



**MODELAGEM PROBABILÍSTICA PARA PREVISÃO DO TEMPO DE
INICIAÇÃO DA CORROSÃO POR CLORETO EM ESTRUTURAS DE
CONCRETO ARMADO EXPOSTAS EM ZONAS DE ATMOSFERA
MARINHA**

Por

Pablo Ramon Rodrigues Ferreira

*Documento apresentado à Universidade Federal da Paraíba para fins de defesa
de Doutorado*



**MODELAGEM PROBABILÍSTICA PARA PREVISÃO DO TEMPO DE
INICIAÇÃO DA CORROSÃO POR CLORETO EM ESTRUTURAS DE
CONCRETO ARMADO EXPOSTAS EM ZONAS DE ATMOSFERA
MARINHA**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor.

Pablo Ramon Rodrigues Ferreira

Orientador: Prof. Dr. Gibson Rocha Meira

João Pessoa – Paraíba

Fevereiro de 2022

**Catalogação na publicação
Seção de Catalogação e Classificação**

F383m Ferreira, Pablo Ramon Rodrigues.

Modelagem probabilística para previsão do tempo de
iniciação da corrosão por cloreto em estruturas de
concreto armado expostas em zonas de atmosfera marinha
/ Pablo Ramon Rodrigues Ferreira. - João Pessoa, 2022.
245 f. : il.

Orientação: Gibson Rocha Meira.
Tese (Doutorado) - UFPB/CT.

1. Corrosão. 2. Concreto armado. 3. Aerossol
marinho. 4. Concreto não saturado. 5. Modelo
probabilístico. I. Meira, Gibson Rocha. II. Título.

UFPB/BC

CDU 620.19 (043)

PABLO RAMON RODRIGUES FERREIRA

**MODELAGEM PROBABILÍSTICA PARA PREVISÃO DO TEMPO DE
INICIAÇÃO DA CORROSÃO POR CLORETO EM ESTRUTURAS DE
CONCRETO ARMADO EXPOSTAS EM ZONAS DE ATMOSFERA
MARINHA**

Tese aprovada em 18 / 02 / 2022 como requisito para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil e Ambiental do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba.

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Gibson Rocha Meira – UFPB

(Orientador)



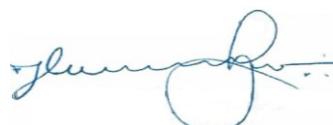
Prof. Dr. Hidelbrando Jose Farkat Diógenes – UFPB

(Examinador Interno)



Prof. Dr. Normando Perazzo Barbosa – UFPB

(Examinador Interno)



Prof. Dr. João Luiz Calmon Nogueira da Gama – UFES

(Examinador Externo)



Prof. Dr. Aires Fernando Fernandes Leite Camões Azevedo – Universidade do Minho (Portugal)

(Examinador Externo)

*A Mãe Rainha três vezes admirável de Schoenstatt, pelas incomparáveis graças.
A Zefinha e Esmeraldina Ferreira, por serem meu porto seguro.*

AGRADECIMENTOS

É com grande fervor emocional, que findo mais uma etapa de minha singela vida como iniciante a pesquisador. Uma verdadeira realização pessoal e profissional, que demonstra o tanto que o conhecimento e a ética profissional adquiridos no trajeto são importantes para o crescimento pessoal de um ser humano. Entretanto, tal orgulho e satisfação, na realização de um sonho, não foram atingidos sozinho, e sim, por um grupo de pessoas e instituições que acreditaram no meu potencial de desenvolver este trabalho. Aqui meus sinceros agradecimentos, aqueles envolvidos diretamente na conquista desta etapa.

Primeiramente gostaria de agradecer ao meu pai **Pedro Rodrigues**, por tantos anos de empenho na minha formação profissional e no caráter meu e de minha irmã, **Rayane Kadja**.

À minha mãe, **Esmeraldina Ferreira**, por sempre acreditar no potencial de seus filhos e, assim, encarar a dificuldade da vida para dar o bem mais precioso a sua prole: amor, carinho e estudo.

À minha madrinha, **Zefinha Ferreira** (*in memorian*), que foi presente durante toda minha infância e adolescência, ajudando minha mãe na criação. Sinto sua falta!

À minha noiva **Fernanda Rayanny** e a irmã **Rayane Kadja**, que me incentivaram nos momentos mais difíceis desta pesquisa, momento esse que todo pós-graduando acha que não vai conseguir. Quem já passou por tal, sabe o que estou falando.

Ao meu cunhado **Leo Constantino**, sinônimo sempre de otimismo e parceria.

A chegada de **Marina Ferreira Constantino** no meio da pandemia e na fase de escrita dessa tese, que era minha desopilação durante a licença maternidade da minha irmã.

Ao meu Orientador **Prof. Gibson Meira**, principal formador da minha vida de iniciante a pesquisa científica, ao qual, dedica-me esforços desde 2007, aonde era estudante do segundo anos de Tecnologia no IFPB. Um orientador de verdade, que sempre teve presente nas dificuldades deste trabalho, direcionando e em muitas vezes pondo a “mão na massa”.

Ao Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia da Paraíba, no nome da Pró-reitora de pesquisa e pós-graduação **Dra. Silvana Costa**, pela bolsa do PIQIFPB, pelo apoio no uso dos laboratórios e espaços de tal instituição.

Ainda no IFPB, aos meus colegas de trabalho do setor de obras e engenharia (**Amando, Edimael, Gilvan, Hillner, Joabe, José Carlos, Naiza, Renan, Rayff e Vinicius**) pela força e

compreensão nos momentos conturbados. Em especial a **Hillner Paiva**, meu mentor na parte de programação em Delphi®.

A Universidade Federal da Paraíba, no nome dos **Profs. Dr. Givanildo Azeredo e Dr. Normando Perazzo**, que mesmo após o término de meus estudos na universidade, me atendeu incrivelmente bem na realização de alguns ensaios no LABEME;

Obrigado meu pai e meu bom Jesus, por que se eu tenho tudo nessa vida, é pela graça e misericórdia de vossa bondade.

FERREIRA, P. R. R. Modelagem probabilística para previsão do tempo de iniciação da corrosão por cloreto em estruturas de concreto armado expostas em zonas de atmosfera marinha. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) - Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa - Paraíba, p. 245, 2022.

RESUMO

A deterioração de estruturas de concreto armado é um problema recorrente em áreas costeiras. Este tipo de ambiente é caracterizado pela atuação dos íons cloreto, que depois de transportados pelo ar, penetram o concreto e se acumulam nas proximidades da armadura, dando início ao processo de corrosão. A crescente necessidade por manutenções preventivas, reparos e construções eficientes reforça a carência de um modelo confiável de predição da penetração de cloreto, capaz de estimar a vida útil destas estruturas. Sendo assim, este trabalho propõe um modelo probabilístico para previsão do tempo de iniciação à corrosão em estruturas de concreto armado expostas em zonas de atmosfera marinha. Levando em consideração a natureza estocástica do processo de corrosão, a variação sazonal das condições climatológicas, a capacidade de fixação de cloreto da matriz cimentícia, as condições de transporte de cloreto em meio não saturado, radiação solar, o processo de lavagem da superfície devido à chuva dirigida e o processo de hidratação do concreto. Através de um exemplo ilustrativo, os fatores que governam o processo de degradação foram estudados. Os resultados mostram a importância de levar em consideração a imprevisibilidade relacionada aos parâmetros de projeto, às propriedades dos materiais, às simplificações do modelo matemático e às condições ambientais de exposição em estruturas de concreto armado não saturadas. Por fim, os resultados foram validados por análise comparativa com dados da literatura e um modelo generalista para concretos em zona de atmosfera marinha é apresentado.

PALAVRAS-CHAVE: Corrosão; Concreto armado; Aerossol marinho; Concreto não saturado; Modelo probabilístico.

FERREIRA, P. R. R. **Probabilistic modeling for prediction of chloride corrosion initiation time in reinforced concrete structures exposed in marine atmosphere zones.** 2022. Thesis (Doctoral in Civil and Environmental Engineering) - Technology Center of the Federal University of Paraiba. João Pesssoa - Paraiba, p. 245, 2022.

ABSTRACT

The deterioration of reinforced concrete structures is a common problem in coastal areas. This type of environment is characterized by the action of chloride ions, which after being transported through the air, penetrate the concrete and accumulate close to the reinforcement, initiating the corrosion process. The need for efficient constructions, preventive maintenances and repairs demonstrates the lack of a reliable prediction model of chloride penetration, capable of estimating the service life of these structures. Thus, this work presents a probabilistic model to predict the time of initiation to corrosion in structures of reinforced concrete constructed in zone of marine atmosphere. The model considers the stochastic nature of the corrosion process, seasonal variation of the climatological conditions, the capacity of chloride binding of the cement paste, the conditions of transport of chlorides in unsaturated condition, the solar radiation effect, washout effect and the hydration time of concrete. With an illustrative example, the factors that govern the degradation process were studied. The results show the importance of considering the unpredictability related to design parameters, property of the materials, simplifications of the mathematical model and the environmental conditions of exposure in unsaturated reinforced concrete structures. Finally, the results were validated by comparative analysis with data from the literature and a generalist model for concrete in a marine atmosphere zone is presented.

KEYWORDS: Corrosion; Reinforced concrete; Marine environment; Unsaturated concrete; Probabilistic model.

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SIMBOLOS E ABREVIACÕES

1	INTRODUÇÃO.....	27
1.1	Importância e justificativa	27
1.2	Originalidade.....	31
1.3	Limitações	33
1.4	Objetivos	33
1.4.1	<i>Objetivo geral.....</i>	33
1.4.2	<i>Objetivos específicos</i>	34
1.5	Estrutura da pesquisa.....	34
2	FORMAÇÃO, TRANSPORTE E ACUMULAÇÃO DO AEROSSOL MARINHO NA SUPERFÍCIE DO CONCRETO.....	36
2.1	Zonas de agressividade marinha	36
2.2	Formação do aerossol marinho.....	38
2.3	Principais fatores que influenciam a geração, o transporte e a acumulação de íons cloreto na superfície do concreto.....	39
2.3.1	<i>Fatores que influenciam a geração e o transporte de cloreto em zonas de atmosfera marinha.....</i>	40
2.3.2	<i>Fatores que influenciam a acumulação de cloreto na superfície do concreto em zonas de atmosfera marinha</i>	49
2.4	Caracterização da agressividade em zonas de atmosfera marinha.....	55
2.4.1	<i>Ensaios de caracterização à agressividade de atmosfera marinha</i>	57
2.4.2	<i>Estudos de deposição de cloreto no Brasil.....</i>	61
3	PENETRAÇÃO DE CLORETO NO INTERIOR DO CONCRETO	63
3.1	Mecanismos naturais de transporte de cloreto	63
3.1.1	<i>Absorção capilar</i>	63
3.1.2	<i>Difusão</i>	64
3.1.3	<i>Permeabilidade</i>	72
3.2	Modelos de vida útil para estrutura de concreto	72
3.2.1	<i>Transporte de cloreto.....</i>	75
3.2.2	<i>Transporte de umidade.....</i>	91
3.2.3	<i>Transporte de calor</i>	102
4	CORROSÃO DE ARMADURAS DESENCADEADA POR CLORETO.....	107
4.1	Fenômeno da Passivação da armadura.....	107
4.2	Fases da corrosão de armaduras	108

4.2.1	<i>Fatores que afetam a fase de iniciação da corrosão</i>	109
4.2.2	<i>Fatores que afetam a fase de propagação da corrosão</i>	115
4.3	A despassivação da armadura por cloretos	116
4.4	Teor crítico de cloretos	117
5	FORMULAÇÃO PROBABILISTICA PARA PREVISÃO DO TEMPO DE INCIAÇÃO A CORROSÃO POR CLORETO	121
5.1	O processo estocástico da corrosão por cloretos	123
5.2	Método de monte carlo	124
5.3	Geração de números aleatórios	127
5.3.1	<i>Tipos de números aleatórios</i>	127
5.3.2	<i>Tipos de geradores de números aleatórios</i>	128
5.3.3	<i>Parâmetros de qualidade para geração de números pseudoaleatórios</i>	131
5.3.4	<i>Geração de números pseudoaleatórios com distribuição de probabilidade contínua</i>	133
5.4	Formulação matemática por elementos finitos	136
5.4.1	<i>Método dos Resíduos Ponderados</i>	137
5.4.2	<i>Funções padrões de forma</i>	139
5.4.3	<i>Imposição das condições de contorno</i>	141
5.4.4	<i>Escolha dos parâmetros numéricos</i>	142
6	MODELO DE INTERAÇÃO AMBIENTE/ESTRUTURA	144
6.1	Proposta de modelo geral para a concentração superficial	146
6.2	Ajuste de C_s ao modelo proposto	149
6.2.1	<i>Dados de laboratório</i>	151
6.2.2	<i>Zona submersa</i>	153
6.2.3	<i>Zona de flutuação de maré</i>	154
6.2.4	<i>Zona de respingo</i>	155
6.2.5	<i>Zona de atmosfera marinha</i>	157
6.3	Análise geral do comportamento de C_s	158
7	DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE BASEADO NO MODELO PROPOSTO	160
7.1	O software	160
7.1.1	<i>Entrada de dados</i>	163
7.1.2	<i>Definição das condições de contorno</i>	168
7.1.3	<i>Pós-Processamento</i>	171
8	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	174
8.1	Descrição do problema	174
8.1.1	<i>Condições do ambiente de exposição</i>	175
8.1.2	<i>Propriedade dos materiais e parâmetros de projeto</i>	177
8.1.3	<i>Parâmetros de cálculo matemático</i>	179

8.2	Preparação para procedimento de cálculo	180
8.3	Influência do tempo de exposição e das condições climáticas no transporte.....	181
8.3.1	<i>Temperatura e umidade no interior do concreto</i>	181
8.3.2	<i>Coeficiente de difusão de cloretos.....</i>	184
8.3.3	<i>Perfis de cloretos totais.....</i>	186
8.3.4	<i>Concentração superficial de cloretos.....</i>	198
8.4	Influência da combinação de cloretos no transporte de massa.....	200
8.4.1	<i>Perfis de cloretos livres.....</i>	200
8.4.2	<i>Tempo de iniciação da corrosão</i>	202
8.5	Influência do mecanismo de transporte no ingresso de cloretos	204
8.5.1	<i>Perfis de cloretos totais.....</i>	205
8.5.2	<i>Tempo de iniciação da corrosão</i>	206
8.6	Probabilidade de corrosão para concretos em zona de atmosfera marinha	208
8.6.1	<i>Modelo específico.....</i>	208
8.6.2	<i>Comparativo entre modelos</i>	211
8.6.3	<i>Modelo generalizado para climatologia local</i>	215
9	CONSIDERAÇÕES FINAIS	221
9.1	Conclusões	221
9.2	Sugestões para trabalhos futuros	224
10	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	225

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Participação da construção civil no PIB (Produto Interno Bruto) de 2018 em alguns países europeus. Fonte: UNECE (2019).....	27
Figura 1.2 – Processo de formação, transporte e deposição do aerossol marinho atrelada ao ingresso e transporte de cloretos no interior do concreto.....	29
Figura 2.1 - Representação esquemática das zonas de agressividade. Fonte: Meira (2004).....	37
Figura 2.2 - Representação esquemática da concentração salina em função da velocidade do vento e da região de deslocamento. Fonte: Gustafsson e Franzén (1996).	38
Figura 2.3 - Processo de ingresso de aerossol marinho em estrutura de concreto. Fonte: Wattanapornprom e Ishida (2017).....	39
Figura 2.4 - Dependência da deposição (a) e concentração de cloretos (b) em relação à velocidade do vento depositado em vela úmida na costa da Suécia. Fonte: Gustafsson e Franzén (1996).	41
Figura 2.5 - Dados da literatura que relacionam a deposição de cloretos do aerossol marinho e a distância do mar.	43
Figura 2.6 - Dados da literatura que mostram a influência da altura do solo na distribuição vertical da concentração salina: (a) deposição de cloretos para alturas até 10m e (b) concentração de cloretos para alturas acima de 70m em plataformas offshore. Fonte: Meira <i>et al.</i> (2017a). ...	45
Figura 2.7 - Dados da literatura que mostram a influência dos obstáculos e da distância na deposição de cloretos: influência em mar aberto (a) e com obstáculos urbanos (b). Fonte: Castañeda <i>et al.</i> (2018).....	48
Figura 2.8 - Relação entre a concentração superficial (C_s) e o tempo de exposição, para concretos expostos em diferentes condições ambientais como: (a) zona de flutuação de maré, (b) zona de respingo e (c) zona de atmosfera marinha. Fonte: Costa e Appleton. (1999b).....	49
Figura 2.9 - Simulação da concentração superficial de cloretos (C_s) para uma ponte localizada a 150m do Mar do Japão. Fonte: Swatekititham <i>et al.</i> (2007).	50
Figura 2.10 - Diferentes condições de rugosidade da superfície de concreto: lisa (a), normal (b) e rugosa (c). Fonte: Swatekititham (2004).....	52
Figura 2.11 - Resultados experimentais que demonstram a influência da rugosidade na concentração de cloretos diferentes das condições de rugosidade: normal (a) e rugosa (b) a 30m do mar. Fonte: Swatekititham (2004).....	53
Figura 2.12 - Concentração de cloretos em diferentes pontos da ponte. Fonte: Swatekititham <i>et al.</i> (2006).	54
Figura 2.13 - Modelo de dispositivo de exposição de espécimes de concreto armado em ambiente com atmosfera marinha. Fonte: Borba Jr (2011).	57
Figura 2.14 - Modelo de dispositivo de vela úmida. Fonte: Meira <i>et al.</i> (2010).	58
Figura 2.15 – Influência do tempo de exposição da vela úmida ao ambiente de estudo (a) e do período do ano em que acontece o ensaio de vela úmida (b). Fonte: Meira (2004).....	59
Figura 2.16 – Efeito sazonal da deposição de cloretos em João Pessoa/PB a 10, 100, 200, 500m do mar, de jan./02 a ago./03. Fonte: Meira (2004).....	60
Figura 2.17 - Modelo de dispositivo de tanque coletor de ar. Fonte: Wattanapornprom e Ishida (2016).	61

Figura 3.1 – Ensaio de célula de difusão em estado estacionário: configuração(a) e exemplo prático(b). Fonte: Joukoski <i>et al.</i> (2004)	65
Figura 3.2 – Perfil de cloretos obtidos de uma parede localizada na costa norte da Alemanha após 8 anos de exposição em zona de respingo ($C_s = 1,77\%$ e $D_{ns} = 8,9e^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$). Fonte: Bertolini <i>et al.</i> (2004)	67
Figura 3.3 – Exemplo de perfil de cloretos obtidos a partir do emprego da Equação 3.5 para diferentes tipos de concreto (consumo de cimento = 400kg/m^3) submetidos à concentração de 1M	68
Figura 3.4 – Perfil de cloretos totais para concretos em condição de exposição real a diferentes distâncias do mar (a) e representação esquemática do perfil de duas zonas (b). Fonte: Meira <i>et al.</i> (2010)	69
Figura 3.5 – Relação entre cloretos livres e combinados (Isoterma de fixação) para pasta de cimento com a/c de 0,5 e $we = 29,7\%$. Fonte: Sergi <i>et al.</i> (1992)	71
Figura 3.6 – Evolução dos modelos de previsão de vida útil de estruturas de concreto aramado submetidos à corrosão por cloretos.	75
Figura 3.7 – Efeito da dependência do coeficiente de difusão efetivo de cloretos (D_c) em relação à temperatura, para vários níveis de energia de ativação (U).....	80
Figura 3.8 – Efeito da dependência do coeficiente de difusão efetivo de cloretos (D_c) em relação ao GS, para vários níveis de fator de redução (n).	81
Figura 3.9 – Efeito da dependência do coeficiente de difusão efetivo de cloretos (D_c) em relação ao tempo de exposição, para vários níveis de fator de redução da idade (m).	82
Figura 3.10 – Efeito da dependência do coeficiente de difusão efetivo de cloretos (D_c) em relação à variação de umidade relativa do concreto.....	83
Figura 3.11 – Representação genérica da formação das camadas de pele e interior (ANDRADE, 1997).....	84
Figura 3.12 – Exemplo de perfil de cloretos obtidos a partir do emprego da Equação 3.5 para diferentes tipos de concreto (consumo de cimento = 400kg/m^3 e $D_{ns}=1,00e^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$) submetidos à concentração de 1M , considerando o efeito pele a 2 e 20mm.....	85
Figura 3.13 – Comportamento do coeficiente de difusão efetivo de cloretos (D_c) em relação à variação de temperatura, umidade relativa e tempo, com base nos dados usados por Martin-Perez <i>et al.</i> (2001).	85
Figura 3.14 – Comportamento das isotermas de combinação de cloretos para pastas moldados com cimento sem adição, a/c = 0,4 e exposto a 22°C . Fonte: Dousti e Shekarchi (2015).....	88
Figura 3.15 – Valor do coeficiente higrotérmico (K) em relação à variação de umidade relativa do concreto.	92
Figura 3.16 – Efeito da dependência do coeficiente de difusão de umidade (D_h) em relação à variação de umidade relativa do concreto ($\alpha_0 = 0,05$).	94
Figura 3.17 – Efeito da dependência do coeficiente de difusão de umidade (D_h) em relação ao período de hidratação, para vários tempos de referência ($tref$)).	95
Figura 3.18 – Comportamento do coeficiente de difusão de umidade (D_h) em relação à variação de temperatura, umidade relativa e do período de hidratação, com base nos dados usados por Martin-Perez <i>et al.</i> (2001) e $D_{h,ref} = 1,0e - 11\text{m}^2/\text{s}$ na secagem $1,5e - 11\text{m}^2/\text{s}$ na umectação	96

Figura 3.19 – Comportamento do coeficiente de difusão de umidade (D_h) nos dois primeiros anos de idade.....	96
Figura 3.20 – Influência do tipo de cimento na concentração de água evaporável.....	98
Figura 3.21 – Influência da temperatura na concentração de água evaporável, para cimento tipo II.....	98
Figura 3.22 – Influência do período de hidratação na concentração de água evaporável, para cimento tipo II.....	99
Figura 3.23 – Influência do fator a/c na concentração de água evaporável, para cimento tipo II.....	99
Figura 3.24 – Relação entre a capacidade de equilíbrio da umidade e a umidade relativa do poro.....	100
Figura 3.25 – Efeito sazonal da umidade relativa em João Pessoa, de jan./18 a dez./18, com dados meteorológicos do INMET.....	102
Figura 3.26 – Efeito sazonal da temperatura em João Pessoa, de jan./18 a dez./18, com dados meteorológicos do INMET.....	104
Figura 3.27 – Incremento na T_{ext} em virtude da radiação solar na cidade de João Pessoa/PB.....	105
Figura 4.1 – Diagrama de Pourbaix de equilíbrio termodinâmico ($Fe - H_2O; 25^\circ C$). Fonte: Pourbaix (1974).....	108
Figura 4.2 – Modelo de vida útil proposto por Tuutti (1982) (a) e adaptado (b). Fonte: Meira (2017b).....	109
Figura 4.3 – Relação entre a taxa de deposição média de cloretos em vela úmida e a concentração de cloretos totais no interior do concreto. Fonte: Meira <i>et al.</i> (2007).....	110
Figura 4.4 – Influência da temperatura (a) e da umidade relativa (b) na predição da concentração de cloretos para modelo baseado na Segunda Lei de Fick. Fonte: Oh <i>et al.</i> (2006).....	110
Figura 4.5 – Influência da relação a/c na penetração de cloretos. Fonte: Jaegermann (1990) apud Meira (2017b).....	112
Figura 4.6 – Perfis de cloretos em concretos expostos a diferentes zonas de exposição por 36 meses. Fonte: Costa e Appleton (1999a).....	114
Figura 4.7 – Concentração de cloretos em concretos após processo de fissuração e ensaio de migração de cloretos. Fonte: Djerbi <i>et al.</i> (2008).....	115
Figura 4.8 – Esquema do Complexo Transitório. Fonte: Treadaway (1988).....	116
Figura 4.9 – Variabilidade dos valores de Cl_{crit} livres e totais. Fonte: Alonso e Sanchez (2009).....	118
Figura 5.1 – Perfis de cloretos totais e livres para espécimes de concreto (consumo de cimento de 415 kg/m^3), com cura de 7 dias em câmara úmida e exposição de 4 dias em solução de $1M$ de $NaCl$ e 3 dias em ambiente de laboratório. Fonte: Ferreira (2015).....	121
Figura 5.2 – Princípio básico da formulação probabilística para previsão de processo estocástico.....	122
Figura 5.3 – Representação gráfica da função de estado-limite com as simulações que falharam e não falharam para 10 simulações de concentração de cloretos usando a solução analítica da Segunda Lei de Fick.....	126

Figura 5.4 – Representação gráfica da função de estado limite com as simulações que falharam e não falharam para 100 (a) e 1000 (b) simulações de concentração de cloretos usando a solução analítica da Segunda Lei de Fick.....	126
Figura 5.5 – Uniformidade no preenchimento bidimensional de um gerador uniformemente distribuído entre -0,5 e 0,5 para 50 (a) e 200 (b) números gerados.	132
Figura 5.6 – Elementos em uma dimensão associado a funções típicas de forma linear (a) e quadrática (b). Fonte: Zienkiewicz e Morgan (1983).....	139
Figura 5.7 – Comparação de vários θ com a solução exata da função $df/dt + \lambda f = 0$ com $\lambda \Delta t = 0,5$. Fonte: Zienkiewicz e Morgan (1983).....	143
Figura 6.1 – Fatores que influenciam a concentração superficial de cloretos (C_s).	144
Figura 6.2 – Variação da concentração superficial (C_s) em função do tempo para diversos tipo de funções.....	147
Figura 6.3 – Determinação esquemática da concentração superficial em perfis de cloretos sem (a) e com presença de zona convectiva (b).	150
Figura 6.4 – Ajuste dos modelos de concentração superficial em função do tempo de exposição aos dados coletados na literatura em zona submersa (no modelo proposto foi considerado um consumo de cimento de 400 kg/m^3 e a/c de 0,40).	154
Figura 6.5 – Ajuste dos modelos de concentração superficial em função do tempo de exposição aos dados coletados na literatura em zona de flutuação de maré (no modelo proposto foi considerado um consumo de cimento de 400 kg/m^3 e a/c de 0,40).....	155
Figura 6.6 – Ajuste dos modelos de concentração superficial em função do tempo de exposição aos dados coletados na literatura em zona de respingo de maré (no modelo proposto foi considerado um consumo de cimento de 400 kg/m^3 e a/c de 0,40).....	156
Figura 6.7 – Ajuste dos modelos de concentração superficial em função do tempo de exposição aos dados coletados na literatura em zona de atmosfera marinha (distância do mar de 100 m, consumo de cimento de 400 kg/m^3 e a/c de 0,40).	157
Figura 7.1 – Janela de abertura do programa <i>Sea air PRO-Life</i>	161
Figura 7.2 – Janela principal do programa <i>Sea air PRO-Life</i>	161
Figura 7.3 – Algoritmo simplificado de rotinas para implementação da programação com intuito de prever o período de iniciação da corrosão por cloretos em estrutura de concreto armado submetidas a zonas de atmosfera marinha. Fonte: Adaptado de Martin-Perez (1999) e Bastidas-Arteaga <i>et al.</i> (2011).....	162
Figura 7.4 – Janela de informações gerais do programa <i>Sea air PRO-Life</i>	163
Figura 7.5 – Janela das características ambientais do programa <i>Sea air PRO-Life</i>	164
Figura 7.6 – Janela de influência da radiação solar na temperatura do programa <i>Sea air PRO-Life</i>	164
Figura 7.7 – Janela para fornecimento das variáveis constantes do programa <i>Sea air PRO-Life</i>	165
Figura 7.8 – Janela com o coef. de difusão efetivo de Cl^- fornecido pelo programa <i>Sea air PRO-Life</i>	165
Figura 7.9 – Janela mostrando a influência da temperatura no coef. de difusão efetivo de Cl^- programa <i>Sea air PRO-Life</i>	166
Figura 7.10 – Janela para fornecimento das variáveis aleatórias do programa <i>Sea air PRO-Life</i>	166

Figura 7.11 – Janela com histograma do coeficiente de difusão de referência de cloretos do programa <i>Sea air PRO-Life</i>	167
Figura 7.12 – Janela com os parâmetros que influenciam as condições de contorno de temperatura do programa <i>Sea air PRO-Life</i>	168
Figura 7.13 – Janela com os parâmetros que influenciam as condições de contorno de umidade do programa <i>Sea air PRO-Life</i>	169
Figura 7.14 – Janela com as variáveis que influenciam a concentração superficial de cloretos do programa <i>Sea air PRO-Life</i>	170
Figura 7.15 – Janela com o gráfico que mostra a evolução da concentração superficial de cloretos no tempo de exposição do programa <i>Sea air PRO-Life</i>	170
Figura 7.16 – Janela mostrando o resultado pós-processamento da concentração de cloretos livres apresentada pelo programa <i>Sea air PRO-Life</i>	172
Figura 7.17 – Janela mostrando os resultados de período de iniciação à corrosão com base no histograma e na curva acumulada de distribuição apresentada pelo programa <i>Sea air PRO-Life</i>	172
Figura 7.18 – Janela mostrando o relatório com os resultados pós-processamento apresentada pelo programa <i>Sea air PRO-Life</i>	173
Figura 8.1 – Mecanismo de efeito lavagem na superfície do concreto. Fonte: Adaptado de Wattanapornprom e Ishida (2017).....	176
Figura 8.2 – Estrutura da malha 1D (a) e 2D (b) para cálculo do MEF dos modelos estudados.	180
Figura 8.3 – Histograma do coeficiente de difusão de cloretos de referência seguindo distribuição de probabilidade log-normal.	180
Figura 8.4 – Histograma do teor crítico de cloretos seguindo distribuição de probabilidade normal.....	181
Figura 8.5 – Variação da temperatura externa e no interior do concreto (25mm e 40mm) para a cidade de João Pessoa/PB.	182
Figura 8.6 – Variação umidade relativa externa e no interior do concreto (25mm e 40mm) para a cidade de João Pessoa/PB.	182
Figura 8.7 – Perfis de umidade relativa no interior do concreto, nas estações do verão e inverno, após 1 e 25 anos de exposição.....	183
Figura 8.8 – Variação anual do fator que mostra a dependência do coeficiente de difusão efetivo de cloretos (D_c) em relação a temperatura.....	184
Figura 8.9 – Variação anual do fator que mostra a dependência do coeficiente de difusão efetivo de cloretos (D_c) em relação a umidade relativa.	185
Figura 8.10 – Comportamento do coeficiente de difusão efetivo de cloretos (D_c) em relação a variação de temperatura, umidade relativa e tempo.	186
Figura 8.11 – Perfis de cloretos livres para 18, 46 e 180 meses de exposição a 10m de distância do mar.....	187
Figura 8.12 – Perfis de cloretos livres para 18, 46 e 180 meses de exposição a 100m de distância do mar.....	187
Figura 8.13 – Perfis de cloretos livres para 18, 46 e 180 meses de exposição a 200m de distância do mar.....	188

Figura 8.14 – Perfis de cloretos livres para 18, 46 e 180 meses de exposição a 500m de distância do mar.....	188
Figura 8.15 – Perfis de cloretos livres durante o verão (a) e inverno (b), em vários tempo de exposição ao ambiente agressivo. Fonte: Martin-Perez (1999).	189
Figura 8.16 – Comparação entre os valores de concentração de cloretos totais calculado e experimental para as distâncias de 10 (a), 100 (b), 200 (c) e 500m (d) do mar.....	190
Figura 8.17 – Influência do efeito lavagem nos perfis de cloretos totais após 15 anos de exposição e a 100m de distância do mar.....	191
Figura 8.18 – Influência do efeito lavagem na quantidade de íons cloretos que penetrou uma área superficial de $1m^2$ a 100m de distância do mar.	192
Figura 8.19 – Ação do efeito lavagem sobre perfis de cloretos totais (a) e total de íons cloretos (b). Fonte: Wattanapornprom e Ishida (2017).	193
Figura 8.20 – Histograma e FDP do tempo de iniciação da corrosão para espécimes com (a) e sem efeito lavagem (b), após Teste de Aderência.	193
Figura 8.21 – Efeito da pluviometria na probabilidade de iniciação à corrosão para modelo com e sem ação do efeito lavagem a 100m de distância do mar.....	194
Figura 8.22 – Ciclo anual da temperatura externa e radiação solar para a cidade de João Pessoa/PB.	195
Figura 8.23 – Influência da radiação solar nos perfis de cloretos totais após 15 anos de exposição e a 100m de distância do mar.	196
Figura 8.24 – Efeito da radiação solar na probabilidade de iniciação à corrosão para modelo com e sem ação da radiação solar a 100m de distância do mar.	197
Figura 8.25 – Histograma e FDP do tempo de iniciação da corrosão para espécimes com (a) e sem efeito da radiação solar (b), após Teste de Aderência.	198
Figura 8.26 – Comportamento da concentração superficial de cloretos (C_s) ao longo do tempo.	198
Figura 8.27 – Simulação da concentração superficial de cloretos (C_s) para uma ponte localizada a 150m do Mar do Japão. Fonte: Swatekititham <i>et al.</i> (2007).	199
Figura 8.28 – Comparação entre os valores de conc. superficial de cloretos calculado e experimental.	200
Figura 8.29 – Influência do efeito da combinação nos perfis de cloretos livres após 15 anos de exposição e a 100m de distância do mar.	201
Figura 8.30 – Perfis de cloretos livres sem e com combinação (Isoterma de Freundlich) para 10, 30 e 50 anos de exposição (difusão + convecção, $D_c, ref = 2e - 12m/s$). Fonte: Lin <i>et al.</i> (2010).	201
Figura 8.31 – Histograma e FDP do tempo de iniciação da corrosão para espécimes sem combinação de cloretos (a) com Isoterma de Langmuir (b) e Isoterma de Freundlich (c), após Teste de Aderência.	203
Figura 8.32 – Efeito da combinação de cloreto na probabilidade de iniciação à corrosão para modelo com e sem combinação a 100m de distância do mar.	204
Figura 8.33 – Influência do mecanismo de transporte nos perfis de cloretos totais após 15 anos de exposição e 100m de distância do mar.	205
Figura 8.34 – Influência da convecção nos perfis de cloretos livres com ciclos de secagem e molhagem. Fonte: Adapatado de Lin <i>et al.</i> (2010).....	206

Figura 8.35 – Histograma e FDP do tempo de iniciação da corrosão para espécimes de concreto armado saturados (difusão) (a) e não saturados (difusão + convecção) (b), após Teste de Aderência.....	206
Figura 8.36 – Efeito do mecanismo de transporte de cloreto na probabilidade de iniciação à corrosão para modelo que representam concretos saturados e não saturados.....	208
Figura 8.37 – Histograma e FDP do tempo de iniciação da corrosão para lajes a 10m (a), 100m (b), 200m (c) e 500m (d), após Teste de Aderência.....	210
Figura 8.38 – Probabilidade de iniciação da corrosão calculado para laje (1D) e viga (2D) em concreto armado submetida a atmosfera marinha na cidade de João Pessoa/PB a 10 e 100m de distância do mar.....	210
Figura 8.39 – Probabilidade de iniciação da corrosão calculado para laje (1D) e viga (2D) em concreto armado submetida a atmosfera marinha na cidade de João Pessoa/PB a 200 e 500m de distância do mar.....	211
Figura 8.40 – Probabilidade de iniciação da corrosão para vários modelos já publicados na literatura em comparação com o modelo proposto (100m de distância do mar).....	213
Figura 8.41 – Concentração de cloretos livres na profundidade da armadura para vários modelos já publicados na literatura em comparação com o modelo proposto (100m de distância do mar).....	215
Figura 8.42 – Tempo de iniciação da corrosão versus cobrimento calculado para diferentes concretos moldados em laje (1D) e viga (2D) submetidos a atmosfera marinha com deposição média de cloretos de 1000mg de Cl ⁻ /m ² .dia.....	218
Figura 8.43 – Tempo de iniciação da corrosão versus cobrimento calculado para diferentes concretos moldados em laje (1D) e viga (2D) submetidos a atmosfera marinha com deposição média de cloretos de 150mg de Cl ⁻ /m ² .dia.....	218
Figura 8.44 – Tempo de iniciação da corrosão versus cobrimento calculado para diferentes concretos moldados em laje (1D) e viga (2D) submetidos a atmosfera marinha com deposição média de cloretos de 40mg de Cl ⁻ /m ² .dia.....	219
Figura 8.45 – Tempo de iniciação da corrosão versus cobrimento calculado para diferentes concretos moldados em laje (1D) e viga (2D) submetidos a atmosfera marinha com deposição média de cloretos de 10mg de Cl ⁻ /m ² .dia.....	219

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Tipos de função de ajustes usados na literatura para demonstrar a relação entre concentração superficial ou deposição de cloretos na atmosfera marinha e velocidade/direção do vento.....	42
Tabela 2.2 - Tipos de função de ajustes usados na literatura para demonstrar a relação entre concentração superficial ou deposição de cloretos na atmosfera marinha e a distância do mar ..	44
Tabela 2.3 – Tipos de função de ajustes usados na literatura para demonstrar a relação entre concentração superficial ou deposição de cloretos na atmosfera marinha e a distribuição vertical.	46
Tabela 2.4 – Influência da umidade relativa, da temperatura e da velocidade do vento na deposição de cloretos na cidade de Havana (Cuba) através de regressão multivariada linear. Fonte: Castañeda <i>et al.</i> (2018).....	47
Tabela 2.5 – Tipos de função de ajustes usados na literatura para demonstrar a relação entre concentração superficial de cloretos em zonas de agressividade marinha e o tempo de exposição.	50
Tabela 2.6 – Relação entre a classe de agressividade e a concentração de cloretos no aerossol marinho. Fonte: Helene (1995).	56
Tabela 2.7 – Relação entre a faixa de agressividade e a concentração de cloretos no aerossol marinho. Fonte: Adaptada de Vilas-Boas (2013) com dados da NBR 6118 (2014) e 14643 (2014).	56
Tabela 2.8 – Relação entre a faixa de agressividade e a concentração de cloretos no aerossol marinho. Fonte: adaptado de Meira (2004).	56
Tabela 2.9 – Parâmetros de ajuste à Equação 2.2 para previsibilidade da deposição de cloretos na cidade de João Pessoa/PB.....	60
Tabela 2.10 – Valores médios de deposição de cloretos encontrados em alguns dos estudos realizados no país.	62
Tabela 3.1 – Valores probabilísticos de coeficiente de difusão efetivo de cloretos determinado através de estruturas reais, ensaios de laboratório ou usados em modelos probabilísticos.....	78
Tabela 3.2 – Valores de Nct e Vct de acordo com o tipo de cimento utilizado.	98
Tabela 4.1 – Coeficiente de difusão de cloretos ($\times 10^{-12}$ m ² /s) em concretos com relação a/c = 0,55. Fonte: adaptado de Park <i>et al.</i> (2016).....	112
Tabela 4.2 – Fatores que influenciam o teor crítico de cloretos. Fonte: Ferreira (2015).	117
Tabela 4.3 – Valores probabilísticos de teor crítico de cloretos obtidos através de ensaios de laboratório ou usados em modelos probabilísticos.	118
Tabela 5.1 – Resultado para 10 simulações da concentração de cloretos usando a solução analítica da Segunda Lei de Fick.....	126
Tabela 5.2 – Valores usuais utilizados no método da congruência linear. Fonte: Chwif e Medina (2015).	129
Tabela 5.3 – Sequência de 224 números aleatórios com distribuição uniforme. Fonte: Chwif e Medina (2015).....	130
Tabela 5.4 – Constantes que correlacionam as equações de transporte de massa e energia.....	137
Tabela 6.1 – Valores probabilísticos da concentração superficial de cloretos obtidos de estruturas reais, ensaios de laboratório ou usados em modelos probabilísticos.....	145

Tabela 6.2 – Principais modelos matemáticos para previsão da concentração superficial de coretos.....	151
Tabela 6.3 – Funções de ajustes usadas para demonstrar a relação entre concentração superficial de cloretos e o tempo de exposição em ensaios de laboratório.....	152
Tabela 6.4 – Funções de ajustes usadas para demonstrar a relação entre concentração superficial de cloretos e o tempo de exposição submetidos a zona submersa.....	153
Tabela 6.5 – Funções de ajustes usadas para demonstrar a relação entre concentração superficial de cloretos e o tempo de exposição submetidos a zona de flutuação de maré.....	154
Tabela 6.6 – Funções de ajustes usadas para demonstrar a relação entre concentração superficial de cloretos e o tempo de exposição submetidos a zona de respingo.....	156
Tabela 6.7 – Funções de ajustes usadas para demonstrar a relação entre concentração superficial de cloretos e o tempo de exposição submetidos a zona de atmosfera marinha.....	157
Tabela 7.1 – Modelos matemáticos para previsão da concentração superficial de coretos dispostos no programa <i>Sea air PRO-Life</i>	169
Tabela 8.1 – Parâmetros climatológicos constantes usados na validação do programa proposto.....	177
Tabela 8.2 – Parâmetros dos materiais e de projeto randômicos usados na validação do programa proposto.....	178
Tabela 8.3 – Parâmetros dos materiais e de projeto constantes usados na validação do programa proposto.....	178
Tabela 8.4 – Parâmetros matemáticos usadas na validação do programa proposto.....	179
Tabela 8.5 – Erro relativo para escolha da malha ótima em 1D.....	179
Tabela 8.6 – Resultados dos ajustes ao tempo de iniciação da corrosão de concretos a curvas clássicas de distribuição de probabilidade, com e sem o efeito lavagem.....	194
Tabela 8.7 – Resultados dos ajustes ao tempo de iniciação da corrosão de concretos a curvas clássicas de distribuição de probabilidade, com e sem o efeito radiação solar.....	197
Tabela 8.8 – Resultados dos ajustes ao tempo de iniciação da corrosão de concretos com e sem combinação de cloretos a curvas clássicas de distribuição de probabilidade.....	202
Tabela 8.9 – Resultados dos ajustes ao tempo de iniciação da corrosão de concretos saturado (difusão) e não saturado (difusão + convecção) a curvas clássicas de distribuição de probabilidade.....	207
Tabela 8.10 – Resultados dos ajustes ao tempo de iniciação da corrosão de concretos em zona de atmosfera marinha a curvas clássicas de distribuição de probabilidade.....	209
Tabela 8.11 – Coeficiente de difusão de Cl^- ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) em concretos submetidos a ensaio de difusão.....	216
Tabela 8.12 – Faixas de agressividade obtida com base na taxa média de deposição de cloretos na cidade de João Pessoa/PB. Fonte: adaptado de Meira (2004).....	217
Tabela 8.13 – Critérios de enquadramento de especificação do material com base no modelo estudado.....	220

LISTA DE SIMBOLOS E ABREVIAÇÕES

a, b, c, d	Coeficientes de regressão de uma função qualquer;
A	Área da sessão transversal (m^2);
A_s	Fator de absorção solar do material (%);
a/c	Relação água/cimento (adimensional);
a/agl	Relação água/aglomerante (adimensional);
$A - D$	Valor para teste de aderência por Anderson-Darling (adimensional);
B_c	Coeficiente de transferência de cloretos na superfície (m/s);
B_h	Coeficiente de transferência de umidade na superfície (m/s);
B_t	Coeficiente de transferência de temperatura na superfície ($W/m^2 \cdot ^\circ C$);
C_1	Conc. de íons cloretos na câmara contendo alta concentração inicial (kg/m^3);
C_2	Conc. de íons cloretos na câmara contendo água destilada ou meio básico (kg/m^3);
C_∞	Concentração inicial de cloretos no interior do concreto (%);
C'_{ar}	Deposição de aerossol marinho após a passagem pelo obstáculo ($mg\ de\ Cl/m^2 \cdot h$);
C_{ar}	Deposição de aerossol marinho livre ($mg\ de\ Cl/m^2 \cdot h$);
C_{cl}	Concentração de íons cloretos (kg/m^3 de solução no poro);
C_{cob}	Concentração de cloretos combinados (kg/m^3 de concreto ou %massa de cimento);
C_{ext}	Concentração de cloretos externo (kg/m^3 de solução);
C_{liv}	Concentração de cloretos livres (kg/m^3 de concreto ou %massa de cimento);
C_{liv}^s	Concentração de cloretos livres na superfície (kg/m^3 de água no poro);
$C_{liv}^s\ t \rightarrow 0s$	Concentração de cloretos livres na superfície no instante ($t \rightarrow 0s$) (kg/m^3 de concreto ou %massa de cimento);
c_{min}	Cobrimento mínimo ou real (cm);
c_{nom}	Cobrimento nominal (cm);
C_q	Capacidade específica calorífica do concreto ($J/kg \cdot ^\circ C$);
C_s	Concentração de cloretos na superfície do concreto (%massa de cimento);
$C_{s \rightarrow 0}$	Concentração de cloretos no limite entre a superfície de concreto e o ambiente de exposição, (% de massa de cimento);
C_{tot}	Concentração de cloretos totais (kg/m^3 de concreto);
$C(x, t)$	Concentração de cloretos na profundidade x e no tempo t (%);
CC	Condição de contorno;
cob	Cobrimento da armadura (m ou cm);
$Conv$	Convecção;
COV	Covariância (adimensional);
Cl_{crit}	Concentração critica de cloretos livres (kg/m^3 de concreto ou %massa de cimento);

dm	Distância do mar (m);
D_c^*	Coeficiente de difusão de cloretos aparente (m^2/s);
D_c	Coeficiente de difusão efetivo de cloretos (m^2/s);
$D_{c,ref}$	Coeficiente de difusão efetivo de cloretos nas condições de referência (m^2/s);
D_{ee}	Coeficiente de difusão no estado estacionário (m^2/s);
Dep^{cl} ou DCl_{ext}	Deposição de cloretos (mg de $\text{Cl}^-/\text{m}^2.\text{dia}$);
DCl_{max}	Deposição de cloretos máxima no ano (mg de $\text{Cl}^-/\text{m}^2.\text{dia}$);
DCl_{min}	Deposição de cloretos mínima no ano (mg de $\text{Cl}^-/\text{m}^2.\text{dia}$);
$DDCl_{max}$	Dia de ocorrência da deposição de cloretos máxima no ano (mg de $\text{Cl}^-/\text{m}^2.\text{dia}$);
$D_{h,ref}$	Coeficiente de difusão de umidade nas condições de referência (m^2/s);
D_{ns}	Coeficiente de difusão no estado não-estacionário (m^2/s).
D_h^*	Coeficiente de difusão de umidade aparente (m^2/s);
D_h	Coeficiente de difusão de umidade efetivo (m^2/s);
$D_{h,sec}$	Coeficiente de difusão de umidade no período de secagem (m^2/s);
$D_{h,um}$	Coeficiente de difusão de umidade no período de umedecimento (m^2/s);
dif	Difusão;
Dh_{max}	Dia em que acontece a umidade relativa externa diária máxima no ano (dias);
DGS_{max}	Dia em que acontece grau de saturação máximo no ano (dias);
DT_{max}	Dia em que acontece a temperatura externa diária máxima no ano (dias);
EDO	Equação diferencial ordinária;
EDP	Equação diferencial parcial;
erf	Função de erro de Gauss;
$f(x, y, t)$	Função qualquer dependente de x, y e t;
$f_1(T)$	Função que considera a dependência da temperatura (adimensional);
$f_2(GS)$	Função que considera a dependência do grau de saturação (adimensional);
$f_3(t)$	Função que considera a dependência do tempo (adimensional);
$f_4(h)$	Função que considera a dependência da umidade relativa (adimensional);
$g_1(T)$	Função que considera a dependência da temperatura (adimensional);
$g_2(h)$	Função que considera a dependência da umidade relativa no poro do concreto (adimensional);
$g_3(t_e)$	Função que considera a dependência do grau de hidratação (adimensional);
GS	Grau de saturação do concreto (adimensional);
GS_{max}	Grau de saturação máxima no ano (%);
GS_{min}	Grau de saturação mínima no ano (%);
h	Altura em relação ao mar (m);

h_∞	Umidade relativa inicial no interior do concreto (adimensional);
h_c	Umidade relativa onde D_c cai pela metade entre a umidade mínima e máxima (adimensional);
h_e	Comprimento da malha (m);
h_{ext}	Umidade relativa externa (adimensional);
h_{max}	Umidade relativa externa diária máxima no ano (adimensional);
h^s	Umidade na superfície (adimensional);
$h_{t \rightarrow 0}^s$	Umidade relativa na superfície no instante ($t \rightarrow 0s$) (adimensional);
I_d	Radiação solar total diária (MJ/m ² .dia);
K	Coeficiente higrotérmico, em 1/°C;
$K - S$	Valor para teste de aderência por Kolmogorov-Smirnov (adimensional);
K_p	Coeficiente de permeabilidade do material (m ²);
L	Espessura do disco (m);
m	<i>Aging reduction factor</i> (adimensional)
n	Parâmetro que caracteriza a queda do D_h com a umidade (adimensional);
N_0, N_1, N_2	Funções padrões de formas para elementos finitos;
N_{ct}	Parâmetro que depende do tipo de cimento e influencia n (adimensional);
n_{gs}	Fator de redução do GS (adimensional);
N_{MC}	Número de simulações (adimensional);
pH	Potencial Hidrogeniônico;
Plu	Pluviometria (mm/hora);
q_{ag}	Fluxo volumétrico de água (m ³ /m ² .s);
q_{cl}	Onde é o fluxo de massa de íons cloreto na superfície (kg/m ² .s)
q_{cl}^s	Fluxo normal de cloreto na superfície do concreto (kg/m ³ .s);
q_h^s	Fluxo de entrada de umidade na superfície do concreto (m ³ /m ² .s);
q_{conv}	Fluxo convectivo de massa de íons cloreto (kg/m ² .s);
q_{per}	Fluxo de massa da substância (m ³ /s);
q_T^s	Fluxo normal de temperatura na superfície do concreto (W/m ²);
r	Taxa expressa a relação entre a direção e a velocidade do vento (adimensional);
r^2	Coeficiente de regressão (adimensional);
R	Constante universal dos gases perfeitos (8,314x10-3 KJ/°K.mol);
$R(d)$	Fator de modificação devido ao obstáculo (adimensional);
RH	Umidade relativa (adimensional, %);
t_e	Período de hidratação (em dias);
t_{refh}	Período de hidratação de referência que se obteve t_e (em dias);
t_{ref}	Tempo de referência que se obteve $D_{c,ref}$ (segundos);

T	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$, $^{\circ}\text{K}$);
T_{∞}	Temperatura inicial no interior do concreto ($^{\circ}\text{C}$);
T_{ext}	Temperatura externa ($^{\circ}\text{C}$);
T_{max}	Temperatura externa diária máxima no ano ($^{\circ}\text{C}$);
T_{min}	Temperatura externa diária mínima no ano ($^{\circ}\text{C}$);
T_{ref}	Temperatura de referência que se obteve $D_{c,ref}$ ($^{\circ}\text{K}$)
T^s	Temperatura na superfície ($^{\circ}\text{C}$);
$T_{t \rightarrow 0}^s$	Temperatura na superfície no instante ($t \rightarrow 0\text{s}$) ($^{\circ}\text{C}$);
t	Tempo (s);
v	Velocidade do vento (m/s);
v_3	Velocidade do vento igual ou maior que 3m/s (m/s);
V	Volume da câmara contendo alta concentração de cloreto (m ³);
V_{ct}	Parâmetro que depende do tipo de cimento e influência V_m (adimensional);
VUP	Vida útil de projeto (anos);
U	Energia de ativação do processo de difusão de cloreto (KJ/mol);
U_h	Energia de ativação do processo de difusão de umidade, em KJ/mol;
w_e	Concentração de água evaporável (m ³ de água/ m ³ de concreto);
α	Constante de combinação de cloreto
α_0	Parâmetro que representa a relação entre $D_{h,min}/D_{h,max}$ (adimensional);
α_s	Coeficiente de transmissão no contato ar-concreto (MJ/m ² .h $^{\circ}\text{C}$);
β	Constante de combinação de cloreto
β_h	Função que expressam a dependência de t_e em relação à umidade (adimensional);
β_T	Função que expressam a dependência de t_e em relação à temperatura (adimensional);
Δc	Tolerância de execução para o cobrimento (cm);
Δt	Time step (s);
ΔT_{rs}	Variação de temperatura em decorrência da radiação solar ($^{\circ}\text{C}$)
η	Viscosidade do fluido (N.s/m ²);
θ	Fator de ponderação da diferença-finita no tempo
θ_v	Inclinação do vento em relação a superfície de estudo (adimensional);
λ	Condutividade térmica do concreto (W/m. $^{\circ}\text{C}$)
μ	Média ou parâmetro de posição de uma função probabilística;
π	Constante Pi (3,14159);
ρ_c	Densidade do concreto (kg/m ³);
σ	Desvio-padrão ou parâmetro de forma de uma função probabilística;
φ	Fator de redução da fixação (adimensional);

ϕ	Valor da função desconhecida no ponto x e y;
$\hat{\phi}$	Valor aproximado da função desconhecida no ponto x e y;
χ^2	Valor para teste de aderência por Qui-quadrado (adimensional);
$\partial C_{cob}/\partial C_{liv}$	Capacidade de fixação (adimensional);
$\partial h_s/\partial t$	Capacidade de variação da umidade relativa devido à autodessecação (1/s);
$\partial p/\partial h$	Gradiente de pressão (N/m ² m);
$\partial T/\partial t$	Capacidade de variação da temperatura ao longo do tempo (°C/s);
$\partial w_e/\partial h$	Capacidade de equilíbrio da umidade (grama de água/grama de cimento).
$[C]$	Matriz de capacitância;
$[K]$	Matriz de condutibilidade;
$[f]$	Matriz de força;

1 INTRODUÇÃO

1.1 IMPORTÂNCIA E JUSTIFICATIVA

Apesar da quinta queda consecutiva, -2,4% em 2014, -7,6% em 2015, -5,2% em 2016, -5,0% em 2017 e -2,5% em 2018, a indústria da construção civil no Brasil movimentou no ano de 2018 uma gama de recurso da ordem de R\$420 bilhões de reais, isso representa 6,2% do PIB nacional (IBGE, 2019). Em outros países, a participação da construção civil na economia varia de 2%, para países em recessão, a 10%, como nos Estados Unidos que foi 4,3% do PIB em 2017 (US BEA, 2019) e em países europeus, como mostra a [Figura 1.1](#) (UNECE, 2019). Uma indústria com tanta representatividade na economia mundial, além de muitos empregos criados, gera grandes esforços na área de desenvolvimento de novas tecnologias, sustentabilidade, manutenção e conservação destes bens.

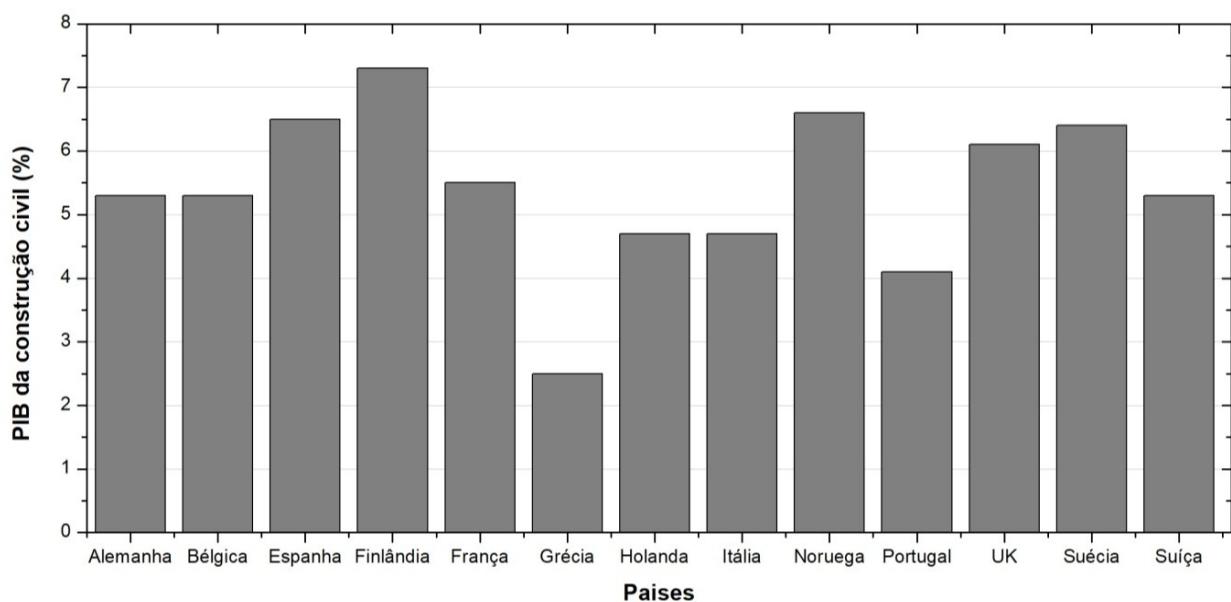


Figura 1.1 – Participação da construção civil no PIB (Produto Interno Bruto) de 2018 em alguns países europeus. **Fonte:** UNECE (2019).

Boa parte dos produtos confeccionados pela indústria da construção civil são executados em concreto armado, dada à boa relação entre o custo de execução e a durabilidade. Como todo bem durável, ele não é eterno, sua vida útil é limitada a fatores relacionados ao uso e as condições de exposição a agentes agressivos. Dentre os diversos fatores de degradação podemos destacar a corrosão de armadura (BERTOLINI *et al.*, 2004).

A corrosão do aço em estruturas de concreto armado é um problema muito sério, recorrente e multibilionário, atualmente é reconhecido como um dos maiores problemas na indústria da construção (FRANKOWSKI, 2018). É difícil dizer precisamente quanto é o custo da corrosão em estruturas de concreto armado, mas tomando com base o setor da metalurgia, estima-se que o custo geral com a corrosão em todo o mundo é chega próximo dos US\$ 2,5 trilhões, algo

equivalente a 3,4% do PIB global em 2013 e/ou 30% de todo ferro e aço produzido no mundo (NACE, 2016).

Ainda nesta temática, um estudo realizado pela *International Zinc Association* (IZA) em parceria com a USP, mostrou que a perda geral com a corrosão é algo entorno de 4% do PIB para o Brasil, o que corresponde a R\$ 270 bilhões em 2018. As últimas estatísticas demonstram que nos EUA mais de 1/3 do investimento na construção civil é destinado a obras de recuperação. Com base no ônus que a corrosão gera para a economia mundial, esforços têm sido dedicados ao estudo de corrosão por íons cloretos desde a segunda metade do século XX, quando este agente agressivo foi identificado como o principal causador de degradação de estruturas de concreto armado inseridos em ambiente de atmosfera marinha (ANGST *et al.*, 2009). Estes estudos se dedicam principalmente as seguintes subáreas:

- i.* Caracterizar os níveis de agressividade de zonas de atmosfera marinha (MEIRA *et al.*, 2017a; MEIRA *et al.*, 2010; MORCILLO *et al.*, 2000; GUSTAFSSON e FRANZÉN, 1996, entre outros);
- ii.* Determinar quais e como as características dos materiais interferem no processo de corrosão (VERA *et al.*, 2017; COSTA e APLETTON, 2007; JAEGERMANN, 1990; TUUTTI, 1982; PAGE *et al.*, 1981, entre outros);
- iii.* Desenvolvimentos de metodologias de ensaio para padronização de procedimentos (FERREIRA, 2015; TREJO e PILLAI, 2003; CASTELLOTE *et al.*, 2002, entre outros);
- iv.* Modelar o fenômeno de transporte e processo de corrosão (WATTANAPORNPROM e ISHIDA; 2017; BASTIDAS-ARTEAGA *et al.*, 2011; MARTIN-PEREZ, 1999; TANG & NILSSON, 1996; SAETTA *et al.*, 1993, entre outros).

Zonas de atmosfera marinha, como regiões próximas ao mar, se caracterizam por apresentar um cenário típico de corrosão de armadura desencadeada por cloretos, onde a formação do aerossol marinho e seu transporte na direção da costa dão início ao processo de deposição de cloretos na superfície do concreto (MEIRA *et al.*, 2010; COLE *et al.*, 2003a). A [Figura 1.2](#) mostra esquematicamente o processo de formação ([Figura 1.2 \(a\)](#)), transporte e deposição de cloretos na superfície do concreto ([Figura 1.2 \(b\)](#)).

A literatura consegue descrever bem o transporte de aerossol pela atmosfera. Porém, não se comprehende muito como acontece à interação aerossol/estrutura, uma vez que nem todos os cloretos depositados na superfície conseguem se acumular e ingressar no interior do concreto, dando início ao processo de corrosão ([Figura 1.2 \(c\)](#)). Dos poucos estudos que tentaram correlacionar a agressividade marinha do ambiente com a quantidade de cloretos no interior do

concreto, destacou que apenas 70% dos cloretos depositados penetraram no interior do concreto (MEIRA *et al.*, 2003).

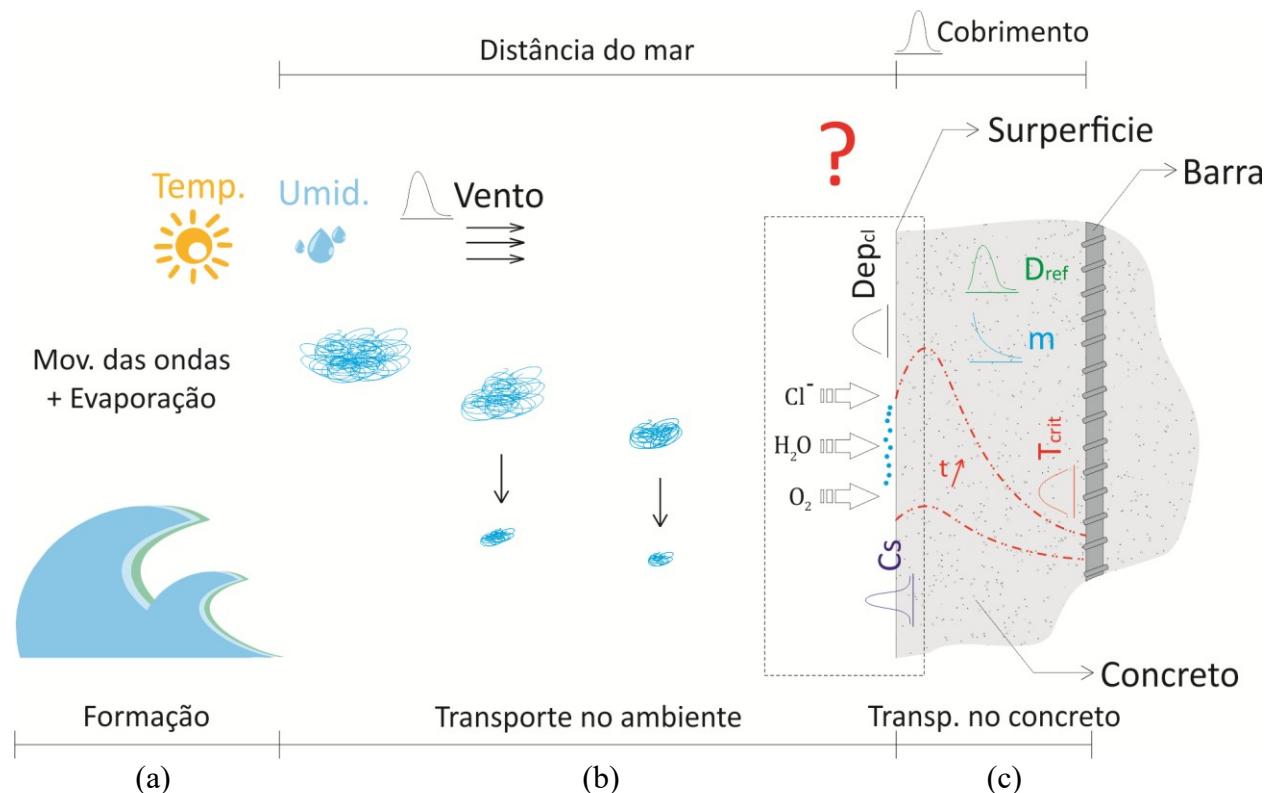


Figura 1.2 – Processo de formação, transporte e deposição do aerossol marinho atrelada ao ingresso e transporte de cloretos no interior do concreto.

Diante do cenário em que nem todos os cloretos que se depositam na superfície ingressam para o interior do concreto, também se percebe que os resultados presentes na literatura representam ainda poucos dados sobre esse fenômeno e os avanços ainda não são significativos para estabelecer relações diretas entre aerossol marinho e sua interação com estruturas de concreto. Portanto, pesquisas que busquem contribuir para a minimização dessa lacuna podem oferecer um conhecimento melhor sobre o comportamento da estrutura e, assim, reduzir futuros custos de manutenção, tendo um papel importante diante do quadro aqui apresentado.

Passada a fase de interação aerossol/estrutura, ocorre o transporte de cloretos para o interior do concreto (Figura 1.2 (c)). A penetração de cloretos por si só não causa qualquer dano ao concreto simples. Porém, numa estrutura de concreto armado, a corrosão começa quando certa quantidade de íons cloretos atinge as proximidades da armadura, dando início ao processo de degradação (ALONSO e SANCHEZ, 2009; ANGST *et al.*, 2009; CASCUDO, 1997).

