



Universidade Federal do Rio Grande
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica

Análise numérica do fator de envelhecimento do concreto e sua influência na resposta de modelos de penetração de cloretos

Dissertação de:
Cristian da Conceição Gomes

Orientador:
Fábio Costa Magalhães

Rio Grande, 28 de Janeiro de 2022.

Análise numérica do fator de envelhecimento do concreto e sua influência na resposta de modelos de penetração de cloretos

Cristian da Conceição Gomes

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.

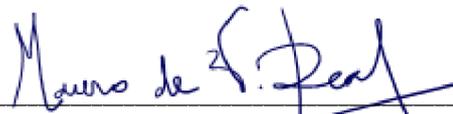


Prof. Dr. Liércio André Isoldi
Coordenador do PPGEO

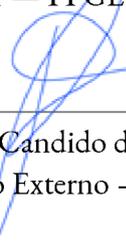
Banca examinadora:



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



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



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



Prof. Dr. Charlei Marcelo Paliga
Membro Externo — UFPEL

Rio Grande, 28 de Janeiro de 2022.

Ficha Catalográfica

G633a Gomes, Cristian da Conceição.

Análise numérica do fator de envelhecimento do concreto e sua influência em modelos de penetração de cloretos / Cristian da Conceição Gomes. – 2022.

114 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Rio Grande/RS, 2022.

Orientador: Dr. Fábio Costa Magalhães.

1. Penetração de cloretos 2. Durabilidade 3. Fator de envelhecimento 4. Análise probabilística I. Magalhães, Fábio Costa II. Título.

CDU 693.54

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

*Todos esses que aí estão
Atravancando meu
Caminho,
Eles passarão...
Eu passarinho!*

Agradecimentos

Agradeço a Deus por me proporcionar disposição e saúde em mais uma etapa de minha formação.

Aos meus pais, Luciano Prunes Gomes e Mariangela Saroti da Conceição, vocês são minha base, e ao meu irmão, Leonardo da Conceição Gomes. Obrigado por todo suporte, apoio e estrutura, para que eu pudesse traçar essa jornada.

A minha namorada e companheira, Mariana Vieira dos Reis, obrigado por estar ao meu lado durante essa difícil etapa. Em muitos momentos fosse minha confidente, me ouvindo e me trazendo palavras de conforto. Agradeço pelo privilégio de te ter ao meu lado.

Ao professor e orientador Fábio Costa Magalhães, que conduziu com maestria a orientação deste trabalho. Agradeço ainda pela oportunidade de participar do grupo de pesquisa, por todo o conhecimento generosamente transmitido e, principalmente, pela atenção que sempre me deu nas diversas reuniões sobre o tema.

Ao colega Gustavo Bosel Wally, agradeço pelas sugestões ao longo do trabalho e tempo fornecido para sanar dúvidas. Com certeza tens um papel muito importante nessa etapa.

Aos amigos que pude fazer nessa etapa, sem citar nomes, pelo companheirismo e auxílio nas dúvidas que surgiram durante o curso, especialmente aquelas relacionadas às disciplinas do PPGEO.

Ao Departamento de Engenharia da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande pela formação acadêmica, científica e suporte proporcionado durante o meu mestrado.

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

À Universidade Federal do Rio Grande.

À agência fomentadora da pesquisa, pela bolsa de estudos concedida. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Resumo

Cristian da Conceição Gomes

ANÁLISE NUMÉRICA DO FATOR DE ENVELHECIMENTO DO CONCRETO E SUA INFLUÊNCIA NA RESPOSTA DE MODELOS DE PENETRAÇÃO DE CLORETOS

Fatores relacionados à durabilidade e à previsão de vida útil têm ganhado importância cada vez maior no projeto de estruturas de concreto armado ao longo dos últimos anos. Diversos fatores influenciam o processo corrosivo em estruturas de concreto armado. Dentre eles, pode ser destacada a agressividade do ambiente e a qualidade do concreto. Os principais causadores de deterioração precoce em estruturas de concreto são a penetração de íons cloretos e a carbonatação. Esses agentes acarretam prejuízos, tanto do ponto de vista técnico, como do ponto de vista econômico, o que inclui os danos causados e os custos para a recuperação. Os íons cloreto penetram a estrutura em diferentes graus em decorrência da ação do meio ambiente, sendo o agente principal do processo de despassivação das armaduras. Esse processo gera as condições necessárias para o início do processo corrosivo, o qual é considerado o processo de degradação mais recorrente e severo em estruturas de concreto armado em ambientes de atmosfera marinha. Ao longo da vida útil do concreto, ao menos três fatores estão em constante mudança: a microestrutura dos poros, a perda de capacidade de fixação dos cloretos e as diferenças de concentração de cloretos na superfície e no interior do concreto. Nesse contexto, o presente trabalho visa avaliar a influência do processo de envelhecimento do concreto utilizando o fator de envelhecimento adotado em distintos modelos matemáticos baseados na solução da 2ª Lei de Fick. Foram realizadas análises numéricas através dos modelos apresentados por GJØRV (2015), KWON (2007) e LIFE 365 (1999) a fim de avaliar a concentração de cloretos em diferentes profundidades e idades para os concretos em estudo. Por meio das análises paramétricas realizadas através do programa MATLAB, observou-se grande influência gerada pelas variações do fator de envelhecimento nos modelos propostos por Gjorv e Life 365, que gerou um aumento na estimativa de concentração de cloretos no interior do concreto. Observou-se também a maior influência da concentração superficial de cloretos no modelo proposto por Kwon. Além disso, através do teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov, constatou-se que as concentrações de cloretos estimadas através dos três modelos seguem uma distribuição de probabilidades Lognormal, a qual representa o comportamento dos três modelos com grande fidelidade. Por fim, observaram-se estimativas de concentrações mais elevadas para o modelo proposto por Kwon, o qual se considerou como uma análise mais crítica, em função dos resultados apresentados, enquanto que o modelo Life 365 apresentou-se como mais completo, devido às considerações que podem ser realizadas durante o processo, como o diâmetro da fissura do concreto, as adições minerais presentes e o tipo de ação que o concreto esteja sofrendo.

Palavras-chave: Penetração de cloretos. Durabilidade. Fator de envelhecimento. Análise probabilística.

Abstract

Cristian da Conceição Gomes

NUMERICAL ANALYSIS OF THE AGING FACTOR OF CONCRETE AND ITS INFLUENCE ON THE RESPONSE OF CHLORIDE PENETRATION MODELS

Factors related to durability and service life prediction have gained increasing importance in the design of reinforced concrete structures over the last few years. Several factors influence the corrosive process in reinforced concrete structures. Among them, the aggressiveness of the environment and the quality of the concrete can be highlighted. The main causes of early deterioration in concrete structures are the penetration of chloride ions and carbonation. These agents cause losses, both from a technical point of view and from an economic point of view, which includes the damage caused and the costs of recovery. Chloride ions penetrate the structure to different degrees as a result of the action of the environment, being the main agent in the depassivation process of the reinforcement. This process generates the necessary conditions for the beginning of the corrosive process, which is considered the most recurrent and severe degradation process in reinforced concrete structures in marine atmosphere environments. Over the lifetime of concrete, at least three factors are constantly changing: the microstructure of the pores, the loss of chloride holding capacity and the differences in chloride concentration on the surface and inside the concrete. In this context, the present work aims to evaluate the influence of the concrete aging process using the aging factor adopted in different mathematical models based on the solution of Fick's 2nd Law. Numerical analyzes were performed using the models presented by GJØRV (2015), KWON (2007) and LIFE 365 (1999) in order to evaluate the chloride concentration at different depths and ages for the concretes under study. Through the parametric analyzes carried out through the MATLAB program, a great influence was observed generated by the variations of the aging factor in the models proposed by Gjorv and Life 365, which generated an increase in the estimate of chloride concentration inside the concrete. A greater influence of the surface concentration of chlorides was also observed in the model proposed by Kwon. Furthermore, through the Kolmogorov-Smirnov adherence test, it was found that the chloride concentrations estimated through the three models follow a Lognormal probability distribution, which represents the behavior of the three models with great fidelity. Finally, estimates of higher concentrations were observed for the model proposed by Kwon, which was considered a more critical analysis, due to the results presented, while the Life 365 model was presented as more complete, due to the considerations that can be carried out during the process, such as the diameter of the concrete crack, the mineral additions present and the type of action that the concrete is undergoing.

Keywords: Chloride penetration. Durability. Aging factor. Probabilistic analysis.

Sumário

	Página
Lista de Figuras	X
Lista de Tabelas	XIII
Lista de Símbolos	XIV
Lista de Siglas	XVI
1 Introdução	17
1.1 Considerações Iniciais _____	17
1.2 Objetivos _____	19
1.2.1 Objetivo Geral _____	19
1.2.2 Objetivos Específicos _____	19
1.3 Delimitações _____	19
1.4 Limitações _____	19
2 Referencial Teórico	21
2.1 Durabilidade e vida útil do concreto armado frente ao ataque de cloretos _____	21
2.1.1 Cloretos no ambiente marinho _____	27
2.1.2 Mecanismos de transporte de cloretos _____	27
2.1.3 Teor crítico de cloretos _____	29
2.1.4 Propriedades que afetam a difusividade ao longo do tempo _____	32
2.2 Considerações sobre o fator de envelhecimento do concreto _____	44
2.3 Modelagem numérica aplicada à vida útil das estruturas _____	49
2.3.1 Estados Limites _____	53
2.3.2 Método de Simulação de Monte Carlo (MCS) _____	54
2.4 Ferramentas Teóricas e Metodológicas _____	55
2.4.1 Modelo de penetração de cloretos apresentado por GjØrv (GJØRV, 2015) _____	60
2.4.2 Modelo apresentado por Poulsen (KWON, 2007) _____	61
2.4.3 Modelo de penetração de cloretos LIFE 365(1999) _____	62
3 Metodologia	65
3.1 Análise paramétrica _____	65
3.1.1 Cobrimento Nominal _____	66
3.1.2 Tempo de referência _____	67
3.1.3 Concentração superficial de cloretos _____	67
3.1.4 Temperatura _____	67
3.1.5 Fator de Envelhecimento _____	67

3.2	Análise de convergência _____	67
4 	ANÁLISE DOS RESULTADOS	70
4.1	Teste de Aderência de Kolmogorov-Smirnov _____	71
4.2	Análise do efeito das variáveis básicas na concentração de cloretos _____	74
4.3	Coeficiente de difusão _____	78
4.4	Penetração de cloretos em função do cobrimento _____	80
4.5	Penetração de cloretos em função do fator de envelhecimento _____	81
4.6	Penetração de cloretos em função das diferentes idades do concreto _____	83
5 	Considerações Finais	87
5.1	Principais conclusões _____	88
5.2	Sugestões para trabalhos futuros _____	89
	Referências	90
	Apêndice 1 – Rotina computacional para cálculo da concentração total de cloretos, Modelo GJØRV	104
	Apêndice 2 – Rotina computacional para cálculo da concentração total de cloretos, Modelo KWON	108
	Apêndice 3 – Rotina computacional para cálculo da concentração total de cloretos, Modelo Life 365	111

Lista de Figuras

Figura 2.1 Zonas de agressividade às estruturas de concreto armado. Fonte: adaptado de Yi <i>et al.</i> , 2020.	22
Figura 2.2 Modelo de vida útil proposto por Tuutti. Fonte: Tuutti, 1982 <i>apud</i> Wally, 2019.	23
Figura 2.3 Mecanismos do processo de propagação da corrosão de armaduras em concreto. Fonte: adaptado de Apostolopoulos e Papadakis, 2008.	24
Figura 2.4 Perfil de confiabilidade estrutural devido à penetração de cloretos. Fonte: adaptado de Lorensini, 2006.	25
Figura 2.5 Modelo de vida útil proposto por Helene. Fonte: Helene, 1993 <i>apud</i> Wally, 2019.	26
Figura 2.6 Relação do teor crítico de cloretos às condições ambientais e qualidade do concreto. Fonte: Andrade, 1992.	30
Figura 2.7 Influência do grau de saturação dos poros na difusividade de cloretos em concretos. Fonte: adaptado de MEIRA, 2004.	36
Figura 2.8 Efeitos da variação da relação a/c na distribuição de poros de concretos produzidos com cimento Portland puro. Fonte: Magalhães, 2019.	38
Figura 2.9 Efeitos da relação a/c na penetração de cloretos. Fonte: SILVESTRO <i>et al.</i> , 2021.	39
Figura 2.10 Influência do teor de cinza volante na difusividade de cloretos. Fonte: Adaptado de GJØRV, 2014.	43
Figura 2.11 Representação gráfica do perfil de concentração de cloretos em relação ao cobrimento da armadura em um tempo t. Fonte: Magalhães (2018).	53
Figura 2.13 Esquema dos domínios no método de Monte Carlo utilizando duas variáveis de entrada. Fonte: Nogueira, 2006.	55
Figura 3.1 Procedimento metodológico realizado. Fonte: Autor.	65
Figura 3.2 Convergência estatística da média da concentração de cloretos $C(x, t)$ nos modelos analisados no presente estudo. Fonte: Autor.	68
Figura 3.3 Convergência estatística do desvio-Padrão da concentração de cloretos $C(x, t)$ nos modelos analisados no presente estudo. Fonte: Autor.	69
Figura 4.1 Ilustração da distância máxima (D_n) relacionada ao teste de Kolmogorov-Sminov com dados obtidos pelo modelo proposto por Gjorv. Fonte: Autor.	71
Figura 4.2 Ilustração da distância máxima (D_n) relacionada ao teste de Kolmogorov-Sminov com dados obtidos pelo modelo proposto por Kwon. Fonte: Autor.	71

- Figura 4.3** Ilustração da distância máxima (D_n) relacionada ao teste de Kolmogorov-Sminov com dados obtidos pelo modelo proposto por Life. Fonte: Autor. _____ 72
- Figura 4.4** Função de densidade de probabilidade relacionada ao Teste de aderência por meio dos resultados de concentração de cloretos obtidos através do modelo proposto por GJORV. Fonte: Autor. _____ 73
- Figura 4.5** Função de densidade de probabilidade relacionada ao Teste de aderência por meio dos resultados de concentração de cloretos obtidos através do modelo proposto por KWON. Fonte: Autor. _____ 74
- Figura 4.6** Função de densidade de probabilidade relacionada ao Teste de aderência por meio dos resultados de concentração de cloretos obtidos através do modelo proposto por LIFE. Fonte: Autor. _____ 74
- Figura 4.7** Efeito do coeficiente de variação das variáveis básicas na concentração de cloretos média no modelo proposto por Gjørnv (2015). Fonte Autor. _____ 75
- Figura 4.8** Efeito do coeficiente de variação das variáveis básicas na concentração de cloretos média no modelo proposto por Kwon (2007). Fonte Autor. _____ 76
- Figura 4.9** Efeito do coeficiente de variação das variáveis básicas na concentração de cloretos média no modelo proposto por Life 365 (1999). Fonte Autor. _____ 76
- Figura 4.10** Efeito do coeficiente de variação das variáveis básicas na COV da concentração de cloretos. Fonte: Autor. _____ 77
- Figura 4.11** Comparativo do coeficiente de difusão aos 50 anos com fator de envelhecimento de 0,3. Fonte: Autor. _____ 78
- Figura 4.12** Coeficiente de difusão em função do fator de envelhecimento aos 50 anos. Fonte: Autor. _____ 79
- Figura 4.13** Concentração de cloretos para um fator de envelhecimento de 0,4. Fonte: Autor. _____ 80
- Figura 4.14** Concentração de cloretos no interior da estrutura (C40,50) em função do fator de envelhecimento. Fonte: Autor. _____ 82
- Figura 4.15** Coeficiente de difusão de concretos em diferentes idades, através de três distintos modelos numéricos em função do fator de envelhecimento de 0,3. Fonte: Autor. _____ 83
- Figura 4.16** Concentração de cloretos em função do fator de envelhecimento para profundidade de 50 mm, em diferentes idades através do modelo matemático proposto por GJØRV. Fonte: Autor. _____ 84
- Figura 4.17** Concentração de cloretos em função do fator de envelhecimento para profundidade de 50 mm, em diferentes idades através do modelo matemático proposto por KWON. Fonte: Autor. _____ 84

Figura 4.18 Concentração de cloretos em função do fator de envelhecimento para profundidade de 50 mm, em diferentes idades através do modelo matemático proposto por LIFE 365. Fonte: Autor. _____ 85

Figura 4.19 Comparativo da concentração total de cloretos em função do fator de envelhecimento para profundidade de 50 mm aos 50 anos. Fonte: Autor. _____ 85

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 Valor crítico de cloretos em concreto segundo normas internacionais. _	31
Tabela 2.2 Difusividade de cloretos, a 25° C, em pastas com relação a/c igual a 0,5. Fonte: Page <i>et al.</i> , 1981. _____	42
Tabela 2.3 Valores calculados de m em função das diferentes equações. _____	46
Tabela 2.4 Diferenças no coeficiente de difusão de cloretos entre modelos numéricos. Fonte: Autor. _____	58
Tabela 3.1 Distribuições de probabilidade utilizadas na análise paramétrica. Fonte: Autor. _____	66
Tabela 4.1 Níveis de significância para cada modelo de distribuição em relação aos modelos matemáticos. Fonte: Autor. _____	72
Tabela 4.2 Avaliação comparativa dos modelos matemáticos aos 50 anos, visando avaliar o cobrimento necessário para cada fator de envelhecimento para obter $C_{x,t} < C_{cr}$. Fonte: Autor. _____	82

Lista de Símbolos

Letras Latinas

C_{crit}	Concentração crítica de cloretos (%)
$C_{(x,t)}$	Concentração de cloretos no interior da estrutura (%)
C_0	Concentração inicial de cloretos (%)
C_i	Concentração iônica (mol/m ³)
C_s	Concentração superficial de cloretos (%)
D_0	Coefficiente de difusão inicial do concreto (mm ² /ano)
D_{ref}	Coefficiente de difusão no tempo de referência (mm ² /ano)
$Temp$	Temperatura média anual (°C)
t'	Idade do concreto quando exposto aos íons (anos)
t_0	Idade do concreto ao ser medido o coeficiente D_0 (s)
t_R	Tempo em que o coeficiente de difusão é assumido como sendo constante (anos)
t_{ref}	Tempo de referência (dias)
C	Concentração de cloretos (%)
C	Coulomb
D	Coefficiente de Difusão (mm ² /ano)
EA	Energia de ativação da difusão (kcal/mol)
M	Constante dependendo das proporções da mistura
R	Constante universal dos gases perfeitos
T	Temperatura (°C)
U	Energia de ativação da difusão do cloreto [kcal/mol]
erf	Função de erro de Gauss
exp	Função exponencial
ke	Influência da temperatura de difusão
pH	Potencial hidrogeniônico

t	Tempo (anos)
x	Cobrimento da armadura (mm)

Símbolos Gregos

σ	Desvio Padrão
α	Fator de envelhecimento do concreto
β	Índice de confiabilidade

Fórmulas Químicas

$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	Sal de Friedel
$3\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	Cloroferratos de cálcio hidratado
C_2S	Belita
C_3A	Aluminato tricálcico
C_3S	Alita
$\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$	Silicato de cálcio hidratado
C_4AF	Ferroaluminato tetracálcico
Ca	Cálcio
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Hidróxido de cálcio
CaCl_2	Cloreto de cálcio
Cl^-	Cloreto
CO_2	Dióxido de carbono
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
H_2O	Água
Mg	Magnésio
P	Fósforo

Lista de Siglas

A/C	Relação água/cimento do concreto
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
AS	Australian Standard
CEB	Comité Euro-International du Béton
COV	Coefficiente de variação
CP-II	Cimento Portland Composto
CP-II- F	Cimento Portland Composto com Fíler
CP-IV	Cimento Portland Pozolânico
CP-V	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
EFL	Estado Limite de Fadiga
ELS	Estado Limite de Serviço
ELU	Estado Limite Último
EN	European Standard
FIP	International Federation for Structural Concrete
FORM	First Order Reability Method
FURG	Universidade Federal do Rio Grande.
ID's	Indicadores de Durabilidade
IMNET	Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil
MCS	Método de Simulação de Monte Carlo
NBR	Norma brasileira
NS	Norwegian Standart
Pf	Probabilidade de falha
PPGEO	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica
R	Esforço Resistente
S	Esforço Solicitante
SDC	Strategic Development Council
SORM	Second Order Reability Method

1 | Introdução

1.1 Considerações Iniciais

O concreto é o material de construção mais utilizado no mundo, especialmente devido a sua versatilidade. Por isso, é encontrado nas mais diversas edificações, embora apresente diferentes características de acordo com as necessidades de cada situação de uso. Nesse contexto, o concreto também tem grande importância na composição dos custos da indústria da construção civil e também na economia mundial. No entanto, estruturas de concreto sofrem processos que afetam diretamente sua durabilidade em função dos agentes agressivos presentes no ambiente onde se encontram, o que se configura como um grande desafio para projetistas e construtores (MAGALHÃES, 2018).

Inúmeros são os mecanismos de deterioração de estruturas de concreto que acarretam o surgimento de manifestações patológicas cuja solução em alguns casos pode ser extremamente complexa (MAGALHÃES, 2018). Conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014), os mecanismos de deterioração são divididos em três classes: (1) relativos ao concreto causados por processos químicos; (2) referentes à armadura em função da corrosão e, por fim, (3) relacionados à estrutura em decorrência de impactos externos, fatores reológicos e etc.

Dentre esses mecanismos de deterioração de estruturas de concreto armado, destaca-se o processo eletroquímico da corrosão das armaduras. Em decorrência desse processo, ocorrem manifestações patológicas, sinais que permitem enxergar o processo de degradação e que decorrem devido ao processo. A importância do estudo de estruturas sob o ataque desses íons se baseia na grande concentração de residências em regiões litorâneas, cuja atmosfera é considerada altamente agressiva, pois favorece o ataque de cloretos.

Cabe ressaltar que, devido à extensão territorial do Brasil, o transporte por via terrestre e através das zonas portuárias torna-se essencial, tanto para o mercado nacional quanto internacional. Dessa forma, estruturas como pontes, viadutos, portos e afins são vitais para a movimentação econômica do país. Entretanto, devido à falta de estudos preliminares e métodos que possibilitassem a previsão de vida útil dessas estruturas no passado, atualmente há grandes gastos com reparos e recuperação em virtude dos processos de deterioração instalados, principalmente em regiões litorâneas.

Visando mudar esse panorama, nas últimas décadas, diversos estudos foram realizados com o intuito de utilizar a modelagem numérica para avaliar a vida útil de estruturas de concreto. O uso de modelos computacionais pode ajudar a gerar projetos de estruturas de concreto armado mais completos e precisos, o que inclui o desempenho global da estrutura e todos os materiais de sua composição. Estudos apontam altos gas-

tos relacionados à manutenção de estruturas costeiras e estima-se que o número de estruturas que necessitam de reparos aumentará acentuadamente nos próximos anos (POLDER, 2012; ANGST, 2019).

O processo de penetração de íons cloretos em concretos depende de três fatores principais: (1) microestrutura de poros do concreto, (2) mudanças na capacidade de ligação das fases de cimento e (3) os diferentes ambientes, que impõem diferentes níveis de agressividade. Esses três fatores estão em constante mudança em função da idade do concreto e, conseqüentemente, a capacidade de transporte de íons no interior do concreto é mutável (Audenaert *et al.*, 2010; Andrade *et al.*, 2011). Ainda segundo Gjrv (2015), a difusividade é um importante parâmetro da condicionante da resistência à penetração de cloretos.

Em função de determinadas condições, os íons cloreto podem penetrar através da matriz cimentícia e, ao atingir as armaduras, desestabilizar a camada passivadora destas, propiciando as condições necessárias para a instalação do processo corrosivo. Sendo assim, a ocorrência deste fenômeno está diretamente relacionada com as características do concreto de cobertura das armaduras e com o nível de agressividade do ambiente (MAGALHÃES, 2018). Entretanto, em função do processo de maturação do concreto, o tempo de iniciação da corrosão se estende, enquanto o concreto torna-se mais duradouro, principalmente em misturas de concreto contendo adições minerais com processo de hidratação prolongado (LEHNER *et al.*, 2018).

A modelagem numérica é uma ferramenta útil para fornecer uma compreensão quantitativa dos processos chave e suas interações que definem a vida útil do concreto armado em ambientes com cloretos. Existem inúmeros modelos, os quais priorizam diferentes propriedades durante o processo de estimativa de vida útil e durante a maturação do concreto. Com contínuas melhorias nesses modelos de vida útil, eles podem ser também usados para quantificação de custos do ciclo de vida e para a determinação do tempo de reparação e estratégias de recuperação (SHI *et al.*, 2011).

A implementação da modelagem da vida útil das estruturas está cada vez mais presente, entretanto, devido ao grande número de modelos existentes na literatura, torna-se difícil a “padronização” dos parâmetros de entrada, implicando na necessidade de pesquisas adicionais sobre o uso de modelos de previsão (OBOLT *et al.*, 2010; ANDRADE *et al.*, 2011; SHI *et al.*, 2012; TANG *et al.*, 2015). Segundo Alexander (2018), a modelagem da vida útil de estruturas visa conferir um melhor desempenho estrutural, favorecendo também a eficiência operacional e a otimização financeira.

Dentre os diversos modelos descritos na literatura para descrever o fenômeno de difusão dos íons cloreto no interior do concreto, destaca-se a solução analítica proposta por Crank (1975) baseada na segunda lei de Fick. Essa solução apresenta fácil aplicação e, por isso, foi amplamente utilizada em diferentes trabalhos (MANGAT e MOLLOY, 1994; MAAGE *et al.*, 1996; DURACRETE, 2000; KWON, 2007; GJRV, 2015; TANG *et al.*, 2015; MAGALHÃES, 2018).

Nesse contexto, o presente trabalho visa avaliar a concentração de cloretos estimada em diferentes profundidades usando os modelos propostos por Gjrv (2015), Kwon (2007) e Life 365 (1999), que são baseados na segunda lei de Fick.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem por objetivo avaliar três diferentes modelos matemáticos para a estimativa da penetração de cloretos no concreto considerando o fator de envelhecimento do concreto.

1.2.2 Objetivos Específicos

Dentre os objetivos específicos, busca-se: (1) Realizar uma análise crítica dos modelos numéricos de previsão de vida útil utilizados neste trabalho; (2) Analisar a influência dos parâmetros intervenientes de cada modelo em diferentes idades nos resultados do coeficiente de difusão e concentração de cloretos; (3) Estimar o comportamento de uma estrutura frente às mudanças com base no fator de envelhecimento; (4) Realizar uma análise paramétrica da influência das principais variáveis envolvidas no processo de iniciação.

1.3 Delimitações

Esta pesquisa apresenta, como delimitações: (1) a avaliação da fase de iniciação da penetração de íons cloreto em uma estrutura de concreto até o estado limite de serviço, não sendo considerados os efeitos decorrentes do processo de propagação da deterioração; (2) a consideração do processo de difusão como o único mecanismo de entrada dos agentes agressivos; (3) a consideração do mecanismo de penetração de íons no concreto como unidirecional; (4) a não consideração dos fenmenos que podem ocorrer paralelamente ao ataque por cloretos, tais como a carbonatação e fissuração. Essas últimas patologias podem modificar a microestrutura do concreto e influenciar a penetração de agentes agressivos, tais como os cloretos.

1.4 Limitações

Esta pesquisa apresenta como limitação: (1) a não realização de ensaios com concretos físicos frente  penetração de íons cloreto para a comparação com resultados

computacionais; (2) a utilização de modelos computacionais similares, o que garantiu uma redução e padronização dos parâmetros de entrada.

2 | Referencial Teórico

Neste capítulo são apresentados assuntos pertinentes ao estudo como a durabilidade e vida útil do concreto, fatores que influenciam a penetração de íons cloreto, corrosão das armaduras e modelos numéricos para simulação da ação do ambiente de severa agressividade nas estruturas de concreto.

2.1 Durabilidade e vida útil do concreto armado frente ao ataque de cloretos

De acordo com o comitê 201 da American Concrete Institute e a NBR 6118 (ABNT, 2014), a durabilidade consiste na capacidade de uma estrutura de concreto em resistir à ação das intempéries, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração. Assim sendo, entende-se a durabilidade como a capacidade do material de suportar solicitações para as quais o mesmo foi concebido ao longo de um determinado período, em decorrência de um ou mais processos de degradação de natureza físico-mecânica, química, biológica ou eletroquímica. Os mecanismos de degradação, deterioração ou envelhecimento comprometem o desempenho do material, componente ou sistema, reduzindo ou anulando sua aptidão ao uso dentro de suas condições de serviço (RIBEIRO e CASCUDO, 2018).

A durabilidade está associada à corrosão das armaduras de estruturas de concreto e a penetração de cloretos pelo processo de difusão é reconhecidamente um dos fatores de maior importância no desencadeamento do processo corrosivo (SOUZA e LEONEL, 2012; VAL e STEWART, 2003; EL HASSAN *et al.*, 2010; BASTIDAS-ARTEAGA *et al.*, 2011; PELLIZZER, 2015).

De acordo com Mehta (1978), Silva Filho (1994) e Lima (2011), o ambiente marinho possui vários agentes que atuam negativamente sobre as estruturas de concreto, reduzindo seu desempenho, e que podem ser agrupados em agentes químicos, agentes físicos e agentes biológicos. Normalmente, a ação desses agentes acontece simultaneamente. Segundo Mehta e Monteiro (2014), no ambiente marinho, a água salgada é o principal agente responsável por processos físicos e químicos de degradação. Assim sendo, muitas pesquisas e textos normativos apresentam o ambiente marinho dividido em diferentes zonas (**Figura 2.1**): zona de atmosfera marinha, zona de respingos, zona de variação de maré, zona submersa, cada zona apresenta as suas principais características de degradação:

- **Zona de atmosfera marinha:** região na qual a estrutura recebe, apesar de não haver contato com a água do mar, uma quantidade razoável de sais,

capazes de produzir depósitos salinos na superfície, onde ocorrem os ciclos de molhagem e secagem;

- **Zona de respingos:** região que sofre ação direta do mar por meio dos ciclos de molhagem e secagem, devido às ondas e respingos. Zona com degradação bastante significativa devido à corrosão das armaduras pelos íons cloretos;
- **Zona de variação das marés:** região limitada pelos níveis máximo e mínimo alcançado pelas marés. Dessa forma, o concreto encontra-se sempre saturado, dependendo das condições climatológicas e crescente concentração de sais;
- **Zona submersa:** região onde a estrutura encontra-se permanentemente submersa. A degradação ocorre pela ação de sais agressivos e através de microrganismos, que, em casos extremos, pode gerar a corrosão biológica de armaduras e do concreto.

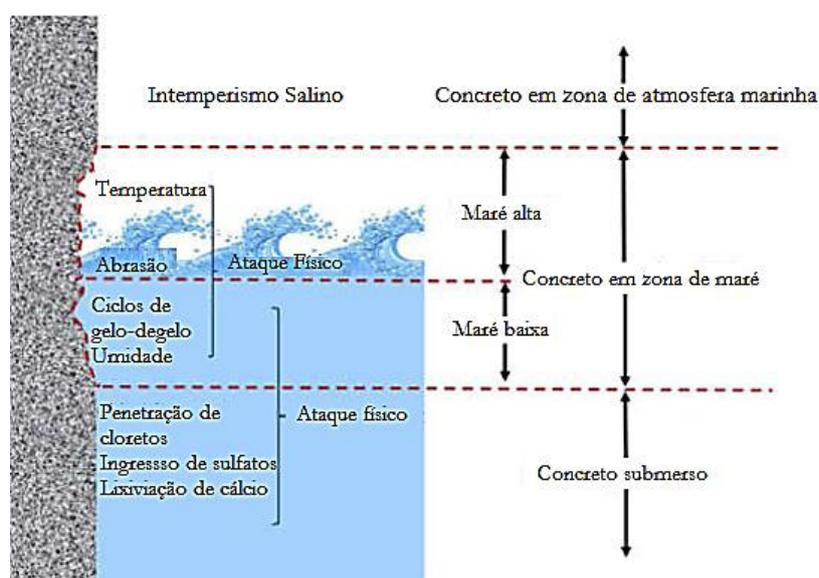


Figura 2.1 Zonas de agressividade às estruturas de concreto armado. Fonte: adaptado de Yi *et al.*, 2020.

O concreto oferece uma proteção física para a armadura dada pelo cobrimento, que dificulta a entrada de agentes agressivos. Além disso, a proteção ocorre devido às reações de hidratação dos silicatos de cálcio, em especial o C_3S e o C_2S , que liberam hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$). Esse componente dissolvido nos poros confere um caráter alcalino ao concreto, que mantém o pH entre 13 e 14 (TUUTTI, 1982; MOREIRA, 2018). Dessa forma, o cobrimento fornece uma barreira física para a entrada

de agentes externos e uma proteção química conferida pela alta alcalinidade da solução dos poros (VIDAL *et al.*, 2007).

Tuutti (1982) propôs um modelo conceitual que ilustra o processo de deterioração das armaduras em estruturas de concreto devido à corrosão das armaduras pode ser dividida em duas principais etapas (**Figura 2.2**). O processo de corrosão do aço no concreto envolve uma fase inicial, na qual os agentes agressivos, como CO_2 e cloretos, alteram as condições do concreto no entorno da barra, despassivando a armadura, o que se segue da formação de uma célula de corrosão, responsável pela propagação da corrosão. Já o período de propagação é aquele no qual já houve a despassivação da armadura e o grau de corrosão aumenta consideravelmente, levando a estrutura a um estado limite caso não haja nenhum tipo de intervenção corretiva.

