho

---

File name: data23\_me  
 Project name: Example calculation for routine testing

##### Input Data #####

---

Number of simulations: n = 10000  
 Initial seed: i = 123897459  
 Concrete cover: xc = N(104.700,2.000)  
 Diffusion Coefficient: Dcoef = N(14.450,2.310)  
 Critical Chloride Concentration: Ccr = N(0.400,0.080)  
 Surface Chloride Concentration: Cs = N(3.800,0.900)  
 Age exponent: n = N(0.600,0.120)  
 Time: t = D(0.000,150.000)  
 Time of testing: to = D(28.000)

##### Output Data #####

---

| Time<br>(years) | Prob.<br>Failure | Std.<br>Error   | Beta<br>Index | Prob. Failure<br>(Beta Index) |
|-----------------|------------------|-----------------|---------------|-------------------------------|
|                 | 0.0000           | 0.0000000e+000  | 23.0217       | 0.0000                        |
| 1               | 0.0000           | 0.0000000e+000  | 6.0411        | 0.0000                        |
| 30              | 0.3100           | 5.5591276e- 004 | 4.0493        | 0.0026                        |
| 45              | 0.9500           | 9.7003866e- 004 | 3.1542        | 0.0805                        |
| 60              | 1.7500           | 1.3112494e- 003 | 2.6161        | 0.4447                        |
| 75              | 3.0700           | 1.7250365e- 003 | 2.2468        | 1.2328                        |
| 90              | 4.5800           | 2.0905109e- 003 | 1.9728        | 2.4260                        |
| 105             | 5.8600           | 2.3487452e- 003 | 1.7590        | 3.9287                        |
| 120             | 7.1800           | 2.5815646e- 003 | 1.5861        | 5.6355                        |
| 135             | 8.4800           | 2.7858385e- 003 | 1.4425        | 7.4580                        |
| 150             | 9.6100           | 2.9472833e- 003 | 1.3207        | 9.3302                        |

##### I, G, R & S #####

---

| Index | Indicator<br>Function (I) | Failure<br>Function (G) | Resistance<br>Variable (R) | Load<br>Variable (S) |
|-------|---------------------------|-------------------------|----------------------------|----------------------|
| 1     | 0                         | 6.14341764e+001         | 1.04331086e+002            | 4.28969098e+001      |
| 2     | 0                         | 5.89294890e+001         | 1.08358764e+002            | 4.94292745e+001      |
| 3     | 1                         | -1.27913839e+001        | 1.02416670e+002            | 1.15208054e+002      |

Figura 5.1: Exemplo de análise realizada no software Duracon.

Fonte: PIANC (2010).