A deterioração da estrutura pode se propagar de forma relativamente rápida e, inicialmente, pode-se manifestar através de manchas marrom-avermelhadas na superfície da estrutura. Em seguida, tornam-se visíveis fissuras longitudinais à armadura, afetando o comportamento mecânico da estrutura. Geralmente, o tempo entre o início da corrosão e a falha causada pela

fissuração é mais curto do que o tempo necessário para o início da corrosão (VAL e TRAPPER, 2008). Portanto, o tempo para o início da corrosão representa um importante parâmetro no controle da deterioração de estruturas de concreto armado expostos a íons cloreto (BERTOLINI *et al.*, 2004). Tal abordagem, apesar de ser considerada como uma ação conservadora, assume extrema importância, por exemplo, nas fases de projeto ou manutenção de obras de infraestruturas (VERA *et al.*, 2017).

Os efeitos prejudiciais da corrosão de armaduras sobre a vida útil de estruturas de concreto armado e o custo gerado com a recuperação das mesmas destacam a necessidade de desenvolvimento de modelos matemáticos que descrevam confiavelmente o processo de corrosão. A análise dos fatores intervenientes possibilita a predição da vida útil de estruturas de concreto armado, a fim de auxiliar o profissional da área na tomada de decisões para confecção de seus projetos, bem como na análise de situações de casos já existentes. Desta forma, ajudando-o a identificar os principais parâmetros que repercutem diretamente na vida útil da estrutura e abrindo a perspectiva para projetar também com base na durabilidade e não somente com relação à estabilidade estrutural.

Dada a complexidade do processo de corrosão e sua natureza estocástica, em função da combinação de vários fatores físicos e químicos associados tanto ao concreto, como ao ambiente de exposição, entende-se que um modelo para previsão do período de iniciação da corrosão em estruturas de concreto armado confiável deve considerar as incertezas relacionadas (BASTIDAS-ARTEAGA *et al.*, 2011; VAL e TRAPPER, 2008):

- i.* Ao fenômeno de transporte de massa e energia envolvido, através da determinação dos tipos de mecanismos de transporte e das EDP que representam o modelo físico;
- ii.* Ao método matemático empregado na resolução do modelo físico, tendo em vista o mecanismo de imposição das condições de contorno e o uso de simplificações ou ajustes para o emprego da solução numérica ou analítica, probabilística ou determinística;
- iii.* Aos parâmetros de projeto, como, por exemplo, a relação a/c, o consumo de cimento, tempo e tipo de cura, o tempo estimado de vida útil, o uso de aditivo e/ou adições, a dosagem do concreto, o cobrimento adotado, etc.;
- iv.* Às propriedades dos materiais, representadas pela densidade, condutibilidade térmica, calor específico, coeficiente de difusão, permeabilidade do concreto, resistência mecânica, capacidade de combinação de cloreto, etc.;

- v. As condições de exposição, tais como temperatura, umidade relativa, distância do mar, velocidade do vento, concentração da atmosfera marinha, altura em relação ao solo, pluviosidade, radiação solar, presença de obstáculos, tempo de exposição, etc.

Hoje, graças ao progresso obtido nas últimas décadas junto à química do cimento e a tecnologia do concreto, essas causas de deterioração podem ser combatidas com certa eficácia. Através da escolha adequada de materiais e da preparação cuidadosamente controlada, é possível obter estruturas de concreto duráveis, sob uma ampla gama de condições operativas (BERTOLINI *et al.*, 2004).

Com o uso de boas práticas no controle da corrosão, estima-se que haja uma economia entre 15 e 35% do custo total com a corrosão, algo entre US\$ 375 e US\$ 875 bilhões anualmente numa base global (NACE, 2016). Também vale destacar que o litoral sofre 150 vezes mais com a corrosão do que a zona rural. Ações mitigadoras na fase de projeto poderia reduzir em cerca de 25% os gastos com a manutenção ou recuperação destas estruturas (SOBRATEMA, 2017).

É dentro desse contexto que este trabalho se insere, apresentando a proposta de desenvolvimento de um modelo com abordagem probabilística que tente minimizar as incertezas e apresente resultados com a maior precisão possível dentro das limitações impostas pela complexidade do processo, sem prejudicar a praticidade do uso do modelo. Por fim, este trabalho colaborará com o entendimento do fenômeno de corrosão em estruturas de concreto armado, além de servir como base para o aprimoramento de modelos futuros.

1.2 ORIGINALIDADE

Modelos de vida útil de estruturas de concreto armado em zonas de agressividade marinha vêm sendo estudados desde a segunda metade da década de oitenta. Desde lá, vários modelos tentaram incorporar, da forma mais simples possível, as variáveis que influenciam o transporte de massa e o processo de corrosão de armaduras em estruturas de concreto armado. Boa parte destes estudos levou em consideração ensaios desenvolvidos em laboratório, que em muitos casos não demonstram com precisão o cenário real, onde uma diversidade de fatores está interagindo simultaneamente.

Como consequência disto, a aplicação desses modelos não conseguiu descrever de forma satisfatória o comportamento de estruturas em casos reais. Esta dificuldade se deve a natureza estocástica do processo de corrosão, os poucos estudos realizados em estruturas reais e a dificuldade em descrever a interação aerossol/estrutura.

Dante deste contexto, este trabalho busca apresentar um modelo com abordagem probabilística, para a formação e o transporte do aerossol marinho na atmosfera, sua interação (captura e acumulação) com a superfície do concreto e o transporte destes cloretos no interior do concreto. Levando em consideração as incertezas dos principais parâmetros reportados na literatura que influenciam o processo de iniciação à corrosão em estruturas de concreto armado, principalmente, os relacionados às condições ambientais e as propriedades dos materiais. Condições estas onde estaria a grande dificuldade dos modelos de previsão de vida útil representarem, de maneira satisfatória o comportamento de estruturas reais.

Sendo assim, a originalidade deste trabalho se respalda em dois segmentos: primeiro, a implementação de um modelo probabilístico que leve em consideração a melhor relação entre a simplicidade e a precisão dos resultados para representar a interação aerossol/estrutura, grande lacuna na literatura nacional e internacional; segundo, a apresentação de uma modelagem probabilística mais refinada de transporte de massa e energia no interior do concreto que leve em consideração a imprevisibilidade relacionada aos parâmetros de projeto, as propriedade dos materiais, as incertezas e simplificações do modelo matemático e as condições ambientais de exposição de estruturas de concreto armado não saturadas.

Como consequência dos desdobramentos deste trabalho, serão apresentados os seguintes diferenciais em relação aos demais modelos já publicados:

- i.* Proposta de um modelo físico-químico que compila numa única formulação matemática a geração, transporte, captura e acumulação de íons cloretos na superfície do concreto, no qual, denomina-se interação aerossol marinho com a estrutura de concreto armado. Servindo de condição de contorno (CC) para resolução das Equações Diferenciais Parciais (EDP's), que regem o mecanismo de transporte de cloretos no interior do concreto;
- ii.* Proposta de um modelo físico-químico para previsão do transporte de cloretos no interior do concreto mais refinado, onde foi acoplada ao modelo a influência do Grau de Saturação do poro do concreto, a diferenciação da velocidade de transporte de umidade na secagem e na umectação e a ação do efeito higrotérmico;
- iii.* Apresentação dos cálculos de transporte de massa e energia em uma dimensão com a possibilidade de escolha da função de forma linear e quadrática;
- iv.* Desenvolvimento de um *software* probabilístico com interface gráfica que fornece, ao usuário, o comportamento da temperatura, da umidade e dos perfis de cloretos (livres e

totais) com o passar do tempo de exposição ao ambiente agressivo, para qualquer zona de aggressividade marinha;

- v. Proposta de ábacos para simplificar o processo de tomada de decisão por parte do projetista de estruturas de concreto armado (lajes/paredes e vigas/pilares), frente à durabilidade, em zonas de atmosfera marinha com climatologia semelhante à cidade de João Pessoa/PB.

1.3 LIMITAÇÕES

Pelas mais diversas razões possíveis, principalmente a complexidade e o tempo demandado para confecção deste trabalho, este estudo não leva em consideração:

- i. O efeito do aumento da temperatura na capacidade de fixação de cloreto com a matriz cimentícia, que aumenta a disponibilidade de cloreto para ser transportado para o interior do concreto (DOUSTI e SHEKARCHI, 2015; SERGI *et al.*, 1992);
- ii. O período de propagação da corrosão, que inicia o processo de fissuração do concreto, aumentando a difusividade do concreto (MARTIN-PEREZ, 1999; CASCUDO, 1998);
- iii. A ação de degradação combinada com outros agentes agressivos, como o gás carbônico responsável pela carbonatação, que reduz o tempo para despassivação (BERTOLINI *et al.*, 2004; ANDRADE e ALONSO, 1996);
- iv. A variabilidade da modelagem espacial das incertezas, que tem sido reconhecida como uma questão que influencia diretamente a avaliação probabilística da vida útil da corrosão de estruturas armado (STEWART e MULLARD, 2007; STEWART e SOU, 2009);

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo geral

O principal objetivo deste presente estudo é desenvolver um modelo computacional, que leve em consideração às incertezas relacionadas aos fenômenos de transporte de massa, as propriedades dos materiais, a sazonalidade do ambiente de exposição e os parâmetros de projeto, com o intuito de prever o período necessário para o início da corrosão por cloreto em estruturas de concreto armado expostas em zonas de atmosfera marinha.

1.4.2 Objetivos específicos

Para atender aos desdobramentos do objetivo geral, descrito no item anterior (1.4.1), os seguintes objetivos específicos deverão ser atendidos:

- i. Desenvolver um *software*, com interface gráfica, utilizando o método dos elementos finitos com propagação de incertezas, para a modelagem do transporte de cloretos em concreto não saturado;
- ii. Conceber uma formulação matemática geral que expresse de maneira mais confiável e simples possível à interação ambiente/estrutura;
- iii. Avaliar o efeito dos parâmetros ambientais, em zonas de agressividade marinha (tempo de exposição, distanciamento do mar, pluviometria e taxa média de deposição de cloretos) sobre a concentração superficial de cloretos no concreto;
- iv. Estudar o efeito da temperatura, da radiação solar, da umidade relativa do ar, do grau de saturação e da idade no coeficiente de difusão de cloretos aparente;
- v. Analisar o efeito químico da fixação de cloretos no coeficiente de difusão de cloretos aparente e nos perfis de cloretos;
- vi. Avaliar a influência das incertezas relacionadas às propriedades dos materiais, os parâmetros de projeto, as condições de exposição e os mecanismos de transporte sobre a penetração de cloretos, o teor crítico de cloretos e o tempo necessário para início da corrosão;
- vii. Validar a modelagem, aplicando o modelo desenvolvido a uma estrutura real, comparando os resultados obtidos pelo *software* com os resultados obtidos em corpos de prova fabricados e dispostos em zona de atmosfera marinha para essa finalidade ou com dados obtidos na literatura.
- viii. Apresentar ábacos que servirão de auxílio no dimensionamento, frente à durabilidade, de estruturas de concreto armado (lajes e vigas) em ambientes de atmosfera marinha semelhante às condições climáticas encontradas em João Pessoa/PB.

1.5 ESTRUTURA DA PESQUISA

Este trabalho é dividido em nove capítulos mais as referências bibliográficas. O primeiro capítulo tem por objetivo apresentar o tema de estudo deste trabalho, mostrando sua importância para comunidade acadêmica através da base para futuras modelagens, auxiliando no

desenvolvimento de projetos e fornecendo subsídios para análise de casos em estruturas reais de concreto armado em zonas de atmosfera marinha.

O Capítulo 2 dedica esforços ao processo de formação, transporte e acumulação de cloretos na superfície do concreto, com base num levantamento bibliográfico de pesquisas relacionadas à modelagem de transporte de aerossol marinho pela atmosfera, elencando as principais variáveis que influenciam o processo e as funções de ajuste utilizadas. Neste mesmo capítulo também se apresenta a importância de caracterizar o ambiente em que a estrutura está inserida.

Uma vez alcançada a superfície do concreto, os cloretos podem penetrar o concreto por diversos mecanismos de transporte. O Capítulo 3 discute exatamente isto, onde são apresentadas as equações diferenciais parciais que idealizam a fenomenologia físico-química, bem como as condições iniciais e de contorno impostas para simular as variações das condições de exposição em concretos não saturados.

O Capítulo 4 mostra, teoricamente, como os cloretos transportados para a proximidade da armadura iniciam o processo de corrosão. Demonstrando que estruturas de concreto armado idênticas num mesmo ambiente de exposição podem ter comportamentos totalmente diferentes, configurando a natureza estocástica da corrosão.

A formulação matemática probabilística do modelo físico-químico de vida útil de estruturas de concreto armado em zonas de atmosfera marinha é descrita no Capítulo 5. Este capítulo resolve o problema aplicando técnicas de simulações à solução numérica que representa esta fenomenologia.

No Capítulo 6 é apresentado uma discussão sobre a interação ambiente/estrutura, representada fisicamente através da variável concentração superficial de cloreto (C_s). Este parâmetro é ponto chave na determinação das condições de contorno dos modelos preditivos de vida útil.

O Capítulo 7 apresenta a primeira versão pública do *software* desenvolvido com base na resolução dos Capítulos 5 e 6.

O Capítulo 8 apresenta e discute o desempenho numérico do modelo por meio de um estudo de sensibilidade a diversos parâmetros de projeto, exposição e características dos materiais. Validando os resultados do *software* desenvolvido com base nos dados de outros modelos e ensaios apresentados pela literatura. Também é apresentados ábacos que facilita e generaliza a aplicação do modelo.

Por fim, conclusões elencadas desta pesquisa e recomendações para trabalhos futuros são discutidas no Capítulo 9.

2 FORMAÇÃO, TRANSPORTE E ACUMULAÇÃO DO AEROSSOL MARINHO NA SUPERFÍCIE DO CONCRETO

O aerossol marinho nada mais é que uma névoa constituída de água e partículas de sal, gerada no mar e transportada para o continente pela ação do vento. O aerossol marinho é uma das fontes naturais de cloretos que em quantidade significativa pode dar início ao processo de degradação de estruturas de concreto armado. A formação e o comportamento do aerossol são amplamente estudados por pesquisadores em todo o mundo. Entretanto pouco se sabe sobre a interação entre os cloretos depositados na superfície e sua interação com a estrutura.

Desta forma, neste capítulo, serão apresentados o processo de formação do aerossol marinho e o seu comportamento quando transportado na direção da costa, destacando-se o efeito de algumas variáveis que influenciam diretamente este fenômeno. De modo a facilitar a compreensão das terminologias empregadas, optou-se por formar a base do conhecimento para na sequência discutir o tema central do capítulo.

2.1 ZONAS DE AGRESSIVIDADE MARINHA

Com o objetivo de caracterizar o ambiente de atmosfera marinha e melhorar o entendimento sobre o processo de penetração dos cloretos nas estruturas de concreto armado, vários estudos propõem a segmentação deste ambiente em zonas de agressividade. Boa parte desses estudos foi proposta nas décadas de 80 e 90, quando a base do conhecimento estava sendo formada nesta área (SWAMMY *et al.*, 1994; CEB Bulletin 183, 1992; BUENFELD, 1984; WILKINS e SHARP, 1980; entre outros).

A divisão por zonas leva em consideração a disponibilidade de oxigênio, agentes agressivos e umidade em contato com a estrutura de concreto armado, além de deixar subtendido o tipo de transporte envolvido no processo. A princípio, as zonas eram divididas em três partes: zona submersa, de respingo e atmosfera marinha (TANG e ANDERSEN, 2000; WILKINS e SHARP, 1980). Depois passaram para quatro: zona submersa, zona de ação de maré, zona de respingo e zona de atmosfera marinha (CEB Bulletin 183, 1992; BUENFELD, 1984). Com a evolução do conhecimento, porém, as zonas com atmosferas marinhas foram subdivididas em cinco segmentos ([Figura 2.1](#)). Swammy *et al.* (1994) as classificaram-nas da seguinte maneira: zona submersa, zona de flutuação da maré, zona de respingo, zona de *Spray* e zona de solo, as quais estão descritas a seguir.

- i. Zona submersa:* o concreto está localizado sempre abaixo do nível da água do mar. Esse ambiente caracteriza-se principalmente por um transporte de difusão iônica e/ou permeabilidade (CASCUDO, 1997);

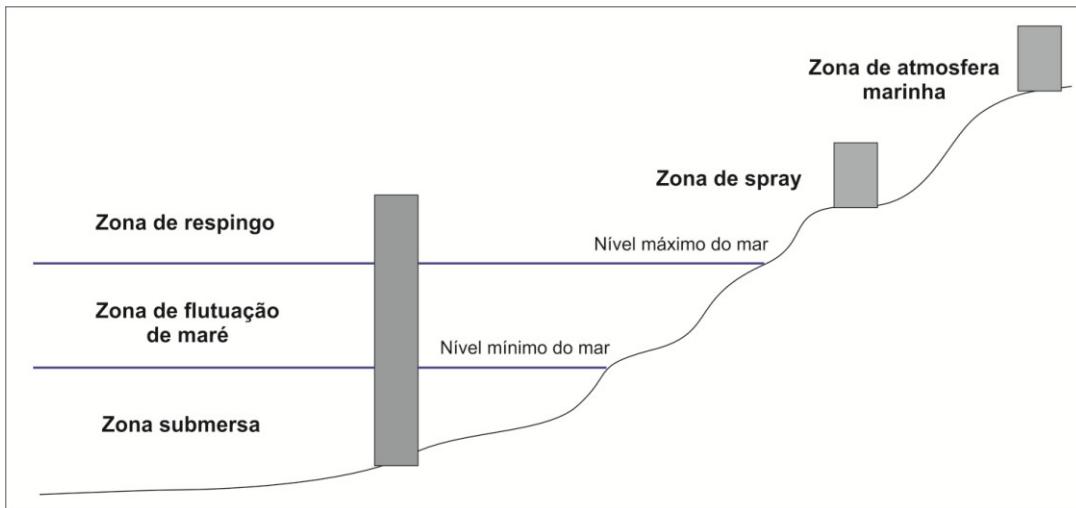


Figura 2.1 - Representação esquemática das zonas de agressividade. **Fonte:** Meira (2004).

- ii. **Zona de flutuação de maré:** nessa zona ora o concreto está submerso, ora está ao ar livre. Sendo assim, o concreto está exposto a ciclos de molhagem e secagem em função da variação das marés. Esse ambiente caracteriza-se por um transporte de absorção capilar na superfície e difusão iônica nas camadas mais internas (CASTRO *et al.*, 2001);
- iii. **Zona de respingo:** nessa zona o concreto está localizado um pouco acima do nível máximo da maré, fazendo com que os respingos de água do mar possam atingi-lo. Esse ambiente caracteriza-se por um transporte de convecção e difusão iônica na superfície e nas camadas mais internas apenas difusão iônica e/ou permeabilidade (MARTIN-PEREZ, 1999);
- iv. **Zona Spray:** o concreto está localizado numa área aonde a presença de ventos fortes pode fazer com que a superfície exposta tenha contato com a zona de respingo e, na presença de ventos fracos, a superfície não sofra a ação dos respingos;
- v. **Zona de solo ou de atmosfera marinha:** a superfície de exposição está a partir de uma distância de aproximadamente 10 – 20m do mar, fazendo com que a superfície receba a ação do aerossol marinho, mas não dos respingos diretamente (MEIRA, 2004).

Dentre as zonas aqui apresentadas, a zona de flutuação de maré é o segmento mais deletério das estruturas de concreto armado, já que estas estruturas estão submetidas a ciclos de molhagem e secagem, onde ocorre o efeito combinado de transporte de agentes agressivos (absorção capilar e difusão iônica) aumentando, assim, a intensidade de penetração de cloretos. Atrelado a esse efeito combinado, pode-se colocar a ação física de choques das ondas com a superfície do concreto, provocando o efeito de lascamento.

2.2 FORMAÇÃO DO AERESSOL MARINHO

A formação do aerossol marinho advém da evaporação da água em mar aberto, da agitação da superfície, do choque constante entre ondas e/ou topografia e da zona de quebra das ondas (MEIRA *et al.*, 2008; COLE *et al.*, 2003a; McKAY *et al.*, 1994; FITZGERALD, 1991). Reações biológicas, físicas e químicas no leito do mar também geram bolhas de ar que sobem à superfície e explodem como aerossol marinho (YANG *et al.*, 2017). Nas áreas de mar aberto também há produção de aerossol marinho devido ao atrito do vento com a superfície do mar, embora de forma menos significativa (MEIRA, 2004). No entanto, é na zona de quebra das ondas que o aerossol incorpora mais e maiores partículas de sal, devido à movimentação intensa das ondas.

Após a geração das gotas, estas ascendem pelas correntes de ar, entram em equilíbrio com o ambiente e, dependendo das condições climáticas, assumem forma de partículas salinas ou soluções salinas de diferentes concentrações. Segundo Zezza e Macri (1995), entre 70 e 74% de umidade relativa, as gotículas supersaturadas se tornam sólidas. Já Ericsson (1959) fala em algo abaixo de 75%.

O aerossol marinho é composto por um amplo espectro de partículas (PETELSKI e CHOMKA, 2000; FITZGERALD, 1991). A previsão de distribuição de volume e tamanho das partículas constituintes do aerossol marinho depende das condições meteorológicas e da topografia da área costeira. Morcillo *et al.* (1999) mediram o diâmetro das partículas do aerossol entre 0,1 e 400 μm e Swatekititham (2004) mediu algo entre 2 e 100 μm . Consenso geral é que partículas de maior tamanho e maior massa se depositam mais rapidamente, e as partículas menores e de menor massa permanecem em suspensão por mais tempo antes de se depositar (MEIRA *et al.*, 2010; COLE *et al.*, 2003a).

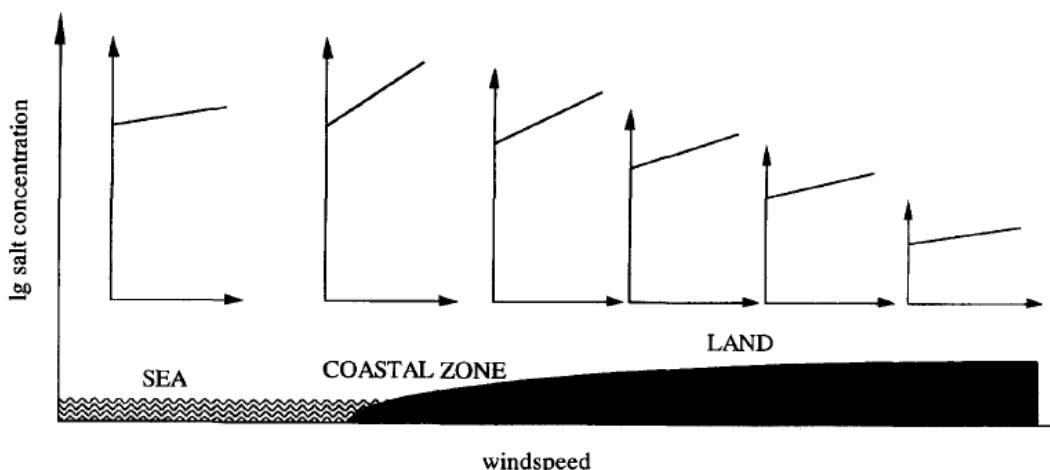


Figura 2.2 - Representação esquemática da concentração salina em função da velocidade do vento e da região de deslocamento. **Fonte:** Gustafsson e Franzén (1996).

Após a sua geração, o aerossol marinho é transportado em direção ao continente por fluxos advectivos que entram na costa. A quebra de ondas produz um fluxo de ar turbulento na vertical, grande responsável pelo aumento da concentração salina nessa região (Figura 2.2). Mas é o fluxo horizontal do ar, o principal responsável pelo transporte destas partículas (PETELSKI e CHOMKA, 1997). À medida que o aerossol se afasta do mar, ocorre uma diminuição da concentração salina em função da deposição das partículas maiores e mais pesadas (PETELSKI e CHOMKA, 1997; GUSTAFSSON e FRANZÉN, 1996).

A Figura 2.2 mostra esse comportamento, de modo que mesmo que a velocidade aumente em mar aberto, a concentração salina aumenta a uma baixa taxa. Porém, na zona costeira, onde há a quebra das ondas, é que a taxa de crescimento da concentração salina cresce de maneira mais acentuada com o vento. No continente, essa concentração salina diminui com o distanciamento ao mar.

2.3 PRINCIPAIS FATORES QUE INFLUENCIAM A GERAÇÃO, O TRANSPORTE E A ACUMULAÇÃO DE ÍONS CLORETOES NA SUPERFÍCIE DO CONCRETO

O processo de geração, transporte e acumulação de íons cloretoes em zonas de atmosfera marinha pode ser dividido basicamente em quatro etapas:

- i. Geração do aerossol marinho;
- ii. Transporte do aerossol na zona de atmosfera marinha;
- iii. Interação aerossol/estrutura (adesão e acumulação de íons cloretoes na superfície do concreto);
- iv. Transporte no interior do concreto, devido ao gradiente de concentração e/ou absorção capilar.

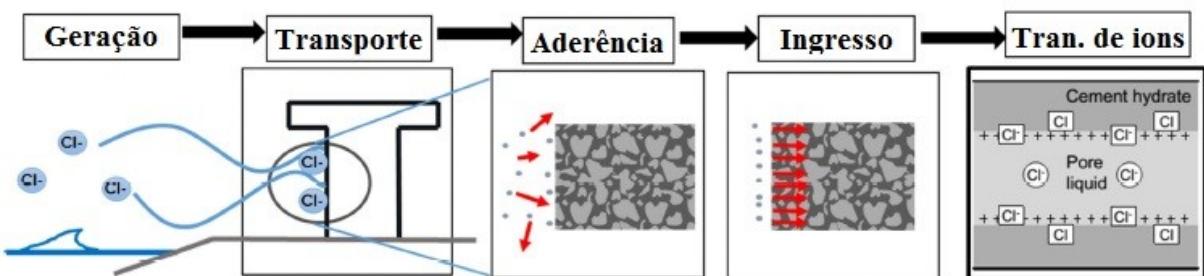


Figura 2.3 - Processo de ingresso de aerossol marinho em estrutura de concreto. **Fonte:** Wattanapornprom e Ishida (2017).

A Figura 2.3 exibe, de forma esquemática, a separação destes processos que influenciam no ingresso de cloretoes em estruturas de concreto armado. Como discutido anteriormente, a geração do aerossol marinho, o transporte na zona de atmosfera marinha e o transporte de íons cloretoes

no interior do concreto já foram bastante estudados. A dúvida paira sobre o processo de interação aerossol/estrutura, onde nem todos os cloretos depositados na superfície do concreto penetram para o seu interior (MEIRA *et al.*, 2007). As seções a seguir apresentam o mecanismo de transporte, as regras de acumulação e os fatores determinantes para que os íons cloretos penetrem no interior do concreto em zona da atmosfera marinha.

2.3.1 Fatores que influenciam a geração e o transporte de cloretos em zonas de atmosfera marinha

2.3.1.1 Velocidade e direção do vento

A ação do vento tem papel fundamental na formação do aerossol marinho, devido à agitação do mar e o choque constante entre ondas e/ou a costa (MEIRA *et al.*, 2008, COLE *et al.*, 2003a). Quando a velocidade do vento aumenta, o número de bolhas geradas aumenta, assim como a porcentagem de partículas maiores no espectro dos aerossóis (FITZGERALD, 1991).

Após a formação, a ascensão pelas correntes de ar e o equilíbrio químico com meio ambiente, as partículas, geralmente com tamanho entre 0,1 e 400 μm , são transportadas pelo vento marinho ao longo da costa (MORCILLO *et al.*, 1999). Durante o transporte, entra em ação o efeito gravitacional, que atua mais intensamente sobre partículas de maior tamanho, reduzindo a distância percorrida dessas partículas ([Figura 2.4](#)).

Portanto, a relação entre a gravidade e a velocidade do vento tem forte influência sobre o processo de transporte do aerossol marinho, fazendo com que as partículas percorram maiores ou menores distâncias (MEIRA *et al.*, 2008). Tendo em vista que as partículas maiores representam uma parcela significativa da concentração salina e percorrem menores percursos, isto resulta numa forte diminuição da concentração de sal marinho nas primeiras zonas terrestres (GUSTAFSSON e FRANZÉN, 1996; FITZGERALD, 1991).

A [Figura 2.4](#) exemplifica esta influência, pontuando que o aumento da velocidade do vento contribui para o aumento da concentração do sal marinho no aerossol transportado e a distância percorrida até a deposição (MEIRA, 2004; GUSTAFSSON e FRANZÉN, 1996). Apesar de não haver um consenso, alguns autores defendem que este efeito é ainda mais forte quando a velocidade do vento excede certo nível (MEIRA *et al.*, 2008; MORCILLO *et al.*, 2000; GUSTAFSSON e FRANZÉN, 1996). Valores acima de 3 m/s, já seriam suficientes para gerar o fenômeno transporte de partículas maiores, ocasionando uma maior concentração salina na atmosfera (MEIRA *et al.*, 2008; SWATEKITITHAM, 2004; MORCILLO *et al.*, 1999;

FITZGERALD, 1991). Já Piazzola e Despiau (1997) relatam 5m/s, Feliu *et al.* (1999) diz 10 m/s e Spiel e Leew (1996) afirmam algo entre 7 e 11m/s.

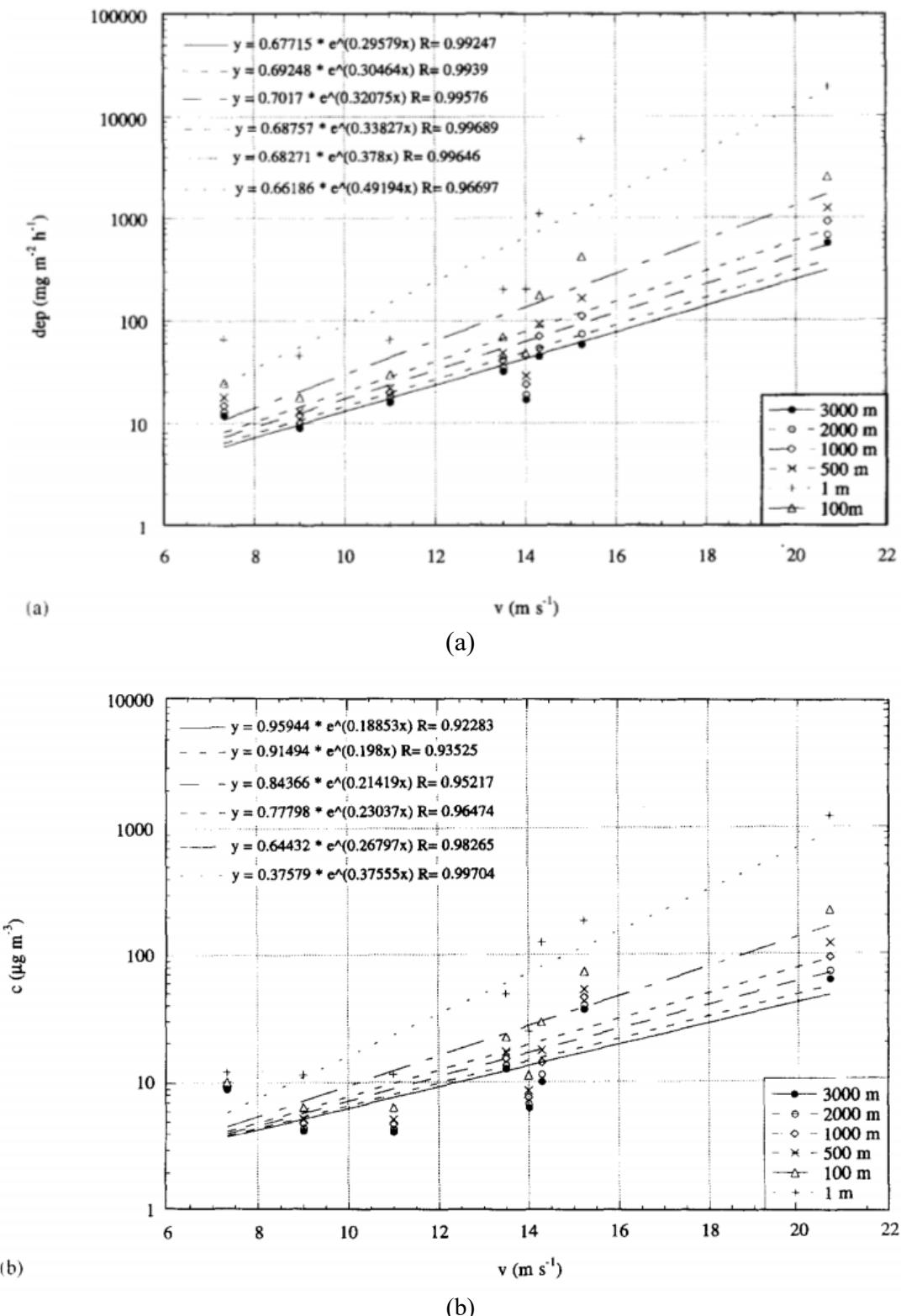


Figura 2.4 - Dependência da deposição (a) e concentração de cloretos (b) em relação à velocidade do vento depositado em vela úmida na costa da Suécia. **Fonte:** Gustafsson e Franzén (1996).

Tabela 2.1 - Tipos de função de ajustes usados na literatura para demonstrar a relação entre concentração superficial ou deposição de cloretos na atmosfera marinha e velocidade/direção do vento.

Fonte	Localização	Faixa observada	Relação	Equação de ajuste
Pham <i>et al.</i> (2019)	Mar da China Meridional (Vietnã)	0,50 – 8,50 m/s	Potencial	$a \times \cos(\theta_v) \times e^{b \times v}$
Castañeda <i>et al.</i> (2018)	Golfo do México (Cuba)	2,25 – 4,40 m/s	Exponencial	$a \times e^{b \times v}$
Yang <i>et al.</i> (2017)	Coleta de vários dados de pesquisa	1,00 – 5,00 m/s	Potencial	$a \times v^b$
Wattanapornprom e Ishida (2017)	Mar do Japão e Oc. Pacífico (Japão)	2,00 – 5,00 m/s	Exponencial	$a \times \cos(\theta_v) \times e^{b/v}$
Chen <i>et al.</i> (2013)	Mar da China (Taiwan)	-	Potencial	$a \times \cos(\theta_v) \times v^b$
Borba Jr (2011)	Oceano Atlântico (Brasil)	3,50 – 4,00 m/s	Exponencial	$a + b \times e^{c \times v_3}$
Akiyama <i>et al.</i> (2009)	Mar do Japão (Japão)	2,20 – 4,00 m/s	Potencial	$a \times r \times v^b$
Kokubo e Ono (2009)	Mar do Japão (Japão)	5,90 – 10,40 m/s	Exponencial	$\int_{h_i}^{h_f} a \times e^{b \times (h + c \times d/v)}$
Meira <i>et al.</i> (2008)	Oceano Atlântico (Brasil)	2,50 – 20,50 m/s	Biexponencial	$a \times e^{b \times e^{c \times d/v_3}}$
Swatekititham (2006)	Mar do Japão e Oc. Pacífico (Japão)	3,80 – 10,10 m/s	Potencial	$\frac{a \times r \times v^b}{\sqrt{d/\cos \theta_v} + c}$
Wai e Tanner (2004)	Mar da China Meridional (Hong Kong)	2,50 – 11,00 m/s	Exponencial	$a \times e^{b \times v}$
Gustafsson e Franzén (1996)	Mar do Norte (Suécia)	7,25 – 21,00 m/s	Exponencial	$a \times e^{b \times v}$

Onde: a , b e c são constantes de regressão; r é a taxa expressa a relação entre a direção e a velocidade do vento marítimo; v é a velocidade do vento; v_3 é a velocidade do vento acima de 3m/s; d é a distância do mar; h é a altura do solo; e θ_v é a inclinação do vento em relação a superfície estudada.

Partindo de tal premissa, observa-se que a velocidade do vento tem relação não linear com a concentração de cloretos depositados em uma área por determinado tempo. Esta influência é tipicamente representada por relações potenciais ou exponenciais entre a velocidade do vento e as concentrações de cloretos na atmosfera marinha, conforme sinaliza a Tabela 2.1. No entanto, alguns estudos demonstram haver certa dispersão na relação não linear entre a deposição de cloretos e a velocidade, quando está é relativamente baixa (MEIRA *et al.*, 2017a; WAI e TANNER, 2004).

Com o objetivo de determinar uma função de ajuste que represente a influência da velocidade e direção do vento na deposição ou na concentração superficial de cloretos foi montada a Tabela 2.1, considerando a base bibliográfica empregada na elaboração deste estudo. Ela faz um retrospecto de modelagens, que consideram a relação em corpos de prova ou estruturas reais submetidos à atmosfera marinha, tomando como referência os cenários nacional e internacional.

A partir dos trabalhos analisados, observa-se que a direção do vento tem caráter redutor na deposição de cloretos na superfície. A maioria dos estudos usa a função trigonométrica do cosseno como forma de ajuste (WATTANAPORNPROM e ISHIDA, 2016; CHEN *et al.*, 2013; AKIYAMA *et al.*, 2009; SWATEKITITHAM, 2004). Deve-se notar que se a direção do vento não for terral (do mar para a costa), o efeito será pequeno mesmo se a velocidade do vento for alta (CHEN *et al.*, 2013). Geralmente esse fator é negligenciado, já que há muitas incertezas no processo de deposição, uma forte dependência deste ajuste à velocidade do vento (AKIYAMA *et al.*, 2009) e uma histórica predominância da direção do vento do mar para a costa, ou seja, perpendicular às áreas de deposição de cloreto ($\cos(90^\circ) = 1$) (LIU *et al.*, 2018; YANG *et al.*, 2017).

2.3.1.2 Distância do mar

De modo geral, a deposição de cloretos reduz consideravelmente com a distância do mar. A [Figura 2.5](#) reúne resultados de pesquisas em alguns países, como Brasil (MEIRA *et al.*, 2006), Cuba (CORVO *et al.*, 1995), Espanha (MORCILLO *et al.*, 1999), França (MORCILLO *et al.*, 1999), Nigéria (AMBLER e BAIN, 1955) e Suécia (GUSTAFSSON e FRANZÉN, 1996).

Comparando os resultados apresentados na [Figura 2.5](#), depreende-se uma forte tendência decrescente nos primeiros 200 metros do mar. Neste ponto, grande parte das partículas maiores e mais concentradas já se depositou ou foi barrada por obstáculos físicos. Os resultados refletem uma variação entre 80% e 95% nos primeiros 500 m, induzindo a uma relação não linear entre a deposição e a distância do mar. De modo complementar, identifica-se na [Figura 2.4\(a\)](#) que com o aumento da velocidade do vento, estas partículas podem chegar um pouco mais longe.

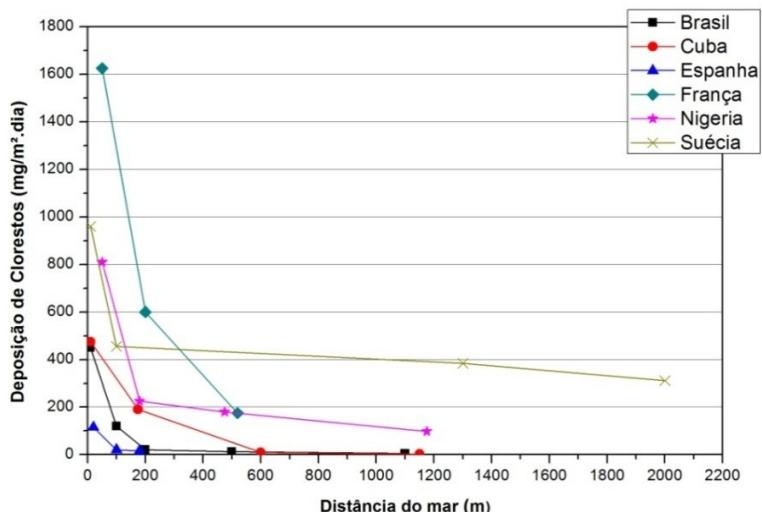


Figura 2.5 - Dados da literatura que relacionam a deposição de cloretos do aerossol marinho e a distância do mar.

Tabela 2.2 - Tipos de função de ajustes usados na literatura para demonstrar a relação entre concentração superficial ou deposição de cloretos na atmosfera marinha e a distância do mar.

Fonte	Localização	Faixa observada	Relação	Equação de ajuste
Castañeda <i>et al.</i> (2018)	Golfo do México (Cuba)	10 – 8000 m	Exponencial	$a \times e^{b \times dm}$
Yang <i>et al.</i> (2017)	Coleta de vários dados de pesquisa	5 – 1000 m	Exponencial	$a \times e^{b \times dm}$
Wattanapornprom e Ishida (2016)	Mar do Japão e Oc. Pacífico (Japão)	1,50 – 9700 m	Exponencial	$a \times e^{b \times dm}$
Chen <i>et al.</i> (2013)	Mar da China (Taiwan)	5 – 2600 m	Potencial	$a \times dm^b$
Borba Jr (2011)	Oceano Atlântico (Brasil)	10 – 520m	Exponencial	$a \times e^{b \times dm}$
Silva (2011)	Oceano Atlântico (Brasil)	100 – 4700m	Exponencial e logaritmo	$a \times e^{b \times \ln(dm) + c}$
Akiyama <i>et al.</i> (2009)	Mar do Japão (Japão)	100 – 500 m	Potencial	$a \times dm^b$
Kokubo e Ono (2009)	Mar do Japão (Japão)	20 – 60 m	Exponencial	$\int_{h_i}^{h_f} a \times e^{b \times (h + c \times dm/v)}$
Meira <i>et al.</i> (2008)	Oceano Atlântico (Brasil)	10 – 1100m	Biexponencial	$a \times e^{b \times e^{c \times dm/v}}$
Pontes (2006)	Oceano Atlântico (Brasil)	7 – 320m	Exponencial	$a \times e^{b \times dm}$
Swatekititham (2006)	Mar do Japão e Oc. Pacífico (Japão)	20 – 400m	Potencial	$\frac{a \times r \times v^b}{\sqrt{dm/\cos \theta + c}}$
Meira (2004)	Oceano Atlântico (Brasil)	10 – 1100m	Exponencial	$a \times e^{b \times dm}$
Feliu <i>et al.</i> (1999)	Golfo da Biscaia (Espanha)	400 – 600 m	Exponencial	$a \times e^{b \times dm}$
Gustafsson e Franzén (1996)	Mar do Norte (Suécia)	10 – 5000m	Exponencial	$a \times dm^{b \times v}$
PWRI (1985)	Mar do Japão e Oc. Pacífico (Japão)	5 – 3700 m	Potencial	$a \times dm^b$

Onde: a , b e c são constantes de regressão; v é a velocidade do vento; r é a taxa expressa da relação entre a direção e a velocidade do vento marítimo; dm é a distância do mar e h é a altura do solo.

Assim como reportado na influência da velocidade do vento, foi confeccionada a [Tabela 2.2](#). Ela leva em consideração a dependência da concentração superficial ou a deposição de cloretos em relação à distância do mar. Foi identificada uma diversidade de estudos que retratam tal relação. De modo a facilitar uma visualização geral do leitor, nove trabalhos que seguem a relação proposta por Meira (2004) foram suprimidos.

Analizando a [Tabela 2.2](#), percebe-se que as publicações propõem, na sua maioria, uma relação exponencial para representar o decréscimo da deposição de cloreto com a distância. Assim como na velocidade do vento, alguns autores inferiram certa dispersão ao redor da curva ajustada nas estações de monitoramento próximo ao mar, algo entre 10 e 100m do mar, apesar de estarem bem distribuídos em torno do valor médio, além de uma tendência a zero nas estações de

monitoramento a 500 e 1100m do mar, o que discordaram um pouco dos valores experimentais (YANG *et al.*, 2017; MEIRA *et al.*, 2006; COSTA e APPLETON, 1999b; MORCILLO *et al.*, 1999; GUSTAFSSON e FRANZÉN, 1996).

2.3.1.3 Distribuição vertical

Outro aspecto que influencia diretamente a concentração salina é a distribuição vertical do aerossol. Apesar de os estudos atestarem uma redução à medida que se aumenta a altitude, sendo mais acentuada nos primeiros metros próximos ao mar, de acordo com a [Figura 2.6 \(a\)](#), esse assunto ainda não foi amplamente estudado. Boa parte desses estudos analisou medidas de concentrações salinas em grandes alturas e regiões *offshore*, dando pouca ênfase a construções em áreas costeiras ([Figura 2.6 \(b\)](#)) (MEIRA *et al.*, 2017a).

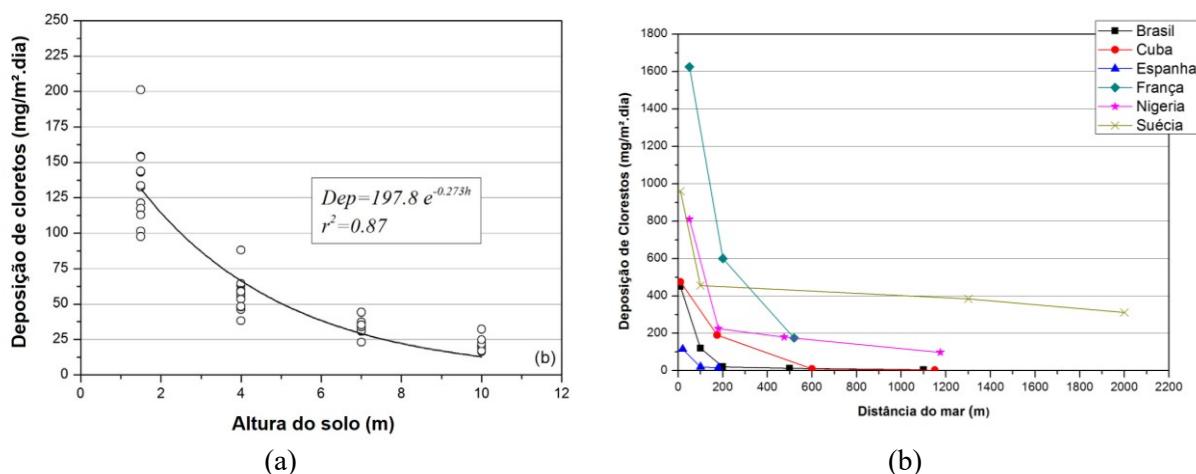


Figura 2.6 - Dados da literatura que mostram a influência da altura do solo na distribuição vertical da concentração salina: (a) deposição de cloretos para alturas até 10m e (b) concentração de cloretos para alturas acima de 70m em plataformas *offshore*. **Fonte:** Meira *et al.* (2017a).

A partir dos estudos analisados, concebe-se que a concentração de sal na zona da atmosfera marinha diminui fortemente com a altitude e esta relação segue uma tendência de decréscimo exponencial (MEIRA *et al.*, 2017a; CHEN *et al.*, 2012; KOKUBO e ONO, 2009). Esse comportamento se deve principalmente à predominância de partículas maiores de sal em regiões mais próximas do mar e ao efeito gravitacional, que influencia com mais intensidade as partículas mais pesadas. Como resultado, quando o aerossol marinho é transportado para o interior, essas partículas são transportadas verticalmente das camadas mais altas para as mais baixas, até serem removidas do aerossol marinho.

Com o objetivo de determinar uma função que represente a influência da altura na deposição ou na concentração superficial de cloretos, foi criada a [Tabela 2.3](#). Seguindo o mesmo modo de criação empregado na [Tabela 2.1](#), dela extraímos que a função de ajuste mais utilizada é a exponencial.

Tabela 2.3 – Tipos de função de ajustes usados na literatura para demonstrar a relação entre concentração superficial ou deposição de cloretos na atmosfera marinha e a distribuição vertical.

Fonte	Localização	Faixa observada	Relação	Equação de ajuste
Meira <i>et al.</i> (2017a)	Oceano Atlântico (Brasil)	1,50 – 10,0 m	Exponencial	$a \times e^{b \times h \times (\sum v_3 \times t_3 / t)}$
Chen <i>et al.</i> (2012)	Mar da China Oriental (Xangai)	1,00 – 6,00 m	Exponencial	$a \times e^{b \times (h - c)^2}$
Kokubo e Ono (2009)	Mar do Japão (Japão)	2,00 – 5,00 m	Exponencial	$\int_{h_i}^{h_f} a \times e^{b \times (h + c \times d / v)}$

Onde: a , b e c são constantes de regressão; v é a velocidade do vento; v_3 é a velocidade do vento acima de 3m/s no tempo t_3 ; e h é a altura do solo.

Outro fato observado é que dois dos estudos, aqui catalogados, levam em consideração o efeito acoplado da altura do solo e da velocidade do vento (Tabela 2.3). Segundo MEIRA *et al.* (2017a), esse modelo apresenta um comportamento mais preciso que o modelo que leva em consideração apenas a altura do solo, já que a velocidade do vento tem influência direta sobre o efeito gravimétrico.

2.3.1.4 Temperatura e umidade relativa

A velocidade do vento não é a única variável meteorológica que influencia a concentração superficial e a deposição de cloretos. A temperatura e a umidade relativa travam uma complexa relação entre as variáveis supracitadas, cuja influência é maior em locais próximos à costa e sem obstáculos (CASTAÑEDA *et al.*, 2018).

Durante a formação e ascensão do aerossol marinho pelas correntes de ar, as partículas de sal tendem a se equilibrar rapidamente com o meio ambiente, dependendo das condições climáticas (temperatura, umidade relativa e pressão atmosférica), as partículas de sal podem estar sob a forma de cristais de sal ou em solução salina (ZEZZA e MACRI, 1995; FITZGERALD, 1991). Um estudo realizado por Zezza e Macri (1995) revela que se a umidade relativa for superior a 70%, as partículas de aerossol são depositadas como solução salina e não como cristais. Já Cole *et al.* (2003b) ilustraram que a influência da RH na concentração de sal é particularmente importante dentro da faixa de 50 - 70% devido à umidificação do sal, já que a umidade aumenta o tamanho das partículas de sal, favorecendo a deposição nas primeiras faixas de terra.

Ainda são poucos os estudos que tentam uma relação entre as variáveis climatológicas e a deposição de cloretos. O único estudo encontrado foi o de Castañeda *et al.* (2018), no qual tenta-se encontrar uma relação linear entre a umidade relativa, temperatura, velocidade do vento e deposição de cloretos na cidade de Havana (Cuba). Os dados encontram-se na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Influência da umidade relativa, da temperatura e da velocidade do vento na deposição de cloretos na cidade de Havana (Cuba) através de regressão multivariada linear. **Fonte:** Castañeda *et al.* (2018).

Dist. de exposição (m)	r ² (%)	Regressão ($Dep = a + b \times RH + c \times T + d \times v$)				
		Medidor	a	b	c	d
20	91	1	828,86	27,73	410,72	88,55
	90	2	803,76	23,63	124,73	103,22
170	73	1	59,28	0,36	-2,93	-2,22
	73	2	60,67	0,36	-2,96	-2,40
600	63	1	0,41	0,28	-0,98	2,10
	66	2	0,56	0,22	-0,88	1,96
1365	75	1	207,40	1,45	-10,19	-1,30
	77	2	212,79	1,47	-9,09	-0,88
1772	85	1	21,01	0,12	-0,95	-1,02
	81	2	18,50	0,13	-0,90	-0,88
2365	76	1	20,64	0,20	-1,16	-1,30
	77	2	19,73	0,18	-1,09	-1,02
4911	75	1	9,84	0,13	-0,68	-0,30
	74	2	11,44	0,12	-0,69	-0,42

Onde: Dep é a deposição de cloretos em $mg/(m^2 \cdot dia)$; a , b , c e d são constantes de regressão; v é a velocidade do vento em m/s ; T é a temperatura em $^{\circ}C$; e RH é a umidade relativa.

Com base nas regressões e análise dos resultados, Castañeda *et al.* (2018) concluem que há uma complexa relação entre a temperatura, a umidade relativa e a deposição de cloretos. Então foi proposto que a deposição de cloretos na cidade de Havana ocorra mais provavelmente como gotas de solução salina e não como partículas cristalizadas, pois a temperatura se manteve perto dos $25^{\circ}C$. Porém, segundo os autores, a entrada de uma frente fria pode reverter o processo de formação do aerossol, facilitando a cristalização dos sais.

Deve-se ter cuidado ao aplicar este modelo a regiões com diferenças significativas nas condições ambientais, dada a especificidade do local e das relações físicas empregadas.

2.3.1.5 Efeito blindagem ou barreira

A presença de obstáculos, tais como edificações e vegetação alta, pode assumir uma importante parcela de contribuição na remoção salina quando o aerossol é transportado. Denominado efeito blindagem ou barreira (CASTAÑEDA *et al.*, 2018; LIU *et al.*, 2018), esta interferência na deposição de cloretos tem sido pouco estudada, devido à sua dificuldade de avaliação e subjetividade de definição. Ambientes com maior presença de obstáculos como, por exemplo, zonas urbanas têm identificado fortes quedas em curtas distâncias, pois parte das partículas em transporte deposita-se na superfície destes obstáculos, diminuindo, assim, a concentração do aerossol à medida que este adentra o continente (GARCIA, 2008; MEIRA, 2004).

A Figura 2.7 mostra a deposição de cloreto em vela úmida para medidas em mar aberto na Baía de Havana - Cuba (Figura 2.7(a)) e com obstáculos urbanos (Figura 2.7(b)). Verifica-se uma queda acentuada nas medidas de deposição mais próximas ao mar, cerca de 90%, motivada pela redução na velocidade do vento com a presença de edificações de pequeno porte (até três andares). Nas distâncias acima de 100 m, essa redução é consideravelmente atenuada.

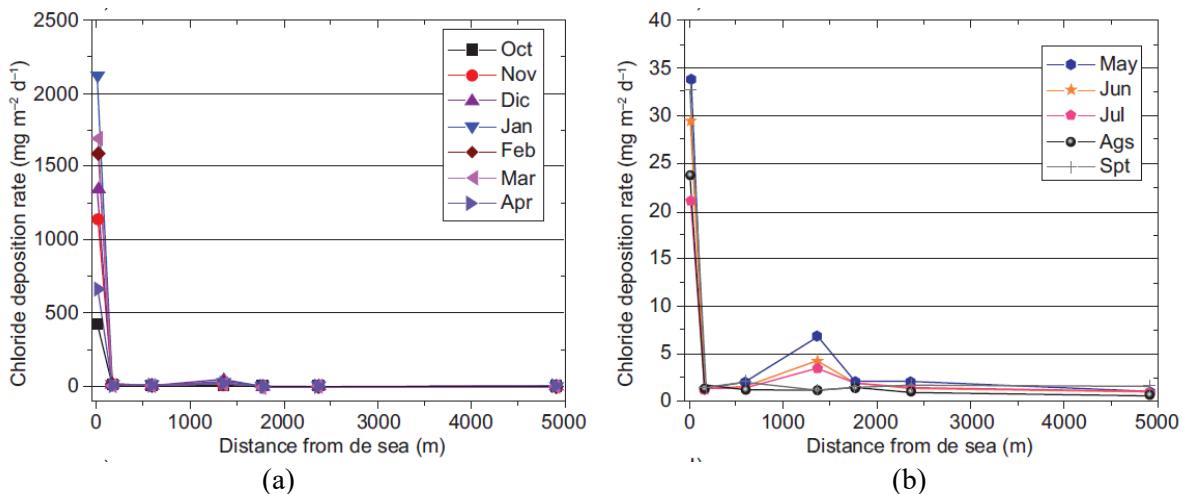


Figura 2.7 - Dados da literatura que mostram a influência dos obstáculos e da distância na deposição de cloreto: influência em mar aberto (a) e com obstáculos urbanos (b). **Fonte:** Castañeda *et al.* (2018).

Liu *et al.* (2018) em estudos realizados no sudoeste da China identificaram um decréscimo de 50% da concentração de cloreto depositado em estruturas de concreto na condição de bloqueio total, quando comparado com a condição de não bloqueado ou condição de parcialmente bloqueado. A variação do teor de deposição de cloreto entre a condição não bloqueado e condição parcialmente bloqueada não foi considerável.

A diferença entre os estudos aqui apresentado revela a dificuldade em avaliar a influência do efeito da blindagem no transporte de aerossol marinho, dada a falta de critério na avaliação do que seja totalmente bloqueado e parcialmente bloqueado. Tendo em vista tal complexidade, os modelos de previsão de geração de aerossol marinho propõem um fator de redução após a passagem pelo obstáculo, tal como retratado por Swatekititham (2004) na [Equação 2.1](#).

$$C'_{ar} = C_{ar} \times R(d) \quad \text{Equação 2.1}$$

Onde: C'_{ar} é a deposição de aerossol marinho após a passagem pelo obstáculo, em mg/m².h; C_{ar} é a deposição de aerossol marinho livre, em mg/m².h; e $R(d)$ é o fator de modificação devido ao obstáculo. $R(d)$ é um valor aproximado que analisa a redução na acumulação da deposição de cloreto com a distância, devido à presença de residências, prédios ou topografia natural. Se o obstáculo é construído a 100 metros do mar, o valor de $R(d)$ é 0,4 após a passagem pelo obstáculo (SWATEKITITHAM, 2004). $R(d)$ não é um valor fixo e varia de estudo para estudo.

2.3.2 Fatores que influenciam a acumulação de cloretos na superfície do concreto em zonas de atmosfera marinha

2.3.2.1 Tempo de exposição

Além das condições ambientais, a concentração de cloreto na superfície do concreto (C_s) também é afetada pelo tempo de exposição (YANG *et al.*, 2017; COSTA e APPLETON, 1999b), porque o processo de hidratação da pasta de cimento melhora a permeabilidade da camada superficial, refinando a rede porosa. Como resultado, a taxa de aumento da concentração aparente de cloreto na superfície diminui com o processo de hidratação e, consequentemente, com o tempo de exposição, como pode ser visto na [Figura 2.8](#) (PACK *et al.*, 2010; MAHESWARAM e SANJAYAN, 2004; COSTA e APPLETON, 1999b).

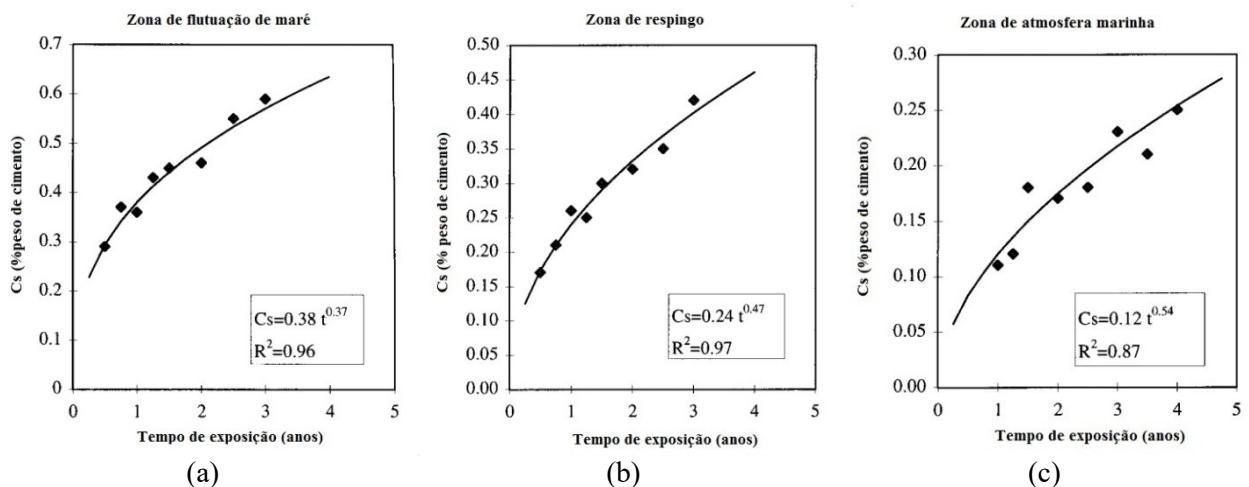


Figura 2.8 - Relação entre a concentração superficial (C_s) e o tempo de exposição, para concretos expostos em diferentes condições ambientais como: (a) zona de flutuação de maré, (b) zona de respingo e (c) zona de atmosfera marinha. **Fonte:** Costa e Appleton. (1999b).

A [Figura 2.8](#) ilustra a influência do tempo na concentração superficial de cloretos em corpos de prova (CPs) de concretos expostos a diferentes condições reais de exposição. A partir dela, observamos, gráfico a gráfico, um aumento na concentração superficial de cloretos com o tempo e a condição de exposição. Ambientes mais agressivos, como zona de flutuação de maré ([Figura 2.8 \(a\)](#)), tendem a apresentar uma taxa de crescimento maior da concentração superficial com o tempo do que as demais zonas. Já as zonas de atmosfera marinha ([Figura 2.8 \(c\)](#)), onde o aerossol é transportado através do ar, as concentrações superficiais são menores com o avanço do tempo.

De modo complementar, é apresentada a [Figura 2.9](#). Ela mostra mesmo comportamento em longo prazo, após simulação de condição real de exposição para uma ponte construída a 150m do Mar do Japão. Dela podemos perceber que a concentração de cloretos na superfície do concreto

aumenta rapidamente durante a fase inicial e diminui com o aumento do tempo de exposição, estabilizando após certo período de tempo, demonstrando haver um comportamento não linear com o tempo.

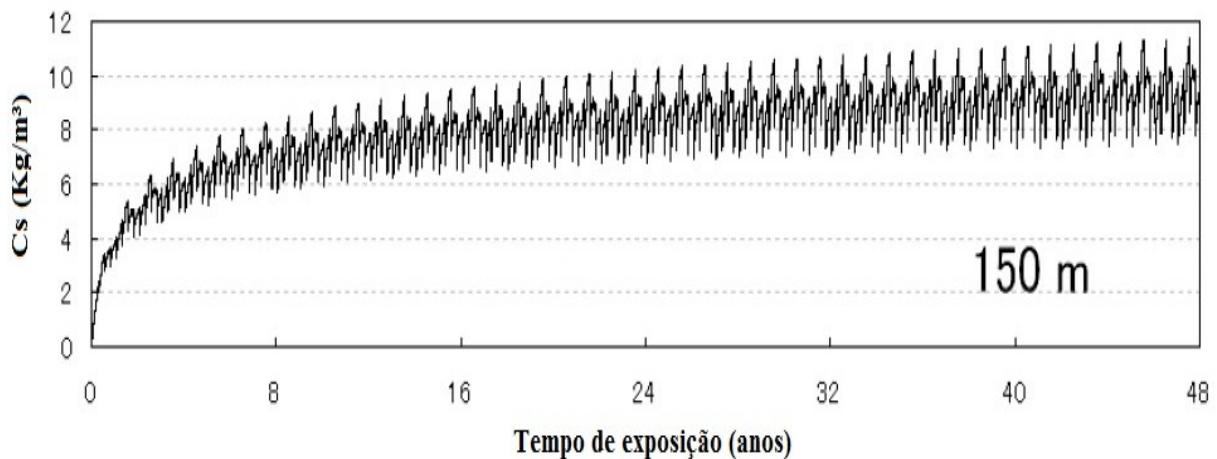


Figura 2.9 - Simulação da concentração superficial de cloretos (Cs) para uma ponte localizada a 150m do Mar do Japão. **Fonte:** Swatekititham *et al.* (2007).

Com o objetivo de determinar a melhor função de ajuste que represente a influência do tempo na acumulação de íons cloretos na superfície do concreto foi montada a [Tabela 2.5](#). Tomou-se como critério para escolha dos trabalhos, CPs ou estruturas expostas a condições reais de exposição, bem como modelos matemáticos com base científica de representação desse efeito.

A partir da [Tabela 2.5](#), verificamos que não há uma predominância no tipo de relação empregada para função de ajuste entre a concentração superficial de cloretos e o tempo de estudo. Porém, os estudos de longo prazo adotam geralmente a função exponencial como relação (YANG *et al.*, 2017; SWATEKITITHAM *et al.*, 2007; MAHESWARAN *et al.*, 2004; KASSIR *et al.*, 2002).

Tabela 2.5 – Tipos de função de ajustes usados na literatura para demonstrar a relação entre concentração superficial de cloretos em zonas de agressividade marinha e o tempo de exposição.

Fonte	Localização	Faixa observada	Zona aplicável	Relação	Equação de ajuste
Yang <i>et al.</i> (2018)	Coleta de vários dados de pesquisa	1 – 10 anos	Submersa	Exponencial	$a \times A_c \times R_{a/c} \times C_m \times (1 - e^{b \times t})$
Shakouri e Trejo (2017)	Coleta de vários dados de pesquisa e ensaios de laboratório	Não reportado	Todas	Sigmoidal	$\begin{cases} C_i & t \leq t_e \\ L([Cl^-], t) & t > t_e \end{cases}$ $L([Cl^-]) = \frac{a \times [Cl^-] + e^{-b \times t}}{1 + e^{-[x\theta + \sigma\varepsilon]}}$
Wang <i>et al.</i> (2017)	Coleta de vários dados de pesquisa	0 – 0,6 anos	Dados de laboratório	Linear	$a \times t + b$

(continua)

(continuação)

Fonte	Localização	Faixa observada	Zona aplicável	Relação	Equação de ajuste
Yang <i>et al.</i> (2017)	Coleta de vários dados de pesquisa	1 – 5 anos	Atmosfera marinha	Exponencial	$a \times (1 - e^{b \times t})$
Pang e Li (2016)	Mar do Japão e Mar Amarelo (China)	3 – 20 anos	Flutuação e respingo de maré	Potencial com inflexão	$\begin{cases} C_0 & t \geq t_0 \\ C_0 \times t^a & 0 \leq t < t_0 \end{cases}$
Zhou (2016)	Coleta de vários dados de pesquisa	0 – 3 anos	Flutuação e respingo de maré	Potencial	$a \times \sqrt{t} + b$
Petcherdchoo (2013)	Coleta de vários dados de pesquisa	2 – 5 anos	Flutuação de maré	Potencial	$a^{(b+R_{a/c}+c)} + d \times \sqrt{t}$
Pack <i>et al.</i> (2010)	Mar Amarelo (Coreia do Sul)	0,65 – 48,65 anos	Flutuação de maré	Logarítmica	$a \times \ln(b \times t + 1) + c$
Chalee <i>et al.</i> (2010)	Golfo da Tailândia (Tailândia)	2 – 5 anos	Flutuação de maré	Logarítmica	$(a \times R_{a/c} + b) + (c \times R_{a/c} + d) \ln(t)$
Phurkhao e Kassir (2005)	Coleta de vários dados de pesquisa	Não reportado	Aplicação de sais para desgelo	Polinomial	$\begin{cases} C_0 & t \geq t_0 \\ C_0 \times t/t_0 & 0 \leq t < t_0 \end{cases}$
Maheswaran <i>et al.</i> (2004)	Modelo matemático comparativo	0 – 100 anos	Todas	Exponencial	$a \times (1 - e^{b(t-c)})$
Kassir <i>et al.</i> (2002)	Oceano Atlântico Norte (EUA)	2 – 16 anos	Respingo e atmosfera	Exponencial	$a \times (1 - e^{b \times t})$
DuraCrete (2000)	Coleta de vários dados de pesquisa	0 – 15 anos	Todas	Constante	$A_c \times R_{a/c}$
Costa e Appleton (1999b)	Oceano Atlântico Norte (Portugal)	0,5 – 5,5 anos	Todas	Potencial	$a \times t^b$
Collins e Grace (1997)	Oceano Pacífico Sul (Austrália)	0 – 7 anos	Flutuação e respingo de maré	Polinomial	$t/(t + a)$
Uji <i>et al.</i> (1990)	Oceano Atlântico Norte (Reino Unido)	Não reportado	Todas	Potencial	$a \times \sqrt{t}$

Onde: a , b , c e d são constantes de regressão; A_c é uma constante dependente do cimento; $R_{a/c}$ é a relação agua/cimento; e t é o tempo de exposição.