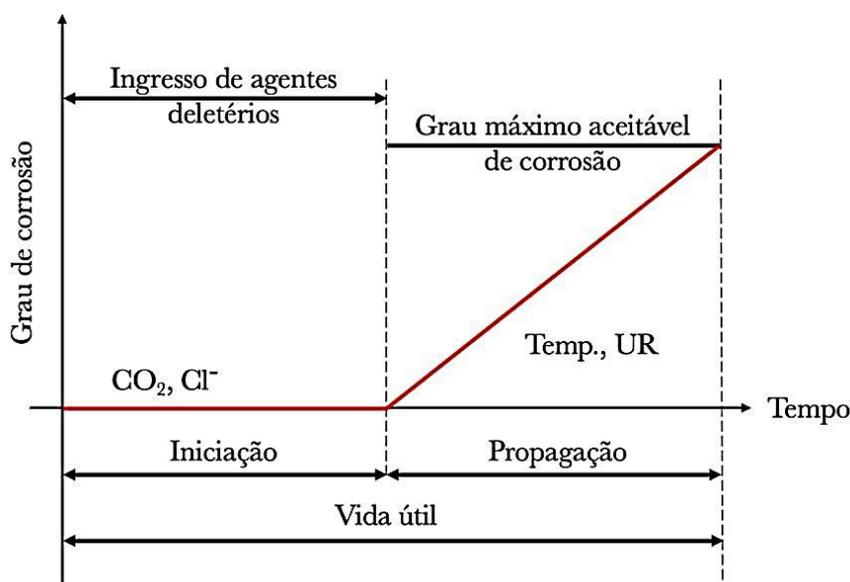


Figura 2.2 Modelo de vida útil proposto por Tuutti. Fonte: Tuutti, 1982 *apud* Wally, 2019.

Os cloretos podem advir tanto do meio externo, atingindo a armadura através do processo de difusão de cloretos, como também pode iniciar no interior do concreto, em decorrência da água de amassamento ou agregados contaminados, ou mesmo devido à presença de aditivos aceleradores de pega e endurecimento à base de cloretos de cálcio (CaCl_2). No entanto, a NBR 12655 (ABNT, 2015) proíbe o uso de aditivos que contenham em sua composição cloretos para uso em estruturas de concreto armado ou protendido. A **Figura 2.3** ilustra os fatores básicos para o início da corrosão no concreto (início do processo de propagação).

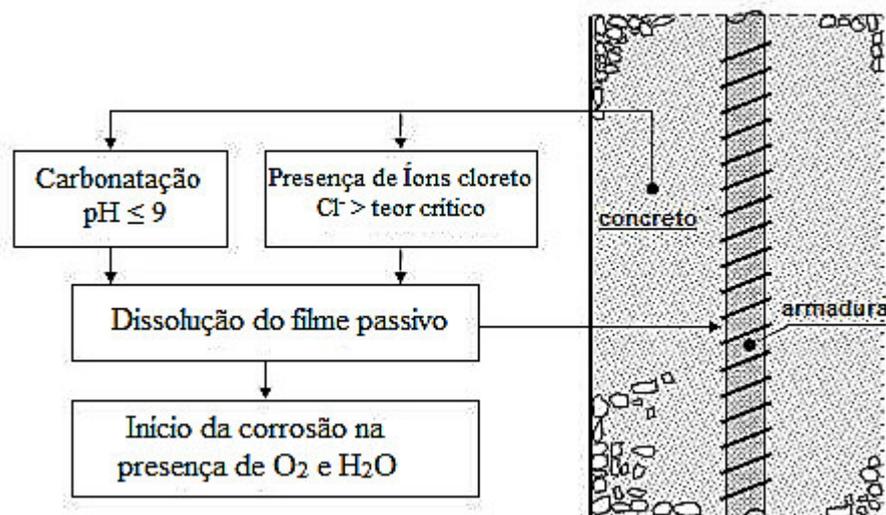


Figura 2.3 Mecanismos do processo de propagação da corrosão de armaduras em concreto. Fonte: adaptado de Apostolopoulos e Papadakis, 2008.

Segundo Cascudo (1997), o modelo proposto por Tuutti é consagrado e possui grande aceitação internacional, mas possui falhas por não apresentar um aprofundamento de dados quantitativos do processo corrosivo das estruturas e por não definir os níveis máximos de deterioração. Entretanto, trata-se de um modelo conceitual, cujo objetivo é demonstrar o comportamento do processo de vida útil como um todo.

Otieno *et al.* (2010) explicaram que a vida útil de serviço de estruturas do concreto armado, com relação à corrosão das armaduras, é usualmente modelada abrangendo fases distintas que seguem estados limites (de serviço e últimos) pré-definidos com distintos indicadores de dano induzidos pela corrosão. Tuutti (1982) não descreveu as diferentes subfases de dano produzidas pela corrosão induzida na fase de propagação.

Para Lorensini (2006), a modelagem do processo de corrosão da armadura é algo bastante complexo, visto que depende de fatores como concentração superficial de cloretos, coeficiente de difusão do cloreto no concreto, entre outros aspectos. O autor apresenta uma divisão do processo de deterioração estrutural devido ao ingresso de cloretos, a qual é apresentada na **Figura 2.4**.

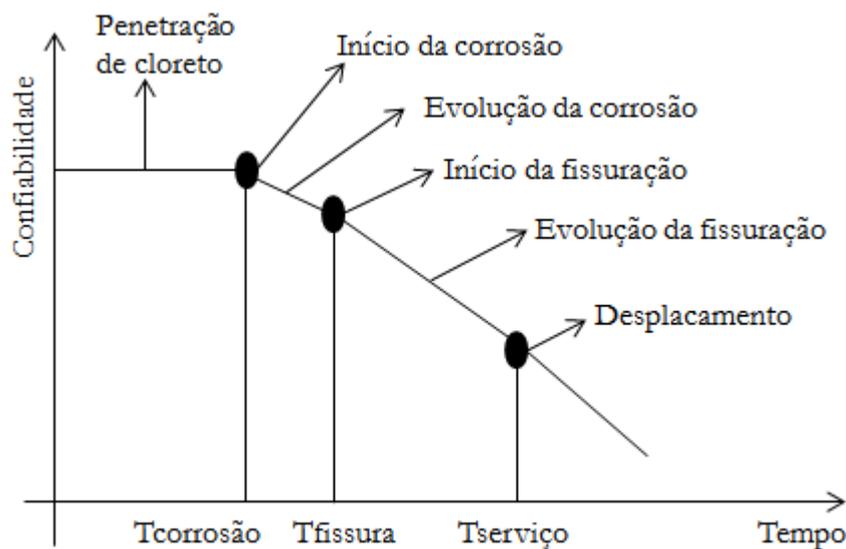


Figura 2.4 Perfil de confiabilidade estrutural devido à penetração de cloretos.
Fonte: adaptado de Lorensini, 2006.

De acordo com o mesmo autor, a definição da vida útil da estrutura é, portanto, dependente do estado limite considerado, isto é, se de serviço ou último. No caso do estado limite de serviço quanto à durabilidade, pode ser tomado como fator de controle o surgimento de fissuras causadas pela corrosão. Já para o estado limite último, o elemento de controle é a perda de resistência do elemento estrutural devido à redução da seção da armadura. No entanto, quando a fissuração passa a ser visível, sabe-se que o processo de corrosão das armaduras já foi desencadeado e dificilmente é cessado ou revertido, em função dessa situação que normalmente acaba se tomando a despassivação como estado limite.

O processo de propagação, por sua vez, consiste no desenvolvimento da corrosão até que se alcance um grau inaceitável do processo. Nesse período, ocorre uma grande redução do desempenho da estrutura devido à acelerada perda de seção de armadura e fissuração (STEWART e ROSOWSKY, 1998). A partir dessa mesma abordagem, Helene (1993) ampliou o modelo proposto por Tuutti (**Figura 2.5**) e define os seguintes períodos:

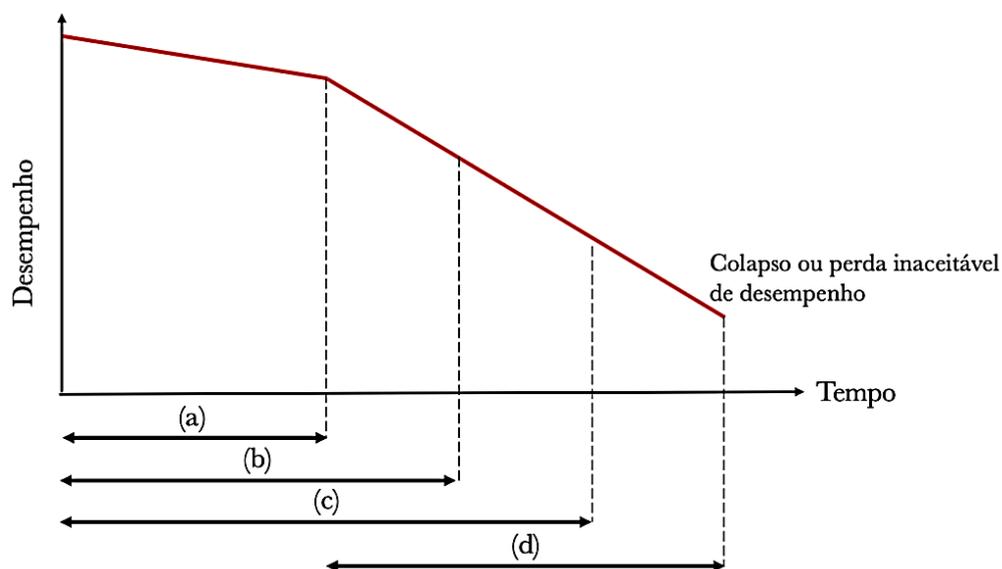


Figura 2.5 Modelo de vida útil proposto por Helene. Fonte: Helene, 1993 *apud* Wally, 2019.

- **(a) vida útil de projeto:** neste período, os agentes agressivos ainda estão penetrando através da rede de poros do revestimento de concreto, sem causar danos efetivos à estrutura. Este período se estende até a despassivação da armadura;
- **(b) vida útil de serviço:** os efeitos dos agentes agressivos começam a se manifestar através de manchas na superfície do concreto, surgimento de fissuras e ocorrência de descolamento do revestimento de concreto. No decorrer desse período, acontecem os reparos e manutenções para recuperação das condições de segurança, funcionalidade e estética superiores ou iguais às previstas no projeto;
- **(c) vida útil total:** ocorre uma redução significativa da seção da armadura ou perda de aderência aço/concreto, acarretando ruptura parcial ou total da estrutura;
- **(d) vida útil residual:** corresponde ao período em que a estrutura será capaz de desenvolver as suas funções após vistoria e/ou intervenção.

A NBR 15575 (ABNT, 2021) trata dos requisitos mínimos de desempenho que devem ser atendidos pelas edificações e, de acordo com essa norma, a vida útil de projeto mínima para edifícios e outras estruturas comuns é de 50 anos. No entanto, essa norma, não estabelece valores mínimos de vida útil para outras estruturas importantes, como pontes e viadutos, tampouco apresenta indicativos de como conduzir a modelagem matemática para a determinação desse período.

2.1.1 Cloretos no ambiente marinho

Os cloretos do meio ambiente podem penetrar no concreto através da estrutura dos poros capilares contínuos (da zona de interface), pelas fissuras, pelos mecanismos clássicos de ingresso de água ou por transporte de íons. Geralmente, a maioria dos problemas gerados pelos íons cloreto é provocada pelo ingresso desses íons a partir do meio ambiente (HELENE, 1993).

Helene (1993) e Neville (1997) afirmam ainda que no ataque dos cloretos em ambiente marinho, normalmente, se comparadas às zonas de névoa e submersas, ocorre maior penetração nas regiões com ciclos de molhagem e secagem, ou seja, nas zonas de respingos e de variação de marés. Em regiões litorâneas, a proximidade do mar faz com que a atmosfera possua íons cloreto. As partículas da água do mar contendo sais dissolvidos, quando em suspensão na atmosfera, são arrastadas pelo vento e podem se depositar nas estruturas e então o cloreto penetra por absorção ou difusão.

2.1.2 Mecanismos de transporte de cloretos

O transporte de agentes agressivos, na forma líquida, gasosa ou iônica, através da estrutura porosa do concreto é extremamente deletério ao mesmo, sendo um indicador da sua durabilidade e, portanto, importante para a previsão de vida útil. O fluxo desses agentes não depende somente da porosidade, mas também do tamanho e da continuidade dos poros (OLLIVIER e TORRENTI, 2014). A interação dos agentes deletérios, que se movimentam no interior do concreto, com seus componentes, tal como a solução dos poros e os produtos hidratados, pode desencadear várias reações, que em longo prazo, conduzem à deterioração do concreto.

Existem vários agentes agressivos que levam à deterioração do concreto e, dentre eles, destacam-se os sulfatos e os ácidos presentes, por exemplo, nas tubulações de esgoto e armazéns de fertilizantes, além do CO_2 presente em atmosferas de grandes cidades e os cloretos encontrados principalmente em ambientes marinhos. Cada uma dessas espécies é transportada de maneira diferente pelo interior do concreto e esse transporte ocorre devido à presença de umidade, variações de temperatura, pressão diferencial no material, diferenças de concentração das soluções no interior do concreto, entre outros fatores. Conforme Cascudo (1997), os agentes nocivos movimentam-se para o interior do concreto através dos mecanismos de transporte, incluindo absorção capilar, permeabilidade, migração e difusão.

Absorção Capilar

Absorção capilar é o processo pelo qual os líquidos, particularmente a água, podem ser transportados no concreto através dos poros capilares devido à tensão superficial. Esse mecanismo de transporte de água ocorre, normalmente, em concretos e argamassas de revestimentos (SILVA, 2011).

Segundo Silva (2006), a absorção capilar pode ser tomada como um bom indicativo da porosidade do concreto e, conseqüentemente, da resistência perante à penetração de agentes agressivos diluídos. Os principais fatores que regem esse fenômeno são intercomunicação, distribuição e tamanho dos poros, além do tipo líquido e a saturação do concreto (BAUER, 1995; NEVILLE, 1997; SILVA, 2006).

Migração

Migração iônica é o processo de transporte que ocorre quando existe uma diferença de potencial elétrico, que possibilita o deslocamento dos íons presentes para que se neutralize o efeito da diferença de potencial (RIBEIRO e CASCUDO, 2018). Conforme Cezar (2011), a diferença de potencial, normalmente, origina-se da presença de dois eletrodos, um positivo e outro negativo, de forma que os íons se dirigem de um eletrodo para o outro. Dessa forma, a movimentação iônica por migração pode permitir o fluxo de íons de regiões de maior tensão para regiões de menor tensão.

Permeabilidade

Segundo Ribeiro e Cascudo (2018), a permeabilidade é definida como o fluxo de um fluido devido a um gradiente de pressão, sendo caracterizada pela facilidade com a qual um fluido atravessa um sólido poroso sob uma diferença de pressão. Essa propriedade é de interesse para a estanqueidade de estruturas destinadas à contenção de líquidos (NEVILLE e BROOKS, 2013).

Os poros capilares da pasta, as microfissuras e a interface entre a matriz e os agregados graúdos têm grande influência no fluxo de água no concreto. Na pasta hidratada, o fluxo de água se produz através dos poros capilares interconectados, os quais dependem principalmente da relação a/c, do grau de saturação, a proporção dos materiais empregados na mistura, o método de cura, a microestrutura do composto, as características do fluido e a espessura do elemento de concreto (FIB, 2010; KESSY, 2013).

Difusão

A difusão é o processo de transporte de substâncias de um meio para outro devido à existência de um gradiente de concentração. De dois diferentes meios em contato íntimo e então a substância se difunde para igualar as concentrações (RIBEIRO e CASCUDO, 2018).

Conforme Santos (2006), esse fenômeno ocorre tanto para substâncias presentes em meio líquido como para aquelas em meio gasoso. Os dois principais agentes agressivos que comprometem as armaduras do concreto, os íons cloro e o dióxido de carbono (CO₂), têm a sua penetração controlada por esse fenômeno. Aliado a isso, a

penetração do oxigênio, substância essencial para o progresso do processo catódico, também se dá por difusão.

2.1.3 Teor crítico de cloretos

O processo de corrosão da armadura em concretos armados inicia-se quando a concentração de cloretos excede um determinado valor, a partir do qual ocorre a despassivação o aço presente no concreto, na presença de oxigênio e umidade (DUPRAT, 2007). Essa concentração depende de fatores como tipo do aço, características do ambiente, tipo de cimento, teor de C_3A no cimento, relação a/c , pH da solução dos poros, presença adições minerais e umidade e do método de detecção de despassivação (STEWART e ROSOWSKY, 1998; ZHANG e LOUINS, 2006; KWON *et al.*, 2009; ANGST *et al.*, 2009). No concreto, a quantidade de cloretos para despassivar o aço pode ser diferente da quantidade exigida nas argamassas devido a sua capacidade de fixar cloretos, à alcalinidade da solução de seus poros e a sua capacidade impedir ou dificultar a penetração dos íons cloreto (ALONSO *et al.*, 2000).

Segundo Neville (1997), para uma dada quantidade de íons cloretos na mistura, encontram-se muito mais íons cloretos livres com $NaCl$ do que com $CaCl_2$. Nota-se, portanto, que ainda não há um claro consenso a respeito da influência do tipo de sal na corrosão das armaduras, sendo que explicações para tais fatos ainda estão sendo buscadas pela comunidade científica.

A relação Cl/OH^- é o parâmetro mais aceito para se predizer o início do processo de corrosão das armaduras em concreto (ALONSO *et al.*, 1997), embora Thangavel e Rengaswamy (1998) afirmem que essa relação não é um índice apropriado para prever a corrosão, sugerindo considerar o papel do teor de cloretos inicial na mistura, as condições de exposição do elemento estrutural e a difusão de oxigênio, além de outros parâmetros importantes. Como há certa dificuldade em medir proporções de OH^- no concreto, também são utilizados outros parâmetros para expressar o risco da corrosão, tais como a quantidade de cloretos totais ou livres em relação à massa de cimento ou concreto, ou ainda em relação à água de amassamento, devido à grande vantagem e facilidade desses métodos, sendo que algumas normas já expressam seus valores limites em função desses parâmetros (GLASS e BUENFELD, 1997).

Tuutti (1980) afirma que somente a concentração de cloretos livres interessa para a iniciação da corrosão, entretanto, é conveniente determinar os cloretos totais, pois parte dos cloretos combinados com a fase hidratada do cimento podem vir a ficar disponíveis em reações deletérias devido a fenômenos de carbonatação ou elevação de temperatura (ANDRADE, 1992; HELENE, 1993). Segundo Glass e Buenfield (1997), das representações correntes, o conteúdo total de cloretos expresso em relação à massa de cimento é o parâmetro que melhor apresenta o nível limite de cloretos para que não haja corrosão, pois essa representação pode ser vista como o conteúdo potencial total do íon agressivo expresso relativamente ao conteúdo potencial total inibidor. Para tais

autores, a melhor maneira de se representar o risco de corrosão seria expressar o conteúdo total de cloretos em relação à alcalinidade total do concreto.

Quando o concreto não estiver carbonatado, 0,05 % de cloretos em relação à massa do concreto, ou 0,4 % de cloretos em relação à massa de cimento (para um consumo de 300 kg/m³) é um bom critério para determinar danos incipientes devido à corrosão, conforme a **Figura 2.6**. Como o aço para protensão é mais sensível à corrosão, um limite inferior de 0,025 % de cloretos em relação à massa de concreto, ou 0,2 % em relação à massa do cimento (para um consumo de 300 kg/m³), é recomendado para estruturas protendidas.

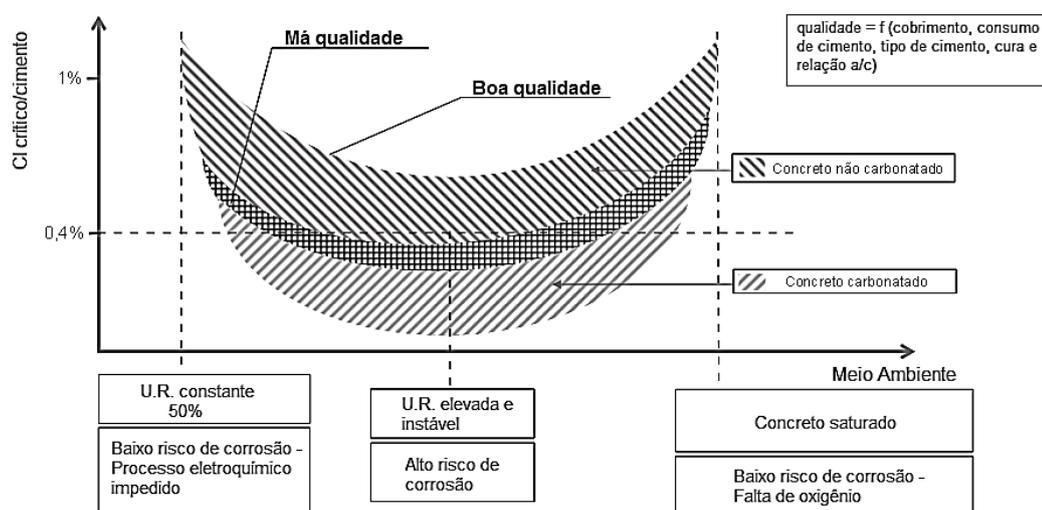


Figura 2.6 Relação do teor crítico de cloretos às condições ambientais e qualidade do concreto. Fonte: Andrade, 1992.

Alguns países, em razão da ação corrosiva dos cloretos, limitam seu valor em relação à massa de cimento ou volume de concreto. A **Tabela 2.1** apresenta os limites máximos de cloretos aceitos por normas de diversos países.

Tabela 2.1 Valor crítico de cloretos em concreto segundo normas internacionais.

Norma/Local	Teor Crítico de cloretos recomendados	Referência de teor de cloretos
NBR 12655 (ABNT, 2015) Brasil	$\leq 0,15$ % em concretos expostos a cloretos	Cloretos totais (% massa de cimento)
	$\leq 0,30$ % em concretos não expostos a cloretos	
	$\leq 0,40$ % em concretos em brandas condições de exposição (seco ou protegido de umidade)	
EN 206-1 (ECS, 2013) Europa	$\leq 0,10$ a $0,20$ % (concreto protendido)	
	$\leq 0,20$ a $0,40$ % (concreto armado)	
Bulletin 34 (FIB, 2006) Suíça	$\leq 0,20$ %	
EHE – 08 (CPH, 2011) Espanha	$\leq 0,60$ % (concreto armado)	
	$\leq 0,30$ % (concreto protendido)	
Hong Kong Building Depart (HJBD, 2016) China	$\leq 0,10$ % (concreto protendido)	
	$\leq 0,20$ % (com cimento resistente a sulfato)	
	$\leq 0,35$ % (com cimento Portland de endurecimento rápido)	
ACI 318-08 (ACI, 2019) EUA	$\leq 0,15$ % em ambiente com cloretos	
	$\leq 0,30$ % em ambiente normal	
	$\leq 1,0$ % em ambiente seco	
	$\leq 0,06$ % (concreto protendido)	
BS 8110:1 (BSI, 1997) Inglaterra	$\leq 0,10$ %	
Committee 222 (ACI, 2002) EUA	$\leq 0,08$ % (concreto protendido)	Cloretos totais (% massa de cimento)
	$\leq 0,10$ % (concreto armado) úmido	
	$\leq 0,20$ % (concreto armado) seco	
	$\leq 0,06$ % (concreto protendido)	Cloretos livres (% massa de cimento)
	$\leq 0,08$ % (concreto armado) úmido	
NZS 3101 (NZS, 2006) Nova Zelândia	$\leq 0,02$ % (concreto protendido)	Cloretos totais (% massa de cimento)
	$\leq 0,03$ % (concreto armado) úmido	
	$\leq 0,07$ % (concreto armado) seco	
AS 3600 (AS, 2018) Austrália	$\leq 0,22$ %	
NS 3474 (NS, 2005) Noruega	$\leq 0,40$ %	
JSCE-15 (JSCE, 2010) Japão	$\leq 1,20$ kg/m ³ de concreto	

Fonte: Adaptado de Gentil, 2012, p. 216 e Magalhães, 2018, p. 36.

A dubiedade do valor crítico de cloretos transcende para as normas de diversos países, as quais possuem os mais variados valores limites de cloretos, expressos das mais variadas formas.

Por outro lado, a NBR 15900-6 (ABNT, 2009) limita o teor máximo de cloretos em relação à água de amassamento; entretanto, não se deve realizar essa consideração, em relação a fixação do teor de cloretos em função da água de amassamento, fato que implicaria em elevados teores de cloretos para elevadas relações a/c, ou seja, quanto mais água, maior é a quantidade de cloretos permitida no concreto, o que é incoerente (HELENE, 1993).

De acordo com Ann e Song (2007), os primeiros estudos acerca da ação dos íons cloreto no desencadeamento do processo corrosivo sugeriam que apenas os cloretos livres contribuía para o processo de corrosão e que, portanto, o teor crítico de cloretos era mais bem representado por meio deles. Esses estudos consideravam que os cloretos fixos (quimicamente ligados ou fisicamente adsorvidos) eram liberados por meio da redução do pH (despassivação) e, que os produtos de hidratação do cimento, como hidróxido de cálcio, mantinham o pH em um valor particular. Entretanto, deve-se notar que as normas atuais não abordam o teor de cloretos livres em relação ao risco de corrosão, em grande parte, pelas mesmas razões mencionadas.

2.1.4 Propriedades que afetam a difusividade ao longo do tempo

De acordo com Zhang *et al.* (2019), por se tratar de um material poroso, a difusividade no concreto é afetada por diversos fatores, como as características das matérias-primas, temperatura do ambiente e umidade relativa, proporções de mistura, processo de hidratação e etc (NOKKEN *et al.*, 2006). Atualmente, pesquisas buscam desenvolver uma metodologia simplificada, que possibilite por meio da resistividade do concreto e a taxa de corrosão, seja possível avaliar os estágios de corrosão e a vida útil das estruturas com eficiência e viabilidade econômica (MEDEIROS-JUNIOR *et al.*, 2015a). Na parte experimental, existem testes de exposição de longo prazo em ambiente natural (WEERDT *et al.*, 2016) ou simulações aceleradas visando reproduzir o ambiente em análise (YU *et al.*, 2015).

No que diz respeito à difusividade, essa propriedade está diretamente atrelada ao amadurecimento do concreto ao longo do tempo, o que pode ser expresso com base no fator de envelhecimento, buscando assim refletir a durabilidade do concreto frente a diversos fatores (CLIMENT *et al.*, 2002).

Pesquisas anteriores mostraram que o coeficiente de difusão diminuiu ao longo do tempo de exposição (BHARGAVA *et al.*, 2011; PETCHERDCHOO, 2013), devido à hidratação contínua dos materiais cimentícios e da microestrutura do concreto (SUN *et al.*, 2012). Além disso, essa redução é influenciada pela relação a/c (BHARGAVA *et al.*, 2011), materiais utilizados na preparação do concreto (PETCHERDCHOO, 2013) e tempo de exposição (SUN *et al.*, 2012). Assim, a difusividade do clo-

reto no concreto é dependente do tempo, que geralmente é expresso em função do tempo de hidratação do cimento (MANGAT e MOLLOY, 1994; MAAGE *et al.*, 1996).

Além disso, a maturidade do concreto depende de sua composição e, assim, a redução dos coeficientes de difusão é inconstante durante toda a evolução da hidratação do concreto. Em geral, o uso de adições no concreto pode efetivamente melhorar a resistência ao ingresso de íons cloreto, entretanto, os efeitos tendem a ser distintos a depender das reações químicas induzidas e das propriedades físicas dessas adições (FA-RAHANI *et al.*, 2015). Portanto, o tempo no qual a difusividade é estável está relacionado aos tipos de adições (MEDEIROS-JUNIOR *et al.*, 2015b), uma vez que a hidratação do cimento é um processo contínuo (PETCHERDCHOO, 2013). Dessa forma, não existem padronizações a respeito das porcentagens de substituição de cimento Portland por adições minerais visando à diminuição da difusividade do concreto. Pelo contrário, deve-se trabalhar buscando alcançar uma maior durabilidade do concreto, e partindo dessa premissa, utilizar as adições minerais da melhor maneira possível visando obter a redução da difusividade e consecutivamente, um ganho de vida útil.

Sobre análises de concretos contendo adições minerais, Weerdt *et al.* (2016) relataram que ambientes controlados artificiais normalmente não refletem com fidelidade o meio ambiente natural de exposição e, em virtude disso, concluíram embora os pesquisadores tenham realizado análises em concretos contendo resíduos industriais e de mineração, o problema apontado está mais relacionado à distorção de resultados causada pela aceleração do fenômeno do que propriamente à adição dos resíduos industriais e de mineração.

Song *et al.* (2008) descreveram a sistemática influência da relação a/c , aliada a substituições parciais de adições minerais e controle das condições de cura, visando controle do coeficiente de difusão de cloreto (D) e concentração de superfície de cloreto (C_s), em virtude desses parâmetros serem variáveis no tempo. Valipour *et al.* (2013) também discutiram as influências do traço do concreto, das condições de cura e das condições de exposição no comportamento de penetração de cloretos. Em linhas gerais, dentre os fatores avaliados, os autores concluíram que a relação a/c e adições minerais possuem as maiores influências no transporte de íons cloreto, o que corroborou resultados provenientes de outros estudos (SHI *et al.*, 2012; SAASSOUH e LOUNIS, 2012).

Ao se referir à dependência do tempo do transporte de cloreto, com base nos dados coletados de 11 pontes de concreto, Pack *et al.* (2010) construíram um modelo de predição para descrever o coeficiente de difusão (D) e a concentração superficial de cloretos (C_s) em função do tempo. O modelo também foi comparado com o modelo mais utilizado nos Estados Unidos, o modelo Life 365. Trabalhos semelhantes também foram apresentados por Petcherdchoo (2013) e Muthulingam e Rao (2016), os quais objetivaram comparar o concreto contendo cinza volante ao concreto de cimento Portland comum. Além disso, foram realizadas investigações laboratoriais por Wang *et al.*

(2016), onde observou-se que uma estrutura sob efeito do processo de compressão sofre influência nos valores de difusividade ao longo do tempo.

Além dos fatores já elencados dentro deste item, observa-se a influência da temperatura do ambiente no processo de deterioração de uma estrutura de concreto armado, pois com a elevação da temperatura ocorre o aumento da salinidade da água do mar e a interação química com materiais cimentícios. Na literatura existente, trabalhos como o estudo desenvolvido por Loreto *et al.* (2018), contribuem para um maior entendimento a respeito da influência de determinadas variáveis na penetração de cloretos em estruturas de concreto armado.

O estudo proposto por Loreto *et al.* (2018) realizou uma longa investigação em pontes de concreto armado nos EUA, através de análises visuais, dados coletados em campo e a utilização de modelagem numérica visando avaliar as condições de estruturas projetadas para alcançar uma vida útil de 75 anos. A avaliação visual ajudou na identificação de áreas com sinais evidentes de deterioração, possibilitando a confecção de um mapa de prioridades. Testes no local permitiram a obtenção de dados para medir o potencial de corrosão, a taxa de corrosão das armaduras e a resistividade elétrica do concreto. Por fim, através da coleta de dados em campo, foi possível realizar testes laboratoriais com materiais coletados em diferentes pontos da estrutura. Por meio desses testes, avaliou-se a resistência à compressão e a concentração de cloretos e foi possível calcular o tempo para o início da corrosão, com a utilização de um modelo semiprobabilístico. Através do modelo numérico, pôde-se realizar a comparação da vida útil da estrutura com a vida útil estimada pelo modelo matemático, e os resultados mostram que a abordagem adotada pode ser utilizada para avaliação de estruturas novas e existentes. Além disso, os autores concluíram que a seleção de materiais específicos em função da região onde determinada estrutura será construída pode impactar diretamente na vida útil, sendo uma variável essencial na consideração dos projetistas.

Costa e Appleton (2002) realizaram um estudo a respeito de um deck naval construído em meados dos anos 70 usando um concreto de baixa qualidade, cuja resistência característica era de 22,5MPa, teor de cimento de 300kg/m³ e relação a/c de 0,7. Segundo os autores, o processo de concretagem e cura do concreto foram inadequados, pois o material apresentou zonas de segregação e más juntas de concreto. A deterioração sofrida pela estrutura esteve condicionada às zonas de exposição, sendo observada a maior degradação no lado interno das paredes do deck. Após cinco anos de exposição, o concreto foi profundamente contaminado por cloretos na profundidade da armadura. Após 10 anos de exposição, uma delaminação geral ocorreu, acompanhada de descamação do concreto de cobertura até o nível atingido pela água salgada. A taxa de deterioração extremamente alta observada nas paredes internas pode ser explicada pelas condições de exposição, a má qualidade do concreto e os ciclos de molhagem do concreto.

Lindvall (2007) observou que o teor de íons cloreto aparente da superfície diminuiu enquanto o coeficiente de difusão de cloreto aumentou com o aumento de tem-

peratura de exposição. Também deve ser notado que a influência da temperatura é limitada devido à relativa estabilidade da temperatura de exposição nesse local de campo (variando principalmente de 10 a 17 °C). Balestra (2013) relatou que uma estrutura de concreto exposta no ambiente marinho da Ilha dos Arvoredos, cidade de Guarujá, Brasil, apresentou maior entrada de cloretos no lado direito das colunas do que no lado esquerdo, o que foi explicado pelo lado direito estar voltado diretamente para o vento marítimo predominante. Isso indica que além da temperatura, os efeitos ambientais também contribuem para a variação dos níveis de deterioração da estrutura de concreto exposta em ambiente marinho. As altas concentrações de sal resultam em reatividade aumentada, enquanto que a alta umidade relativa do ar no entorno leva mais água livre para os poros do concreto, facilitando a penetração de íons externos e ações químicas entre íons e fases sólidas.

Os fatores que influenciam na penetração de íons cloreto em concretos podem ser inerentes ao próprio material ou estarem relacionados com o ambiente e as condições de exposição. Segundo Ribeiro e Cascudo (2018), a qualidade do concreto é essencial para uma boa durabilidade da estrutura já que a dificuldade para o ingresso de agentes agressivos depende da complexa microestrutura formada durante a hidratação do cimento, que influencia diretamente na capacidade de transporte de massa na rede de poros. Portanto, a composição química e a finura do cimento, o processo de cura do concreto, a presença de adições minerais, a relação a/c e o teor de argamassa são fatores que influenciam na velocidade de transporte de cloretos no concreto.