| D U R A C O N                                           |                           |                         |                            |                               |
|---------------------------------------------------------|---------------------------|-------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| Durability of Concrete Structures in Marine Environment |                           |                         |                            |                               |
| Release v2.3 - August 2009                              |                           |                         |                            |                               |
| Registered to UNKNOWN USER (-)                          |                           |                         |                            |                               |
| File name: Duracon_me                                   |                           |                         |                            |                               |
| Project name: Software Duracon                          |                           |                         |                            |                               |
| ##### Input Data #####                                  |                           |                         |                            |                               |
| Number of simulations: n = 10000                        |                           |                         |                            |                               |
| Initial seed: i = 123897459                             |                           |                         |                            |                               |
| Concrete cover: xc = N(104.700,2.000)                   |                           |                         |                            |                               |
| Diffusion Coefficient: Dcoef = N(14.450,2.310)          |                           |                         |                            |                               |
| Critical Chloride Concentration: Ccr = N(0.400,0.080)   |                           |                         |                            |                               |
| Surface Chloride Concentration: Cs = N(3.800,0.900)     |                           |                         |                            |                               |
| Age exponent: n = N(0.600,0.120)                        |                           |                         |                            |                               |
| Time: t = D(0.000,150.000)                              |                           |                         |                            |                               |
| Time of testing: to = D(28.000)                         |                           |                         |                            |                               |
| ##### Output Data #####                                 |                           |                         |                            |                               |
| Time<br>(years)                                         | Prob.<br>Failure          | Std.<br>Error           | Beta<br>Index              | Prob. Failure<br>(Beta Index) |
| 1                                                       | 0.0000                    | 0.0000000e+000          | 23.0217                    | 0.0000                        |
| 15                                                      | 0.0000                    | 0.0000000e+000          | 6.0411                     | 0.0000                        |
| 30                                                      | 0.3100                    | 5.5591276e-004          | 4.0493                     | 0.0026                        |
| 45                                                      | 0.9500                    | 9.7003866e-004          | 3.1542                     | 0.0805                        |
| 60                                                      | 1.7500                    | 1.3112494e-003          | 2.6161                     | 0.4447                        |
| 75                                                      | 3.0700                    | 1.7250365e-003          | 2.2468                     | 1.2328                        |
| 90                                                      | 4.5800                    | 2.0905109e-003          | 1.9728                     | 2.4260                        |
| 105                                                     | 5.8600                    | 2.3487452e-003          | 1.7590                     | 3.9287                        |
| 120                                                     | 7.1800                    | 2.5815646e-003          | 1.5861                     | 5.6355                        |
| 135                                                     | 8.4800                    | 2.7858385e-003          | 1.4425                     | 7.4580                        |
| 150                                                     | 9.6100                    | 2.9472833e-003          | 1.3207                     | 9.3302                        |
| ##### I, G, R & S #####                                 |                           |                         |                            |                               |
| Index                                                   | Indicator<br>Function (I) | Failure<br>Function (G) | Resistance<br>Variable (R) | Load<br>Variable (S)          |
| 1                                                       | 0                         | 6.14341764e+001         | 1.04331086e+002            | 4.28969098e+001               |
| 2                                                       | 0                         | 5.89294890e+001         | 1.08358764e+002            | 4.94292745e+001               |
| 3                                                       | 1                         | -1.27913839e+001        | 1.02416670e+002            | 1.15208054e+002               |

Figura 5.2: Resultados obtidos no software Duracon.