Os modelos apresentados na [Tabela 2.5](#) podem ser categorizados em três grandes grupos: modelos que C_s cresce indefinidamente com o tempo; modelos que C_s estabiliza com o tempo; e modelos com limite superior de C_s a partir de certo tempo. As funções matemáticas que descrevem o modelo, em relação ao tempo, podem ser lineares e não lineares. Vale ressaltar que independentemente da função matemática (linear ou não linear) que descreva o modelo, a concentração superficial não pode tender ao infinito num determinado tempo, já que C_s atinge o equilíbrio com o meio de exposição e o acúmulo deve estabilizar.

2.3.2.2 *Rugosidade da superfície*

Muitos esforços foram dedicados em estudos paramétricos para determinação da quantidade de cloretos suficiente para iniciar a corrosão (ANGST *et al.*, 2011). A literatura consegue explicar com certa dificuldade o comportamento de concretos submetidos à zona de atmosfera marinha, avaliando a influência da temperatura, da umidade relativa, da quantidade de transporte de cloretos pelo ar, do nível de deterioração inicial, etc.

Pouco se sabe, porém, sobre a influência da rugosidade da superfície do concreto e da ação da chuva sobre a concentração superficial de cloretos (WATTANAPORN PROM e ISHIDA, 2017; SWATEKITITHAM *et al.*, 2007). Apesar de poucos estudos, eles sinalizam que esses fatores são determinantes para o tempo de vida útil da estrutura e para a definição das condições de contorno em modelos que buscam prever o comportamento de estruturas de concreto armado (SWATEKITITHAM, 2004).

Para esmiuçar a influência da rugosidade na acumulação de cloretos na superfície, Swatekititham (2004) definiu três condições de face externa (lisa, normal e rugosa), conforme mostra a [Figura 2.10](#). Já EL-Desouky e Tsubaki (2012) definiram duas condições (normal e rugosa). Os critérios para determinação das condições de aspereza não foram reportados. Porém, serviram de base para formulação da metodologia de estudo.

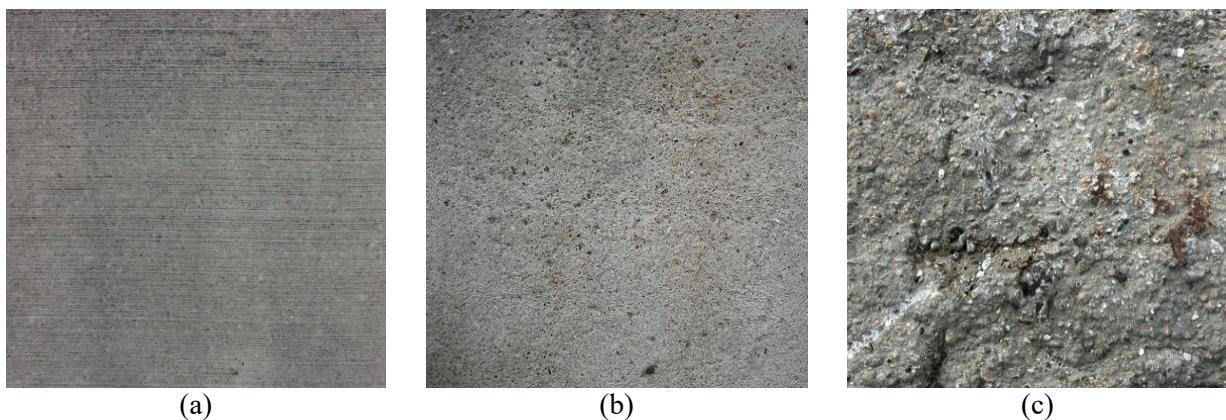


Figura 2.10 - Diferentes condições de rugosidade da superfície de concreto: lisa (a), normal (b) e rugosa (c). **Fonte:** Swatekititham (2004).

Com base nas condições de rugosidade, foi determinado o perfil de cloretos totais, tomando como amostra uma ponte localizada a 30 m do Mar do Japão ([Figura 2.11](#)). O critério para a profundidade de análise foi até onde se encontra o agregado graúdo. Portanto, as superfícies ásperas e lisas têm a camada limite de cerca de 1,00 e 0,08mm, respectivamente, para esta estrutura em específico.

A partir dos perfis de cloretos, observam-se diferenças nas concentrações de cloretos em cada condição de rugosidade, sob as mesmas condições de exposição real. As superfícies normais

(Figura 2.11 (a)) apresentaram maior concentração de cloretos totais do que as superfícies rugosas (Figura 2.11 (b)), em virtude da maior quantidade de pasta. Outro ponto a ser observado, é a grande variabilidade das concentrações de cloretos com os dias de medição, demonstrando a forte interferência das condições climáticas, principalmente a chuva e a velocidade do vento, nos resultados.

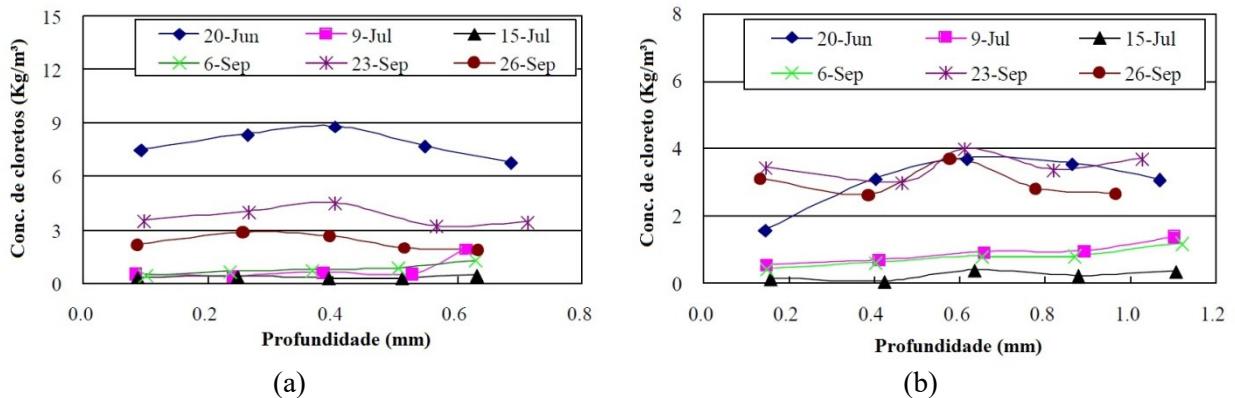


Figura 2.11 - Resultados experimentais que demonstram a influência da rugosidade na concentração de cloretos diferentes das condições de rugosidade: normal (a) e rugosa (b) a 30m do mar. **Fonte:** Swatekititham (2004).

Por fim, o trabalho de Swatekititham (2004) conclui que a superfície do concreto aumenta a aspereza com o passar do tempo. As concentrações de cloretos na superfície variam com a rugosidade e esse efeito atua em conjunto com a chuva, provocando uma maior remoção da quantidade de cloretos com a aspereza da superfície devido à maior área superficial específica.

2.3.2.3 Efeito lavagem

Como visto anteriormente, a concentração de cloretos na superfície do concreto é fortemente influenciada pelas condições climáticas. Estudos revelam que a precipitação e/ou neve derretida podem remover ou diluir a concentração de cloreto na superfície do concreto (MEIRA *et al.*, 2017a; WATTANAPORNPROM e ISHIDA, 2017; EL-DESOUKY e TSUBAKI, 2012; SWATEKITITHAM *et al.*, 2007; COLE *et al.*, 2003b). O efeito lavagem é considerado o maior efeito na remoção de cloretos da superfície do concreto, sendo que a chuva é o principal fator que reduz essa concentração na área de atuação (SWATEKITITHAM, 2004).

Com o objetivo de ressaltar a influência desse efeito na concentração superficial de cloretos, a Figura 2.12 é apresentada. Ela indica a concentração superficial de cloretos totais na ponte de *Ananai Bridge*, localizada a 150 metros no Mar do Japão em Kochi/JPN. A partir dos resultados de titulação, verifica-se que a concentração superficial de cloretos totais é menor nas regiões onde há a incidência da chuva. À medida que sua ação é minimizada pelos obstáculos, as concentrações de cloretos na superfície aumentam gradativamente. Também se observa que não

há diferenças significativas entre as concentrações superficiais na parte nova (construída há 37 anos) e na parte velha (construída há 52 anos), podendo haver uma estabilização das concentrações com o decorrer do tempo, nas áreas sem atuação da chuva.

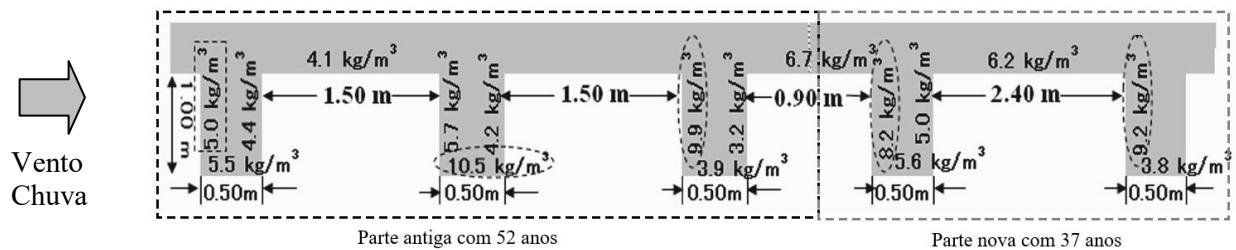


Figura 2.12 - Concentração de cloretos em diferentes pontos da ponte. **Fonte:** Swatekititham *et al.* (2006).

Dentre os fatores que mais influenciam o efeito de remoção superficial de cloretos, podemos elencar:

- i. **Precipitação:** nem toda precipitação reduz a concentração de cloretos na superfície. Estudo prova que apenas chuvas acima de 5mm/h têm capacidade de zerar a concentração superficial no momento da precipitação. Porém, chuvas acima de 1mm/h já têm ação de redução desta concentração (WATTANAPORN PROM e ISHIDA, 2016);
- ii. **Rugosidade da superfície:** superfícies mais ásperas apresentam maior área específica e coeficiente de atrito. Portanto, revelam maiores reduções nas concentrações superficiais devido à maior superfície exposta e à fricção (EL-DESOUKY e TSUBAKI, 2012; SWATEKITITHAM *et al.*, 2007);
- iii. **Estado da superfície:** superfícies mais secas tendem a apresentar maiores reduções nas concentrações com a lavagem do que superfícies molhadas, em virtude da fricção provocada pelo fluxo de água escorrendo na superfície (EL-DESOUKY e TSUBAKI, 2012);
- iv. **Confinamento:** faces não expostas à ação da chuva ou ao derretimento da neve, não podem ser “lavadas”. Portanto não sofrem efeito lavagem (SWATEKITITHAM, 2004).

Considerando a redução nas concentrações superficiais devido ao efeito de lavagem, estudos relatam que os íons cloretos depositados na superfície do concreto são removidos principalmente nos primeiros minutos da precipitação, mais pela ação mecânica do impacto da chuva do que pelo fluxo de água na superfície (EL-DESOUKY e TSUBAKI, 2012).

Como consequência dessa lavagem, além da redução na concentração superficial, podemos ter um processo de difusão de cloreto de dentro do concreto para a superfície; um aumento do grau

de saturação da superfície, potencializando esta difusão; uma redução na temperatura e aumento na umidade relativa local (WATTANAPORNPROM e ISHIDA, 2016; SWATEKITITHAM *et al.*, 2007).

Tendo em mente os modelos já publicados na literatura, temos o descrito por Swatekititham (2004) e o por Wattanapornprom e Ishida (2017), ambos trabalhos japoneses. O primeiro trabalho mostra um modelo empírico que retira valores constantes na concentração superficial, tendo em vista a rugosidade e a intensidade de chuva em duas condições: fraca (< 2 mm/h) e forte (≥ 2 mm/h).

Já o segundo trabalho apresenta um modelo mais complexo que mensura a intensidade da chuva, o grau de saturação da superfície e o balanço de massa na área. Este estudo também propõe que nem toda precipitação (chuvas menores que 1 mm/h) altera a concentração superficial de cloretos. Chuvas entre 1 mm/h e 5 mm/h reduzem parte da concentração, dependendo das condições de saturação da superfície. Por fim, as chuvas maiores que 5 mm/h reduzem a zero a concentração superficial no momento da incidência. Os valores-limites (1 mm/h e 5 mm/h) foram obtidos através de ensaios em laboratório em CPs de concretos com superfície retificada. Este trabalho é um modelo matemático, baseado em princípios físicos, mas que não examinou a rugosidade da superfície e o impacto da chuva dirigida.

2.4 CARACTERIZAÇÃO DA AGRESSIVIDADE EM ZONAS DE ATMOSFERA MARINHA

Pesquisadores têm dedicado esforços em estudos na área de corrosão de armadura iniciada por ação de cloretos desde a década de 50. Boa parte destes estudos tem enfoque em ensaios de laboratório, que simulam ambientes reais sobre certas condições (ANGST *et al.*, 2011). Pesquisas que avaliam o comportamento de estruturas de concreto em zonas de atmosfera marinha são escassas e apenas algumas delas consideram os diferentes níveis de agressividade de cada região (MEIRA *et al.*, 2010).

Zonas de atmosfera marinha são caracterizadas por explicitar diferentes graus de agressividade (MEIRA, 2004). Considerando que os íons cloretos presentes na atmosfera estão disponíveis para se depositar na superfície do concreto e penetrar no concreto, estudos que propõem mapear a agressividade de determinado local podem ser bastante úteis para profissionais que buscam determinar parâmetros de projeto e especificações de execução (PONTES, 2006; CASCUDO, 1997).

Portanto, o conhecimento dos níveis de concentração de íons de cloreto em determinado ambiente permitirá o desenvolvimento de projetos de estruturas de concreto armado mais eficientes e de menor custo, tratando de forma preventiva o surgimento de corrosão das armaduras e, consequentemente, aumentando a vida útil dessas estruturas de concreto.

Partindo de tal premissa e baseado em casos de deterioração repentina de estruturas recém-construídas, as normas começaram a se preocupar com o ambiente em que cada tipo de estrutura estaria inserida, de modo a conservar sua segurança e estabilidade durante o período correspondente à sua vida útil. A norma NBR6118 (2014), no capítulo seis, item 6.1, determina que no projeto seja avaliado o ambiente em que a estrutura será construída.

Sendo assim, vários pesquisadores tentaram relacionar determinado ambiente com as classes de agressividade da norma NBR6118 (2014), como mostram as tabelas [Tabela 2.6](#) e [Tabela 2.7](#). Focando na área de nosso estudo, a [Tabela 2.8](#) tenta correlacionar a deposição de cloretos com o grau de agressividade da zona de atmosfera marinha.

Tabela 2.6 – Relação entre a classe de agressividade e a concentração de cloretos no aerossol marinho.
Fonte: Helene (1995).

Classe de agressividade	Macroclima	Microclima (%)	Concentração de cloretos (mg/L)
I	Rural	UR < 60%	< 200
II	Urbana	60% < UR < 95%	< 500
III	Marinha ou industrial	65% < UR < 98%	> 500
IV	Polos Industriais	Interior úmido confinado	> 500

Tabela 2.7 – Relação entre a faixa de agressividade e a concentração de cloretos no aerossol marinho.
Fonte: Adaptada de Vilas-Boas (2013) com dados da NBR 6118 (2014) e 14643 (2014).

Classe de agressividade	Faixa de agressividade	Macroclima	Deposição média de cloretos (mg/m ² .dia)
I	Insignificante	Rural	DCI < 3
	Fraca	Rural ou submersa	3 < DCI < 60
II	Moderada	Urbana	60 < DCI < 300
III	Forte	Marinha ou industrial	300 < DCI < 1500
IV	Muito forte	Industrial ou respingo de maré	DCI > 1500

Tabela 2.8 – Relação entre a faixa de agressividade e a concentração de cloretos no aerossol marinho.
Fonte: adaptado de Meira (2004).

Faixa de agressividade	Macroclima	Deposição média de cloretos (mg/m ² .dia)	Distância do mar (m)
Mínima	Rural	< 10	Até 100
Moderada	Urbana	10 < DCI < 100	Entre 100 e 750
Elevada	Marinha ou industrial	> 100	Acima de 750

O uso de indicadores ambientais, como medida de deposição de cloretos, pode ser útil na análise do tempo de serviço de uma estrutura em zona de atmosfera marinha, sem a necessidade de grandes esforços na avaliação de outras variáveis. Isso possibilita ao profissional uma técnica de

fácil operação e caracterização da agressividade do ambiente no qual a estrutura será ou está inserida (MEIRA *et al.*, 2010).

2.4.1 Ensaios de caracterização à agressividade de atmosfera marinha

Há vários tipos de ensaios que caracterizam a agressividade de zonas de atmosfera marinha. Os principais estão descritos a seguir. Outros ensaios como coletores em cascata ou sistemas de bombeamento não estão descritos neste trabalho, porém, seguem a mesma lógica de funcionamento da vela úmida ou coletor de ar.

2.4.1.1 Exposição de CPs de concreto em condições em situações reais

A exposição de corpos de prova (CPs) de concreto é a opção de ensaio mais fidedigna ao comportamento da estrutura em condições reais. Porém, é o ensaio mais demorado, visto que demanda tempo para alcançar resultados significativos. O ensaio consiste na exposição de CPs de concreto em ambientes com agressividade similar à qual a estrutura real estará submetida.



Figura 2.13 - Modelo de dispositivo de exposição de espécimes de concreto armado em ambiente com atmosfera marinha. **Fonte:** Borba Jr (2011).

A maioria dos estudos dispôs a face dos CPs para a direção de maior agressividade, geralmente perpendicular à maior incidência da direção do vento e/ou paralelo ao mar (VITALI, 2013; VILAS-BOAS, 2013; BORBA JR, 2011; MEIRA *et al.*, 2010; entre outros).

A [Figura 2.13](#) ilustra um exemplo de disposição dos CPs. de tempos em tempos, são colhidas amostras para titulação e determinação das concentrações de cloretos em cada profundidade (perfis de cloretos). A maioria dos estudos começou a coleta com 6 meses (VITALI, 2013; BORBA JR, 2011; MEIRA *et al.*, 2010). Porém, foi apenas com 46 meses que se conseguiu uma boa representatividade dos resultados em longo prazo (MEIRA *et al.*, 2010).

2.4.1.2 Vela úmida

O princípio do ensaio é simples. Consiste apenas na captura de íons cloretos suspensos no ar por um aparato denominado de vela úmida. A norma NBR 6211 (ABNT, 2001) define os procedimentos para a realização deste ensaio. A norma brasileira foi fundamentada com base na norma americana ASTM D512 – 89 (ASTM, 1989). Esta foi atualizada em 2014 (ASTM G140 – 02, 2014).

Esse tipo de ensaio é amplamente utilizado no mundo devido à sua praticidade e baixo custo de implementação (Meira *et al.*, 2010). Após determinado tempo de exposição, a água contida num frasco é analisada e obtém-se a concentração de cloretos no recipiente. A [Figura 2.14](#) mostra um exemplo de dispositivo usado para esse tipo de ensaio.



Figura 2.14 - Modelo de dispositivo de vela úmida. **Fonte:** Meira *et al.* (2010).

Durante a execução do ensaio, alguns fatores devem ser observados, tais como: o tempo de exposição da vela úmida ao ambiente e o período do ano em que o ensaio é realizado, já que variações importantes podem ser observadas nos resultados de deposição média de cloretos (MEIRA, 2004).

A [Figura 2.15 \(a\)](#) ilustra a influência do tempo de exposição da vela úmida ao ambiente. Os dados indicam uma grande dispersão nos resultados com menor tempo de exposição, dada a flutuação na velocidade do vento no curto tempo. Esta flutuação é amenizada com resultados aferidos após certo tempo de ensaio. De modo a minimizar esta problemática, a normalização recomenda um período de exposição superior a 30 dias (ASTM G140 – 02, 2014).

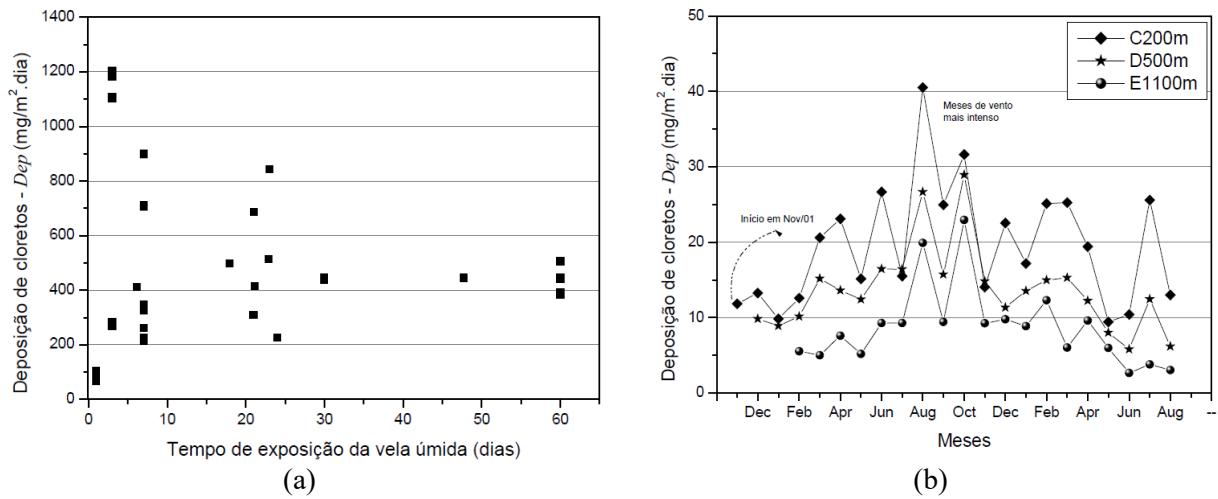


Figura 2.15 – Influência do tempo de exposição da vela úmida ao ambiente de estudo (a) e do período do ano em que acontece o ensaio de vela úmida (b). **Fonte:** Meira (2004).

Outro fator que afeta a aferição da deposição média de cloretos é o período do ano em que o ensaio esta sendo realizado. Observe a [Figura 2.15 \(b\)](#), onde os meses com maior incidência de ventos apresentam maiores taxas de médias de deposição, o que pode levar a resultados mais elevados se comparados a outros meses do ano.

Outro aspecto a ser comentado é a sazonalidade (tendência de aumentar e reduzir) das medidas de deposição ao longo dos meses, o que tende a se repetir ano após ano, independentemente da distância da estrutura em relação ao mar, indicando que o ensaio da vela úmida reproduz bem o comportamento da névoa, independentemente da distância (MEIRA, 2004). Para simular a variação sazonal da deposição de cloretos, adaptaremos uma função senoidal variando no tempo. Para ilustrar, veja a [Equação 2.2](#):

$$DCl_{ext} = \frac{DCl_{max} + DCl_{min}}{2} + \frac{DCl_{max} - DCl_{min}}{2} \sin \left(2\pi \frac{(t - DDCl_{max})}{365} + \frac{\pi}{2} \right) \quad \text{Equação 2.2}$$

Onde DCl_{ext} é a deposição de cloretos no instante t , $\text{mg/m}^2\text{.dia}$; DCl_{max} é a deposição de cloretos máxima no ano, $\text{mg/m}^2\text{.dia}$; DCl_{min} é a deposição de cloretos mínima no ano, $\text{mg/m}^2\text{.dia}$; $DDCl_{max}$ é o dia em que acontece a deposição de cloretos máxima no ano, dias; t é tempo, dias.

A [Figura 2.16](#) e a [Tabela 2.9](#) mostram os ajustes com base na [Equação 2.2](#) aos dados de deposição média de cloretos na cidade de João Pessoa/PB, coletados pelo trabalho de Meira (2004) entre jan./2002 e ago./2003, após a realização do ensaio de vela úmida. As velas úmidas estavam dispostas a 10, 100, 200 e 500 m do mar.

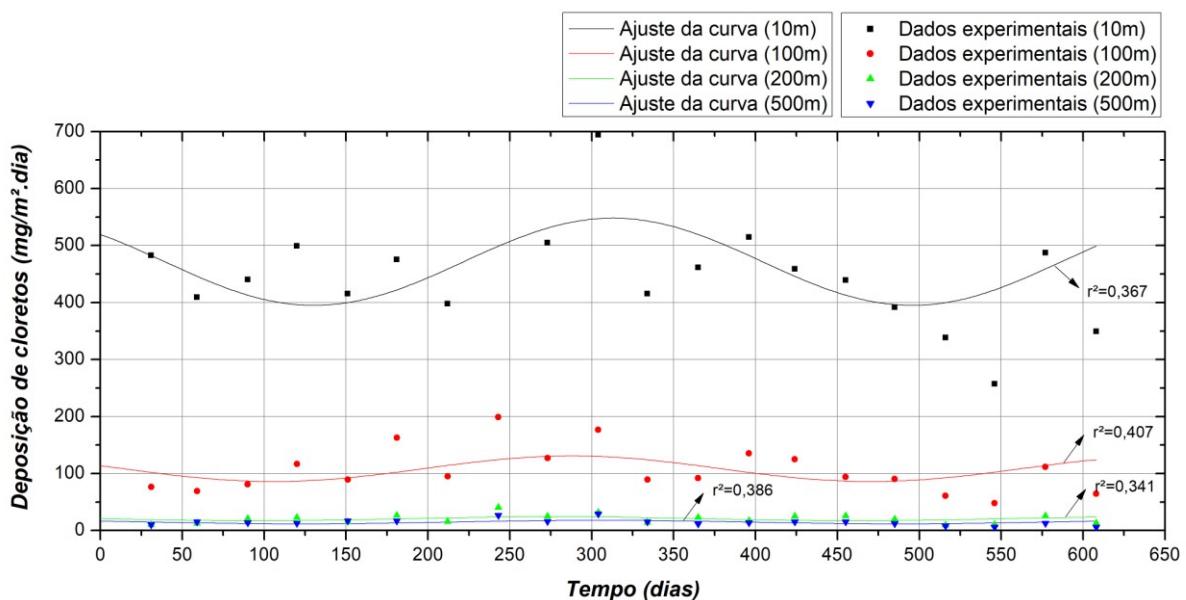


Figura 2.16 – Efeito sazonal da deposição de cloretos em João Pessoa/PB a 10, 100, 200, 500m do mar, de jan./02 a ago./03. **Fonte:** Meira (2004).

Tabela 2.9 – Parâmetros de ajuste à [Equação 2.2](#) para previsibilidade da deposição de cloretos na cidade de João Pessoa/PB.

Parâmetros de ajuste	Distância do mar			
	10 m	100 m	200 m	500 m
DCl_{max} (mg/m ² .dia)	548,16	130,8	23,96	17,8
DCl_{min} (mg/m ² .dia)	395,21	56	17,15	11,64
$DDCl_{max}$ (dia do ano)	313	288	277	305
r^2	0,367	0,407	0,341	0,386

Os resultados sinalizam uma forte redução na deposição média de cloretos a partir dos 200 primeiros metros. O comportamento da deposição de cloretos, ao longo do tempo, apresentou uma boa flutuação nos períodos dos meses com maior incidência de vento (junho a outubro). Apesar de uma boa dispersão nos dados, a curva convergiu para um ajuste aceitável dentro de certos critérios, mesmo se tratando de uma variável influenciada por parâmetros climatológicos. Dessa forma, as análises aqui realizadas devem ser interpretadas dentro das limitações e condições assumidas nos ajustes.

2.4.1.3 Tanque coletor de ar

Este método foi desenvolvido pelo *Public Works Research Institute of Japan (PWRI)* e consiste na deposição de cloretos por difusão entre o ar e água. Todas as partes do tanque são feitas de aço inoxidável. As partículas de aerossol marinho são capturadas através de uma área de 10x10cm² e direcionadas por um tubo até um tanque plástico contendo água deionizada. A água no recipiente é analisada e, assim, obtida a taxa de deposição no local. A [Figura 2.17](#) mostra o modelo de dispositivo usado para esse tipo de ensaio.



Figura 2.17 - Modelo de dispositivo de tanque coleto de ar. **Fonte:** Wattanapornprom e Ishida (2016).

2.4.2 Estudos de deposição de cloretos no Brasil

O primeiro trabalho que se tem notícia sobre a deposição de cloretos no Brasil foi publicado por Romero *et al.* (1991), estudando o comportamento de aço-carbono e correlacionando-o com dados de deposição de cloretos na região costeira de Fortaleza/CE no fim da década de 80. Já em relação à estrutura de concreto armado, os primeiros trabalhos publicados foram no Congresso Brasileiro de Concreto (CBC) por Meira e Padaratz (2002) e Albuquerque e Otoch (2005), com medições de deposição em zona costeira de João Pessoa/PB no início dos anos 2000 e em Fortaleza/CE no início da década de 90, respectivamente.

Nas últimas décadas, vários estudos surgiram com o objetivo de caracterizar a atmosfera marinha. Boa parte deles mediu o teor de íons cloretos no ar atmosférico em região costeira do Brasil. Dessa feita, apresentamos os estudos contidos na [Tabela 2.10](#). Também foram investigados outros estudos de deposição de cloretos em cidade do Brasil, como Aracaju/SE (PRATA, 2017), Fortaleza/CE (PORTELA 2013; ALBURQUERQUE E OTOCH, 2005), Florianópolis/SC (GARCIA, 2008), Maceió/AL (ALVES, 2007), Salvador/BA (VILAS-BOAS, 2013; COSTA, 2001) e São Luís/MA (SICA, 2006). A grande parte dos estudos nessa área é da Região Nordeste do país.

De forma geral, os dados mostram uma alta deposição de cloretos nos primeiros metros, seguida por uma forte redução dessa concentração com a distância do mar, a partir dos 100-200m. Entre as regiões, constata-se certa padronização a distância do mar, apesar de os dados terem alta dispersão, o que é intrínseco dos parâmetros ambientais. Estas médias podem fornecer uma boa ideia de como esses valores podem ser diferentes de acordo com as condições climáticas.

Tabela 2.10 – Valores médios de deposição de cloreto encontrados em alguns dos estudos realizados no país.

São Fran. do Sul/SC Vitali (2013)		Fortaleza/CE Silva (2011)		João Pessoa/PB Meira <i>et al.</i> (2006)		Recife/PE Pontes (2006)		Vitória/ES Borba Jr (2011)	
Dist. do mar (m)	Dep Cl- (mg/m ² d)	Dist. do mar (m)	Dep Cl- (mg/m ² d)	Dist. do mar (m)	Dep Cl- (mg/m ² d)	Dist. do mar (m)	Dep Cl- (mg/m ² d)	Dist. do mar (m)	Dep Cl- (mg/m ² d)
50	590,77	100	484,35	10	480,30	7	554,40	10	502,08
100	63,52	300	208,08	100	117,65	100	393,00	65	62,16
200	34,11	740	151,16	200	19,10	160	145,10	120	116,65
400	20,14	7400	112,93	500	13,80	230	40,80	240	32,60
650	16,22	4700	0,00	1100	2,30	320	44,10	520	9,40
1100	9,56	-	-	-	-	-	-	-	-

Não há como correlacionar com segurança os dados de deposição entre as regiões brasileiras, haja vista que poucos estudos foram realizados no Sul e Sudeste do país. Com os estudos aqui apontados, percebe-se que o Sudeste segue a mesma faixa de deposição do Nordeste, próximo de 500mg/m².dia. Já em relação ao Sul, a deposição é um pouco maior do que a do Nordeste, provavelmente motivada pelo aumento da velocidade do vento nessa região.

3 PENETRAÇÃO DE CLORETO NO INTERIOR DO CONCRETO

Uma vez que o aerossol marinho foi gerado, transportado pela atmosfera e aderiu à superfície do concreto, inicia-se a fase de transporte no interior do concreto ([Figura 2.3](#)), alvo principal de estudo deste capítulo. O transporte de cloretos no interior do concreto pode ocorrer de diversas maneiras e depende de uma série de variáveis (CASCUDO, 1997). Neste capítulo veremos os principais mecanismos naturais de transporte, com enfoque principal sobre a difusão iônica e a convecção, a evolução dos modelos de previsão de ingresso de cloretos e uma breve discussão sobre a influência de certas variáveis sobre o processo de transporte.

3.1 MECANISMOS NATURAIS DE TRANSPORTE DE CLORETO

O ingresso de agentes agressivos no interior do concreto se dá através de sua rede porosa. Esses agentes podem ser gases (por exemplo, oxigênio e gás carbônico) e/ou por substâncias líquidas (por exemplo, íons dissolvidos na água). O fenômeno que leva à degradação do concreto armado depende do processo de transporte, que permite ou não a entrada de água, dióxido de carbono, íons cloretos, oxigênio, íons sulfatos, etc. (BERTOLINI *et al.*, 2004). No caso deste trabalho, a degradação do concreto por corrosão de armaduras em atmosfera marinha, ocorre por íons cloretos.

Os principais mecanismos de transporte no interior do concreto são a absorção capilar ou convecção, permeabilidade e difusão iônica. Concretos em zonas de agressividade marinha tendem a apresentar uma combinação de transporte por absorção capilar e difusão (TUTTI, 1993).

A cinética do transporte depende do tipo de mecanismo envolvido, das propriedades do concreto (permeabilidade), da presença de fissuras, da capacidade de ligação da matriz cimentícia, bem como das condições ambientais existentes na superfície do concreto.

3.1.1 Absorção capilar

Quando a água entra em contato com a superfície de um material poroso, ela é absorvida rapidamente pela criação de uma pressão nos poros secos, chamada de pressão capilar. Esta pressão depende da tensão superficial, viscosidade e densidade do líquido, do ângulo de contato e do diâmetro do poro. Em teoria, a tensão capilar é mais forte à medida que as dimensões dos poros diminuem. Por outro lado, quanto menor os poros, mais lento o transporte será devido ao aumento do atrito (BERTOLINI *et al.*, 2004).

O mecanismo de absorção capilar ou convecção ocorre exatamente quando surge essa tensão capilar. No nosso caso, os íons cloretos dissolvidos na água, presentes na umidade relativa, entram em contato com a superfície do concreto. Se o poro estiver seco, surge um fluxo deste líquido pelo efeito da tensão superficial atuante nos poros capilares (CLASSE, 2014).

Neste contexto, o fluxo convectivo é função da concentração de íons cloretos no líquido e do fluxo de líquido que entra pela sucção capilar. Logo, o transporte de íons cloretos por convecção é obtido pelo balanço de massa empregando a Lei de Darcy ampliada, como atesta a [Equação 3.1](#) (TANG e NILSSON, 1996).

$$q_{conv} = C_{cl} \times q_{ag} \quad \text{Equação 3.1}$$

Onde q_{conv} é o fluxo convectivo de massa de íons cloretos, em $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$; C_{cl} é a concentração de cloretos no líquido, em kg/m^3 de solução; e q_{ag} é o fluxo volumétrico de água, em $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$.

Dificilmente, a absorção capilar atuará sozinha. Contudo, ela pode ser preponderante em relação a outros mecanismos de transporte em casos que o concreto é de baixa qualidade e/ou com pequenos cobrimentos, sujeitos a ambiente com grande variação de umidade relativa.

3.1.2 Difusão

Quando uma região com mais concentração de um determinado agente entra em contato com outra região com menor concentração, surge um gradiente de concentração iônico com sentido da área de maior concentração para a de menor, tendendo ao equilíbrio do meio. Este movimento de íons por diferença de concentração é chamado de difusão iônica (BERTOLINI *et al.*, 2004).

A penetração de íons cloretos dentro do concreto geralmente ocorre por difusão. Os íons cloretos somente se difundem quando dissolvidos na água do poro, sendo mais eficaz este tipo de transporte quando os poros estão totalmente saturados. Vale salientar que na difusão não há qualquer transporte de água, e sim o transporte de íons dissolvidos no líquido (CLASSE, 2014).

3.1.2.1 Difusão em estado estacionário

Quando o fluxo de íons cloretos se difunde por uma determinada região sem variação com o tempo, denominamos esse processo como difusão em estado estacionário ou regime permanente. Logo, fluxo de cloretos que entra numa superfície é o mesmo que sai, resultando numa variação linear da concentração no espaço ao longo do gradiente de concentração. Este processo é matematicamente descrito pela Primeira Lei de Fick, na qual os cloretos se difundem através de

um plano perpendicular à superfície de exposição e proporcional ao gradiente de concentração, dado por (CRANK, 1975):

$$q_{cl} = -D_c^* \frac{\partial C_{cl}}{\partial x} - D_c^* \frac{\partial C_{cl}}{\partial y} \quad \text{Equação 3.2}$$

Onde q_{cl} é o fluxo de massa de íons cloretos na superfície, em $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$; D_c^* é o coeficiente de difusão efetivo de cloretos, em m^2/s ; e C_{cl} é a concentração de íons cloretos, em kg/m^3 de solução no poro. O sinal negativo na [Equação 3.2](#) indica que o fluxo de massa ocorre no sentido em que diminui a concentração. Já o coeficiente difusão efetivo (D_c^*) depende da espécie em difusão, das características do concreto e das condições de exposição, como será visto adiante.

Estudos de difusão em estado estacionário vêm sendo realizados desde a década de 70 com o propósito de classificar diferentes composições de concreto. Esses estudos se baseiam na configuração de ensaio mostrado na [Figura 3.1 \(a\)](#), onde uma fina camada de concreto, pasta ou argamassa (≈ 10 mm) é submetida a diferentes concentrações de cloretos em suas superfícies. Após certo período de tempo (*time lag, t_1*) o fluxo de cloretos que se difunde através da amostra (a derivada da concentração em relação à profundidade, x) torna-se constante (BERTOLINI *et al.*, 2004). Logo, o perfil de cloretos tende a se aproximar de uma reta ([Figura 3.1 \(b\)](#)) e a Primeira Lei de Fick pode ser reescrita como a [Equação 3.3](#).

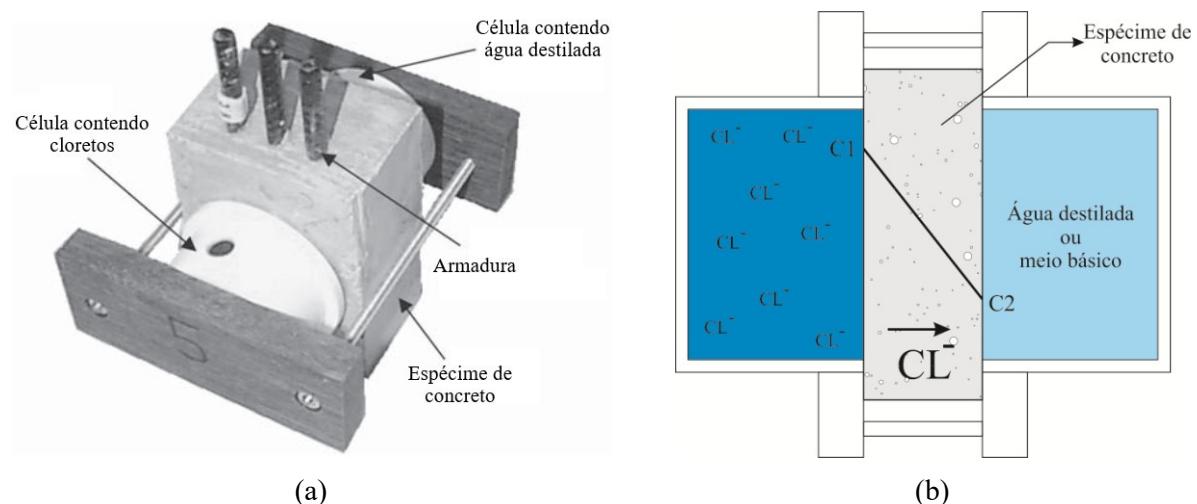


Figura 3.1 – Ensaio de célula de difusão em estado estacionário: configuração(a) e exemplo prático(b).
Fonte: Joukoski *et al.* (2004).

$$\frac{C_2 + V}{A \times (t - t_1)} = \frac{D_{ee} + C_1}{L} \quad \text{Equação 3.3}$$

Onde C_2 é a concentração de íons cloretos na câmara contendo água destilada ou meio básico, em kg/m^3 ; V é o volume da câmara contendo alta concentração de cloretos, em m^3 ; A é área da sessão transversal, em m^2 ; C_1 é a concentração de íons cloretos na câmara contendo alta

concentração inicial, em kg/m³; L é a espessura do disco, em m; e D_{ee} é o coeficiente de difusão no estado estacionário, m²/s.

3.1.2.2 Difusão de cloretos em estado não estacionário

A Primeira Lei de Fick despreza a ação do tempo e assume que a concentração de cloretos é diretamente proporcional ao fluxo que se difunde (gradiente de concentração). A Segunda Lei de Fick generaliza o caso, podendo a concentração variar ao longo do tempo e espaço, denominando esse processo como estado não estacionário ou regime transiente ([Equação 3.4](#)).

$$\frac{\partial C_{cl}}{\partial t} = -\frac{\partial q_{cl}}{\partial x} - \frac{\partial q_{cl}}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_c^* \frac{\partial C_{cl}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_c^* \frac{\partial C_{cl}}{\partial y} \right) \quad \text{Equação 3.4}$$

Onde C_{cl} é a concentração de íons cloretos, em kg/m³ de solução no poro; q_{cl} é o fluxo de massa de íons cloretos na superfície, em kg/m².s; D_c^* é o coeficiente de difusão efetivo de cloretos, em m²/s; e t é o tempo de exposição, em segundos.

Geralmente esta equação é integrada sob certas suposições: a concentração de íons cloretos na superfície do concreto é constante com o tempo ($C(x \rightarrow 0, t) = C_s$); o coeficiente de difusão é homogêneo em todo o concreto, constante com o tempo e invariável com as condições ambientais e a concentração interna inicial é constante ($C(x, t \rightarrow 0) = C_\infty$). Outro fator que não é levado em consideração é a interação entre os cloretos e a matriz cimentícia (combinação de cloreto). A [Equação 3.5](#) exibe a solução (CRANK, 1975):

$$C(x, t) = C_s + (C_\infty - C_s) \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{ns}t}} \right) \quad \text{Equação 3.5}$$

Onde $C(x, t)$ é a concentração de cloretos na profundidade x e no tempo t , em %; x é a profundidade paralela ao fluxo de ingresso dos cloretos, em cm; t é o tempo de exposição, em segundos; C_∞ é a concentração inicial de cloretos no interior do concreto, em %; C_s é a concentração de cloretos na superfície do concreto, em %; erf é a função de erro de Gauss ([Equação 3.6](#)); e D_{ns} é o coeficiente de difusão no estado não estacionário, em m²/s.

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\pi} \times \int_0^z e^{-t^2} dt \quad \text{Equação 3.6}$$

Este modelo simplificado foi amplamente empregado por diversos pesquisadores com o objetivo de estudar a influência das variáveis sobre o transporte de cloretos (CHIANG *et al.*, 2009; COSTA e APPLETON, 2007; MEIRA, 2004; TREJO & MONTEIRO, 2004; CASTELLOTE, 2002; ANDRADE, 1988; entre outros) e com previsão de deterioração de estruturas

(MAHESWARAN *et al.*, 2004; KASSIR *et al.*, 2002; BAMFORTH, 1999; NILSSON *et al.*, 1997; entre outros).

Parte desses estudos partiu de ensaios de laboratório ou estruturas reais, com longo tempo de exposição, onde amostras são colhidas de tempos em tempos (de meses a anos), trituradas e analisadas quimicamente para determinação do teor de cloretos. Depois de confeccionados os perfis de cloretos (concentração *versus* profundidade), a [Equação 3.5](#) ([Figura 3.2](#)) era ajustada aos resultados experimentais com o intuito de determinar a concentração superficial de cloretos e o coeficiente de difusão em estado não estacionário. Observa-se que a penetração de cloretos, em situações que se aplique a solução analítica simplificada da Segunda Lei de Fick ([Equação 3.5](#)), produz um perfil caracterizado por um alto teor de cloretos próximo à superfície externa do concreto e pela diminuição da concentração em maiores profundidades para todas as combinações plausíveis de C_s e D_{ns} .

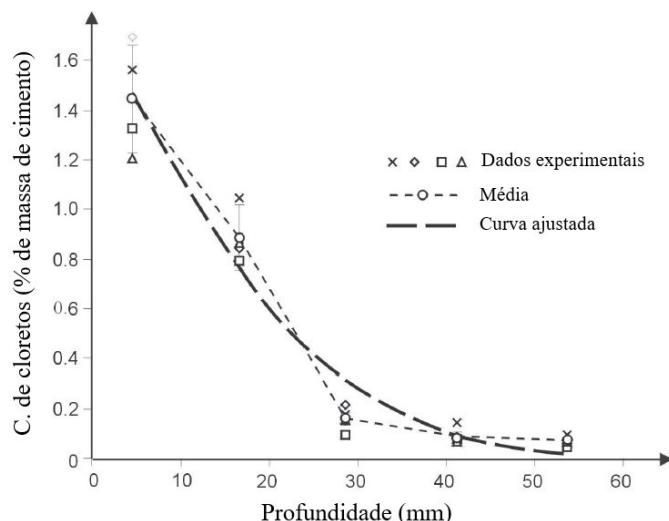


Figura 3.2 – Perfil de cloretos obtidos de uma parede localizada na costa norte da Alemanha após 8 anos de exposição em zona de respingo ($C_s = 1,77\%$ e $D_{ns} = 8,9e^{-13} m^2/s$). **Fonte:** Bertolini *et al.* (2004).

Partindo da [Figura 3.2](#), foi confeccionada a [Figura 3.3](#). Ela indica diferentes concretos (D_{ns} diferentes) com consumo de cimento de 400kg/m^3 calculados para uma concentração superficial próxima à do mar ($3,5\% \approx 1\text{M}$) em diferentes idades (5, 10 e 25 anos). Com os resultados, percebemos que esta análise pode descrever teoricamente a cinética do processo de difusão em estado não estacionário, sob certas condições, mostrando a velocidade com que os cloretos penetram o concreto no decorrer do tempo. As reportadas “certas condições” (poros do concreto saturados, desconsideração da capacidade de fixação de cloretos, concentração superficial invariável no tempo e coeficiente de difusão de cloretos homogêneo em todo concreto e constante) raramente são encontradas em estruturas reais (MARTIN-PEREZ, 1999; CRANK, 1975).

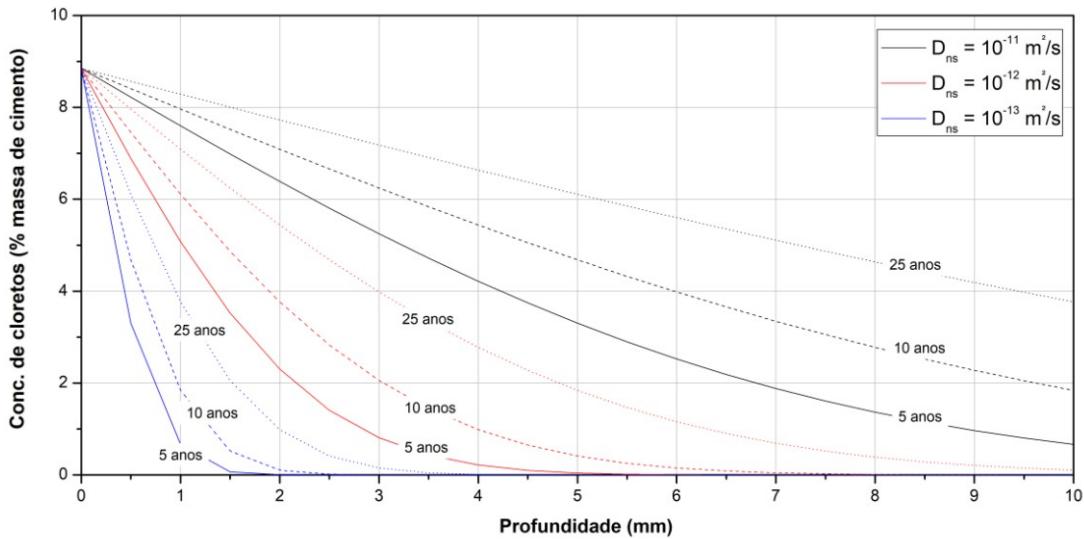


Figura 3.3 – Exemplo de perfil de cloreto obtidos a partir do emprego da [Equação 3.5](#) para diferentes tipos de concreto (consumo de cimento = 400 kg/m³) submetidos à concentração de 1M.

Vale salientar que o coeficiente de difusão em estado estacionário (D_{ee}) obtido através de ensaios de laboratório, conforme a [Figura 3.1](#), não se aplica à [Equação 3.5](#), tendo em vista que o coeficiente de difusão no estado não estacionário (D_{ns}) depende de outros fatores, como condições de exposição e o tempo de exposição. Sendo D_{ee} um parâmetro de resistência à penetração de cloreto, quando se quer comparar diferentes materiais (BERTOLINI *et al.*, 2004).

3.1.2.3 O efeito combinado da difusão e convecção de cloreto

Na realidade, as superfícies de concreto estão sujeitas às condições climáticas que provocam umedecimento, lavagem e secagem da superfície do concreto. Sobre estas condições outros mecanismos de transporte contribuem para a penetração de cloreto, na maioria das vezes acelerando o processo de ingresso.

Por exemplo, quando o concreto está seco e sua superfície é umedecida com água salgada, esta água é rapidamente absorvida em poucas horas por absorção capilar, trazendo consigo os íons cloreto dissolvidos que penetram o concreto entre 10 a 20 mm, dependendo da qualidade e do processo de cura. Durante o processo de secagem, que geralmente acontece mais lentamente que a absorção, a água próxima à superfície evapora deixando para trás os íons cloreto e facilitando a entrada de gases (CO₂ e O₂) (BERTOLINI *et al.*, 2004; ANDRADE e ALONSO, 1996).

Devido à combinação desses efeitos (umedecimento e secagem) atrelada ao efeito pele (item [3.2.1.1-v](#)) e à lavagem ocasionada pela chuva na superfície externa, a concentração superficial de cloreto irá flutuar, atingindo um valor máximo de alguns milímetros depois da superfície ([Figura 3.4 \(a\)](#)). Vários pesquisadores identificaram comportamento similar em ensaios de laboratório (FERREIRA, 2015; POLDER e PEELEN; 2002; LEVY, 2001) ou em exposição real

na zona da atmosfera marinha (MEIRA *et al.*, 2010; COSTA e APLETTON, 2007; CASTRO *et al.*, 2001; NILSON e TANG, 2000), denominando esse tipo de perfis de cloreto como de duas zonas (Figura 3.4 (b)) (TUTTI, 1993). Nos trabalhos de Cai *et al.* (2020a) e Gao *et al.* (2017), é possível identificar uma gama de valores de profundidade da zona de convecção, para diversas zonas de atmosfera marinha.

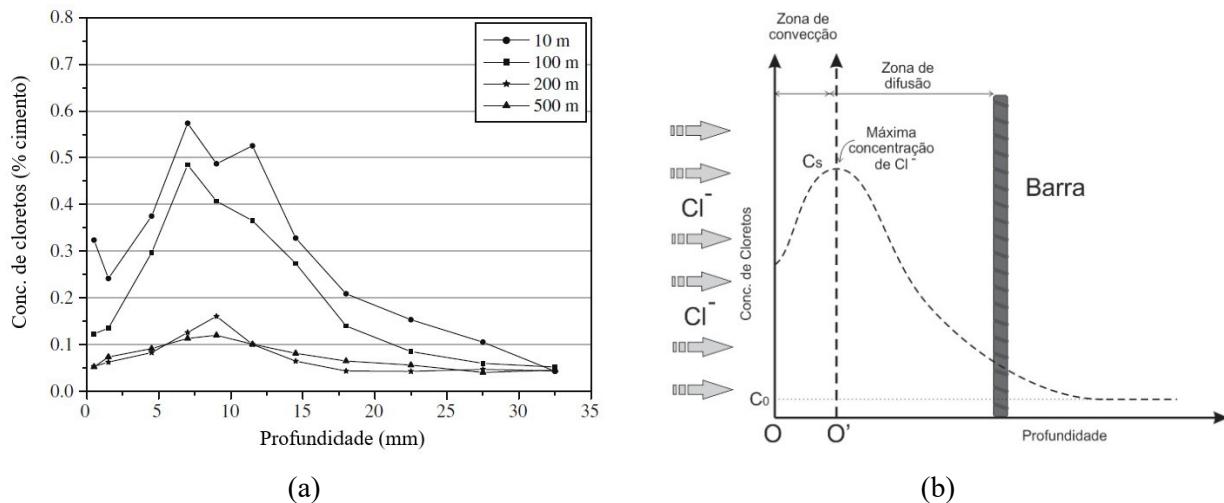


Figura 3.4 – Perfil de cloreto totais para concretos em condição de exposição real a diferentes distâncias do mar (a) e representação esquemática do perfil de duas zonas (b). **Fonte:** Meira *et al.* (2010).

Desta forma, os perfis de cloreto (Figura 3.4 (b)) apresentam uma zona convectiva, onde nas primeiras camadas a oscilação da umidade favorece o transporte de cloreto por absorção capilar e nas zonas mais internas (zona de difusão), com a umidade mais constante e presente em elevados níveis, favorece a difusão.

Como resultado, quando a água na superfície do concreto evapora, os íons cloreto migram do interior do concreto para a superfície junto com a água, favorecendo a formação de um pico de concentração a poucos milímetros da superfície (CAI *et al.*, 2020a). A região localizada entre a superfície e a profundidade de maior concentração de cloreto determina a zona convectiva (Figura 3.4 (b)).

Diante deste cenário, perfis de cloreto onde a concentração superficial é menor que a concentração interna a poucos centímetros da superfície, surgiu como alternativa a análise do transporte de cloreto usando a solução analítica da Segunda Lei de Fick (Equação 3.5) o reescalonamento de perfil. Técnica que considera apenas na análise as concentrações de cloreto a partir do final da zona de convecção (ANDRADE e ALONSO, 1997; ANDRADE *et al.*, 2000; NILSSON *et al.*, 2000).

Com a evolução dos estudos, modelos mais refinados de transporte de cloreto em concretos não saturados (efeito combinado da convecção e difusão) foram aparecendo, como os propostos por Saetta *et al.* (1993), Collins e Grace (1997) e Martin-Perez (1999). Nesses modelos, o uso de

técnicas matemáticas foi usado para resolução das Equações Diferenciais Parciais (EDP), diminuindo consideravelmente, a gama de simplificações adotadas nas análises e aumentando a precisão das previsões de penetração de cloretos.

3.1.2.4 O efeito da ligação de cloretos no transporte destes íons

O concreto tem uma capacidade especial de fixar cloretos à sua matriz cimentícia até certo ponto. Esta propriedade do material influencia diretamente o processo de transporte de íons, já que nem todos os cloretos que penetrarem o concreto chegam à armadura para iniciar o processo de corrosão. Sendo assim, a capacidade de ligação pode reduzir o risco de corrosão e aumentar o tempo de vida útil das estruturas de concreto armado (BERTOLINI *et al.*, 2004; CASCUDO, 1997).

Os cloretos podem estar no concreto basicamente de três formas: livres (grandes responsáveis pelo início da corrosão), quimicamente combinados aos aluminatos - C₃A e C₄AF (formando sal de Friedel - C₃A.CaCl₂.10H₂O) ou fisicamente adsorvidos ao gel de CSH, em menor proporção. A ligação de cloretos à matriz cimentícia depende de vários fatores como a temperatura, a quantidade de CSH e os teores de C₃A e C₄AF, principais fases hidratadas que são responsáveis pela fixação dos cloretos. No entanto, a presença de íons sulfatos e/ou gás carbônico resulta na liberação de íons cloretos devido à maior força química atrativa para formação de Etringita/monosulfo-aluminato (C₆A⁺SH₃₂⁻ / 3C₄A⁺SH₁₂⁻ ou C₃A⁺SH₁₂⁻) ou CSH-CO₂, respectivamente (NEVILLE, 1995).

Os cloretos fixados à matriz cimentícia não estão permanentemente ligados. Uma vez que o equilíbrio químico seja quebrado, os cloretos combinados estão livres para atuar na corrosão (TANG & NILSSON, 1993). Este mesmo equilíbrio químico também garante que sempre haverá cloretos livres na fase líquida, mesmo que a matriz cimentícia ainda tenha capacidade de fixação (PAPADAKIS *et al.*, 1996).

A vida útil das estruturas de concreto armado em ambientes com atmosfera marinha está intimamente relacionada ao grau de dificuldade (coeficiente de difusão) que o material impõe ao transporte de íon cloreto através do concreto (TUTTI, 1982; CRANK, 1975). Em modelos baseados na [Equação 3.5](#), a penetração de cloretos geralmente pondera em consideração a concentração total de íons cloretos, desprezando a capacidade de fixação da matriz e subestimando a vida útil (BERTOLINI *et al.*, 2004). Tendo em vista que a capacidade de fixação tem ação determinante no retardamento do processo de transporte, faz-se necessário estimar um termo corretivo.

Esse termo corretivo é geralmente definido como um fator de redução aplicado ao coeficiente de difusão de cloretos (Equação 3.7). Apesar de difícil mensuração, ele é obtido através da determinação da relação entre os cloretos livres e combinados no equilíbrio (isoterma de fixação), assumindo que o esse equilíbrio acontece instantaneamente quando as condições no poro do concreto mudam (Figura 3.5).

$$D_c^* = \varphi \times D_c$$

Equação 3.7

Onde D_c^* é o coeficiente de difusão de cloretos aparente, em m^2/s ; φ é o fator de redução da fixação, adimensional, e D_c é o coeficiente de difusão de cloretos, em m^2/s . A Equação 3.8 expressa o modelo matemático mais usado para representar a capacidade de fixação de cloretos com a matriz cimentícia.

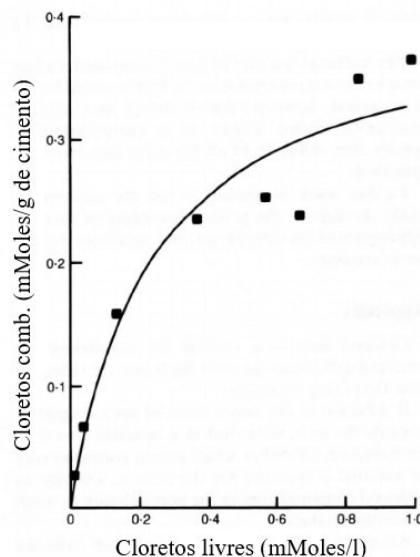


Figura 3.5 – Relação entre cloretos livres e combinados (Ioterma de fixação) para pasta de cimento com a/c de 0,5 e $w_e = 29,7\%$. **Fonte:** Sergi *et al.* (1992).

$$D_c^* = \frac{D_c}{1 + \left(\frac{1}{w_e} \times \frac{\partial C_{cob}}{\partial C_{liv}} \right)}$$

Equação 3.8

Onde w_e é a concentração de água evaporável, em m^3 de água/ m^3 de concreto, e $\frac{\partial C_{cob}}{\partial C_{liv}}$ é a capacidade de combinação de cloretos, em m^3 de solução do poro/ m^3 de concreto. A capacidade de combinação é a derivada da isoterma, em relação à concentração de cloretos livres, determinada empiricamente através de ajuste à curva de dados obtidos em ensaios de laboratório. As isotermas são tradicionalmente definidas por ensaios de laboratório. Elas, maioria das vezes, são determinadas para concreto não carbonatado numa determinada faixa de temperatura ambiente. Essas isotermas (por exemplo, a Figura 3.5) são caracterizadas por retratar uma alta

capacidade de combinação em baixas concentrações de cloretos livres, seguidas por uma redução gradual até a estabilização, devido à saturação da capacidade de combinação (DOUSTI e SHEKARCHI, 2015). As isotermas mais conhecidas são a de Langmuir e Freundlich, que serão discutidas posteriormente.

3.1.3 Permeabilidade

A permeabilidade é o mecanismo de transporte responsável pelo ingresso de um fluido sobre pressão. Esse tipo de mecanismo de transporte é predominante em represas ou revestimento de túneis onde há uma pressão externa da água, mas em determinadas situações o processo de absorção pode ser tão forte que cria uma pressão diferencial (CLAISSÉ, 2014). O fluxo de água é definido através da velocidade do fluido incompressível através do concreto, estimado pelo balanço de massa ou pela Lei de Darcy com fluxo laminar em regime estacionário:

$$q_{per} = -\frac{K_p}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \quad \text{Equação 3.9}$$

Onde q_{per} é o fluxo de massa da substância, em m^3/s ; η é a viscosidade do fluido, em N.s/m^2 ; $\partial p / \partial x$ é o gradiente de pressão, em $\text{N/m}^2\text{m}$, e K_p é o coeficiente de permeabilidade do material, em m^2 . A permeabilidade do concreto está diretamente ligada ao diâmetro e à conectividade dos poros capilares.

3.2 MODELOS DE VIDA ÚTIL PARA ESTRUTURA DE CONCRETO

A penetração de cloretos no interior do concreto implica uma interação complexa entre processos físicos e químicos (BASTIDAS-ARTEAGA *et al.*, 2011). Esses processos são afetados por um grande número de fatores, incluindo as propriedades do concreto, o grau de saturação dos poros do concreto, as condições de exposição e a capacidade de ligação entre os cloretos e a matriz cimentícia (ANGST *et al.*, 2011; MARTIN-PEREZ, 1999; SAETTA *et al.*, 1993). Dada à complexidade e sob várias hipóteses, este fenômeno pode ser simplificado num problema de difusão simples (TUTTI, 1982; CRANK, 1975).

Tal simplificação leva em consideração a solução analítica da Segunda Lei de Fick, utilizável apenas quando as estruturas de concreto armado estão sob condições saturadas e submetidas a uma concentração superficial constante. No entanto, esta solução é válida apenas para zonas submersas, onde a baixa concentração de oxigênio dissolvido reduz consideravelmente os riscos

de corrosão em comparação com as zonas não saturadas (BASTIDAS-ARTEAGA *et al.*, 2011; SAETTA *et al.*, 1993).

Foi partindo da solução analítica da Segunda Lei de Fick que surgiram os primeiros modelos de previsão de vida útil de concreto (MAHESWARAN *et al.*, 2004; KASSIR *et al.*, 2002; BAMFORTH, 1999; NILSSON *et al.*, 1997; entre outros). Este tipo de abordagem é usado pelas modelagens DuraCrete e Life-365.

Dentre os modelos baseados na difusão, o mais conhecido é o modelo HETEK ou modelo Mejlbø-Poulsen (NILSSON *et al.*, 1997). Ele considera o efeito de ligação entre os cloretos e o concreto, a dependência do tempo no coeficiente de difusão e evidencia uma gama de parâmetros experimentais de caracterização do concreto. No entanto, não leva em consideração, a influência da temperatura na ligação de cloretos, a penetração em duas dimensões e o envelhecimento do concreto.

Seguindo a linha evolutiva do conhecimento na área de previsão de tempo de vida útil de estruturas de concreto armado, surgiram os primeiros trabalhos usando métodos numéricos para solução das equações diferenciais parciais por diferenças finitas (NIELSEN e GEIKER, 2003; ALMENAR, 2000; TANG e NILSON, 1996) e elementos finitos (BRÜHWILER *et al.*, 2001; MARTIN-PEREZ, 1999; SAETTA *et al.*, 1993) em concretos sob condições não saturadas, ou seja, incorporando o efeito da convecção.

Em seguida começaram a surgir modelos mais abrangentes que consideravam as incertezas relacionadas ao fenômeno para fazer previsões racionais do tempo de vida das estruturas. Dentre os trabalhos referentes à modelagem probabilística da penetração de cloretos, é importante destacar os estudos realizados por Kong *et al.* (2002) e Ababneh *et al.* (2003). Eles fazem uma análise de confiabilidade considerando as incertezas relacionadas às propriedades dos materiais. Incorporando as incertezas relacionadas à natureza aleatória das ações ambientais, ressalta-se o trabalho de Akiyama *et al.* (2009). No entanto, estas abordagens estudaram apenas o caso do concreto saturado e com fluxo unidirecional.