Grau de saturação

Segundo estudo de Guimarães e Helene (2001), o grau de saturação tem grande influência sobre a difusão de cloretos no concreto, sendo que essa propriedade deve ser levada em consideração na previsão da vida útil de estruturas de concreto armado. Guimarães (2000) constatou que, com a redução do grau de saturação de 100 % para 85 %, a seção transversal de difusão de íons diminui rapidamente, restando na rede de poros apenas água adsorvida. Dessa forma, os íons cloreto precisam percorrer distâncias maiores, pois precisam circundar o poro para conseguir ultrapassá-lo. Em concretos sem a presença de água não ocorre o processo de difusão de cloretos.

Um dos parâmetros mais importantes que governam a solução da 2ª Lei de Fick para penetração de cloretos é o coeficiente de difusão de cloretos (D). O processo de difusão dos íons cloreto ocorre apenas em meio aquoso, logo se faz necessária a presença de água na microestrutura de poros do concreto para que haja movimentação iônica. A forte influência do grau de saturação do concreto sobre D já foi comprovada, sendo essencial para correta avaliação da penetração de íons cloreto no concreto (GUIMARÃES e HELENE, 2001; MERCADO-MENDOZA *et al.*, 2012; MERCADO-MENDOZA *et al.*, 2014). Apesar da comprovada influência do grau de saturação sobre o coeficiente de difusão, a medição dessa propriedade do concreto enfrenta dificul-

dades técnicas e econômicas, dificultando seu uso. Busca-se então facilitar o processo de obtenção do grau de saturação, avaliando-se as condições ambientais a que o concreto está exposto.

Diversos fatores podem gerar variação no grau de saturação do concreto, tais como zona de inserção, características do concreto, posição da superfície exposta em relação à superfície de concretagem, condições de exposição no ambiente tais como sentido da superfície (horizontal ou vertical) e orientação (norte, sul, leste, oeste, para cima e para baixo). Para as diversas situações de exposição relatadas, o grau de saturação do concreto pode ser influenciado pelas condições meteorológicas locais. Peraça (2009) relatou que para as condições de exposição de seus corpos de prova na cidade de Rio Grande, localizada no extremo sul do Brasil, as variáveis ambientais mais influentes foram a temperatura máxima (TM) e a umidade relativa do ar (UR). Vílchez (2011) em Santa Pola (Alicante/Espanha) encontrou como variáveis mais influentes a temperatura máxima, a taxa de precipitação (TP), o tempo de insolação (HI) e a umidade relativa do ar (UR).

Nesse contexto, estudos de Almenar (2000) e Nielsen e Geiger (2003) correlacionaram o grau de saturação dos poros do concreto com o coeficiente de difusão de cloretos, evidenciando o aumento desses coeficientes à medida em que o grau de saturação se elevou, como pode ser observado na **Figura 2.7**.

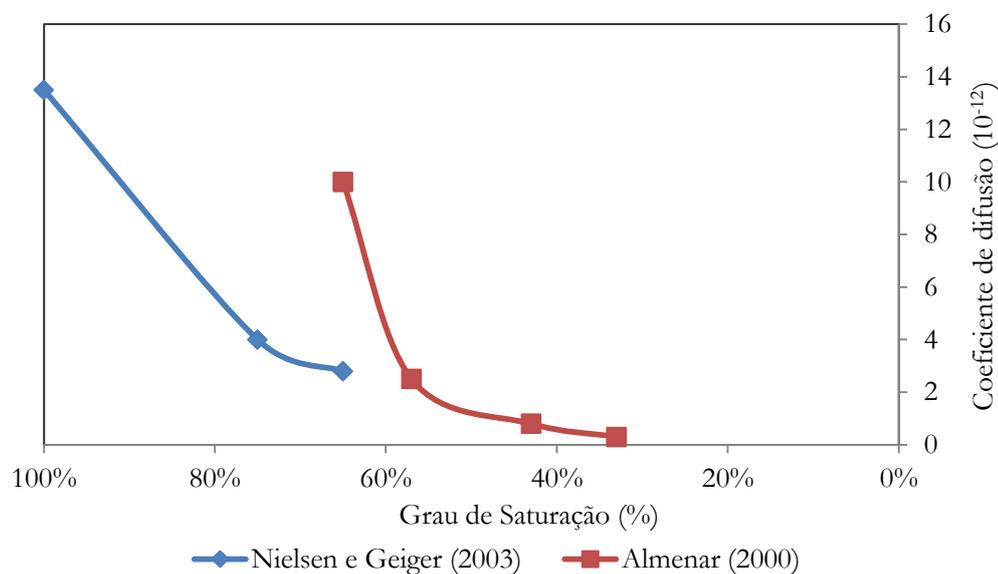


Figura 2.7 Influência do grau de saturação dos poros na difusividade de cloretos em concretos. Fonte: adaptado de MEIRA, 2004.

Tempo de cura

Conforme estudos apresentados pelos pesquisadores Aïtcin (2000) e Page *et al.* (1981) *apud* Meira (2004), as condições de cura possuem um efeito sobre as proprieda-

des de transporte de pastas de cimento endurecidas e, por conseguinte, sobre a difusibilidade efetiva dos íons cloreto. De acordo com esses pesquisadores, as condições de cura modificam a estrutura dos poros da pasta e, dessa forma, alteraram a porosidade final.

A conexão entre os poros, suas formas e tortuosidades são características fundamentais a serem analisadas quando se deseja avaliar a permeabilidade de um concreto. Os poros de maior importância são os contínuos (interconectados), com raios entre 10^{-2} e 10^{-8} m, que influenciam muito na capacidade de transporte de agentes através do concreto, diferentemente dos descontínuos, que são irrelevantes para esse aspecto (NEVILLE, 2011).

O excesso de poros com diâmetros maiores (500 Å) podem aumentar a permeabilidade e também prejudicar a resistência mecânica do concreto, ao passo que os poros de menores diâmetros geralmente interferem na retração e na fluência (KHIARA, 2005).

Por isso, o aumento no tempo de cura do concreto acarreta significativa redução da porosidade da pasta com o decorrer do tempo. Assim, um concreto com curto período de cura está mais suscetível a sofrer ataque por cloretos que um concreto que recebeu uma cura mais prolongada.

No estudo apresentado por Crauss (2011) foram avaliadas as influências do tipo de cimento, da relação a/c e do tempo de cura na penetração de cloretos em concreto. Os resultados apresentados pela autora corroboram estudos anteriores que demonstram que quanto menor a relação a/c, menor a penetração de íons cloreto. Em relação ao tempo de cura, tal processo demonstrou-se eficiente, através da diminuição dos valores de cloreto encontrados no concreto com o aumento do tempo de cura. Aliado a esse fator, o tipo de cimento também interfere na penetração de íons cloretos, pois concretos produzidos com CP-IV obtiveram menores índices de cloretos quando comparados com concretos produzidos com CP-II-F e CP-V.

Relação água/cimento

A relação a/c é um dos fatores que mais exercem influência na penetração dos íons cloreto, pois é determinante para definir características como porosidade, capacidade de absorção e permeabilidade da pasta (GOMES, 2001; SILVA, 2011; GJØRV, 2014). Pode ser afirmado que quanto maior for a relação a/c, maior será a porosidade e permeabilidade do concreto, ocasionando uma maior penetração de cloretos.

Caré (2007) destacou que a relação a/c e o efeito da temperatura sobre a porosidade modificam a estrutura dos poros, ocasionando um aumento na penetração de cloretos, em uma maior relação a/c, relacionado com o aumento da temperatura.

Segundo Sato e Agopyan (1998), ao estudarem concretos com mesma relação a/c e diferentes porosidades, observaram diferentes percentuais no teor de umidade quando expostos ao vapor de água presente na atmosfera. Os pesquisadores enfatizam que o

teor de umidade controla o acesso de agentes agressivos ao interior do concreto, além da resistividade elétrica, que por sua vez, influencia na velocidade de corrosão das armaduras.

Ainda segundo os pesquisadores, no caso da difusividade de água, parâmetro que foi utilizado para caracterizar a penetração de água em concretos também não saturados, sem a aplicação de pressões externas, observou-se que o concreto de maior volume de poros maiores apresentou difusividade bem maior que os outros concretos, havendo também uma indicação de que os concretos com poros menores apresentam menor difusividade à água.

Desse modo, à medida que há uma redução na relação a/c , o coeficiente de difusão efetivo de cloretos diminui tendo em vista que a velocidade de transporte destes agentes agressivos no interior do concreto se reduz devido à obtenção de uma menor porosidade na matriz do concreto (OLLIVIER e TORRENTI, 2014), conforme a **Figura 2.8**.

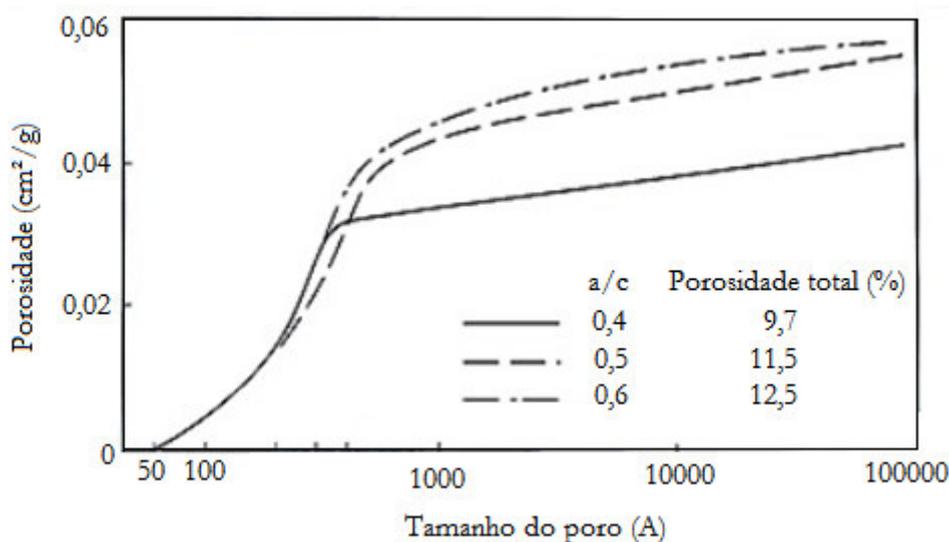


Figura 2.8 Efeitos da variação da relação a/c na distribuição de poros de concretos produzidos com cimento Portland puro. Fonte: Magalhães, 2019.

Por sua vez, Mangat e Molloy (1994) apontaram que o parâmetro decisivo na proteção das armaduras de concretos monitorados eletroquimicamente e submetidos a ciclos de molhagem e secagem por jatos de solução salina com cloreto de sódio (NaCl) foi a relação a/c .

Do mesmo modo, Silvestro *et al.* (2021) avaliou os efeitos da relação a/c na penetração de cloretos em concretos contendo sílica ativa, de modo que os resultados apresentados na **Figura 2.9**, evidenciaram que alguns traços avaliados, durante o período de 9 anos de exposição, já apresentavam concentração de cloretos próxima do limite

crítico para a despassivação das armaduras em profundidades iguais ou até mesmo superiores a 15 mm, indicando que podem apresentar problemas em relação ao atendimento da vida útil estabelecida pelas normativas brasileiras. Em relação à concentração de cloretos em profundidades maiores (25 mm), fica clara a maior penetração desses íons em concretos com relações a/agl mais elevadas. Avaliando a concentração de cloretos na profundidade de 25 mm, os concretos moldados com cimento CP V e relações $a/agl = 0,45, 0,55$ e $0,65$. Deve-se evidenciar que a concentração de cloretos nos concretos destas relações a/agl foram superiores a concentração superficial de cloretos em função da alta precipitação de chuvas em período próximo a realização das análises realizadas no estudo, efeito denominado por Castro-Borges *et al.* (2013) como lavagem superficial, que tende a lixiviar a camada externa do concreto, reduzindo a concentração superficial de cloretos nessa região. Em contrapartida, observa-se que a adição de sílica ativa em teores de 5 % e 10 % proporcionaram melhorias a resistência do concreto frente à penetração de cloretos.

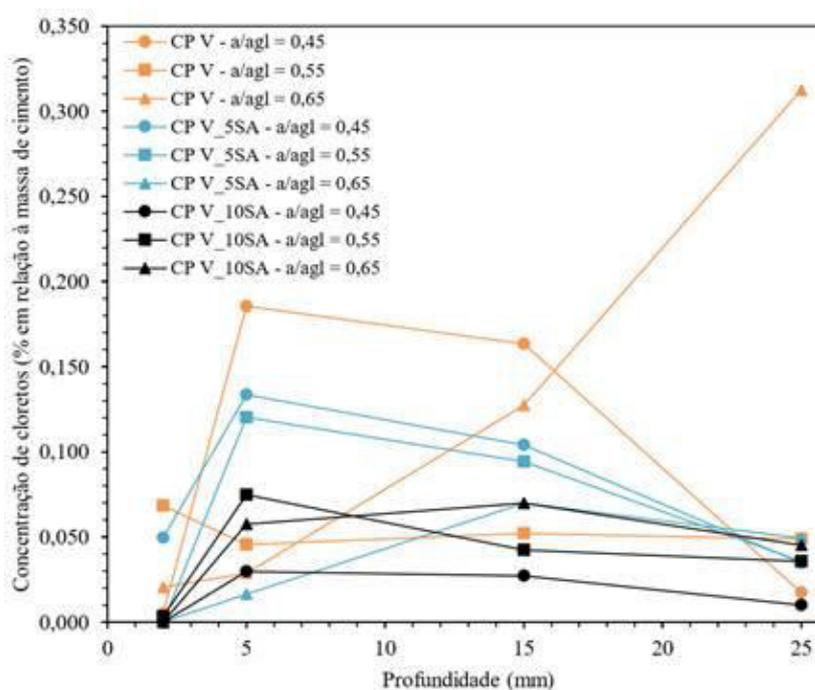


Figura 2.9 Efeitos da relação a/c na penetração de cloretos.

Fonte: SILVESTRO *et al.*, 2021.

É possível perceber que a relação a/c é um fator muito importante a ser considerado na construção de uma estrutura de concreto armado em ambiente agressivo de íons cloreto. Contudo, segundo Bertolini *et al.* (2004), em ambientes onde há predominância de contaminação por cloretos, o tipo de cimento utilizado no concreto tem uma importância ainda maior do que a relação a/c . Portanto, será abordada a influên-

cia das adições minerais no cimento e suas consequências nas propriedades e microestrutura do concreto.

Adições minerais

A indústria do cimento é uma das principais fontes geradoras de dióxido de carbono (CO_2). Estima-se que para cada tonelada de clínquer produzida, principal matéria-prima do cimento, seja emitida cerca de uma tonelada de CO_2 na atmosfera (CAS-SGNABERE, 2009). Estudos apontam que aproximadamente 5 % de todas as emissões de CO_2 de origem antrópica no mundo provêm da produção do cimento (KIHARA e VISEDO, 2014).

O impacto ambiental decorrente da demanda de energia e das emissões de CO_2 pelo processo de produção do cimento tem aumentado a busca por uma engenharia mais sustentável, que, entre outros aspectos, se baseie na maximização da durabilidade do concreto, a conservação de materiais e na utilização de resíduos e de materiais cimentícios suplementares (BERNDT, 2009).

Um subproduto industrial considerado um resíduo por um determinado setor industrial, como a cinza volante, a escória de alto-forno, a sílica ativa e a cinza de casca de arroz, pode possuir certa capacidade pozolânica e encontrar alguma aplicação em outro setor, por exemplo, como substituto parcial do cimento Portland nas construções em concreto. Nesse sentido, a utilização dos chamados materiais cimentícios suplementares e/ou materiais pozolânicos surge como uma alternativa menos nociva ao meio ambiente, em relação ao cimento comum e, quando adequadamente empregados, podem conferir benefícios em determinadas propriedades de interesse aos concretos (MADRID *et al.*, 2016).

Além de representar uma relevante medida de controle e de redução das emissões de CO_2 pela indústria (KIHARA e VISEDO, 2014), a utilização de resíduos, como a escória de alto-forno, em cimentos ajuda a solucionar a questão de armazenamento e eliminação desses resíduos, os quais são gerados em quantidades muito elevadas por outras indústrias. As adições minerais podem ser usadas em concretos tanto como um aglutinante adicional, introduzido na mistura durante a concepção, quanto como um constituinte do cimento, sendo misturadas diretamente ao clínquer (YILDIRIM *et al.*, 2011).

Neste contexto, o emprego desses materiais tem sido cada vez mais comum nos projetos em razão dos atributos positivos associados ao seu uso, refletindo, geralmente, em melhores propriedades mecânicas, de durabilidade, além de maior sustentabilidade e ganhos econômicos (OTIENO *et al.*, 2014).

De fato, a incorporação de materiais pozolânicos finamente moídos, como adições ou em substituição ao cimento comum, aumentam, quando utilizados em teores adequados, a durabilidade dos concretos. Ocorre que a hidratação do cimento Portland resulta, principalmente, na produção de cristais de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$),

chamados de portlandita, e de um gel amorfo de silicato de cálcio hidratado, comumente chamado de C-S-H. Em geral, são formados no processo, aproximadamente, 70 % de C-S-H, 20 % de Ca(OH)_2 , 7 % de sulfoaluminatos e 3 % de fases secundárias. O Ca(OH)_2 , parcialmente solúvel em água, afeta negativamente a qualidade do concreto, formando cavidades e oferecendo baixa resistência mecânica. Nesse sentido, o uso das pozolanas tem um efeito positivo, pois reagem com o Ca(OH)_2 formando produtos de hidratação secundários mais resistentes, como C-S-H, que por sua vez preenchem os vazios capilares grandes e refinam a estrutura dos poros (ASTM, 2000; ONER e AKYUZ, 2007).

As adições minerais podem ser classificadas quanto à sua atuação, sendo divididas entre aquelas com ação pozolânica, ação cimentante e as que atuam somente como filler (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Como dito, as adições minerais com ação pozolânica consomem o Ca(OH)_2 livre para formar silicato de cálcio hidratado (C-S-H), enquanto que os materiais com ação cimentante formam o mesmo produto a partir da reação com a água, sem interagir, obrigatoriamente, com o Ca(OH)_2 (NEVILLE, 2011).

Além de ganhos, tais como as reduções de porosidade, de demanda de energia e de geração de CO_2 , eventualmente, as adições minerais melhoram também a interface da pasta com o agregado e reduzem o risco de fissurações térmicas no concreto (ONER e AKYUZ, 2007).

Em decorrência da melhor distribuição das dimensões dos poros e da maior densificação da interface entre a matriz e o agregado, a utilização de cimentos compostos e das adições minerais possibilitam, por exemplo, uma maior resistência à penetração dos íons cloretos (HELENE, 1993; FIGUEIREDO, 2005; OLLIVIER e TORRENTI, 2014).

As adições minerais afetam também a composição iônica da solução de poros do concreto (REAL *et al.*, 2015). Elas levam a uma alteração nos hidratos do cimento, conduzindo a uma redução na mobilidade dos íons cloreto (BASHEER, 2002), isto é, acarretam uma redução da velocidade de transporte desses agentes agressivos no concreto (MEIRA, 2017). Isso se deve ao fato de que as pozolanas e, em particular, as cinzas volantes e as escórias de alto-forno, por apresentarem em sua composição teores mais elevados de aluminatos se comparados aos encontrados no clínquer, promovem alterações na estrutura de poros e na composição da solução aquosa, além de um aumento da capacidade de fixação dos íons cloreto, o que potencializa a resistência do concreto quanto ao ataque por esses agentes agressivos (ISAIA, 1995; PEREIRA, 2001).

Sob outra perspectiva, o uso crescente de adições pozolânicas incorporadas ao cimento ou diretamente inseridas na mistura do concreto leva a uma diminuição do pH da solução dos poros. Isso faz com que a vantagem do uso dessas adições minerais seja mais pronunciada para adições mais ativas e para as dosagens com relação a/c mais baixas (MEIRA, 2017).

Ademais, os efeitos benéficos na resistência à penetração de cloretos pela utilização dessas adições são oriundos também do aumento da finura destes materiais em relação ao cimento. Lim *et al.* (2016) constataram, que o aumento da finura da escória de alto-forno aumenta a área superficial disponível para reações de hidratação, o que pode melhorar as propriedades do concreto nas primeiras idades, bem como, no longo prazo, as propriedades mecânicas e de durabilidade. Segundo Gjörv (2014), a moagem da escória de alto-forno até uma finura Blaine de 16.000 cm²/g, por exemplo, propicia uma resistência extremamente alta à penetração de íons cloreto.

Em estudos com diferentes tipos de cimento, Mehta *et al.* (1992) *apud* Helene, (1993) encontraram o mais alto coeficiente efetivo de difusão nos concretos produzidos com cimento Portland resistente a sulfatos, que por sua vez, possuem baixo teor de aluminato tricálcico (C₃A). Os menores coeficientes efetivos de difusão, isto é, as maiores resistências à penetração de cloretos se deram pela utilização dos cimentos com microssilica e, principalmente, pelos cimentos com adição de escória de alto-forno.

Do mesmo modo, Gjörv (2014), ao realizar testes de campo prolongado em estruturas de concreto de portos noruegueses, verificou que a melhor resistência à ação de cloretos foi observada para os cimentos compostos com escória de alto-forno, enquanto que a menor resistência foi obtida para os cimentos Portland puros. Esses resultados corroboram com os obtidos por Page *et al.* (1986) e Page *et al.* (1981), ao constatarem que a adição de escória de alto-forno e de cinza volante levava a uma relevante diminuição da difusividade dos cloretos em relação ao cimento Portland puro, como retrata a **Tabela 2.2.**

Tabela 2.2 Difusividade de cloretos, a 25°C, em pastas com relação a/c igual a 0,5. Fonte: Page *et al.*, 1981.

Tipo de Cimento	Coefficiente de difusão (10 ⁻⁹) (cm ² /s)
Cimento Portland puro	44,7
Cimento com 30 % de cinza volante	14,7
Cimento com 65 % de escória	4,1
Cimento resistente a sulfatos	100,0

Outrossim, Yildirim *et al.* (2011) verificaram que concretos produzidos usando os cimentos com escória tiveram uma resistência à penetração de íons cloreto substancialmente menor em comparação àqueles produzidos com outros tipos de cimento. Arskog *et al.* (2007) e Gjörv (2014) também avaliaram as resistências à penetração de cloretos em concretos compostos por diferentes cimentos, sendo que aqueles cimentos com escória de alto-forno foram bastante superiores aos demais cimentos testados.

Ipavec *et al.* (2013), estudando a capacidade de ligação de cloretos em cinco diferentes sistemas de aglomerantes, incluindo a cinza volante, a escória granulada de alto-forno e a sílica ativa, constataram que as adições afetaram significativamente essa capa-

cidade, a qual se mostrou notadamente maior nos sistemas que continham uma maior quantidade de aluminatos em relação ao cimento comum, tais como os com cinza volante e com escória.

Ainda nesse contexto, estudos desenvolvidos por Thomas *et al.* (2011) mostraram que a incorporação de vários tipos de materiais cimentícios suplementares, como a escória de alto-forno, a cinza volante ou a sílica ativa, mantendo-se a mesma relação a/c, reduziu a difusividade de cloretos em até 20 vezes. Da mesma maneira, Bijen (1998) *apud* Gjörv (2014) sugeriu que uma substituição de cimento Portland puro por um cimento composto com escória de alto-forno pode reduzir a difusividade de íons cloreto em até 50 vezes. Segundo Lim *et al.* (2016), a substituição de 45 % de cimento por escória de alto-forno aumentou a durabilidade do concreto, em termos de difusividade, em cerca de 40 %.

Gjörv (2014) salienta que, no tocante aos teores de substituição, enquanto as escórias de alto-forno são aglomerantes hidráulicos e têm sido comumente utilizadas com melhoria de propriedades, mesmo em elevados teores, alguns materiais pozolânicos, como, por exemplo, a cinza volante, têm seus principais efeitos dependentes da quantidade de Ca(OH)_2 disponível para a reação pozolânica e, dessa forma, as substituições de cimento Portland por esses materiais em teores acima de 30 % produzem pouco ou nenhum efeito na resistência à penetração de cloretos, consoante com os estudos de Sengul (2005), retratados na **Figura 2.10**.

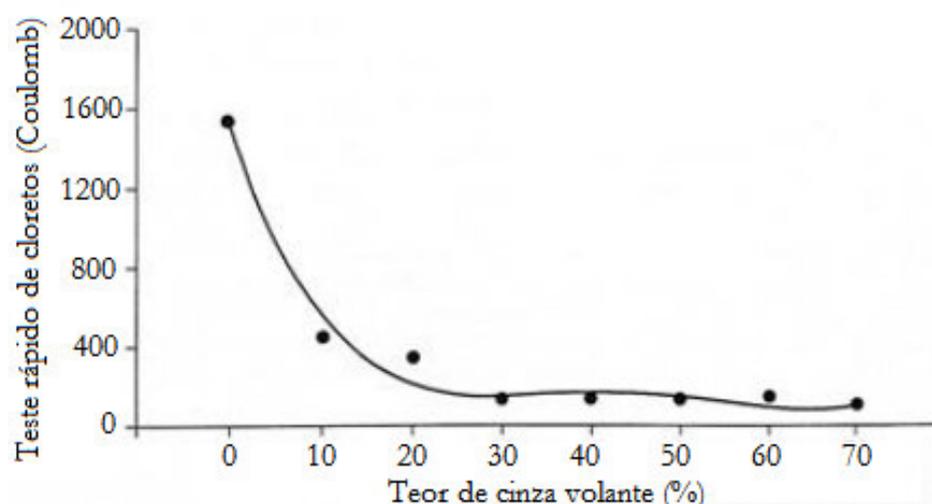


Figura 2.10 Influência do teor de cinza volante na difusividade de cloretos
Fonte: Adaptado de GJØRV, 2014.

Pereira *et al.* (2013), estudando a capacidade de proteção de alguns tipos de cimento brasileiros em relação à corrosão de armaduras sob a ação de íons cloreto, constataram que o cimento composto com escória de alto-forno obteve, em relação aos

demais, o melhor desempenho em termos de propriedades mecânicas e de resistência à penetração de cloretos.

2.2 Considerações sobre o fator de envelhecimento do concreto

A difusividade de íons cloreto no concreto depende da concentração desses íons na superfície externa do material, da capacidade de retenção de cloretos devido à combinação do Cl^- com certos compostos da hidratação do cimento, das variações de temperatura, da tortuosidade e constrictividade na rede porosa do concreto. Todos esses fatores influenciam no chamado coeficiente de difusão, que é uma medida que expressa a habilidade do concreto em permitir o transporte, por difusão, de uma determinada substância em sua massa. O coeficiente de difusão também depende do tempo, porém, em algumas situações é aceitável admiti-lo constante, sendo denominado coeficiente de difusão aparente.

Diversos estudos têm verificado que a difusividade de íons cloreto diminui com a evolução do tempo de exposição (MEDEIROS-JUNIOR *et al.*, 2015b) e são afetados por fatores como: temperatura e umidade relativa do ar (CLIMENT *et al.*, 2002; TAMIMI *et al.*, 2008; DOUSTI e SHEKARCHI, 2015), bem como pelo processo de hidratação do cimento (THOMAS e BAMFORTH, 1999; BHARGAVA *et al.*, 2011; PETCHERDCHOO, 2013; SILVA *et al.*, 2017). Dessa forma, o processo de redução de difusividade de íons cloreto pode ser variável para concretos (expresso através do fator de envelhecimento, por meio da função m/α) com diferentes misturas e condições de exposição (SUN *et al.*, 2012; MEDEIROS-JUNIOR *et al.*, 2015a; PILVAR *et al.*, 2015). Portanto, há características dependentes do tempo, que resultam em diferentes resultados com o passar dos anos, como a diminuição do coeficiente de difusão.

O fator tempo permite ao concreto amadurecimento de sua estrutura interna, devido às características não intrínsecas desse material e, assim, a pasta de cimento e a zona de transição (entre pasta e agregado) apresentam-se sujeitas a diferentes efeitos, sendo dotadas de diferentes níveis de porosidade, permeabilidade e penetração de íons cloretos. Essas mudanças ocasionadas na microestrutura do concreto, em função do processo de hidratação contínuo do cimento, propiciam melhoria das propriedades mecânicas do concreto e uma maior durabilidade (PAULON e KIRCHHEIM, 2011; MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Em outros estudos, a difusividade de íons cloreto em concretos é frequentemente ajustada de acordo com resultados de testes prolongados em estruturas de concreto e, para tal, uma função exponencial é usada para representar a relação entre o coeficiente de difusão do cloreto e o tempo (THOMAS e BAMFORTH, 1999; AUDENAERT *et al.*, 2010; GJØRV, 2015).

Segundo Yang *et al.* (2018), o coeficiente de difusão e a concentração superficial de cloretos são dois importantes parâmetros para descrever o processo de difusão em concretos. Durante o período inicial, a solução analítica para a segunda Lei da difusão

de Fick foi proposta tomando esses parâmetros como constantes (COLLEPARDI, 1982), que é referido como a solução analítica com parâmetros de constante dupla. A solução analítica com parâmetros de constante dupla é simples de programar e tem sido amplamente usada na previsão de vida útil (MARCHAND e SAMSON, 2009) e análise de durabilidade (THOMAS e MATTHEWS, 2009) de estruturas de concreto.

Song *et al.* (2015) desenvolveram um modelo considerando reações multifásicas e interações iônicas para descrever o comportamento da difusão em concretos imersos em soluções de NaCl e CaCl₂. Nesse aspecto, os testes experimentais e as simulações numéricas foram utilizados visando melhorar o modelo e estudar a influência do tipo de cátion no comportamento da difusão no concreto. Na parte experimental, as concentrações totais e de cloretos solúveis em água foram determinadas após 180 dias de imersão em soluções de NaCl, KCl, MgCl₂ e CaCl₂. Os resultados do teste mostraram que as capacidades de ligação de cloreto associadas aos quatro tipos de cátions diminuíram na seguinte ordem Ca²⁺ > Mg²⁺ > Na⁺ ≈ K⁺, enquanto que os coeficientes de difusão aparente diminuem na seguinte ordem K⁺ ≈ Na⁺ > Ca²⁺ > Mg²⁺. Na parte numérica, as equações que levaram em consideração os íons de magnésio foram consideradas para o aprimoramento do modelo, possibilitando assim a aplicação para outros cátions.

Da mesma maneira, Weerd *et al.* (2015) verificaram, em estudo com soluções de MgCl₂, CaCl₂ e NaCl a 20° C, que a capacidade de ligação foi significativamente maior para Mg²⁺ e Ca²⁺ em comparação com Na⁺. Ocorre que, segundo os autores, há uma relação linear entre o pH da solução de exposição e a capacidade de ligação de íons cloreto e quando a pasta de cimento é exposta a soluções como CaCl₂ ou MgCl₂, são formados compostos como o Ca(OH)₂ ou o Mg(OH)₂, respectivamente, levando a uma redução do pH do concreto e a um aumento da solubilidade do Ca, ou seja, cátions capazes de formar hidróxidos menos solúveis acabam por reduzir o conteúdo de OH⁻ na solução dos poros, diminuindo assim, a capacidade de fixação de cloretos e facilitando o ingresso no concreto.

Com base no fenômeno de diminuição do coeficiente de difusão ao longo do tempo, Mangat e Molloy (1994), Maage *et al.* (1996), DuraCrete (2000), Tang *et al.* (2015), entre outros pesquisadores, propuseram distintas soluções analíticas para obter o coeficiente de difusão dependente do tempo para concretos. Entretanto, as soluções acima ignoraram o comportamento da concentração superficial de cloreto (C_s) dependente do tempo, devido às influências das condições ambientais, nas quais as estruturas de concreto estavam localizadas. Vários são os modelos, incluindo linear, raiz quadrada, lei de potência, funções logarítmicas e exponenciais, que podem ser adotados para descrever o comportamento do fator de envelhecimento frente à concentração superficial de cloreto.

Ainda segundo o estudo de Mangat e Molloy (1994), o fator de envelhecimento poderia ser calculado de duas formas distintas: (1) de maneira empírica, a partir do coeficiente de difusão em função da idade do concreto ou (2) através da relação a/c . As **Equações 2.1** e **2.2** são utilizadas para a obtenção dos valores de fator de envelheci-

mento. Enquanto a **Tabela 2.3** visa apresentar um comparativo entre os valores obtidos pelas diferentes equações.

$$\log D_c = \log D_i - m \log t \quad (2.1)$$

$$m = 2,5(a/c) - 0,6 \quad (2.2)$$

Onde: D_c é o coeficiente de difusão efetivo (cm^2/s) no tempo t , e D_i é o coeficiente de difusão inicial, m é o fator de envelhecimento e a/c relação a/c da mistura do concreto.

Tabela 2.3 Valores calculados de m em função das diferentes equações.

Mistura	a/c	D_i (cm^2/s)	m calculado através Equação 2.1	m calculado através Equação 2.2
A	0,40	7,08E-05	0,44	0,40
B	0,54	7,96E-02	0,86	0,75
D1	0,58	1,21E-03	0,53	0,85
D2	0,45	1,96E-04	0,47	0,53
D5	0,58	2,67E-02	0,74	0,85
D8	0,77	3,04E+02	1,34	1,33
D11	1,45	8,59E+01	1,23	-
D14	0,68	1,01E+01	1,13	1,10

Fonte: Adaptado de Mangat e Molloy, (1994).

Para problemas de difusão, algumas vezes torna-se conveniente expressar a concentração em termos da massa do componente em difusão por unidade de volume do sólido (kg/m^3 ou g/cm^3). A matemática da difusão em estado estacionário ao longo de uma única direção (x) é relativamente simples, pelo fato do fluxo ser proporcional ao gradiente de concentração, de acordo com a expressão.

$$F = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2.3)$$

O sinal negativo nessa equação surge pois a difusão de íons cloreto ocorre no sentido oposto do aumento da concentração desses íons. A constante de proporcionalidade apresentada na **Equação 2.3** é o coeficiente de difusão de cloretos. Sendo coefi-

ciente de difusão constante, a **Equação 2.3** é usualmente denominada de primeira lei de difusão de Fick, a qual é aplicada para fenômenos de difusão em estado estacionário.