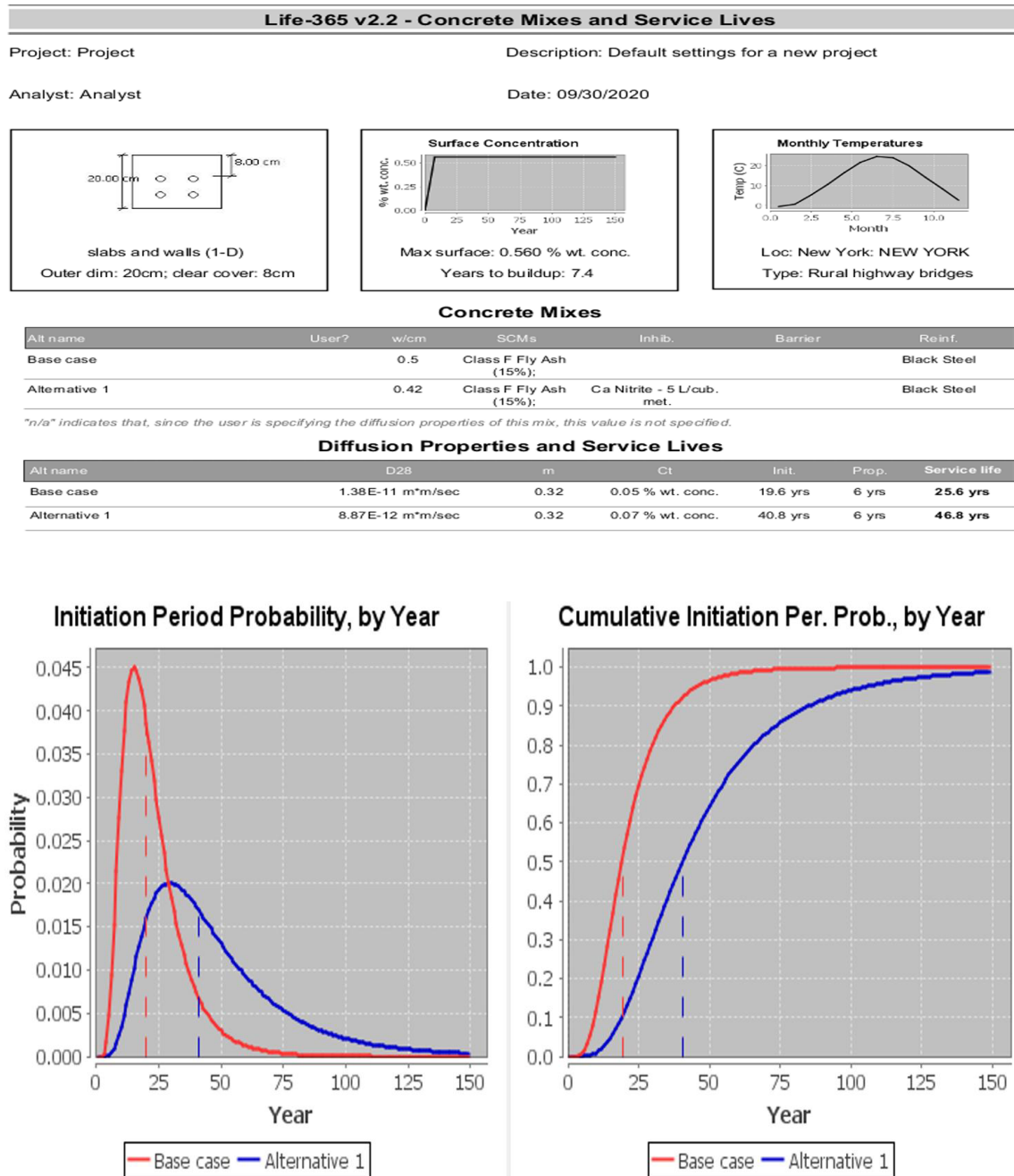


Figura 5.3: Exemplo de análise realizada no software Life-365.

Fonte: Deiveegan *et al.* (2021).

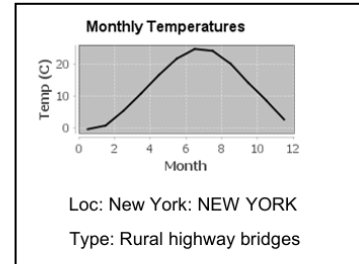
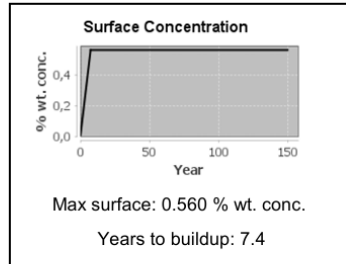
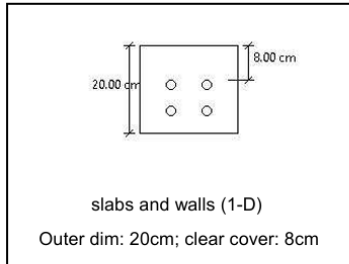
### Life-365 v2.2 - Concrete Mixes and Service Lives

Project: Software Life-365

Description: -

Analyst: Pietra Meerssche

Date: -



### Concrete Mixes

| Alt name      | User? | w/cm | SCMs                   | Inhib.                     | Barrier | Reinf.      |
|---------------|-------|------|------------------------|----------------------------|---------|-------------|
| Base case     |       | 0.5  | Class F Fly Ash (15%); |                            |         | Black Steel |
| Alternative 1 |       | 0.42 | Class F Fly Ash (15%); | Ca Nitrite - 5 L/cub. met. |         | Black Steel |

"n/a" indicates that, since the user is specifying the diffusion properties of this mix, this value is not specified.