Entre 2005 e 2010, surgiu uma gama de modelos probabilísticos de previsão de vida útil de estruturas de concreto, partindo de uma dimensão para duas dimensões (VAL e TRAPPER, 2008; FRIER e SØRENSEN, 2005). O trabalho de Val e Trapper (2008) realiza uma avaliação probabilística do tempo de iniciação da corrosão, considerando o fluxo unidimensional e bidimensional de cloretos na avaliação da probabilidade de início da corrosão. No entanto, não considera as incertezas relacionadas ao modelo matemático e ignora o impacto da natureza estocástica da umidade, temperatura e concentração de cloreto na superfície do concreto.

A partir de 2010 surgiram os modelos matemáticos que englobam todas as incertezas relacionadas às propriedades dos materiais, condições de exposição e simplificações matemáticas usadas no modelo, com destaque para os trabalhos de Bastidas-Arteaga *et al.* (2011). Porém, os concretos eram apenas submetidos à ação de cloreto para desgelo e o processo de fissuração que aumenta a difusividade.

É com o trabalho de Tavares (2013) que os modelos saem do processo simplificado de gelo e desgelo (condições de contorno constantes na superfície) e passam a adotar outras zonas de agressividade marinha. Este trabalho estuda a iniciação e a propagação da corrosão em concretos considerando apenas a difusão, mas inova no aspecto de adicionar a influência do tempo na concentração superficial de cloretos e o período de propagação da corrosão.

Os trabalhos mais recentes se dedicam a estudar a previsão de iniciação à corrosão em concretos não saturados (difusão e convecção) submetidos à zona de atmosfera marinha. Destacamos o trabalho de Wattanapornprom e Ishida (2017 e 2018) que é um modelo determinístico para geração do aerossol marinho até o transporte de cloretos no interior do concreto, considerando diversas variáveis (velocidade do vento, distância do mar, efeito lavagem, difusão, convecção, ligação de cloretos, entre várias outras). Há um trabalho publicado em 2009 por Akiyama *et al.* (2009), que inicia os modelos probabilísticos de previsão de vida útil, considerando apenas a difusão em zonas de atmosfera marinha.

De modo a simplificar o entendimento do leitor, foi confeccionada a [Figura 3.6](#). Ela retrata a evolução cronológica do conhecimento na aplicação de modelos de previsão de vida útil em estrutura de concreto armado submetidos à ação dos íons cloretos. Nem sempre as datas das publicações correspondem à cronologia exibida na [Figura 3.6](#), pois alguns pesquisadores evoluem mais numa determinada área específica. Porém exibe de forma progressiva a quebra de paradigmas pelos trabalhos de maior destaque.

Compreende-se, a partir dos modelos discutidos, que a primeira dificuldade foi a saída da condição do concreto saturado (difusão) para não saturado (difusão + convecção). Em segundo lugar, veio a passagem do fluxo unidimensional para bidimensional. Depois a inserção das incertezas do processo (modelos probabilísticos). Por fim, a dificuldade é apresentar um modelo para concretos em zona de atmosfera marinha. Porém, em todas as épocas, as condições de contorno sempre foram o “Calcanhar de Aquiles” na validação dos modelos.

Nas seções a seguir, são vistos os modelos matemáticos para previsão do transporte de cloretos no interior do concreto, a partir da metodologia proposta por Martin-Perez (1999) e Saetta *et al.* (1993). O modelo é baseado numa modificação da Segunda Lei de Fick, na qual é levada em consideração a combinação de cloretos com a matriz cimentícia, a difusão iônica e a convecção.

Para resolução do modelo, faz-se necessária a resolução simultânea das equações diferenciais parciais (EDP) de calor, umidade e transporte de cloretos.

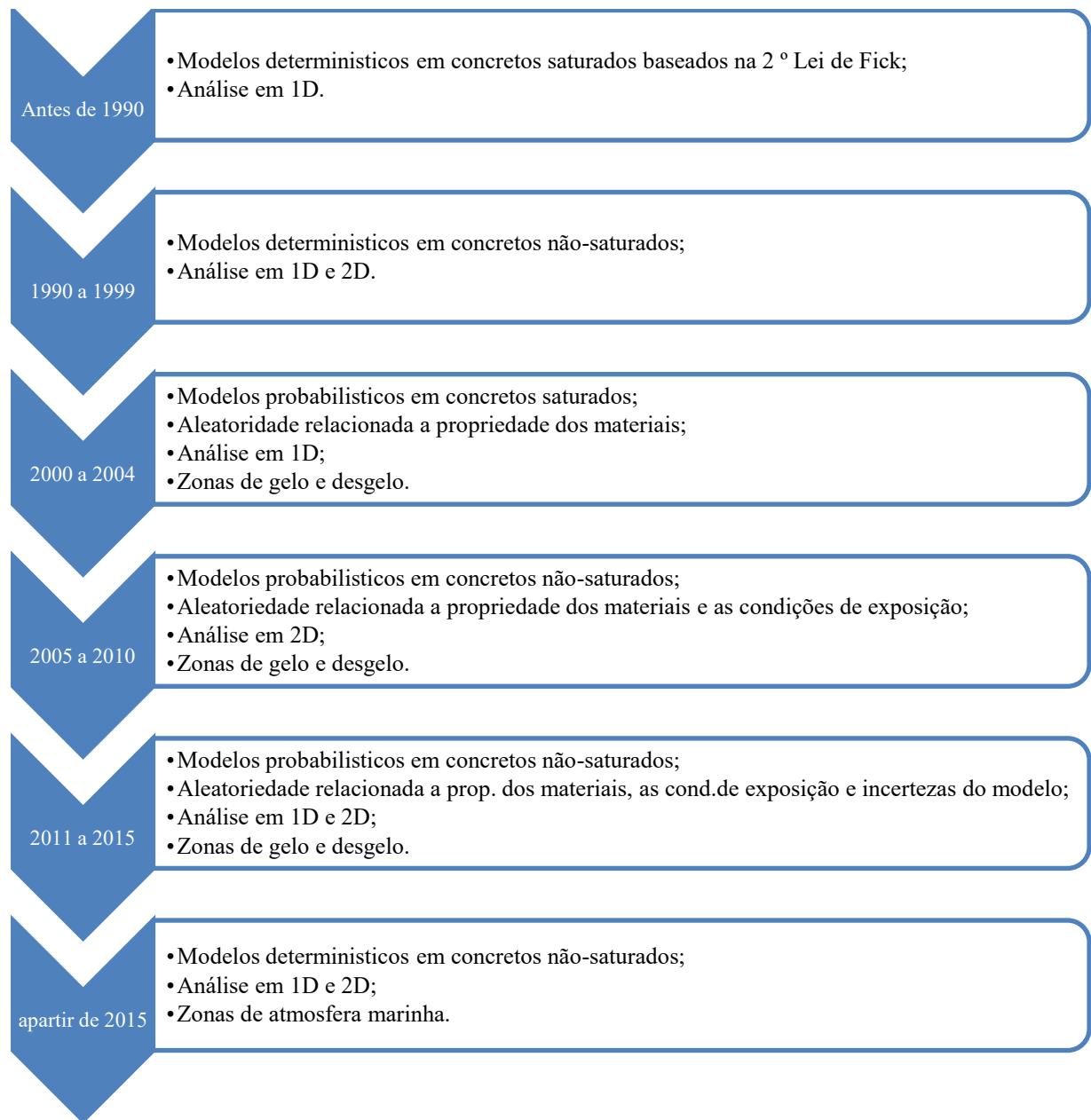


Figura 3.6 – Evolução dos modelos de previsão de vida útil de estruturas de concreto armado submetidos à corrosão por cloretos.

3.2.1 Transporte de cloretos

A penetração de íons cloretos no interior do concreto é definida por uma interação complexa entre fenômenos químicos e físicos, que geralmente tem sido simplificada como um problema de difusão pura, modelada pela solução analítica da Segunda Lei de Fick. Muitos estudos adotam a solução simplificada da Lei de Fick, onde a concentração de cloreto é estimada pela Função de Erro de Gauss num dado momento e posição ([Equação 3.5](#)).

As condições para usar essa solução são: material homogêneo, coeficiente de difusão constante no tempo e no espaço, e o material saturado e concentração na superfície do concreto constante durante a exposição. Naturalmente, essas condições dificilmente serão satisfeitas, pois o concreto é um material heterogêneo, que é frequentemente exposto a concentrações de cloreto de superfície, variando no tempo.

A difusão é considerada o principal processo de transporte de cloretos no interior do concreto. No entanto, as estruturas reais dificilmente estarão sempre com seus poros saturados. É partindo desse ponto que o processo de penetração de cloreto torna-se uma combinação de dois processos de transporte: a difusão e a convecção. A difusão é um mecanismo de transporte baseado na diferença de concentração entre duas regiões interconectadas. Sendo assim, os cloretos se movem de regiões de maiores concentrações para regiões de menores concentrações, por surgimento de um gradiente de concentração iônico.

Já convecção ou absorção capilar é um processo de transporte originado por fluxo de umidade na superfície do concreto para o interior. Nesse fluido, encontram-se íons dissolvidos de cloretos. Naturalmente, a difusão e convecção são processos espontâneos de transporte de massa (BERTOLINI *et al.*, 2004; TUTTI, 1982). A [Equação 3.10](#) assinala a Segunda Lei de Fick que representa o processo de difusão e convecção matematicamente:

$$\frac{\partial C_{tot}}{\partial t} = \underbrace{\text{div}(D_c w_e \vec{\nabla}(C_{fc}))}_{\text{difusão}} + \underbrace{\text{div}(D_h w_e C_{liv} \vec{\nabla}(h))}_{\text{convecção}} \quad \text{Equação 3.10}$$

Onde C_{tot} é a concentração de cloretos totais no tempo t , em kg/m^3 de concreto; D_c é o coeficiente de difusão de cloretos, em m^2/s ; w_e é a concentração de água evaporável, em m^3 de água/ m^3 de concreto; C_{liv} é a concentração de cloretos dissolvidos nos poros, isto é, os cloretos livres, em kg/m^3 de concreto; D_h é o coeficiente de difusão de umidade, em m^2/s ; e h é a umidade relativa no poro do concreto. A partir da [Equação 3.10](#), inferimos que a concentração de cloretos totais (C_{tot}) é função do gradiente espacial da concentração de cloretos livres (C_{liv}).

Como pode ser visto na [Equação 3.10](#), o transporte de cloreto em concreto não saturado é dependente da difusão da umidade no interior do concreto. Além disso, várias propriedades do concreto, como o coeficiente de difusão de cloreto, dependem do teor de umidade do concreto. Portanto, é de suma importância para a precisão dos resultados a determinação do perfil de umidade no interior do concreto.

Durante o transporte de cloreto no concreto, os íons cloretos podem estar de três formas distintas no interior do concreto: dissolvidos na solução de poro (cloreto livres), quimicamente combinados aos produtos de hidratação do cimento, ou fisicamente absorvidos nas superfícies

dos poros do gel (CASCUDO, 1997). Se as concentrações de cloretos quimicamente ligados e fisicamente adsorvidos forem agrupadas na concentração de cloretos combinados (C_{cob}), teremos a concentração de cloreto total pode ser expressa pela [Equação 3.11](#).

$$C_{tot} = C_{cob} + w_e C_{liv} \quad \text{Equação 3.11}$$

Assim, a [Equação 3.10](#) pode ser reescrita em termos de concentração de cloretos livres em duas dimensões, conforme a [Equação 3.12](#). Esta equação governa o transporte de cloretos livres em concretos parcialmente saturados, estando ela em termos de cloretos livres, as concentrações estarão em kg/m³ de solução do poro.

$$\frac{\partial C_{liv}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_c^* \frac{\partial C_{liv}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_c^* \frac{\partial C_{liv}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(C_{liv} D_h^* \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(C_{liv} D_h^* \frac{\partial h}{\partial y} \right) \quad \text{Equação 3.12}$$

Onde D_c^* e D_h^* representam os coeficientes aparentes de difusão e umidade, respectivamente. A [Equação 3.13](#) sinaliza a formulação matemática. Assim, o efeito da ligação dos cloretos em movimento convectivo no concreto seria reduzido à difusividade do transporte de íons de cloreto dissolvidos na umidade, ou seja, a capacidade de ligação é dada pela inclinação da isoterma de ligação $\left(\partial C_{cob} / \partial C_{liv} \right)$ (MARTIN-PEREZ, 1999).

$$D_c^* = \frac{D_c}{1 + \left(1/w_e \times \partial C_{cob} / \partial C_{liv} \right)} \quad e \quad D_h^* = \frac{D_h}{1 + \left(1/w_e \times \partial C_{cob} / \partial C_{liv} \right)} \quad \text{Equação 3.13}$$

Após aplicação da regra da derivação do produto e considerando os coeficientes aparentes de umidade e cloretos constantes, a [Equação 3.12](#) fica:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_{liv}}{\partial t} = & D_c^* \left(\frac{\partial^2 C_{liv}}{\partial x^2} \right) + D_c^* \left(\frac{\partial^2 C_{liv}}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial C_{liv}}{\partial x} D_h^* \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial C_{liv}}{\partial y} D_h^* \left(\frac{\partial h}{\partial y} \right) \\ & + C_{liv} \underbrace{\left[D_h^* \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \right) + D_h^* \left(\frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) \right]}_{\frac{\partial w_e \partial h}{\partial h \partial t}} \end{aligned} \quad \text{Equação 3.14}$$

3.2.1.1 Coeficiente de difusão efetivo de cloretos

O coeficiente de difusão não é uma constante durante toda a vida útil da estrutura. Este parâmetro depende de vários fatores físicos e químicos do concreto e das condições de exposição ambiental. Segundo Saetta *et al.* (1993), evidências experimentais estabeleceram que o coeficiente de difusão de cloretos depende principalmente da temperatura, umidade relativa do poro, envelhecimento do concreto, tipo de cimento, porosidade e condições de cura. Com o

passar do tempo, percebeu-se que o grau de saturação do poro também tem influência significativa nesta variável, quando a umidade relativa cai a um valor crítico (MEIRA, 2004).

Partindo das condições acima apresentadas, propomos ao modelo de Saetta *et al.* (1993) a adição da influência do grau de saturação para representar a dependência do coeficiente de difusão em relação à temperatura, à umidade relativa no poro e ao tempo ([Equação 3.15](#)).

$$D_c = D_{c,ref} \times f_1(T) \times f_2(GS) \times f_3(t) \times f_4(h) \quad \text{Equação 3.15}$$

Onde $D_{c,ref}$ é o coeficiente de difusão efetivo de cloretos nas condições de referência, em m^2/s ; $f_1(T)$ é a função que considera a dependência da temperatura, adimensional; $f_2(GS)$ é a função que considera a dependência do grau de saturação, adimensional; $f_3(t)$ é a função que considera a dependência do tempo, adimensional; e $f_4(h)$ é a função que considera a dependência da umidade relativa, adimensional.

Valores típicos para o coeficiente de difusão efetivo de cloretos podem ser encontrados nos trabalhos de Yu *et al.* (2019a), Park *et al.* (2016), Chalee *et al.* (2009) e Delagrange *et al.* (1996), para diversos tipos de cimento, ambientes de exposição, adições e relações água/cimento.

Como discutido no item [3.2](#), os modelos mais recentes de previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambientes de atmosfera marinha usam variáveis probabilísticas para determinação do tempo de iniciação à corrosão. Diante disto, a [Tabela 3.1](#) mostra valores probabilísticos do coeficiente de difusão efetivo de cloretos obtidos de estruturas reais, ensaios de laboratório e modelos probabilísticos.

Tabela 3.1 – Valores probabilísticos de coeficiente de difusão efetivo de cloretos determinado através de estruturas reais, ensaios de laboratório ou usados em modelos probabilísticos.

Fonte	Tipo de estudo	Condições	Tipo de distribuição	Média $\times 10^{-11}$ (m^2/s)	COV
Akiyama <i>et al.</i> (2009)	Modelo	Valores obtidos de ensaios de laboratório de outros pesquisadores japoneses	Log-normal	1,89	1,87
Andrade (2005)	Ensaio de laboratório	Concreto de CPV-ARI, consumo de cimento de 370kg/m^3 , a/c = 0,47, submetidos à imersão total (3,5%) por 6 meses	Log-normal	0,371	0,75
Bastidas-Arteaga <i>et al.</i> (2011)	Modelo	Concreto de Cimento Portland comum, consumo de cimento de 400kg/m^3 , a/c = 0,5, zona de gelo e desgelo	Log-normal	3,00	0,20
Breitenbücher <i>et al.</i> (2001)	Modelo	Valores obtidos de ensaios de laboratório com argamassa de outro pesquisador alemão	Normal	0,475	0,15
Bruhwiler <i>et al.</i> (2001)	Modelo	Valor obtido de outro pesquisador francês	Normal	1,30	0,25

(continua)

(continuação)

Fonte	Tipo de estudo	Condições	Tipo de distribuição	Média $\times e^{-11}$ (m ² /s)	COV
Enright e Frangopol (1998)	Modelo	Valor obtido de outros pesquisadores em pontes norte-americanas	Log-normal	40,9	0,15
Ferreira (2004)	Estrutura real/ Modelo	Extração de estruturas reais em porto no Mar da Noruega. Consumo de Cimento Portland comum de 380kg/m ³ , zona de respingo e flutuação de maré	Normal	0,114	0,14
Izquierdo <i>et al.</i> (2017)	Estrutura real	Concreto de Cimento Portland comum, consumo de cimento de 220kg/m ³ , porosidade 15%, zona de flutuação de maré e respingo	Log-normal	2,73	0,02
Kiesse <i>et al.</i> (2020)	Modelo	Calculado a partir de modelos de previsão com base em ensaios de teste de migração	Log-normal	0,66	1,24
Lounis (2003)	Modelo	Ponte em concreto submetido a sais de desgelo por quatro anos	Log-normal	1617	0,14
Markeset (2009)	Estrutura real	Ponte na Noruega, aço liso Ø10mm, a/c = 0,40 a 0,50, concreto de Cimento Portland, zona de flutuação de maré	Log-normal	0,70	0,30
Martin-Perez e Lounis (2003)	Estrutura real/ Modelo	Concreto de ponte com FCK de 28 MPa, zona de respingo.	Log-normal	0,162	0,3
Kwon <i>et al.</i> (2009)	Estrutura real	Concreto de Cimento Portland comum, cais localizado na Coreia do Sul, zona de atmosfera marinha	Log-normal	0,387	0,52
Petcherdchoo (2018)	Modelo	Dados coletados da literatura	Triangular	0,396	0,27
Song <i>et al.</i> (2009)	Modelo	Dados coletados da literatura (65 trabalhos)	Wiebull	0,377	0,24
Stewart e Mullard (2007)	Modelo	Não reportada	Normal	2000	0,375
Stewart <i>et al.</i> (1998)	Modelo	Não reportada	Log-normal	2000	0,75
Tavares (2013)	Modelo	Não reportada	Log-normal	240	0,30
Val e Trapper (2008)	Modelo	Não reportada	Log-normal	0,60	0,20
Vera <i>et al.</i> (2017)	Estrutura real	Concreto de Cimento Portland comum, cais localizado no Mar Mediterrâneo (Espanha), zona de atmosfera marinha	Log-normal	2,70	0,02
Zhang <i>et al.</i> (2019)	Estrutura real	Comporta no estuário do Rio Qiantang (China), zona de flutuação de maré, Conc. de cl. nas águas do rio de 27,6 mg/l	Normal	0,1273	0,55
Wu <i>et al.</i> (2015)	Estrutura real	Concreto de doca do Golfo de Beibu/CH, zona de flutuação de maré	Log-normal	28,07	0,11

Com base nos dados coletados, percebe-se uma predominância pela distribuição de probabilidade log-normal. Entretanto, as médias e COV de coeficiente de difusão efetivo de cloretos variaram bastante entre os trabalhos, dadas as características peculiares de cada um deles. Salientamos que a aferição precisa do coeficiente de difusão de cloretos é importantíssima para avaliação da vida útil de estruturas de concreto armado em ambiente de agressividade marinha.

i. Efeito da temperatura no coeficiente de difusão efetivo de cloretos

A dependência do coeficiente de difusão efetivo de cloretos pela temperatura pode ser expressa pela [Equação 3.16](#). Ela é estimada pela Lei de Arrhenius (MARTIN-PEREZ, 1999).

$$f_1(T) = \exp \left(\frac{U}{R} \times \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right) \quad \text{Equação 3.16}$$

Onde U é a energia de ativação do processo de difusão de cloretos, em KJ/mol; R é a constante universal dos gases perfeitos, $8,314 \times 10^{-3}$ KJ/°K.mol; T_{ref} é a temperatura de referência que se obteve $D_{c,ref}$, em °K; e T é temperatura do concreto, em °K.

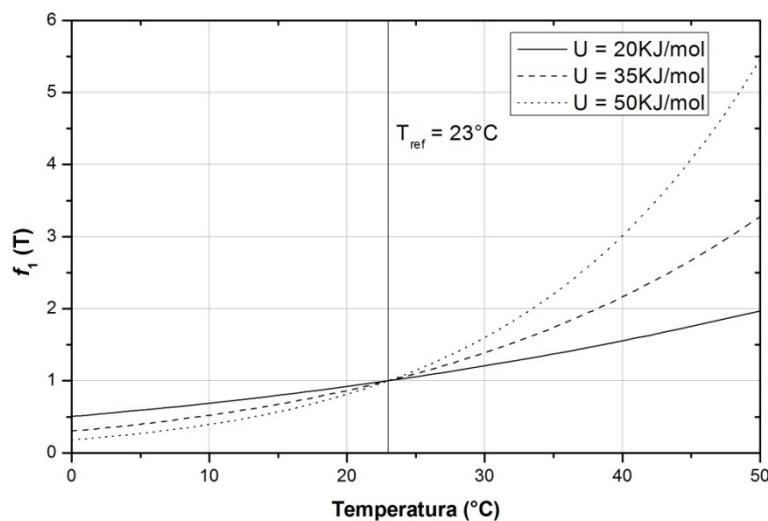


Figura 3.7 – Efeito da dependência do coeficiente de difusão efetivo de cloretos (D_c) em relação à temperatura, para vários níveis de energia de ativação (U).

A [Figura 3.7](#) comprova a influência desta variável com a mudança da energia de ativação e a temperatura do concreto. À medida que se aumenta a temperatura do concreto e os níveis de energia de ativação, o efeito da temperatura aumenta, a partir da temperatura de referência. Logo, regiões mais quentes tendem a apontar maior coeficiente de difusão efetiva de cloretos e, consequentemente, maior penetração de cloretos.

ii. Efeito do grau de saturação (GS) no coeficiente de difusão efetivo de cloretos

A função que expressa a dependência do coeficiente de difusão efetivo de cloretos pelo grau de saturação (GS) é dada pela [Equação 3.17](#) (GUIMARÃES; 2000; ALMENAR, 2000). O Grau de Saturação é função das propriedades do material, principalmente da porosidade do material, das condições ambientais, principalmente a umidade relativa próxima ao concreto (MEIRA, 2004). Esta relação matemática permite-nos comparar o coeficiente de difusão efetivo de cloretos em estado saturado ($GS = 100\%$) e não saturado. Facilitando a determinação do coeficiente de difusão efetivo de cloretos em estado não saturado, a partir do estado saturado (resultado coletado da maioria dos ensaios de laboratório).

$$f_2(GS) = \exp \left(n_{gs} \times (GS - 1) \right) \quad \text{Equação 3.17}$$

Onde n_{gs} é fator de redução do GS, adimensional e GS é o grau de saturação do concreto, adimensional. A [Figura 3.8](#) mostra a influência desta variável com a mudança do GS do concreto e o fator de redução. À medida que se aumenta o GS, o efeito do GS aumenta até 100%, para todos os fatores de redução, indicando que o poro está saturado. Logo, concretos com maior permeabilidade e em regiões mais úmidas tendem a apresentar maior influência dessa variável.

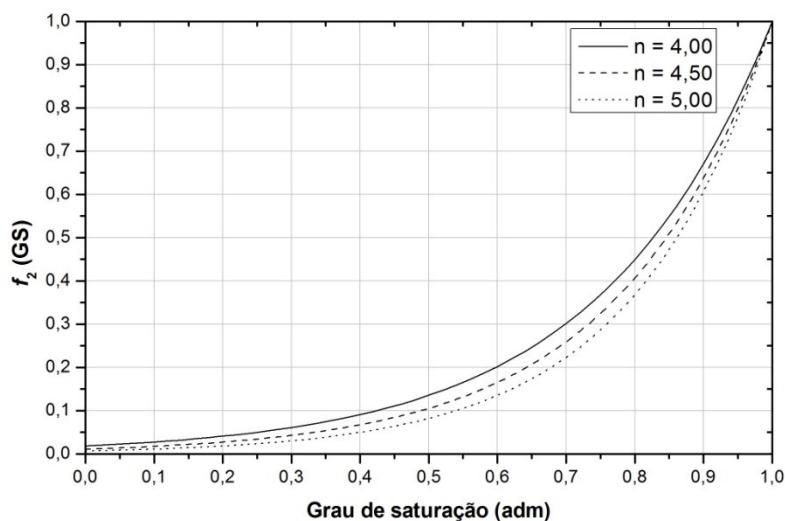


Figura 3.8 – Efeito da dependência do coeficiente de difusão efetivo de cloretos (D_c) em relação ao GS, para vários níveis de fator de redução (n).

De forma semelhante à temperatura ([Equação 3.60](#)) e a umidade relativa do ar ([Equação 3.61](#)), o comportamento do grau de saturação apresenta ciclos sazonais ao longo do ano, onde valores mais altos de GS são alternados com outros de menor intensidade. Desta forma, uma função senoidal foi ajustada à realidade dessa variável (MEIRA, 2004):

$$GS = \frac{GS_{max} + GS_{min}}{2} + \frac{GS_{max} - GS_{min}}{2} \sin \left(2\pi \frac{(t - DGS_{max})}{365} - \frac{\pi}{2} \right) \quad \text{Equação 3.18}$$

Onde GS é o grau de saturação do concreto, adimensional; GS_{max} é o grau de saturação máximo no ano, adimensional; GS_{min} é grau de saturação mínimo no ano, adimensional; DGS_{max} é o dia em que acontece o grau de saturação máximo no ano, dias; t é tempo, dias.

iii. Efeito do tempo de exposição no coeficiente de difusão efetivo de cloretos

A dependência do tempo de exposição é levada em conta pelo uso da equação obtida por Mangat e Molloy (1994). A [Equação 3.19](#) expressa matematicamente a relação, onde t_{ref} é o tempo de referência em que se obteve $D_{c,ref}$, em segundos; m é o fator de idade (*age reduction factor*), adimensional e t é tempo de exposição do concreto, em segundos. A [Figura 3.9](#) sinaliza a relação desta variável com a mudança do fator de redução da idade e o tempo de exposição do concreto.

$$f_3(t) = \left(\frac{t}{t_{ref}} \right)^{-m} \quad \text{Equação 3.19}$$

A partir da [Figura 3.9](#), verificamos que o crescimento do *age reduction factor* e do tempo de exposição tende a diminuir a ação deste efeito. Portanto, concretos com menor porosidade e com maiores tempos de exposição apresentam melhor desempenho frente à penetração por cloretos. Nos trabalhos de Mangat e Moloy (1994) e Yu *et al.* (2019b), é possível observar valores de m para diversas dosagens de concreto. Já no trabalho de Lu *et al.* (2015), visualizam-se alguns modelos para determinação desse fator em função principalmente da relação água/cimento e da concentração de alguns produtos de hidratação do cimento.

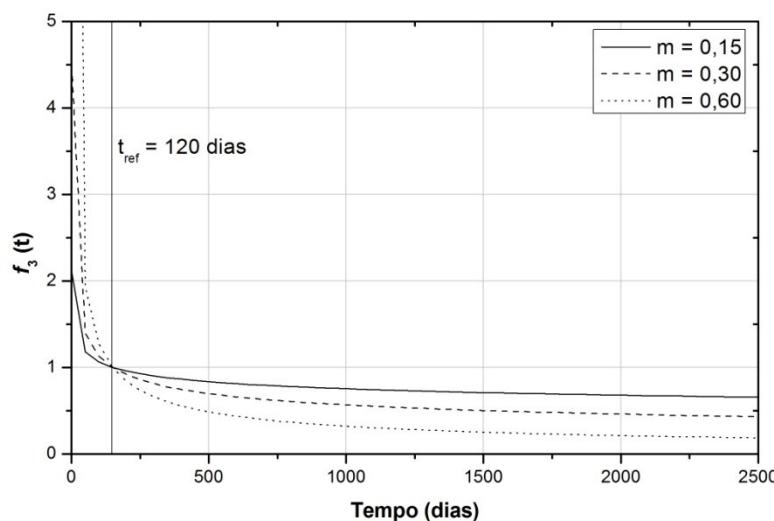


Figura 3.9 – Efeito da dependência do coeficiente de difusão efetivo de cloretos (D_c) em relação ao tempo de exposição, para vários níveis de fator de redução da idade (m).

iv. Efeito da umidade relativa no coeficiente de difusão efetivo de cloreto

Por fim, apresentemos a última variável acoplada ao modelo proposto por Saetta *et al.* (1993). A [Equação 3.20](#) mostra matematicamente a relação entre o efeito e a umidade.

$$f_4(h) = \left[1 + \frac{(1-h)^4}{(1-h_c)^4} \right]^{-1} \quad \text{Equação 3.20}$$

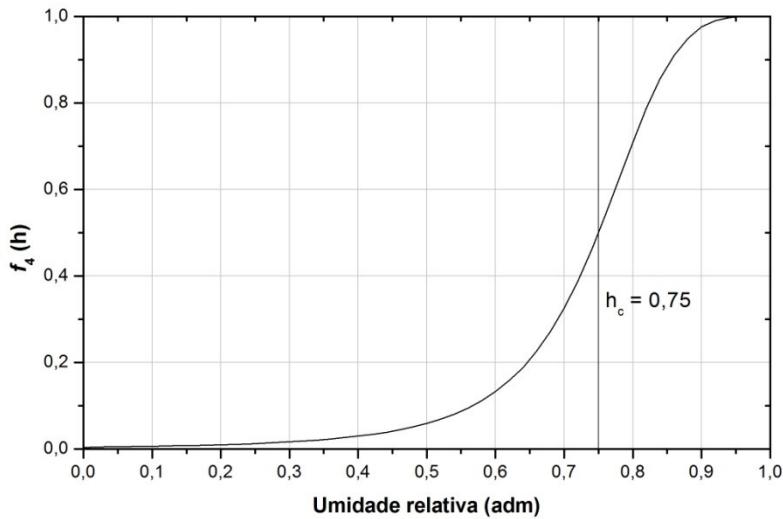


Figura 3.10 – Efeito da dependência do coeficiente de difusão efetivo de cloreto (D_c) em relação à variação de umidade relativa do concreto.

Onde h_c é a umidade relativa, onde D_c cai pela metade entre a umidade mínima e máxima, adimensional. Já a [Figura 3.10](#) indica graficamente a interferência desta variável, pois concretos mais úmidos tendem a apresentar melhor influência desta variável.

v. Efeito pele ou resistência

A “pele” do concreto é uma zona compreendida por poucos milímetros após a superfície do concreto. Esta zona tem composição diferenciada das camadas mais internas, pois apresenta uma concentração de pasta/argamassa bem mais acentuada que as demais, devido ao contato com a forma e a vibração no ato da concretagem. Outros fatores também influenciam para a diferenciação desta camada, tais como a carbonatação, precipitação de brucita ou a aplicação de pinturas de revestimento (ANDRADE, 1997).

Este efeito é bem visualizado nos perfis típicos de duas zonas, exposta na [Figura 3.4](#), onde se observaram concentrações de cloreto mais elevadas a poucos milímetros da superfície, evidenciando a formação de duas camadas distintas ([Figura 3.11](#)). Estas camadas são caracterizadas por apresentarem comportamentos diferentes, repercutindo diretamente na formação do perfil de cloreto ao longo do tempo.

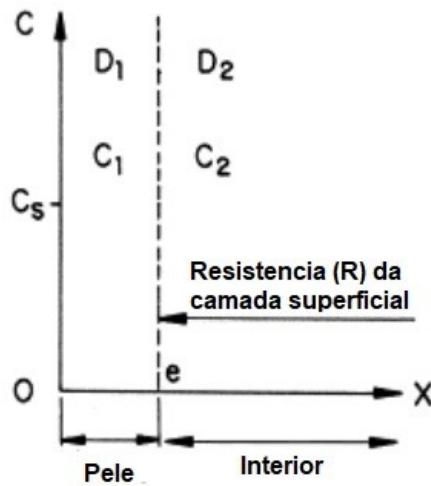


Figura 3.11 – Representação genérica da formação das camadas de pele e interior (ANDRADE, 1997).

Este modelo é representado matematicamente considerando valores diferentes para a difusividade da camada superficial e do interior, conforme denota a [Equação 3.21](#) (ANDRADE, 1997).

$$D_{c,ref \text{ pele}} = \omega \times D_{c,ref \text{ interior}} \quad \text{Equação 3.21}$$

Onde $D_{c,ref \text{ pele}}$ é o coeficiente de difusão efetivo de cloretos nas condições de referência na camada de pele, em m^2/s ; $D_{c,ref \text{ interior}}$ é o coeficiente de difusão efetivo de cloretos nas condições de referência no interior do concreto, em m^2/s ; e ω é o fator redutor ou amplificador da difusividade devido ao efeito pele, adimensional.

Caso $\omega > 1$ acontece quando a superfície está carbonatada ou os cloretos penetraram por succção capilar. Já $\omega < 1$ acontece quando alguma barreira é formada na superfície como uma pintura ou a precipitação de brucita (ANDRADE, 1997). Diante do modelo matemático descrito, percebe-se que apenas quando $\omega < 1$ induziria a desvios significativos no perfil de cloretos para aumento no tempo de vida útil da estrutura ([Figura 3.12](#)).

A espessura da “pele” atua como agente potencializador de ω . Dando seguimento, quanto maior a espessura da pele, maior será a penetração de cloretos, quando $\omega > 1$, ou menor será a penetração de cloretos, quando $\omega < 1$, se comparado a um concreto sem efeito pele ($\omega = 1$). Este comportamento pode ser visto na [Figura 3.12](#), onde concretos simulados a partir da Segunda Lei de Fick apresentam diferentes perfis de cloretos para diversas espessuras e fatores de difusividade de pele.

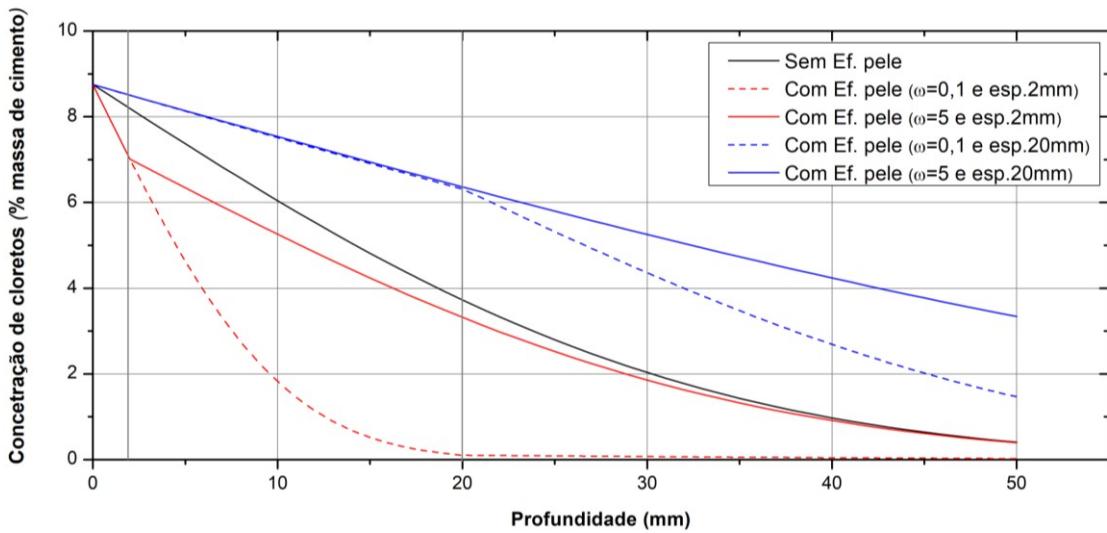


Figura 3.12 – Exemplo de perfil de cloretos obtidos a partir do emprego da [Equação 3.5](#) para diferentes tipos de concreto (consumo de cimento = 400kg/m³ e D_{ns}=1,00e⁻¹³m²/s) submetidos à concentração de 1M, considerando o efeito pele a 2 e 20mm.

...

A [Figura 3.13](#) assinala o comportamento do coeficiente de difusão efetivo de cloretos (D_c) após ação das variáveis de temperatura, tempo e umidade relativa. Para o cálculo, foram utilizados o *software* proposto neste trabalho e os valores impostos por Martin-Perez *et al.*(2001) no seu estudo numérico de transporte de massa. A influência do grau de saturação foi negligenciada na apresentação do resultado, em função de não ter sido alvo de estudo no trabalho supracitado.

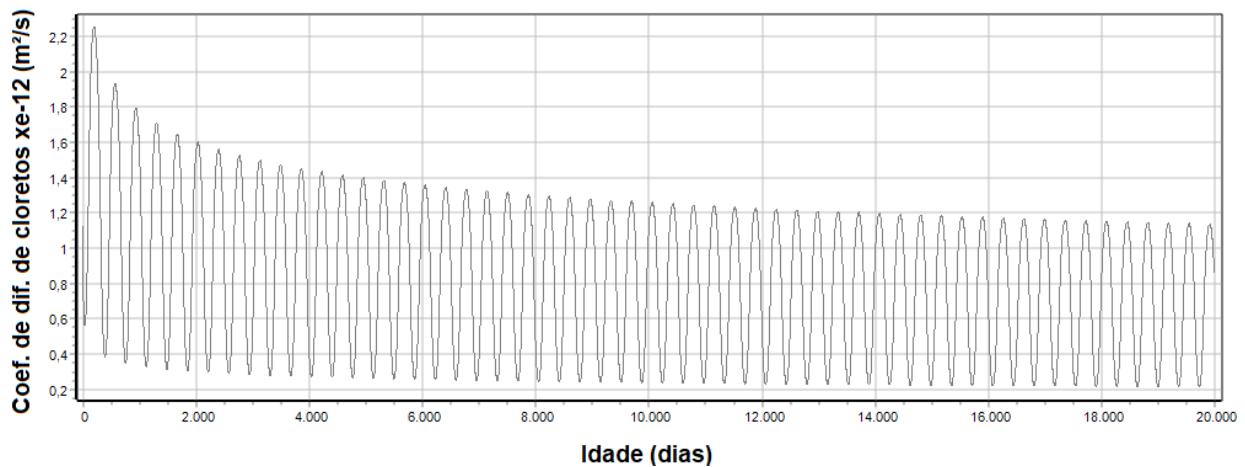


Figura 3.13 – Comportamento do coeficiente de difusão efetivo de cloretos (D_c) em relação à variação de temperatura, umidade relativa e tempo, com base nos dados usados por Martin-Perez *et al.*(2001).

A partir da [Figura 3.13](#), identificamos que o coeficiente de difusão efetivo de cloretos reduz com o tempo, de maneira mais acentuada, nas primeiras idades. Já as oscilações assinalam a forte influência das condições climáticas na variável (temperatura e umidade relativa). Porém, com o passar do tempo, essas oscilações vão reduzindo, motivadas principalmente pelo refinamento dos

poros que dificulta a entrada de umidade e transferência de calor. Este tema será discutido mais adiante.

3.2.1.2 Combinação de cloretos

Conforme descrito na [Equação 3.11](#), a quantidade de cloretos presente no concreto é a soma dos cloretos livres com os que estão combinados de alguma forma com o concreto. Sabendo disso, é possível descrever uma relação (isoterma) onde a concentração de cloretos combinados é função da concentração de cloretos livres, aceitando que o processo químico de fixação acontece de forma imediata.

No modelo aqui utilizado, a combinação de cloretos foi aplicada com uma simplificação ao método, no qual a relação entre cloretos combinados e livres é dada como um fator de redução no coeficiente de difusão, de acordo com a [Equação 3.13](#).

Esse fator de redução é chamado de capacidade de fixação $\left(\frac{\partial C_{cob}}{\partial C_{liv}}\right)$, onde a inclinação da relação (isoterma) comprova quanto dos íons cloretos livres foram combinados. Para levar em conta a capacidade de ligação de cloreto na solução da [Equação 3.14](#), as isotermas têm que ser determinadas experimentalmente para cada tipo de matriz cimentícia.

O maior problema na predição da capacidade de fixação da matriz cimentícia é sua alta suscetibilidade à temperatura, tendo em vista que a maioria das isotermas foi desenvolvida em condição de laboratório (20-25°C). Estudos na área comprovam que um aumento na temperatura reduz a quantidade de cloretos combinados e aumenta a concentração de cloretos livres nos poros do concreto (DOUSTI e SHEKARCHI, 2015; ZIBARA; 2001; LARSEN, 1998). A seguir são apresentados os tipos de relações mais usadas pela literatura.

i. Caso em que não há fixação de cloretos

Neste caso, $C_{cob} = 0$, portanto $\frac{\partial C_{cob}}{\partial C_{liv}} = 0$, o que resulta em $D_c^* = D_c$. Logo não há diferença entre cloretos totais e livres.

ii. Isoterma linear

Para este caso, adota-se uma função linear como representação da relação ([Equação 3.22](#)). A capacidade de combinação é igual a uma constante, como ilustra a [Equação 3.23](#). Indica-se o uso deste tipo de isoterma para baixas concentrações, pois à medida que os cloretos penetram o

concreto a capacidade de combinação tende a zerar. Tal fato não é encontrado nesse tipo de isoterma ([Figura 3.5](#)). Este modelo foi inicialmente proposto por Tutti (1982) e deve ser empregado sob certos cuidados. Por fim, o coeficiente de difusão é explicitado na [Equação 3.24](#).

$$C_{Cob} = \alpha C_{liv} \quad \text{Equação 3.22}$$

$$\frac{\partial C_{Cob}}{\partial C_{liv}} = \alpha \quad \text{Equação 3.23}$$

$$D_c^* = \frac{D_c}{(1 + \alpha/w_e)} \quad \text{Equação 3.24}$$

Onde α é a constante de combinação, em m^3 de solução do poro/ m^3 de concreto.

iii. Isoterma de Langmuir

A Isoterma de Langmuir segue a relação polinomial dada pela [Equação 3.25](#). A capacidade de fixação encontra-se na [Equação 3.26](#). Essa isoterma aponta limitações para valores superiores a $1,775 \text{ kg/m}^3$ (TANG e NILSON, 1993). Por outro lado, Glass e Buenfeld (2000) trabalharam com concentrações acima de $37,5 \text{ kg/m}^3$ e não constataram limitações. Diferentemente da isoterma linear, a capacidade de ligação da Isoterma de Langmuir tende a se aproximar de zero à medida que a concentração de cloretos livres aumenta, demonstrando que o concreto não tem capacidade infinita de combinação ([Figura 3.14](#)). O coeficiente de difusão é exibido na [Equação 3.27](#).

$$C_{Cob} = \frac{\alpha C_{liv}}{1 + \beta C_{liv}} \quad \text{Equação 3.25}$$

$$\frac{\partial C_{Cob}}{\partial C_{liv}} = \frac{\alpha}{(1 + \beta C_{liv})^2} \quad \text{Equação 3.26}$$

$$D_c^* = \frac{D_c}{1 + \frac{\alpha}{w_e(1 + \beta C_{liv})^2}} \quad \text{Equação 3.27}$$

Onde α é constante de combinação direta, em m^3 de solução do poro/ m^3 de concreto, e β é a constante de combinação indireta, em m^3 de solução do poro/kg.

iv. Isoterma de Freundlich

Por fim, apresentamos a Isoterma de Freundlich ([Equação 3.28](#)). Cuja capacidade de combinação é dada pela [Equação 3.29](#). Aconselha-se o uso desta isoterma para concretos submetidos à alta concentração de cloretos, pois seu ajuste é mais bem indicado para valores de combinação de cloretos superiores a $0,355 \text{ kg/m}^3$.

$$C_{Cob} = \alpha C_{liv}^{\beta} \quad \text{Equação 3.28}$$

$$\frac{\partial C_{Cob}}{\partial C_{liv}} = \alpha \beta C_{liv}^{\beta-1} \quad \text{Equação 3.29}$$

$$D_c^* = \frac{D_c}{1 + \frac{1}{w_e} \alpha \beta C_{liv}^{\beta-1}} \quad \text{Equação 3.30}$$

Onde α é constante de combinação direta, em m^3 de solução do poro/ m^3 de concreto, e β é a constante de combinação indireta, em m^3 de solução do poro/kg. Nos trabalhos de Dousti e Shekarchi (2015), Zibara (2001), Glass e Buenfeld (2000), Larsen (1998) e Tang e Nilson (1993) é possível encontrar uma gama de constantes que representam as isotermas acima discutidas para diversos tipos de cimento, adições e relações água/cimento.

A [Figura 3.14](#) ilustra ajustes das isotermas acima citadas (Linear, Langmuir e Freundlich) aos dados experimentais coletados em amostras de pasta de cimento sem adição, com fator a/c de 0,4 e expostos a íons cloretos à temperatura de 22°C. Para altas contrações de cloretos livres (acima de 0,5 mg de cloretos por grama de amostra), o ajuste à Isoterma de Freundlich foi mais eficaz do que os demais modelos de combinação de cloretos. Abaixo deste valor, não é possível se concluir com muita clareza que a Isoterma de Langmuir tem melhor ajuste, pois há apenas dois dados.

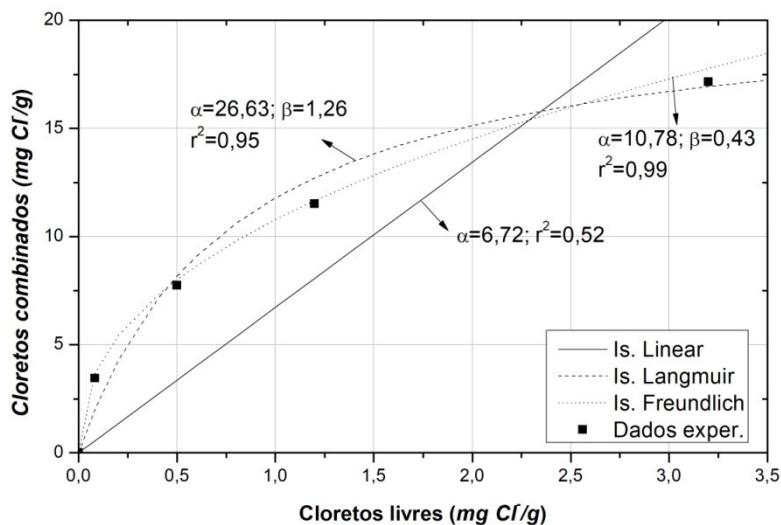


Figura 3.14 – Comportamento das isotermas de combinação de cloretos para pastas moldadas com cimento sem adição, a/c = 0,4 e exposto a 22°C. **Fonte:** Dousti e Shekarchi (2015).

3.2.1.3 Condições de contorno (CC)

A resolução da [Equação 3.14](#) exige a definição das condições de contorno na superfície do concreto e no tempo. Como visto na [Figura 3.6](#), a evolução matemática das modelagens de

previsão de iniciação à corrosão provocadas por cloretos sempre esbarrou nas especificações destas condições, tendo em vista que elas são pontos cruciais para a estimativa da propagação dos cloretos no interior do concreto. É a partir da condição de contorno imposta à [Equação 3.14](#), que se estima a concentração de cloretos na superfície através da concentração de cloretos no ambiente ao qual a estrutura está submetida.

Basicamente, a primeira condição de contorno a ser estipulada é a concentração de cloretos no concreto no instante zero ($t = 0\text{seg}$), ou seja, no ato da concepção da estrutura. É comum em estudos de previsão de penetração de cloretos supor que não há quantidade significativa de cloretos no concreto ($C_{tot}(x, y, t \rightarrow 0s) = 0\text{Kg/m}^3$), a menos que os cloretos tenham sido incorporados na mistura do concreto ou na fabricação do cimento. Porém, matematicamente, pode-se estimar nesta primeira condição de contorno qualquer função contorno da profundidade.

A segunda condição de contorno a ser imposta não é mais no ato da fabricação da estrutura, e sim com o ataque dos cloretos advindos do ambiente no qual está submetido. Matematicamente, há quatro condições de contorno praticadas em problemas de Equações Diferenciais Parciais (EDP):

i. Condição de contorno de Dirichlet:

Este tipo de condição de contorno (CC) impõe um valor constante para a concentração superficial de cloretos (C_s) para todo x e y em determinado tempo (ZIENKIEWICZ e MORGAN, 1983). A [Equação 3.31](#) e os primeiros modelos de previsão de penetração de cloretos usaram esse tipo de condição de contorno, devido à facilidade de aplicação. Sendo assim, os modelos de difusão de cloreto geralmente calculam esta CC como ajuste às curvas contidas na [Tabela 2.5](#). Matematicamente, isso implica que o valor da concentração na superfície é igual ao valor da função de ajuste num dado tempo ([Equação 3.31](#)).

$$C_{liv}^s(x, y, t) = f(x, y, t) \rightarrow f(x, y, t) = C_{ext} = C_{liv}^s(t), \quad \forall x \text{ e } y \in \partial\Omega \quad \text{Equação 3.31}$$

Onde C_{liv}^s é a concentração de cloretos livres na superfície, em kg/m^3 de água no poro, $f(x, y, t)$ é a função ou a constante que representa o valor da concentração de cloretos na superfície no momento t , em kg/m^3 de água no poro; e C_{ext} é a concentração de cloretos no limite entre o ambiente externo e a superfície do concreto, em kg/m^3 de solução.

ii. Condição de Contorno de Neumann:

Enquanto a CC de Dirichlet especifica um valor constante no espaço para o contorno, a condição de contorno de Neumann especifica o valor da derivada normal à função no domínio, ou seja, o

valor do fluxo no local (NITHIARASU *et al.*, 2016; ZIENKIEWICZ e MORGAN, 1983). A [Equação 3.32](#) define matematicamente a condição de contorno.

$$q_{cl}^s = f(x, y, t), \quad \forall x, y \text{ e } t \in \partial\Omega \quad \text{Equação 3.32}$$

Onde q_{cl}^s é o fluxo normal de cloretos na superfície do concreto, em $\text{kg/m}^3 \cdot \text{s}$. No transporte de massa, essa condição de contorno tem pouca aplicabilidade, já que não há conotação física com a realidade para transporte por difusão e convecção. Ela é amplamente empregada em transporte de energia, como a temperatura.

iii. Condição de contorno de Robin:

A condição de contorno de Robin é uma combinação ponderada das condições de contorno de Dirichlet e das condições de contorno de Neumann, ou seja, impõe valores de uma função e os valores de sua derivada na fronteira do domínio (NITHIARASU *et al.*, 2016). É a condição de contorno mais aplicada em modelos complexos de previsão de vida útil em ambientes com ação de cloretos (BASTIDAS-ARTEAGA *et al.*, 2011; MARTIN-PEREZ, 1999; SAETTA *et al.*, 1993).

Ela simula o ingresso de cloretos no concreto aplicando um fluxo cruzando a superfície do concreto (SAETTA *et al.*, 1993). A [Equação 3.33](#) denota a condição de contorno para difusão e convecção.

$$q_{cl}^s = \underbrace{B_c(C_{liv}^s - C_{ext})}_{\text{difusão}} + \underbrace{C_{ext} \times q_h^s}_{\text{convecção}}, \quad \forall x, y \text{ e } t \in \partial\Omega \quad \text{Equação 3.33}$$

Onde q_{cl}^s é o fluxo normal de cloretos na superfície do concreto, em $\text{kg/m}^3 \cdot \text{s}$; B_c é o coeficiente de transferência de cloretos na superfície, em m/s ; C_{liv}^s é a concentração de cloretos livres na superfície, em kg/m^3 de água no poro; C_{ext} é a concentração de cloretos no limite entre o ambiente externo e a superfície do concreto, em kg/m^3 de solução; e q_h^s é o fluxo de entrada de umidade na superfície do concreto, em $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$.

O coeficiente de transferência age como um pequeno freio ($B_c < 1$) ou acelerador ($B_c > 1$) no equilíbrio entre a transferência de cloretos da atmosfera para superfície exposta (MARTIN-PEREZ, 1999). Portanto se $B_c \rightarrow 0$, a superfície do concreto seria perfeitamente selada e se $B_c \rightarrow \infty$, a superfície teria condições perfeitas de transferência (SAETTA *et al.*, 1993).

Todavia Martin-Perez (1999) não observou diferenças significativas nos perfis de cloretos simulados com B_c variando entre $3e^{-7}$ a 6 m/s para várias idades (1, 5 e 25 anos). O valor de B_c adotado nos estudos aqui analisados foi de 1 m/s (BASTIDAS-ARTEAGA *et al.*, 2011;

MARTIN-PEREZ, 1999; SAETTA *et al.*, 1993). Estudos experimentais realizados por Saetta *et al.* (1993) observaram valores entre 1 e 6 m/s.

Durante o processo de secagem, o fluxo de umidade que tende a sair do concreto também gera um fluxo convectivo com mesmo sentido (do interior para a superfície do concreto). Teoricamente, a atmosfera marinha retiraria cloretos de dentro do concreto. Porém, neste caso, o fluxo convectivo é zerado, pois os cloretos permanecerão na superfície do concreto à medida que a água evapora (SAETTA *et al.*, 1993).

...

No capítulo 6, nesse raciocínio, observam-se diferentes curvas de aproximação para o cálculo da concentração de cloretos no limite entre ambiente de exposição e a superfície do concreto (C_{ext}). Vários parâmetros receberam a devida atenção, tais como: tempo de exposição ao ambiente agressivo, tipo de ambiente de exposição, relação água/cimento, consumo de cimento, distância do mar, etc. O objetivo de considerar vários parâmetros é refinar as condições de contorno, encaradas hoje como a grande dificuldade de precisão dos modelos de previsão de vida útil.

3.2.2 Transporte de umidade

O transporte de umidade no concreto geralmente envolve a combinação de um ou mais mecanismos de transporte, incluindo a difusão de água, absorção e permeabilidade. Um modelo completo de transporte de umidade deve incluir a transferência de água, de vapor e de ar no concreto (BERTOLINI *et al.*, 2004). Em pasta de cimento, já está bem estabelecido que a umidade se desloca das regiões mais abundantes para as regiões mais secas. Isto sugere que o fluxo de umidade é proporcional ao gradiente de umidade.

Teoricamente, o fluxo de umidade no concreto pode ser abordado como um problema baseado no balanço de massa e energia do sistema ou como uma formulação simples da Segunda Lei de Fick ou da Lei de Darcy (XI *et al.*, 1994). Neste estudo, utilizou-se a abordagem baseada na Segunda Lei de Fick, onde o transporte de umidade pode ser expresso em termos de umidade relativa do poro, como sinaliza a [Equação 3.34](#).

$$\frac{\partial w_e}{\partial t} = \frac{\partial w_e}{\partial h} \times \frac{\partial h}{\partial t} = \operatorname{div}(D_h \vec{V}(h)) + \frac{\partial h_s}{\partial t} + K \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{Equação 3.34}$$

Onde w_e é a concentração de água evaporável na camada no tempo t , em m^3 de água/ m^3 de concreto; D_h é o coeficiente de difusão de umidade efetivo, em m^2/s ; h é a umidade relativa no poro do concreto, adimensional; $\partial h_s / \partial t$ é a capacidade de variação da umidade relativa devido à

autodessecção, em 1/s; K é o coeficiente higrotérmico, em $1/{}^\circ\text{C}$; $\partial T/\partial t$ é a capacidade de variação da temperatura ao longo do tempo, em ${}^\circ\text{C}/\text{s}$.

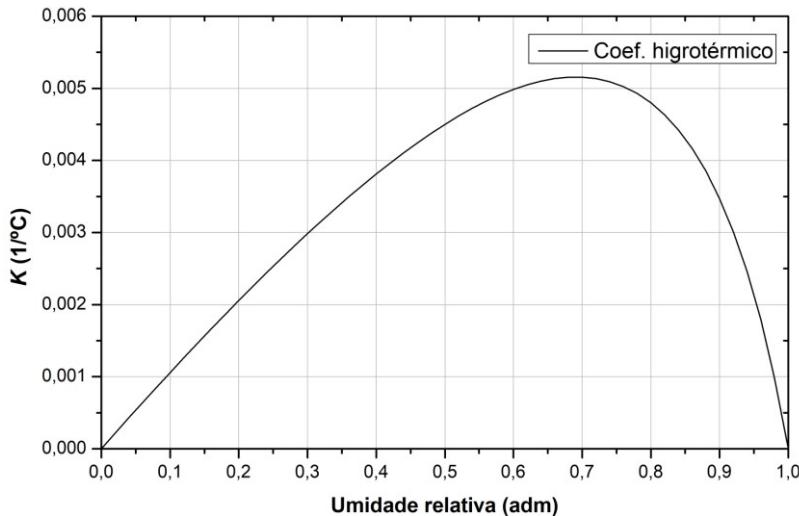


Figura 3.15 – Valor do coeficiente higrotérmico (K) em relação à variação de umidade relativa do concreto.

Em concretos convencionais, a variação da umidade devido à autodessecção é muito pequena e pode ser negligenciada, mesmo que a hidratação do concreto não tenha finalizado (XI *et al.*, 1994). Já o valor do coeficiente higrotérmico pode ser assumido, simplificadamente, como (BAZANT e NAJJAR, 1972):

$$K = 0,0135 \times \frac{h \times (1 - h)}{1,25 - h} \quad \text{Equação 3.35}$$

A Equação 3.35 foi obtida a partir de modelo empírico de amostras de concretos selados. A Figura 3.15 indica variação do coeficiente higrotérmico em relação à umidade relativa do poro do concreto, demonstrando que independentemente da temperatura, a umidade do poro será sempre 0 (zero) se ele estiver completamente seco ou 1 (um) se ele estiver completamente saturado. Por fim, a equação que governa o transporte de massa no concreto pode ser reduzida a:

$$\frac{\partial w_e}{\partial h} \times \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial h}{\partial y} \right) + K \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{Equação 3.36}$$

3.2.2.1 Coeficiente de difusão de umidade

Assim como o coeficiente de difusão de cloretos, o coeficiente de difusão de umidade não é uma constante durante toda a vida útil da estrutura. Este parâmetro é influenciado pela temperatura, pela umidade relativa do poro e pelo grau de hidratação (Equação 3.37).

$$D_h = D_{h,ref} \times g_1(T) \times g_2(h) \times g_3(t_e) \quad \text{Equação 3.37}$$

Onde $D_{h,ref}$ é o coeficiente de difusão de umidade nas condições de referência, em m^2/s ; $g_1(T)$ é a função que considera a dependência da temperatura, adimensional; $g_2(h)$ é a função que considera a dependência da umidade relativa no poro do concreto, adimensional; e $g_3(t_e)$ é a função que considera a dependência do grau de hidratação, adimensional.

Segundo Janssen *et al.* (2007), quando um concreto parcialmente saturado é molhado, a umidade é rapidamente absorvida por meio da sucção capilar. Durante os períodos de secagem, a umidade é expelida do interior do concreto pela evaporação da água dos poros e, também, pela difusão do vapor. Assim, o coeficiente de difusão de umidade durante os períodos de secagem e umedecimento deve ser diferente ([Equação 3.38](#)).

$$D_{h,ref} = \begin{cases} D_{h,sec} & \rightarrow \text{durante a secagem} \\ D_{h,um} & \rightarrow \text{durante a umectação} \end{cases} \quad \text{Equação 3.38}$$

Onde $D_{h,sec}$ é o coeficiente de difusão de umidade no período de secagem, em m^2/s , e $D_{h,um}$ é o coeficiente de difusão de umidade no período de umedecimento, em m^2/s .

i. Efeito da temperatura no coeficiente de difusão de umidade

A dependência do coeficiente de difusão de umidade pela temperatura pode ser expressa pela [Equação 3.39](#).

$$g_1(T) = \exp \left(\frac{U_h}{R} \times \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right) \quad \text{Equação 3.39}$$

Onde U_h é a energia de ativação do processo de difusão de umidade, em KJ/mol ; R é a constante universal dos gases perfeitos, $8,314 \times 10^{-3} \text{ KJ} \cdot \text{°K} \cdot \text{mol}$; T_{ref} é a temperatura de referência que se obteve $D_{h,ref}$, em $^{\circ}\text{K}$; e T é temperatura do concreto, em $^{\circ}\text{K}$. O comportamento desta variável é análogo ao da função que mostra a dependência do coeficiente de difusão efetivo de cloretos ($f_1(T)$). A função g_1 cresce com o aumento da energia de ativação, a partir da temperatura de referência ([Figura 3.7](#)).

ii. Efeito da umidade relativa no coeficiente de difusão de umidade

A [Equação 3.40](#) comprova a relação entre umidade relativa e a dependência do coeficiente de difusão de umidade (BAZANT e NAJJAR, 1972).

$$g_2(h) = \alpha_0 + \frac{1 - \alpha_0}{1 + \left(\frac{1 - h}{1 - h_c} \right)^n} \quad \text{Equação 3.40}$$

Onde α_0 é o parâmetro que representa a relação entre $D_{h,min}/D_{h,max}$, adimensional; n é o parâmetro que caracteriza a queda do D_h com a umidade, adimensional; e h_c é a umidade relativa onde D_h cai pela metade entre a umidade mínima e máxima, adimensional.

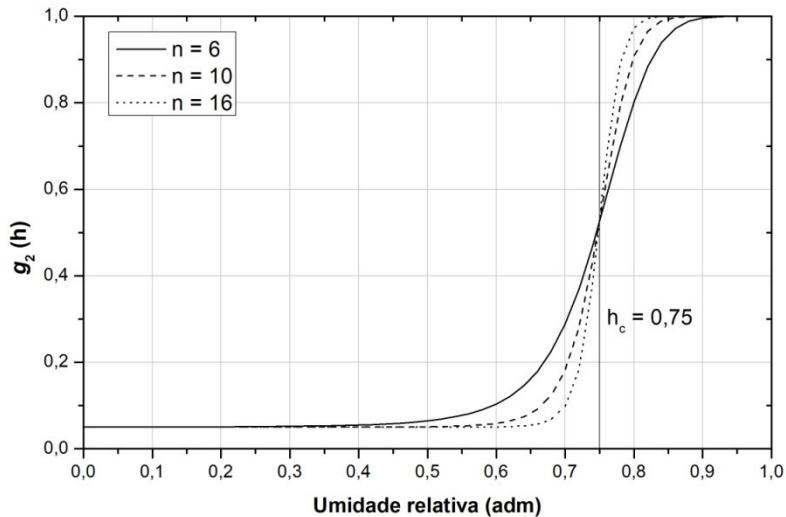


Figura 3.16 – Efeito da dependência do coeficiente de difusão de umidade (D_h) em relação à variação de umidade relativa do concreto ($\alpha_0 = 0,05$).

Os valores de α_0 e h_c variam muito pouco de concreto para concreto, geralmente se adotam 0,05 e 0,75, respectivamente. O valor de n varia entre 6 e 16. Quanto maior o valor deste parâmetro, maior a queda no coeficiente de difusão, como ilustra a [Figura 3.16](#). Concretos menos porosos apresentam maiores valores de n (BAZANT e NAJJAR, 1972).

iii. Efeito da dependência do grau de hidratação no coeficiente de difusão de umidade

A influência do grau de hidratação no coeficiente de difusão de unidade é mostrada pela [Equação 3.41](#). O grau de hidratação é caracterizado por um equivalente denominado período de hidratação (BAZANT e NAJJAR, 1972).

$$g_3(t_e) = 0,3 + \sqrt{\frac{t_{refh}}{t_e}} \quad \text{Equação 3.41}$$

Onde t_e é o período de hidratação, em dias, calculado a partir da [Equação 3.42](#); t_{refh} é o período de hidratação de referência que se obteve t_e , em dias. O valor de referência de t_{refh} é de 13 dias (SAETTA *et al.*, 1993).

$$dt_e = \beta_T \times \beta_h \times dt \quad \text{Equação 3.42}$$

Onde β_T e β_h são as funções que expressam a dependência de t_e em relação à temperatura e a umidade, calculadas a partir da [Equação 3.43](#) e [Equação 3.44](#), respectivamente. O

comportamento de β_t é semelhante ao mostrado na [Figura 3.7](#). Já o comportamento de β_h revela que o período de hidratação estagna quando a umidade é inferior a $\approx 70\%$.

$$\beta_T = \exp \left(2500 \times \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right) \quad \text{Equação 3.43}$$

$$\beta_h = [1 + (7,5 - 7,5h)^4]^{-1} \quad \text{Equação 3.44}$$

A [Figura 3.17](#) assinala a influência de todas essas variáveis com o aumento do grau de hidratação. Partindo dela, podemos concluir que o aumento no tempo de hidratação reduz consideravelmente o coeficiente de difusão de umidade. Logo, regiões mais úmidas tendem a apresentar maior período de hidratação, menor coeficiente de difusão de umidade, consequentemente, menor entrada de água e agentes agressivos com o decorrer do tempo.