De acordo com Souza e Leonel (2012), quando os íons cloreto difundem-se no concreto, ocorre uma mudança na concentração de cloretos C , ao longo de um tempo t , em cada ponto x , do concreto, caracterizando um estado de difusão não estacionário. Com o intuito de simplificar a análise, o problema de difusão pode ser considerado como sendo unidirecional.

Uma grande parcela dessas equações tem origem na solução da equação diferencial da segunda lei de Fick, sendo frequentemente empregadas como *benchmarks* para a verificação da eficácia e da precisão de resultados fornecidos por métodos numéricos (YANG *et al.*, 2013). A segunda lei de Fick caracteriza um estado de difusão transiente, no qual o gradiente de concentração (C) em um ponto específico do espaço (x) varia com o tempo (t). Através do princípio do balanço de massa, essa lei pode ser escrita como:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(-D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (2.4)$$

Em que, D (m²/s) é o coeficiente de difusão (difusividade). Esse parâmetro depende da permeabilidade do concreto, que deve ser determinada a partir de propriedades de sua estrutura microporosa, sendo variável com a hidratação do cimento. Uma vez completado o processo de hidratação, a função que descreve a diminuição do coeficiente de difusão do cloreto com o tempo atinge um valor constante. Portanto, D pode ser uma função de coordenadas espaciais, tempo e concentração de íons cloreto livre (TANG e NILSSON, 1996; GUO *et al.*, 2012).

Para a aplicação da **Equação 2.4**, em concretos expostos a cloretos durante um longo período de tempo, seria necessário conhecer a variação do coeficiente de difusão ao longo do tempo. Se apenas poucas observações existirem em um cenário específico, é possível estimar limites inferiores e superiores para a variação de D ao longo do tempo (LIBERATI *et al.*, 2014). Apesar dessa dependência, pode-se considerar um caso particular no qual o coeficiente de difusão é independente da localização x , tempo t e concentração de cloreto C :

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

Sendo D o coeficiente de difusão constante (ou aparente).

Uma solução particular da **Equação 2.5** é obtida assumindo-se um domínio semi-infinito com concentração inicial de cloretos nula (C_i) e concentração superficial de cloretos constante (C_0) no tempo e espaço, geralmente expressa em kg/m³. Essa solução

é conhecida na literatura como “Função de erro” por incluir a função erro de Gauss complementar ($erfc[.]$), conforme (CRANK, 1979):

$$C(x, t) = C_0 \operatorname{erfc} \left[\frac{x}{2\sqrt{D_0 t}} \right] \quad (2.6)$$

Em que $\operatorname{erfc}[z] = 1 - \operatorname{erf}[z]$, sendo $\operatorname{erf}[z]$ a função erro de Gauss:

$$\operatorname{erf}[z] = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-x^2} dx \quad (2.7)$$

A forma geral da **Equação 2.6**, que considera a concentração superficial de cloreto (C_s), é apresentada na **Equação 2.8**.

$$\frac{C_{(x,t)}}{C_s} = 1 - \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (2.8)$$

Onde $C_{(x,t)}$ e C_s denotam a concentração de cloretos no interior e superficial do concreto, respectivamente. D é o coeficiente de difusão de cloretos, podendo ser medido para diferentes idades (t). Explicitando a variável t na **Equação 2.6** e adotando-se uma concentração crítica de cloretos (C_{crit}) na posição x , correspondente ao cobrimento nominal, tem-se um dos primeiros modelos para a previsão do tempo de iniciação da corrosão.

Visando obter a Equação 2.9, foram realizadas simplificações nas Equações 2.6, 2.7 e 2.8, de forma que assume-se que os íons cloreto são transportados pelo processo de difusão através de um concreto homogêneo, isotrópico, em condições totalmente saturadas e inerte; além disso, considera-se a superfície do concreto como plana e o sentido do processo de difusão como unidimensional. Portanto, não considerando o fluxo de cloretos em outras direções, obtém-se:

$$C_{(x,t)} = C_s \left[1 - \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \quad (2.9)$$

Onde $C_{(x,t)}$ é a concentração de cloretos na profundidade x após um período t , C_s é a concentração de cloretos na superfície da estrutura, erfc é a função de erro de Gauss, x é a profundidade considerada em relação à superfície (mm), D é o coeficiente de difusão de cloretos em determinada idade e t é a idade para qual a previsão está sendo realizada (anos).

Vale ressaltar que a **Equação 2.9** baseia-se na premissa do processo de difusão de cloretos constante ao longo do tempo. Entretanto, o coeficiente de difusão deverá

ser considerado como variável no tempo ao longo do presente estudo, em virtude de dados presentes na literatura demonstrarem sua viabilidade, aliado ao fato dos modelos normatizados utilizarem da mesma consideração.

2.3 Modelagem numérica aplicada à vida útil das estruturas

A crescente preocupação com a durabilidade e vida útil das edificações em concreto armado instigou a comunidade técnico-científica a desenvolver soluções para minimizar os danos decorrentes do processo de degradação. Nesse sentido, organizações, como a Federação Internacional do Concreto Estrutural (FIB; *Fédération Internationale Du Béton*) e o Instituto Americano do Concreto (ACI; *American Concrete Institute*), por meio de seus comitês técnicos e grupos de trabalhos, têm desenvolvido relatórios sobre práticas recomendadas com o intuito de resolver problemas dessa natureza.

Inicialmente, essas instituições desenvolveram rotinas relacionados à durabilidade do concreto, destacando-se o documento da ACI 201 (1992) – nomeado como “*Guide to Durable Concrete*” e documento do CEB 183 (1992) intitulado “*Durable concrete structures*”, além documento publicado pelo CEB 238 (1997) de nome “*New approach to durability design: an example for carbonation induced corrosion*”.

Tanto a FIB como o ACI, por meio de seus comitês, deram início a estudos relacionados à previsão de vida útil, englobando também a análise do ciclo de vida (ACV). Nos boletins publicados, apresenta-se uma visão holística, que abrange aspectos relacionados à concepção, projeto, execução, utilização, manutenção, adequação e fatores de ordem econômica. Dentre as publicações da área, destacam-se o ACI 365 (2000) e o “*Model Code for Service Life Design*” da FIB 34 (2006).

O ACI 365 (2000), intitulado “*Service Life Prediction: state-of-the-art report*”, apresenta orientações à predição de vida útil de estruturas de concreto armado, tanto novas como existentes, oferecendo dados sobre os fatores que controlam a vida útil das estruturas, metodologias para a avaliação da condição de estruturas existentes e técnicas matemáticas voltadas à predição de vida útil. O relatório também discute alguns aspectos econômicos concernentes à vida útil das estruturas de concreto, incluindo a análise do custo do ciclo de vida.

O “*Model Code for Service Life Design*” da FIB 34 (2006) foi instaurado com o objetivo de identificar modelos consensuais relacionados à durabilidade e de preparar uma estrutura física voltada à normalização do projeto baseada nesta aproximação de desempenho. Destina-se à previsão de vida útil de estruturas de concreto simples, armado e protendido, com foco especial nas prescrições de projeto que tem como objetivo controlar os efeitos adversos da degradação, considerando as ações ambientais que conduzem à deterioração do aço imerso no concreto. A metodologia descrita nesse documento também pode ser aplicada para a avaliação da vida útil de estruturas existentes.

Nesse sentido, destacam-se ainda as publicações ISO 15686 e EUROCODE 2. A norma ISO 15686 (2011) “*Buildings and constructed assets: Service life planning*” e complementares (de 1 a 11) destinam-se ao estudo da durabilidade, abrangendo a vida útil, o ciclo de vida e o impacto ambiental das edificações. O EUROCODE 2 (2004) “*Design of concrete structures*” e suas partes 1, 2 e 3, em relação à publicação anterior de 1992, inserem uma nova abordagem para o projeto de estruturas de concreto, trazendo critérios baseados em conceitos probabilísticos. A nova versão da norma ISO 13823 (2008) “*General principle on the design of structures for durability*” enfatiza que é necessário garantir a confiabilidade do desempenho de uma estrutura desde a concepção até o final da sua vida útil, recomendando que procedimentos probabilísticos sejam empregados. Nessa mesma linha conceitual, cita-se ainda o FIB 53 (2010) “*Design of durable concrete structures*”.

Com o intuito de criar um código do concreto e promover a cooperação e o entendimento entre as nações integrantes do continente Asiático e da Região do Pacífico, foi desenvolvido pelo ICCMC, em parceria com JCI, o “*Asian Concrete Model Code*” – ACCMC (2006). O objetivo principal desse código é elevar o padrão de desempenho estrutural e de segurança das estruturas de concreto frente às condições sociais e ambientais, coletando padrões e práticas utilizadas em cada país, a fim de desenvolver um modelo comum para todo o território Asiático. O ACCMC contempla o projeto, a construção e a manutenção, os quais podem ser convertidos e adaptados dentro dos diferentes contextos.

Na África também está em desenvolvimento o Código Africano do Concreto, o ACC (*African Concrete Code*), que tem por objetivo atuar como um guia para o projeto de estruturas de concreto duráveis, úteis, econômicas e seguras, em harmonia com o ambiente natural e social do continente, servindo como ferramenta para facilitar e acelerar o desenvolvimento econômico e a transferência de tecnologia, no campo da engenharia do concreto, entre a região Africana e a Comunidade Internacional. Contando com a participação de especialistas da Europa, da Ásia, dos Estados Unidos e da África, um simpósio realizado em 2005 oficializou o início dos trabalhos. NGAB (2005) relata que as características climáticas, a qualidade dos materiais e o nível econômico e social desse continente são relativamente distintos dos referenciados nos códigos internacionais, justificando a implantação do ACC.

Além dos relatórios, códigos e boletins técnicos já desenvolvidos pelos comitês e grupos de pesquisa (como o ACI, a FIB e o ACCMC) e em desenvolvimento (como o ACC), diversos projetos relacionados ao tema, advindos de vários países do mundo, têm contribuído na evolução dos estudos da durabilidade e vida útil das estruturas de concreto. Como exemplos, citam-se os projetos DURACRETE (1999), LIFECON (2003), DARTS (2003), DURACON (2004), entre outros.

Com o intuito de estabelecer critérios e probabilidades de falhas aceitáveis para o projeto de durabilidade de estruturas de concreto armado, conferindo desempenho satisfatório durante a vida útil requerida, o DURACRETE – “*Probabilistic Perfor-*

mance Based Durability Design of Concrete Structures” – projeto de pesquisa Europeu, desenvolvido entre 1996-1999, foi um dos pioneiros na área. Nele, os princípios da teoria de confiabilidade, já aplicados no projeto estrutural, foram inseridos para o projeto de durabilidade.

Em virtude da crescente necessidade de manutenção, reparo e modernização de antigas infraestruturas civis da Europa (como pontes, portos, túneis, usina hidrelétricas, plataformas off-shore, assim como edifícios públicos), a Comunidade Europeia, sob o programa de sustentabilidade e crescimento competitivo (1998 – 2002), desenvolveu o projeto LIFECON (2003). Tal projeto objetiva desenvolver e validar um modelo Europeu genérico e aberto para integração e predição dos sistemas de manutenção e de planejamento e gerenciamento do ciclo de vida (LMS) de infraestruturas de concreto que facilite alterações na gestão e manutenção; trabalhe com os princípios do ciclo de vida e inclua aspectos relacionados ao desenvolvimento sustentável, atendendo às exigências humanas (uso, segurança, saúde e conforto), ao desempenho técnico, econômico e ecológico, assim como à aceitação cultural.

O projeto contempla aspectos necessários à classificação quantitativa das cargas de degradação, estimativa da vida útil total e residual, sobretudo devido à ação de íons cloretos, carbonatação e sais de degelo, ao planejamento e gerenciamento de ações de manutenção e à análise do custo do ciclo de vida de estruturas e infraestruturas de concreto. Esses aspectos são atrelados a modelos matemáticos (probabilísticos e semiprobabilísticos), à teoria de confiabilidade e a fatores socioeconômicos. Para atender o objetivo proposto, o projeto LIFECON contou com a participação da comunidade acadêmica, tecnológica e construtiva da União Europeia, gerando um manual disponibilizado na internet, no qual são descritos os principais processos do sistema proposto, incluindo diferentes análises, aproximações, métodos e soluções matemáticas.

Destaca-se ainda o projeto DARTS - “*Durable and Reliable Tunnels Structures*” – que objetiva o desenvolvimento de ferramentas práticas para dar suporte proativo ao processo de tomada de decisão da escolha da alternativa ótima. Neste contexto, consideram-se aspectos associados com custos, tipo e processo de construção, manutenção, condições ambientais, qualidades técnicas e segurança ao longo da vida útil de túneis.

Sob coordenação do CYTED (1998), em 2000 teve início o projeto DURACON (2004), a qual objetiva: correlacionar à durabilidade de diferentes concretos com as características ambientais reinantes na América Latina, Espanha e Portugal; estimar, de acordo com o clima de cada região, o teor de cloretos necessário para desencadear a corrosão do aço e propor modelos de previsão de vida útil adequados aos ambientes de estudo. Mediante a exposição de corpos de prova com e sem armadura, em no mínimo duas atmosferas distintas, sendo uma marinha e outra urbana, em cada país Ibero-Americano participante, monitorou-se a evolução da degradação dos concretos ao longo do tempo, no intuito de correlacionar os dados dos ensaios acelerados com os de estruturas reais. Como resultado, tem-se o mapeamento da agressividade do ambiente de exposição da região de estudo.

O Brasil participou desse projeto contando com quatro estações de envelhecimento natural, localizadas em Goiânia (GO), Natal (RN), Rio Grande (RS) e São Paulo (SP). O trabalho publicado por Rincón (2006) apresenta os resultados preliminares do estudo. No país, ainda há o projeto DURAR (Rede Brasileira de Estações de Envelhecimento Natural), que por meio da criação de uma rede de estações em localidades distintas (Belém, PA; Rio Grande, RS; São Paulo e Pirassununga, SP), objetiva o estudo da influência do clima na degradação de materiais e componentes de construção, dando suporte às atividades de pesquisa e desenvolvimento no país.

No Brasil, a Norma de Desempenho (ABNT NBR 15575, 2013), lançada em 2013, constitui-se no principal documento normativo voltado ao desempenho de edificações habitacionais, com vistas à melhoria da qualidade. Objetiva estabelecer uma sistemática de avaliação de tecnologias e sistemas construtivos habitacionais, tendo como base requisitos e critérios de desempenho expressos em normas técnicas brasileiras vigentes. Também leva em conta a durabilidade e a vida útil das estruturas e suas partes, sugerindo a modelagem matemática como ferramenta para as estimativas de vida útil e análise de desempenho, embora não apresente modelos de aplicação prática para tal. No mesmo ano, a Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC) lançou um guia orientativo como leitura complementar à norma com o intuito de cooperar com a comunidade da construção civil e promover a difusão da norma de desempenho em todo o país (CBIC, 2015). Também se destaca a revisão da NBR 6118 (ABNT, 2014) que, de forma prescritiva, tenta inserir as questões de durabilidade e vida útil no projeto de estruturas de concreto.

Destaca-se que os projetos DURACRETE (1999) e LIFECON (2003) sugerem, em seus relatórios, que as considerações de projeto para a durabilidade e as estimativas de vida útil das estruturas de concreto devem derivar de uma abordagem probabilística, destinando, principalmente, a teoria de confiabilidade para esse fim. O projeto DURACON (2004) ainda discorre acerca dos aspectos determinísticos do processo de degradação.

Os conceitos de durabilidade apresentados nas revisões recentes dos códigos e normas internacionais (ACI, FIB e ISO) são fundamentados em modelos matemáticos, os quais buscam descrever os mecanismos de degradação atuantes na estrutura, incorporando conhecimento de várias áreas (multidisciplinar), como a estatística, a ciência e tecnologia dos materiais, a economia, o projeto e a execução. Dados de inspeções, manutenção e reparo de estruturas existentes, dados de ensaios acelerados e o conhecimento de especialistas são usados nos modelos para identificar e calibrar os parâmetros críticos de entrada dessas informações, possibilitando a estimativa mais aproximada e coerente da vida útil de estruturas de concreto.

2.3.1 Estados Limites

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

Ao contrário das avaliações de confiabilidade que envolvem o atingimento de um estado limite último (ELU), como análises acerca de vigas ou pilares, as análises de durabilidade demandam uma definição subjetiva do critério de falha. Na teoria, o processo de degradação se inicia quando os agentes nocivos atingem um teor crítico no interior da estrutura. Na prática, entretanto, os efeitos desse ingresso só serão percebidos quando houver a ruptura da camada passivadora e início do processo corrosivo. O momento exato em que esse fenômeno ocorre, no entanto, assim como o nível de comprometimento tido como limite para a armadura, são aspectos que geram divergências entre pesquisadores e normas sobre o assunto (MAGALHÃES, 2018).

Em termos de confiabilidade, este é o período de tempo no qual não é observada nenhuma perda na capacidade resistente da estrutura. Ocorrendo, no entanto, a deterioração dos mecanismos de proteção do elemento estrutural.

Conforme o critério de falha adotado pode-se ter diferentes estimativas da vida útil de uma estrutura de concreto armado. Diversos autores (TUUTTI, 1982; HELENE, 1986; UJI *et al.*, 1990; MEJLBRO 1996; FRANGOPOL *et al.*, 1997 e THOFT-CHRISTENSEN, 1997) definem o alcance do teor crítico de cloretos nas proximidades da armadura como o fim da vida útil de serviço.

Graficamente, o processo analisado por ser visualizado através da **Figura 2.11**. Percebe-se que, para um determinado tempo t , a concentração de cloretos atinge um valor crítico nas margens da armadura, desencadeando a despassivação das barras.

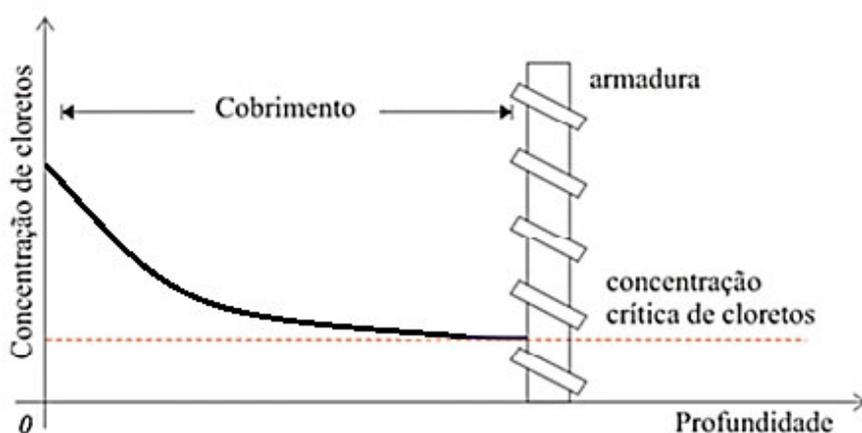


Figura 2.11 Representação gráfica do perfil de concentração de cloretos em relação ao cobrimento da armadura em um tempo t . Fonte: Magalhães (2018).

2.3.2 Método de Simulação de Monte Carlo (MCS)

O método de simulação de Monte Carlo caracteriza-se como uma das mais utilizadas ferramentas de estimativa de probabilidade de falha de determinado sistema. Este fato pode ser atribuído à funcionalidade do método na análise de problemas que envolvem variáveis aleatórias com distribuição de frequência conhecida ou assumida.

Em termos práticos, o método de Monte Carlo caracteriza-se pela realização de um número consideravelmente grande de simulações de um fenômeno (ou função estado limite considerada) baseado em um conjunto de parâmetros de entrada gerados a partir da distribuição de frequência das variáveis envolvidas no processo. Em outras palavras, variáveis aleatórias dos dados de entrada são geradas em cada simulação, gerando resultados diferentes em cada uma das análises (SAASSOUH *et al.*, 2012). O número de situações de sucesso ou insucesso obtidas do total de simulações realizadas representa a probabilidade de segurança ou de falha para o fenômeno que está sendo estudado. Real (2000) complementa afirmando que, sendo função de diversas variáveis aleatórias que afetam seu comportamento, a própria resposta da estrutura será também uma variável aleatória.

Na **Figura 2.12** é apresentado um modelo esquemático do funcionamento do método de Monte Carlo. Já a **Figura 2.13** apresenta esquematicamente a avaliação da probabilidade de falha via método de Monte Carlo considerando a função de falha como $g(X) = 0$. Cada ponto na figura representa a resposta de uma simulação. Os pontos localizados no domínio de falha, isto é, $g(X) < 0$, representam o não atendimento à função estado limite.

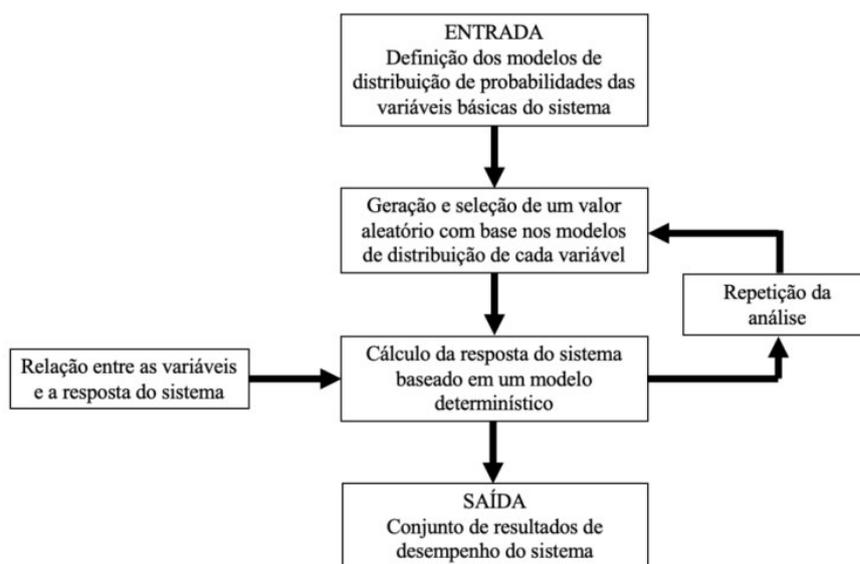


Figura 2.12 Funcionamento do Método de Simulação de Monte Carlo.

Fonte: Real (2000) *apud* Wally (2019).

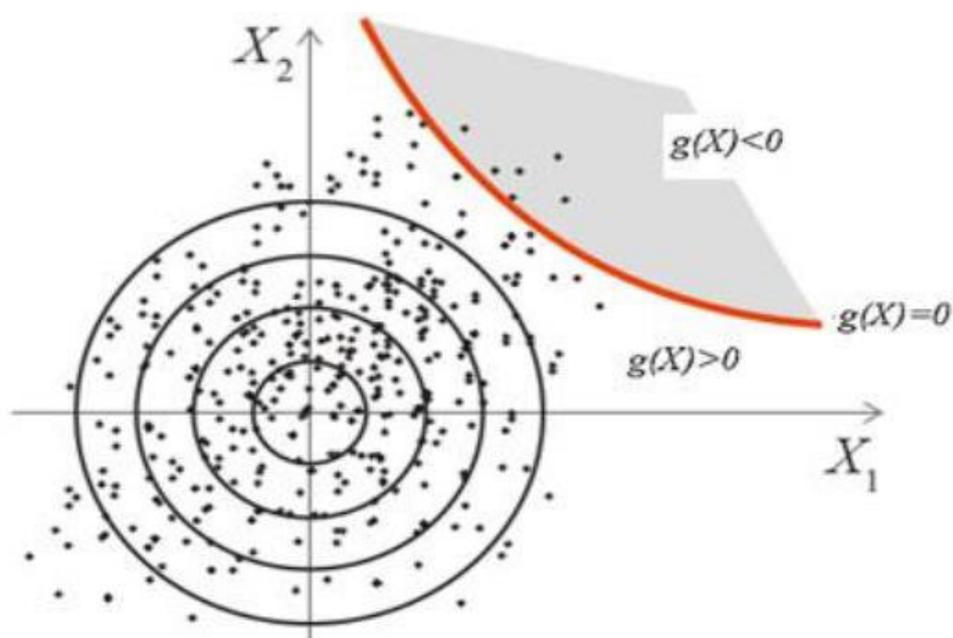


Figura 2.13 Esquema dos domínios no método de Monte Carlo utilizando duas variáveis de entrada. Fonte: Nogueira, 2006.

2.4 Ferramentas Teóricas e Metodológicas

O uso de modelos de vida útil vem se tornando uma ferramenta necessária para os projetos estruturais na engenharia, seja para a construção de novas estruturas, seja para verificar a manutenção durante o tempo de operação, análises preventivas de riscos ou ainda para análise do ciclo de vida (VESIKARI, 2009). Assim, através das leis de difusão e leis de reações químicas, iniciaram-se os modelos de vida útil que tentavam explicar como os agentes agressivos se comportam na difusão e como está quimicamente ligada à matriz do concreto. Essas expressões foram ainda baseadas na lei de conservação de massa (MARTÍN-PÉREZ, 1999).

Atualmente, existem vários modelos numéricos para tentar simular os mecanismos envolvidos na corrosão das armaduras. Esse fato vem do interesse na comunidade técnico-científica mundial para estabelecer de maneira confiável os parâmetros necessários para a modelagem dos diversos fenômenos de degradação que ocorrem nas estruturas de concreto (ANDRADE, 2001). Os modelos são diversos devido à enorme quantidade de variáveis para simular realisticamente os mecanismos de ingresso dos agentes agressivos, que inclui a complexidade do fenômeno da corrosão, do concreto, as diferentes condições ambientais e ainda a geometria da estrutura que está em análise. No entanto, essa complexidade dos modelos torna difícil incorporar o uso destes na engenharia.

Atualmente, existe uma demanda para incorporar dentro das normas mais conceitos relacionados à durabilidade do concreto para melhor prever o comportamento do material e evitar deterioração, no entanto, engenheiros ainda estão relutantes para introduzir esse tipo de modelo em leis nacionais e códigos estruturais (ANDRADE *et al.*, 2011). Cada modelo tem sua particularidade, que é importante destacar a fim de entender a interação considerada pelo autor do modelo. A partir disso, o responsável pelo projeto de durabilidade ou pela análise do tempo de vida útil em estruturas existentes pode escolher a melhor abordagem para a análise.

A **Equação 2.9** é utilizada em muitos casos para a previsão da vida útil de estruturas de concreto. No entanto, seu uso deve ser feito com cautela, devido às simplificações utilizadas para chegar ao seu formato. Vários autores destacam que a solução analítica tem várias limitações (MARTÍN-PÉREZ, 1999; MARCHAND; SAMSON, 2009; ANDRADE *et al.*, 2011; TANG *et al.*, 2015) como o uso apenas unidimensional, tendência a superestimar as concentrações de cloreto para exposições de longa duração e uso do coeficiente de difusão constante. É importante destacar que as simplificações e as hipóteses consideradas para o uso da **Equação 2.9** como, concentração constante de íons na superfície, condições do ambiente constante e características do concreto constante durante toda a fase de operação não são cumpridas na maioria das situações.

Os autores Thomas e Bamforth (1999) verificaram que existe uma dependência no tempo no transporte de íons para concretos com teores de escória e cinza volante. Luping e Gulikers (2007) verificaram que a solução analítica pode significativamente superestimar a concentração de cloretos, e a solução pode ser moderadamente utilizada para prever a penetração de cloretos para concreto com cimento Portland, quando se considera o coeficiente de difusão de cloretos dependente do tempo. No entanto, os autores verificaram que para o concreto com adição de cinzas volantes, a quantidade de cloretos penetrados no concreto é significativamente subestimada. Song *et al.* (2008) propuseram formulações para que o coeficiente aparente de difusão seja dependente do tempo para ser substituído na solução analítica.

Com o avanço dos modelos, o transporte de íons cloretos no concreto foi objeto de estudo de vários autores que simularam o processo através de modelos que utilizam teorias matemáticas, como o método dos elementos finitos e programas computacionais mais sofisticados. Esses modelos foram surgindo com o intuito de incluir características do material, situações do ambiente ou novas reações que não são contempladas pelas equações.

Assim, o modelo proposto por Saetta *et al.* (1993) utilizou as equações diferenciais que representam o transporte de umidade, a variação da temperatura e a difusão de cloretos de maneira acoplada pelo método dos elementos finitos. Os autores examinaram a difusão de cloretos para concretos saturados e parcialmente saturados, considerando a variabilidade de difusão de íons dependendo das características do concreto.

Além disso, o estudo foi talvez o primeiro a considerar a temperatura e umidade variantes no concreto, que influenciam também o transporte de íons cloreto.

Outros modelos, com o uso de métodos numéricos para resolver a equação diferencial da 2ª Lei de Fick, sucederam os autores adicionando outros fatores de influência no transporte de íons, considerando outras condições de contorno e diferentes parâmetros em cada abordagem (MARTÍN-PÉREZ, 1999; BAROGHEL-BOUNY *et al.*, 2011; DOMINICINI *et al.*, 2016; SUZANO, 2017). Outros autores analisaram o efeito das cargas mecânicas na difusão de cloretos (WU *et al.*, 2016).

Muitos modelos investigaram o efeito dos cloretos combinados na matriz do concreto que influenciam na quantidade total de cloretos no concreto sendo considerados nos modelos subsequentes (TANG e NILSSON, 1995; MARTÍN-PÉREZ, 1999). Alguns modelos retratam o transporte de cloretos na situação em que as estruturas estão submetidas a ciclos de secagem e molhagem (MARTÍN-PÉREZ, 1999; WU *et al.*, 2016). Modelos mais complexos consideram fissuras no concreto (ISHIDA *et al.*, 2009; MARSAVINA *et al.*, 2009; OŽBOLT *et al.*, 2010).

Como pode ser observado, existem vários modelos na literatura para representar o fenômeno de penetração por íons cloreto. Completas revisões bibliográficas dos modelos que descrevem as equações de cada autor podem ser verificadas em Suzano (2017). A partir do que foi evidenciado anteriormente, percebe-se que existe uma grande dispersão de modelos, o que favorece uma confusão para o usuário de modelos de previsão de vida útil, o que faz com que este opte pela Equação analítica 2.9.

A maioria dos modelos numéricos inicia-se com a 2ª Lei de Fick. No entanto, essa lei é modificada seguindo os critérios de cada autor. As principais diferenças encontradas depois de uma análise detalhada entre os modelos de previsão de vida útil para o período de iniciação são: modificações na 2ª lei de Fick, o cálculo do coeficiente de difusão de cloretos, o cálculo da concentração de cloretos em determinada profundidade, as considerações de variáveis envolvidas na obtenção dos coeficientes anteriormente, condições de contorno da equação de Fick (**Tabela 2.4**).

Tabela 2.4 Diferenças no coeficiente de difusão de cloretos entre modelos numéricos. Fonte: Autor.

Autor	Coeficiente de Difusão	Fatores
GJØRV (2015)	$D(t) = \frac{D_0}{1-\alpha} \left[\left(1 + \frac{t'}{t}\right)^{1-\alpha} - \left(\frac{t'}{t}\right)^{1-\alpha} \right] \left(\frac{t_0}{t}\right)^\alpha ke$	<p>$D(t)$: Coeficiente de difusão; D_0: Coeficiente de difusão inicial; t': Idade do concreto; t: Instante; t_0: Tempo de referência; ke: Coeficiente do efeito da temperatura; e α: Fator de envelhecimento.</p>
LIFE 365 (1999)	$D = D_0 \left(\frac{t_{ref}}{t}\right)^m \exp\left(\frac{U}{R} * \frac{1}{T_{ref} + 273} * \frac{1}{273 + Temp}\right)$	<p>D: Coeficiente de difusão; D_0: Coeficiente de difusão de referência; t: Instante; t_{ref}: Idade do concreto; U: Energia de ativação da difusão de cloretos; R: Constante universal dos gases perfeitos; T_{ref}: Temperatura de referência; T_{emp}: Temperatura média anual; m: Fator de envelhecimento.</p>
KWON (2007)	$D_m = \frac{1}{t} \int_0^t D_{ref} \left(\frac{t_{ref}}{\tau}\right)^m d\tau = \frac{D_{ref}}{1-m} \left(\frac{t_{ref}}{t}\right)^m$ $D_m = D_{ref} \left[1 + \frac{t_R}{t} \left(\frac{1}{1-m}\right)^m \right] \left(\frac{t_{ref}}{\tau}\right)^m$	<p>D_m: Coeficiente de difusão; D_{ref}: coeficiente de difusão no tempo de referência; t: Idade do concreto; t_R: tempo em que o coeficiente de difusão é assumido como sendo constante e é geralmente assumido como 30 anos t_{ref}: tempo de referência; e m: é uma constante dependendo das proporções da mistura.</p>

A partir da **Tabela 2.4**, pode-se verificar as diferentes considerações que cada modelo possui para realizar o cálculo do coeficiente de difusão. A 2ª Lei de Fick define como o modelo considera o processo de difusão, ou seja, como ele considera o processo de transporte de íons cloreto dentro dos poros do concreto através do revestimento. A solução dessa equação é a concentração de cloretos na distância requerida, por exemplo, se o revestimento é de 40 mm, a concentração de cloretos em 40 mm será calculada (ou na distância definida pelo usuário). Portanto, as diferenças nessa formulação evidenciam como o modelo calcula a concentração de cloretos no concreto.

Contudo, há modelos complexos que englobam grande número de variáveis como dados de entrada, o que torna a sua resolução complexa e, conseqüentemente, reduz a sua aplicabilidade prática. Tanto o modelo proposto por Gjrv, quanto o modelo proposto por Life 365, necessitam de ensaios acelerados realizados em laboratório para a determinação do coeficiente de difusão e, aliado a isso, todos os problemas associados a ensaios acelerados, como as condições de realização do ensaio que muitas vezes não condizem com as condições reais de exposição da degradação natural e a dificuldade em correlacionar os fenmenos naturais com os acelerados. Embora tendam a serem mais precisos para descrever o fenômeno de penetração de cloretos, os métodos de longo prazo se tornam inviáveis pelo elevado tempo de execução. Não são viáveis de serem exigidos na indústria da construção civil.