### Diffusion Properties and Service Lives

| Alt name      | D28                            | m    | Ct               | Init.    | Prop. | Service life  |
|---------------|--------------------------------|------|------------------|----------|-------|---------------|
| Base case     | 1,38E-11 m <sup>2</sup> /m/sec | 0.32 | 0.05 % wt. conc. | 19.6 yrs | 6 yrs | <b>26 yrs</b> |
| Alternative 1 | 8,87E-12 m <sup>2</sup> /m/sec | 0.32 | 0.07 % wt. conc. | 40.8 yrs | 6 yrs | <b>47 yrs</b> |

">" indicates that the user has directly specified this value; "+" indicates the service life exceeds the study period.

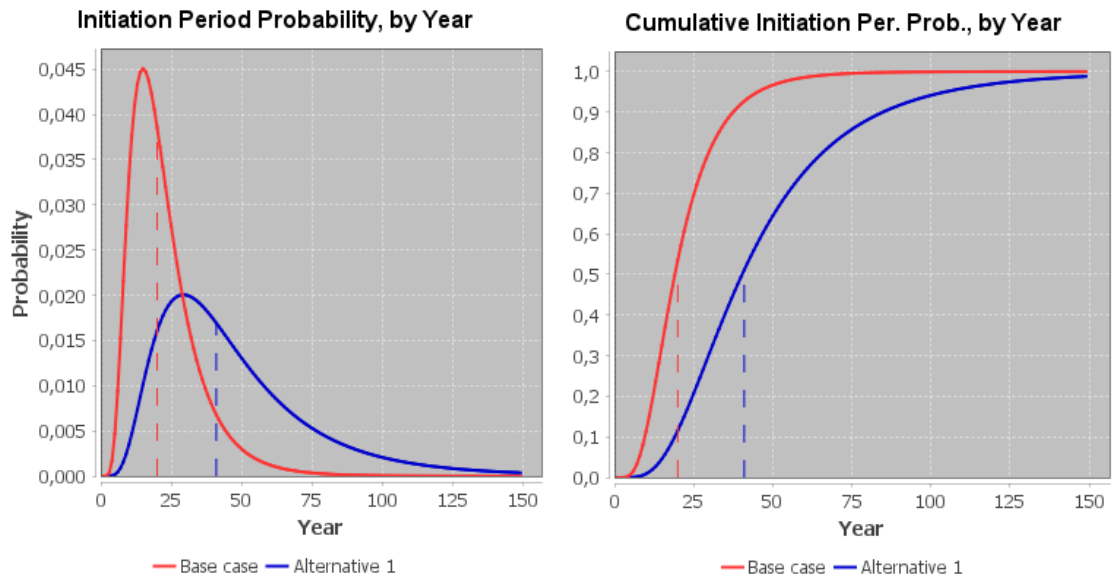


Figura 5.4: Resultados obtidos no software *Life-365*.