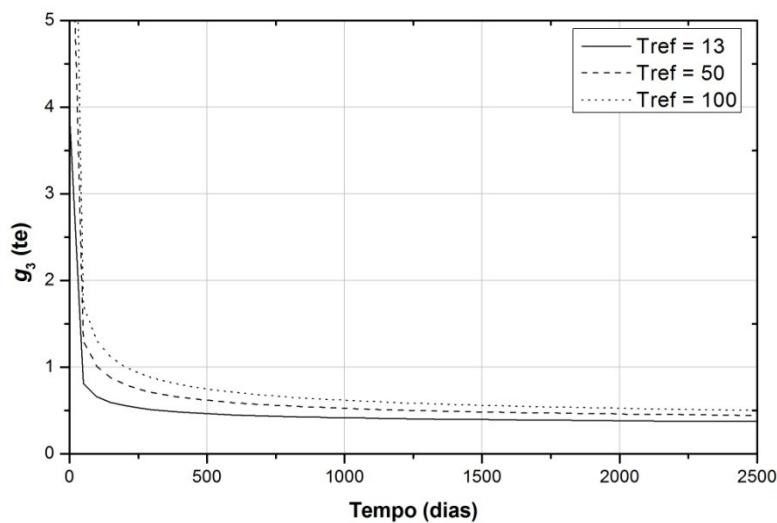


Figura 3.17 – Efeito da dependência do coeficiente de difusão de umidade (D_h) em relação ao período de hidratação, para vários tempos de referência (t_{ref}).

...

Assim como calculado para o coeficiente de difusão de cloretos ([Figura 3.13](#)), foi confeccionada a [Figura 3.18](#). Ela atesta o comportamento do coeficiente de difusão de umidade (D_h) após ação das variáveis de temperatura, umidade relativa e período de hidratação. Para o cálculo, foram utilizados o *software* proposto neste trabalho e os valores impostos por Martin-Perez *et al.*(2001) no seu estudo numérico de transporte de massa.

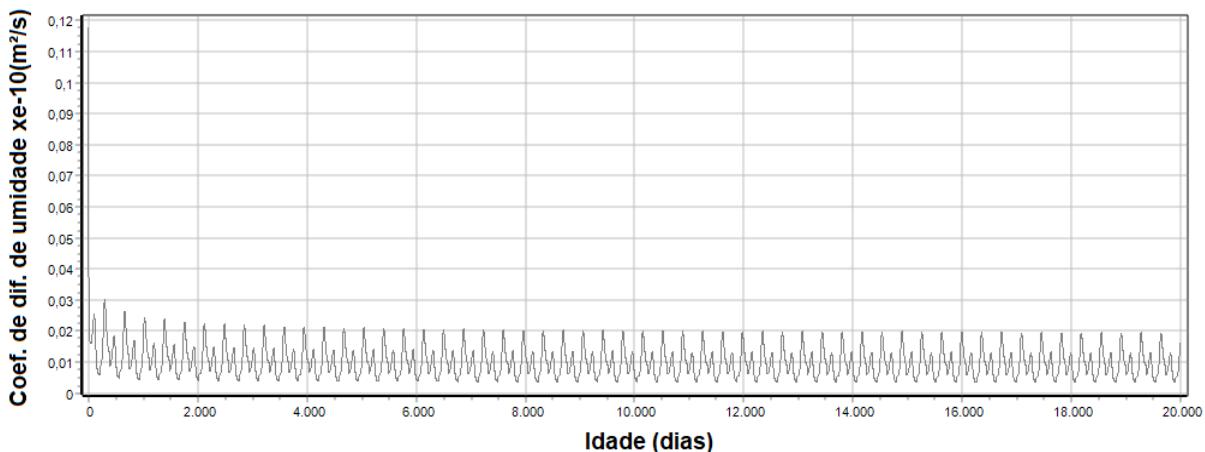


Figura 3.18 – Comportamento do coeficiente de difusão de umidade (D_h) em relação à variação de temperatura, umidade relativa e do período de hidratação, com base nos dados usados por Martin-Perez *et al.* (2001) e $D_{h,ref} = \begin{cases} 1,0e^{-11}m^2/s \text{ na secagem} \\ 1,5e^{-11}m^2/s \text{ na umectação} \end{cases}$.

Diante do resultado mostrado na [Figura 3.18](#), compreendemos que o coeficiente de difusão umidade tem forte influência do período de hidratação, de maneira mais acentuada nas primeiras idades. As condições climáticas são grandes responsáveis pelas oscilações em curto espaço de tempo, mas estas oscilações reduzem gradativamente com o passar do tempo, influenciadas pela hidratação do cimento.

A partir da [Figura 3.18](#), não se observa claramente a influência dos ciclos de molhagem e secagem no coeficiente de difusão de umidade. Em consonância com esse fato, foi confeccionada a [Figura 3.19](#), que mostra os dados apresentados na [Figura 3.18](#) nos dois primeiros anos.

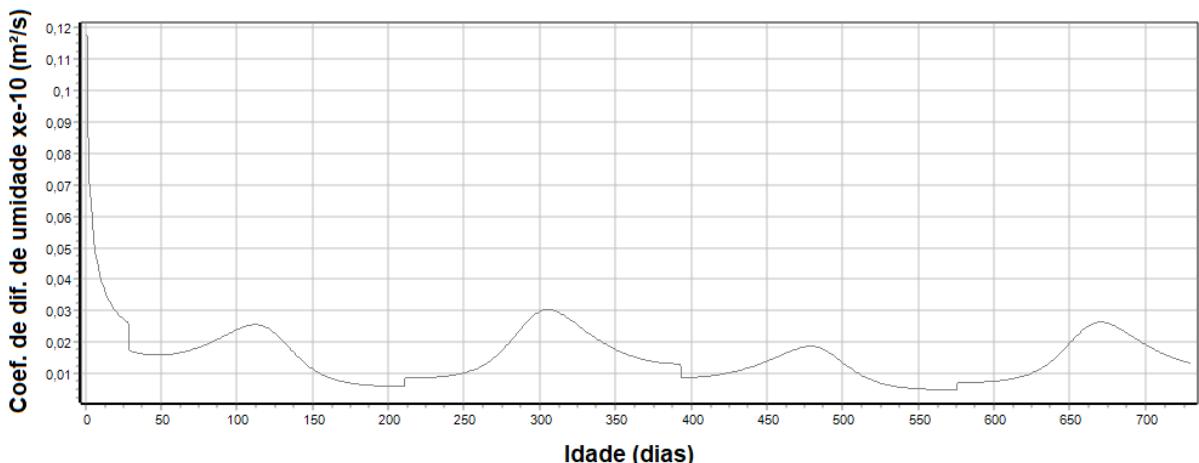


Figura 3.19 – Comportamento do coeficiente de difusão de umidade (D_h) nos dois primeiros anos de idade.

Os resultados apontam o aumento do coeficiente de difusão de umidade durante os períodos de molhagem, o que favorece o transporte de umidade e, consequentemente, de cloretos para o interior do concreto. Com o passar do tempo, a magnitude deste aumento do transporte vai sendo minimizada pela hidratação do cimento.

3.2.2.2 Isoterma de adsorção de equilíbrio

A resolução da [Equação 3.36](#) implica o cálculo da capacidade de equilíbrio da umidade $\left(\frac{\partial w_e}{\partial h}\right)$, que representa a derivada da isoterma de adsorção, obtida através de testes experimentais com ajustes em modelos matemáticos (XI *et al.*, 1994). Fisicamente, a capacidade de equilíbrio da umidade representa a facilidade ou não das diferentes fases de água encontrada no poro do concreto (vapor, capilar e adsorvida) ao se equilibrar termodinamicamente em determinado espaço de tempo (BAZANT e NAJJAR, 1972).

Há vários modelos que representam a relação entre w_e e h . O modelo mais empregado é o BSB (BRAUNAUER *et al.*, 1969) com a adequação empírica proposta por Xi *et al.* (1994). A isoterma de adsorção de acordo com o modelo BSB é dada por:

$$w_e = \frac{CkV_m h}{(1 - kh)[1 + (C - 1)kh]} \quad \text{Equação 3.45}$$

Onde os parâmetros C , k e V_m são os valores obtidos a partir de expressões semiempíricas (XI *et al.*, 1994):

$$C = \exp\left(\frac{855}{T}\right) \quad \text{Equação 3.46}$$

$$C = \frac{(1 - 1/n)C - 1}{C - 1} \quad \text{Equação 3.47}$$

$$n = \begin{cases} 1,65 \left(2,5 + \frac{15}{t_e}\right) \times N_{ct} & \text{se } a/c \geq 0,7 \\ 0,99 \left(2,5 + \frac{15}{t_e}\right) \times N_{ct} & \text{se } a/c \leq 0,3 \\ 5,5(0,33 + 2,2 \times a/c) \times N_{ct} & \text{se } t_e \leq 5 \text{ dias} \\ \left(2,5 + \frac{15}{t_e}\right) \times (0,33 + 2,2 \times a/c) \times N_{ct} & \text{se } t_e > 5 \text{ dias e } 0,3 < a/c < 0,7 \end{cases} \quad \text{Equação 3.48}$$

$$V_m = \begin{cases} 1,12 \left(0,068 - \frac{0,22}{t_e}\right) \times V_{ct} & \text{se } a/c \geq 0,7 \\ 0,985 \left(0,068 - \frac{0,22}{t_e}\right) \times V_{ct} & \text{se } a/c \leq 0,3 \\ 0,985(0,85 + 0,45 \times a/c) \times V_{ct} & \text{se } t_e \leq 5 \text{ dias} \\ \left(0,068 + \frac{0,22}{t_e}\right) \times (0,85 + 0,45 \times a/c) \times V_{ct} & \text{se } t_e > 5 \text{ dias e } 0,3 < a/c < 0,7 \end{cases} \quad \text{Equação 3.49}$$

Onde t_e é o período de hidratação, em dias; T é a temperatura do concreto, em $^{\circ}\text{C}$; a/c é a relação água/cimento, adimensional; N_{ct} é o parâmetro que depende do tipo de cimento e influencia n , adimensional; e V_{ct} é o parâmetro que depende do tipo de cimento e influência V_m ,

adimensional. Os valores de N_{ct} variam de 1,00 a 1,50 de acordo com o tipo de cimento estipulado pela norma norte-americana ASTM C-150 (ASTM, 2018). Já os valores de V_{ct} variam de 0,60 a 1,00. A Tabela 3.2 ilustra os valores de N_{ct} e V_{ct} de acordo com o tipo de cimento americano utilizado e sua equivalência com os cimentos brasileiros. A correspondência entre os cimentos americanos e brasileiros foi obtida de Mehta e Monteiro (2008). Já as Figuras 3.20, 3.21, 3.22 e 3.23 comprovam a influência do tipo de cimento, da temperatura, do período de hidratação e do fator a/c na concentração de água evaporável (w_e).

Tabela 3.2 – Valores de N_{ct} e V_{ct} de acordo com o tipo de cimento utilizado.

Cimento americano		Cimento brasileiro		N_{ct}	V_{ct}
Norma	Tipo	Norma	Tipo		
ASTM C-150	I	ABNT NBR 5732	CPI ou CPI-S	1,10	0,90
ASTM C-150	II	ABNT NBR 11578	CPII-F	1,00	1,00
ASTM C-150	III	ABNT NBR 5733	CPV-ARI	1,15	0,85
ASTM C-150	IV	ABNT NBR 13116	Baixo calor de hidratação	1,50	0,60

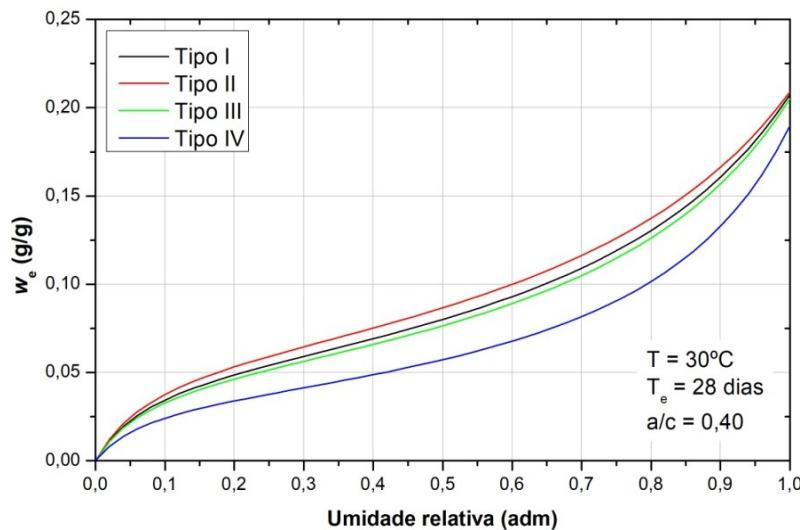


Figura 3.20 – Influência do tipo de cimento na concentração de água evaporável.

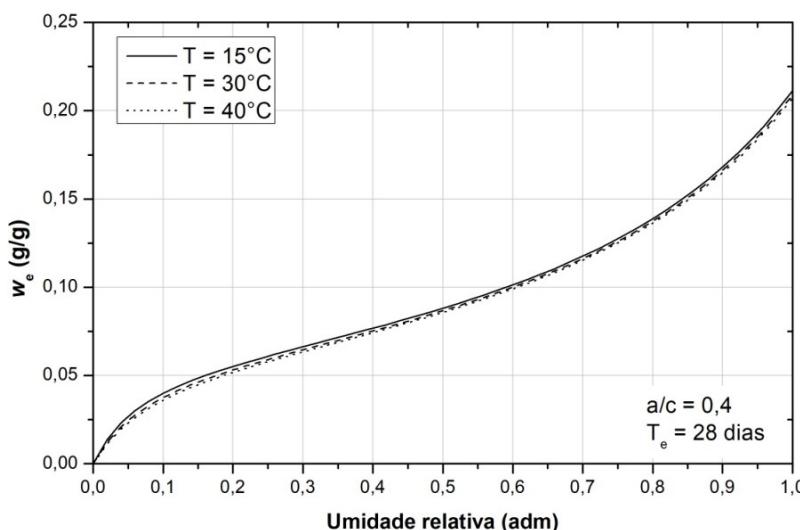


Figura 3.21 – Influência da temperatura na concentração de água evaporável, para cimento tipo II.

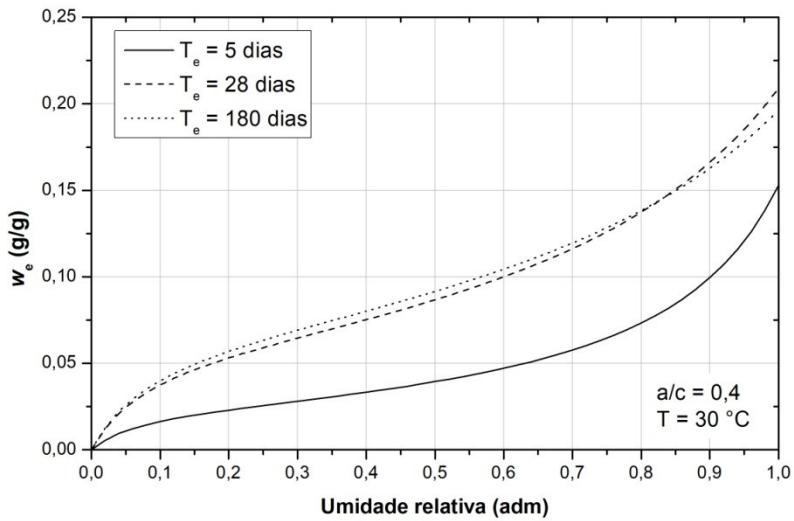


Figura 3.22 – Influência do período de hidratação na concentração de água evaporável, para cimento tipo II.

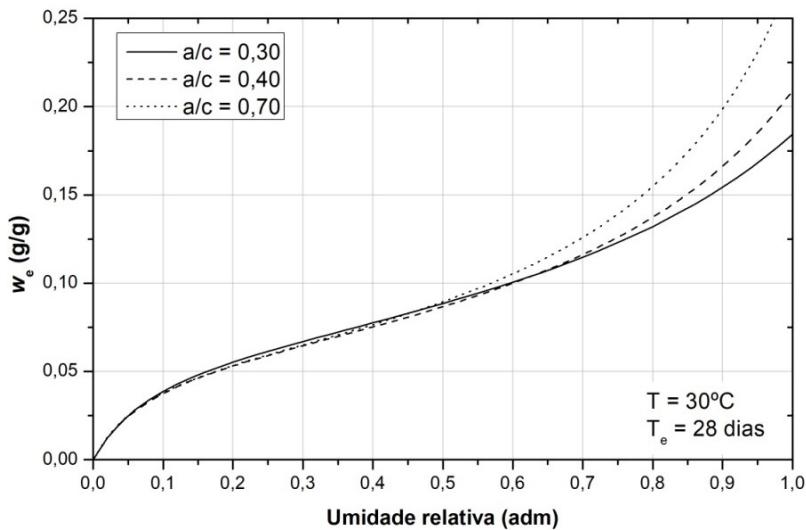


Figura 3.23 – Influência do fator a/c na concentração de água evaporável, para cimento tipo II.

Os resultados mostram que a temperatura pouco influencia na isoterma de adsorção na faixa de temperatura ambiente. O fator água/cimento atinge seus valores máximos para relações a/c acima de 0,6. O período de hidratação tem forte influência sobre a isoterma, mas tende a estabilizar com o tempo. Já para o tipo de cimento, não está claro o mecanismo de influência no comportamento da isoterma de adsorção (XI *et al.*, 1994).

Por fim, uma vez deduzida a concentração de água evaporável (w_e) em relação à umidade relativa do poro do concreto, é possível determinar a capacidade de equilíbrio da umidade $\left(\frac{\partial w_e}{\partial h}\right)$ (Equação 3.50).

$$\frac{\partial w_e}{\partial h} = \frac{CkV_m((C-1)k^2h^2 + 1)}{(1-kh)^2(1 + (C-1)kh)^2} \quad \text{Equação 3.50}$$

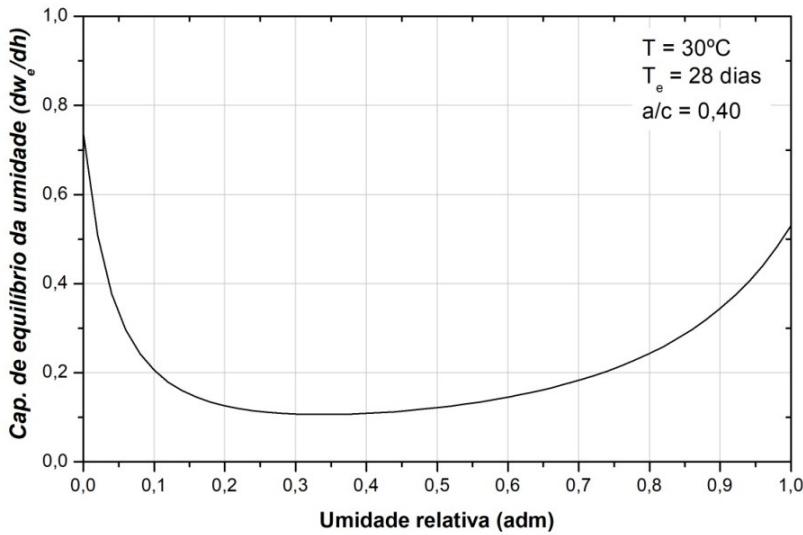


Figura 3.24 – Relação entre a capacidade de equilíbrio da umidade e a umidade relativa do poro.

Assim como w_e , $\frac{\partial w_e}{\partial h}$ depende da estrutura de poros do concreto, a estrutura de poros depende dos parâmetros básicos do material, como a relação água/cimento, tempo de cura e tipo de cimento. Diferentemente do que se pensava nos primeiros estudos, a capacidade de equilíbrio não é constante com a umidade relativa (XI *et al.*, 1994). A curva mostra uma queda para baixos valores de h . Após uma leve estabilização, a capacidade volta a crescer gradativamente com o crescimento de h , como ilustra a [Figura 3.24](#).

3.2.2.3 Condições de contorno

A primeira condição de contorno a ser estipulada é a umidade relativa em todos os pontos da sessão transversal (x e y), quando o tempo for igual a zero. A maioria dos estudos de transporte de massa de água adotou a condição saturada ou próxima da saturação (BASTIDAS-ARTEAGA *et al.*, 2011; ABABNEH *et al.*, 2003; MARTIN-PEREZ, 1999; SAETTA *et al.*, 1993), conforme mostra a [Equação 3.51](#).

$$h_{t \rightarrow 0}^s = \text{const} \approx 100\% \quad \forall x, y \in \partial\Omega, t \rightarrow 0s \quad \text{Equação 3.51}$$

Onde $h_{t \rightarrow 0}^s$ é a umidade relativa na superfície no instante ($t \rightarrow 0s$), adimensional. Após esta definição, estipulam-se as condição de contorno para o transcorrer do tempo. As condições de contorno mais usadas em modelos de transporte de umidade no interior do concreto estão apresentadas nas [Equações 3.52](#) e [3.53](#).

$$h^s = f(x, y, t) = h_{ext} \quad \forall x, y \in \partial\Omega \quad \text{Equação 3.52}$$

$$q_h^s = B_h(h^s - h_{ext}) \quad \forall x, y \in \partial\Omega \quad \text{Equação 3.53}$$

Onde $f(x, y, t)$ é a função ou constante que representa o valor da umidade na superfície do concreto no momento t ; q_h^s é o fluxo normal de umidade na superfície do concreto, em $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{s}$; B_h é o coeficiente de transferência de umidade na superfície, em m/s ; h^s é a umidade na superfície, adimensional; e h_{ext} é a umidade relativa externa, adimensional.

A [Equação 3.52](#) impõe que a umidade na superfície seja igual à umidade relativa externa a cada passo no tempo (Condição de Contorno de Dirichlet). Já a [Equação 3.49](#) impõe a Condição de Contorno de Robin, em que parte da umidade relativa do ambiente é transferida para a superfície do concreto. O valor de B_h adotado nos estudos aqui analisados variou entre 3e^{-7} e 1m/s (BASTIDAS-ARTEAGA *et al.*, 2011; MARTIN-PEREZ, 1999; AKITA *et al.*, 1997; SAETTA *et al.*, 1993).

Quando a UR externa é maior que a UR superficial, há o surgimento de um fluxo de umidade de fora para dentro do concreto ($q_h^s > 0$), tendendo a umedecer o concreto. Já quando a umidade superficial é maior que a umidade externa, há um fluxo de dentro para fora ($q_h^s < 0$), tendendo a secar o concreto.

3.2.2.4 A sazonalidade da umidade relativa ambiente

Parâmetros climatológicos, como temperatura e umidade relativa do ambiente, apresentam ciclos de maior intensidade, alternados com ciclos de menor intensidade, o que demonstra o comportamento sazonal destas variáveis (MEIRA, 2004; TANG e NILSSON, 1996). Para simular a variação sazonal da umidade relativa no meio ambiente, uma função senoidal variando no tempo foi definida. Ao modelo proposto por Tang e Nilsson (1996), foi acoplado o dia de maior valor da umidade. Como mostra a [Equação 3.54](#):

$$h_{ext} = \frac{h_{max} + h_{min}}{2} + \frac{h_{max} - h_{min}}{2} \sin\left(2\pi \frac{(t - Dh_{max})}{365} - \frac{\pi}{2}\right) \quad \text{Equação 3.54}$$

Onde h_{ext} é a umidade relativa externa, adimensional; h_{max} é a umidade relativa externa diária máxima no ano, adimensional; h_{min} é a umidade relativa externa diária mínima no ano, adimensional; Dh_{max} é o dia em que acontece a umidade relativa externa diária máxima no ano, dias; t é tempo, dias.

A [Figura 3.25](#) revela um ajuste com base na [Equação 3.54](#) aos dados meteorológicos de UR média diária na cidade de João Pessoa/PB, coletados entre jan./18 e dez./18 pela estação meteorológica automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

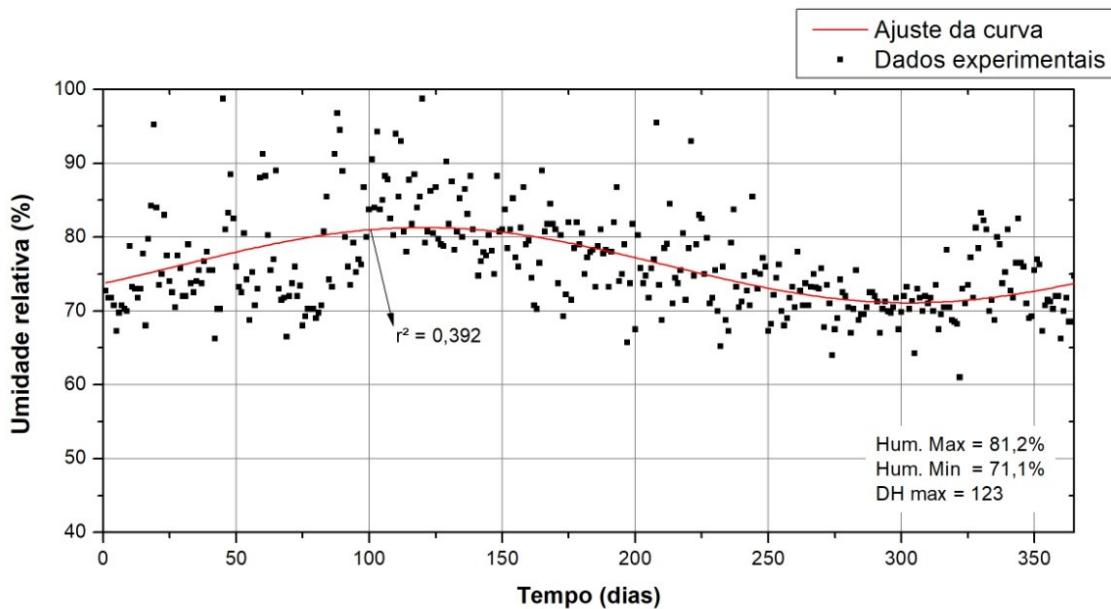


Figura 3.25 – Efeito sazonal da umidade relativa em João Pessoa, de jan./18 a dez./18, com dados meteorológicos do INMET.

O comportamento da umidade relativa (UR), ao longo do tempo, apresentou uma boa flutuação nos períodos mais quentes (janeiro a abril) e mais estáveis na entrada da primavera (agosto a outubro). Apesar de certa dispersão nos dados ($r^2=0,392$), a curva convergiu para um ajuste aceitável até certo ponto, mesmo se tratando de uma variável climatológica influenciada por diversas variáveis.

3.2.3 Transporte de calor

O fluxo de calor no concreto é calculado pelo princípio de conservação de energia aplicado à Lei de condução de calor de Fourier:

$$\rho_c c_q \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda \vec{\nabla}(T)) \quad \text{Equação 3.55}$$

Onde ρ_c é a densidade do concreto, em kg/m^3 ; C_q é a capacidade específica calorífica do concreto, em $\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$; λ é a condutividade térmica do concreto, em $\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$; e T é a temperatura do concreto, em $^\circ\text{C}$. Em duas dimensões, a equação pode ser rescrita conforme está apresentada abaixo:

$$\rho_c c_q \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad \text{Equação 3.56}$$

A condutividade térmica (λ) é definida com a resistência do material à transferência de calor. Em concretos convencionais, essa propriedade varia entre 1,2 e 3,9 $\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ (ASADI *et al.*, 2018). A densidade (ρ_p) é a propriedade do material que relaciona peso e volume. Em concretos

convencionais essa propriedade varia entre 1500 e 2100 kg/m³ (ASADI *et al.*, 2018). Já o calor específico, varia entre 690 e 1890 J/kg.°C. Essa propriedade determina a quantidade de energia necessária para aumentar em um grau a temperatura de um grama do concreto (POMIANOWSKI *et al.*, 2014).

3.2.3.1 Condições de contorno

No transporte de energia, é comum se empregar as três condições de contorno (Dirichlet, Neumann e Robin), conforme mostram as equações abaixo.

$$T^s = f(x, y, t) = T_{ext} + \Delta T_{rs} \quad \forall x, y \in \partial\Omega \quad \text{Equação 3.57}$$

$$q_T^s = f(x, y, t) \quad \forall x, y \in \partial\Omega \quad \text{Equação 3.58}$$

$$q_T^s = B_T[T^s - (T_{ext} + \Delta T_{rs})] \quad \forall x, y \in \partial\Omega \quad \text{Equação 3.59}$$

Onde $f(x, y, t)$ é a função ou constante que representa o valor da temperatura na superfície do concreto no momento t ; q_T^s é o fluxo normal de temperatura na superfície do concreto, em W/m²; B_T é o coeficiente de transferência de temperatura na superfície, em W/m².°C; T^s é a temperatura na superfície, em °C; T_{ext} é a temperatura externa, em °C; e ΔT_{rs} é o incremento na temperatura devido à incidência da radiação solar na superfície do concreto, em °C.

A Equação 3.57 impõe que a temperatura na superfície seja igual à temperatura externa a cada passo no tempo (Condição de Contorno de Dirichlet). A Equação 3.58 impõe um fluxo de calor na superfície igual uma função qualquer (Condição de Contorno de Neumann), fisicamente isso representaria uma fonte de calor (forno, incêndio, etc.).

A Equação 3.59 é a mais empregada nos modelos de transporte de cloretos, devido à maior afinidade com a realidade (Condição de Contorno de Robin). O valor de B_T adotado nos estudos aqui analisados variou entre 0,07 e 7,75 W/m².°C (BASTIDAS-ARTEAGA *et al.*, 2011; MARTIN-PEREZ, 1999; SAETTA *et al.*, 1993). O concreto ganha calor quando a temperatura externa é maior que a interna, ou seja, o fluxo de calor é positivo ($q_T^s > 0$). E perde calor quando a temperatura externa é menor que a interna, fluxo de calor é negativo ($q_T^s < 0$).

3.2.3.2 A sazonalidade da temperatura ambiente

A sazonalidade da temperatura segue o mesmo raciocínio da umidade relativa, ou seja, é comum o emprego de uma função senoidal para estimar o valor da temperatura externa com o tempo. Existe correlação entre temperatura e umidade. Neste trabalho, essa correlação é levada em consideração, onde estações mais quentes apresentam umidades relativas mais baixas, e vice-

versa. As Equações 3.60 e 3.61 atestam esse modelo acoplado tanto para a temperatura como para a umidade relativa do ambiente, semelhante ao usado por Tang e Nillson (1996).

$$T_{ext} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} + \frac{T_{max} - T_{min}}{2} \sin\left(2\pi \frac{(t - DT_{max})}{365} + \frac{\pi}{2}\right) \quad \text{Equação 3.60}$$

$$h_{ext} = \frac{h_{max} + h_{min}}{2} + \frac{h_{max} - h_{min}}{2} \sin\left(2\pi \frac{(t - DT_{max})}{365} - \frac{\pi}{2}\right) \quad \text{Equação 3.61}$$

Onde T_{ext} é a temperatura externa, °C; T_{max} é a temperatura externa diária máxima no ano, °C; T_{min} é a temperatura externa diária mínima no ano, °C; DT_{max} é o dia em que acontece a temperatura externa diária máxima no ano, dias; t é tempo, dias.

A Figura 3.26 ilustra um ajuste com base na Equação 3.60 aos dados meteorológicos de temperatura máxima diária na cidade de João Pessoa/PB, coletados entre jan./18 e dez./18 pela estação meteorológica automática do INMET. A temperatura apresentou um comportamento mais estável que a UR. Percebe-se com mais facilidade a influência das estações climáticas na temperatura, o que facilitou um melhor ajuste ($r^2=0,484$) à Equação 3.60.

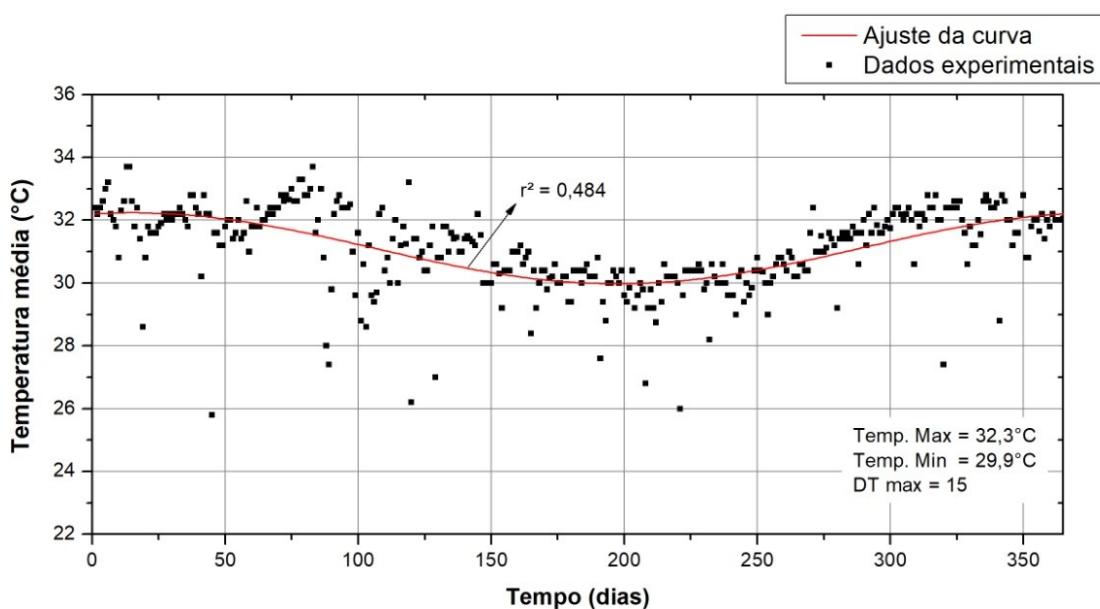


Figura 3.26 – Efeito sazonal da temperatura em João Pessoa, de jan./18 a dez./18, com dados meteorológicos do INMET.

3.2.3.3 A influência da radiação solar na temperatura externa

A radiação solar causa aumento na temperatura das estruturas (DOMINICINI e CALMON, 2017). Esta variação na temperatura estimula a mobilidade das moléculas e, consequentemente, acelera as reações químicas, favorecendo transporte através da microestrutura do concreto (ANDRADE, 2019; GOÑI *et al.*, 1989). Entretanto, o aumento da temperatura em decorrência

da radiação solar pode reduzir a umidade dos poros do concreto, influenciando também na taxa do transporte de cloretos.

O modelo de cálculo utilizado neste trabalho para mensurar o incremento da temperatura em decorrência da radiação solar foi proposto por Dominicini e Calmon (2017). Ele se baseia na energia solar total diária absorvida por uma superfície inclinada e opaca (Equação 3.62). Matematicamente, a temperatura gerada pela radiação solar é adicionada à temperatura externa.

$$\Delta T_{rs} = A_s \times \frac{I_d}{24 \times \alpha_s} \quad \text{Equação 3.62}$$

Onde ΔT_{rs} é a variação de temperatura em decorrência da radiação solar, em °C; A_s é o fator de absorção solar do material, %; I_d é a radiação solar total diária, MJ/m².dia; e α_s é o coeficiente de transmissão no contato ar-concreto, MJ/m².h°C. Na ausência de medições específicas de radiação solar para um determinado local, recomenda-se usar os dados do Atlas Solarimétrico do Brasil (TIBA *et al.*, 2000).

Dentre as variáveis que influenciam a radiação solar, podem-se destacar a posição do sol, a latitude da superfície, o ângulo de incidência dos raios solares, a quantidade de radiação que incide e a natureza da radiação (DOMINICINI e CALMON, 2017). Para cálculo da radiação solar diária e mais detalhes, recomenda-se consultar a fonte Dominicini e Calmon (2017). Já em Castellanos (1994) é possível encontrar o algoritmo para implementação computacional e um exemplo de cálculo da radiação solar diária.

De modo exemplificar o comportamento do incremento na temperatura externa em decorrência da radiação solar, foi confeccionada a Figura 3.27. Ela mostra a variação diária da temperatura externa em virtude da influência da radiação solar, para uma região perpendicular ao solo localizada em João Pessoa/PB.

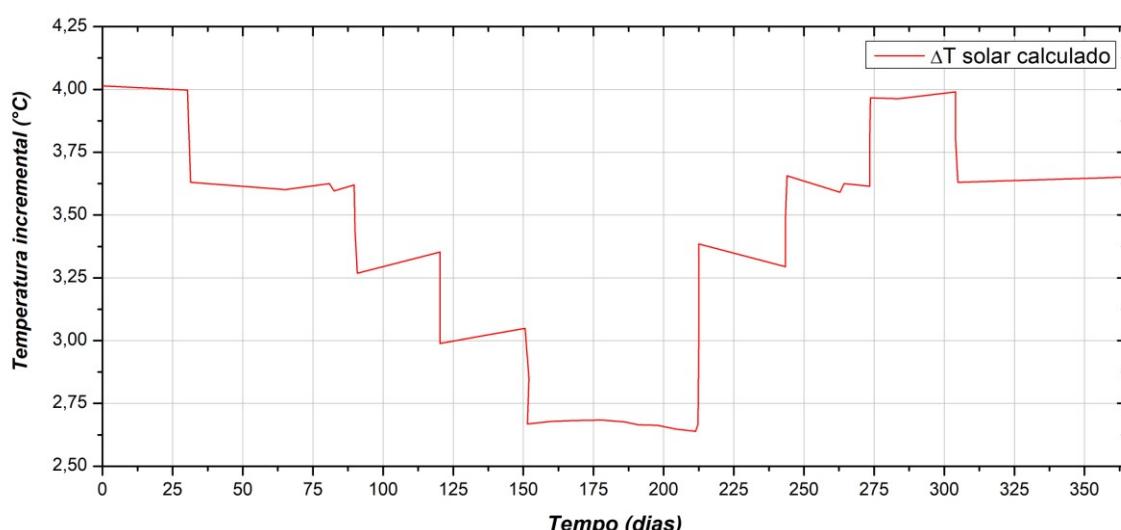


Figura 3.27 – Incremento na T_{ext} em virtude da radiação solar na cidade de João Pessoa/PB.

Os resultados apresentam um incremento na temperatura externa mais acentuada nos meses da primavera ao verão, da magnitude de 4°C, onde a incidência dos raios solares é mais intensa. Já no inverno, o aumento na temperatura é da ordem de 2,5°C.

4 CORROSÃO DE ARMADURAS DESENCADEADA POR CLORETO

Neste capítulo, veremos como a armadura se comporta após a concretagem e no decorrer da penetração dos íons cloretos. Serão discutidas a formação e a estabilidade da película passivadora, como acontece à quebra desta película após a penetração, os fatores que interferem no início e na propagação da corrosão e, por fim, em que quantidade os cloretos devem se fazer presentes nas proximidades da armadura para iniciar a corrosão.

Este capítulo servirá de embasamento teórico para analisarmos como as variáveis, combinadamente, interferem no período de iniciação à corrosão, demonstrando como a ação das condições do ambiente (discutida no capítulo 2), as propriedades do concreto, os parâmetros de projeto e o modelo matemático (discutidos no capítulo 3) determinam as conjunturas necessárias para afirmar, dentro de certa probabilidade (a serem discutido nos capítulos 5 e 6), se a barra entrou em corrosão.

Apesar de ser um assunto aplicado a diversos agentes agressivos, os temas abordados aqui se referem à corrosão por cloretos. Recomendamos cautela ao correlacioná-los a outros contextos, como a ação da carbonatação ou sulfatos, por exemplo.

4.1 FENÔMENO DA PASSIVAÇÃO DA ARMADURA

O concreto garante à armadura uma dupla proteção: uma mecânica, caracterizada pela camada de concreto entre a face externa e a armadura (cobrimento); e uma química, caracterizada pela estabilidade termodinâmica da camada passiva, formada em função do elevado pH da solução dos poros (MEIRA, 2017b; CASCUDO, 1997).

Durante a hidratação do cimento, a solução dos poros do concreto torna-se altamente alcalina, algo entre 13 e 13,8 (BERTOLINI *et al.*, 2004). No princípio, pensava-se que esta alta alcalinidade devia-se à presença de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). No entanto, com o passar do tempo, verificou-se que o elevado pH deve-se principalmente aos hidróxidos de sódio (NaOH) e potássio (KOH) (ANDRADE e PAGE, 1986). Neste ambiente, os compostos de ferro, óxidos e oxihidróxidos, são termodinamicamente estáveis. Assim, um filme fino de óxido protetor (a camada passiva) é formado espontaneamente na superfície da armadura (POURBAIX, 1987).

Este filme passivo tem apenas alguns nanômetros de espessura e é composto de óxidos de ferro com diferentes graus de hidratação e íons ferrosos (Fe^{2+} e Fe^{3+}), formado a partir de uma rápida reação eletroquímica. A camada passivante contribui para as baixíssimas taxas de corrosão da armadura, sem maiores consequências em longo prazo (BERTOLINI *et al.*, 2004; CASCUDO, 1997).

Basicamente, a estabilidade da película passivadora é garantida pela alcalinidade do concreto e o potencial eletroquímico da armadura, conforme pode ser visto na [Figura 4.1](#). Observamos, então, o equilíbrio termodinâmico de Pourbaix para o sistema Fe-H₂O a 25°C, onde a barra pode ser encontrada em estado de imunidade, passividade e corrosão.

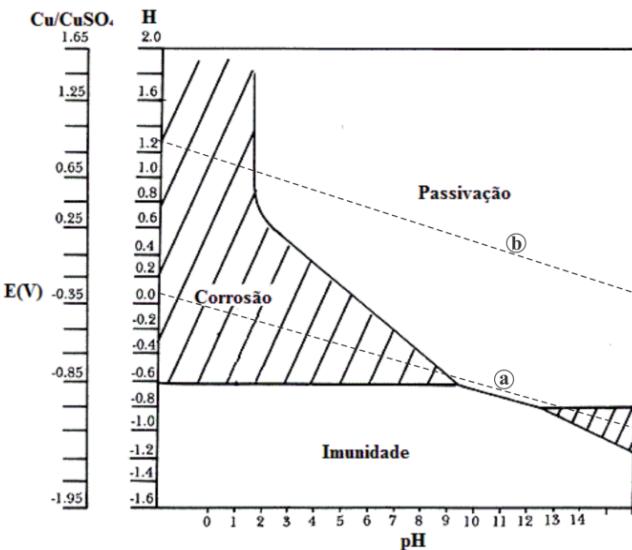


Figura 4.1 – Diagrama de Pourbaix de equilíbrio termodinâmico (Fe – H₂O; 25°C). **Fonte:** Pourbaix (1974).

A região de imunidade é caracterizada pela ausência de corrosão, independentemente do pH do meio em que estejam inseridas. Este tipo de estado só acontece por meio de indução artificial, onde correntes impressas são aplicadas à armadura (Proteção Catódica). A região de passivação é aquela onde o processo de corrosão é tão baixo que a aparência da barra permanece inalterada ao longo do tempo, devido à formação e estabilidade da película passivadora. Já a região de corrosão é caracterizada pelo processo de oxidação do aço (MEIRA, 2017b).

Vale ressaltar que um concreto bem dosado, um cobrimento com boa espessura, o uso de adições minerais e baixas relações água/aglomerantes podem dificultar a entrada de agentes agressivos e diminuir a disponibilidade de água e oxigênio, itens indispensáveis para que a corrosão eletroquímica aconteça (GENTIL, 1996; HELENE, 1993).

4.2 FASES DA CORROSÃO DE ARMADURAS

A vida útil das estruturas de concreto armado pode ser dividida em duas fases distintas, segundo o modelo fenomenológico proposto por Tuutti (1982) ([Figura 4.2 \(a\)](#)). A primeira fase é a iniciação da corrosão, na qual a armadura está passiva, mas a penetração de cloreto na camada de cobrimento do concreto pode ocorrer a quebra da película passivadora, dando início à corrosão da armadura. A segunda fase é a propagação da corrosão, que começa com o aço despassivado e termina quando as consequências da corrosão não podem ser mais toleradas.

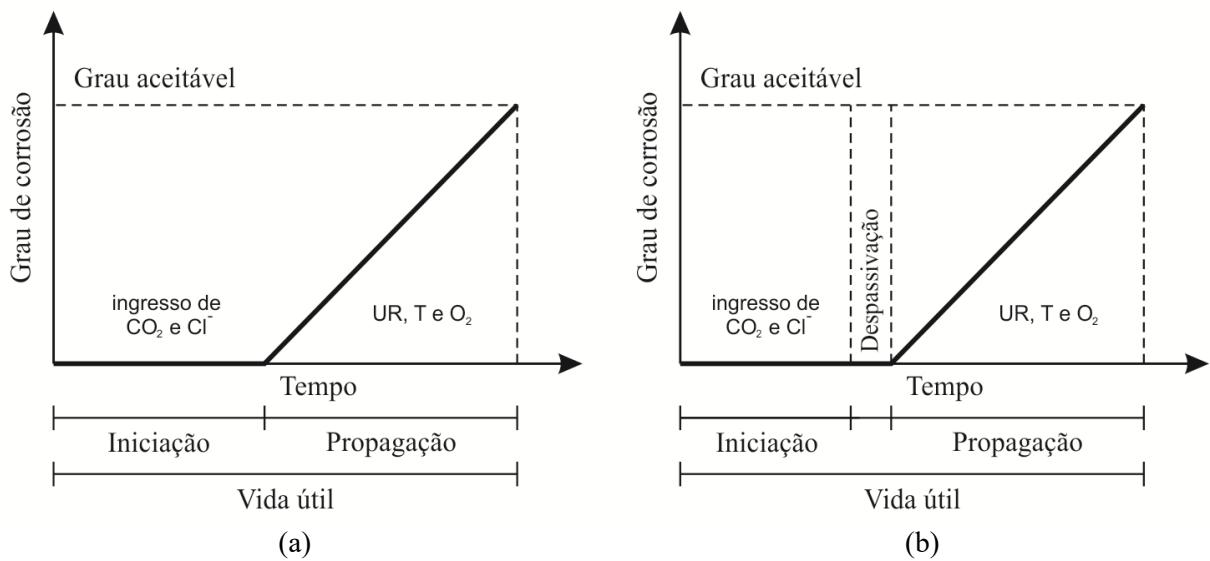


Figura 4.2 – Modelo de vida útil proposto por Tuutti (1982) (a) e adaptado (b). **Fonte:** Meira (2017b).

Neste entendimento, o momento da despassivação do aço envolve alterações físico-químicas na superfície do aço e demanda certo tempo para se proceder de modo consistente. Atualmente o modelo de vida útil de Tuutti foi adaptado, passando a ter três fases distintas: iniciação, despassivação e propagação, de acordo com a [Figura 4.2 \(b\)](#).

Se a despassivação ocorrer apenas numa parte da armadura, uma macrocélula pode se desenvolver entre as áreas corroídas e as áreas ainda passivas, desde que conectadas eletricamente. Isso pode aumentar a taxa de corrosão da armadura, reduzindo o tempo de vida útil da estrutura (BERTOLINI *et al.*, 2004).

4.2.1 Fatores que afetam a fase de iniciação da corrosão

Grosso modo, o período de iniciação da corrosão é influenciado pelos fatores que determinam a penetração dos agentes agressivos, em especial o gás carbônico, responsável pela corrosão por carbonatação, e os íons cloreto, responsável pela corrosão por pite (CASCUDO, 1997). Os fatores que influenciam a penetração de cloreto, alvo deste estudo, são as condições ambientais de exposição, os parâmetros de projeto, a qualidade do concreto e a interação ambiente-estrutura.

4.2.1.1 Condições ambientais

As condições ambientais dizem como a atmosfera marinha interfere no comportamento do concreto em longo prazo, aumentando ou reduzindo o período de iniciação à corrosão. Dentre os fatores citados neste trabalho, destacamos a concentração dos agentes agressivos na atmosfera marinha e o microclima em que a estrutura está inserida.

i. Concentração dos agentes agressivos:

Ambientes com maiores concentrações de cloretos na atmosfera tendem a evidenciar redução significativa no período de iniciação à corrosão, onde a disponibilidade de cloretos no ambiente está intimamente ligada à quantidade de cloretos no interior do concreto (MEIRA, 2017b). A Figura 4.3 ilustra um exemplo deste comportamento, onde concretos igualmente dosados apresentam diferentes concentrações de cloretos, ao longo do tempo, em função da maior ou menor presença de cloretos na atmosfera, medida pela taxa de deposição média em vela úmida.

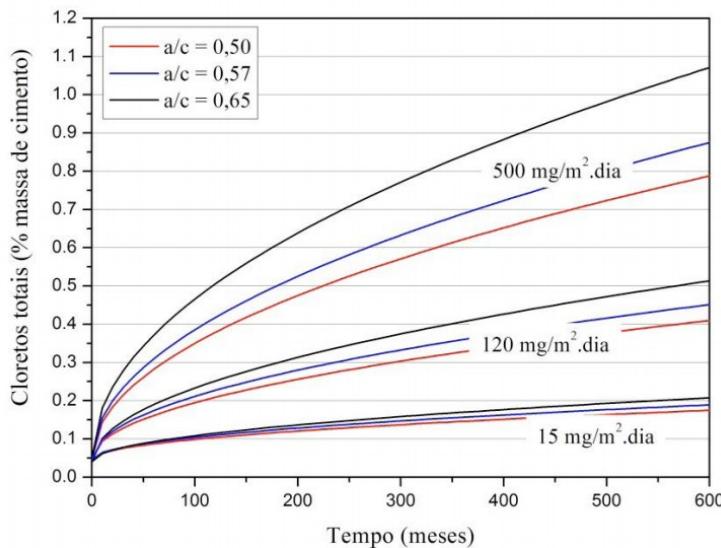


Figura 4.3 – Relação entre a taxa de deposição média de cloretos em vela úmida e a concentração de cloretos totais no interior do concreto. **Fonte:** Meira *et al.* (2007).

ii. Condições microclimáticas:

A umidade relativa e a temperatura têm influência direta sobre o coeficiente de difusão de cloretos, a capacidade de fixação e a quantidade de cloretos transportados, principalmente por convecção, como visto nos itens 3.2.1.1, 3.2.1.2 e iii, respectivamente, além de influenciar nas reações químicas relacionadas ao processo de corrosão.

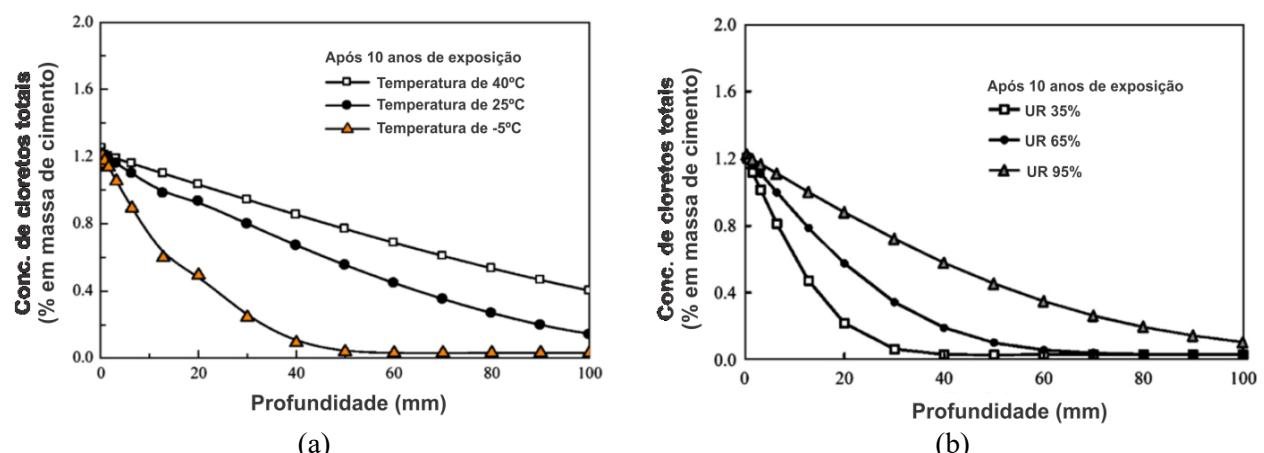


Figura 4.4 – Influência da temperatura (a) e da umidade relativa (b) na predição da concentração de cloretos para modelo baseado na Segunda Lei de Fick. **Fonte:** Oh *et al.* (2006).

Nessa perspectiva, quanto maiores a temperatura e a variação da umidade relativa, maior quantidade de cloretos livres no interior do concreto e, consequentemente, menor o período de iniciação da corrosão. Este comportamento pode ser verificado em modelos de predição de comportamento de penetração de cloretos, como os apresentados na [Figura 4.4 \(a\)](#) para a temperatura e [Figura 4.4 \(b\)](#) para a umidade relativa.

4.2.1.2 Parâmetros de projeto, dosagem e execução

Por serem fatores que levam em consideração o tipo de estrutura, a aplicabilidade e o ambiente em que estão inseridos, os parâmetros de projeto são os principais reguladores do tempo de vida útil da estrutura, já que atrelam um desempenho satisfatório frente ao menor custo de implantação. Destacamos aqui os parâmetros relacionados à dosagem do concreto e proteção física da armadura.

i. Cobrimento

Quanto mais distante a armadura estiver da superfície, maior será o tempo para que os cloretos penetrem o concreto e cheguem em quantidade suficiente para iniciar o processo de despassivação. O cobrimento regula este espaço de tempo, traduzindo-se numa barreira que pode demandar maior ou menor espaço de tempo para iniciação da corrosão. Este comportamento pode ser observado na [Figura 3.4](#), onde os valores da concentração vão se reduzindo com a profundidade, evidenciando que a influência do cobrimento se dá através do efeito combinado entre a profundidade e o teor crítico de cloreto.

ii. Fator água/cimento e condições de cura

A relação água/cimento e a condição de cura (tempo e tipo) têm relação direta com a porosidade do material, que, por sua vez, tem influência na velocidade de transporte de cloretos para o interior do concreto (CASCUDO, 1997), como pode ser observado na [Figura 4.5](#), onde diversos perfis de cloretos são plotados com diferentes relações água/cimento. Os resultados sinalizam concentrações maiores à medida que o fator a/c aumenta, reduzindo assim o tempo para iniciação da corrosão (MEIRA, 2017b).

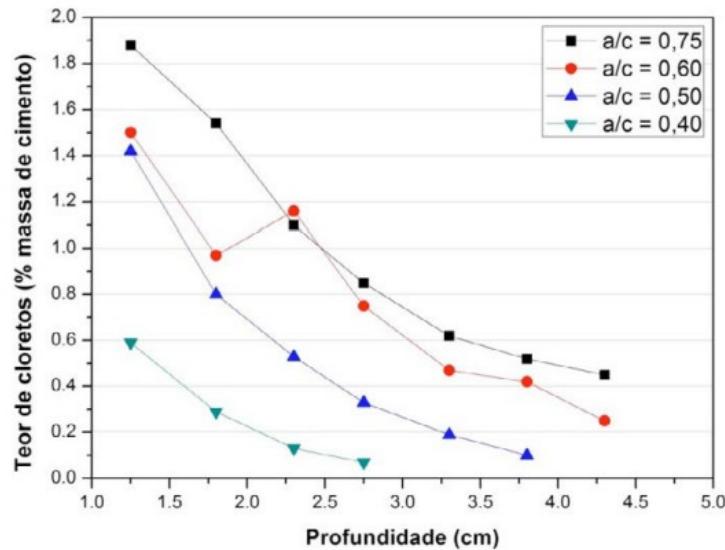


Figura 4.5 – Influência da relação a/c na penetração de cloretos. **Fonte:** Jaegermann (1990) *apud* Meira (2017b).

iii. Adições minerais

O uso de adições minerais está também relacionado à porosidade do material. Apesar da perda de potencial alcalino com o uso de adições, o incremento na redução da porosidade é muito maior, recomendando o uso como forma de ampliar o tempo de iniciação da corrosão. A [Tabela 4.1](#) comprova a influência da adição mineral no transporte de cloretos, através do coeficiente de difusão em concretos com mesma dosagem, variando apenas a quantidade de cinza volante e escória de alto-forno.

Observa-se que o uso de adições minerais reduziu significativamente o coeficiente de difusão com o aumento na proporção da mistura e na idade. Percebe-se, também, que concretos feitos com escória de alto-forno tiveram melhores resultados do que os confeccionados com cinza volante e apenas Cimento Portland Comum.

Tabela 4.1– Coeficiente de difusão de cloretos ($x e^{-12} m^2/s$) em concretos com relação a/c = 0,55. **Fonte:** adaptado de Park *et al.* (2016).

Tipo de mistura	28 dias	182 dias	365 dias
Cimento Portland comum	24,51	17,55	16,84
Cimento + 20% de escória de alto-forno	16,53	8,88	8,47
Cimento + 40% de escória de alto-forno	11,06	4,02	3,49
Cimento + 60% de escória de alto-forno	8,38	2,47	1,75
Cimento + 10% de cinza volante	36,93	12,18	10,68
Cimento + 20% de cinza volante	38,27	9,60	7,13
Cimento + 30% de cinza volante	42,04	5,22	4,26

4.2.1.3 Características do concreto

Tendo relação intrínseca com os parâmetros de projeto, a qualidade do concreto influencia diretamente o período de iniciação à corrosão, de modo que quanto melhor a qualidade do concreto maior o período de iniciação à corrosão. Destacamos como parâmetros relacionados à qualidade do concreto: a porosidade/permeabilidade, discutida de certa forma no item anterior, o potencial alcalino e a capacidade de fixação de cloretos da matriz cimentícia.

i. Potencial alcalino

A literatura reconhece o efeito inibidor do potencial alcalino na corrosão por cloretos, através da relação entre $[Cl^-]/[OH^-]$ (ANGST *et al.*, 2009), onde concretos com maiores concentrações de hidroxilas apresentam maiores tolerância à presença de cloretos, requerendo mais íons agressivos para realizar a despassivação (MEIRA, 2017b). A oferta de íons hidroxilas advém do tipo de aglomerante, mas pode ser afetada em estágios posteriores pela carbonatação, lixiviação, hidratação, etc.

ii. Capacidade de fixação

Como discutido no item 3.1.2.4, a capacidade de fixação de cloretos do concreto é uma propriedade físico-química do material responsável por “frear” a entrada de íons cloretos no interior do concreto. Considerando que esta capacidade diminui a velocidade de transporte, uma vez que apenas os cloretos livres se movem pela rede porosa e estão propensos a iniciar a corrosão, quanto maior a capacidade de fixação maior o período de iniciação à corrosão.

4.2.1.4 Interação ambiente-estrutura

A interação ambiente-estrutura trata dos fatores que influenciam o comportamento do concreto frente às condições ambientais. Como concretos com mesma dosagem e num mesmo ambiente de exposição tem comportamento diferente? Elencamos dois fatores preponderantes, a condição de contato entre a superfície do concreto e os cloretos e em que condição está essa superfície durante a exposição.

i. Condições de contato com o agente agressivo

A forma como os cloretos estão em contato com a superfície do concreto influencia o comportamento da estrutura frente à corrosão. Um modo de constatarmos este comportamento é analisando os perfis de cloretos de concretos em diversas zonas de agressividade (Figura 4.6), onde concretos próximos à fonte (flutuação de maré) apresentam maiores concentrações de cloretos do que os que mantêm contato menos intenso (atmosfera marinha) (MEIRA, 2017b).

Isto não que dizer que concretos em zona submersa, por terem contato constante com o mar, apresentem maiores concentrações de cloretos e menor período de iniciação à corrosão do que os demais. O comportamento neste tipo de zona é distinto, já que o transporte ocorre apenas por difusão e há redução da disponibilidade de oxigênio, reduzindo a concentração de cloretos e aumentando o período de iniciação à corrosão.

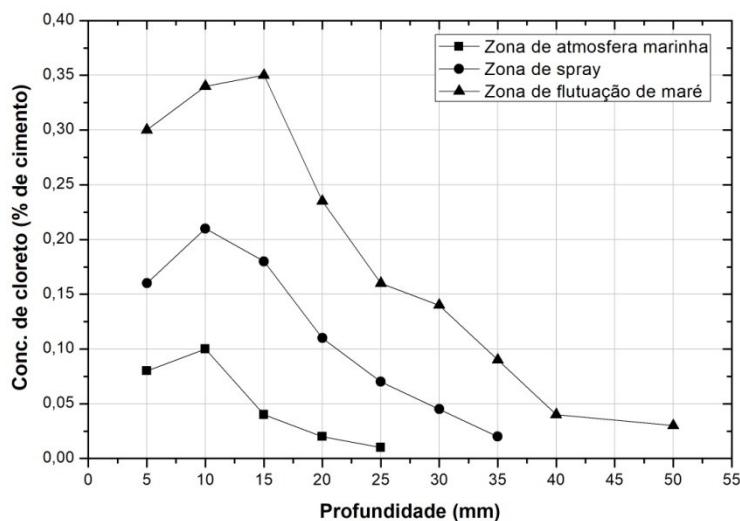


Figura 4.6 – Perfis de cloretos em concretos expostos a diferentes zonas de exposição por 36 meses.

Fonte: Costa e Appleton (1999a).

Sendo assim, não só o contato constante com a fonte de cloretos garante a redução no período de iniciação à corrosão, mas também disponibilidade de oxigênio e a variação da umidade relativa no poro do concreto aceleram o processo de despassivação.

ii. Condições da superfície

Superfícies rugosas e com presença de fissuras transversais facilitam a penetração de cloretos, pois a rugosidade aumenta a área de exposição e facilita a lavagem da superfície após uma incidência pluviométrica, como discutido no item 2.3.2.

Já a fissura constitui um caminho rápido para a penetração de cloretos na direção da armadura. Neste sentido, observam-se concentrações de cloretos maiores com o aumento das fissuras (DJERBI *et al.*, 2008). A [Figura 4.7](#) mostra o aumento da concentração de cloretos com o aumento do tamanho transversal da fissura em discos de concreto ($a/c=0,5$) submetidos a ensaio de migração.

As condições da superfície evoluem com o tempo. Superfícies menos rugosas tendem a ficar mais rugosas, devido à erosão e/ou à lixiviação causada pela ação humana ou das intempéries, respectivamente; e as estruturas fissuram com o uso, tanto pela ação térmica, ação de carregamento e descarregamento ou por ação da corrosão.

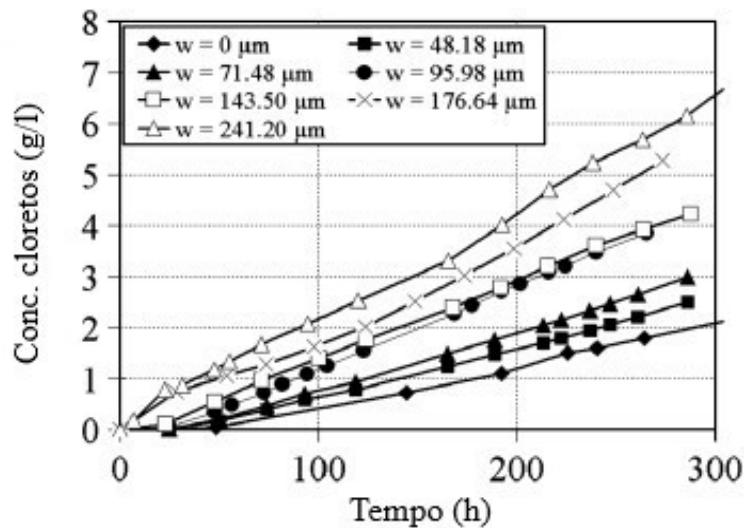


Figura 4.7 – Concentração de cloreto em concretos após processo de fissuração e ensaio de migração de cloreto. **Fonte:** Djerbi *et al.* (2008).

4.2.2 Fatores que afetam a fase de propagação da corrosão

Os principais fatores que influenciam a propagação da corrosão são a umidade do poro, a temperatura e a disponibilidade de oxigênio.

i. Umidade relativa dos poros do concreto

A água contida no poro do concreto funciona com eletrólito para a pilha eletroquímica. Portanto, quanto menor a quantidade de água no poro, menor a velocidade de corrosão. Todavia o raciocínio inverso não é válido, já que com o poro todo preenchido de água pode haver redução na presença de oxigênio no interior do concreto, reduzindo a velocidade de corrosão (MEIRA, 2017b).

ii. Temperatura

A temperatura, apesar de acelerar as reações químicas de oxidação do ferro, diminui a disponibilidade de água no poro do concreto. Em consequência desta diminuição, o processo de propagação da corrosão diminui devido à falta de eletrólito (MEIRA, 2017b).

iii. Oxigênio

O oxigênio é fonte de alimentação das reações catódicas. Portanto, quanto maior a disponibilidade de oxigênio e umidade, maior a velocidade de propagação da corrosão (BERTOLINI *et al.*, 2004; CASCUDO, 1997).

4.3 A DESPASSIVAÇÃO DA ARMADURA POR CLORETO

Nenhum outro agente agressivo ao concreto é tão extensivamente documentado pela literatura como os cloreto (CASCUDO, 1997). Desde a década de 1950 que os cloreto foram reconhecidos como principais responsáveis pela corrosão de armaduras em zonas de atmosfera marinha. Os íons cloreto podem ser introduzidos intencionalmente ao concreto, por aceleradores de pega, misturados à água de amassamento ou penetrarem devido à ação de transporte de massa (ANGST *et al.*, 2009).

Após estarem em quantidade suficiente nas proximidades da armadura, em conjunto com a água e o oxigênio, os íons cloreto rompem pontualmente a capa passivante, iniciando o processo de corrosão (BERTOLINI *et al.*, 2004; CASCUDO, 1997). Boa parte dos estudos considera a ruptura da película passivadora como algo dinâmico, através de ciclos de passivação e repassivação (MEIRA, 2017b).

A teoria mais aceita para representar a ação dos íons cloreto é a Teoria do Complexo Transitório (Figura 4.8), onde tais íons competem com os íons hidroxilos (OH^-) para a produção de íons ferrosos. Forma-se, então, um complexo solúvel de cloreto de ferro de baixa estabilidade, que se difunde pelas áreas anódicas e a certa distância da armadura são facilmente quebradas por hidrólise, liberando estes íons cloreto para novas reações (TREADAWAY, 1988).