Devido à complexidade, diversos autores utilizam a solução analítica da 2ª Lei de Fick, normalmente fazendo uso do coeficiente de difusão constante (**Equação 2.6**, **Equação 2.8 e Equação 2.9**) para seu modelo. Como já se destacou, as soluções analíticas tendem a supervalorizar as concentrações de cloreto para exposições de longo prazo, especialmente devido ao uso do coeficiente de difusão constante (ZHANG e LOUNIS, 2006; TANG *et al.*, 2015; PRADELLE *et al.*, 2017). Para reduzir esse problema, muitos autores adicionam os fatores mais apropriados para o caso que estão analisando. Nessa linha, Cavalaro *et al.* (2015) adicionaram o fator da temperatura no modelo utilizado, já que para o seu caso de estudo a temperatura tinha um grande efeito. Luping e Gulikers (2007) adicionaram no seu modelo a dependência do coeficiente de difusão com o tempo, de acordo com os autores, a não incluo desse fator superestima a concentração de cloretos em muitas ordens de magnitude. Outros autores também adicionaram o fator ou fatores que mais convinham para seu caso de análise (FERREIRA, 2004; POLDER e DE ROOIJ, 2005; LUPING e GULIKERS, 2007; TAVARES, 2013; CAVALARO *et al.*, 2015; DOMINICINI *et al.*, 2016).

Outra particularidade interessante das formulações da 2ª Lei de Fick  que tipo de força motriz foi levado em consideração. Existem modelos que consideram a concentração de cloretos totais como força motriz e outros, a concentração de cloretos livres. De acordo com Tang *et al.* (2015), os modelos que assumem a concentração de cloretos totais no processo de difusão são teoricamente questionáveis, já que apenas os cloretos livres podem se mover na solução dos poros e contribuir para a corrosão da armadura do concreto.

2.4.1 Modelo de penetração de cloretos apresentado por Gjorv (GJØRV, 2015)

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

O modelo utilizado é apresentado a partir da **Equação 2.11**.

$$C_{(x,t)} = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x_c}{2\sqrt{D(t)t}} \right) \right] \quad (2.11)$$

Onde $C_{(x,t)}$ é a concentração de cloretos na profundidade x_c após um período t [% (em relação à massa de cimento)], C_s é a concentração de cloretos na superfície da estrutura [% (em relação à massa de cimento)], erf é a função de erro de Gauss, x_c é o cobrimento da armadura (mm), $D(t)$ é o coeficiente de difusão de cloretos e t é a idade para qual a previsão está sendo realizada (anos).

Para o cálculo do coeficiente de difusão, o modelo faz uso da **Equação 2.12**:

$$D(t) = \frac{D_o}{1 - \alpha} \left[\left(1 + \frac{t'}{t} \right)^{1-\alpha} - \left(\frac{t'}{t} \right)^{1-\alpha} \right] \left(\frac{t_o}{t} \right)^\alpha ke \quad (2.12)$$

Sendo $D(t)$ o coeficiente de difusão de cloretos no concreto [mm^2/ano], D_o o coeficiente de difusão de referência [mm^2/ano] medido no instante t_o [anos] e t' a idade do concreto quando exposto aos íons [anos]. A variável α representa o fator de envelhecimento do concreto, no qual é considerada a evolução da microestrutura do material, e ke é o parâmetro que leva em conta o efeito da temperatura.

Para o cálculo do coeficiente de temperatura, o modelo faz uso da **Equação 2.13**:

$$ke = \exp \left[\frac{E_A}{R} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{273 - T} \right) \right] \quad (2.13)$$

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

2.4.2 Modelo apresentado por Poulsen (KWON, 2007)

Esse modelo foi proposto com base na AASHTO T 260, com o intuito de estimar a vida útil de estruturas de concreto armado, possibilitando planejar manutenções preventivas, avaliar teoricamente os efeitos que o meio ambiente provoca na estrutura e, por fim, levando em consideração a influência do fator de envelhecimento sobre as propriedades do concreto.

$$C_{(x,t)} = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_m t}} \right) \right] \quad (2.14)$$

Onde $C_{(x,t)}$ é a concentração de cloretos na profundidade x após um período t [% (em relação à massa de cimento)], C_s é a concentração de cloretos na superfície da estrutura [% (em relação à massa de cimento)], erf é a função de erro de Gauss, x é o cobrimento da armadura (mm), D_m é o coeficiente de difusão de cloretos e t é a idade para qual a previsão está sendo realizada (anos).

De acordo com Poulsen e Mejlbro (2010), estruturas expostas por períodos superiores a 20 ou 30 anos possibilitam a obtenção de uma estimativa aproximada da penetração de cloretos negligenciando a dependência do coeficiente de difusão ao tempo, conforme pode ser avaliado na **Equação 2.15** para situações com tempo de referência inferiores há 30 anos, faz-se uso da **Equação 2.16**.

$$D_m = \frac{1}{t} \int_0^t D_{ref} \left(\frac{t_{ref}}{\tau} \right)^m \quad d_\tau = \frac{D_{ref}}{1-m} \left(\frac{t_{ref}}{t} \right)^m \quad (t < t_R) \quad (2.15)$$

$$D_m = D_{ref} \left[1 + \frac{t_R}{t} \left(\frac{1}{1-m} \right)^m \right] \left(\frac{t_{ref}}{\tau} \right)^m \quad (t \gg t_R) \quad (2.16)$$

Onde t_R é o tempo em que o coeficiente de difusão é assumido como sendo constante e é geralmente assumido como 30 anos, D_{ref} é o coeficiente de difusão no tempo de referência t_{ref} (geralmente, $t_{ref} = 28$ dias), m é uma constante dependendo das proporções da mistura.

O modelo matemático Kwon (KWON, 2007), considera o coeficiente de difusão dependente do tempo, utilizando essa variável no cálculo da concentração de cloretos para determinado período.

Assume-se que a falha de durabilidade acontece quando a concentração de cloreto no nível de barra de reforço atingiu o teor crítico de cloreto, C_{crit} . Assim sendo, a

vida útil correspondente ao estágio de iniciação da corrosão aplicada neste modelo, pode ser conservadora, pois não inclui o 'estágio de propagação de corrosão', como perda de seção.

Outra peculiaridade em comparação com os modelos existentes está no cálculo do coeficiente de difusão de cloretos, onde existem duas equações, visando avaliar com maior precisão as estruturas novas (até 30 anos) e as estruturas com mais tempo de utilização.

2.4.3 Modelo de penetração de cloretos LIFE 365(1999)

Em 1999 foi criado um consórcio de empresas norte americanas para desenvolver um software que fosse possível estimar a vida útil de estruturas de concreto armado. Em outubro de 2000 foi introduzida no mercado a primeira versão do Life 365. Ao longo dos anos foram realizadas revisões do software e foram criados mais dois consórcios, um em 2005 e o outro em 2010, com o objetivo de dar continuidade e melhorar o software. E em julho de 2013 foi liberada a versão mais recente, Life-365 v 2.2.

O Life 365 é um software que foi desenvolvido para estimar a vida útil do concreto armado, inserir sistemas de proteção contra corrosão para reduzir o custo do ciclo de vida da estrutura que são expostas a cloreto, entre outros.

Neste modelo, a dependência do tempo da concentração superficial de cloretos é introduzida na solução da Segunda Lei de Fick e; o coeficiente de difusão dependente do tempo, obtido por meio de uma técnica de médias no tempo, é aplicado à solução como uma variável para calcular o ingresso de cloretos. Além disso, em análise realizada por Pack *et al.* (2010) comparando os resultados de um modelo matemático com o modelo LIFE 365, observou-se uma descrição imprecisa do cloreto a longo prazo, por apresentar uma concentração superficial de cloreto constante e decaimento rápido do coeficiente de difusão.

O modelo utilizado é apresentado a partir da **Equação 2.17**.

$$C_{(x,t)} = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D(t)t}} \right) \right] \quad (2.17)$$

Onde $C_{(x,t)}$ é a concentração de cloretos na profundidade x após um período t [% (em relação à massa de cimento)], C_s é a concentração de cloretos na superfície da estrutura [% (em relação à massa de cimento)], erf é a função de erro de Gauss, x é o cobrimento da armadura (mm), D é o coeficiente de difusão de cloretos e t é a idade para qual a previsão está sendo realizada (anos).

Enquanto o cálculo do coeficiente de difusão realiza-se por meio da equação abaixo:

$$D(t) = D_0 \left(\frac{t_{ref}}{t} \right)^m \exp \left(\frac{U}{R} * \frac{1}{T_{ref} + 273} * \frac{1}{273 + T_{emp}} \right) \quad (2.18)$$

Sendo D o coeficiente de difusão de cloretos no concreto [mm^2/ano], D_0 o coeficiente de difusão de referência [mm^2/ano] medido no instante t_0 [anos] e t_{ref} a idade do concreto quando medido D_{ref} [anos], t é a idade do concreto que está sob análise [anos]. A variável m representa o fator de envelhecimento do concreto, no qual é considerada a evolução da microestrutura do material, T_{emp} é o parâmetro que leva em conta o efeito da temperatura média anual [$^{\circ}\text{C}$], U é a energia de ativação para a difusão do cloreto [kcal/mol], R é a constante universal dos gases perfeitos.

O modelo numérico Life 365 (LIFE, 1999) usa uma implementação de diferença finita da Segunda Lei de Fick, a equação geral, utilizada para os cálculos do coeficiente de difusão e concentração de cloretos. Entretanto, para isso, conforme manual do modelo de vida útil e programa computacional Life 365 (1999) apresenta, as seguintes hipóteses implícitas devem ser consideradas:

- O elemento estrutural analisado deve ser considerado homogêneo;
- A concentração superficial de cloretos ao redor do elemento de concreto deve ser considerada constante, para qualquer idade em que a estrutura esteja sendo avaliada;
- As propriedades dos elementos analisados devem ser consideradas constantes durante a idade analisada, sendo calculada no início de cada análise para determinada idade; e
- O coeficiente de difusão inicial é uniforme ao longo da profundidade do elemento analisado.

Esse modelo inclui previsões probabilísticas do período de iniciação, com base no trabalho desenvolvido por Bentz (2003). Essas previsões são calculadas usando as seguintes etapas:

- a) Estime o tempo para a primeira corrosão para a melhor situação ou valores médios das entradas, ou seja, os valores inseridos pelo usuário;
- b) Para cada uma das cinco variáveis de entrada específicas (D_{28} , C_s , m , C_t , x), estima-se cinco tempos adicionais para primeiras corrosões, onde cada uma é ajustada individualmente em 10 %;
- c) Utiliza-se os resultados das etapas (b) e (a) para estimar a derivada do tempo de iniciação da corrosão em relação a cada uma das cinco variáveis. Isso determina a sensibilidade do período de iniciação às variações em cada uma das variáveis de entrada;
- d) Por fim, utilizam-se os resultados da etapa (c) para estimar um único parâmetro de variabilidade, semelhante a um desvio padrão, para uma variação assumida log-

normal do tempo para o início da corrosão (apresentado por Bentz, visando o melhor desempenho), onde o valor médio desta distribuição é removido da análise determinística na etapa (a) e a variabilidade desta distribuição assumida são determinadas a partir dos resultados das etapas (b) e (c).

Além disso, esse modelo permite mensurar as fissuras para o cálculo de estimativa da penetração de cloretos, de forma que o programa realiza um sistema de classificação de acordo com a abertura da fissura. Essas questões envolvendo fissuração em estruturas de concreto armado não foram abordadas no presente estudo.

As funções de densidade de probabilidade e probabilidade cumulativa resultante são usadas no Life-365 para calcular os efeitos da incerteza do período de iniciação (somente) no custo do ciclo de vida. Além de possui a maior gama de possibilidades de uso, fazendo índices de custos e afins, considerados para um determinado tempo, levando em consideração a inflação e indicadores da norma norte-americana.

3 | Metodologia

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada neste trabalho, a fim de deixar o leitor a par dos valores empregados nas variáveis envolvidas nas simulações numéricas e, assim, facilitar a posterior compreensão dos resultados obtidos e das conclusões formuladas.

Nesta etapa, apresenta-se a análise probabilística proposta. Utilizando dados de diversos autores, com base em estudos experimentais, avaliando a resposta dos modelos, suas características, particularidades, etc., especialmente com relação à influência do fator de envelhecimento durante as simulações, visando analisar a segurança de estruturas em diferentes períodos de tempo. A **Figura 3.1** apresenta esquematicamente a metodologia empregada neste trabalho.

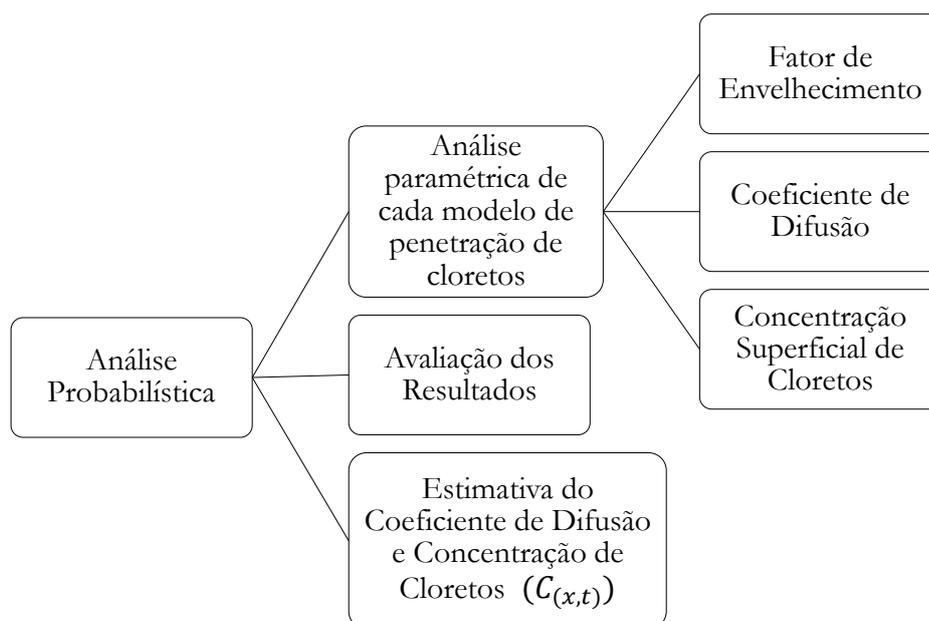


Figura 3.1 Procedimento metodológico realizado. Fonte: Autor.

3.1 Análise paramétrica

Visando uma melhor compreensão dos modelos utilizados e da influência de seus parâmetros de entrada na estimativa da vida útil das estruturas, uma análise paramétrica foi realizada.

Os valores médios utilizados nessa análise foram tomados de diversos autores. Quanto aos coeficientes de variação (COV) de cada um dos parâmetros realizou-se uma média dentre os valores mais utilizados entre diversos pesquisados (ANDRADE,

2001; SHERKACHI *et al.*, 2009; ANGST *et al.*, 2009; WALLY, 2019), dessa forma os dados utilizados na análise de sensibilidade são apresentados na **Tabela 3.1**.

Tabela 3.1 Distribuições de probabilidade utilizadas na análise paramétrica.

Fonte: Autor.

Parâmetro de Entrada	Unidade	Referência	Distribuição	Média	COV
Coefficiente de Difusão	m ² /s	Sell Junior	Normal	1,75x10 ⁻¹²	0,091
Cobrimento Nominal	mm	NBR 6118 (2014) Gjørv (2015) Dominicini <i>et al.</i> (2016) Favretto <i>et al.</i> (2021)	Lognormal	0 - 20 40 50 60 70	0,100
Concentração superficial de cloretos	%	Guimarães (2000) Medeiros (2008) Fib bulletin 76 (2015)	Lognormal	2	0,450
Temperatura	°C	Inmet (2019) Atlas/RS (2020)	Normal	18	0,200
Tempo de referência	dias	NBR 5739 (2018)	Normal	28	0,036 ($\sigma=1$)
Fator de envelhecimento	-	Boddy <i>et al.</i> , (2001) Sherkachi <i>et al.</i> , (2009)	Normal	0,10-0,70	0,100

3.1.1 Cobrimento Nominal

No presente trabalho, o cobrimento nominal utilizado foi baseado em diversos trabalhos anteriores (GJØRV, 2015; DOMINICINI *et al.*, 2016; FAVRETTO *et al.*, 2021) e na NBR 6118 (ABNT, 2014), a qual atenta para as características recomendadas do concreto quando exposto a diferentes características ambientais.

Dessa forma, as simulações foram realizadas em cobrimentos de 0 a 20 mm, em concordância com dados práticos encontrados no trabalho dos pesquisadores Dominicini *et al.* (2016). Posteriormente, realizou-se a análise em cobrimentos de 40 e 50 mm, de acordo com as classes de agressividade III e IV da NBR 6118 (ABNT,

2014), respectivamente. Por fim, foram utilizados valores de 60 e 70 mm, baseados nos estudos de Gjørnv (2015) e Magalhães *et al.* (2016) sobre estruturas portuárias e ambientes extremamente agressivos.

3.1.2 Tempo de referência

Com relação ao valor adotado para o tempo de referência, tomaram-se como base as considerações para corpos de prova moldados para o ensaio de resistência à compressão. Dessa maneira, o tempo de 28 dias foi fixado de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018).

3.1.3 Concentração superficial de cloretos

Adotou-se a concentração superficial de cloretos em função da *FIB Bulletin 76* (2015) na ordem de 2%. Esse valor foi escolhido com base em dados que corroboram essa adoção, os quais foram observados em estudos presentes na literatura (GUIMARÃES, 2000; ANDRADE, 2001; MEDEIROS, 2008; POSSAN e ANDRADE, 2014; MAGALHÃES, 2018).

3.1.4 Temperatura

A temperatura ambiente considerada nas análises é a apresentada pelo Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil (INMET) e pelo ATLAS/RS. Dessa forma, foi considerada a média durante o ano de 2020 para a cidade de Rio Grande/RS, que foi aproximadamente igual a 18°C. A consideração da temperatura média anual é recomendada por Gjørnv (2015) na apresentação de seu modelo de penetração de cloretos.

3.1.5 Fator de Envelhecimento

Com o objetivo de avaliar numericamente o comportamento das propriedades do concreto ao longo do tempo, o fator de envelhecimento foi mensurado de modo condizente aos demais parâmetros já mencionados. Os valores entre 0,1 e 0,7 foram utilizados por serem valores obtidos experimentalmente (SHERKACHI *et al.*, 2009).

3.2 Análise de convergência

A análise de convergência foi realizada considerando as variáveis básicas que compõem os modelos apresentados no item 2.4. Tendo em vista a quantidade de variáveis presentes e o fato de que cada uma delas apresenta seus próprios parâmetros estatísticos, o cálculo da concentração de cloretos foi realizado por meio de uma combinação da **Equação 2.11**, **Equação 2.12** e **Equação 2.13** para o modelo Gjørnv (2015). Também, da **Equação 2.14**, **Equação 2.15** e **Equação 2.16** foram usadas para o modelo

Kwon (2007). E, por fim, a **Equação 2.17** e a **Equação 2.18** foram utilizadas para o modelo Life 365 (1999) com a simulação de Monte Carlo. Para tal, foi necessário que todos os parâmetros de entrada envolvidos fossem descritos por uma função de densidade de probabilidade (Ang & Tang, 1990). Os valores médios adotados foram baseados em diversos estudos, enquanto que os valores de coeficientes de variação (COV) de cada um dos parâmetros seguiram os apresentados por Andrade (2001), conforme apresentado anteriormente na Tabela 3.1. As análises foram realizadas considerando um tempo de projeto de 50 anos. Para cada cenário, foram realizadas 10^5 simulações de Monte Carlo.

O número de 100000 simulações se mostrou suficiente para a convergência estatística do valor esperado para a concentração de cloretos e do seu desvio-padrão. As **Figuras 3.2** a **3.3** apresentam as convergências estatísticas das médias e dos desvios-padrões para cada um dos modelos utilizados.

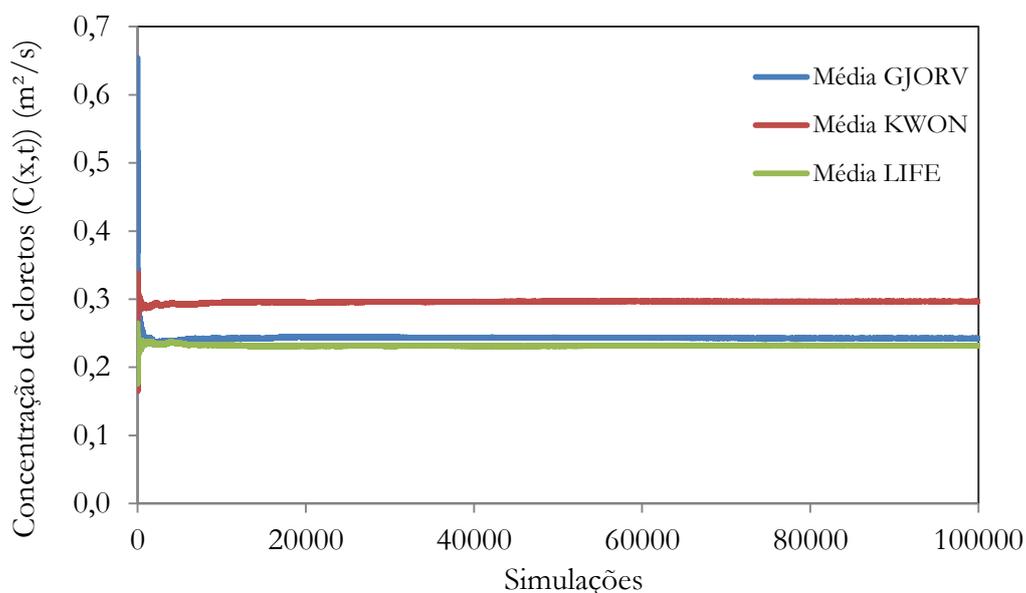


Figura 3.2 Convergência estatística da média da concentração de cloretos $C_{(x,t)}$ nos modelos analisados no presente estudo. Fonte: Autor.

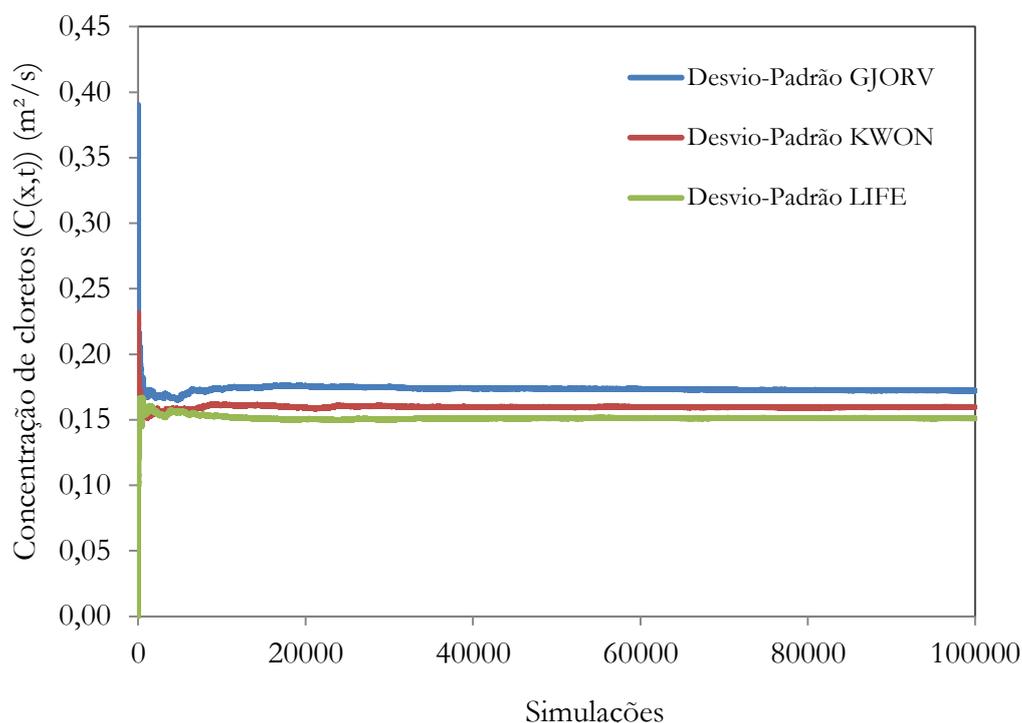


Figura 3.3 Convergência estatística do desvio-Padrão da concentração de cloretos $C_{(x,t)}$ nos modelos analisados no presente estudo. Fonte: Autor.

Inicialmente, foram avaliados os efeitos das mudanças do coeficiente de variação das variáveis básicas na concentração de cloretos $C_{(x,t)}$. Para tal, estabeleceu-se uma relação entre a concentração de cloretos obtida a partir das simulações, considerando os coeficientes de variação apresentados anteriormente na Tabela 3.1 (chamada de $C_{(x,t)}$) e a concentração de cloretos, sem considerar nenhuma variação dos parâmetros básicos, denominada $C_{(x,t)}(COV = 0)$. Após, foi analisado o efeito da mudança do COV de cada uma das variáveis básicas no coeficiente de variação de $C_{(x,t)}$ para cada modelo e, por fim, os valores obtidos de $C_{(x,t)}$ foram analisados levando em consideração que quando $C_{(x,t)} = C_{crit}$, a situação foi considerada como um estado limite, fixado em $C_{cr} = 0,4$, o que foi ajustado de acordo com valores de outros trabalhos.

Para isso, estabeleceu-se uma relação entre a concentração de cloretos obtida e os valores de variação de α . Após esse processo, avaliou-se a influência das variabilidades atribuídas aos parâmetros de entrada nos valores calculados de D e $C_{(x,t)}$ para cada modelo e, por fim, os valores obtidos para $C_{(x,t)}$ foram comparados com o valor de C_{crit} , que estava fixado em 0,4, levando em consideração valores de outros trabalhos anteriores.

As análises de D e $C_{(x,t)}$ visando avaliar a influência do fator de envelhecimento foram realizadas considerando estruturas de concreto armado que deveriam alcançar uma vida útil de 25, 50, 75, 100 e 150 anos.

4 | ANÁLISE DOS RESULTADOS

A comparação entre modelos numéricos vem sendo contemplada desde Andrade (2001), entretanto poucos estudos abordaram esse tópico em função de cada modelo numérico possui suas singularidades. Devido a isso, há uma dificuldade na padronização dos parâmetros de entrada nos diferentes modelos numéricos existentes. Andrade *et al.* (2013) compararam o modelo de Tavares (2013) com outros oito modelos, sendo três deles modelos numéricos. Além de que essa comparação foi feita entre modelos unidirecionais, os autores não deixam claro como é a formulação dos outros modelos numéricos. Os autores apenas evidenciam que o modelo numérico considera a dependência do tempo com relação ao coeficiente de difusão e a concentração superficial e que o modelo avalia a combinação de cloretos.

Dessa forma, essa seção visa comparar os resultados numéricos obtidos pelos modelos trabalhados nessa dissertação, ou seja, aqueles propostos por Gjørnv (2015), Kwon (2007) e Life 365 (1999), todos eles modelos unidimensionais. As equações governantes de cada modelo podem ser lembradas na **Tabela 2.3**, e nos **subitens 2.4.1, 2.4.2 e 2.4.3**. O modelo proposto por Gjørnv (2015) apresenta influência direta da temperatura, visto que necessita da temperatura média anual para o início dos cálculos. A partir desse valor, calcula-se o coeficiente de difusão e a concentração de cloretos. Enquanto isso, o modelo proposto por Kwon (2007) analisa com maior exatidão os resultados pois leva em consideração a idade da estrutura analisada e, através dessa condição, é definida uma equação para o cálculo do coeficiente de difusão e, posteriormente, a concentração de cloretos. Por fim, o modelo Life 365 (1999) demonstra a dependência da temperatura e de outros dados obtidos em experimentos práticos em relação ao coeficiente de difusão e concentração de cloretos.

4.1 Teste de Aderência de Kolmogorov-Smirnov

Com o objetivo de avaliar qual a distribuição que melhor se ajusta aos dados de $C_{(x,t)}$ que saem de cada modelo, utilizou-se o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov (K-S) por meio do programa EASYFIT, para avaliar um conjunto de dados obtidos preliminarmente através do programa MATLAB. Para o teste de aderência, foram utilizados dados de 5.000 simulações, utilizando os parâmetros de entrada para cada modelo.

Entre os objetivos do teste de Kolmogorov-Smirnov está avaliar a distância máxima absoluta (D_n) entre a distribuição cumulativa gerada pelos resultados de determinado modelo de penetração de cloretos e compará-la com a distribuição cumulativa dos dados, como pode ser observado nas figuras (4.1, 4.2 e 4.3). Através desse procedimento, compara-se essa distância com um valor crítico, relacionado a um dado nível de significância λ , que se relaciona com o nível de confiança referente à rejeição da hipótese nula.

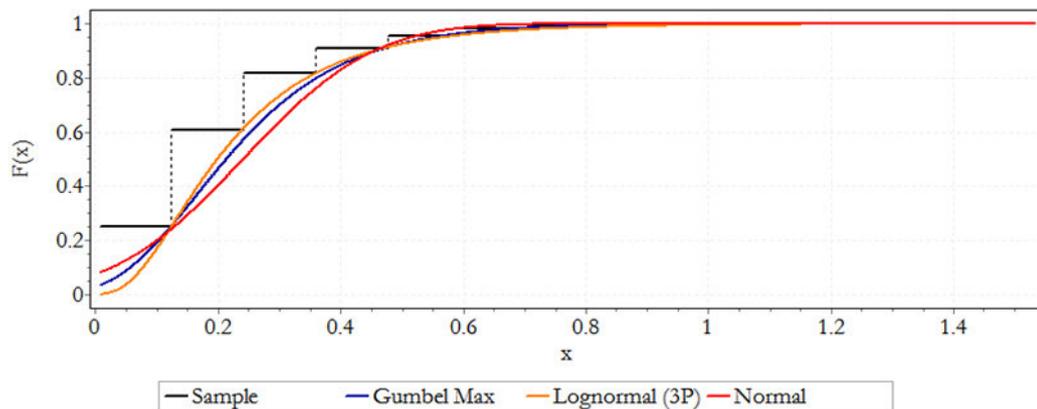


Figura 4.1 Ilustração da distância máxima (D_n) relacionada ao teste de Kolmogorov-Smirnov com dados obtidos pelo modelo proposto por Gjørv. Fonte: Autor.

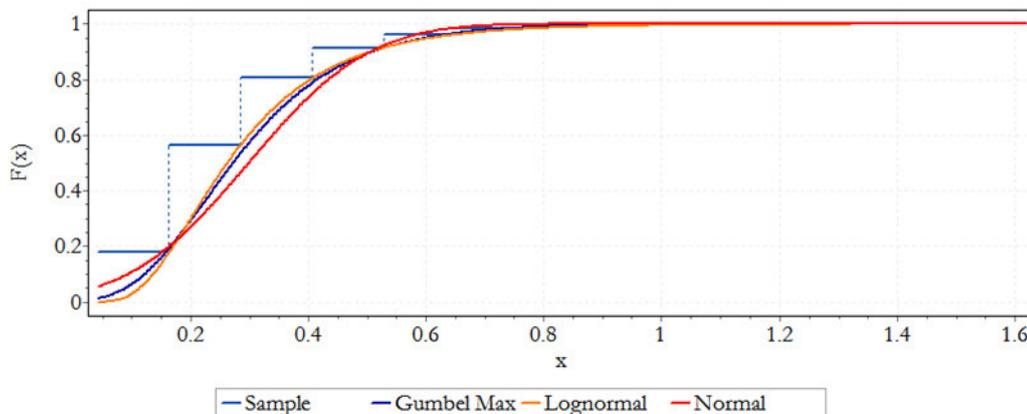


Figura 4.2 Ilustração da distância máxima (D_n) relacionada ao teste de Kolmogorov-Smirnov com dados obtidos pelo modelo proposto por Kwon. Fonte: Autor.

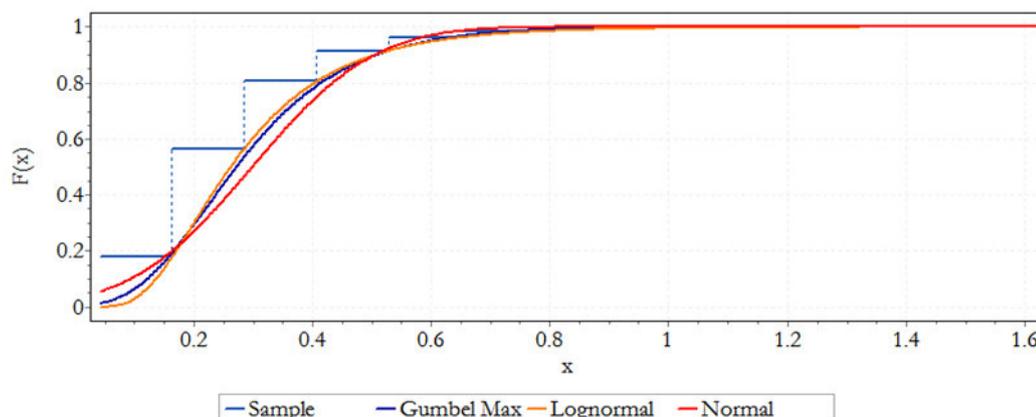


Figura 4.3 Ilustração da distância máxima (D_n) relacionada ao teste de Kolmogorov-Sminov com dados obtidos pelo modelo proposto por Life. Fonte: Autor.

Por meio do programa EASYFIT, analisou-se a distribuição de cada modelo (Sample), de modo que se conclui que a distribuição Lognormal apresenta o melhor ajuste frente a cada modelo analisado no presente estudo.

Visando avaliar os resultados obtidos, foram calculados os valores de níveis de significância para cada modelo de distribuição em função de cada modelo matemático, conforme pode ser visto na **Tabela 4.1**.

Tabela 4.1 Níveis de significância para cada modelo de distribuição em relação aos modelos matemáticos. Fonte: Autor.