| Parameter        |                              | Unit                                  | Distribution Type | Mean $\mu$ | Std Dev. $\sigma$ | a   | b   |
|------------------|------------------------------|---------------------------------------|-------------------|------------|-------------------|-----|-----|
| $D_{RCM}$        | Chloride Migration Coef.     | $\cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ | Normal (Gauss)    | 8.5        | 2.4               | -   | -   |
| $\alpha$         | Aging Coefficient            | -                                     | Beta              | 0.3        | 0.12              | 0   | 1.0 |
|                  |                              |                                       |                   | 0.65       | 0.12              | 0   | 1.0 |
| $C_{s,\Delta x}$ | Surface Chloride Level       | wt.-%/c                               | Lognormal         | 0.48       | 0.16              | -   | -   |
|                  |                              |                                       |                   | 0.8        | 0.27              | -   | -   |
| $t_0$            | Age of Samples at Test       | Days                                  | Constant          | 28         | -                 | -   | -   |
| $T$              | Initiation period            | Years                                 | Constant          | 80         | -                 | -   | -   |
| $T_{ref}$        | Test Temperature (23°C)      | K                                     | Constant          | 296        | -                 | -   | -   |
| $T_{real}$       | Temp. Exposure Site (16°C)   | K                                     | Normal            | 289        | 5                 | -   | -   |
| $b_e$            | Temp. Coefficient Exponent   | -                                     | Normal            | 4800       | 700               | -   | -   |
| $\Delta x$       | Convection zone depth        | mm                                    | Constant          | 0          | -                 | -   | -   |
| $C_{crit}$       | Critical Chloride Level      | wt.-%/c                               | Beta              | 0.60       | 0.15              | 0.2 | 2.0 |
| $C_{nom}$        | Cover All                    | mm                                    | Normal (Gauss)    | 38.8       | 7.3               | -   | -   |
|                  | Cover All $\geq 25\text{mm}$ | mm                                    | Beta              | 39.1       | 6.9               | 25  | 100 |
|                  | Cover L2 Cat 1               | mm                                    | Normal (Gauss)    | 38         | 9.2               | -   | -   |
|                  | Cover L6 Cat 1               | mm                                    | Normal (Gauss)    | 32         | 5.2               | -   | -   |

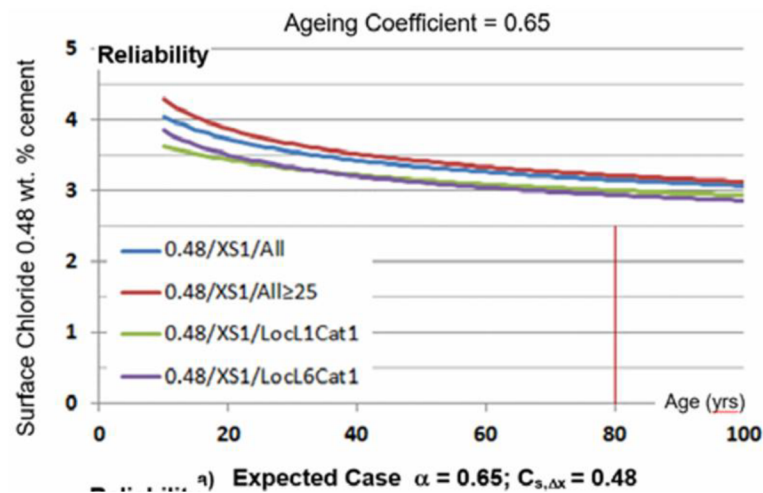


Figura 5.5: Exemplo de análise realizada com base no modelo *fib* (2006).  
Fonte: Papworth e Gehlen. (2016).

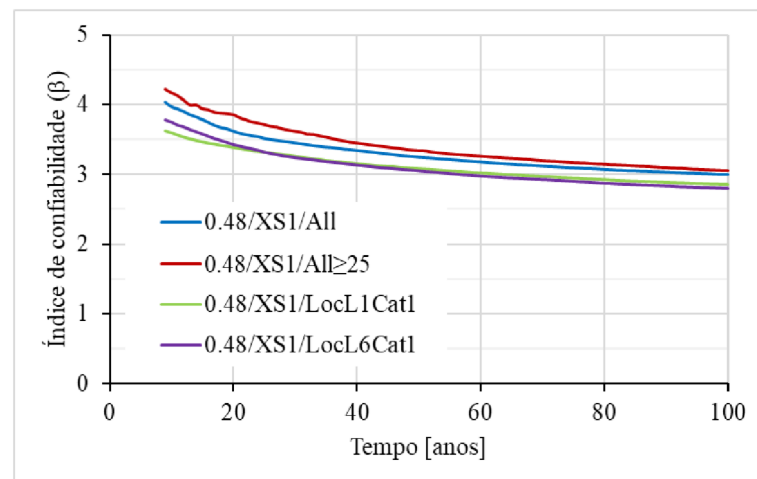


Figura 5.6: Resultados obtidos no programa em linguagem Python para aplicação do modelo *fib* (2006).