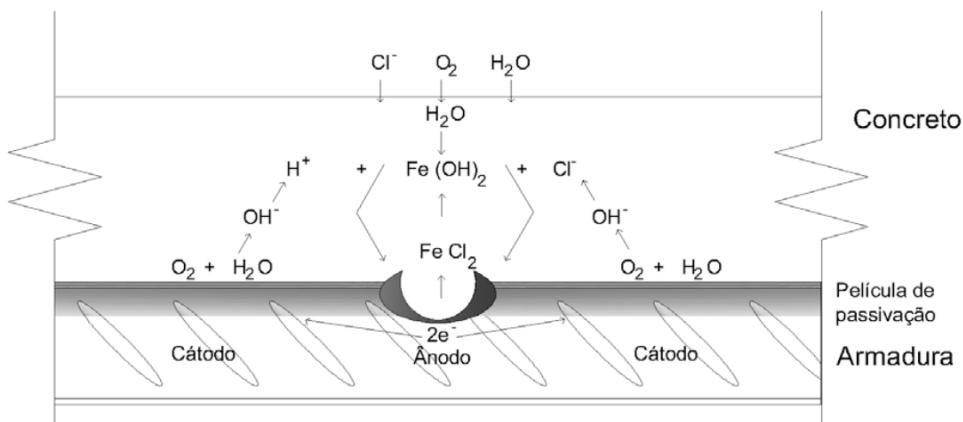


Figura 4.8 – Esquema do Complexo Transitório. **Fonte:** Treadaway (1988).

A presença de íons cloreto na zona anódica provoca acidificação da região, diminuindo o pH e o potencial do aço devido às reações de oxidação. Já nas zonas catódicas, a liberação de íons hidroxilos aumenta o pH na área, diminuindo a possibilidade de corrosão (MEIRA, 2017b).

4.4 TEOR CRÍTICO DE CLORETOES

Constatar a presença de íons cloretoes na proximidade da armadura não é fato determinante para que a corrosão aconteça. Faz-se necessário, além de água e oxigênio, que os íons cloretoes estejam em quantidade suficiente para despassivar a armadura (ANGST *et al.*, 2009; BERTOLINI *et al.*, 2004). Esta quantidade é conhecida como teor crítico de cloretoes, concentração crítica ou limiar de cloretoes. São inúmeras as variáveis que interferem no teor crítico de cloretoes (Cl_{crit}), sendo elas relacionadas às características do ambiente, dos materiais e da interface aço-concreto. A [Tabela 4.2](#) resume os principais fatores que influenciam o teor crítico de cloretoes.

Tabela 4.2 – Fatores que influenciam o teor crítico de cloretoes. **Fonte:** Ferreira (2015).

Ligados à armadura	Ligados ao concreto		Ligados ao ambiente de exposição
	Fatores químicos	Fatores físicos	
Processo de fabricação	pH da solução do poro	Cobrimento	Temperatura
Composição do aço	Composição química do cimento	Porosidade	Teor de umidade
Barras lisas ou rugosas	Consumo de cimento	Relação A/C	Teor de oxigênio
Oxidação prévia	Uso de adições	Resistividade elétrica	Cátion associado aos íons cloretoes
Potencial prévio	Grau de Hidratação	-	-
Falhas/vazios na interface aço/concreto	Presença de inibidores de corrosão	-	-

Os fatores ligados à armadura dizem respeito à possibilidade de acúmulo local ou falhas na formação da película passivante. Os fatores ligados à química do concreto levam em conta o potencial alcalino, a capacidade de fixação ou aditivos inibidores de corrosão. Os fatores físicos levam em consideração a microestrutura do concreto e a estabilidade das condições iniciais nas proximidades do aço. Já as variáveis relacionadas ao meio ambiente referem-se à capacidade da fonte de suprir os elementos necessários para garantir a corrosão (umidade, cloretoes e oxigênio), além do cátion associado aos íons cloretoes (MEIRA, 2017b).

Várias revisões bibliográficas (MEIRA *et al.*, 2014; ALONSO e SANCHEZ, 2009; ANGST *et al.*, 2009; SONG *et al.*, 2009; ANN e SONG, 2007) tentaram obter uma tendência geral para o Cl_{crit} em relação a certo tipo de aglomerante, dosagem de concreto, fator a/c, tipo de ensaio, etc. Mas os resultados mostraram-se amplamente dispersos numa faixa entre 0 e $>3\%$ de cloretoes livres em relação à massa de aglomerante, como pode ser visto na [Figura 4.9](#). Este fato induz que o processo estocástico da corrosão por pite (MEIRA *et al.*, 2014) e as metodologias experimentais (ANGST, 2019; MEIRA *et al.*, 2014; ALONSO e SANCHEZ, 2009) parecem ter tanta influência nos valores de Cl_{crit} , quanto o grau de agressividade do ambiente e os fatores de

dosagem e projeto (grau de hidratação, consumo de cimento, Ph da solução do poro, tipo de aglomerante, uso de adições, cobrimento, etc.).

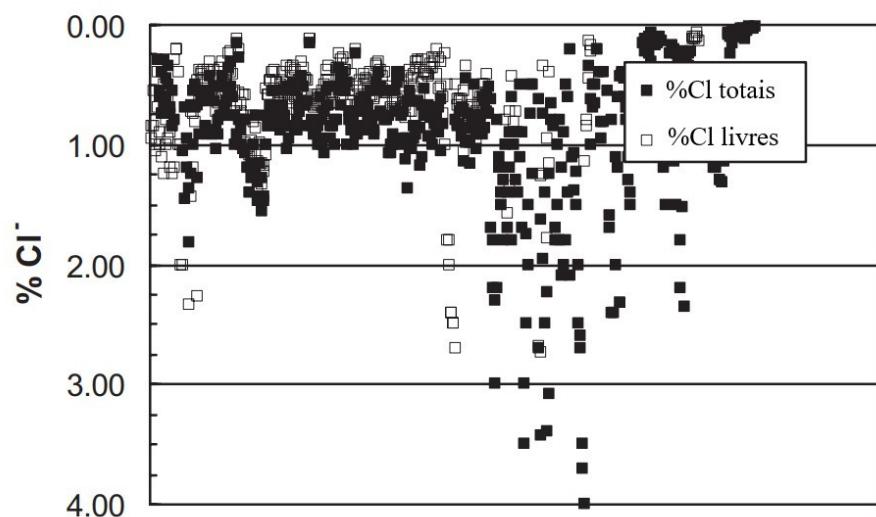


Figura 4.9 – Variabilidade dos valores de Cl_{crit} livres e totais. **Fonte:** Alonso e Sanchez (2009).

Assim, estudos mais recentes propõem que Cl_{crit} seja expresso de maneira probabilística, com média, desvio-padrão e certo tipo de distribuição de probabilidade (ANGST, 2019; ALONSO e SANCHEZ, 2009; CEB Bulletin 37, 2006), objetivando minimizar a dispersão. Diante desse panorama, foi confeccionada a [Tabela 4.3](#), que mostra os valores estatísticos de Cl_{crit} reportados na literatura, obtidos a partir de ensaios de laboratório, estruturas reais ou adotados em modelos de previsão de vida útil.

Tabela 4.3 – Valores probabilísticos de teor crítico de cloretos obtidos através de ensaios de laboratório ou usados em modelos probabilísticos.

Fonte	Tipo de estudo	Condições	Tipo de distribuição	Média	COV
Angst e Elsener (2017)	Laboratório	Prismas de concreto, aço liso Ø10mm, a/c = 0,50	Log-normal	1,25	0,30
Angst <i>et al.</i> (2016)	Estrutura real	Cilindros de concreto, aço liso Ø12-14mm	Log-normal	0,85	0,80
Akiyama <i>et al.</i> (2009)	Modelo	Valores obtidos de ensaios de laboratório de outros pesquisadores japoneses	Log-normal	1,00	0,35
Bastidas-Arteaga <i>et al.</i> (2011)	Modelo	Não reportada	Normal	0,50	0,20
Breit (2001)	Laboratório	Cilindros de argamassa, aço liso Ø10mm com polarização anódica, a/c = 0,50 a 0,60	Log-normal	0,50	0,44
Breitenbücher <i>et al.</i> (2001)	Modelo	Valores obtidos de ensaios de laboratório com argamassa de outro pesquisador alemão	Normal	0,70	0,14

(continua)

(continuação)

Fonte	Tipo de estudo	Condições	Tipo de distribuição	Média	COV
Bruhwiler <i>et al.</i> (2001)	Modelo	Valor obtido de outro pesquisador francês	Normal	0,40	0,15
CEB Bulletin 37 (2006)	Modelo	Não reportada	Beta	0,20	2,00
Enright <i>et al.</i> (1998)	Modelo	Valor obtido de outros pesquisadores	Normal	0,60	0,25
Ferreira <i>et al.</i> (2020)	Laboratório	Prismático, aço nervurado Ø6.3mm, a/c = 0,55, ciclos de imersão e secagem	Log-normal	0,70	0,31
Ferreira (2004)	Estrutura real/ Modelo	Extração de estruturas reis em porto no mar da Noruega.	Normal	0,45-0,50	0,16
Gao <i>et al.</i> (2019)	Laboratório	Prismático, aço liso Ø10mm, a/c = 0,45	Gumbel	0,35	0,06
Gao <i>et al.</i> (2019)	Exposição natural	Prismático, aço liso Ø10mm, a/c = 0,45, disposto mar da China (13g de Cl por litro)	Log-normal	0,22	0,05
Izquierdo <i>et al.</i> (2004)	Laboratório	Prismas de argamassa, aço Ø6mm sem limpeza, a/c = 0,50	Normal	0,53	0,28
Josiline <i>et al.</i> (2016)	Laboratório	Cilindros de argamassa, aço com polarização anódica, a/c = 0,50 a 0,60	Normal	1,93	0,07
Know <i>et al.</i> (1997)	Modelo	Não reportada	Normal	0,30*	0,20*
Lounis (2003)	Modelo	Ponte em concreto submetido a sais de desgelo por quatro anos	Log-normal	1,35	0,10
Markeset (2009)	Estrutura real	Ponte na Noruega, aço liso Ø10mm, a/c = 0,40 a 0,50	Log-normal	0,77	0,42
Petcherdchoo (2018)	Modelo	Dados coletados da literatura	Triangular	0,80	0,42
Polder (2009)	Laboratório	Prismático, aço Ø8mm, a/c = 0,55, ciclos de imersão e secagem	Log-normal	0,80	0,13
Polder e Rooij (2015)	Estrutura real	Ponte localizada no Mar do Norte, Holanda.	Normal	0,50	0,30
Song <i>et al.</i> (2009)	Modelo	Dados coletados da literatura (65 trabalhos)	Gumbel	0,69	0,43
Stewart e Mullard (2007)	Modelo	Não reportada	Normal	0,60*	0,20*
Stewart <i>et al.</i> (1998)	Modelo	Não reportada	Uniforme	0,22*	0,18*
Trejo e Pillai (2003)	Laboratório	Cilindros de argamassa, aço liso Ø19mm com polarização anódica, limpeza com álcool, a/c = 0,50	Log-normal	0,95*	0,53*
Val e Trapper (2008)	Modelo	Não reportada	Normal	0,50	0,20

(continua)

(continuação)

Fonte	Tipo de estudo	Condições	Tipo de distribuição	Média	COV
Zhang <i>et al.</i> (2019)	Estrutura real	Comporta no estuário do Rio Qiantang (China), zona de flutuação de maré, Conc. de cl. nas águas do rio de 27,6 mg/l.	Normal	0,96*	0,26*
Zimmermma (2000)	Laboratório	Primas de argamassa, aço nervurado jateado de Ø8.0mm, a/c = 0,60	Log-normal	0,85	0,45

Onde: A unidade de μ e σ são % de massa de cimento. * valores com base no consumo de 400kg/m³ de cimento e/ou uma densidade de 2400kg/m³.

No geral, os resultados da referida tabela apontam certa predominância para a distribuição normal ou log-normal, com valores de média e desvio-padrão ainda exibindo grande variação, perto de 7 vezes em relação à média, mas não como nos resultados determinísticos apresentados nas revisões bibliográficas de Angst *et al.* (2009), perto de 210 vezes, e Meira (2017b), perto de 30 vezes. Outro fato a ser atestado é a divergência entre os valores obtidos em laboratório e estruturas reais. Os resultados de Cl_{crit} em estruturas reais são sempre inferiores aos obtidos em laboratório, motivados pela possível presença de fissuração (ALONSO e SANCHEZ, 2009) e o efeito conjunto entre os cloretos e a carbonatação (MEIRA *et al.*, 2014).

Com base em tal conhecimento, a tendência vigente sugere que os valores de Cl_{crit} sejam adotados de modo mais conservador possível, algo próximo a 0,4% e 0,2% em relação a massa de cimento, para estruturas de concreto armado e pretendido em situações reais de uso, respectivamente (DURAR (1997) *apud* MEIRA (2017b)).

5 FORMULAÇÃO PROBABILISTICA PARA PREVISÃO DO TEMPO DE INCIAÇÃO A CORROSÃO POR CLORETO

Modelos de predição do tempo de vida útil de estruturas de concreto armado podem ter abordagem determinística ou probabilística (BAMFORTH, 2004). Um modelo matemático determinista impõe ao usuário uma única solução para o problema, dada uma condição inicial. Neste caso, teríamos que toda estrutura de concreto armado submetida às mesmas características de exposição e concepção de projeto teria uma única resposta para o tempo de iniciação da corrosão e perfil de cloretos.

De fato, essa presunção não é verídica e varia caso a caso nos mínimos detalhes. Basta observar os perfis de cloretos livres e totais mostrados na figura abaixo (Figura 5.1). Ela exibe a concentração de cloreto em relação à profundidade para diversos corpos de prova moldados com o mesmo tipo de concreto, dimensões e condições de exposição, porém com comportamentos distintos. Um modelo determinístico diria que todos os perfis de cloretos livres ou totais seriam iguais independentemente do corpo de prova.

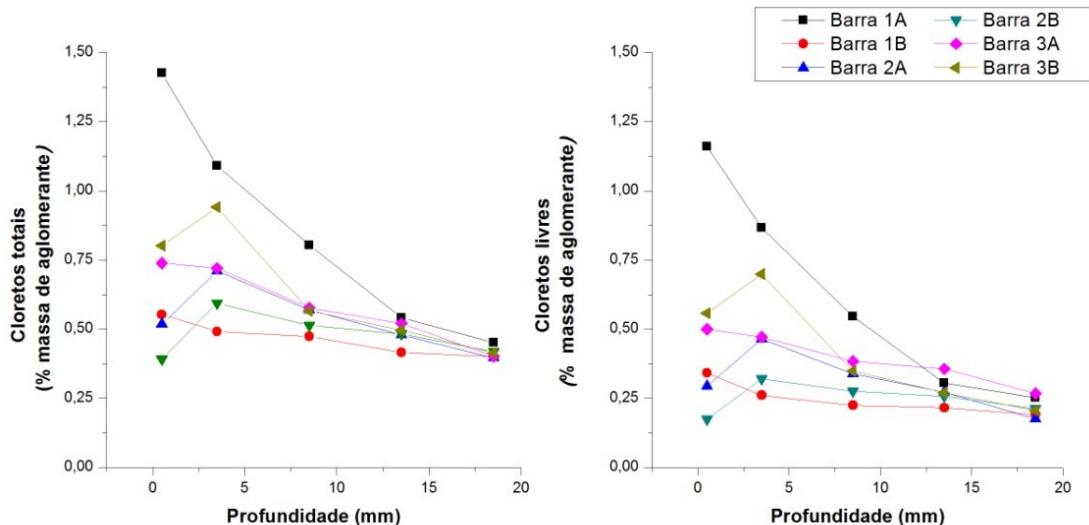


Figura 5.1 – Perfis de cloretos totais e livres para espécimes de concreto (consumo de cimento de 415 kg/m³), com cura de 7 dias em câmara úmida e exposição de 4 dias em solução de 1M de NaCl e 3 dias em ambiente de laboratório. **Fonte:** Ferreira (2015).

Diversos fatores colaboram para uma aleatoriedade nas características dos materiais, na execução da estrutura, nas mudanças climáticas, etc. No caso em pauta, eles impõem a esse tipo de modelo uma abordagem probabilística, onde o objetivo é obter a probabilidade de ocorrência de um evento indesejável, por exemplo, o tempo para início da corrosão. Durante os últimos anos, métodos probabilísticos para o cálculo da vida útil ganharam importância (VERA *et al.*, 2017; TAVARES, 2013; BASTIDAS-ARTEAGA *et al.*, 2011; STEWART e MULLARD, 2007; MARTIN-PEREZ e LOUNIS, 2003; KIRKPATRICK *et al.*, 2002, entre outros), pois levam em conta as incertezas no modelo, permitindo introduzir o conceito de probabilidade de falha.

Neste capítulo, veremos como a partir do modelo matemático determinístico descrito por Martin-Perez (1999) e Saetta *et al.* (1993), reportados na seção 3.2 deste trabalho, chegaremos a estimar a evolução da penetração de cloretos com a profundidade e probabilidade do tempo de início da corrosão em concretos submetidos à zona de atmosfera marinha.

Sendo assim, primeiramente discutimos como as incertezas relacionadas ao processo de penetração de cloretos geram uma complexa relação de natureza estocástica, apontando a solução mais apropriada para resolver o problema dentre as ferramentas estatísticas disponíveis.

Logo após, faremos uma breve análise sobre a aplicação da técnica de Simulação de Monte Carlo aplicada a problemas de durabilidade de estruturas frente à corrosão por cloretos, transformando o modelo matemático determinístico em um modelo probabilístico, após a geração de inúmeras variáveis aleatórias com distribuição de probabilidade definida.

Grosseiramente, a formulação probabilística para previsão da penetração de cloretos se dá através da separação da formulação em duas etapas: a probabilística, que leva em consideração a natureza aleatória do processo pela definição prévia das distribuições de probabilidade das variáveis envolvidas (Figura 5.2 (a)), e a formulação matemática, que resolve recursivamente as Equações Diferenciais Parciais (EDP) de entrada dos cloretos, umidade e calor (Figura 5.2 (b)) por métodos numéricos de aproximação.

Diante dos resultados obtidos, após os dois processos, é possível analisar estatisticamente a função de distribuição acumulada (FDA) para o tempo de iniciação da corrosão, à penetração de cloretos provável com a evolução do tempo (Figura 5.2 (c)) e à probabilidade de falha.

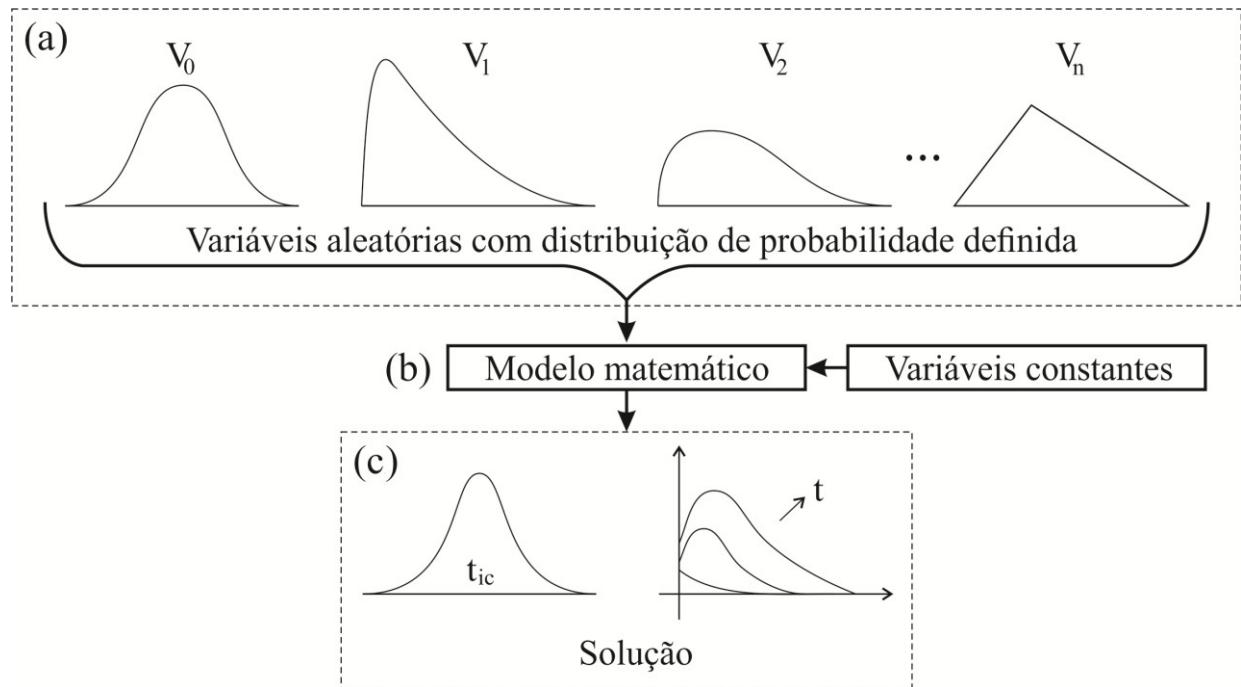


Figura 5.2 – Princípio básico da formulação probabilística para previsão de processo estocástico.

Este trabalho não objetiva pormenorizar alguns conceitos e demonstrações de teoremas citados neste capítulo, dada a extensão que essa obra poderia ter. Consulte as seguintes bibliografias: Yates e Goodman (2016), Ross (2008) e Ghansem e Spanos (2003), para mais detalhes sobre a formulação matemática de conceitos básicos de probabilidade e estatística, processo estocástico, Cadeia Markov, Teoria do Limite Central e Lei dos Grandes Números.

5.1 O PROCESSO ESTOCÁSTICO DA CORROSÃO POR CLORETOES

Com a evolução dos modelos de previsão de comportamento, os métodos numéricos probabilísticos tornaram-se uma importante ferramenta na resolução de problemas nas diversas áreas do conhecimento, principalmente onde as soluções determinísticas são de difícil dedução ou até mesmo não representam de maneira satisfatória o comportamento após a adição de simplificações.

Como já comentado anteriormente, o processo de penetração de cloretoes no interior do concreto gera incertezas significativas relacionadas às condições ambientais, às propriedades do material, os parâmetro de projeto e os critérios de modelagem (BASTIDAS-ARTEAGA *et al.*, 2011; BAMFORTH, 2004). Portanto, para dar uma estimativa apropriada do ingresso de cloreto no concreto, faz-se necessário a introdução de uma estrutura estocástica ao modelo matemático descrito na Seção 3.2.

Estimar o ingresso de cloretoes no concreto é estudar a interação de diversas variáveis aleatórias que governam o modelo ao longo do tempo, onde se conhecem as condições iniciais. Podemos, porém, ter diversos caminhos possíveis para a evolução do ingresso (processo estocástico). Ou seja, ao invés de o modelo possuir um único modo de evoluir, como é no caso de soluções de Equações Diferenciais Ordinárias (EDO), nesse tipo de processo (processo estocástico) há uma indeterminação. Mesmo que se conheça a condição inicial, existem várias formas nas quais o processo pode se desenvolver (GHANSEM e SPANOS, 2003).

Um processo estocástico possui natureza matemática complexa, que, em geral, nos problemas de engenharia, não se conhecem todas as ferramentas estatísticas possíveis para solução das incertezas (TASCHETTO, 2007). Esta complexidade deve-se a natureza aleatória das variáveis que governam o processo, travando entre si uma complicada dependência estatística.

Sabendo que a evolução dos perfis de cloretoes com o tempo é um processo estocástico, e que este processo é um procedimento complexo, a solução exata para a probabilidade do tempo de iniciação da corrosão é de impossível determinação (BASTIDAS-ARTEAGA *et al.*, 2011; STEWART e MULLARD, 2007; KIRKPATRICK *et al.*, 2002). Portanto, a solução mais

apropriada para lidar com esse tipo de problema é determinar uma sequência de variáveis aleatórias independentes entre si que governam o processo, sabendo que o próximo passo depende apenas do seu estado atual e não da sequência de eventos que precederam (Cadeia de Markov) e, assim, resolver o processo de forma determinística através de inúmeras repetições (Simulações de Monte Carlo).

5.2 MÉTODO DE MONTE CARLO

O método de Monte Carlo é uma ferramenta numérica que se utiliza da geração de números aleatórios para computar certo grau de incertezas através de um problema qualquer. Este problema pode ser determinístico (analítico ou numérico) ou puramente estatístico. A ideia principal do método consiste em construir um modelo estocástico compatível com o problema, gerar uma grande quantidade de números aleatórios ou pseudoaleatórios, com regras definidas, para caracterizar as variáveis do problema e, em seguida, simulá-los repetidas vezes partindo de um modelo matemático que representa o fenômeno em análise. Após as simulações, os resultados são coletados e, finalmente, a análise estatística é realizada com base na Lei dos Grandes Números e no Teorema do Limite Central, se for o caso (FROBERG, 1966).

O método surgiu na Segunda Guerra Mundial, aproximadamente em 1944, com o Projeto Manhattan, impulsionado pelo esforço de guerra e desenvolvimento da bomba atômica. Embora o emprego de simulações já tivesse sido empregado em problemas determinísticos há muitos anos, foi apenas em 1949 que o método foi publicado no jornal da *American Statistical Association* (METROPOLIS e ULAM, 1949), descrevendo a simulação de um problema probabilístico relativo à difusão de nêutrons. O nome do método foi dado por Metropolis com base nos cassinos da cidade de Monte Carlo/Mônaco, após fazer uma analogia entre os procedimentos usados na formulação matemática do método e o modo como Ulam o aplicou para calcular a probabilidade num determinado jogo de azar.

Foi apenas com o desenvolvimento dos computadores que o método recebeu a devida importância da comunidade científica, dada a carga computacional exigida pelo grande número de repetições. Dentre as vantagens que o método pode oferecer, destacam-se a flexibilidade de aplicação em simulação de eventos reais, a formulação matemática simples e não intrusiva, a fácil aplicação a códigos computacionais comerciais, e a capacidade de impor grande precisão na resposta do problema. Já as desvantagens são o alto custo computacional de processamento e uma correlação espúria entre os parâmetros estocásticos do sistema (ROSS, 2008).

Com o aumento da velocidade computacional e o desenvolvimento de métodos de redução de amostras (amostragem estratificada, análise sequencial, *Latin Hypercube*, etc.), a simulação pelo

Método de Monte Carlo se transformou numa alternativa viável para problemas de engenharia. Diversos modelos usaram a esse tipo de técnica (Simulações de Monte Carlo) para previsão de vida útil de estruturas submetidas à corrosão por cloretos, uns modelos mais complexos e outros menos (VERA *et al.*, 2017; TAVARES, 2013; BASTIDAS-ARTEAGA *et al.*, 2011; VAL e TRAPPER, 2008; STEWART e MULLARD, 2007; MARTIN-PEREZ e LOUNIS, 2003; KIRKPATRICK *et al.*, 2002, entre outros). Basicamente, o princípio da simulação consiste diretamente na aplicação da [Equação 5.1](#).

$$P_f = \frac{1}{N_{MC}} \sum_{i=1}^N \text{cont}(f(x_i) \leq 0) \quad \text{Equação 5.1}$$

Onde P_f é a probabilidade de falha, adimensional; N_{MC} é o número de simulações, adimensional; $f(x_i)$ é a função de estado-limite, adimensional, e $\text{cont}(f(x_i) \leq 0)$ é o número de vezes que a função de estado-limite detectou a falha, adimensional.

De modo a facilitar o entendimento com um exemplo simples, suponhamos que um concreto esteja em zona submersa, onde a solução analítica da Segunda Lei de Fick é valida ([Equação 3.5](#)). É interesse do projetista saber a probabilidade de a estrutura iniciar a corrosão dentro do tempo de vida útil de projeto. Para tal, ele definiu o cobrimento da armadura como 40 mm (distribuição uniforme, média de 40 mm e desvio-padrão de 5 mm) e o tempo de vida útil dessa estrutura com 20 anos. Sabendo que a concentração superficial (C_s) segue distribuição uniforme (média de 5% e desvio-padrão de 0,5%), o coeficiente de difusão (D_{ns}) segue distribuição log-normal (média de 10^{-12} m²/s e desvio-padrão de 5×10^{-13} m²/s) e a concentração máxima para iniciar a corrosão é 1% (Cl_{crt}), qual a probabilidade de o evento correr em 10 simulações.

Logo a resposta para essa indagação é dada pela [Equação 5.2](#), onde a concentração de cloretos próxima à armadura deverá ser inferior a 1%, depois de decorridos 20 anos. A próxima etapa a ser realizada é gerar as variáveis aleatórias envolvidas no processo (o processo de geração de números aleatórios será discutido na próxima seção), para isso usamos o *software* alvo desta pesquisa.

$$P_f = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} \text{cont}(C(x = 40mm \pm 5mm, t = 20 \text{ anos}) \leq 1\%) \quad \text{Equação 5.2}$$

A [Figura 5.3](#) e a [Tabela 5.1](#) mostram os resultados obtidos pelas simulações. A partir delas, percebemos que a corrosão aconteceu em oito dos dez casos. Portanto a probabilidade de falha, ou seja, de ocorrência da corrosão é de 80,00% para este exemplo. Uma abordagem determinista diria que a corrosão aconteceria de qualquer forma independentemente da variabilidade das

condições de exposição (C_s) e da propriedade do material (D_{ns} e Cl_{crt}). Porém, para o modelo haverá casos nos quais a corrosão não acontecerá, apesar de relativamente baixa, o que garante um pouco mais de sobrevida à estrutura.

Tabela 5.1 – Resultado para 10 simulações da concentração de cloreto usando a solução analítica da Segunda Lei de Fick.

Simu.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C_s (%)	4,548	4,61	4,567	4,587	4,593	4,925	4,527	4,843	4,765	4,819
D_{ns} (m^2/s)	1,1e-12	1,4e-12	6,9e-13	1,2e-12	2,7e-13	1,9e-12	1,2e-12	7,6e-13	1,6e-12	1,0e-12
C_{ob} (mm)	42,073	39,858	42,326	36,002	41,663	39,347	42,64	35,811	42,683	36,956
Conc. Cl^-	1,230	1,625	0,697	1,693	0,108	2,054	1,231	1,202	1,658	1,456
Ocorreu	Sim	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim

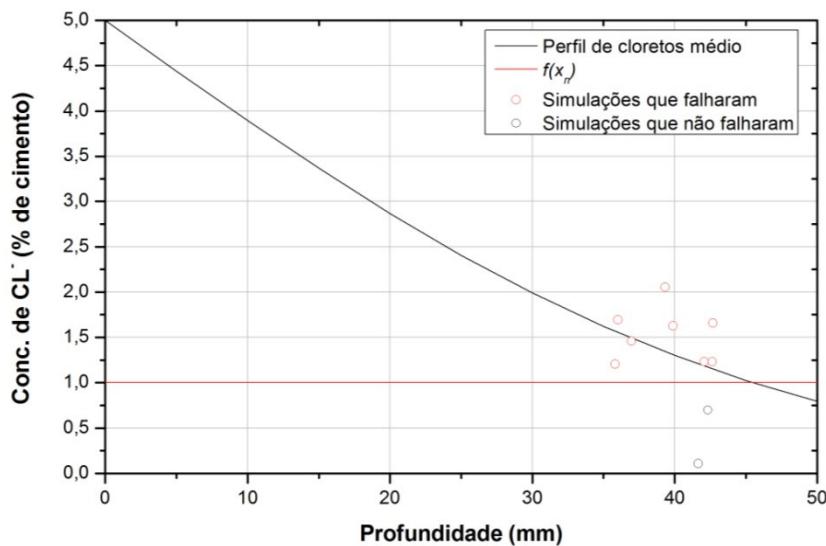


Figura 5.3 – Representação gráfica da função de estado-limite com as simulações que falharam e não falharam para 10 simulações de concentração de cloreto usando a solução analítica da Segunda Lei de Fick.

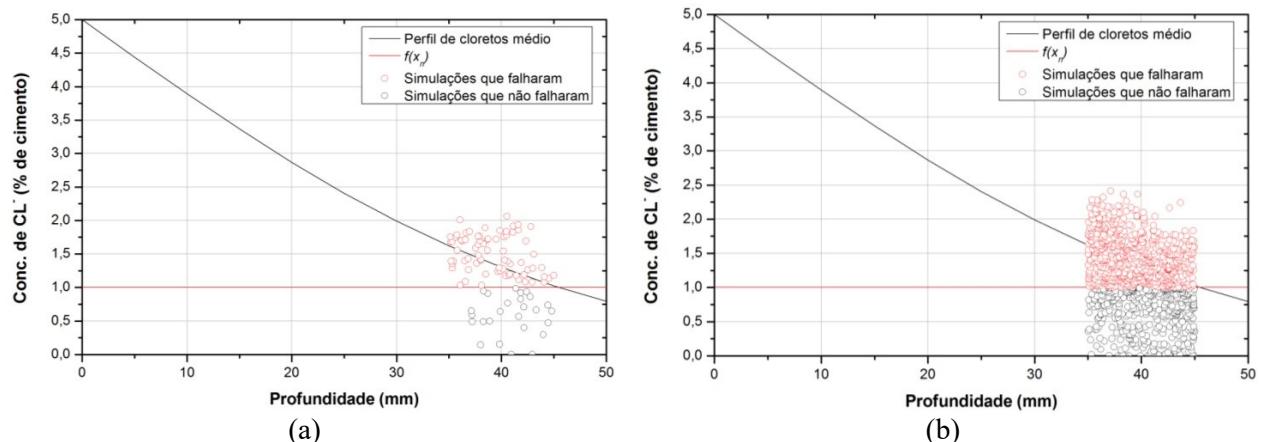


Figura 5.4 – Representação gráfica da função de estado limite com as simulações que falharam e não falharam para 100 (a) e 1000 (b) simulações de concentração de cloreto usando a solução analítica da Segunda Lei de Fick.

Veremos agora qual comportamento terá a probabilidade de falha se aumentar o número de simulações. Tratemos, pois, do mesmo caso citado acima (Equação 5.2) e calculemos para 100 e

1000 simulações. Os resultados podem ser visualizados na [Figura 5.4](#). A probabilidade de falha é de 74,00% ([Figura 5.4 \(a\)](#)) e 65,40% ([Figura 5.4 \(b\)](#)), respectivamente. Com 10.000 simulações, a probabilidade de falha é de 65,23%, evidenciando a tendência de estabilização com o aumento do número de simulações. Diante do exposto, percebemos que o número de simulações interfere diretamente na precisão dos resultados, de modo que quanto maior o número de simulações maior a precisão nos resultados.

A precisão tende a estabilizar após certo número de simulações e depende de cada caso em estudo (BUKAÇI *et al.*, 2016). O método de Simulação de Monte Carlo induz a um erro no pior caso da ordem de $E(N_{MC}^{-1/2})$, enquanto outros métodos de refinamento, como *Latin Hypercube*, têm erros da ordem $E(N_{MC}^{-1/d})$. Sem métodos de refinamento, a geração de números aleatórios deve prosseguir até que se chegue a um desvio-padrão aceitável (σ_{ac}). Recomenda-se o procedimento a seguir para determinar quando parar de gerar novos valores:

- i. *Passo1*: Determine um valor aceitável para o desvio-padrão do estimador (σ_{ac});
- ii. *Passo2*: Gere no início pelo menos 100 dados;
- iii. *Passo3*: Continue gerando dados, até que $(\sigma_{atual}/\sqrt{N_{MC}} < \sigma_{ac})$, onde σ_{atual} é o desvio-padrão da amostra atual com N_{MC} valores.

A literatura sabe que não só o número de simulações interfere na precisão dos resultados, como também a qualidade dos números gerados (ROSS, 2008). Discutiremos este tópico na seção [5.3](#) deste trabalho.

5.3 GERAÇÃO DE NÚMEROS ALEATÓRIOS

A implementação do Método de Monte Carlo está intrinsecamente ligada à geração de números aleatórios. A quantidade e qualidade desta sequência de números gerados influenciam diretamente na precisão dos resultados. Boa parte dos estudos deriva de uma variável aleatória uniformemente distribuída entre 0 e 1.

5.3.1 Tipos de números aleatórios

Os números aleatórios podem ser classificados de acordo com o tipo de número gerado em:

- i. **Números Aleatórios:** são números gerados de maneira completamente imprevisível, através de processos naturais, como o jogar de um dado não viciado ou o decaimento radioativo. Esses números são geralmente encontrados em livros com uma quantidade relativamente pequena de amostragem.

- ii. **Números Pseudoaleatórios:** são os números mais utilizados devido à praticidade, sendo gerados por simples algoritmos de computadores. Este tipo de números não é genuinamente aleatório, pois ele é criado por modelos determinísticos.
- iii. **Números Quase-Aleatórios:** também são números criados por algoritmo de computador, contudo, são produzidos usando técnicas mais rebuscadas de refinamento, como uniformemente distribuídos ou acoplamento de vários pontos de partida.

5.3.2 Tipos de geradores de números aleatórios

Basicamente, existem três métodos distintos para gerar número aleatório: algoritmo, dispositivos físicos e tabelas.

i. *Algoritmos:*

Os números gerados por algoritmos não são considerados aleatórios. Isso porque estes números são gerados por modelos deterministas, perdendo a principal característica deles, a imprevisibilidade. A literatura os chama de pseudoaleatório, visto que o intuito é gerar uma massiva quantidade de números, com baixa carga computacional. Portanto, o objetivo não é gerar números genuinamente aleatórios, mas uma sequência de valores que parecem aleatórios dentro de um determinado intervalo.

Quase todo algoritmo utiliza processos de construção recursivos. Os pontos de partida, chamados de semente, são geralmente números positivos inteiros coletados através de alguma ferramenta do computador, como o relógio, data, últimas teclas digitadas, localizações, etc. Todo bom algoritmo de geração de números pseudoaleatórios deve passar por um teste de validação, como: teste Qui-quadrado ou Kolmogorov-Smirnov, por teste de aderência; teste visual, por uso de gráfico de dispersão; teste de correlação à determinada função; ou teste de frequência, por validação de uniformidade (PIDD, 2004).

Os mais conhecidos tipos de algoritmos geradores de números pseudoaleatórios são:

Gerador meio-quadrado: desenvolvido por John Von Neumann em 1946, um dos principais precursores do uso do Método de Monte Carlo, é um método bem simples, no qual a cada interação, eleva-se um número “semente” ao quadrado e extraem-se os dígitos do meio do resultado. O processo continua usando o número anterior. Por exemplo, suponha que o número inicial é $u_1 = 1457$, obtido do relógio do computador, $u_1^2 = 2.122.849$, os números do meio é $n_1 = 2284$. O próximo passo é $u_2^2 = 2284^2 = 5.216.656$ e $u_3^2 = 1665^2 = 2.772.225$. Assim, será gerada uma sequência de números pseudoaleatórios com quatro dígitos: $S_1 = \{1457, 2284,$

1665, 7222, 1572, 7118...} O método gerador meio-quadrado apesar de simples e bem aceitável, não retrata uniformidade e período de geração longo, tendendo para geração de números mais baixos com repetição da mesma sequência em curtos intervalos de interação (CHWIF e MEDINA, 2015).

Gerador Congruente Linear ou residual: é o método mais popularmente empregado. Depende apenas de quatro parâmetros: o multiplicador, a ; a constante aditiva, c ; o módulo, M ; e a semente inicial, r_0 . O processo de geração começa com a escolha dos quatro parâmetros, pois quanto mais alto o valor de M , melhores a geração e o período de repetição, seguidos da escolha da semente ($1 \leq r_0 \leq M$) e o cálculo do próximo termo pela [Equação 5.3](#).

$$r_i = (a \times r_{i-1} + c) \bmod(M) \quad \text{Equação 5.3}$$

O processo se repete usando novamente a [Equação 5.3](#), desta vez substituindo a semente inicial (r_0) por r_1 . Esse método gera números aleatórios uniformemente distribuídos entre 0 e $M-1$. Para conseguir uma geração entre $[0,1]$, basta dividir o valor calculado por $M-1$. A sequência de números gerados para $a = 7$, $c = 12$, $M = 22$ e $r_0 = 1457$ é: $S_1 = \{3,11,1,19,13,15,7...\}$ e uniformemente distribuída entre 0 e 1 fica: $S_2 = \{0,1429; 0,5238, 0,0476, 0,9048, 0,6191, 0,7143, 0,3333...\}$ A [Tabela 5.2](#) mostra os valores mais usuais para os parâmetros de entrada.

Tabela 5.2 – Valores usuais utilizados no método da congruência linear. **Fonte:** Chwif e Medina (2015).

a	c	M	Período de repetição
75	0	$2^{31}-1$	$2^{31}-2$
1.664.525	1.013.904.223	2^{32}	2^{32}
69.069	0	2^{32}	2^{32}
$6,36414e^{18}$	1	2^{64}	2^{64}

Gerador de atraso de Fibonacci: semelhante ao Método da Congruência Linear, porém utiliza vários parâmetros e sementes como ponto de partida para geração do número. Esta classe de gerador tem como objetivo melhorar o gerador congruente linear. Estes são baseados numa generalização da sequência de Fibonacci.

Neste tipo de gerador, o próximo termo pode ser determinado por qualquer operador matemático, a [Equação 5.4](#) mostra a soma. O período de repetição é $(2^k - 1) \times 2^{m-1}$ para adição ou subtração, já para multiplicação é $(2^k - 1) \times 2^{m-3}$.

$$S_i = (S_{i-j} + S_{i-k}) \bmod(M) \quad \text{Equação 5.4}$$

Geradores Híbridos: É a combinação de duas ou mais classes de geradores com o objetivo de melhorar o gerador final.

ii. Dispositivos físicos:

São equipamentos acoplados ao computador (antenas, válvulas, receptores, etc.) que captam algum ruído eletromagnético, térmicos, fotoelétricos ou quânticos, transformando-os em sinal elétrico. A partir de um algoritmo refinado, este sinal é convertido numa sequência de números binários, que, por sua vez, é transformada em números aleatórios.

Teoricamente, este método pode gerar números aleatórios genuínos. Porém, se o meio estiver contaminado por uma determinada frequência, os dados podem ser viciados, gerando um desvio na distribuição de probabilidade. Periodicamente, esses números devem ser analisados quanto à qualidade de geração (imprevisibilidade), um processo lento que demanda tempo e recurso computacional.

iii. Tabelas:

São listas impressas ou arquivos de computador contendo uma coleção de números binários ou decimais, onde uma sequência de números aleatórios foi obtida por algum dispositivo mecânico (jogar dados, cartas ou roletas), decaimento radioativo ou entrelaçamento quântico, seguindo uma distribuição de probabilidade uniforme. A [Tabela 5.3](#) mostra parte de um exemplo de tabela contendo 224 dígitos aleatórios uniformemente em sequência de quatro dígitos colados.

Tabela 5.3 – Sequência de 224 números aleatórios com distribuição uniforme. **Fonte:** Chwif e Medina (2015).

8147	9505	9502	3404	1966	1299	3998	2399
9208	6557	344	5853	2511	5688	2599	1233
1270	0357	4387	2238	6160	4994	8001	1839
9134	8491	3816	7513	4733	0119	4314	2400
6324	9340	3816	2551	3517	3371	9106	4173
9575	6787	7655	7513	8308	9133	1818	0497
2785	7577	7952	2551	5853	1524	2638	9027

A sequência de escolha pode ser pelas linhas (exemplo: $S_1 = \{8;1;4;7;9;5; \dots; 2;6;3;8;9;0;2;7\}$, com 224 números, ou $S_2 = \{0,8147; 0,9505; \dots; 0,2638; 0,9027\}$, com 56 números), ou pelas colunas (exemplo: $S_3 = \{8;1;4;7;9;2; \dots; 0;4;9;7;9;0;2;7\}$, com 224 números, ou $S_4 = \{0,8147; 0,9208; \dots; 0,0497; 0,9027\}$, com 56 números). A forma de se ampliar a utilização da tabela com números decimais é usar a seguinte sequência $S_5 = \{0,8147; 0,1479; 0,4795; \dots; 0,3890; 0,8902; 0,9027\}$, com 400 números uniformemente distribuídos.

O uso de tabela caiu em desuso com o surgimento de algoritmos melhorados para geração de números pseudoaleatórios, motivado pelo custo de armazenamento e pelo tamanho das tabelas. Se as tabelas são pequenas, geram curtas sequências. Se as tabelas são grandes demais, consomem muita memória do computador (DORNELLES FILHO, 2000).

A primeira tabela que se tem notícia é de 1927, publicada por Leonard H. C. Tippett, contendo 41600 números aleatórios, obtidos ao se retirar os dígitos do meio dos valores das áreas das paróquias existentes na Inglaterra (CHWIF e MEDINA, 2015). Há várias tabelas publicadas na literatura, dentre elas destacamos a tabela de Rand Co. (1955), provavelmente, a maior tabela já impressa (um milhão de números uniformemente distribuídos), e Abramowitz e Stegun (1965), com 2500 números.

5.3.3 Parâmetros de qualidade para geração de números pseudoaleatórios

A precisão e a qualidade das simulações dependem diretamente da qualidade dos números pseudoaleatórios gerados. Dentre as principais características destacamos a aleatoriedade, periodicidade, reproduzibilidade, uniformidade e velocidade de geração. Em alguns tipos de simulação, a qualidade tem influência direta da qualidade, como integração numérica, em outros nem tanto (DORNELLES FILHO, 2000).

- i. **Aleatoriedade:** Todo gerador tem que partir da premissa de ser o mais imprevisível possível. A aleatoriedade é a propriedade que denota a incerteza relacionada à qualidade do algoritmo em demonstrar essa imprevisibilidade. Esta qualidade pode ser mensurada, em parte, por teste de correlação a uma determinada função e/ou teste de aderência a uma determinada distribuição de probabilidade, conforme reportado no item 5.3.2-i. Logo, entende-se que o gerador deva apresentar correlação próxima de zero para qualquer função (linear, quadrática, exponencial, etc.), demonstrando que quanto menor a correlação, maior a aleatoriedade (DORNELLES FILHO, 2000). Além de revelar similaridade com alguma distribuição de probabilidade (normal, exponencial, beta, uniforme, etc.), demonstra que quanto maior a similaridade, maior a aleatoriedade para fins de simulação (CHWIF e MEDINA, 2015).
- ii. **Periodicidade:** é uma propriedade ligada diretamente à capacidade do gerador de não repetir a série após a criação de uma determinada quantidade de números, ou seja, suponha uma sequência com n termos $S_1 = \{s_1, s_2, s_3, \dots, s_n\}$, o período seria a quantidade de termos gerados após a constatação $s_{n+1} = s_1$. Esta propriedade apresenta limitação tanto ligada ao *software* (algoritmo) quanto ao *hardware* (bits por memória do computador). Logo, algoritmos mais refinados e computadores com maior capacidade de processamento aumentam o período de repetição. Não se recomenda ultrapassar o período do gerador. Buscar algoritmos híbridos e melhores sementes resolve a grande maioria dos problemas.

- iii. **Reprodutibilidade:** é a característica do algoritmo de mudar a sequência de números gerados após algum outro processamento que não seja gerar os números pseudoaleatórios. Em alguns casos, é importante que a sequência não seja alterada, tais como correção de *bugs* de processamento com certa combinação de números, análise de resultados após simulações, troca de computador para nova simulação, etc.
 - iv. **Uniformidade:** entende-se por uniformidade a qualidade do gerador de criar números pseudoaleatórios uniformemente distribuídos entre determinada faixa de observação, ou seja, se a faixa observada for dividida em n pedaços iguais, em todos os pedaços a mesma quantidade de pontos existirá. Veja a [Figura 5.5](#). Ela mostra a geração de cinquenta ([Figura 5.5 \(a\)](#)) e duzentos ([Figura 5.5 \(b\)](#)) pontos criados por uma distribuição uniforme entre $-0,5$ e $0,5$ para ambos os eixos (abscissa e coordenada). Percebe-se certa uniformidade na geração dos números, já que em todos os quadrantes o número de pontos foi próximo a 12 e 50 unidades, respectivamente.

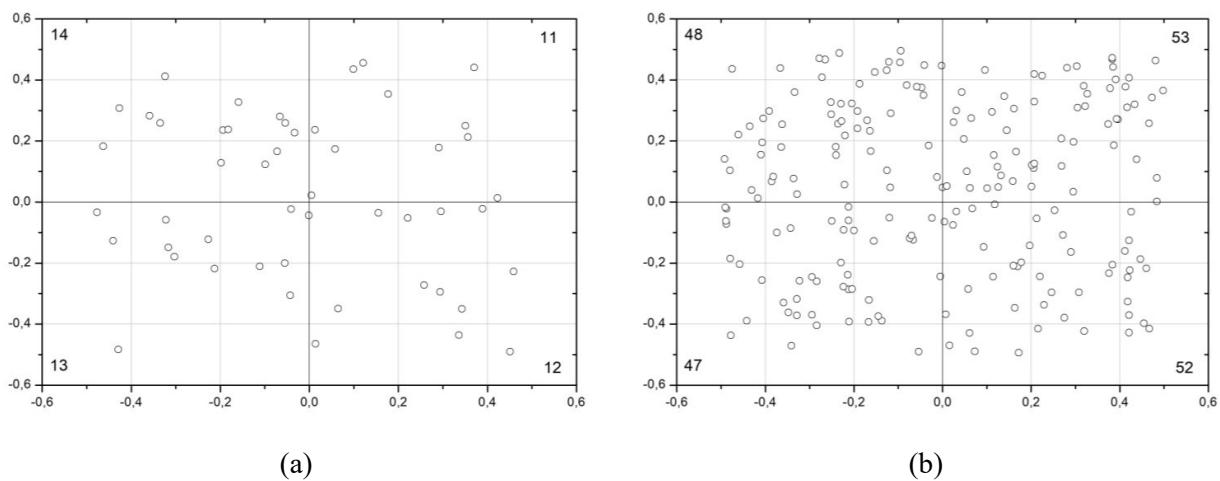


Figura 5.5 – Uniformidade no preenchimento bidimensional de um gerador uniformemente distribuído entre -0,5 e 0,5 para 50 (a) e 200 (b) números gerados.

- v. **Velocidade de geração:** algoritmos otimizados e de curtos passos de cálculo geram números pseudoaleatórios mais rápidos e com menor uso de memória do computador. Quando se deseja simular um determinado comportamento usando o Método de Monte Carlo, é imprescindível que o algoritmo gerador dê resposta rápida de modo efetivo. Em geral, a velocidade de um gerador de números pseudoaleatórios não é preocupante, a menos que a geração seja extremamente lenta ou o restante do programa seja rápido demais (DORNELLES FILHO, 2000).

5.3.4 Geração de números pseudoaleatórios com distribuição de probabilidade contínua

Existem diversas técnicas para geração de números pseudoaleatórios com distribuição de probabilidade contínua definida, dentre elas destacamos a Transformada Inversa e a Técnica de Aceitação e Rejeição. O método mais popular é a Transformada Inversa (CHWIF e MEDINA, 2015). Este método consiste em simular a variável com distribuição de probabilidade a partir da função de densidade de distribuição e da geração de um número pseudoaleatório com distribuição de probabilidade contínua, tal que:

$$r_i = \int_{-\infty}^{x_i} f(x_i) dx \quad \text{Equação 5.5}$$

Onde r_i é a número pseudoaleatório com distribuição uniforme entre 0 e 1, $f(x_i)$ é a função de densidade de probabilidade, e x_i é a variável pseudoaleatório cuja distribuição é dada pela função $f(x_i)$. A seguir apresentamos alguns algoritmos para a criação de números pseudoaleatórios com distribuições de probabilidade contínua, relacionadas ao objetivo deste trabalho.

5.3.4.1 Distribuição exponencial

A função de densidade de distribuição exponencial é dada pela [Equação 5.6](#). Igualando a função ao número aleatório uniformemente distribuído, obteremos a [Equação 5.7](#).

$$f(x) = 1 - e^{-\lambda x} \quad \text{Equação 5.6}$$

$$r_i = \int_{-\infty}^{x_i} 1 - e^{-\lambda x_i} dx \quad \text{Equação 5.7}$$

Onde $\lambda = 1/\mu$ e μ é a média da distribuição exponencial. Logo, o número aleatório com distribuição de probabilidade exponencial é dado pela [Equação 5.8](#).

$$x_i = -\frac{1}{\lambda} \ln(1 - r_i) \quad \text{Equação 5.8}$$

5.3.4.2 Distribuição normal

A distribuição normal, também chamada de distribuição gaussiana, é a família de distribuições contínuas de probabilidade mais importante, devido à sua aplicabilidade em diversos campos da ciência. Os parâmetros que governam esta distribuição são a média (μ) e o desvio-padrão (σ). A [Equação 5.9](#) mostra a função de densidade de distribuição normal.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

Equação 5.9

Onde μ é a média da distribuição normal e σ é o desvio-padrão. A importância da distribuição normal como modelo de fenômenos quantitativos nas ciências naturais deve-se ao Teorema do Limite Central. Neste caso, medições de fenômenos físicos (ruídos e contagem de fótons), partes anatômicas dos seres vivos (bico de aves, relação altura/idade/sexo de humanos, etc.), coeficiente de inteligência humana, filtros de fotos, aumento de preço de *commodities* (trigo, ouro e algodão) no mercado financeiro podem ser bem aproximados pela distribuição normal.

Para obtenção de uma variável aleatória seguindo distribuição normal com média μ e o desvio-padrão σ , deve-se utilizar a seguinte equação:

$$x_i = (\sqrt{-2 \times \ln(r_i)} \times \cos(2 \times \pi \times u_i)) \times \sigma + \mu \quad \text{Equação 5.10}$$

Onde r_i e u_i são a números pseudoaleatórios com distribuição uniforme entre 0 e 1 distintos. A distribuição normal foi usada principalmente para gerar números pseudoaleatórios que representam o cobrimento (AKIYAMA *et al.*, 2009; KNOW *et al.*, 2009; STEWART e MULLARD, 2007; FRIER e SØRENSEN, 2005; LOUNIS, 2004; MARTIN-PEREZ e LOUNIS, 2003; KIRKPATRICK *et al.*, 2002), a concentração superficial (TAVARES, 2013; SENGUL, 2011; KNOW *et al.*, 2009; VAL e TRAPPER, 2008; STEWART e MULLARD, 2007; FRIER e SØRENSEN, 2005; MARTIN-PEREZ e LOUNIS, 2003; KIRKPATRICK *et al.*, 2002), o coeficiente de difusão de cloreto (VAL e TRAPPER, 2008; STEWART e MULLARD, 2007; FRIER e SØRENSEN, 2005; KIRKPATRICK *et al.*, 2002; BRÜHWILER *et al.*, 2001) e o teor crítico de cloreto (BASTIDAS-ARTEAGA *et al.*, 2011; VAL e TRAPPER, 2008; STEWART e MULLARD, 2007; FRIER e SØRENSEN, 2005; BRÜHWILER *et al.*, 2001).

5.3.4.3 Distribuição log-normal

A distribuição log-normal pertencente à família de distribuição normal, tendo aplicação nas áreas de estudo de vida útil de materiais e preços de *commodities* em mercados financeiros. Uma característica básica desta distribuição é não admitir valores negativos, já que o logaritmo da variável é que possui distribuição normal. Assim como na distribuição normal, os parâmetros que governam esta distribuição são a média (μ) e o desvio-padrão (σ) (Equação 5.11).

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(\ln(x)-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

Equação 5.11

A [Equação 5.12](#) mostra como se obter uma variável com distribuição log-normal, a partir de uma com distribuição normal com (μ) e o desvio-padrão (σ).

$$x_i = \exp((\sqrt{-2 \times \ln(r_i)} \times \cos(2 \times \pi \times u_i)) \times \sigma + \mu) \quad \text{Equação 5.12}$$

Nos modelos de previsão de vida útil de estrutura, este tipo de distribuição de probabilidade é usado para representar o coeficiente de difusão de cloretos (VERA *et al.*, 2017; TAVARES, 2013; BASTIDAS-ARTEAGA *et al.*, 2011; AKIYAMA *et al.*, 2009; KNOW *et al.*, 2009; VAL e TRAPPER, 2008; LOUNIS, 2004; MARTIN-PEREZ e LOUNIS, 2003), concentração superficial (AKIYAMA *et al.*, 2009; LOUNIS, 2004; MARTIN-PEREZ e LOUNIS, 2003) e teor crítico de cloretos (AKIYAMA *et al.*, 2009; LOUNIS, 2004).

5.3.4.4 Distribuição normal truncada

A distribuição normal truncada é uma distribuição de probabilidade derivada da família de distribuição normal, onde uma variável aleatória normal é delimitada inferiormente, superiormente ou ambos. A distribuição normal truncada é definida da mesma forma que a distribuição normal: pela média (μ) e desvio-padrão (σ), também se escolherá um intervalo para limitar a distribuição. Sua aplicação é mais na área de econometria (Modelo *Probit* e *Tobit*), no marketing (estudos para melhorar a qualidade de serviços) e na agricultura (para previsão de preço de terreno de fazenda). A [Equação 5.13](#) ilustra a função de densidade de distribuição normal.

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, & \text{se } a \leq x \leq b \\ 0, & \text{caso contrario} \end{cases} \quad \text{Equação 5.13}$$

A geração de variáveis com distribuição normal truncada segue a mesma linha da distribuição normal ([Equação 5.10](#)), eliminando os números gerados que não estejam entre os limites definidos para a distribuição. A distribuição normal truncada é usada principalmente para representar o cobrimento em modelos de vida útil de concreto (BASTIDAS-ARTEAGA *et al.*, 2011; VAL e TRAPPER, 2008).

5.3.4.5 Distribuição beta

A distribuição beta é uma família de distribuições de probabilidade contínuas definidas no intervalo [0, 1], influenciada por dois parâmetros positivos (α e β), que aparecem como expoentes da variável aleatória e controlam a forma da distribuição. A [Equação 5.14](#) mostra a função de densidade de distribuição.

$$f(x) = \begin{cases} \frac{x^{\beta-1} \times (1-x)^{\alpha-1}}{B(\beta, \alpha)}, & \text{se } 0 < x < 1 \\ 0, & x \leq 1 \end{cases} \quad \text{Equação 5.14}$$

Onde $B(\beta, \alpha)$ é a função beta completa dada pela [Equação 5.15](#).

$$B(\beta, \alpha) = \int_0^1 t^{\beta-1} \times (1-t)^{\alpha-1} dt \quad \text{Equação 5.15}$$

A geração de números aleatórios seguindo distribuição beta pode ser realizada seguindo o algoritmo proposto por Cheng (1978). Diversos parâmetros que governam o transporte de massa no interior do concreto são modelados por distribuição beta, dentre eles destacamos o teor crítico de cloretos (VERA *et al.*, 2017; CEB Bulletin 37, 2006), a condutibilidade térmica (BASTIDAS-ARTEAGA *et al.*, 2011; VAL e TRAPPER, 2008), o *aging reduction factor* (BASTIDAS-ARTEAGA *et al.*, 2011; VAL e TRAPPER, 2008; CEB Bulletin 37, 2006), dentre outros.

5.4 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA POR ELEMENTOS FINITOS

Após a determinação e geração das variáveis aleatórias que governam o processo estocástico da iniciação da corrosão, entramos na segunda etapa da formulação probabilística do problema, que é a formulação matemática do processo de transporte de massa e energia em sólidos porosos ([Figura 5.2](#)).

Como visto anteriormente, uma solução analítica para as equações que governam o transporte de cloretos em concretos não saturados é impossível, dado o seu caráter estocástico (BASTIDAS-ARTEAGA *et al.*, 2011), e a forte dependência do transporte com o tempo de exposição, a inter-relação entre as propriedades dos materiais e as condições de contorno nos parâmetros físicos do concreto (MARTIN-PEREZ, 1999). Diante desta problemática, cabe a aplicação de soluções numéricas, considerando o espaço como um problema de valor-limite e o tempo como um problema de valor inicial, onde as condições de contorno são responsáveis pela sazonalidade das condições de exposição (MARTIN-PEREZ, 1999; SAETTA *et al.*, 1993).

As Equações [3.14](#), [3.36](#) e [3.56](#) juntas resolvem simultaneamente a formulação matemática para a determinação das concentrações de cloretos livres, umidade e calor no interior do concreto. Dada a similaridade matemática entre elas, derivadas do fluxo de massa ou energia, a [Equação 5.16](#) pode bem representá-las.

$$A \times \frac{\partial \phi}{\partial t} = B \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right) + C \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial y} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + D \phi \frac{\partial h}{\partial t} + E \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{Equação 5.16}$$

Onde A, B, C, D e E são constantes do sistema expresso na [Tabela 5.4](#).

Tabela 5.4 – Constantes que correlacionam as equações de transporte de massa e energia.

Φ	A	B	C	D	E
C_{liv}	1	D_c^*	D_h^*	$\frac{\partial w_e}{\partial h}$	0
h	$\frac{\partial w_e}{\partial h}$	D_h	0	0	K
T	$\rho_c c_q$	λ	0	0	0

5.4.1 Método dos Resíduos Ponderados

O método dos resíduos ponderado é uma técnica matemática usada para resolução de equações diferenciais. O método envolve basicamente dois passos. Na primeira etapa, uma solução aproximada baseada no comportamento geral da variável dependente é assumida. Como a solução em questão é apenas aproximada, ela não satisfaz, em geral, a equação diferencial e, portanto, resulta num erro, que chamamos de resíduo. Este resíduo tende a ser minimizado sobre todo o domínio da solução para produzir um sistema de equações lineares. O segundo passo é resolver esse sistema de equações, impondo a condição de contorno para produzir uma solução aproximada (ZIENKIEWICZ e MORGAN, 1983).

O Método de Galerkin é uma subclasse do Método dos Resíduos Ponderados, onde a função de ponderação escolhida é a própria função de aproximação associada aos nós dos elementos (MARTIN-PEREZ, 1999). A seguir, apresentamos a formulação matemática por elementos finitos para resolução da [Equação 5.16](#) em uma dimensão. A resolução para duas dimensões pode ser consultada no trabalho de Martin-Perez (1999). Empregando o Método dos Resíduos Ponderados, mais precisamente a formulação fraca do Método de Galerkin, temos:

$$\int_{\Omega} N_i \left(A \times \frac{\partial \phi}{\partial t} - B \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} - C \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial h}{\partial x} - D \phi \frac{\partial h}{\partial t} - E \frac{\partial T}{\partial t} \right) d\Omega = 0 \quad \text{Equação 5.17}$$

Onde N_i é a função de forma associada ao nó do elemento no domínio Ω . Expandindo a [Equação 5.17](#) e aplicando a integração por partes, chegamos à [Equação 5.18](#):

$$\int_{\Omega} N_i A \times \frac{\partial \phi}{\partial t} + B \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial N_i}{\partial x} - \left[N_i \frac{\partial \phi}{\partial x} \right]_l - N_i C \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial h}{\partial x} - N_i D \phi \frac{\partial h}{\partial t} - N_i E \frac{\partial T}{\partial t} d\Omega = 0 \quad \text{Equação 5.18}$$

Sabendo que o domínio espacial pode ser discretizado em M partes iguais, com elementos e nós numerados, a aproximação ($\hat{\phi}$) pode ser construída por elementos finitos da seguinte maneira:

$$\hat{\phi} = \sum_{m=1}^{M+1} \phi_m(t) N_j(x) \quad \text{Equação 5.19}$$

Onde $\phi_m(t)$ é a aproximação dependente da [Equação 5.17](#) que depende do tempo e $N_m(x)$ é a função de forma-padrão associada com a discretização espacial. Inserindo a aproximação $(\hat{\phi})$, chegamos ao conjunto de equações:

$$\sum_{m=1}^M \left\{ \frac{d\phi_m}{dt} \left(A \int_{\Omega} N_i N_j dx \right) \right. \\ \left. + \phi_m \left(B \int_{\Omega} \frac{dN_i}{dx} \frac{dN_j}{dx} dx - C \int_{\Omega} N_i \frac{dN_j}{dx} [h_j] \frac{dN_j}{dx} dx \right. \right. \\ \left. \left. - D \int_{\Omega} N_i N_j \left[\frac{\partial h_j}{\partial t} \right] N_j dx \right) - E \int_{\Omega} N_i \left[\frac{\partial T_j}{\partial t} \right] N_j \right\} = B \left[N_i \frac{\partial \hat{\phi}}{\partial x} \right]_l \quad \text{Equação 5.20}$$

Que pode ser escrito na forma da [Equação 5.21](#),

$$[C] \left\{ \frac{d\phi}{dt} \right\} + [K] \{\phi\} = \{f\} \quad \text{Equação 5.21}$$

Onde típicas matrizes de elemento são agora:

$$C_{ij} = A \int_0^L N_i N_j dx \quad \text{Equação 5.22}$$

$$K_{ij} = \underbrace{B \int_0^L \frac{dN_i}{dx} \frac{dN_j}{dx} dx}_{K1} - \underbrace{C \int_0^L N_i \frac{dN_j}{dx} \{h_j\} \frac{dN_j}{dx} dx}_{K2} - \underbrace{D \int_0^L N_i N_j \left\{ \frac{\partial h_j}{\partial t} \right\} N_j dx}_{K3} \quad \text{Equação 5.23}$$

$$f_i = \underbrace{B \left[N_i \frac{\partial \hat{\phi}}{\partial x} \right]_0^L}_{f1 \rightarrow CC} + \underbrace{E \int_0^L N_i N_j \left\{ \frac{\partial T_j}{\partial t} \right\} dx}_{f2} \quad \text{Equação 5.24}$$

Onde N_i e N_j são a função de forma (ver item [5.4.2](#)); A, B, C, D e E são constantes do sistema expresso na [Tabela 5.4](#). A [Equação 5.21](#) representa um sistema de equações diferenciais de primeira ordem no domínio do tempo. Para obter uma solução numérica, a [Equação 5.21](#) é resolvida no domínio do tempo por meio de uma aproximação de diferenças finitas ([Equação 5.25](#)) (ZIENKIEWICZ e MORGAN, 1983).

$$\left(\frac{[C]}{\Delta t} + \theta [K] \right) \{\phi\}^{t+\Delta t} = \left(\frac{[C]}{\Delta t} - (1 - \theta) [K] \right) \{\phi\}^t + (1 - \theta) \{f\}^t + \theta \{f\}^{t+\Delta t} \quad \text{Equação 5.25}$$

Onde θ é um parâmetro que varia de 0 a 1 ([Equação 5.46](#)) e regula o incremento do tempo, $\{\phi\}^{t+\Delta t}$ é o vetor que representa o resultado da EDP em análise no tempo $t + \Delta t$ e $\{\phi\}^t$ é o vetor que representa o resultado da EDP em análise no tempo atual.