Distribuição	λ		
	GJORV	KWON	LIFE
Gumbel	96,60 %	90,00 %	95,20 %
Lognormal	96,60 %	99,00 %	97,40 %
Normal	92,70 %	86,30 %	91,70 %

A distribuição assumida pelos três modelos tende a ser Lognormal em função de sua distribuição possuir maior flexibilidade, aliado ao fato de estar relacionada à distribuição Normal. Além disso, a distribuição Lognormal pode ser especialmente útil para a modelagem de dados que são mais ou menos simétricos ou assimétricos à direita.

Podendo também ser utilizada para estimar a vida útil de um elemento baseado no modelo de crescimento multiplicativo, o que significa que a qualquer momento, o processo é submetido a um aumento da degradação aleatória, que é proporcional ao seu estado atual. Portanto, a distribuição é, muitas vezes, usada para modelar peças ou componentes que falham principalmente devido ao estresse ou fadiga, incluindo as seguintes aplicações.

Através dos resultados obtidos, observa-se a adequabilidade de um modelo de distribuição Lognormal aos conjuntos de dados gerados pelos três modelos matemáticos, os quais apresentaram níveis de estatísticas de teste acima dos 95 %. Isso demonstra que essa é a distribuição que representa com maior precisão o comportamento dos modelos analisados no presente estudo.

Além disso, foram realizadas análises por meio de histogramas gerados com dados dos três modelos, usando a chamada função de densidade de probabilidade, visando assim, confirmar a melhor distribuição para os modelos. Utilizando como base os estudos propostos por Lo Brano *et al.* (2010) e Wang *et al.* (2016), onde as distribuições geradas pelos modelos foram comparadas com as distribuições Weibull, Rayleigh, Lognormal, Gamma, Gaussiana Inversa, Pearson tipo V e Burr, no presente estudo, as comparações se restringiram às distribuições de Gumbel, Lognormal e Normal, conforme pode ser observado nas **Figuras 4.4, 4.5 e 4.6**.

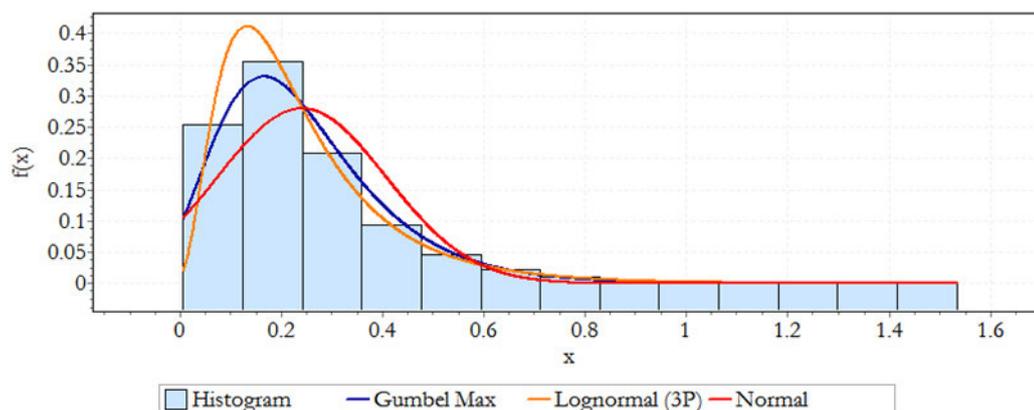


Figura 4.4 Função de densidade de probabilidade relacionada ao Teste de aderência por meio dos resultados de concentração de cloretos obtidos através do modelo proposto por GJORV. Fonte: Autor.

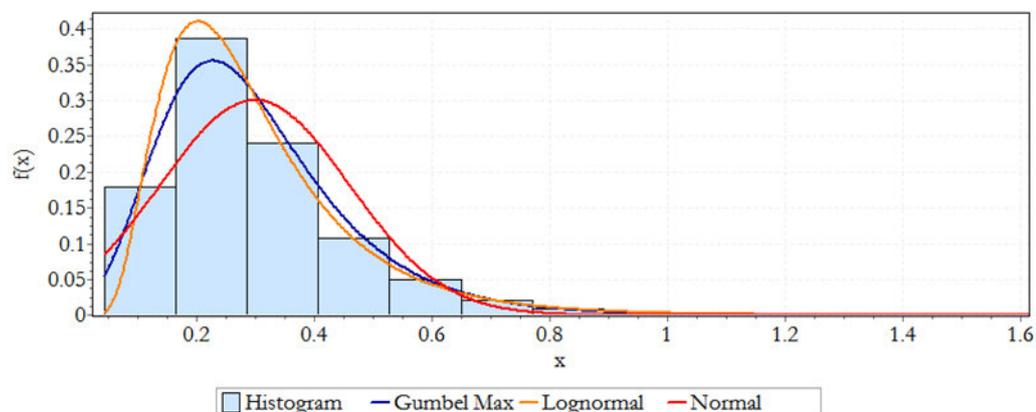


Figura 4.5 Função de densidade de probabilidade relacionada ao Teste de aderência por meio dos resultados de concentração de cloretos obtidos através do modelo proposto por KWON. Fonte: Autor.

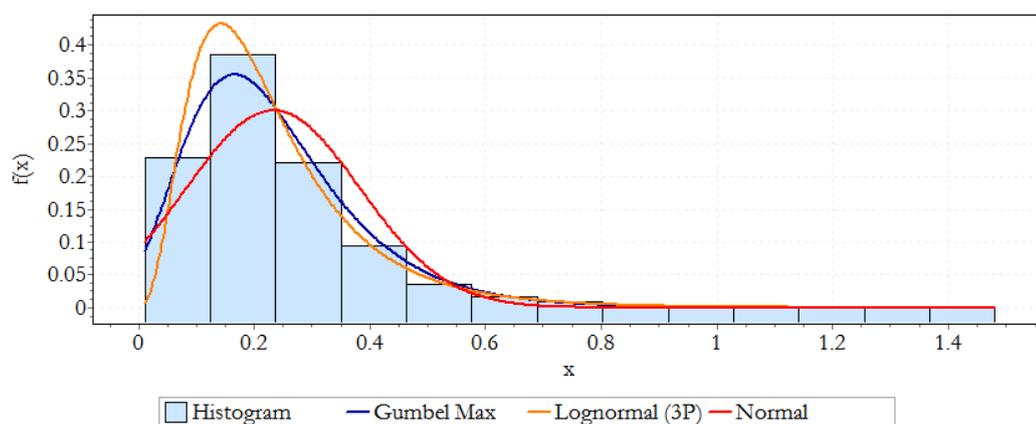


Figura 4.6 Função de densidade de probabilidade relacionada ao Teste de aderência por meio dos resultados de concentração de cloretos obtidos através do modelo proposto por LIFE. Fonte: Autor.

Por fim, os resultados obtidos com os histogramas, que representam as funções de Densidade de Probabilidade, corroboram os valores obtidos para os níveis de significância. Dessa forma, conclui-se que, dentre os modelos de distribuição considerados no presente estudo, o modelo Lognormal apresentou o comportamento que melhor representa o comportamento das distribuições gerado pelos dados de cada modelo de penetração de cloretos.

4.2 Análise do efeito das variáveis básicas na concentração de cloretos

As **Figuras 4.7 a 4.10** apresentam o aumento da concentração de cloretos na profundidade da armadura, em relação à situação referência ($COV = 0$), devido aos diferentes COV adotados às variáveis básicas.

Na **Figura 4.7**, analisando as variações de $C_{(x,t)}$ devido às mudanças do COV das variáveis analisadas, percebe-se a grande influência gerada pelo fator de envelhecimento no modelo proposto por Gjørnv (2015). De acordo com esse modelo, uma variação do fator de envelhecimento de 0,2 gerou um aumento de aproximadamente 50 % na COV da $C_{(x,t)}$, sendo responsável por aumentos da COV da $C_{(x,t)}$ na ordem de 2,0 vezes.

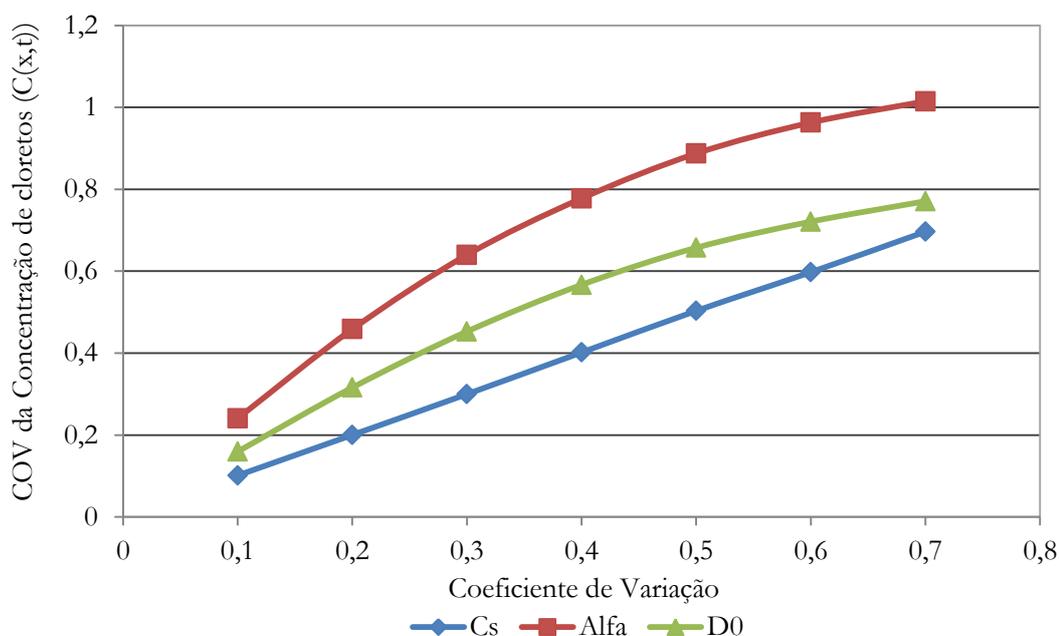


Figura 4.7 Efeito do coeficiente de variação das variáveis básicas na concentração de claretos média no modelo proposto por Gjørnv (2015). Fonte Autor.

Quanto à **Figura 4.8**, analisando as variações de $C_{(x,t)}$ devido às mudanças de COV das variáveis analisadas, observa-se que o fator de envelhecimento é a principal variável que gera influência sobre o modelo proposto por Kwon (2007). Ao verificar os resultados, nota-se que a variação do fator de envelhecimento em 0,2 gerou um aumento de aproximadamente 50 % na COV da $C_{(x,t)}$, sendo responsável por aumentos da COV da $C_{(x,t)}$ na ordem de 2,0 vezes.

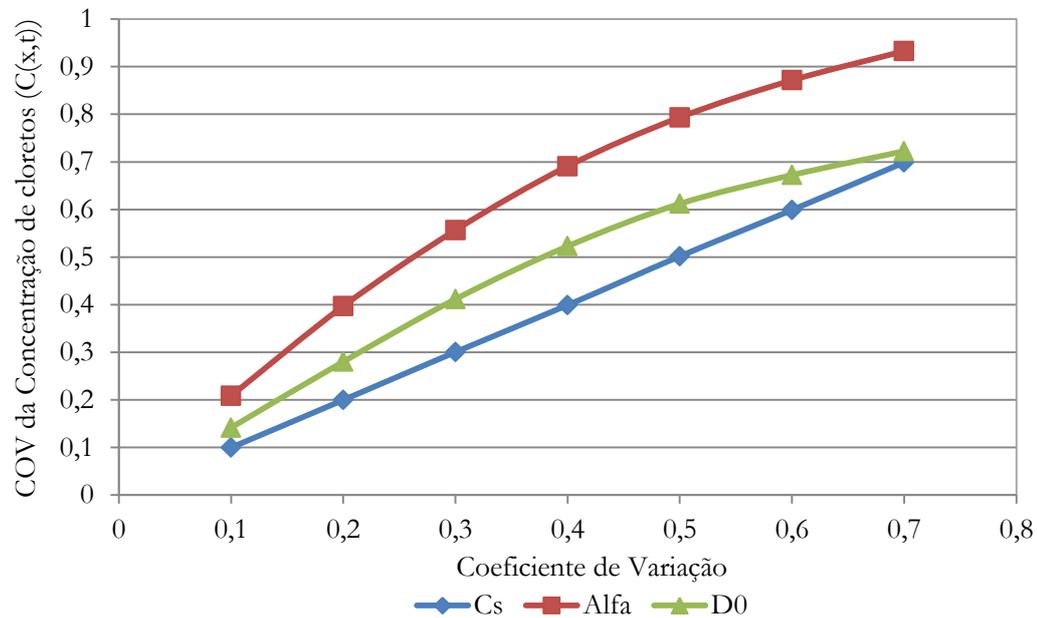


Figura 4.8 Efeito do coeficiente de variação das variáveis básicas na concentração de cloretos média no modelo proposto por Kwon (2007). Fonte Autor.

Já no modelo proposto por Life 365 (1999), observa-se principalmente a influência por parte das variações do fator de envelhecimento e coeficiente de difusão inicial. Analisando a **Figura 4.9**, as variações de $C_{(x,t)}$ devido às mudanças de COV resultaram em um aumento na ordem de 2,5-2,0 vezes para um COV igual a 0,2.

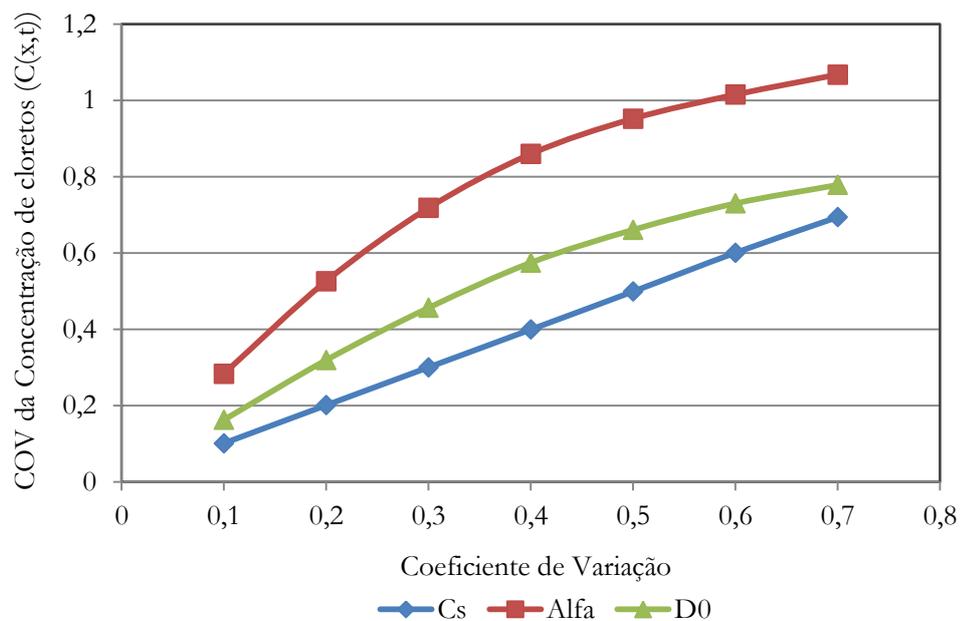


Figura 4.9 Efeito do coeficiente de variação das variáveis básicas na concentração de cloretos média no modelo proposto por Life 365 (1999). Fonte Autor.

Por fim, na **Figura 4.10** são apresentadas as alterações sofridas pelo COV de $C(x,t)$ devido às variações do parâmetro do fator de envelhecimento analisados para cada um dos modelos. Se observa a influência direta do fator de envelhecimento em relação aos modelos propostos por Gjørø (2015), Kwon (2007) e Life 365 (1999) como já visto nas **Figuras 4.7, 4.8 e 4.9**.

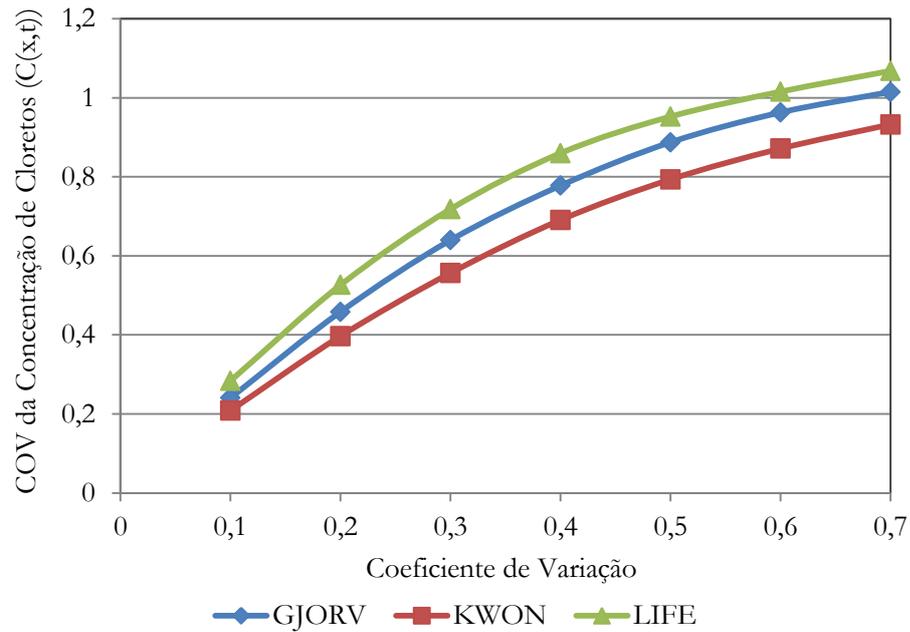


Figura 4.10 Efeito do coeficiente de variação das variáveis básicas na COV da concentração de cloretos. Fonte: Autor.

4.3 Coeficiente de difusão

Os resultados obtidos através das simulações numéricas para determinação do coeficiente de difusão em função do fator de envelhecimento são apresentados nas **Figuras 4.11 e 4.12**.

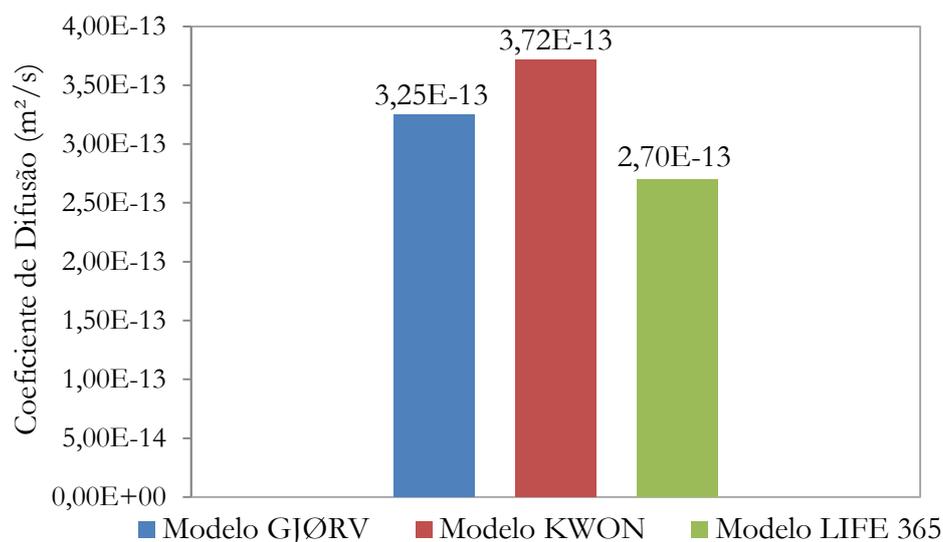


Figura 4.11 Comparativo do coeficiente de difusão aos 50 anos com fator de envelhecimento de 0,3. Fonte: Autor.

Inicialmente, por meio da avaliação da **Figura 4.11**, observa-se que os modelos obtiveram resultados que comprovam a diminuição do coeficiente de difusão ao longo do tempo, quando comparado ao coeficiente de difusão inicial. Posterior a isso, escolheu-se realizar a avaliação da influência do fator de envelhecimento, a partir do coeficiente de variação, frente ao coeficiente de difusão. Realizou-se essa análise em conjunto, visando analisar como cada modelo é influenciado por esse parâmetro, conforme visto na **Figura 4.12**.

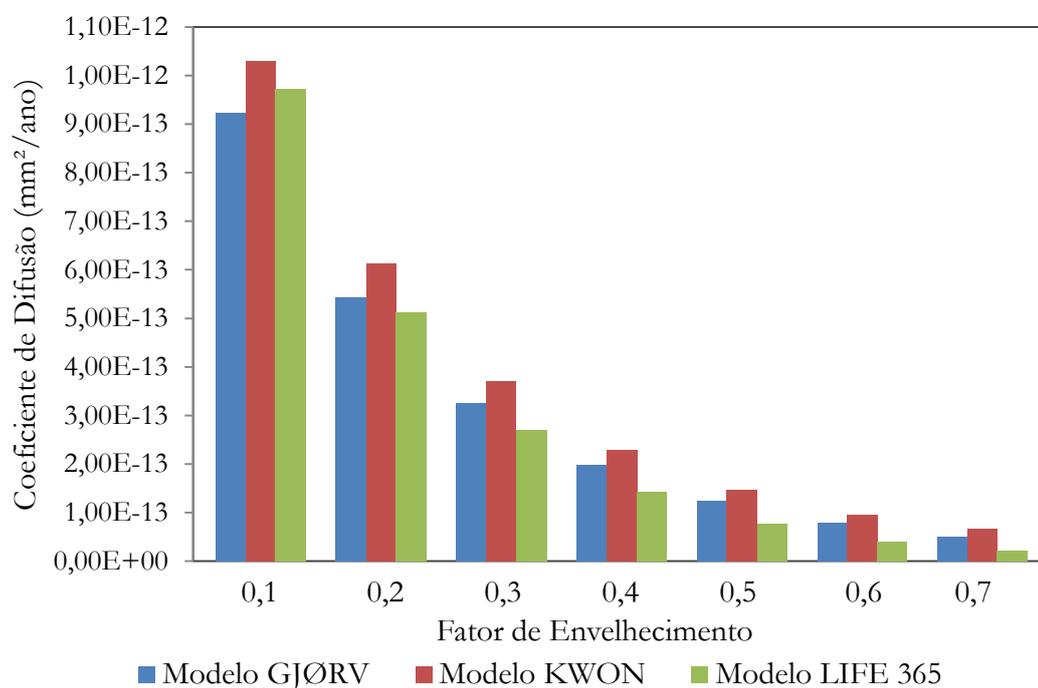


Figura 4.12 Coeficiente de difusão em função do fator de envelhecimento aos 50 anos. Fonte: Autor.

Avaliando os valores de coeficiente de difusão obtidos, tomando o resultado do modelo proposto por GjØrv como base (GJØRV, 2015), quanto analisados sob um fator de envelhecimento de 0,1, obteve-se um aumento de 11,57 % no modelo proposto por Kwon (KWON, 2007) e uma aumento de 5,41 % no modelo proposto pelo projeto Life 365 (LIFE, 1999).

Quando analisada a mesma situação para um fator de envelhecimento de 0,4, observaram-se os seguintes resultados de coeficiente de difusão, tomando o resultado do modelo proposto por GjØrv como base (GJØRV, 2015) e obteve-se um aumento de 16,03 % no modelo proposto por Kwon (KWON, 2007), além de uma redução de 27,39 % no modelo proposto pelo projeto Life 365 (LIFE, 1999)

Por fim, realizou-se a avaliação do coeficiente de difusão dos três modelos em função de um fator de envelhecimento de 0,7, tomando o resultado do modelo proposto por GjØrv (GJØRV, 2015) como base e, com isso, obteve-se um aumento 32,43 % no modelo proposto por Kwon (KWON, 2007), e uma redução de 56,94 % no modelo proposto pelo projeto Life 365 (LIFE, 1999).

Nota-se uma diminuição do coeficiente de difusão nos três modelos, em função da alteração do fator de envelhecimento, o que permite concluir que o fator de enve-

lhecimento inserido nos modelos teóricos com o objetivo de representar a “maturação” do concreto e refinamento da microestrutura ao longo dos anos, realmente diminuiu a penetração de íons cloretos. Além disso, observa-se um maior rigor nos valores obtidos pelo modelo proposto por Kwon (KWON, 2007), fato esse que está diretamente relacionado ao fato de que o modelo leva em consideração a idade da estrutura em análise para selecionar a equação utilizada no cálculo do coeficiente de difusão.

Salienta-se, por fim, que apesar das expressivas reduções no coeficiente de difusão do concreto, que foram observadas em função do crescimento do fator de envelhecimento, não se pode afirmar que estejam diretamente ligadas à idade do concreto. Em situações reais, quando ocorre uma análise de uma estrutura, são necessários testes adicionais para comprovar os fatores que levaram a estrutura a apresentar seu comportamento.

4.4 Penetração de cloretos em função do cobrimento

Os resultados obtidos através das simulações numéricas para a determinação da concentração de cloretos em função do cobrimento da estrutura são apresentados na **Figura 4.13**.

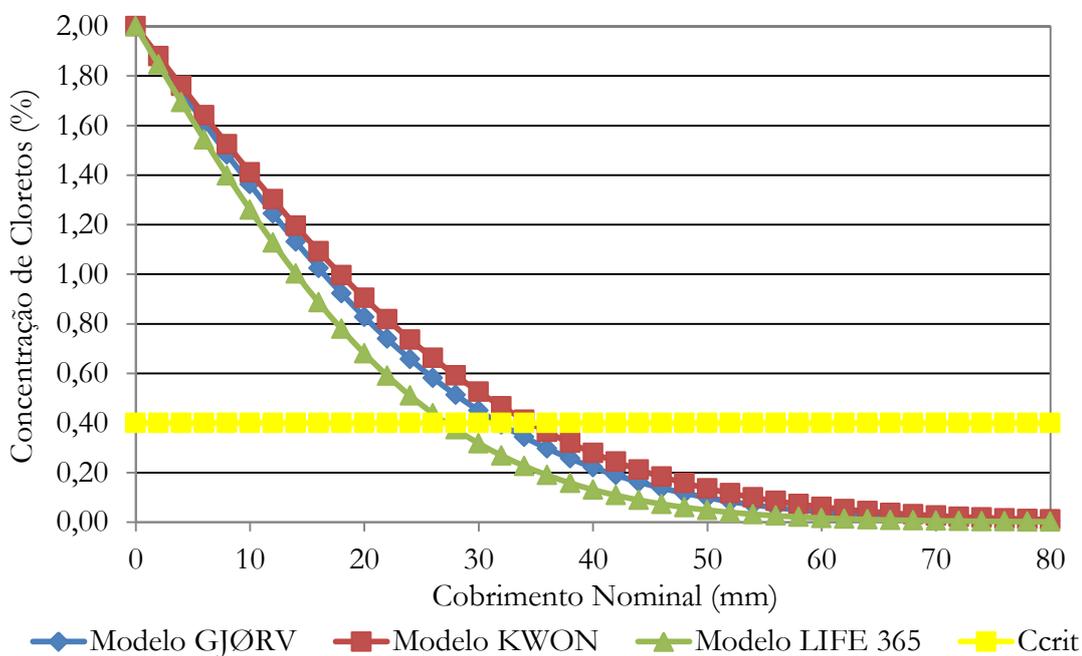


Figura 4.13 Concentração de cloretos para um fator de envelhecimento de 0,4.

Fonte: Autor.

Torna-se evidente a importância do revestimento frente à penetração de cloretos, ao analisar os resultados obtidos através das simulações numéricas (GJØRV,2015; FARAHANI *et al.*,2015).

A partir da análise da **Figura 4.13**, observam-se comportamentos similares entre os modelos, com a diminuição gradativa da concentração de cloretos na medida do aumento da camada de proteção propiciada pelo revestimento. Além disso, com relação à concentração crítica de cloretos avaliada com modelo proposto por Gjerv (GJØRV, 2015) como base, foi necessário um revestimento de 32 mm para obter um valor de $C(x, t) < C_{crit}$. No modelo proposto por Kwon (KWON, 2007) foi necessário um revestimento de 36 mm para obter um valor de $C(x, t) < C_{cr}$. Já no modelo proposto pelo projeto Life 365 (LIFE, 1999), foi necessário um revestimento de 28 mm para obter um valor de $C(x, t) < C_{crit}$.

Por fim, avaliando os valores de concentração de cloretos obtidos, conclui-se que, para alcançar um valor de $C(x, t) < C_{crit}$, visando estimar com precisão a vida útil de uma estrutura, os três modelos obtiveram resultados similares, com diferença geral inferior a 1 cm. Entretanto, em uma análise dos três modelos frente a um ambiente mais agressivo, as diferenças obtidas através das simulações provavelmente seriam ainda maiores. Além disso, considerando os resultados obtidos de um ponto de vista econômico, essa pequena diferença de espessura pode representar altos custos com reparações ou intervenções em estruturas costeiras.

4.5 Penetração de cloretos em função do fator de envelhecimento

Os resultados obtidos através das simulações numéricas para determinação da concentração total de cloretos em função do fator de envelhecimento são apresentados na **Figura 4.14**.

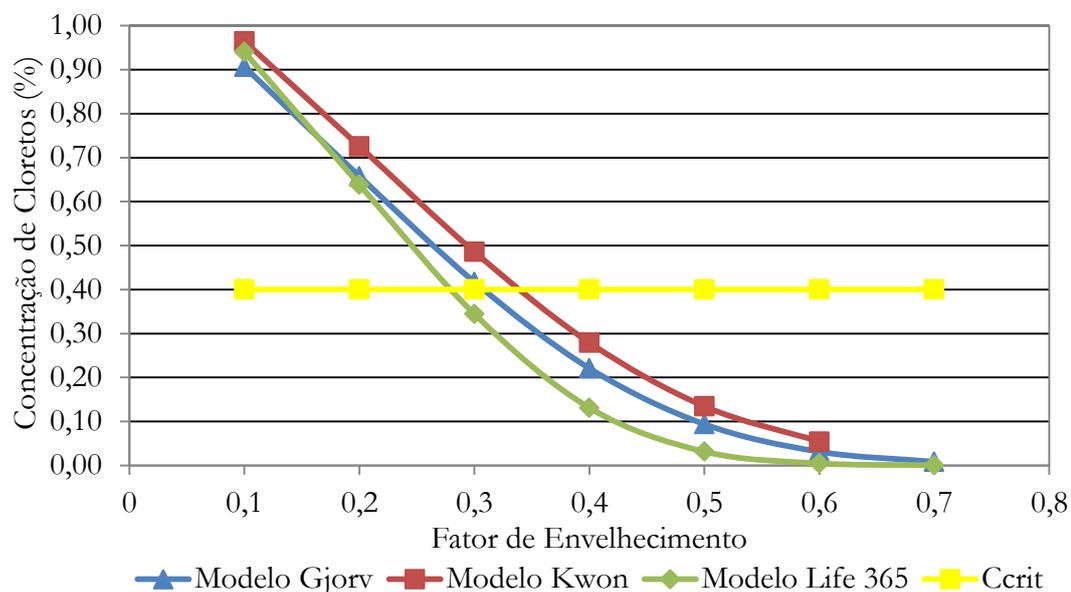


Figura 4.14 Concentração de cloretos no interior da estrutura ($C(40,50)$) em função do fator de envelhecimento. Fonte: Autor.

Por meio da análise dos resultados obtidos nas simulações numéricas, observou-se resultados mais elevados por parte do modelo proposto por Kwon (KWON, 2007), em comparação aos modelos propostos por Gjørv (GJØRV, 2015) e Life 365 (LIFE, 1999). Tal conclusão foi possível ao avaliar os valores obtidos de $C(x, t) < C_{cr}$, em função do crescimento do fator de envelhecimento durante as simulações para uma determinada estrutura aos 50 anos, observando o cobrimento que possibilita uma vida útil satisfatória, como pode ser observado na **Tabela 4.2**.

Tabela 4.2 Avaliação comparativa dos modelos matemáticos aos 50 anos, visando avaliar o cobrimento necessário para cada fator de envelhecimento para obter $C(x, t) < C_{cr}$. Fonte: Autor.

Fator de Envelhecimento (m/α)	Modelo matemático		
	GJØRV (2015) (mm)	KWON (2007) (mm)	LIFE 365 (1999) (mm)
0,1	70	74	72
0,2	54	58	52
0,3	42	46	38
0,4	32	36	28
0,5	26	28	20
0,6	20	24	16
0,7	16	-	12

4.6 Penetração de cloretos em função das diferentes idades do concreto

Os resultados obtidos através das simulações numéricas para determinação do coeficiente de difusão em função do fator de envelhecimento para diferentes idades são apresentados na **Figura 4.15**. Já a penetração de cloretos em função do fator de envelhecimento para diferentes idades é apresentada nas **Figuras 4.16, 4.17, 4.18 e 4.19**.

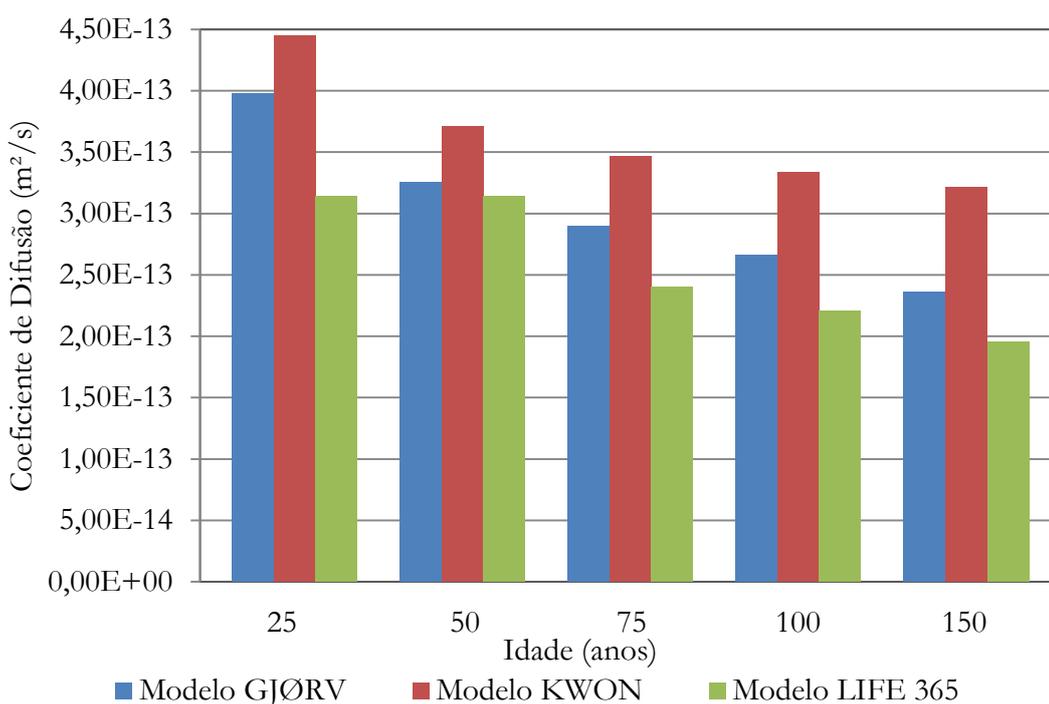


Figura 4.15 Coeficiente de difusão de concretos em diferentes idades, através de três distintos modelos numéricos em função do fator de envelhecimento de 0,3.