5.4.2 Funções padrões de forma

A resolução da [Equação 5.21](#) necessita da determinação de um conjunto de funções de forma ou ajuste. Elas são responsáveis por interpolar/aproximar a solução entre os valores discretos obtidos nos nós da malha. Cada tipo de função apresenta melhor comportamento de aproximação a determinado tipo de malha. Geralmente, polinômios de baixa ordem são tipicamente escolhidos como funções de forma, como funções lineares e quadráticas (NITHIARASU *et al.*, 2016). A [Figura 5.6](#) mostra dois tipos de função de forma-padrão, associados a elementos em uma dimensão.

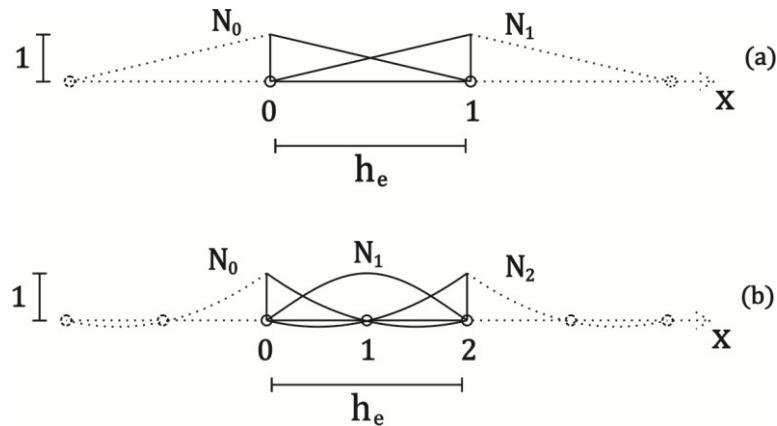


Figura 5.6 – Elementos em uma dimensão associado a funções típicas de forma linear (a) e quadrática (b). **Fonte:** Zienkiewicz e Morgan (1983).

As [Equações 5.26](#) e [5.27](#) mostram as funções de forma linear e quadrática, respectivamente. Quanto maior o grau do polinômio desta função, maior a precisão da solução numérica. Porém, as adoções de função de forma com graus elevados induzem a uma grande carga computacional, que nem sempre repercutem diretamente numa grande redução do erro para estes tipos de funções estudadas neste trabalho. Recomenda-se a sua utilização em eventos extremos, onde as condições de contorno mudam consideravelmente entre o *time step* (Δt).

$$N_0 = \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} \text{ e } N_1 = \frac{x_1 - x}{x_2 - x_1} \quad \text{Equação 5.26}$$

$$N_0 = \frac{(x_2 - x)(x_3 - x)}{(x_2 - x_1)(x_3 - x_1)}, N_1 = \frac{(x_1 - x)(x_3 - x)}{(x_1 - x_2)(x_3 - x_2)} \text{ e } N_2 = \frac{(x_1 - x)(x_2 - x)}{(x_1 - x_3)(x_2 - x_3)} \quad \text{Equação 5.27}$$

Sendo assim, com as funções de forma lineares ([Equação 5.26](#)), as matrizes de capacidade ($[C]$), condutibilidade ($[K]$) e força ($[f]$) ficam da seguinte forma por elemento, respectivamente:

$$[C^e] = A \int_0^{h_e} N_i N_j dx = Ah_e \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \frac{1}{3} & \frac{6}{3} \\ 1 & 1 \\ \frac{1}{6} & \frac{3}{3} \end{bmatrix} \quad \text{Equação 5.28}$$

$$[K1^e] = B \int_0^{h_e} \frac{dN_i}{dx} \frac{dN_j}{dx} dx = B \frac{1}{h_e} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Equação 5.29}$$

$$[K2^e] = C \int_0^{h_e} N_i \frac{dN_j}{dx} \{h_j\} \frac{dN_j}{dx} dx = C \frac{1}{2h_e} \begin{bmatrix} h_1 - h_2 & h_2 - h_1 \\ h_1 - h_2 & h_2 - h_1 \end{bmatrix} \quad \text{Equação 5.30}$$

$$[K3^e] = D \int_0^{h_e} N_i N_j \left\{ \frac{\partial h_j}{\partial t} \right\} N_j dx = D \frac{h_e}{12} \begin{bmatrix} 3 \frac{dh_1}{dt} + \frac{dh_2}{dt} & \frac{dh_1}{dt} + \frac{dh_2}{dt} \\ \frac{dh_1}{dt} + \frac{dh_2}{dt} & \frac{dh_1}{dt} + 3 \frac{dh_2}{dt} \end{bmatrix} \quad \text{Equação 5.31}$$

$$[f1] = B \left[N_i \frac{\partial \hat{\phi}}{\partial x} \right]_0^L = \begin{cases} -B \frac{\partial \hat{\phi}}{\partial x} \Big|_{x=0} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ B \frac{\partial \hat{\phi}}{\partial x} \Big|_{x=L} \end{cases} \quad \text{imposição da condição de contorno (CC)} \quad \text{Equação 5.32}$$

$$[f2^e] = E \int_0^{h_e} N_i N_j \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} \right\} dx = E h_e \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{6} \\ \frac{1}{6} & \frac{1}{3} \end{bmatrix} \begin{cases} \frac{dT_1}{dt} \\ \frac{dT_2}{dt} \end{cases} \quad \text{Equação 5.33}$$

Considerando as funções de forma quadrática (Equação 5.27) no cálculo por elemento das matrizes de capacidade ($[C]$), condutibilidade ($[K]$) e força ($[f]$), os resultados estão a seguir:

$$[C^e] = A \int_0^{h_e} N_i N_j dx = Ah_e \begin{bmatrix} \frac{2}{15} & \frac{1}{15} & -\frac{1}{30} \\ \frac{1}{15} & \frac{8}{15} & \frac{1}{15} \\ -\frac{1}{30} & \frac{1}{15} & \frac{2}{15} \end{bmatrix} \quad \text{Equação 5.34}$$

$$[K1^e] = B \int_0^{h_e} \frac{dN_i}{dx} \frac{dN_j}{dx} dx = B \frac{1}{3h_e} \begin{bmatrix} 7 & -8 & 1 \\ -8 & 16 & -8 \\ 1 & -8 & 7 \end{bmatrix} \quad \text{Equação 5.35}$$

$$[K2^e] = C \int_0^{h_e} N_i \frac{dN_j}{dx} \{h_j\} \frac{dN_j}{dx} dx = C \frac{1}{30h_e} \begin{bmatrix} 37h_1 - 44h_2 + 7h_3 & -44h_1 + 48h_2 - 4h_3 & 7h_1 - 4h_2 - 3h_3 \\ 36h_1 - 32h_2 - 4h_3 & -32h_1 + 64h_2 - 32h_3 & -4h_1 - 32h_2 + 36h_3 \\ -3h_1 - 4h_2 + 7h_3 & -4h_1 + 48h_2 - 44h_3 & 7h_1 - 44h_2 + 37h_3 \end{bmatrix} \quad \text{Equação 5.36}$$

$$[K3^e] = D \int_0^{h_e} N_i N_j \left\{ \frac{\partial h_j}{\partial t} \right\} N_j dx = D \frac{h_e}{420} \begin{bmatrix} 39 \frac{dh_1}{dt} + 20 \frac{dh_2}{dt} - 3 \frac{dh_3}{dt} & 20 \frac{dh_1}{dt} + 16 \frac{dh_2}{dt} - 8 \frac{dh_3}{dt} & -3 \frac{dh_1}{dt} - 8 \frac{dh_2}{dt} - 3 \frac{dh_3}{dt} \\ 20 \frac{dh_1}{dt} + 16 \frac{dh_2}{dt} - 8 \frac{dh_3}{dt} & 16 \frac{dh_1}{dt} + 192 \frac{dh_2}{dt} + 16 \frac{dh_3}{dt} & -8 \frac{dh_1}{dt} + 16 \frac{dh_2}{dt} + 20 \frac{dh_3}{dt} \\ -3 \frac{dh_1}{dt} - 8 \frac{dh_2}{dt} - 3 \frac{dh_3}{dt} & -8 \frac{dh_1}{dt} + 16 \frac{dh_2}{dt} + 20 \frac{dh_3}{dt} & -3 \frac{dh_1}{dt} + 20 \frac{dh_2}{dt} + 39 \frac{dh_3}{dt} \end{bmatrix} \quad \text{Equação 5.37}$$

Onde h_e é o tamanho dos elementos da malha, em metros ([Figura 5.6](#)); h_j é a umidade relativa no nó em análise, adimensional; $\frac{dh_j}{dt}$ é a variação temporal da umidade relativa no nó em análise, em 1/s; e $\frac{dT_j}{dt}$ é a variação temporal da temperatura no nó em análise, em °C/s. As variações temporais de umidade relativa $\left(\frac{dh}{dt}\right)$ e da temperatura $\left(\frac{dT}{dt}\right)$ em cada nó podem ser obtidas por elementos finitos através da [Equação 5.38](#) ou por diferenças finitas com uma das Equações [5.39](#) a [5.42](#).

$$\left\{ \frac{d\phi(t)}{dt} \right\} = [C]^{-1}(\{f\} - [K]\{\phi\}) \quad \text{Equação 5.38}$$

$$\left\{ \frac{d\phi(t)}{dt} \right\} = \frac{\phi(t + \Delta t) - \phi(t)}{\Delta t} + O(\Delta t) \quad \text{Equação 5.39}$$

$$\left\{ \frac{d\phi(t)}{dt} \right\} = \frac{\phi(t) - \phi(t - \Delta t)}{\Delta t} + O(\Delta t) \quad \text{Equação 5.40}$$

$$\left\{ \frac{d\phi(t)}{dt} \right\} = \frac{\phi(t + \Delta t) - \phi(t - \Delta t)}{2\Delta t} + O(\Delta t^2) \quad \text{Equação 5.41}$$

$$\left\{ \frac{d\phi(t)}{dt} \right\} = \frac{-\phi(t + 2\Delta t) + 8\phi(t + \Delta t) - 8\phi(t - \Delta t) + \phi(t - 2\Delta t)}{12\Delta t} + O(\Delta t^4) \quad \text{Equação 5.42}$$

O emprego de diferenças finitas para determinação das derivadas temporais em cada nó do domínio garante maior praticidade, entretanto, há o aumento no erro da solução. As matrizes com função de forma linear e malha triangular ou retangular, para cálculo em duas dimensões, podem ser encontradas no trabalho de Martin-Perez (1999).

5.4.3 Imposição das condições de contorno

As condições de contorno usadas para resolução das Equações [3.14](#), [3.36](#) e [3.56](#), generalizadas pela [Equação 5.16](#), são impostas após aplicação do Método de Galerkin, onde o vetor de força ([Equação 5.24](#)) satisfaz o emprego da condição de contorno (CC) através da criação de um fluxo na superfície ($x = 0$) e no interior do concreto ($x = L$). A CC na superfície pode ser expressa pelas equações descritas nos itens [3.2.1.3](#) (cloreto), [0](#) (UR) e [3.2.3.1](#) (temperatura). Já a condição de contorno no interior do concreto pode ser descrita de duas maneiras: adotando igual a zero, isto significa que o contorno está isolado, ou seja, $\phi(L) = \phi(L - h_e)$; ou adotando o fluxo de sólido médio semi-infinito, isso significa que a CC adota a solução da equação analítica da Segunda Lei de Fick ([Equação 3.5](#)).

Sendo assim, o vetor da [Equação 5.32](#) pode ser reescrito da seguinte maneira, considerando a CC convectiva (CC de Robin) na superfície e a solução para sólido médio semi-infinito no interior do concreto:

i. Para cloretos livres:

$$[f1] = D_c^* \left[N_i \frac{\partial \hat{C}_{liv}}{\partial x} \right]_0^L = \left\{ \begin{array}{c} - \left(\overbrace{B_c(C_0 - C_{ext})}^{Dif} + \overbrace{C_{ext}B_h(h_0 - h_{ext})}^{conv} \right) \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \frac{(C_\infty - C_0)}{\sqrt{\pi D_c^* t}} e^{-L^2/(4D_c^* t)} \end{array} \right\} \quad \text{Equação 5.43}$$

ii. Para umidade relativa:

$$[f1] = D_h^* \left[N_i \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} \right]_0^L = \left\{ \begin{array}{c} -(B_c(h_0 - h_{ext})) \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \frac{(h_{min} - h_\infty)}{\sqrt{\frac{\partial w_e}{\partial h}}} e^{-L^2/(\frac{4D_h^* t}{\partial w_e / \partial h})} \end{array} \right\} \quad \text{Equação 5.44}$$

iii. Para temperatura:

$$[f1] = D_h^* \left[N_i \frac{\partial \hat{T}}{\partial x} \right]_0^L = \left\{ \begin{array}{c} -(B_T(T_0 - T_{ext})) \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \frac{(T_{min} - T_\infty)}{\sqrt{\frac{\rho_c c_q}{\lambda}} t} e^{-L^2/(\frac{4\lambda t}{\rho_c c_q})} \end{array} \right\} \quad \text{Equação 5.45}$$

5.4.4 Escolha dos parâmetros numéricos

Os principais parâmetros que governam a solução numérica são: o comprimento da malha 1D (h_e) ([Figura 5.6](#)), o fator de ponderação da diferença-finita no tempo (θ) ([Equação 5.25](#)) e *time step* (Δt) ([Equação 5.25](#)). Quanto menor o comprimento da malha, maior o número de nós e, consequentemente, maior a precisão dos resultados. A escolha de uma boa malha influencia diretamente nos resultados, principalmente quando a malha é em duas dimensões.

O fator de ponderação da diferença-finita no tempo (θ) varia de acordo com a [Equação 5.46](#). Geralmente, o método de Crank-Nicolson é o preferido em aplicações numéricas, uma vez que

sua taxa de convergência assintótica é próxima à Δt^2 . No entanto, sua implementação é frequentemente caracterizada por oscilações em torno da solução correta (MARTIN-PEREZ, 1999).

$$\theta = \begin{cases} 0 & \text{Diferença a direita} \\ 1/2 & \text{Crank - Nicolson} \\ 2/3 & \text{Galerkin} \\ 1 & \text{Diferença a esquerda} \end{cases} \quad \text{Equação 5.46}$$

Quando a matriz $[K]$ resulta num valor positivo e a EDP tem caráter de crescimento com o tempo, como nosso caso, as equações do tipo da [Equação 5.21](#) tendem a apresentar melhor precisão para valores de θ igual a 1/2 ou 2/3, segundo a [Figura 5.7](#) (ZIENKIEWICZ e MORGAN, 1983). De todo modo, o estudo realizado por Martin-Perez (1999) revela que $\theta = 2/3$ apresentou menos oscilação com a variação brusca das condições sazonais de contorno.

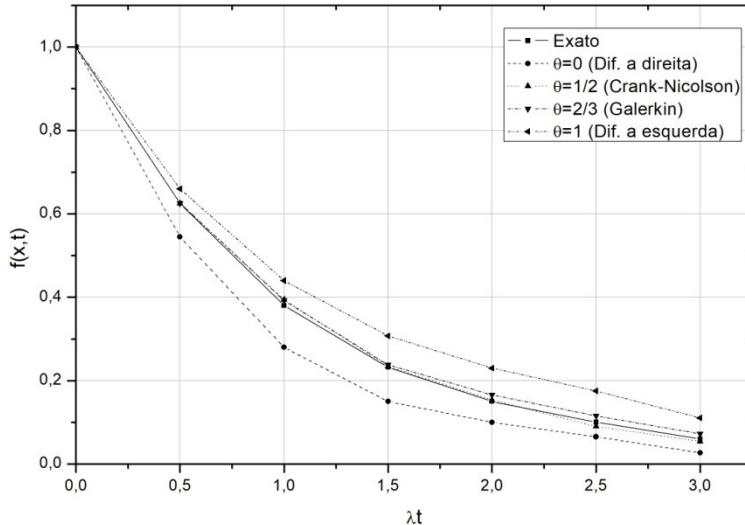


Figura 5.7 – Comparação de vários θ com a solução exata da função $df/dt + \lambda f = 0$ com $\lambda \Delta t = 0,5$. **Fonte:** Zienkiewicz e Morgan (1983).

Por fim, considerando a escolha do *time step* (Δt), verifica-se que os artigos pouco tratam sobre o tema. Sabe-se, porém, que o aumento dele causa fortes oscilações na aproximação, refletindo diretamente na precisão dos resultados. Na única publicação observada acerca do tema, recomenda-se o uso de 12 horas para minimizar o erro (MARTIN-PEREZ, 1999). Por outro lado, sua diminuição gera enorme carga computacional.

6 MODELO DE INTERAÇÃO AMBIENTE/ESTRUTURA

Estruturas de concreto armado são tipicamente duráveis, desde que concebidas adequadamente ao ambiente de exposição em que estão submetidas. Para melhorar a durabilidade destas estruturas, pesquisadores têm dedicado esforços na concepção de modelos teóricos e empíricos para prever a vida útil. Tal concepção deve ser baseada em modelos consistentes que levem em consideração vários fatores influentes e descreva a fenomenologia com certa precisão.

A [Equação 3.14](#) representa muito bem o transporte de cloretos no interior do concreto. Entretanto, requer a resolução de equações diferenciais parciais, que só podem ser resolvidas de forma numérica. De modo a simplificar os cálculos, superar as dificuldade e diminuir as incertezas, pesquisadores e engenheiros costumam assumir pressupostos em relação às condições de contorno e a interação entre o concreto e o ambiente de exposição. Esses pressupostos facilitam a aplicação do modelo na prática, porém restringe sua aplicação a certas condições, como é caso da [Equação 3.5](#) que deve ser aplicada em meios saturados e com as condições de contorno (C_s e C_∞) e “cinética do transporte de massa” (D_{ns}) constantes no tempo e no espaço.

Matematicamente, o parâmetro que reflete a interação entre o ambiente de exposição e a estrutura é a concentração superficial (C_s). Esta concentração é fator essencial, uma vez que não só representa a intensidade da ação agressiva do ambiente, como também fornece a condição de contorno para análises preditivas de estruturas de concreto armado em ambientes de agressividade marinha (CAI *et al.*, 2020b). C_s é um parâmetro complexo, influenciado por vários fatores, conforme mostra a [Figura 6.1](#). A influência de alguns desses fatores foi discutida no item [2.3](#).

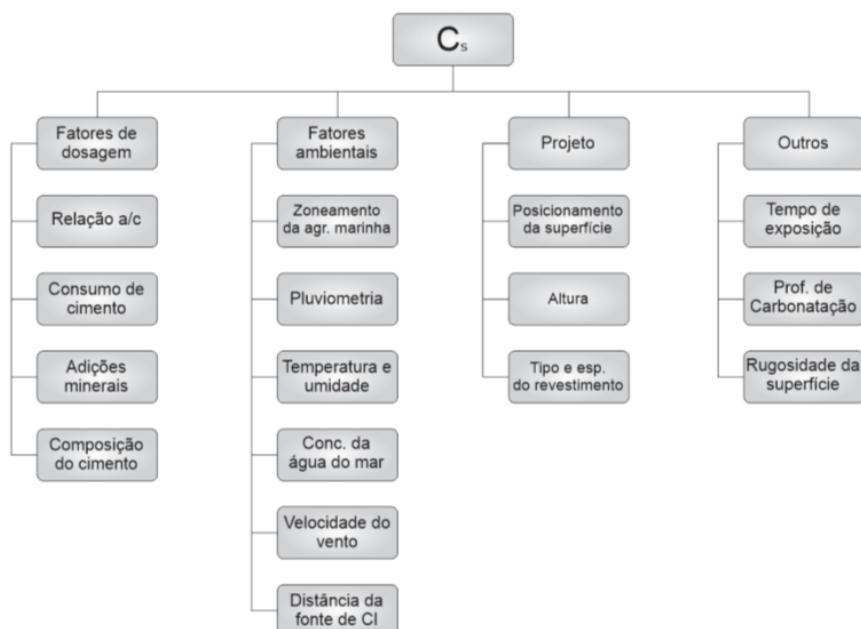


Figura 6.1 – Fatores que influenciam a concentração superficial de cloretos (C_s).

Tabela 6.1 – Valores probabilísticos da concentração superficial de cloretos obtidos de estruturas reais, ensaios de laboratório ou usados em modelos probabilísticos.

Fonte	Tipo de estudo	Condições	Tipo de distribuição	Média ou μ	COV ou β
Andrade (2005)	Ensaio de laboratório	Concreto de Cimento Portland Comum, consumo de cimento de 370kg/m ³ , a/c = 0,47, submetidos a imersão total (3,5%) por 6 meses	Log-normal	1,08-2,08	0,55
Bastidas-Arteaga <i>et al.</i> (2011)	Modelo	Concreto de Cimento Portland comum, consumo de cimento de 400kg/m ³ , a/c = 0,5, zona de gelo e desgelo	Log-normal	4%*	0,2-0,4
Breitenbücher <i>et al.</i> (1999)	Modelo	Valores obtidos de ensaios de laboratório com argamassa de outro pesquisador alemão	Normal	4%	0,50
Enright e Frangopol (1998)	Modelo	Valor obtido de outros pesquisadores em pontes norte-americanas	Log-normal	6*	0,10
Ferreira (2004)	Estrutura real/ Modelo	Amostras no porto no Mar da Noruega. Consumo de Cimento Portland comum de 380kg/m ³ , zona de respingo e flutuação de maré	Normal	5,23*	0,47
Lounis (2003)	Modelo	Ponte em concreto submetido a sais de desgelo por quatro anos	Log-normal	1,15*	0,40
Markeset (2009)	Estrutura real	Ponte na Noruega, aço liso Ø10mm, a/c = 0,40 a 0,50, concreto de Cimento Portland, zona de flutuação de maré	Log-normal	2,67	0,60
Martin-Perez e Lounis (2003)	Estrutura real/ Modelo	Concreto de ponte com FCK = 28MPa, zona de respingo.	Normal	1,27	0,40
Kwon <i>et al.</i> (2009)	Estrutura real	Concreto de Cimento Portland comum, cais localizado na Coreia do Sul, zona de atmosfera marinha	Normal	3,28*	0,10
Petcherdchoo (2018)	Modelo	Dados coletados da literatura	Triangular	2,94	0,24
Song <i>et al.</i> (2009)	Modelo	Dados coletados da literatura (65 trabalhos)	GEV	2,83	0,25
Stewart e Mullard (2007)	Modelo	Não reportada	Normal	0,763*	0,74
Tavares (2013)	Modelo	Não reportada	Normal	0,48	0,125
Vera <i>et al.</i> (2017)	Estrutura real	Concreto de Cimento Portland comum, cais no Mar Mediterrâneo (Espanha), atmosfera marinha	Beta	1,415	0,60
Val e Trapper (2008)	Modelo	Não reportada	Normal	2,40	0,10
Zhang <i>et al.</i> (2019)	Estrutura real	Comporta no estuário do Rio Qiantang (China), zona de flutuação de maré, Conc. de cl. nas águas do rio de 27,6 mg/l.	Normal	2,412*	0,33

Onde: A unidade de μ e σ são % de massa de cimento. * Valores com base no consumo de 400kg/m³ de cimento e/ou uma densidade de 2400kg/m³.

Diante da complexidade que envolve a determinação da C_s , alguns modelos de previsão de vida útil de estruturas de concreto armado tendem a representar tal parâmetro como uma variável aleatória constante no tempo, atrelando a ela certa média, desvio-padrão e distribuição de probabilidade. A [Tabela 6.1](#) mostra os valores probabilísticos da concentração superficial de cloretos obtidos de estruturas reais, ensaios de laboratório ou usados em modelos probabilísticos.

A partir dos dados coletados da [Tabela 6.1](#), percebe-se uma predominância pela distribuição de probabilidade normal e log-normal. Entretanto, as médias e desvios padrões variaram bastante entre os trabalhos, dadas às características peculiares de cada estudo analisado, tais como: zona de agressividade marinha, posição e distância em relação ao mar, características físico-químicas de concreto, condição da superfície, etc.

6.1 PROPOSTA DE MODELO GERAL PARA A CONCENTRAÇÃO SUPERFICIAL

Com o advento dos modelos numéricos auxiliados por processamento computacionais, a consideração de C_s constante no tempo foi questionada, tendo em vista a diversidade de valores encontrados na literatura e a sua influência significativa na previsão de vida útil. Os primeiros modelos avaliaram a influência do tempo (UJI, 1990; COLLINS & GRACE, 1997; COSTA & APPLETON, 1999b; KASSIR *et al.*, 2002, PACK *et al.*, 2010, entre outros) e com o passar dos anos outras variáveis foram sendo incorporadas ao modelo, tais como tipo do ambiente de exposição ([Figura 2.1](#)), tipo de aglomerante (DURACRETE, 2000; YANG *et al.*, 2018; CAI *et al.*, 2020b), uso de adições (CAI *et al.*, 2020b), relação água/cimento (CHALEE *et al.*, 2009; PETCHERDCHOO, 2013; YANG *et al.*, 2018; CAI *et al.*, 2020b), etc. A [Tabela 2.5](#) mostra alguns modelos de concentração superficial publicados na literatura.

A deposição de cloretos na superfície do concreto é um processo cumulativo. Os modelos de predição de C_s são caracterizados por apresentarem funções lineares e não lineares, sendo elas funções crescentes indefinidamente com o tempo de exposição ([Figura 6.2\(a\)](#)), como os propostos por Uji *et al.* (1990), Petcherdhoo (2013), Zou (2016) e Wang *et al.* (2017); funções descontínuas crescentes com o tempo até um certo limite ([Figura 6.2\(b\)](#)), como os propostos por Phurkhae e Kassir (2005), Pang e Li (2016) e Shakouri e Trejo (2017); e funções contínuas crescentes com tendência de estabilização com o tempo ([Figura 6.2\(c\)](#) e [Figura 6.2\(d\)](#)), como os propostos por Collins e Grace (1997), Costa e Appleton (1999b), Kassir *et al.* (2002), Challe *et al.* (2010), Pack *et al.* (2010), Yang *et al.* (2018), entre outros.

Modelos que crescem indefinidamente com o tempo, como os mostrados na [Figura 6.2\(a\)](#), infringem a Lei de Difusão, na qual a concentração superficial tende a equilibrar com o ambiente de exposição, fazendo a concentração de cloretos na superfície estabilizar com o tempo de

exposição. De modo a superar esta limitação, pesquisadores impõem um limite superior para C_s aos modelos de crescimento perpétuo (Figura 6.2(b)). Já os modelos contínuos que estabilizam com o tempo (Figura 6.2(c)) foram estabelecidos com base em formulações empíricas e/ou condições de imposição matemática (SHAKOURI e TREJO, 2017).

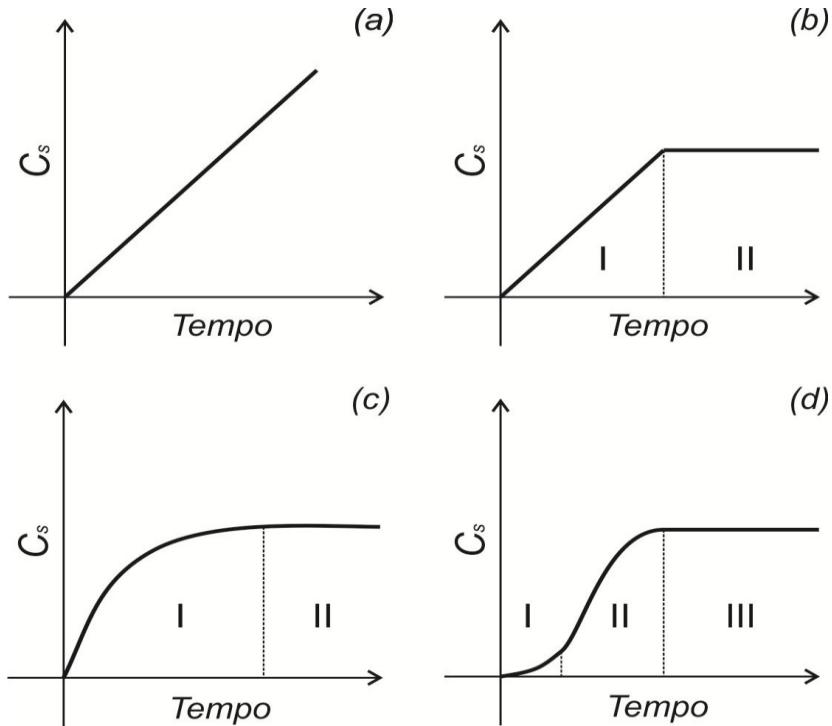


Figura 6.2 – Variação da concentração superficial (C_s) em função do tempo para diversos tipo de funções.

Objetivando minimizar a complexidade da previsão de C_s , este capítulo busca desenvolver uma nova formulação matemática para prever este parâmetro chave de maneira mais eficaz e simples possível. Para tal, será proposto um modelo que leve em consideração a zona de agressividade na qual a estrutura está exposta, alguns parâmetros de dosagem (consumo de cimento e relação água/cimento) e o tempo de exposição.

Partindo do pressuposto de que há um curto período inicial de exposição da estrutura ao ambiente agressivo (Figura 6.2(d-I)), onde a estrutura é concebida (momento entre a concretagem e o inicio da exposição), o processo de lavagem é mais acentuado devido à pequena rugosidade da superfície e a estrutura realiza as primeiras interações com o ambiente marinho (captura e aderência de íons cloretos na superfície do concreto); seguido por um período de acumulação de íons cloretos na superfície e forte crescimento da C_s nos primeiros anos de exposição (Figura 6.2(d-II)); e, por fim, um período de saturação, onde C_s se aproxime de um valor máximo, se equilibrando com a concentração de cloretos do ambiente de exposição após um longo período (Figura 6.2(d-III)). Uma função matemática capaz de representar estas três fases (inicial de exposição, acumulação e saturação) é a função de caráter sigmoidal, que

apresenta formato de “S” e mostra um período de crescimento lento por um curtíssimo espaço de tempo, seguido por um período de rápido crescimento, mais longo em relação a primeira fase, e um período de redução na taxa de crescimento. Esta classe de função é amplamente usada na ecologia, economia, computação, química, física e medicina para representar o crescimento populacional de certas espécies, estimar flutuações de mercados comportados, simular processamento de dados diversos, calcular quantitativos de reagentes químicos em certo espaço de tempo, discretizar parâmetros climáticos e modelar a taxa de crescimentos de tumores, respectivamente.

Diante dos fatos apresentados, o modelo proposto tenta apresentar uma formulação matemática com boa precisão nos resultados preditivos da concentração superficial, atrelada a aplicação generalista e simplista. Portanto, a variação temporal da concentração superficial terá similaridade gráfica com modelo apresentado na [Figura 6.2\(d\)](#) e formulação matemática geral dada pela [Equação 6.1](#).

$$C_s(d, Cons, a/c, t) = C_{ref}^{Cl^-} \times \left[\frac{2}{1 + e^{c_1 \times dm}} \right] \times \left\{ 1 - e^{-[c_2 \times (\frac{a/c}{Cons}) \times t]} \right\}^{c_3} \quad \text{Equação 6.1}$$

Onde C_s é a concentração superficial de cloretos, em % de massa de cimento; $C_{ref}^{Cl^-}$ é concentração de cloretos de referência do ambiente de exposição, em % de massa de cimento; dm é a distância da superfície para a fonte de cloretos, em metros; t é o tempo de exposição, em anos; $Cons$ é o consumo de cimento por volume de concreto, em kg/m³; a/c é a relação água/cimento, é adimensional; e c_1 , c_2 , e c_3 são coeficientes de regressão, em 1/m, anos.m³/kg e adimensional, respectivamente.

O comportamento da [Equação 6.1](#) indica crescimento seguido de estabilização da concentração superficial após um determinado tempo de exposição e esta tendência (crescimento e estabilização) é mais acentuada à medida que a estrutura se aproxima da fonte de íons cloretos. O consumo de cimento e o a/c tende a aumentar a C_s à medida que o consumo de cimento reduz e o a/c aumenta. Por fim, as zonas de agressividade, no qual a estrutura está inserida, influencia diretamente os coeficientes de regressão ($c_1 \dots c_n$) do ajuste, potencializando ou não este comportamento de crescimento seguido de estabilização ([Figura 6.2\(d\)](#)).

Sabendo que a zona de agressividade marinha tem forte influência sobre o comportamento da função ao longo do tempo, podemos especificar um modelo matemático para cada zona de agressividade marinha tendo como base nos desdobramentos da [Equação 6.1](#). Sendo a assim, para as zonas de agressividade marinha submersa, de flutuação de maré e respingo, a [Equação](#)

6.1 pode ser escrita como a [Equação 6.2](#), já que a fonte de cloretos é própria água do mar em contato com a superfície do concreto ($d = 0$).

$$C_s(Cons, a/c, t) = C_{max}^{Cl^-} \times \left\{ 1 - e^{-[c_2 \times (\frac{a/c}{Cons}) \times t]^{c_3}} \right\} \quad \text{Equação 6.2}$$

Onde $C_{max}^{Cl^-}$ é uma constante que representa a concentração de cloretos máxima do ambiente de exposição no tempo infinito, em % de massa de cimento. Já para zona de atmosfera marinha, o modelo pode ser escrito em termos de concentração máxima de cloretos ([Equação 6.3](#)) ou de deposição média de cloretos ([Equação 6.4](#)), com base no modelo adaptado de Akayama *et al.* (2009). Entendendo que a concentração máxima de cloretos ($C_{max}^{Cl^-}$) é função da deposição de cloretos em uma superfície.

$$C_s(d, Cons, a/c, t) = C_{max}^{Cl^-} \times \left[\frac{2}{1 + e^{c_1 \times dm}} \right] \times \left\{ 1 - e^{-[c_2 \times (\frac{a/c}{Cons}) \times t]^{c_3}} \right\} \quad \text{Equação 6.3}$$

$$C_{max}^{Cl^-} = c_0 \times DCl_{ext}^{c_{dep}} \quad \text{Equação 6.4}$$

Onde $C_{max}^{Cl^-}$ é a concentração máxima de cloretos do ambiente de exposição no tempo infinito e em contato direto com a fonte de cloretos ($d = 0$), em % de massa de cimento, DCl_{ext} é a deposição média de cloretos, em mg de $Cl^- m^2$ dia, e c_0 e c_{dep} são coeficientes de regressão, em dia.% de massa de cimento/ $Cl^- m^2$ e adimensional, respectivamente. Fisicamente, estes coeficientes de regressão representam a taxa de captura de cloretos do ambiente para o interior do concreto.

6.2 AJUSTE DE C_s AO MODELO PROPOSTO

Com o intuito de analisar a capacidade de previsão da C_s , tendo como base a formulação matemática proposta pela [Equação 6.1](#), este trabalho catalogou 804 perfis de cloretos de concretos submetidos a distintos ambientes de agressividade marinha. Todos os registros foram coletados na literatura e incluem medições de estruturas ou espécimes de concreto localizados em:

- Submetidos a ensaio de laboratório por imersão total em solução contendo cloretos, ciclos de secagem e imersão ou em câmara de nevoa salina (SHAKOURI e TREJO, 2017; FERREIRA, 2015; LIU *et al.*, 2014; JERONIMO, 2014; BRENE *et al.*, 2013; DOUSTI *et al.*, 2013; DI BELLA *et al.*, 2012; MALHEIROS, 2008);
- Zona submersa (DOUSTI *et al.*, 2013; VALIPOUR *et al.*, 2013; MARKESET e SKJOLSVOLD, 2010; ALIZADEH *et al.*, 2008; LINDVALL, 2007; GHODS *et al.*,

- 2005; TANG, 2003; SANDBERG *et al.*, 1998; ZHANG e WEI, 1998; BENTZ, 1996; ROY *et al.*, 1993);
- c) Zona de flutuação de maré (FATTAH *et al.*, 2018; MORADLLO *et al.*, 2018; ZHANG *et al.*, 2018; WANG *et al.*, 2018; GAO *et al.*, 2017; TADAYON *et al.*, 2016; FARAHANI *et al.*, 2015; MEDEIROS *et al.*, 2015; SAFEHIAN e RAMEZANIANPOUR, 2013; VALIPOUR *et al.*, 2013; MARKESET e SKJOLSVOLD, 2010; PACK *et al.*, 2010; CHALEE *et al.*, 2009; NANUKUTTAN *et al.*, 2008; COSTA e APPLETON, 1999; ZHANG e WEI, 1998; ROY *et al.*, 1993);
 - d) Zona de respingo (MEDEIROS *et al.*, 2015; NANUKUTTAN *et al.*, 2008; GHODS *et al.*, 2005; TANG, 2003; COSTA e APPLETON, 1999; THOMAS e BAMFORTH, 1999; SANDBERG *et al.*, 1998; ZHANG e WEI, 1998);
 - e) Zona de atmosfera marinha (LIU *et al.*, 2020; BALESTRA *et al.*, 2019; FATTAH *et al.*, 2018; ZUQUAN *et al.*, 2018; ZHANG *et al.*, 2016; WU *et al.*, 2017; BOUBITSAS *et al.*, 2014; SAFEHIAN e RAMEZANIANPOUR, 2013; VALIPOUR *et al.*, 2013; MEIRA *et al.*, 2010; OSLAKAVIC *et al.*, 2010; NANUKUTTAN *et al.*, 2008; SALTA *et al.*, 2008; MEIRA *et al.*, 2007; SALTA *et al.*, 2006; CASTRO *et al.*, 2001; TANG, 2003; COSTA e APPLETON, 1999; MUSTAFA e YUSOF, 1994; ROY *et al.*, 1993).

A determinação da C_s foi obtida a partir do ajuste do perfil de cloreto a 2^a Lei de Fick (Equação 3.5), conforme ilustrado na Figura 6.3(a). Na maioria dos concretos, principalmente os expostos a condições não saturadas, observa-se a formação de um pico de concentração de cloretos a poucos milímetros da superfície, delimitado a presença da zona de convecção (Figura 6.3(b)). Neste caso, considera-se, para a aferição da C_s , apenas o ajuste aos dados de concentração de cloretos dispostos na zona após a convecção, conforme recomenda Andrade e Alonso (1997).

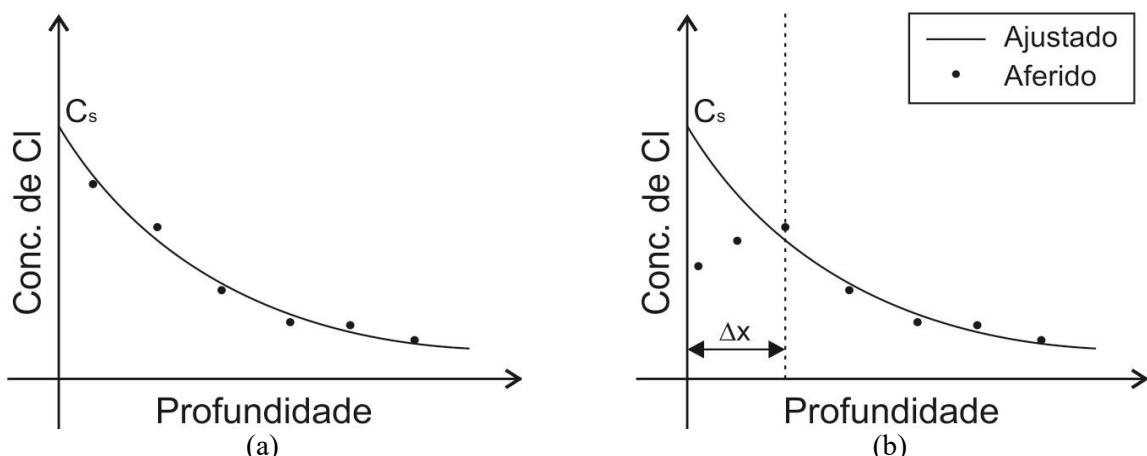


Figura 6.3 – Determinação esquemática da concentração superficial em perfis de cloretos sem (a) e com presença de zona convectiva (b).

Os resultados dos ajustes aos perfis de cloretos representados ilustrativamente pela [Figura 6.3\(a\)](#), levam a resultados precisos da C_s . Entretanto, esta técnica de ajuste aplicado aos perfis de duas zonas, conforme descrito na [Figura 6.3\(b\)](#), gera uma superestimação dos valores da C_s e, consequentemente, uma subestimação da real capacidade do material frente à zona de agressividade marinha, levando os custos maiores para confecção da estrutura, todavia, a favor da segurança. Uma discussão bem detalhada sobre este tema é apresentada no trabalho de Andrade (1997). Salientamos que o objetivo principal deste capítulo não é fornecer um modelo de C_s generalista aplicado a cada zona de agressividade marinha, e sim, comparar a qualidade destes ajustes a outras funções já amplamente usadas em modelos para representar o comportamento desta variável, com os mesmos dados, validando o emprego do modelo proposto.

Estudos semelhantes ao apresentando aqui, utilizaram esta mesma técnica para estimativa da concentração superficial de cloretos em modelos de vida útil (SHAKOURI, 2021; CAI *et al.*, 2020b; GAO *et al.*, 2017; SHAKOURI e TREJO, 2017; FARAHANI *et al.*, 2015; CHALEE *et al.*, 2009; GHODS *et al.*, 2005; NANUKUTTAN *et al.*, 2008; COSTA e APPLETON, 1999). Um estudo está sendo desenvolvido para melhorar a qualidade desta aferição de C_s em perfis de duas zonas, alvo de um próximo trabalho a ser publicado.

Diante dos fatos explicitados a cima, os resultados de C_s foram ajustados não só ao modelo geral apresentado na [Equação 6.1](#), como também a outros modelos publicados na literatura ([Tabela 6.2](#)), com intuito de comparar os melhores ajustes. Os ajustes foram calculados para cada ambiente de agressividade marinha (laboratório, submerso, flutuação de maré, respingo e zona de atmosfera marinha), como se segue nos itens [6.2.1](#) a [6.2.5](#). A qualidade dos ajustes foi determinada com base no coeficiente de regressão (r^2).

Tabela 6.2 – Principais modelos matemáticos para previsão da concentração superficial de cloretos.

Fonte	Zona aplicável	Relação	Equação de ajuste
Collins e Grace (1997)	Flutuação de maré e respingo	Polinomial	$c_1 \times t / (t + c_2)$
Costa e Appleton (1999b)	Todas	Potencial	$c_1 \times t^{c_2}$
Kassir <i>et al.</i> (2002)	Respingo e atmosfera	Exponencial	$c_1 \times (1 - e^{c_2 \times t})$
Pack <i>et al.</i> (2010)	Flutuação de maré	Logarítmica	$c_1 \times \ln(c_2 \times t + 1) + c_3$
Uji <i>et al.</i> (1990)	Todas	Potencial	$c_1 \times \sqrt{t}$

Onde: c_1 , c_2 e c_3 são as constantes dos modelos.

6.2.1 Dados de laboratório

Após a determinação das concentrações superficiais de cloretos obtidas de 114 perfis de cloretos de espécimes ensaiadas em laboratório, foram obtidos os ajustes aos modelos de previsão de C_s . A [Tabela 6.3](#) mostra esses ajustes, inclusive para o modelo proposto por este trabalho.

Tabela 6.3 – Funções de ajustes usadas para demonstrar a relação entre concentração superficial de cloretos e o tempo de exposição em ensaios de laboratório.

Conc. da sol. (%)	Fonte	Zona aplicável	Relação	Equação de ajuste	r^2
$\sim 3,50$	Constante	Todas	Constante	2,081	-
	Collins e Grace (1997)	Flutuação de maré e respingo	Polinomial	$6,53 \times t / (t + 192,5)$	0,711
	Costa e Appleton (1999)	Todas	Potencial	$0,153 \times t^{0,57}$	0,663
	Kassir <i>et al.</i> (2002)	Respingo e atmosfera	Exponencial	$2,08 \times (1 - e^{-4,51 \times t})$	0,621
	Pack <i>et al.</i> (2010)	Flutuação de maré	Logarítmica	$0,02 \times \ln(2,07 \times t + 1) + 0,20$	0,700
	Uji <i>et al.</i> (1990)	Todas	Potencial	$0,22 \times \sqrt{t}$	0,653
	Modelo proposto	Em análise	Sigmoide – Weibull	$3,47 \times \left\{ 1 - e^{-\left[9 \left(\frac{a/c}{\text{cons}} \right) \times t \right]^{1,66}} \right\}$	0,737
$\sim 5,00$	Constante	Todas	Constante	1,241	-
	Collins e Grace (1997)	Flutuação de maré e respingo	Polinomial	$8,99 \times t / (t + 1613)$	0,729
	Costa e Appleton (1999)	Todas	Potencial	$0,013 \times t^{0,815}$	0,731
	Kassir <i>et al.</i> (2002)	Respingo e atmosfera	Exponencial	$1,27 \times (1 - e^{-4,32 \times t})$	0,580
	Pack <i>et al.</i> (2010)	Flutuação de maré	Logarítmica	$2,15 \times \ln(0,96 \times t + 1) - 4,37$	0,654
	Uji <i>et al.</i> (1990)	Todas	Potencial	$0,095 \times \sqrt{t}$	0,661
	Modelo proposto	Em análise	Sigmoide – Weibull	$5,08 \times \left\{ 1 - e^{-\left[0,53 \left(\frac{a/c}{\text{cons}} \right) \times t \right]^{0,74}} \right\}$	0,728
$\sim 10,00$	Constante	Todas	Constante	6,198	-
	Collins e Grace (1997)	Flutuação de maré e respingo	Polinomial	$57,5 \times t / (t + 1502)$	0,722
	Costa e Appleton (1999)	Todas	Potencial	$0,06 \times t^{0,891}$	0,722
	Kassir <i>et al.</i> (2002)	Respingo e atmosfera	Exponencial	$6,19 \times (1 - e^{-4,22 \times t})$	0,604
	Pack <i>et al.</i> (2010)	Flutuação de maré	Logarítmica	$6,14 \times \ln(0,05 \times t + 1) - 8,49$	0,712
	Uji <i>et al.</i> (1990)	Todas	Potencial	$0,465 \times \sqrt{t}$	0,603
	Modelo proposto	Em análise	Sigmoide – Weibull	$10,3 \times \left\{ 1 - e^{-\left[5,11 \left(\frac{a/c}{\text{cons}} \right) \times t \right]^{1,15}} \right\}$	0,701

Os resultados mostram um bom ajuste dos modelos aos dados da literatura, com exceção do modelo de C_s constante no tempo. Em relação à concentração da solução de ensaio

(concentração de cloretos externa), os ajustes mostram a forte tendência de estabilização com o aumento da concentração externa e do tempo.

Comparando os ajustes dos modelos já publicados na literatura com o modelo proposto ([Equação 6.2](#)), observamos uma melhoria no ajuste em comparação aos demais, inclusive com r^2 superior aos outros modelos na maioria dos modelos de concentração superficial.

6.2.2 Zona submersa

A [Tabela 6.4](#) mostra os ajustes de C_s aos modelos matemáticos propostos, sendo os dados de ajustes coletados de 127 perfis de cloretos de espécimes ou estruturas de concreto armado dispostas em situações reais de exposição a zona de agressividade marinha submersa.

Tabela 6.4 – Funções de ajustes usadas para demonstrar a relação entre concentração superficial de cloretos e o tempo de exposição submetidos a zona submersa.

Fonte	Zona aplicável	Relação	Equação de ajuste	r^2
Constante	Todas	Constante	2,512	-
Collins e Grace (1997)	Flutuação de maré e respingo	Polinomial	$3,66 \times t / (t + 0,496)$	0,738
Costa e Appleton (1999b)	Todas	Potencial	$2,214 \times t^{0,23}$	0,638
Kassir <i>et al.</i> (2002)	Respingo e atmosfera	Exponencial	$3,38 \times (1 - e^{-1,334 \times t})$	0,717
Pack <i>et al.</i> (2010)	Flutuação de maré	Logarítmica	$1,517 \times \ln(1,15 \times t + 1) + 0,647$	0,711
Uji <i>et al.</i> (1990)	Todas	Potencial	$1,415 \times \sqrt{t}$	0,306
Modelo proposto	Em análise	Sigmoide – Weibull	$3,425 \times \left\{ 1 - e^{-\left[955,2 \left(\frac{a/c}{\text{Cons}} \right) \times t \right]^{0,56}} \right\}$	0,757

Os resultados mostram um bom ajuste dos modelos aos dados coletados, isso se deve principalmente a concentração externa constante na maioria do tempo de exposição à zona agressiva, haja vista que os espécimes estavam em submersão na água do mar. O modelo proposto representou bem o comportamento de C_s ao longo do tempo, com um bom ajuste aos dados experimentais (r^2).

A [Figura 6.4](#) mostra graficamente estes ajustes e os dados coletados, extrapolando as funções no tempo de exposição para analisar o seu comportamento em longo prazo. Os resultados mostram que os melhores ajustes apresentam comportamento de estabilização da concentração superficial após determinado tempo de exposição. Este tempo de estabilização foi em média de 3 a 5 anos. Vale ressaltar que para uma melhor compreensão da C_s , estudos de longo prazo devem ser realizados, já que o máximo período de exposição observado nos estudos foi de cerca de 10 anos.

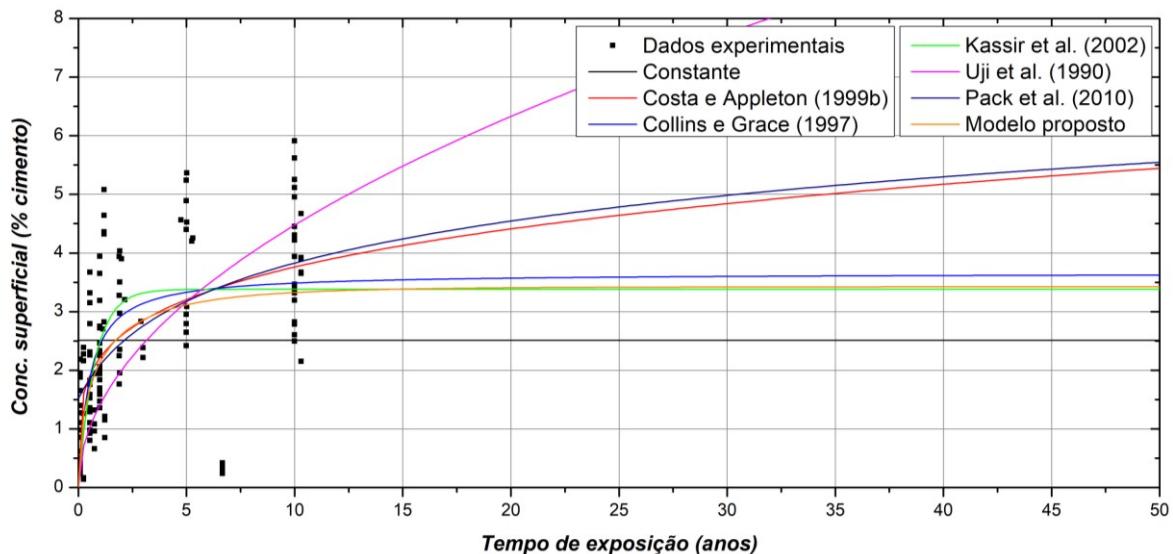


Figura 6.4 – Ajuste dos modelos de concentração superficial em função do tempo de exposição aos dados coletados na literatura em zona submersa (no modelo proposto foi considerado um consumo de cimento de 400 kg/m³ e a/c de 0,40).

Comparando os valores de C_s obtidos de ensaios de laboratório (concentração da solução de 3,5%) com os obtidos em situação real de exposição em zona submersa, percebemos certa semelhança entre os valores. Em geral, os valores preditivos de C_s relatados em laboratório foram 7% mais altos do que aqueles medidos para a estrutura marinha.

6.2.3 Zona de flutuação de maré

Após 381 dados de C_s obtidos de perfis de cloretos de espécimes ou estruturas de concreto armado dispostos em zona de flutuação de maré, ajustes aos modelos de C_s reportados acima foram realizados. Os resultados estão apresentados na [Tabela 6.5](#) e mostram uma relação razoável de afinidade entre os dados preditivos e os dados experimentais.

Tabela 6.5 – Funções de ajustes usadas para demonstrar a relação entre concentração superficial de cloretos e o tempo de exposição submetidos a zona de flutuação de maré.

Fonte	Zona aplicável	Relação	Equação de ajuste	r^2
Constante	Todas	Constante	4,025	-
Collins e Grace (1997)	Flutuação de maré e respingo	Polinomial	$4,598 \times t / (t + 0,219)$	0,478
Costa e Appleton (1999b)	Todas	Potencial	$3,761 \times t^{0,065}$	0,477
Kassir <i>et al.</i> (2002)	Respingo e atmosfera	Exponencial	$4,511 \times (1 - e^{-1,469 \times t})$	0,512
Pack <i>et al.</i> (2010)	Flutuação de maré	Logarítmica	$0,414 \times \ln(0,414 \times t + 1) + 3,105$	0,503
Uji <i>et al.</i> (1990)	Todas	Potencial	$1,648 \times \sqrt{t}$	0,191
Modelo proposto	Em análise	Sigmoide – Weibull	$4,86 \times \left\{ 1 - e^{-\left[1508 \left(\frac{a/c}{Cons} \right) \times t \right]^{0,55}} \right\}$	0,562

Essa mediana relação entre os dados preditivos e os dados experimentais mostra a heterogeneidade entre o tempo em umectação e o tempo de secagem peculiar a cada estudo, dada a posição da extração e a flutuação da maré. Comparando os modelos, o que mais representou os dados experimentais foi modelo sigmoidal proposto por este estudo e o modelo de Kassir *et al.* (2002), ambos de natureza exponencial.

Com base nos dados da [Tabela 6.5](#), foi confeccionado a [Figura 6.5](#), ela mostra graficamente os ajustes matemáticos dos modelos preditivos de C_s e os dados experimentais. Com o mencionado na seção anterior, foram observados poucos dados de C_s em longo prazo, o que dificulta a compreensão e a previsão desta propriedade.

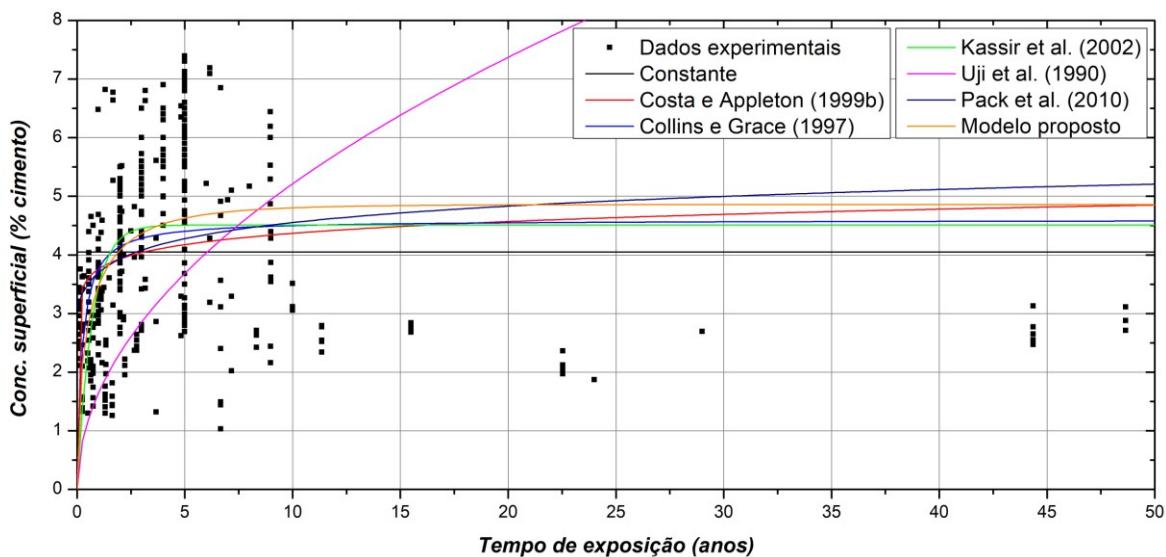


Figura 6.5 – Ajuste dos modelos de concentração superficial em função do tempo de exposição aos dados coletados na literatura em zona de flutuação de maré (no modelo proposto foi considerado um consumo de cimento de 400 kg/m³ e a/c de 0,40).

Com base na figura a cima, podemos observar que os melhores ajustes apresentam comportamento de estabilização da concentração superficial após 2,5 a 4 anos, cujas funções foram de origem logarítmica ou exponencial.

6.2.4 Zona de respingo

De 78 perfis de cloretos, coletados de corpos de prova ou estruturas de concreto armado dispostos em zonas de respingo, foram obtidas as concentrações superficiais de cloretos. Com essas concentrações, ajustes foram realizados as principais funções de previsibilidade desta propriedade empregadas na literatura e a um modelo proposto por este trabalho. Os resultados dos ajustes de previsibilidade da C_s estão na [Tabela 6.6](#) para a zona de respingo. Com os dados da [Tabela 6.6](#) foi confeccionado a [Figura 6.6](#).

Tabela 6.6 – Funções de ajustes usadas para demonstrar a relação entre concentração superficial de cloreto e o tempo de exposição submetidos a zona de respingo.

Fonte	Zona aplicável	Relação	Equação de ajuste	r^2
Constante	Todas	Constante	1,948	-
Collins e Grace (1997)	Flutuação de maré e respingo	Polinomial	$2,465 \times t / (t + 0,893)$	0,401
Costa e Appleton (1999b)	Todas	Potencial	$1,627 \times t^{0,048}$	0,505
Kassir <i>et al.</i> (2002)	Respingo e atmosfera	Exponencial	$2,021 \times (1 - e^{-1,643 \times t})$	0,361
Pack <i>et al.</i> (2010)	Flutuação de maré	Logarítmica	$1,495 \times \ln(0,48 \times t + 1) + 0,322$	0,585
Uji <i>et al.</i> (1990)	Todas	Potencial	$0,684 \times \sqrt{t}$	0,241
Modelo proposto	Em análise	Sigmoide – Weibull	$2,91 \times \left\{ 1 - e^{-\left[484,8 \left(\frac{a/c}{\text{Cons}} \right) \times t \right]^{0,268}} \right\}$	0,572

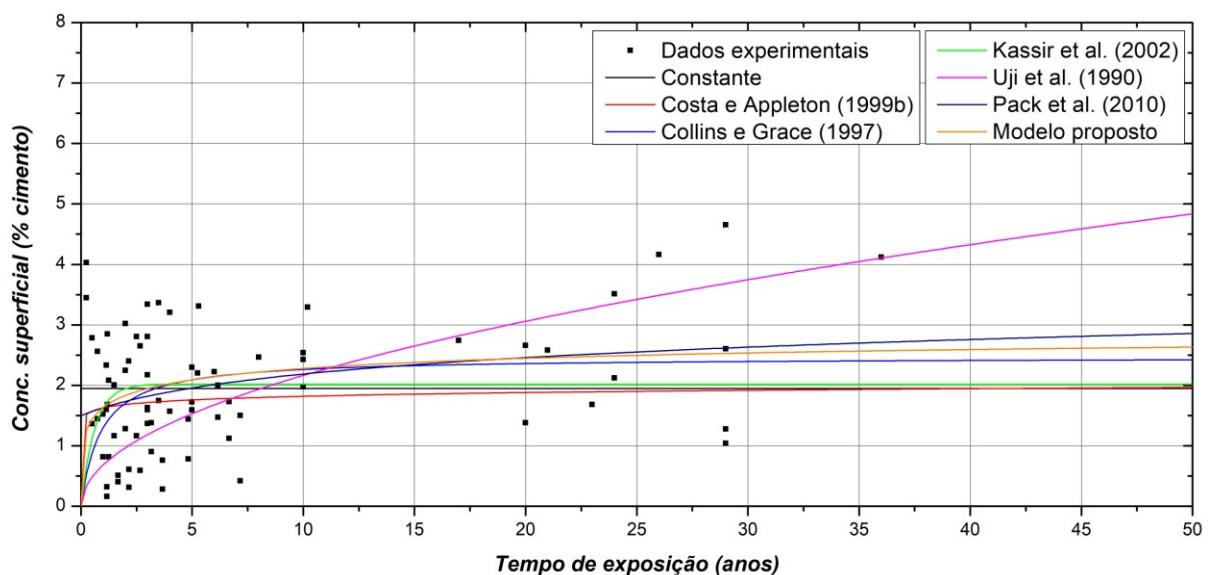


Figura 6.6 – Ajuste dos modelos de concentração superficial em função do tempo de exposição aos dados coletados na literatura em zona de respingo de maré (no modelo proposto foi considerado um consumo de cimento de 400 kg/m³ e a/c de 0,40).

A partir dos dados da [Tabela 6.6](#) observamos que os melhores ajustes se deram para as funções de origem logarítmica e exponencial. O modelo proposto apresentou um bom ajuste aos dados experimentais, se comparado aos demais. Já os resultados da [Figura 6.6](#) mostram que os melhores ajustes apresentam comportamento de estabilização da concentração superficial após um período entre 2,5-5 anos. Alguns dados de longo prazo foram catalogados, porém bem dispersos na faixa de observação.

6.2.5 Zona de atmosfera marinha

A Tabela 6.7 mostra os ajustes às funções de previsão de concentração superficial de cloretos obtidos de 104 perfis de cloretos de corpos de prova ou estruturas de concreto armado dispostos em zona de atmosfera marinha. Os dados experimentais foram ajustados aos principais modelos utilizados pela literatura e a Equação 6.3, levando em consideração como variável independente não só o tempo de exposição, como também o consumo de cimento, a relação água/cimento e, principalmente, a distância para mar.

Tabela 6.7 – Funções de ajustes usadas para demonstrar a relação entre concentração superficial de cloretos e o tempo de exposição submetidos a zona de atmosfera marinha.

Fonte	Zona aplicável	Relação	Equação de ajuste	r^2
Constante	Todas	Constante	1,180	-
Collins e Grace (1997)	Flutuação de maré e respingo	Polinomial	$3,64 \times t / (t + 15,4)$	0,310
Costa e Appleton (1999b)	Todas	Potencial	$0,343 \times t^{0,594}$	0,353
Kassir <i>et al.</i> (2002)	Respingo e atmosfera	Exponencial	$8,251 \times (1 - e^{-0,0143 \times t})$	0,301
Pack <i>et al.</i> (2010)	Flutuação de maré	Logarítmica	$0,322 \times \ln(0,86 \times t + 1) + 0,281$	0,327
Uji <i>et al.</i> (1990)	Todas	Potencial	$0,4435 \times \sqrt{t}$	0,356
Modelo proposto	Em análise	Sigmoide – Weibull	$3,68 \times \left[\frac{2}{1 + e^{0,008dm}} \right] \times \left\{ 1 - e^{-\left[125,6 \left(\frac{a/c}{Cons} \right) \times t \right]^{1,15}} \right\}$	0,417

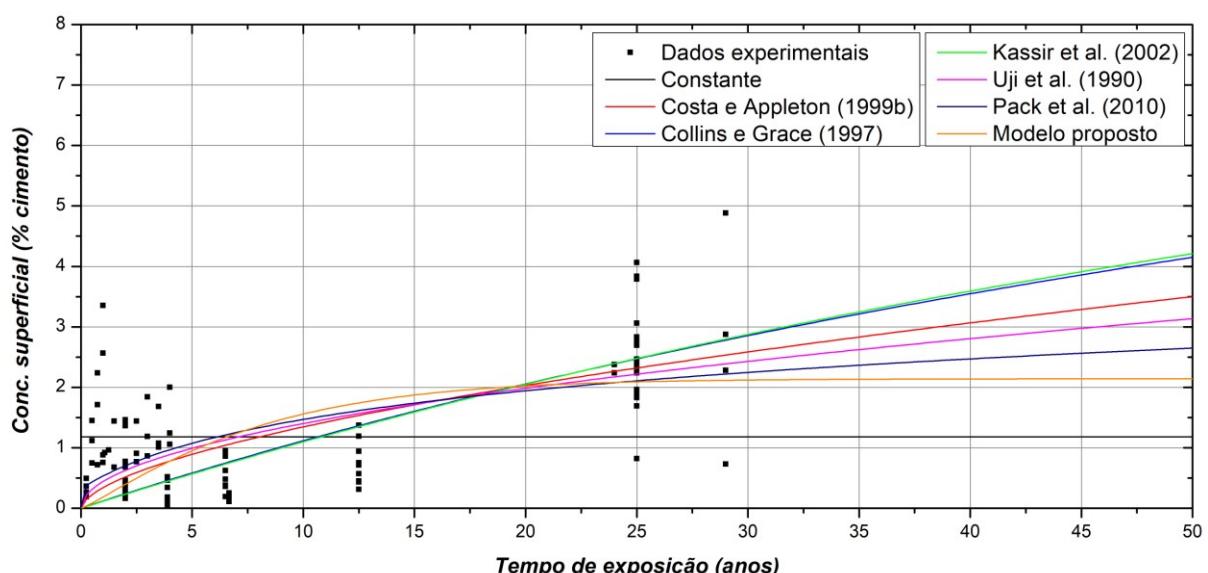


Figura 6.7 – Ajuste dos modelos de concentração superficial em função do tempo de exposição aos dados coletados na literatura em zona de atmosfera marinha (distância do mar de 100 m, consumo de cimento de 400 kg/m³ e a/c de 0,40).