Fonte: Autor.

Através dos resultados apresentados, observaram-se para os valores de coeficiente de difusão aos 25 e 150 anos as diminuições de 50,44 %, 63,83 % e 49,77 %, para os modelos propostos por GjØrv (GJØRV, 2015), Kwon (KWON, 2007), e Life 365 (LIFE, 1999), respectivamente.

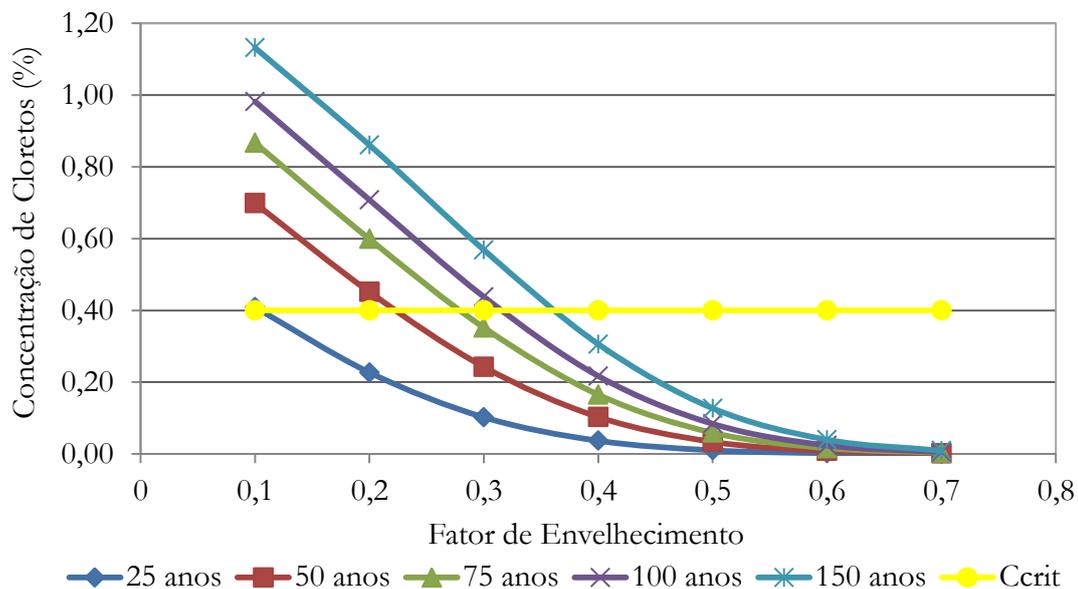


Figura 4.16 Concentração de cloretos em função do fator de envelhecimento para profundidade de 50 mm, em diferentes idades através do modelo matemático proposto por GJØRV. Fonte: Autor.

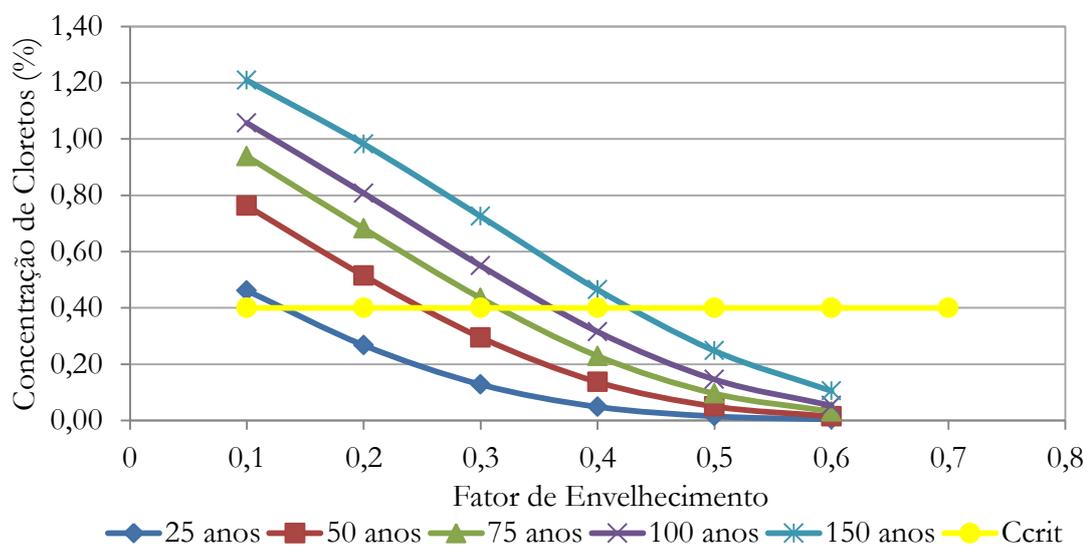


Figura 4.17 Concentração de cloretos em função do fator de envelhecimento para profundidade de 50 mm, em diferentes idades através do modelo matemático proposto por KWON. Fonte: Autor.

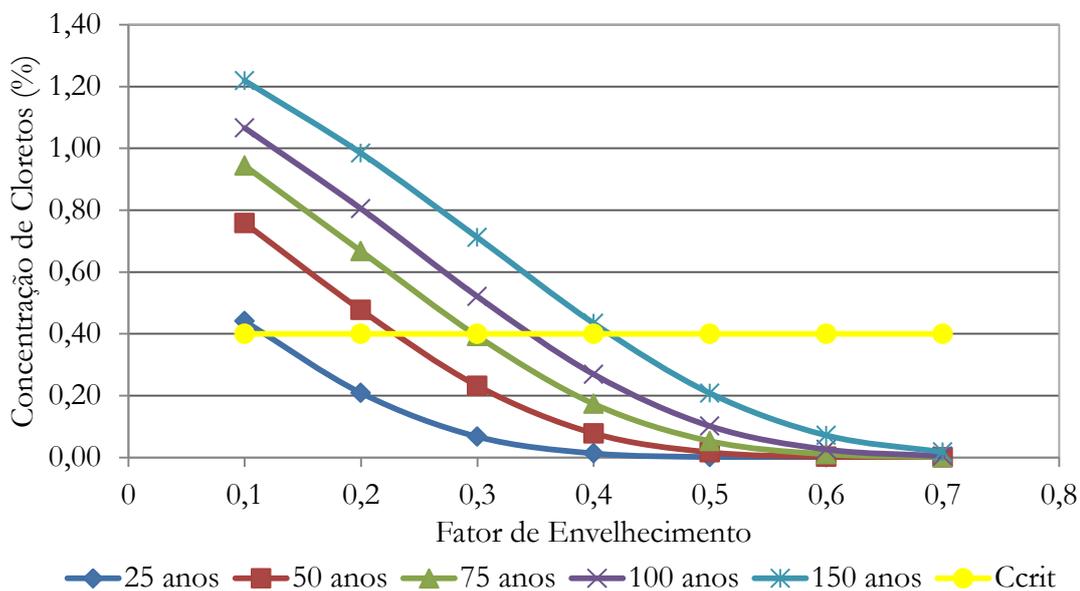


Figura 4.18 Concentração de cloretos em função do fator de envelhecimento para profundidade de 50 mm, em diferentes idades através do modelo matemático proposto por LIFE 365. Fonte: Autor.

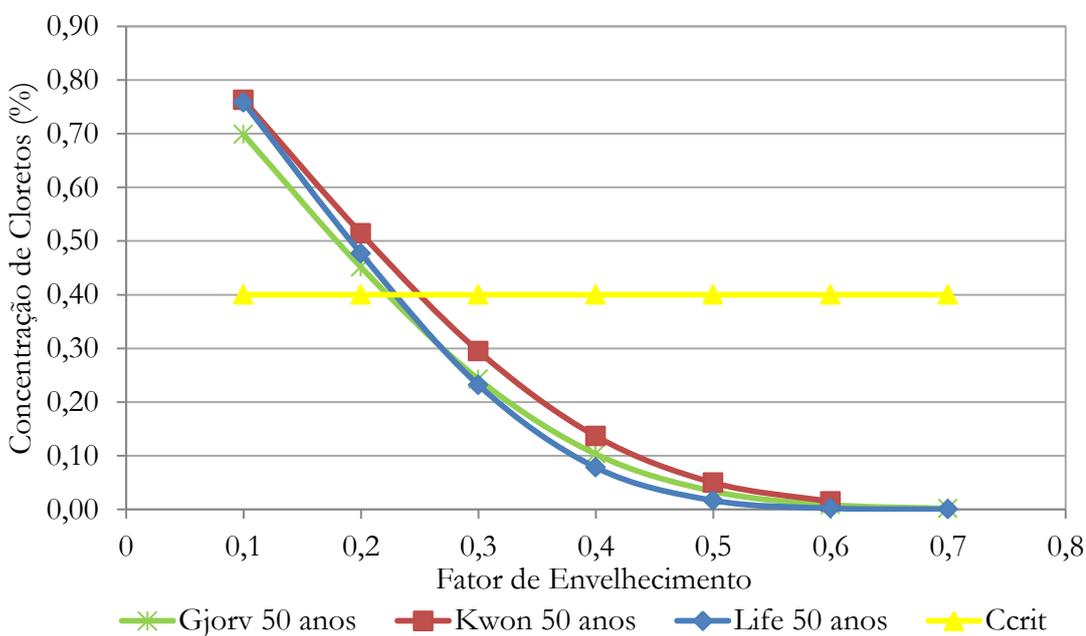


Figura 4.19 Comparativo da concentração total de cloretos em função do fator de envelhecimento para profundidade de 50 mm aos 50 anos. Fonte: Autor.

Através das **Figuras 4.16 a 4.19**, observou-se que os três modelos em estudo apresentam diminuição gradativa da concentração de cloretos, conforme aumentou o

fator de envelhecimento (de 0,1 a 0,7). Por fim, analisa-se que os modelos estudados obtêm resultados similares do coeficiente de difusão e da concentração de cloretos, com diferenças em virtude das considerações matemáticas de cada modelo. Observa-se que o uso dos modelos matemáticos estará diretamente vinculado aos parâmetros disponíveis para o projetista, aliado a necessidade do projeto, para que dessa forma, realize-se uma avaliação preliminar a respeito do ambiente onde determinada estrutura será instalada e sobre as tomadas de decisões de intervenções futuras.

5 | Considerações Finais

A avaliação da qualidade do concreto e sua potencial durabilidade quando exposto ao ambiente de severa agressividade são temas de notável relevância, especialmente em países que possuem vasta região costeira, como o Brasil. Ao longo deste trabalho foram abordadas questões fundamentais para uma melhor compreensão do complexo fenômeno da penetração de cloretos no concreto, bem como para avaliação da qualidade do concreto.

Considerando a grande variabilidade que os parâmetros envolvidos no processo de penetração de cloretos no concreto podem assumir, uma análise probabilística foi realizada. O Método de Monte Carlo foi utilizado na determinação do coeficiente de difusão, bem como a concentração de cloretos das estruturas avaliadas.

Este trabalho teve por objetivo analisar três modelos matemáticos distintos, com o objetivo de investigar como cada um determina a penetração de cloretos e o coeficiente de difusão em uma determinada estrutura. Dessa forma, através de simulações aos 25, 50, 75, 100 e 150 anos, este trabalho comparou esses modelos e suas metodologias, comparando também os resultados obtidos.

Realizada a análise paramétrica dos modelos matemáticos estudados neste trabalho, verificou-se uma significativa influência do fator de envelhecimento nos modelos GjØrv (2015) e Life 365 (1999), que ao ter $COV = 0,2$, geraram um aumento de aproximadamente 50 % na concentração de cloretos, o que representou aumentos da concentração de cloretos na ordem de 3,5 e 2,5 vezes, respectivamente, quando o COV atingiu 0,6.

A concentração superficial de cloretos, diretamente ligada ao ambiente ao qual a estrutura é exposta, apresentou variações significativas numa comparação entre os modelos propostos por Kwon (2007) e Life 365 (1999), gerando aumento do coeficiente de variação da concentração de cloretos.

Além disso, constatou-se que os modelos avaliados neste trabalho cumprem com sua função, visando estimar a concentração de cloretos de uma estrutura em determinada idade. O modelo proposto por Kwon (KWON, 2007) obteve resultados mais conservadores com relação ao coeficiente de difusão e a concentração de cloretos, devido ao fato desse modelo possuir considerações para o cálculo do coeficiente de difusão que levam em consideração a idade da estrutura que estará sob análise. Enquanto que os modelos propostos por GjØrv (GJØRV, 2015) e Life 365 (LIFE, 1999) apresentam resultados com índices um pouco inferiores, podendo ocasionar discrepâncias no futuro, devido à variabilidade dos resultados.

5.1 Principais conclusões

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

(a) Todos os modelos cumpriram suas funções de estimar a vida útil de uma determinada estrutura, em função dos parâmetros de entrada. Dentre os resultados obtidos, observou-se que o modelo proposto por Kwon (KWON, 2007) apresenta resultados mais conservadores, em virtude desse modelo levar em consideração o fator idade da estrutura na tomada de decisão das equações utilizadas na obtenção do coeficiente de difusão e por consequência, obtenção da concentração de cloretos;

(b) Dentre os modelos para o cálculo da penetração de cloretos, vale ressaltar o modelo proposto por Life 365 (LIFE, 1999), devido as considerações que podem ser feitas a respeito do concreto, como: adições minerais, o diâmetro da fissura e o tipo de aço que esteja sofrendo;

(c) As análises dos modelos a respeito da penetração de cloretos mostram uma significativa relação entre as variabilidades do cobrimento nominal da armadura e do fator de envelhecimento do concreto. Esses fatores corroboram a importância de um controle de qualidade cada vez mais rigoroso na execução de estruturas em concreto armado, principalmente quando expostas a ambientes agressivos;

(d) Considerando as influências paramétricas do coeficiente de difusão inicial, da concentração superficial de cloretos e do fator de envelhecimento frente aos três modelos analisados, pôde-se concluir que a variável que mais influencia na concentração de cloretos e no COV da concentração de cloretos para todos os modelos é o fator de envelhecimento;

(e) Realizou-se o teste de aderência para os três modelos numéricos avaliados no presente estudo, onde se buscou obter uma distribuição que garantisse um grau de confiabilidade de 95 %. Concluiu-se que a distribuição Lognormal apresenta a melhor representação gráfica para os três modelos matemáticos;

(f) Através dos resultados obtidos, observa-se que, em função das diferenças sobre as considerações de cada modelo frente aos parâmetros de entrada, os valores obtidos não devem ser tomados como números definitivos, mas sim como base para a avaliação do comportamento da estrutura ao longo do tempo e para a tomada de decisões a respeito de intervenções.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

No desenvolvimento desta pesquisa surgiram aspectos que podem ser estudados e que, devido às limitações de tempo hábil, não foram abordadas. Sendo assim, são apresentadas as seguintes sugestões para ampliação e prosseguimento do estudo:

- (a) Análise probabilística da estimativa de vida útil dos três modelos;
- (b) Geração de banco de dados para melhorar a estimativa de variabilidade das variáveis envolvidas nos modelos;
- (c) Realização de análise paramétrica das variáveis envolvidas nos três modelos estudados.

Referências

- Aïtcin, P.C. (2000). *Concreto de alto desempenho*. 1. ed. São Paulo, Editora Pini, 667 p.
- Alexander, M. G. (2018). “Service life design and modelling of concrete structures – background, developments and implementation”. *Revista ALCONPAT*, 8 (3), pp. 224-245, doi: [dx.doi.org/10.21041/ra.v8i3.325](https://doi.org/10.21041/ra.v8i3.325).
- Almenar, G V. (2000). “Chloride ingress into concrete: analyse methods, non-destructive detection and transport modelling under a limited first approach”. Tese de Doutorado. Alicante University. Alicante, Espanha.
- Alonso, C.; Andrade, C.; Castellote, M.; Castro, P. (1997). “Valores críticos de cloruros para despassivar aceros de refuerzo embebidos en un mortero estandarizado de cemento Portland”. In: IV Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções (CONPAT 97). Anais, Vol. 2, pp. 555-562.
- Alonso, C.; Andrade, C.; Castellote, M.; Castro, P. (2000). “Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar”. *Cement and Concrete Research*. v. 30. pp. 1047 -1055.
- American society for testing and materials. (2000). C 618. “Standard specifications for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as mineral admixture in Portland cement concrete”. West Conshohocken, USA. ASTM International.
- American Concrete Institute. (2000). ACI 365: “Service-life prediction: state-of-the-art report”. Detroit, 44p.
- Andrade, C. (1992). *Manual para diagnostico de obras deterioradas por corrosão de armaduras*. Tradução de Antonio Carmona Filho e Paulo Roberto do Lago Helene. São Paulo: Editora Pini.
- Andrade, C.; Castellote, M.; d’andrea, R. (2011). “Chloride aging factor of concrete measured by means of resistivity”. XII DBMC, Porto, Portugal.
- Andrade, C. (2017). “Reliability analysis of corrosion onset: initiation limit state”. *Journal of Structural Integrity and Maintenance*, 2(4), pp. 200–208. doi: [10.1080/24705314.2017.1388693](https://doi.org/10.1080/24705314.2017.1388693).
- Angst, U. M. (2019). “Predicting the time to corrosion initiation in reinforced concrete structures exposed to chlorides”. *Cement and Concrete Research*, pp. 559-567, doi: doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.08.007.
- Ann, K.Y.; Song, H.W. (2007). “Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete”. *Corrosion Science*, v.49, pp.4113-4133.
- Apostolopoulos, C.A.; Papadakis V.G. (2008). “Consequences of steel corrosion on the ductility properties of reinforcement bar”. *Construction and Building Materials*, v.22, pp.2316-2324.

- Arskog, V.; Ferreira, M.; Liv, G.; Gjorv, O.E. “Effect of Cement Type on the Resistance of concrete against chloride penetration”. In Toutlemont, F.; Sakai, K.; Gjorv, O. E.; Banthia, N. (2007). Proceedings, Fifth International Conference on Concrete under Severe Conditions - Environment and Loading, vol. 1, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, pp. 367-374.
- Asian concrete model code – ACMC. (2006). International Committee on Concrete Model Code for Asia. Disponível em: <<http://www.iccmc.org/index.htm>>.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2014). ABNT NBR 6118. Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. 3a Ed. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2018). ABNT NBR 5739. Concreto - ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2015). ABNT NBR 12655: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2021). ABNT NBR 15575: Edificações habitacionais – Desempenho. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2009). ABNT NBR 15900: Água para amassamento do concreto - Parte 6: Análise química - Determinação de cloreto solúvel em água. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2018). ABNT NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro.
- Audenaert, K.; Yuan, Q.; de Schutter, G. (2010). “On the time dependency of the chloride migration coefficient in concrete”. *Construction and Building Materials*, pp. 396-402.
- Balestra, C.E.T. (2013). “Influência do grau de corrosão na resistência à tração de armaduras – Estudo de caso das fundações da nova Ala Zero do ITA”. Dissertação de Mestrado. Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), 172 p.
- Baroghel-Bouny, V.; Kinomura, K.; Thiery, M.; Moscardelli, S. (2011). Easy assessment of durability indicators for service life prediction or quality control of concrete with high volumes of supplementary cementitious material”. *Cement and Concrete Composites*, 33, pp. 832-847, doi: doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.04.007.
- Bastidas-Arteaga, E.; Chateauneuf, A.; Sánchez-Silva, M.; Bres-Solette, P.; Schoefs, F. (2011). “A comprehensive probabilistic model for chloride ingress in unsaturated concrete”. *Engineering Structures*, v.51, pp. 259-266.
- Bastidas-Arteaga, E.; Stewart, M.G. (2015). “Damage risks and economic assessment of climate adaptation strategies for design of new concrete structures subject to chloride-induced corrosion”. *Structural Safety*, v.52, pp.40-53.
- Bauer, E. (1995). “Avaliação comparativa da influência da adição de escória de alto-forno na corrosão das armaduras através de técnicas eletroquímicas”. São Paulo, 236p. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

- Berndt, M. L. (2009). "Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate". *Construction and Building Materials*. v. 23, n. 7, pp. 2606-2613.
- Bertolini, L. (2010). *Materiais de Construção: Patologia, Reabilitação, Prevenção*. 1.ed., 414 p. ISBN 9788579750106.
- Bhargava K.; Mori Y.; Ghosh A.K. (2011). "Time-dependent reliability of corrosion affected RC beams. Part 3: effect of corrosion initiation time and its variability on time-dependent failure probability". *Nuclear Engineering and Design* 241, (5), pp. 1395–1402.
- Bijen, J. (1998). "Blast furnace slag for durable marine structures". Hertogenbosch, Holanda. VNC/BetonPrisma.
- British Standard Institution. (2003). *BS 7543: Guide to Durability of Buildings and Building Element, Products and Components*. London.
- Câmara Brasileira da Indústria Da Construção. (2013). "Desempenho de edificações habitacionais: guia orientativo para atendimento à norma ABNT NBR 15575/2013". Fortaleza: Gadioli Cipolla Comunicação, 308p. Disponível em <http://www.cbic.org.br/arquivos/guia_livro/Guia_CBIC_Norma_Desempenho_2_edicao.pdf>.
- Cascudo, O. O. (1997). "Controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas". São Paulo: Editora Pini; Goiânia: UFG.
- Cassgnabere, F.; Mouret, M.; Escadeillas, G. (2009). "Early hydration of clinker-slagmetakaolin combination in steam curing conditions, relation with mechanical properties". *Cement and Concrete Research*, v. 39, n. 1, pp. 1164-1173.
- Cezar, D. S. (2011). "Características de durabilidade de concretos com cinza volante e cinza de casca de arroz com e sem beneficiamento". Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Maria. Rio grande do Sul.
- Climent M.A., Vera G. de, L. J.F., Viqueira E., Andrade C. (2002). "A test method for measuring chloride diffusion coefficients through non saturated concrete: Part I. The instantaneous plane source diffusion case". *Cement and Concrete Research* 32, (7), pp. 1113–1123.
- Costa, A.; Appleton, J. (2007). "Análise da penetração de cloretos em estruturas de betão armado expostas ao ambiente marítimo". *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*, v. 46, pp. 3-13.
- Crank, J. (1975). "The mathematics of diffusion". 2. ed. New York: Oxford University Press, 414p.
- Crauss, C. (2010). "Penetração de cloretos em concretos com diferentes tipos de cimento submetidos a tratamento superficial". Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria.
- CYTED. (1998). "Manual de Inspección, Evaluación y Diagnostico de corrosión en estructuras de hormigón armado". Programa Iberoamericano d Ciencia y Tecno-

- logía para el Desarrollo. Subprograma XV. Corrosión/Impacto Ambiental sobre Materiales. 2. ed..
- Darts. (2003). “Durable and Reliable Tunnel Structures”. Research project. Framework. Disponível em: <www.dartsproject.net>.
- Dousti, A.; Shekarchi, M. (2015). “Effect of exposure temperature on chloride-binding capacity of cementing materials”. Magazine of Concrete Research 67, (15), pp. 3–13, doi: dx.doi.org/10.1680/macr.14. 00327.
- Dominicini, W. K.; Suzano, A. B.; Calmon, J. L.. (2016). “Estruturas de concreto armado: influência de diferentes modelos de concentração superficial”. Resumo carbonatação. In: ANAIS 58º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, Belo Horizonte. Anais.
- Duprat, F. (2007). “Reliability of RC beams under chloride-ingress”. Construction and Building Materials, v.21, p.1605-1616,.
- DURACON. (2004). “Influência da ação do meio ambiente na durabilidade do concreto: Projeto Duracon, Brasil”. Pesquisador responsável Maryangela Geimba de Lima. Relatório de reunião anual.
- DURACRETE. (1999). “General Guidelines for Durability Design and Redesign. The European Union-Brite-EuRam III, Project No. BE 95-1347, Probabilistic Performance based Durability Design of Concrete Structures”, Report No. T 7-01-1.
- El Hassan, J.; Bressollette, P.; Chateauneuf, A.; El Tawil, K. (2010). “Reliability based assessment of the effect of climatic conditions on the corrosion of RC structures subject to chloride ingress”. Engineering Structures, v.32, pp.3279-3287.
- European committee for standardization - EUROCODE 2. (2004). “Design of concrete structures: General rules and rules for buildings - BS EN 1992-1”. British-Adopted European Standard, 230p.
- Farahani, A.; Taghaddos, H.; Shekarchi, M. (2015). “Prediction of long-term chloride diffusion in silica fume concrete in a marine environment”. Cement and Concrete Composites, v. 59, p. 10-17.
- Favretto, F.; Magalhães, F. C. Guimarães, A. T. C.; Climent, M. A.; Real, M. V. (2021). “Modelos de estimativa do grau de saturação do concreto a partir das variáveis ambientais aplicados à análise de confiabilidade de estruturas de concreto armado atacadas por íons cloreto”. Revista Matéria. ISSN 1517-7076.
- Fédération Internationale du Béton. FIB Bulletin 34. (2006). “Model Code for Service Life Design”.
- Fédération Internationale du Béton. FIB Bulletin 53. (2010). “Model Code for Structural Concrete Textbook on behaviour, design and performance”. Second edition. Volume 3: Design of durable concrete structures, 390 p.
- Fédération Internationale du Béton. FIB (CEB-FIP) (2010). “Model Code 2010: First complete draft”. Bulletin 55, v.1. Lausanne, Switzerland.
- Ferreira, R. M. (2004). “Probability-based durability analysis of concrete structures under chloride attack environments”. University of Minho.

- Frangopol, D. M., Kai-Yung Lin, Chung-Shen, Estes, A. C. (1997). "Reliability of reinforced concrete girders under corrosion attack". Published in *Journal of Structural Engineering*, Volume 123, Issue 3, pp. 286-297.
- Geiker, M. R.; Michel, A.; Stang, H.; Lepech, M. D. (2019). "Limit states for sustainable reinforced concrete structures". *Cement and Concrete Research*, 122, pp. 189–195. Doi: doi:10.1016/j.cemconres.2019.04.013.
- Gentil, V. (2011). *Corrosão*. 6. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC,. 376 p. ISBN 9788521618041.
- Gjørsv, O. E. (2014). *Durability design of concrete structures in severe environments*. 2ª ed. Boca Raton: CRC Press, 254 p..
- Gjørsv, O. E. (2015). *Projeto da durabilidade de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade*. São Paulo, oficina de textos.
- Glass, G. K.; Buenfeld, N. R. (1997). "The presentation of the chloride threshold level for corrosion of steel in concrete". *Corrosion Science*, v. 39, n. 5, pp. 1001–1013.
- Guimarães, A. T. C.; Helene, P. R. L. (2001). "Grau de saturação do concreto: um importante fator na difusão de cloretos. Teoria e Prática na Engenharia Civil". No. 2, pp.55-64.
- Guimarães, A. T. C. (2000). "Vida útil de estruturas de concreto armado em ambientes marítimos". Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade de São Paulo.
- Guo, L.; Guo, X.; Mi, C. (2012). "Multi-scale finite element analysis of chloride diffusion in concrete incorporating paste/aggregate itzs". *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, Springer, v. 55, n. 9, pp. 1696–1702.
- Helene, P. R. L. (1993). "Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado". Tese de Doutorado (Livre Docência em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Helene, P. R. L. (1986). "Corrosão em armaduras para concreto armado. São Paulo". Editora Pini.
- International Organization for Standardization. (2011). "Buildings and constructed assets - Service life planning: General principles". International Organization for Standardization - General principles and framework . ISO 15686: Part 1., 51p.
- International Organization for Standardization. (2008). "General Principles on the Design of Structures for Durability". ISO 13823. Geneva: ISO/TC.
- International Organization for Standardization. (1998). "General principles on reliability for structures". ISO 2394. Geneva: ISO/TC.
- International Organization for Standardization. (2012). "Durability – Service Life Design of Concrete Structures". ISO 16204, Geneva.
- Ipavec, A.; Vuk, T.; Gabrova Ek, R.; Kauaia, V. (2013). "Chloride binding into hydrated blended cements: The influence of limestone and alkalinity". *Cement and Concrete Research*, v. 48, pp. 74-85.

- Ishida, T.; Iqbal, P. O. N.; Anh, H.T. L. (2009). "Modeling of chloride diffusivity coupled with non-linear binding capacity in sound and cracked concrete". *Cement and Concrete Research*, v. 39, n. 10, pp. 913–923. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.07.014>.
- Kessy, J. G. (2013). "Durability specifications for structural concrete – an international comparison". Master's thesis of Science in Engineering, Faculty of Engineering and Built Environment, University of Cape Town.
- Kihara, Y.; Visedo, G. (2014). "A indústria do cimento e o desenvolvimento do Brasil. Associação Brasileira de Cimento Portland". Disponível em: <http://www.abcp.org.br/conteudo/imprensa/a-industria-do-cimento-e-o-desenvolvimento-do-brasil>.
- Khiara, Y.; Centurione, S. L. (2005). "O cimento Portland. In: *Concreto: ensino, pesquisa e realizações*". São Paulo: IBRACON, v. 1, cap. 10, pp. 295-322.
- Kwon, S.J.; Na, U.J.; Park, S.S.; Jung, S.H. (2009). "Service life prediction of concrete wharves with early-aged crack: Probabilistic approach for chloride diffusion". *Structural Safety*, v.31, pp 75-83.
- Lehner, P.; Ghosh, P.; Konecny, P. (2018). "Statistical analysis of time dependent variation of diffusion coefficient for various binary and ternary based concrete mixtures". *Construction and Building Materials*, 183, pp. 73-82.
- Liberati, E. A. P.; Leonel, E. D.; Nogueira, C. G. (2014). "Influência da corrosão da armadura na capacidade resistente à flexão de vigas em concreto armado: uma abordagem via teoria da confiabilidade". *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 7 (3), pp. 379-413. Doi: dx.doi.org/10.1590/S1983-41952014000300005.
- Lifecon. (2003). *Methodology and data for calculation of life cycle costs (LCC) of maintenance and repair methods and works. Deliverable 5.2. Author Minna Kesäläinen. (Project -CT- 2000-00378)*.
- Lim, T. Y. D.; Teng, S.; Bahador, S. D.; Gjörv, O. E. (2016). "Durability of very-high-strength concrete with supplementary cementitious materials for marine environments". *ACI Materials Journal*, v. 113, n. 1, pp. 95-103.
- Lima, M. G. (2011). *Ações do meio ambiente sobre estruturas de concreto*. In: *Concreto: Ciência e Tecnologia*. São Paulo, IBRACON.
- Lindvall, J. (2007). "Fall studie strategier". *Statsvetenskaplig Tidsskrift*, 109(3), pp. 270-278.
- Lorensini, R.V. (2006). "Avaliação probabilística da deterioração de estruturas em concreto armado". Belo Horizonte, Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG.
- Loreto G.; Benedetti M. di; de Luca A.; Nanni A. (2018). "Assessment of re-inforced concrete structures in marine environment: a case study". *Corrosion Review Journal*.
- Luping, T.; Gulikers, J. (2007) "On the mathematics of time-dependent apparent chloride diffusion coefficient in concrete". *Cement and Concrete Research*, 37 (4), pp. 589-595, doi: doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.01.006.

- Maage M.; Helland S.; Poulsen E.; Vennesland Ø.; Carlsen J.E. (1996). "Service life prediction of existing concrete structures exposed to marine environment". *Aci. Mater.* V. 93, pp. 602–608.
- Madrid, J. A.; Cabrera, G.; Escalante, J. I.; Castro, P. (2016). "Resistência à compressão de concreto com escória de alto forno". Revisão do estado da arte. *Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción – Alconpat*. Mérida, v. 6, n. 1, p. 64-83.
- Magalhães, Fábio C. (2014). "A problemática dos concretos não conformes e sua influência na confiabilidade de pilares de concreto armado". Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Magalhães, Felipe C. (2018). "Proposição de um modelo para a penetração de íons cloreto em concreto: estudos dos parâmetros intervenientes e análise probabilística". Porto Alegre. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Magalhães, Thiago A. (2019). "Análise da penetração de íons cloreto em compósitos cimentícios contendo diferentes teores de escória de alto-forno". Belo Horizonte, 2019. Dissertação de Mestrado em Construção Civil - Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais.
- Mangat P.S.; Molloy B.T. (1994). "Prediction of long term chloride concentration in concrete". *Materials Structures*, v.27, pp. 338–346.
- Marchand, J.; Samson, E. (2009). "Predicting the service-life of concrete structures – Limitations of simplified models". *Cement and Concrete Composites*, Vol. 31, Issue 8, pg. 515-521.
- Martin-Pérez, B. (1999). "Service Life Modelling of R.C. Highway Structures Exposed to Chlorides". (Doctor of Philosophy), University of Toronto, Toronto.
- Marsavina, L. et al. (2009). "Experimental and numerical determination of the chloride penetration in cracked concrete". *Construction and Building Materials*, [s. l.], v. 23, n. 1, p. 264–274.
- Medeiros, M.; Helene, P. (2008). "Efficacy of surface hydrophobic agents in reducing water and chloride ion penetration in concrete". *Materials and Structures*, v.41, p.59-71.
- Medeiros-Junior R. A.; Lima M. G.; Brito P. C.; Medeiros M. H. F. (2015a). "Chloride penetration into concrete in an offshore platform - analysis of exposure conditions". *Ocean Engineering*, v.103, pp.78-87.
- Medeiros-Junior R. A.; Lima M. G.; Medeiros M. H. F. (2015b). "Service life of concrete structures considering the effects of temperature and relative humidity on chloride transport". *Environment, Development and Sustainability*, v.17, p.1103-1119.

- Mehta, P.K.; Monteiro, P. J. M. (2014). *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. HASPARYK, N. P. (Ed. Trad.). 2ª Ed. São Paulo, Ibracon.
- Mehta P.K. (1978). “Performance tests for sulfate resistance and alkali-silica reactivity of hydraulic cements”. In: International Conference on durability of building Materials and Components, 1st_ Proceedings. ASTM Special Technical Publication nº 691. Ottawa, p.336-345.
- Meira, G. R. (2004). “Agressividade por cloretos em zona de atmosfera marinha frente ao problema da corrosão em estruturas de concreto armado”. Tese de doutorado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.
- Mercado-Mendoza, H.; Lorente, S.; Bourbon, X. (2012). “The Diffusion Coefficient of Ionic Species Through Unsaturated Materials”, *Transport in Porous Media*, v. 96, Issue 3, pp. 469-481.
- Mercado-Mendoza, H.; Lorente, S.; Bourbon, X. (2014). “Ionic aqueous diffusion through unsaturated cementitious materials – A comparative study”, *Construction and Building Materials*, v. 51, pp. 1-8.
- Moreira, A. L. R. (2018). “Previsão de vida útil de estruturas de concreto armado submetidas à ação de íons cloretos: modelagem numérica e aplicações”. Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Civil. Universidade Federal Do Espírito Santo, Vitória.
- Muthulingam S.; Rao B.N. (2016). “Chloride binding and time-dependent surfasse chloride content models for fly ash concrete”. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 10 (1), pp. 112–120.
- Neville, A. M.; Brooks, J. J. (2013). *Tecnologia do concreto*. 2 ed. Bookman Editora.
- Neville, A. M. (1997). *Propriedades do concreto*. 3 ed. Bookman Editora.
- Neville, A. M. (2011). *Properties of concrete*. Harlow: Pearson Education.
- Nielsen, E. P.; Geiker, M. R. (2003). “Chloride diffusion in partially saturated cementitious material”. *Cement and Concrete Research*, n. 33, p. 133-138.
- Nogueira, C.G. (2005). “Um modelo de confiabilidade e otimização aplicado às estruturas de barras de concreto armado”. 166f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Nogueira, C.G.; Leonel, E.D.; Coda, H.B. (2012). “Corrosion time initiation modeling considering uncertainties”. In: International symposium on uncertainty quantification and stochastic modeling, 1., Maresias, São Sebastião. Anais... Maresias, São Sebastião.
- Nokken, M.; Boddy, A.; Hooton, R.D.; Thomas, M.D.A. (2006). “Time dependent diffusion in concrete—three laboratory studie”s. *Cement and Concrete Re-search*, v. 36, p. 200-207.
- Oliveira, M. C. de (2014). “Definição do nível de significância em função do tamanho amostral”. 63f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto de Matemática e Estatística, Universidade Federal de São Paulo, São Paulo.

- Ollivier, J. P.; Torrenti, J. M. (2014). A estrutura porosa dos concretos e as propriedades de transporte. In: Ollivier, J. P.; Vichot, A. Durabilidade do concreto: Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente. CAS-CUDO, O; CARASEK, H. (Ed. Trad.). 1 ed. São Paulo: IBRACON, 615 p. ISBN: 978-85-98576-22-0
- Ollivier, J.P. (1998). “Durability of concrete. Boletim técnico da escola politécnica da USP – Departamento de engenharia de construção civil”. São Paulo: BT/PCC/192,. Disponível em: http://www.pcc.usp.br/files/text/publications/BT_00192.pdf.
- Ossorio, A.; Lorenzo, R. (2014). “Predicción de la vida útil de estructuras de hormigón armado mediante la utilización de un modelo de difusión de cloruro”. Revista Facultad de Ingeniería, n. 72, p. 161-172.
- Otieno, M.; Beushausen, H.; Alexander, M. (2014). “Effect of chemical composition of slag on chloride penetration resistance of concrete”. Cement and Concrete Composites, v. 46, p. 56-64.
- Otieno, M.B.; Beushausen, H.D.; Alexander, M.G. (2010). “Modelling corrosion propagation in reinforced concrete structures - A critical review”. Cement & Concrete Composites, v.33, n.2, p.240-245.
- Ozbolt, J.; Balabani, G.; Peri, G.; Kuster, M., Constr. Build. Mater. 2010, 24, 1638.
- Pack S.W.; Jung M.S.; Song H.W.; Kim S.H.; Ann K.Y. (2010). “Prediction of time dependent chloride transport in concrete structures exposed to a marine environment”. Cement and Concrete Research, v. 40 (2), pp. 302–312.
- Paulon, V.; Kirchheim, A. P. (2011). Nanoestrutura e Microestrutura do Concreto Endurecido. In: ISAIA, G. C. (Org.). Concreto: ciência e tecnologia. São Paulo: Ibracon.
- Pellizzer, G. P. (2015). “Análise mecânica e probabilística da corrosão de armaduras de estruturas de concreto armado submetidas à penetração de cloretos”. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo.
- Peraça, M.G.T. (2009). “Modelos para estimativa do grau de saturação do concreto mediante variáveis ambientais que influenciam na sua variação”. Tese de M.Sc., FURG, Rio Grande, RS, Brasil.
- Pereira, V. C. de O.; Monteiro, E. C. B.; Almeida, K. da S. (2013). “Influence of cement type in reinforcement corrosion of mortars under action of chlorides”. Construction and Building Materials, v. 40, pp. 710-718.
- Petcherdchoo A. (2013). “Time dependente models of apparent diffusion coefficient and surface chloride for chloride transport in fly ash concrete”. Construction and Building Materials, v. 38, pp. 497–507.
- Polder, R. B.; De Rooij, M. R. (2005). “Durability of marine concrete structures” - Field investigations and modelling. Heron, [s. l.], v. 50, n. 3, p. 133–154.
- Polder, R.B.; Peelen, W.H.A.; Courage, W.M.G. (2012). “Non-traditional assessment and maintenance methods for aging concrete structures” – technical and non-technical issues. V.62, <https://doi.org/10.1002/maco.201206725>.

- Possan, E. (2010). "Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano". 265 f. Tese (Doutorado em engenharia) –Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Poulsen, E., Mejlbro, L. (2006). Diffusion of chloride in concrete – Theory and Application. Abingdon, Taylor & Francis.
- Pradelle, S.; Thiéry, M.; Baroghel-Bouny, V. (2016). "Comparison of exist-ing chloride ingress models within concretes exposed to seawater". Materials and Structures, [s. l.], pp. 4497–4516.
- Real, S.; Bogas, J. A.; Pontes, J. (2015). "Chloride migration in structural lightweight aggregate concrete produced with different binders". Construction and Building Materials, v. 98, pp. 425-436.
- Real, M. V. (2000). "Análise probabilística de estruturas de concreto armado, sob estado plano de tensão, através do método dos elementos finitos". Tese (Doutorado em Engenharia), PPGEC/UFRGS. Porto Alegre-RS.
- Ribeiro, D. V.; Cascudo, O. (2018). Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto. In: Corrosão e Degradação em Estruturas de Concreto – Teoria, controle e técnicas de análise e intervenção. Rio de Janeiro, Elsevier.
- Saassouh, B.; Lounis, Z. (2012). "Probabilistic modeling of chloride-induced corrosion in concrete structures using first- and second-order reliability methods". Cement e Concrete Composites, v.34, p.1082-1093.
- Santos, L. (2006). "Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto". Dissertação (Mestrado em Estruturas), Departamento de Estruturas, Universidade de Brasília, Brasília, 161 p.
- Santos, I.H.; Souza, C.A.C.; Ribeiro, D.V. (2020). "Porosity influence on life time of concrete structures analysed by chloride migration testing". In: RILEM International workshop on performance-based specification and control of concrete durability, Zagreb, Croácia. Proceedings of RILEM International workshop on performance-based specifications and control of concrete durability. Bagneux, France: RILEM, 2014. p. 471-480. Disponível em: https://www.rilem.net/publication/publication/433?id_papier=9761.
- Saetta A. V. et al. (1993). "Analysis of chloride diffusion into partially saturated concrete," Mater. J., vol. 90, pp. 441–451.
- Sato, N. M. N.; Agopyan, V. (1998). "Análise da porosidade e de propriedades de transporte de massa em concretos". [S.l: s.n.].
- Scherer, M. (2018). "Avaliação da confiabilidade de vigas de concreto armado pelo método dos elementos finitos". Dissertação (Mestrado em Estruturas), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Sengul, Ö.; Gjörv, O. E. (2007). "Effect of blast furnace slag for increased concrete sustainability". In: Proceedings, International Symposium on Sustainability in the

- cement and concrete industry. Norwegian Concrete Association. Oslo, Norway: pp. 248-256.
- Shekarchi, M., Rafiee, A., Layssi, H. (2009). "Long-term chloride diffusion in silica fume concrete in harsh marine climates". *Cement and Concrete Composites*, 31 (10), p. 769-775, doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.08.005.
- Shi X.M., Xie N., Fortune K., Gong J. (2011). "Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: an overview". *Construction and Building Materials*, v. 30, pp. 125–138.
- Siamphukdee K.; Collins F.; Zou R. (2013). "Sensitivity Analysis of Corrosion Rate Prediction Models Utilized for Reinforced Concrete Affected by Chloride". *ASM International*, DOI: 10.1007/s11665-012-0447-1.
- Silva, F. G. da. (2006). "Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos". Tese de Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, p. 48-50.
- Silva, T, J. L. (2011). Durabilidade e Vida útil das Estruturas de Concreto. In ISAlA, G. C.: *Concreto: Ciência e Tecnologia*. IBRACON, Vol. 1.
- Silva, A.; Rui, N.; Brito, J.D. (2017). "Statistical modelling of the influential factors on chloride penetration in concrete". *Magazine of Concrete Research* 69(5): 255–270, <http://dx.doi.org/10.1680/jmacr.16.00379>.
- Silva Filho, L. C. P. da, (1994). "Durabilidade do concreto à ação de sulfatos: análise do efeito da permeação de água e da adição de microssílica". Dissertação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Silvestro, L.; Romano, F. S.; Dal Molin, D. C. C. (2021). "Penetração de cloretos em concretos expostos em zona de atmosfera marinha por um período de 9 anos". *Revista Ambiente Construído*, v. 21(1). Doi: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212021000100496>
- Song H.W.; Lee C.H.; Ann K.Y. (2008). "Factors influencing chloride transport in concrete structures exposed to marine environments". *Cement and Concrete Composites*, v. 30 (2), pp. 113–121.
- Sousa, C. A. (2018). Princípios da corrosão eletroquímica. In: Ribeiro, D. V. (org.). *Corrosão e degradação em estruturas de concreto: Teoria, controle e técnicas de análise e intervenção*. 2ª. ed. Rio de Janeiro: Elsevier.
- Souza, G.; Leonel, E.D. (2012). "Análise da redução da área de aço em seções transversais de estruturas em concreto armado submetidas à penetração de íons cloro". In: *Simpósio de Mecânica Computacional*, 10., 2012, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: UFMS.
- Stewart, M.G.; Rosowsky, D.V. (1998). "Structural safety and serviceability of concrete bridges subject to corrosion". *Journal Infrastructure System*, v.4, pp.146-155.
- Sun Y.M.; Liang M.T.; Chang T.P. (2012). "Time/depth dependent diffusion and chemical reaction model of chloride transportation in concrete", *Applications Mathematics Modeling*, v. 36 (3), pp. 1114–1122.

- Suo, Q.; Stewart, M.G. (2009). "Corrosion cracking prediction updating of deteriorating RC structures using inspection information". *Reliability Engineering and System Safety*, v.94, p.1340-1348.
- Suzano, A. (2017). "Contribuição a previsão de vida útil de estruturas de concreto armado sujeitas à corrosão por transporte de cloretos. Uma abordagem ao fluxo convectivo de íons cloreto". Universidade Federal do Espírito Santo, [s. l.].
- Tamimi, A.K.; Abdalla, J.A.; Sakka, Z.I. (2008). "Prediction of long term chloride diffusion of concrete in harsh environment". *Construction and Building Materials*, v. 22 (5), pp. 829–836.
- Tang, L.; Utgenannt, P.; Boubitsas, D. (2015). "Durability and service life predicti"- *Journal of the Chinese Ceramic Society*.
- Tang, L.; Nilsson, L-O. (1995). "A new approach to the determination of pore distribution by penetrating chlorides into concrete". *Cement and Concrete Research*, v. 25, pp. 695-701.
- Tavares, F. (2013). "Coupled model of initiation and propagation of corrosion in reinforced concrete". Universidade Politécnica de Madrid.
- Thangavel, K.; Rengaswamy, N. S. (1998). "Relations hip between chloride/hydroxide ratio and corrosion rate of steel in concrete". *Cement and Concrete Composites*, v. 20, pp. 283- 292.
- Thoft-Christensen, P. et al. Frangopol, D.M. (Ed); Corotis, R.B. (Ed); Rackwitz, R. (Ed). (1997). *Assessment of the reliability of concrete slab bridges reliability and optimization of structural systems*. Pergamon,
- Thomas, M.D.A.; Bamforth P.B. (1999). "Modelling chloride diffusion in concrete: effect of fly ash and slag". *Cement and Concrete Research*, v. 29 (4), pp. 487–495.
- Thomas, M.D.A.; Matthews J.D. (2009). "Performance of pfa concrete in a marine environment –10-year results". *Cement and Concrete Composites*, v. 26 (1), pp 5–20.
- Thomas, J.J.; Biernacki, J.B.; Bullard, W.; Bishnoi, S.; Dolado, J.S.; Scherer, G.W; Luttge, A. (2011). "Modeling and simulation of cement hydration kinetics and microstructure development". *Cement and Concrete Research*, Vol. 41, Issue 12, Pages 1257-1278.
- Tuutti, K. (1982). *Corrosion of steel in concrete*. Stockolm, Swedish. Cement and Concrete Research Institute.
- Uji, K., Matsuaka, Y., Maruya, T. (1990). "Formulation of an equation for surface chloride content due to permeation of chloride". *Proceedings of Third International Symposium on Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction*, Elsevier Applied Science. London, UK.
- Val, D.V.; Stewart, M.G. (2003). "Life-cycle cost analysis of reinforced concrete structures in marine environments". *Structural Safety*, v.25, pp.343-362.

- Vesikari, E. (2009). "Service life management system of concrete structures in nuclear power plants (SERVICEMAN): Service Life Management System of Concrete Structures in Nuclear Power Plants". VTT Technical Research Centre of Finland.
- Vidal, T.; Castel, A.; Francois, R. (2007). "Corrosion process and structural performance of a 17 year old reinforced concrete beam stored in chloride environment". *Cement and Concrete Research*, pp. 1551-1561.
- Vílchez, E.F. (2011). "Estudio de la influencia de las variables meteorológicas em el grado de saturacion em hormigones expuesto a un ambiente marino atmosferico mediterraneo". Tese de M.Sc., UA, Alacant, Alicante, Espanha,.
- Wally, G. B. (2019). "Vida útil de concretos produzidos com utilização de sílica ativa e metacaulim frente ao ataque por cloretos: indicadores de durabilidade e análise probabilística". Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande.
- Wally, G. B.; Sell Junior, F. K.; Pinheiro, L.; C. L.; Magalhães, F. C.; Real, M. V. (2018). "Modelo de estimativa de vida útil baseado na penetração de íons cloreto: uma análise paramétrica". ANAIS DO 8o MCSUL / VIII SEMENGO. Universidade Federal do Rio Grande.
- Wang, H.L.; Dai, J.G.; Sun, X.Y.; Zhang, X.L. (2016). "Time-dependent and stress dependent chloride diffusivity of concrete subjected to sustained compressive loading". *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28 (8).
- Weerd, K. de; Orsáková, D.; Müller, A.C.A.; Larsen, C.K.; Pedersen, B.; Geiker, M.R. (2016). "Towards the understanding of chloride profiles in marine exposed concrete, impact of leaching and moisture content". *Construction and Building Materials* 120, pp. 418–431.
- Wu, S.; Muhunthan, B.; Wen, H. (2017). "Investigation of effectiveness of prediction of fatigue life for hot mix asphalt blended with recycled concrete aggregate using monotonic fracture testing". *Construction and Building Materials* 131, pp. 50–56. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.045>.
- Yang, L. F. et al. (2013). "Compensation length of two-dimensional chloride diffusion in concrete using a boundary element model". *Acta Mechanica*, Springer, v. 224, n. 1, p. 123–137.
- Yi, Y., Zhu, D., Guo, S., Zhang, Z., & Shi, C. (2020). "A review on the deterioration and approaches to enhance the durability of concrete in the marine environment". *Cement and Concrete Composites*, 103695. doi:10.1016/j.cemconcomp.2020.103695.
- Yildirim, H.; Ilica, T.; Sengul, O. (2011). "Effect of cement type on the resistance of concrete against chloride penetration". *Construction and Building Materials*, v. 25, p. 1282- 1288.
- Yu, Z.W.; Chen, Y.; Liu, P.; Wang, W.L. (2015). "Accelerated simulation of chloride ingress into concrete under drying-wetting alternation condition chloride environment". *Construction and Building Materials*, 93, pp. 205–213.

- Zhang, J.; Wu, J.; Zhang, Y.; Gao, Y.; Wang, J. (2019). "Time-varying relationship between pore structures and chloride diffusivity of concrete under the simulated tidal environment". *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. <https://doi.org/10.1080/19648189.2019.1665108>.
- Zhang, J; Lounis, Z. (2006). "Sensitivity analysis of simplified diffusion-based corrosion initiation model of concrete structures exposed to chlorides". *Cement and Concrete Research*, [s. l.], v. 36, n. 7, p. 1312–1323.

Apêndice 1 – Rotina computacional para cálculo da concentração total de cloretos, Modelo GJØRV

```

%-----
%
% Programa para avaliação do comportamento do fator de
% envelhecimento do concreto no modelo de Gjorv (Gjorv, 2015)
%
% Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica
% Universidade Federal do Rio Grande
% Maio de 2019 (Rev. Janeiro de 2021)
%
% Gustavo Bosel Wally, Fábio Costa Magalhães, Mauro de Vasco-
% cellos Real
%-----

% Número de simulações de Monte Carlo
n = 1e5;

% Dados de entrada determinísticos
EA = 5000.00; % Energia de ativação da difusão
R = 1.00; % Constante dos gases
t1 = 28/365; % Idade da estrutura [anos] quando exposta aos
íons
t = 50; % Idade [anos] da análise/previsão

% Geração das variáveis aleatórias do problema

% Idade do concreto quando medido D0 (t0 [anos])
mediat0 = 28/365;
desviot0 = 1/365;
t0 = normrnd(mediat0,desviot0,n,1);

% Coeficiente de difusão inicial (D0 [mm^2/ano])
mediaD0 = 55.188;
desvioD0 = 0.0*mediaD0;
D0 = normrnd(mediaD0,desvioD0,n,1);

% Concentração superficial de cloretos (Cs [%])
mediaCs = 2.0;
desvioCs = 0.0*mediaCs;
zetaCs = (log(1+(desvioCs/mediaCs)^2))^(1/2);
lambdaCs = log(mediaCs)-1/2*zetaCs^2;
Cs = lognrnd(lambdaCs,zetaCs,n,1);

% Cobrimento da armadura (xc [mm])
mediaxc = 50.00;

```

```

desvioxc = 0.00*mediaxc;
zetaxc   = (log(1+(desvioxc/mediaxc)^2))^(1/2);
lambdaxc = log(mediaxc)-1/2*zetaxc^2;
xc        = lognrnd(lambdaxc,zetaxc,n,1);

% Temperatura média anual (Temp [°C])
mediaTemp = 18;
desvioTemp = 0.00*mediaTemp;
Temp       = normrnd(mediaTemp,desvioTemp,n,1);

% Fator de envelhecimento do concreto (alpha)
mediaalpha = 0.30;
desvioalpha = 0.0*mediaalpha;
alpha       = normrnd(mediaalpha,desvioalpha,n,1);

% Concentração crítica de cloretos (habilitar caso analise a Pf)
mediaCcr   = 0.4;
desvioCcr  = 0.00*mediaCcr;
Ccr        = normrnd(mediaCcr,desvioCcr,n,1);

% Cálculo do fator ke
ke = exp(EA/R*(1/293-1./(273+Temp)));

% Cálculo do coeficiente de difusão no tempo t (D [mm^2/ano])
D = D0./(1-alpha).*((1+t1/t).^(1-alpha)-(t1/t).^(1-alpha)).*(t0/t).^alpha.*ke;

meanD = mean(D)
CovD  = std(D)/mean(D)

% Cálculo da concentração de cloretos na profundidade x no tempo t
(Cxt [%])
Cxt = Cs.*(1-erf(xc./(2.*(abs(D).*t).^0.5)));

% Função estado limite g(x,t) = Ccr - Cxt
gxt = Ccr-Cxt;

% Cálculo da probabilidade de falha
meangxt = mean(gxt);
stdgxt  = std(gxt);
%Beta1  = mean(gxt)/std(gxt)
%mu     = 0;
%sigma  = 1;
%pd     = makedist('Normal',mu,sigma);
%pf1    = cdf(pd,-Beta1)

%Pf2    = sum(gxt<0)/n
%Beta2  = -norminv(Pf2,mu,sigma)

% Grafico de N x Pf
%figure(1);
%subplot(3,1,1);
%plot(n,Pf2);
%title('N x P_f');

```

```

    xlabel('N');
    ylabel('P_f');

    %Grafico de N x Beta
    subplot(3,1,2);
    plot(n, Beta1);
    title('N x \beta');
    xlabel('N');
    ylabel('\beta');

meanCxt = mean(Cxt)
COVCxt  = std(Cxt)/mean(Cxt)

% Passando D [mm2/ano] para D[m2/s]
%Dplot = D*3.171e-14;

% Exportando resultados para .txt
fid = fopen('Cxtvalues_Duracon.txt','wt');
fprintf(fid,'%d\n',Cxt);
fclose(fid);

% Incluindo pdf das distribuições normal e lognormal
figure(1);
title('Histograma de C(x,t)');
hold on;

% Histograma normalizado
%histog = histogram(Cxt(1:n), 100, 'Normalization', 'pdf');

% Plotando a pdf normal de Cxt
grafx = [min(Cxt):(max(Cxt)-min(Cxt))/500:max(Cxt)];
%pdfCxtnorm = plot(grafx, normpdf(grafx, meanCxt, std(Cxt)), '--
k', 'LineWidth', 1.5);

% Grafico da pdf lognormal de Cxt
%qsiCxt = sqrt(log(1 + (std(Cxt)/meanCxt)^2));
%lambdaCxt = log(meanCxt) - 1/2*qsiCxt^2;
%pdfCxtlogn = plot(grafx, lognpdf(grafx, lambdaCxt, qsiCxt), '--
b', 'LineWidth', 1.5);

% Configurando a legenda
%legend([pdfCxtnorm, pdfCxtlogn], 'pdf gaussiana de C (x,t)', 'pdf
lognormal de C (x,t)');
%legend('boxoff');

%figure
%hist(Cs,100)
%title('Cs (Lognormal)')
%figure
%hist(Ccr,100)
%title('Ccr (Normal)')
%figure
%hist(xc,100)

```

```
%title('xc (Normal)')
%figure
%hist(Temp,100)
%title('Temp (Normal)')
%figure
%hist(alpha,100)
%title('alpha (Normal)')
%figure
%hist(ke,100)
%title('ke ')
%figure
%hist(Dplot,100)
%title('D (mm2/ano)')
%hold on
%figure
%hist(Cxt,1000)
%title('C(x,t) (%)')
%hold on
%figure
%hist(gxt,100)
%title('Função g(x,t) ')
```

Apêndice 2 – Rotina computacional para cálculo da concentração total de cloretos, Modelo KWON

```

%-----
%
% Programa para avaliação do comportamento do fator de
% envelhecimento do concreto no modelo de Poulsen (Kwon, 2009)
% doi.org/10.1016/j.strusafe.2008.03.004
%
% Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica
% Universidade Federal do Rio Grande
% Janeiro de 2021
%
% Gustavo Bosel Wally, Fábio Costa Magalhães, Cristian Gomes
%-----

% Número de simulações de Monte Carlo
n = 1e5;

% Dados de entrada determinísticos
tr = 30; % Idade [anos] até a qual o fator de envelhe-
cimento "atua mais"
t = 50; % Idade [anos] da análise/previsão

% Geração das variáveis aleatórias do problema

% Idade do concreto quando medido Dref (tref [anos])
mediatref = 28/365;
desviotref = 1/365;
tref = normrnd(mediatref,desviotref,n,1);

% Coeficiente de difusão inicial (Dref [mm^2/ano])
mediaD0 = 55.188;
desvioD0 = 0.7*mediaD0;
D0 = normrnd(mediaD0,desvioD0,n,1);

% Concentração superficial de cloretos (Cs [%])
mediaCs = 2.0;
desvioCs = 0.0*mediaCs;
zetaCs = (log(1+(desvioCs/mediaCs)^2))^(1/2);
lambdaCs = log(mediaCs)-1/2*zetaCs^2;
Cs = lognrnd(lambdaCs,zetaCs,n,1);

% Cobrimento da armadura (x [mm])
mediax = 50.00;

```

```

desviox = 0.00*mediax;
zetax   = (log(1+(desviox/mediax)^2))^(1/2);
lambdax = log(mediax)-1/2*zetax^2;
x       = lognrnd(lambdax,zetax,n,1);

% Fator de envelhecimento do concreto (m)
mediam  = 0.30;
desviom = 0.00*mediam;
m       = normrnd(mediama,desviom,n,1);

% Concentração crítica de cloretos (habilitar caso analise a Pf)
%mediaCcr = 0.4
%desvioCcr = 0.10*mediaCcr
%Ccr       = normrnd(mediaCcr,desvioCcr,n,1);

% Cálculo do coeficiente de difusão médio (Dm [mm^2/ano])
if t>=tr
    Dm = D0.*(1+((tr./t).*(m./(1-m)))).*(tref/tr).^m;
else
    Dm = (D0./(1-m)).*(tref/t).^m;
end

meanDm = mean(Dm)
CovDm  = std(Dm)/mean(Dm)

% Cálculo da concentração de cloretos na profundidade x no tempo t
Cxt = Cs.*(1-erf(x./(2.*(abs(Dm).*t).^0.5)));

% Função estado limite g(x,t) = Ccr - Cxt
%gxt=Ccr-Cxt;

% Cálculo da probabilidade de falha
%Pf=sum(gxt<0)/n
%Beta=-norminv(Pf,mu,sigma)

meanCxt = mean(Cxt)
COVCxt  = std(Cxt)/mean(Cxt)

% Passando D [mm2/ano] para D[m2/s]
%Dplot = Dm*3.171e-14;

% Exportando resultados para .txt
%fid = fopen('Cxtvalues_Poulsen.txt','wt');
%fprintf(fid,'%d\n',Cxt);
%fclose(fid);

% Incluindo pdf das distribuições normal e lognormal
%figure(1);
%title('Histograma de C(x,t)');
%hold on;

% Histograma normalizado
%histog = histogram(Cxt(1:n), 100, 'Normalization', 'pdf');

```

```

% Plotando a pdf normal de Cxt
%grafx = [min(Cxt):(max(Cxt)-min(Cxt))/500:max(Cxt)];
%pdfCxtnorm = plot(grafx, normpdf(grafx, meanCxt, std(Cxt)), '--
k', 'LineWidth', 1.5);

% Grafico da pdf lognormal de Cxt
%qsiCxt = sqrt(log(1 + (std(Cxt)/meanCxt)^2));
%lambdaCxt = log(meanCxt) - 1/2*qsiCxt^2;
%pdfCxtlogn = plot(grafx, lognpdf(grafx, lambdaCxt, qsiCxt), '--
b', 'LineWidth', 1.5);

% Configurando a legenda
%legend([pdfCxtnorm, pdfCxtlogn], 'pdf normal de C (x,t)', 'pdf
lognormal de C (x,t)');
%legend('boxoff');

%figure
%hist(Cs,100)
%title('Cs (Lognormal)')
%figure
%hist(Ccr,100)
%title('Ccr (Normal)')
%figure
%hist(x,100)
%title('x (Normal)')
%figure
%hist(m,100)
%title('m (Normal)')
%figure
%hist(Dplot,100)
%title('D (mm2/ano)')
%hold on
%figure
%hist(Cxt,100)
%title('C(x,t) (%)')
%hold on
%figure
%hist(gxt,100)
%title('Função g(x,t) ')

```

Apêndice 3 – Rotina computacional para cálculo da concentração total de cloretos, Modelo Life 365

```

%-----
%
% Programa para avaliação do comportamento do fator de
% envelhecimento do concreto no modelo Life-365
% life-365.org/download/Life-365_v2.2.3_Users_Manual.pdf
%
% Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica
% Universidade Federal do Rio Grande
% Janeiro de 2021
%
% Gustavo Bosel Wally, Fábio Costa Magalhães, Cristian Gomes
%
%-----

% Número de simulações de Monte Carlo
n = 1e5;

% Dados de entrada determinísticos
t = 50 % Idade [anos] da análise/previsão
Tref = 20 % Temperatura [°C] referência
U = 5000.00 % Energia de ativação da difusão
R = 1.00 % Constante dos gases

% Geração das variáveis aleatórias do problema

% Idade do concreto quando medido Dref (tref [anos])
mediatref = 28/365;
desviotref = 1/365;
tref = normrnd(mediatref,desviotref,n,1);

% Coeficiente de difusão inicial (Dref [mm^2/ano])
mediaD0 = 55.188;
desvioD0 = 0.09143*mediaD0
D0 = normrnd(mediaD0,desvioD0,n,1);

% Concentração superficial de cloretos (Cs [%])
mediaCs = 2.0;
desvioCs = 0.45*mediaCs;
zetaCs = (log(1+(desvioCs/mediaCs)^2))^(1/2);
lambdaCs = log(mediaCs)-1/2*zetaCs^2;
Cs = lognrnd(lambdaCs,zetaCs,n,1);

% Cobrimento da armadura (x [mm])

```

```

mediax = 50.00;
desviox = 0.10*mediax;
zetax = (log(1+(desviox/mediax)^2))^(1/2);
lambdax = log(mediax)-1/2*zetax^2;
x = lognrnd(lambdax,zetax,n,1);

% Fator de envelhecimento do concreto (m)
mediam = 0.30;
desviom = 0.10*mediam;
m = normrnd(mediam,desviom,n,1);

% Temperatura média anual (Temp [°C])
mediaTemp = 18;
desvioTemp = 0.20*mediaTemp;
Temp = normrnd(mediaTemp,desvioTemp,n,1);

% Concentração crítica de cloretos (habilitar caso analise a Pf)
mediaCcr = 0.4
desvioCcr = 0.10*mediaCcr
Ccr = normrnd(mediaCcr,desvioCcr,n,1);

% Cálculo do coeficiente de difusão (D [mm^2/ano])
D=D0.*(tref/t).^m.*(exp(U/R*(1/(Tref+273)./(273+Temp))));
meanD = mean(D)
CovD = std(D)/mean(D)

D30=D0.*(tref/30).^m.*(exp(U/R*(1/(Tref+273)./(273+Temp))));
meanD30 = mean(D30)
CovD30 = std(D30)/mean(D30)

% Cálculo da concentração de cloretos na profundidade x no tempo t
if t>=30
    Cxt = Cs.*(1-erf(x./(2.*(abs(D30).*t).^0.5)));
else
    Cxt = Cs.*(1-erf(x./(2.*(abs(D).*t).^0.5)));
end

% Função estado limite g(x,t) = Ccr - Cxt
gxt=Ccr-Cxt;

% Cálculo da probabilidade de falha
%Pf=sum(gxt<0)/n
%Beta=-norminv(Pf,mu,sigma)

% Grafico de N x Pf
%figure(1);
%plot(n,Pf);
%title('N x P_f');
%xlabel('N');
%ylabel('P_f');

%Grafico de N x Beta
%subplot(3,1,2);

```

```

    %plot(n, Beta1);
    %title('N x \beta');
    %xlabel('N');
    %ylabel('\beta');

meanCxt = mean(Cxt)
COVCxt  = std(Cxt)/mean(Cxt)

% Passando D [mm2/ano] para D[m2/s]
Dplot = D30*3.171e-14;

% Exportando resultados para .txt
fid = fopen('Cxtvalues_Life365.txt','wt');
fprintf(fid, '%d\n',Cxt);
fclose(fid);

% Incluindo pdf das distribuições normal e lognormal
%figure(1);
%title('Histograma de D(t)');
%hold on;

% Histograma normalizado
%histog = histogram(D30(1:n), 100, 'Normalization', 'pdf');

% Plotando a pdf normal de D
%grafx = min(D30):(max(D30)-min(D30))/500:max(D30);
%pdfD30norm = plot(grafx, normpdf(grafx, meanD30, std(D30)), '--
k', 'LineWidth', 1.5);

% Grafico da pdf lognormal de D
%qsiD30 = sqrt(log(1 + (std(D30)/meanD30)^2));
%lambdaD30 = log(meanD30) - 1/2*qsiD30^2;
%pdfD30logn = plot(grafx, lognpdf(grafx, lambdaD30, qsiD30), '--
b', 'LineWidth', 1.5);

% Configurando a legenda
%legend([pdfD30norm, pdfD30logn], 'pdf gaussiana de D', 'pdf log-
normal de D');
%legend('boxoff');

%figure
%hist(Cs,100)
%title('Cs (Lognormal)')
%figure
%hist(Ccr,100)
%title('Ccr (Normal)')
%figure
%hist(x,100)
%title('x (Normal)')
%figure
%hist(m,100)
%title('m (Normal)')
%figure
%hist(Dplot,100)
%title('D (mm2/ano)')

```

```
%hold on
%figure
%hist(Cxt,1000)
%title('C(x,t) (%)')
%hold on
%figure
%hist(gxt,100)
%title('Função g(x,t) ')
```