Os resultados da [Tabela 6.7](#) mostram uma pequena correlação dos ajustes aos dados experimentais, demonstrando a forte influência de outras variáveis sobre os resultados de C_s , onde não só o tempo de exposição e a distância do mar possuem papel importante na previsibilidade da concentração superficial, como também as condições ambientais (umidade, temperatura, pluviometria, velocidade do vento, etc.).

Tomando como base os dados apresentados na tabela acima foi confeccionada a [Figura 6.7](#), ela mostra os dados experimentais coletados e os modelos ajustados a estes dados. Diante desta figura, percebemos que o modelo proposto se mostrou mais confiável que os demais nas primeiras idades de exposição à atmosfera marinha. Entretanto, a falta de dados experimentais de longo prazo e a influência de outras variáveis reforça a possível incerteza da previsibilidade de C_s do uso dos ajustes aqui apresentados.

Em todo o tempo de exposição previsto (0-50 anos) não foi possível observar a estabilização da concentração superficial. Uma das possíveis causas deste comportamento se deve ao efeito lavagem gerado pela chuva na superfície do concreto e a tendência de estabilização só ocorrer após um longo período de exposição, próximo aos vinte anos.

6.3 ANÁLISE GERAL DO COMPORTAMENTO DE C_s

A concentração superficial de cloretos do concreto tem sido estudada por diversos pesquisadores em diferentes condições de exposição e metodologias experimentais. Os resultados mostram uma dispersão significativa entre os valores de C_s observados, pressupõem que este comportamento esteja associado a outras variáveis que influenciam no comportamento deste parâmetro que não foram devidamente controladas e/ou levadas em consideração nas análises, dentre elas podemos citar a variação da umidade, o efeito lavagem, a capacidade de fixação de cloretos da matriz cimentícia, as metodologias de ensaio e o período de exposição.

Todos os modelos C_s variantes no tempo estudados neste capítulo tiveram um bom ajuste aos dados no curto prazo de exposição (até 5 anos). No entanto, devido à falta de dados de longo prazo, sua aplicabilidade é incerta neste momento. Com base nos resultados apresentados neste capítulo, percebemos que o comportamento de cada função é diferente com a passagem do tempo, para estudos de curto prazo (até 5 anos) o ajuste das funções potenciais teve melhor performance (maior r^2), dada a alta taxa de crescimento da concentração superficial com o tempo de exposição nos primeiros anos de vida (YANG *et al.*, 2017).

Estudos de longo prazo (acima de 10 anos) indicam o uso de funções logarítmica e especialmente exponenciais com estabilização, dada à tendência de cessar o crescimento da

função em longo prazo (SWATEKITITHAM *et al.*, 2007). Este comportamento de estabilização concorda com o comportamento na realidade, onde a concentração de cloretos tende a estabilizar próximo à concentração máxima do ambiente após determinado espaço de tempo. Por outro lado, as funções constantes para representação da concentração superficial estão em desuso, devido a pouca representatividade em relação a situações reais (TAVARES, 2013).

Diante dos fatos, observamos que os modelos para previsão do comportamento da concentração superficial em relação ao tempo devem apresentar alta taxa de crescimento nas primeiras idades e, dado certo tempo (variável para cada zona de agressividade), devem se equilibrar com o ambiente de exposição.

Para o modelo apresentado neste trabalho, observamos que ele apresentou bom comportamento para previsibilidade da concentração superficial de cloretos em todas as zonas de agressividade analisadas, se comparado aos demais modelos já publicados na literatura. Chancelando sua empregabilidade dentro das faixas de tempo e concentrações analisadas neste trabalho. Estudos futuros devem ser realizados, aplicando este modelo a dados de longo prazo de exposição aos ambientes agressivos.

Por fim, outro ponto que deve ser destacado é a redução do coeficiente de regressão (r^2) à medida que a superfície de concreto se afasta da fonte de íons cloretos, demonstrando a complexidade físico-química que envolve a determinação da concentração superficial de cloretos.

7 DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE BASEADO NO MODELO PROPOSTO

Neste capítulo, uma breve explicação sobre o *software* desenvolvido é fornecida. O programa é denominado *Sea air PRO-Life*, termo alusivo a aerossol marinho. Sua implementação foi desenvolvida em Delphi® com interface gráfica para Windows®. Baseado nos capítulos anteriores, o *software* é apresentado visualmente aqui. No entanto, instruções mais detalhadas de uso e restrições podem ser encontradas no menu *Help* do *software*.

O *Sea air PRO-Life* é um *software* probabilístico que fornece, ao usuário, o comportamento dos perfis de cloretos (livres e totais) ao longo do tempo, bem como da temperatura e umidade com o passar do tempo de exposição ao ambiente agressivo em 1D. Além da probabilidade para o tempo de iniciação da corrosão por cloretos em estruturas de concreto armado expostos em zona de atmosfera marinha. Despertando no usuário, a sensibilidade em relação aos principais parâmetros que envolvem o modelo adotado no caso em particular. As informações geradas são importantes, pois auxiliam o projetista na tomada de decisões para confecção de seus projetos, bem como na análise de situações de casos já existentes, ajudando-o a identificar os principais parâmetros que repercutem diretamente na relação durabilidade/custo de obra.

7.1 O SOFTWARE

O algoritmo do *software* foi desenvolvido com base na [Figura 1.2](#), separando o processo de previsão de transporte em três fases distintas: fatores que influenciam a interação ambiente/estrutura, discutido nos Capítulos 2 e 6, determinando as condições de contorno do problema; fenomenologia físico-químico do transporte de massa e energia, apresentada no Capítulo 3, determinando quais e como as variáveis que influenciam o processo; e matemática aplicada, discutido no Capítulo 5, descrevendo matematicamente o processo de degradação da estrutura com a propagação de incerteza.

O *software* foi implementado em Delphi X - Seattle®, um compilador para desktops, celulares e web, que usa uma linguagem própria de programação, chamada *Object-Pascal*, oriunda do Pascal. O programa é auto-executável, desenvolvido em plataforma com linguagem de programação orientada a objetos e interface gráfica para Windows® XP, Vista, 7 e 10, com processamento em 32 ou 64 bits. A [Figura 7.1](#) mostra a tela de abertura do programa.

Por ser o fenômeno da corrosão um processo complexo, o público alvo deste *software* são profissionais da área de construção civil, cujo caso em estudo englobe o período de iniciação da corrosão por cloretos em estruturas de concreto armado. Este programa envolve cerca de 130

parâmetros, dentre os quais nove são probabilísticos. Através de uma interface gráfica simples e amigável (Figura 7.2), o algoritmo de solução do problema procede da seguinte maneira:

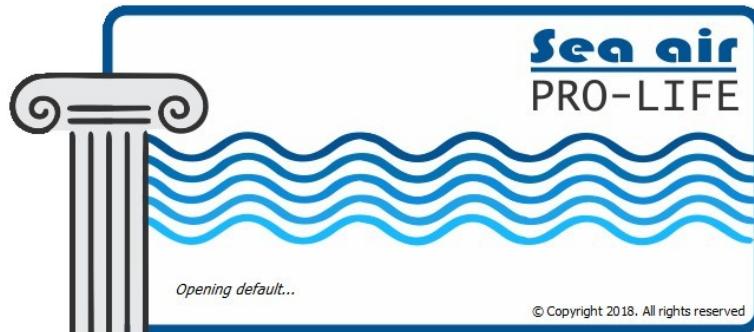


Figura 7.1 – Janela de abertura do programa *Sea air PRO-Life*.

- i. Insira os dados fixos que representam as características de projeto, parâmetros de cálculo, condições ambientais e as propriedades dos materiais;
- ii. Insira os dados que representam as propriedades aleatórias dos materiais;
- iii. Automaticamente, o programa gera um vetor coluna com n linhas (número de simulações) seguindo as distribuições de probabilidade impostas no item *ii*;
- iv. Determine as condições de contorno (nas condições $t = 0s$ e $t > 0s$) e a função de acumulação de cloretos na superfície;
- v. Inicie o processo de cálculo, que corre conforme a Figura 7.3;
- vi. Visualize os gráficos, histogramas e relatórios com os resultados calculados.

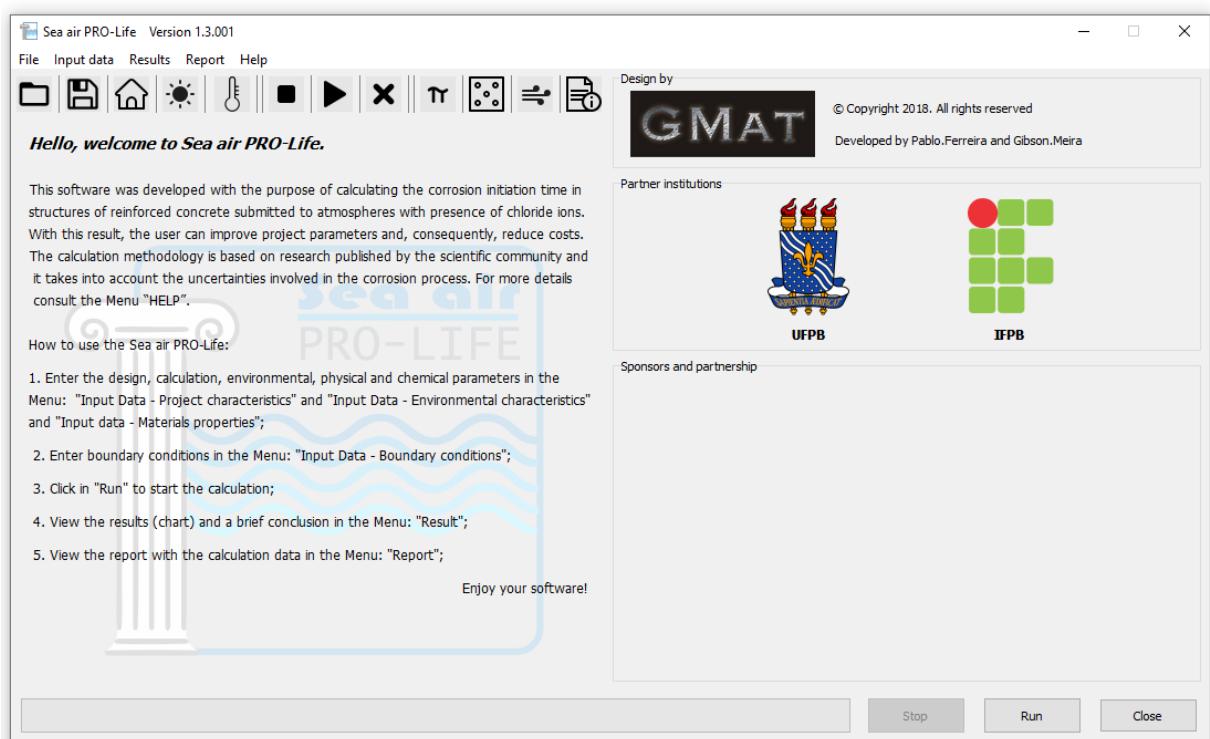


Figura 7.2 – Janela principal do programa *Sea air PRO-Life*.

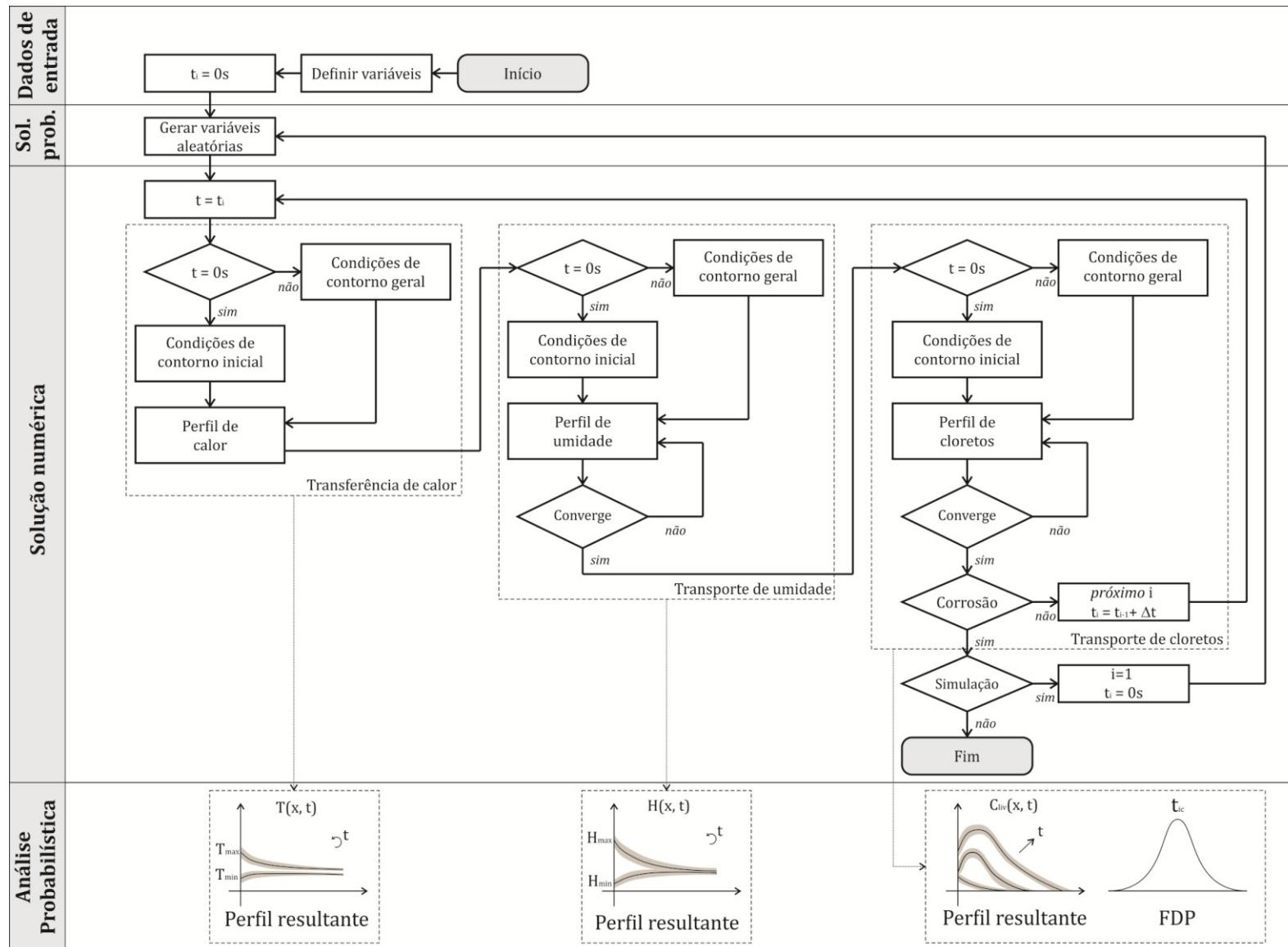


Figura 7.3 – Algoritmo simplificado de rotinas para implementação da programação com intuito de prever o período de iniciação da corrosão por cloreto em estrutura de concreto armado submetidas a zonas de atmosfera marinha. **Fonte:** Adaptado de Martin-Perez (1999) e Bastidas-Arteaga *et al.* (2011).

7.1.1 Entrada de dados

O *software* é composto por 15 janelas, exemplificadas nas Figuras 7.4 a 7.18. Onde o usuário inicia sua sessão introduzindo dados gerais acerca do projeto (nome, analista, data de realização da análise e comentários gerais), fornece dados relacionados às características do projeto (tempo de vida útil do projeto, consumo de cimento, fator a/c, distância do mar e concentração inicial de cloreto), tipo de mecanismo de transporte envolvido, intervalo de confiança e variáveis relacionadas ao Método dos Elementos Finitos (*time step*, função de ajuste e característica da malha).

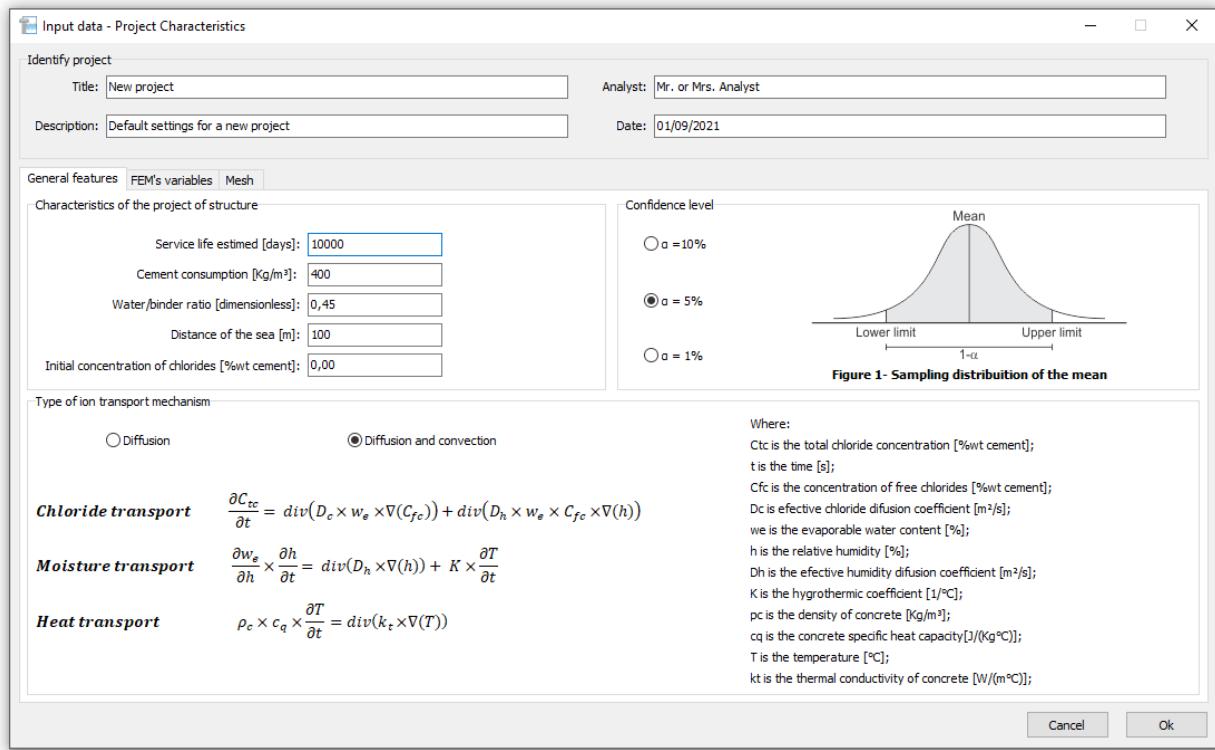


Figura 7.4 – Janela de informações gerais do programa *Sea air PRO-Life*.

No menu *Input data - Environmental characteristics - Temperature and humidity*, o usuário informa os parâmetros de sazonalidade ambiental, escolhendo um dos modelos dispostos no programa (Figura 7.5). O usuário pode optar pelo modelo apresentados nas Equações 3.60 e 3.61 ou qualquer outro valor preenchendo uma tabela na aba seguinte. A boa determinação destas variáveis influencia diretamente as condições de contorno de transferência de calor e transporte de umidade. No menu *Input data - Environmental characteristics - Solar radiation* é definido as condições de exposição da superfície a radiação solar (Figura 7.6), partindo do modelo apresentado na Equação 3.62. No caso de falta de medições aceitáveis de radiação solar para um determinado local, recomenda-se usar os dados do Atlas Solarimétrico do Brasil (TIBA *et al.*, 2000).

Input data - Environmental characteristics - Temperature and humidity

Environmental condition General chart

Environmental temperature

Mathematical model (time dependent)

Tang an Nilsson (1996) Another model

Tang and Nilsson (1996) Another model

$$T_{ext} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} + \frac{T_{max} - T_{min}}{2} \sin \left(2\pi \frac{(t - DT_{max})}{365} + \frac{\pi}{2} \right)$$

Where:
 "Tmax" is the maximum temperature in the year [°C]: 35
 "Tmin" is the minimum temperature in the year [°C]: 20
 "DTmax" is day of the year when the maximum temperature occurs [days (0 to 365)]: 0

Environmental humidity

Mathematical model (time dependent)

Tang an Nilsson (1996) Another model

Tang and Nilsson (1996) Another model

$$h_{ext} = \frac{h_{max} + h_{min}}{2} + \frac{h_{max} - h_{min}}{2} \sin \left(2\pi \frac{(t - DT_{max})}{365} - \frac{\pi}{2} \right)$$

Where:
 "hmax" is the maximum humidity in the year [%]: 95
 "hmin" is the minimum humidity in the year [%]: 45

Cancel Ok

Figura 7.5 – Janela das características ambientais do programa *Sea air PRO-Life*.

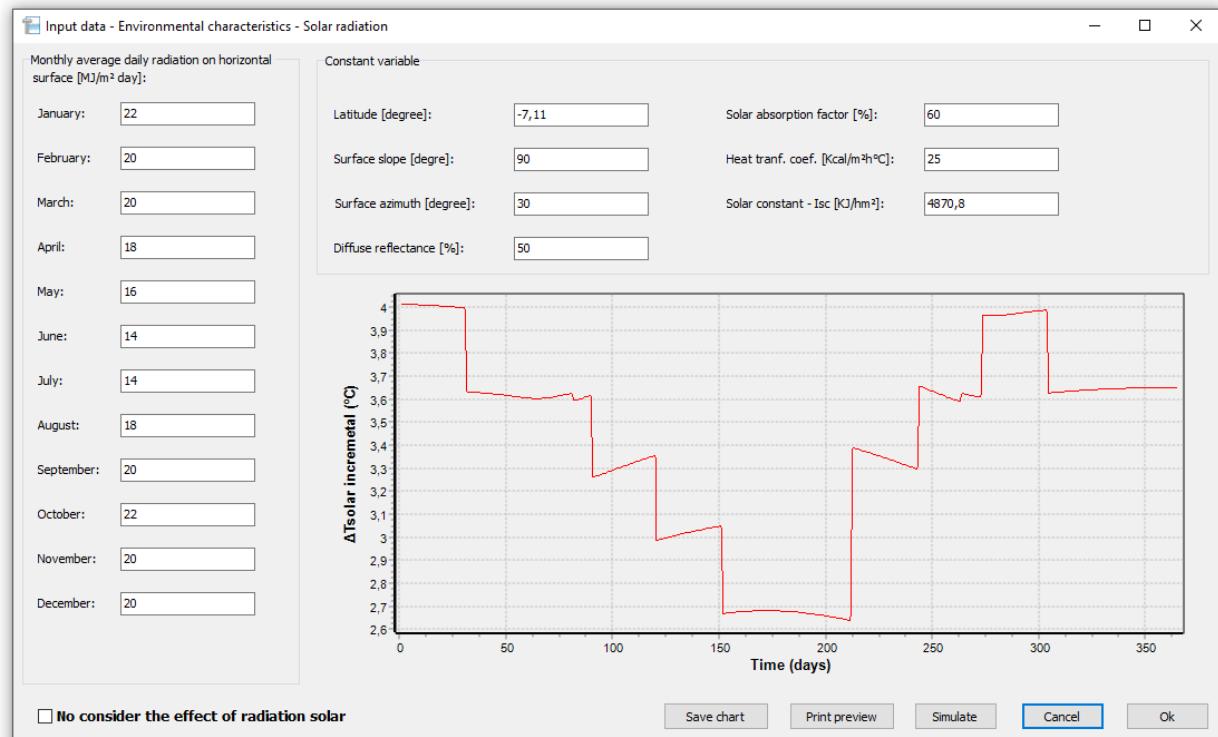


Figura 7.6 – Janela de influência da radiação solar na temperatura do programa *Sea air PRO-Life*.

Já no menu *Input data - Materials properties - Constant variables* são definidos as variáveis determinísticas que influenciam no processo de transporte (Figura 7.7) e a isoterma de capacidade de fixação de cloretos, bem como são apresentados os resultados para o coeficiente de difusão efetivo de cloretos e umidade (Figura 7.8), atrelada aos principais fatores que os influenciam (Figura 7.9).

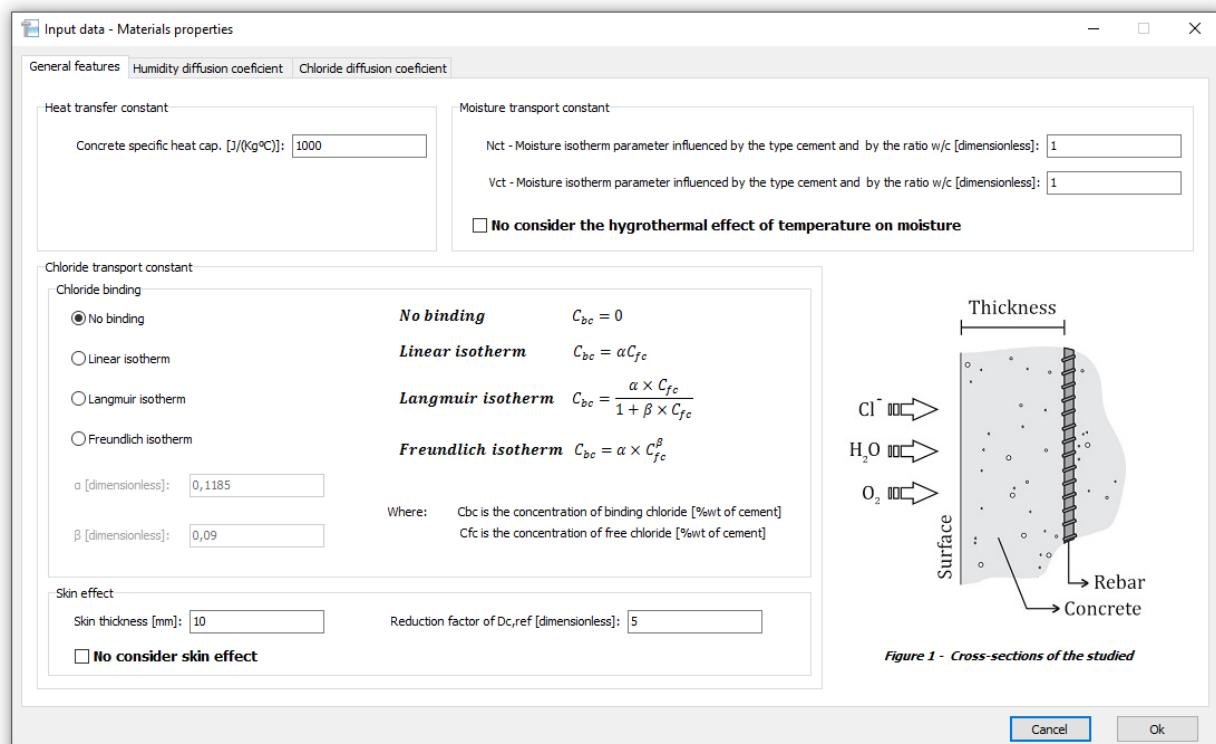


Figura 7.7 – Janela para fornecimento das variáveis constantes do programa *Sea air PRO-Life*.

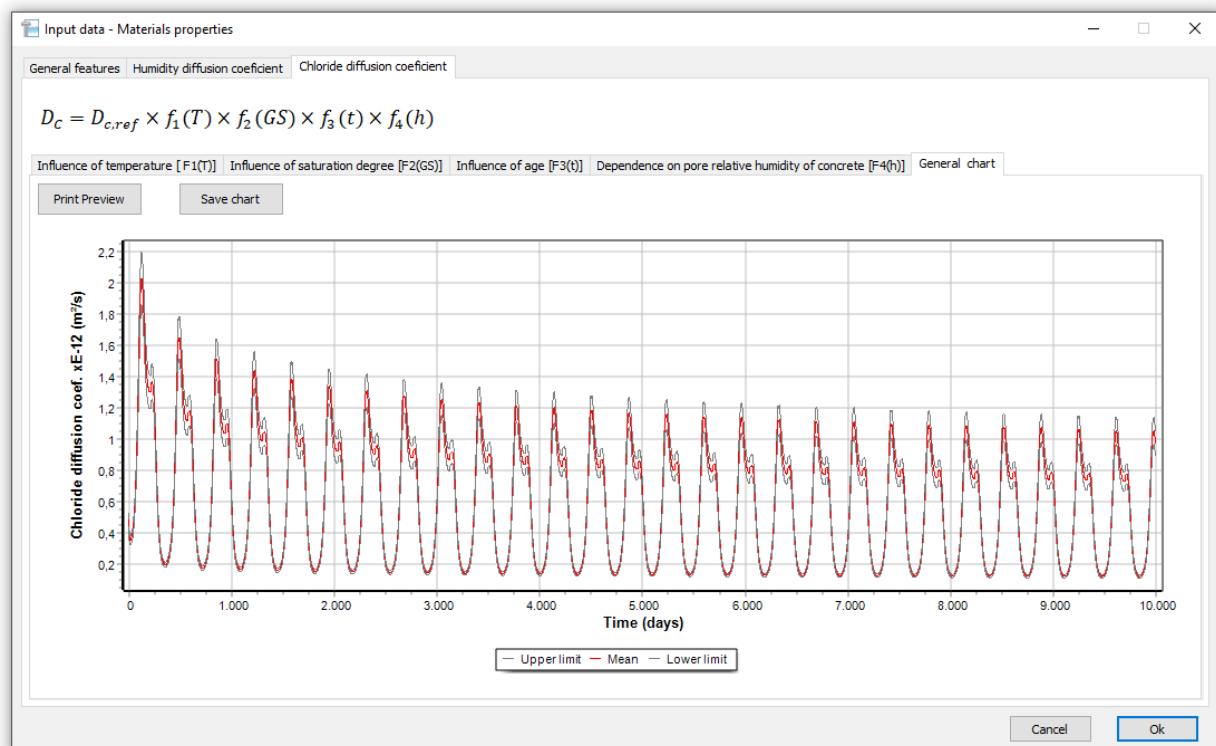


Figura 7.8 – Janela com o coef. de difusão efetivo de Cl^- fornecido pelo programa *Sea air PRO-Life*.

Diante do fornecimento dos dados, a navegação pelas abas já fornece o cálculo automático do coeficiente de difusão efetivo de cloretos e/ou umidade. Os resultados mostram a média (linha em vermelho) e os limites inferior e superior (linha em cinza claro) com a evolução do tempo de vida útil prevista para o projeto (Figura 7.8).

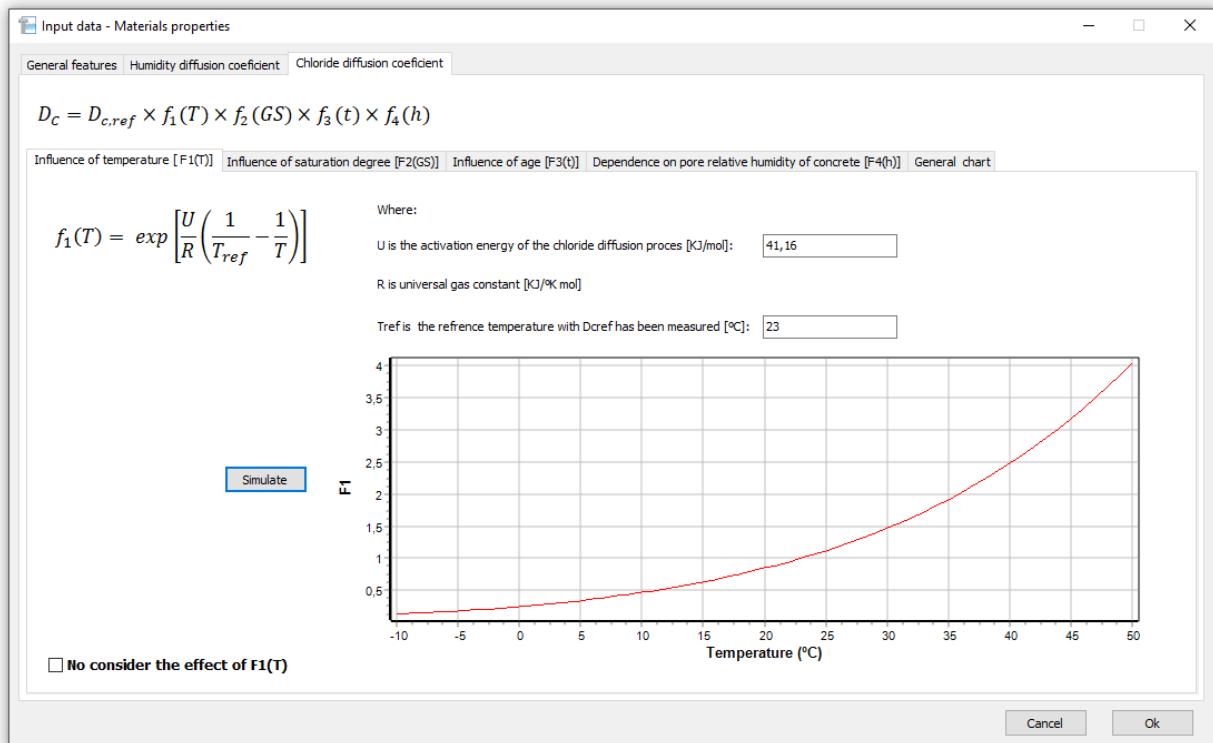


Figura 7.9 – Janela mostrando a influência da temperatura no coef. de difusão efetivo de Cl^- programa *Sea air PRO-Life*.

Fornecidos os dados das variáveis determinísticas, no menu *Input data - Materials properties - Probabilistic variables* deve ser preenchido a média, covariância e tipo de distribuição de probabilidade das novas variáveis aleatórias que o programa permite determinar (Figura 7.10). Além do número de simulações que o usuário deseja realizar.

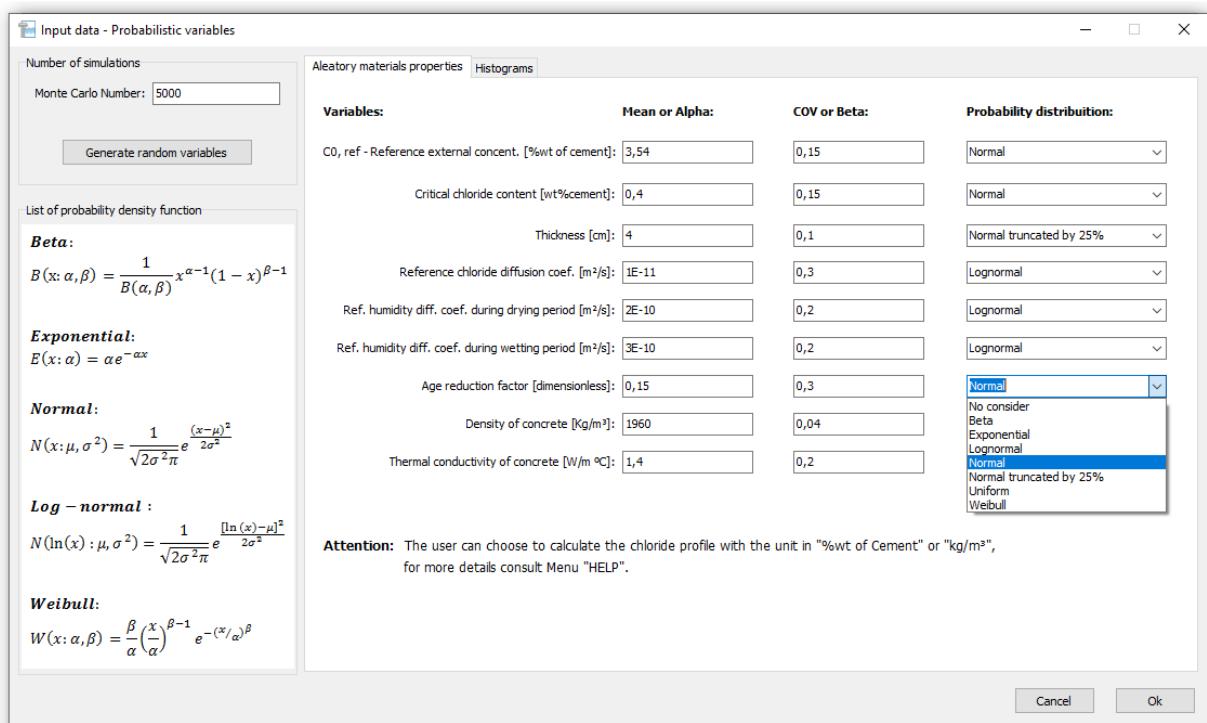


Figura 7.10 – Janela para fornecimento das variáveis aleatórias do programa *Sea air PRO-Life*.

A escolha do número de simulações é fundamental para a precisão dos resultados (ver últimos parágrafos do item 5.2). Valores baixos (<100) impõem erros mais altos e velocidade de processamento maior, já uma escolha de números de simulação elevados (>10.000) impõem boa precisão com elevado custo computacional. Geralmente, para nosso caso de estudo, a realização acima de 10.000 simulações conduz a uma redução no erro muito baixa, não compensando o tempo necessário para execução do algoritmo. O programa impede o cálculo para menos de 1.000 simulações, alertando o usuário através de caixas de diálogo. Não há limite superior para escolha do número de simulações, embora se recomende cautela.

O método usado para a geração de números pseudoaleatórios com distribuição uniforme foi o método da congruência ou residual, discutido no item 5.3.2. Partindo da distribuição uniforme, a imposição do tipo de distribuição seguiu o método da Transformada Inversa, conforme discutido no item 5.3.4. O software permite a escolha de sete tipos de distribuição de probabilidade (beta, exponencial, log-normal, normal, normal truncada em 25%, uniforme e Weibull). Também se pode optar por não considerar a aleatoriedade de cada variável. Caso seja imputado a não consideração de todas as variáveis aleatórias, o resultado torna-se determinístico. Veja o exemplo mostrado nas Figuras 3.13 e 3.18.

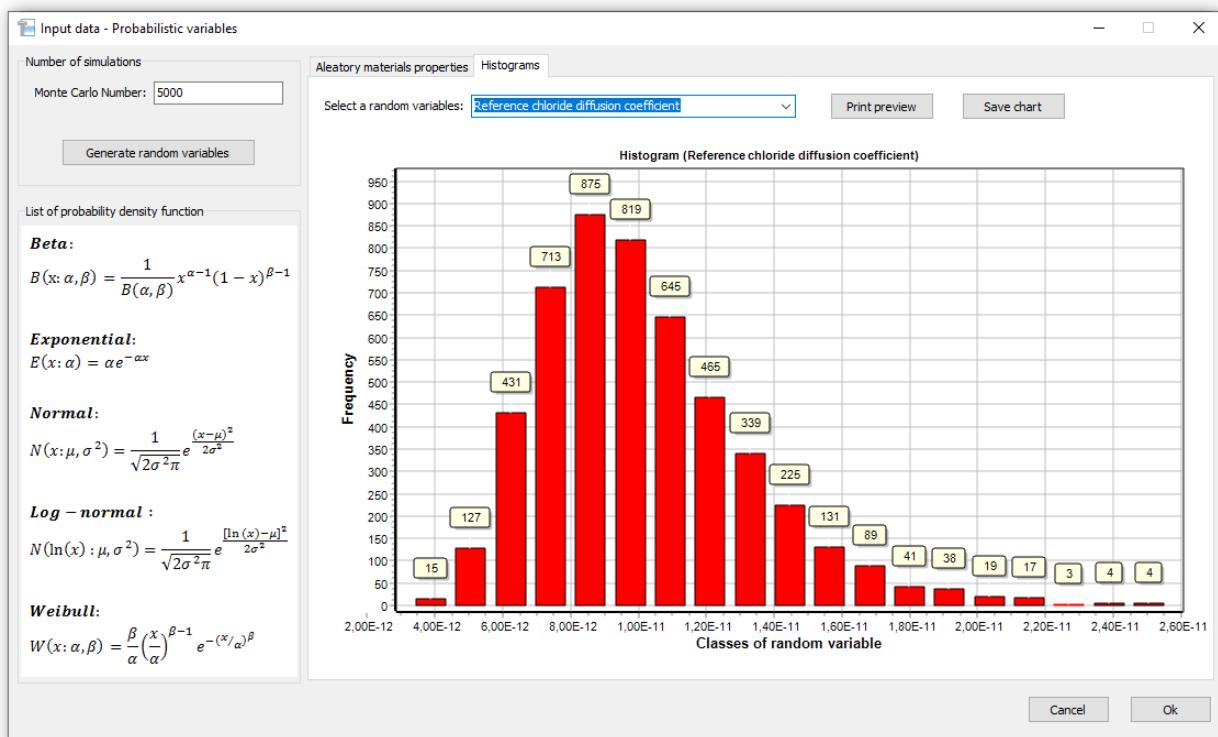


Figura 7.11 – Janela com histograma do coeficiente de difusão de referência de cloretos do programa *Sea air PRO-Life*.

Na aba *Histograms* pode ser visto o histograma de cada das variáveis aleatórias. Tomando como exemplo o coeficiente de difusão de referência de cloretos, vemos os resultados na **Figura 7.11**.

para 10.000 simulações. O cálculo de Histograma é automático após a escolha de visualização. Ao lado, nos botões específicos, os gráficos podem ser salvos.

7.1.2 Definição das condições de contorno

Dando prosseguimento a entrada de dados do *software*, entramos na imposição das condições de contorno, comentadas nos itens 3.2.1.3 (cloreto), 3.2.2.3 (umidade) e 3.2.3.1 (temperatura) e formuladas matematicamente no item 5.4.3. A determinação das condições de contorno na superfície externa é feita no menu *Input data – Boundary conditions – Temperature/Moisture/Chloride*, tanto para $t = 0s$ e $t > 0s$. As condições de contorno no interior do concreto seguem o fluxo de sólido médio semi-infinito por *default*, como a solução analítica da Segunda Lei de Fick, proposta por Crank (1975).

As Figuras 7.12 e 7.13, mostram as janelas com os parâmetros que devem ser escolhidos ou fornecidos para a imposição das condições de contorno de temperatura e umidade, respectivamente. A temperatura e umidade externa foram impostas no menu *Input data - Environmental characteristics - Temperature and humidity* (Figura 7.5). Dentre as condições de contorno disponíveis, temos os tipos de Dirichet (igual à temperatura externa), Neumann (fluxo constante de calor) e Robin (fluxo convectivo de calor, ou seja, uma parcela da umidade externa) para a temperatura. Já para a umidade, pode-se optar por Dirichet ou Robin.

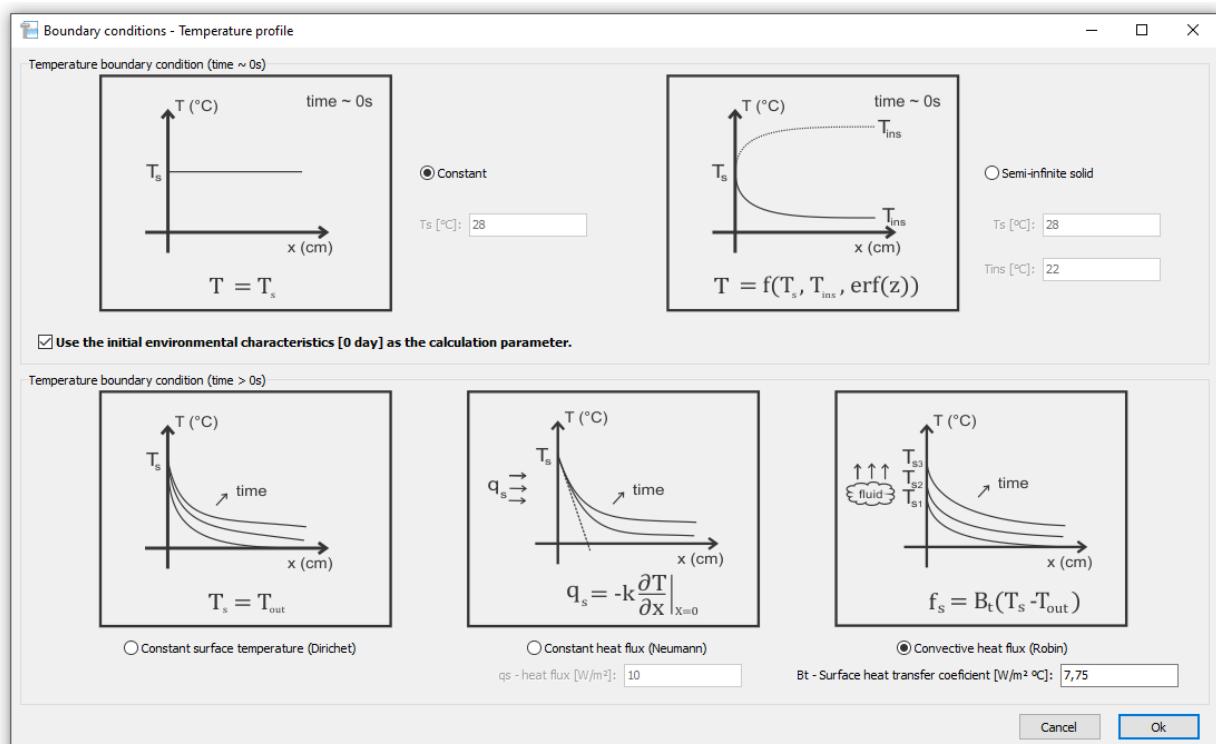


Figura 7.12 – Janela com os parâmetros que influenciam as condições de contorno de temperatura do programa *Sea air PRO-Life*.

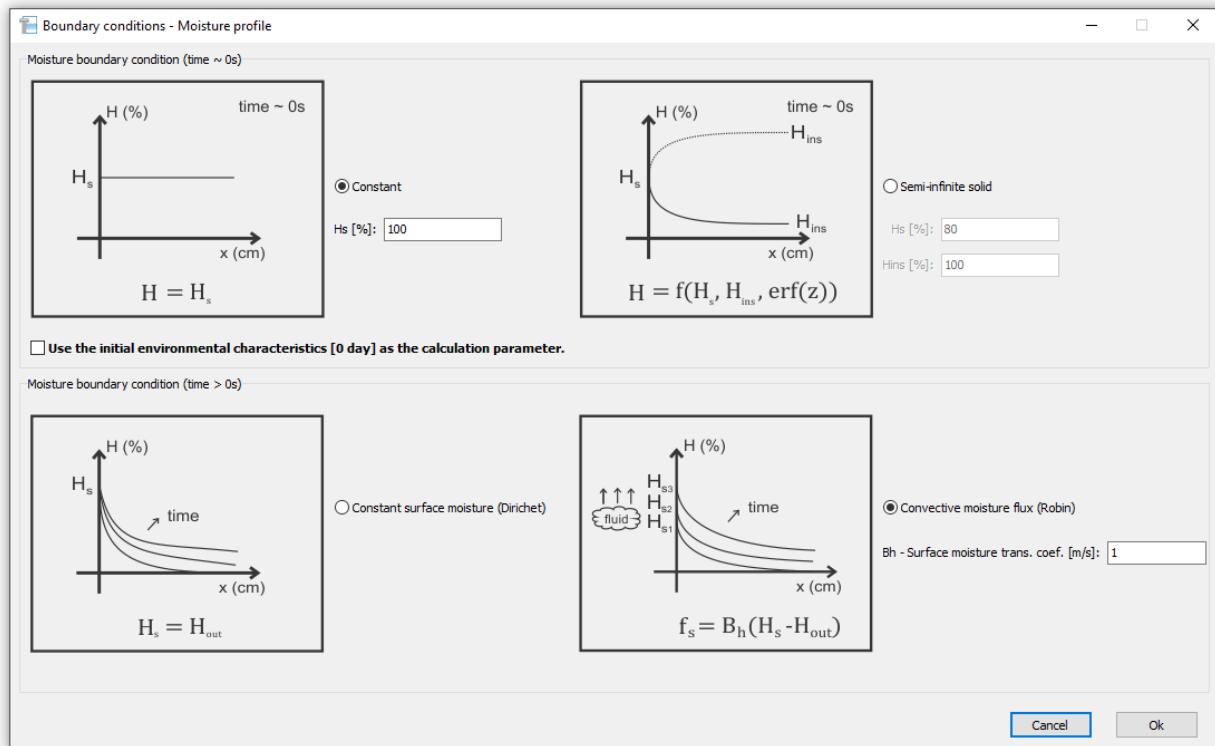


Figura 7.13 – Janela com os parâmetros que influenciam as condições de contorno de umidade do programa *Sea air PRO-Life*.

As condições de contorno para a concentração de cloretos na superfície do concreto estão na **Figura 7.14**. Nela, impõem-se o tipo de condição de contorno (Dirichlet ou Robin), a zona de agressividade marinha e a função de acumulação de cloretos na superfície do concreto. Dentre a gama de modelos apresentados na literatura (**Tabela 2.5**), o usuário do programa pode escolher, entre sete tipos distintos de funções (**Tabela 7.1**), a que melhor se adequar a situação em análise.

Tabela 7.1 – Modelos matemáticos para previsão da concentração superficial de cloretos dispostos no programa *Sea air PRO-Life*.

Fonte	Zona aplicável	Relação	Modelo matemático
Constante	Todas	Linear	$C_{0,ref}$ em determinados meses do ano
Collins e Grace (1997)	Flutuação de maré e respingo	Polinomial	$C_{0,ref} \times (t/(t + c_1))$
Costa e Appleton (1999b)	Todas	Potencial	$C_{0,ref} \times t^{c_1}$
Kassir <i>et al.</i> (2002)	Respingo e atmosfera	Exponencial	$C_{0,ref} \times (1 - e^{c_1 \times t})$
Modelo proposto	Todas	Sigmoide	$C_{0,ref} \times \left[\frac{2}{1 + e^{c_1 \times d}} \right] \times \left\{ 1 - e^{-\left[c_2 \left(\frac{a/c}{Cons} \right) \times t \right]^{c_3}} \right\}$
Pack <i>et al.</i> (2010)	Flutuação de maré	Logarítmica	$C_{0,ref} \times (\ln(c_1 \times t + 1) + c_2)$
Uji <i>et al.</i> (1990)	Todas	Potencial	$C_{0,ref} \times \sqrt{t}$
Qualquer modelo	Todas	-	$C_{0,ref} \times factor$

Onde: $C_{0,ref}$ é a concentração de cloretos de referência no limite da superfície, em % de massa de cimento; c_1, c_2 e c_3 são as constantes dos modelos, na maioria adimensional; $factor$ é qualquer constante determinada pelo usuário para controlar o $C_{0,ref}$, adimensional; d é a distância do mar, em metros, e t é o tempo de exposição, em anos;

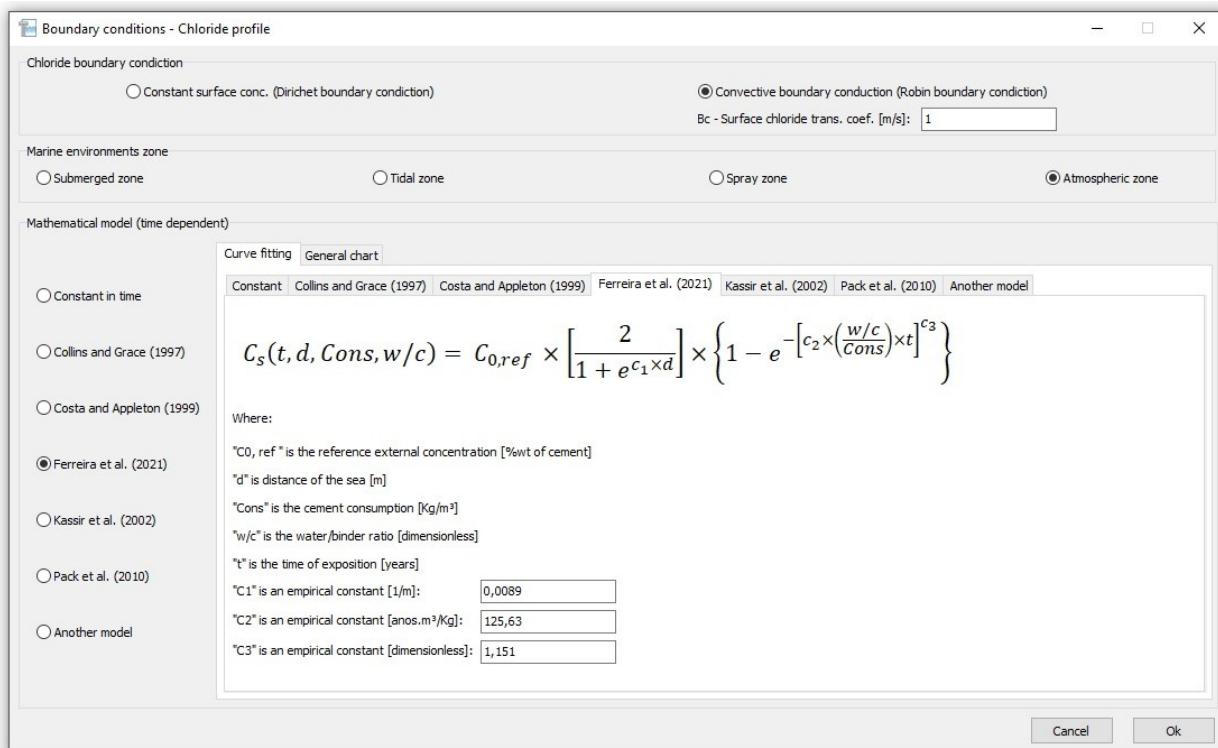


Figura 7.14 – Janela com as variáveis que influenciam a concentração superficial de cloretos do programa *Sea air PRO-Life*.

Após a imposição das variáveis da função de ajuste escolhida (aba *Curve fitting*), na aba *General chart* é mostrado o gráfico com a evolução da concentração de cloretos no limite entre a superfície e o ambiente de exposição ($C_{s \rightarrow 0}$) em função do tempo de exposição (Figura 7.15).

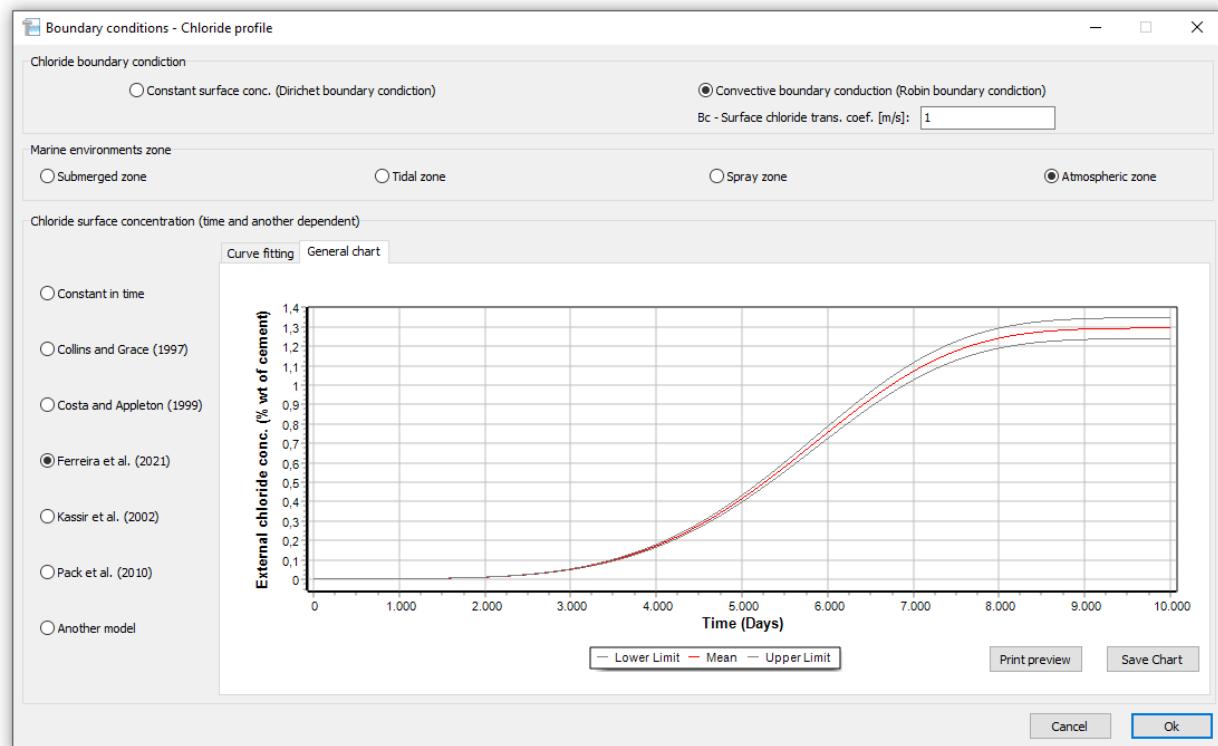


Figura 7.15 – Janela com o gráfico que mostra a evolução da concentração superficial de cloretos no tempo de exposição do programa *Sea air PRO-Life*.

7.1.3 Pós-Processamento

Após inserir os dados de entrada e as condições de contorno, no botão *Run* (Figura 7.2) da janela principal do *software* é simulado o processo de transporte de massa e energia. No botão *Stop* pode ser encerrado o cálculo no momento que o usuário desejar. Ao fim do processamento, o *software* alerta e fornece ao usuário:

- i. O gráfico com a evolução do coeficiente de difusão efetivo de cloretos e umidade, com base na influência da temperatura, da umidade e do grau de hidratação, no menu *File - Export chart* ou *print - Moisture ou Chloride diffusion coeficient* (Figura 7.7);
- ii. Os histogramas das variáveis probabilísticas (coeficiente de referência de difusão, teor crítico de cloretos, cobrimento, índice de variabilidade da concentração superficial, capacidade térmica, densidade e *aging factor*) que influenciam no processo, no menu *File - Export chart* ou *print - Histograms* (Figura 7.11);
- iii. O gráfico com o processo de acumulação de cloretos na superfície do concreto, no menu *File - Export chart* ou *print - Chloride surface concentration* (Figura 7.15);
- iv. A faixa de distribuição dos perfis de temperatura, umidade e cloretos (livres e totais) com o avançar do tempo, através do menu *Results - profiles* (Figura 7.16);
- v. O histograma e a distribuição de probabilidade acumulada para o período de iniciação à corrosão com intervalo de confiança pré-determinado, no menu *Results - corrosion initiation time* (Figura 7.17);
- vi. Relatórios com os dados de entrada e cálculo pós-processamento do sistema, no menu *Report* (Figura 7.18).

A Figura 7.16 mostra um exemplo de perfil de cloretos livres calculado pelo programa a título de ilustração. No programa, pode-se optar por ver os perfis de temperatura, umidade, cloretos livres e cloretos totais. Através de um *rollover* é possível acompanhar a evolução do transporte de massa e energia no tempo.

A Figura 7.17 mostra o histograma e a curva de distribuição de probabilidade acumulada para o período de iniciação à corrosão. A janela apresenta breve conclusão, tomando como referência o intervalo de confiança escolhido na fase de entrada de dados. Para este caso em particular, não se pode afirmar, com 95% de confiança que a armadura estudada entrará em corrosão, tendo em vista que 3,9% das simulações não indicam a despassivação. De todo modo, a probabilidade é alta de acontecer à corrosão. Cabe ao usuário analisar o caso em concreto e tomar as devidas precauções.

Ainda dentro dos resultados, pode-se consultar os cálculos para uma simulação específica e um simples relatório que mostra parâmetros de entrada e os resultados do processamento do algoritmo (Figura 7.18).

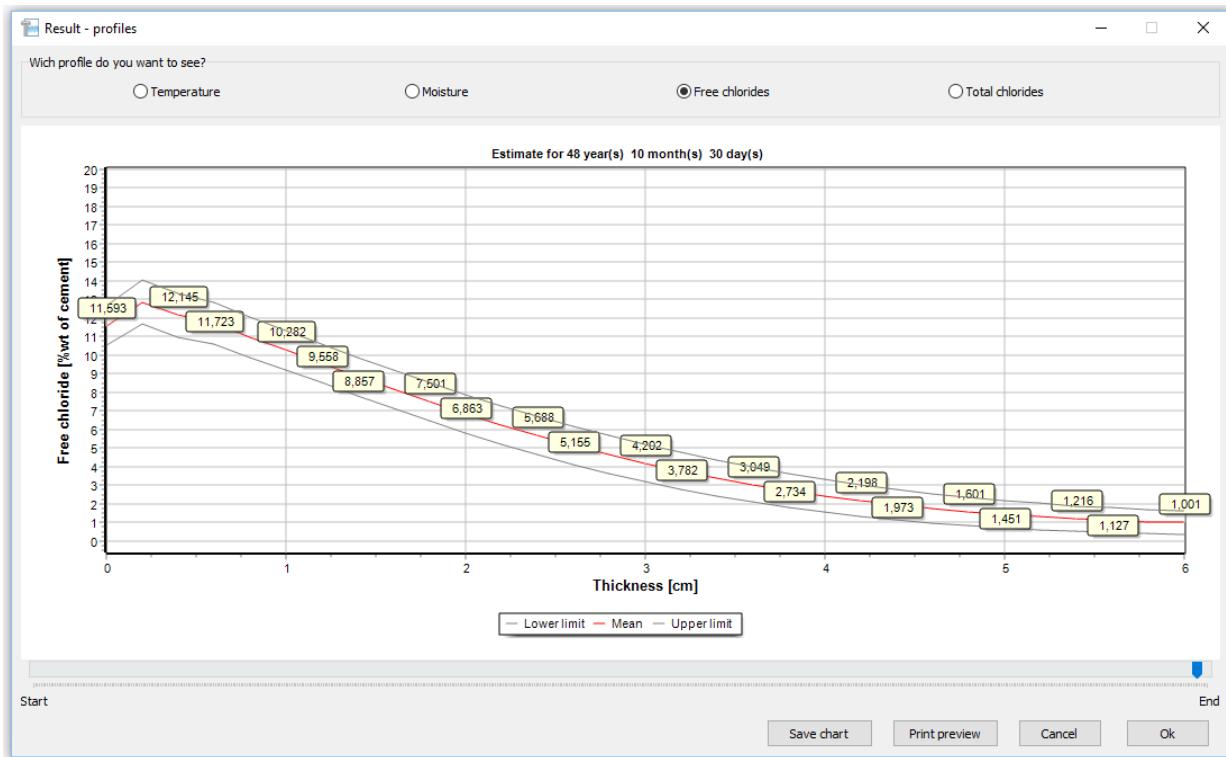


Figura 7.16 – Janela mostrando o resultado pós-processamento da concentração de cloreto livres apresentada pelo programa *Sea air PRO-Life*.

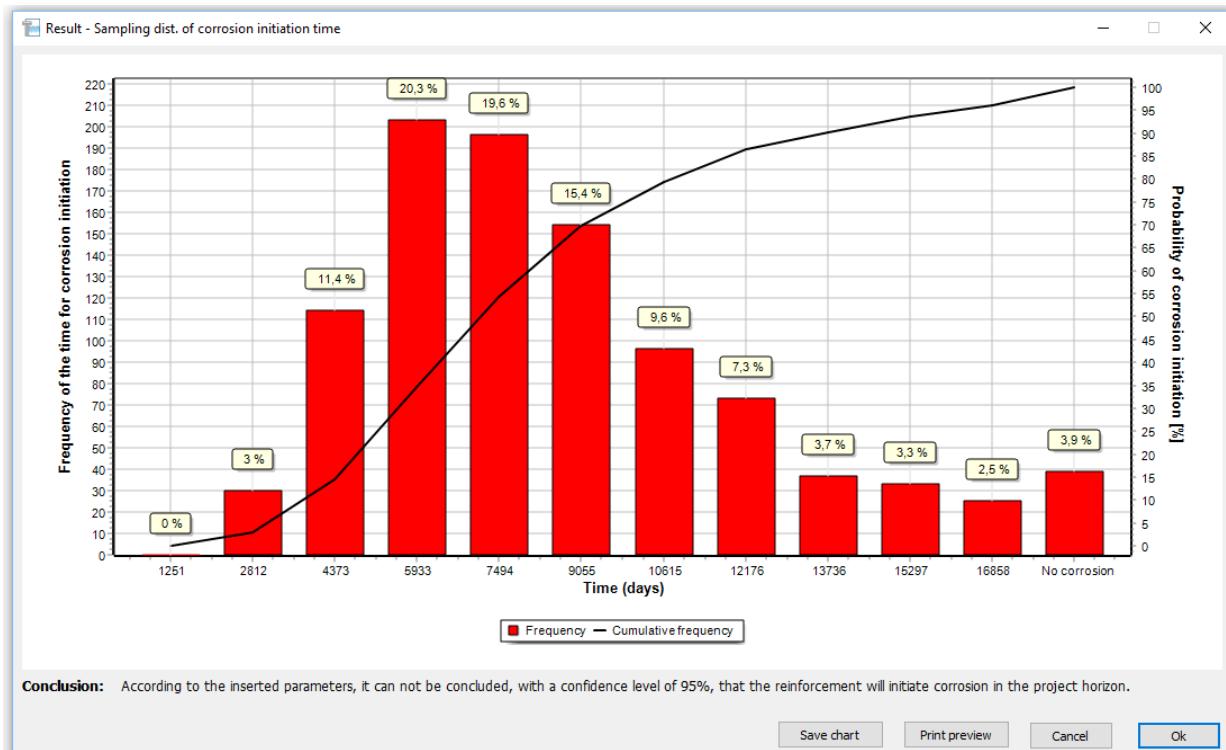


Figura 7.17 – Janela mostrando os resultados de período de iniciação à corrosão com base no histograma e na curva acumulada de distribuição apresentada pelo programa *Sea air PRO-Life*.

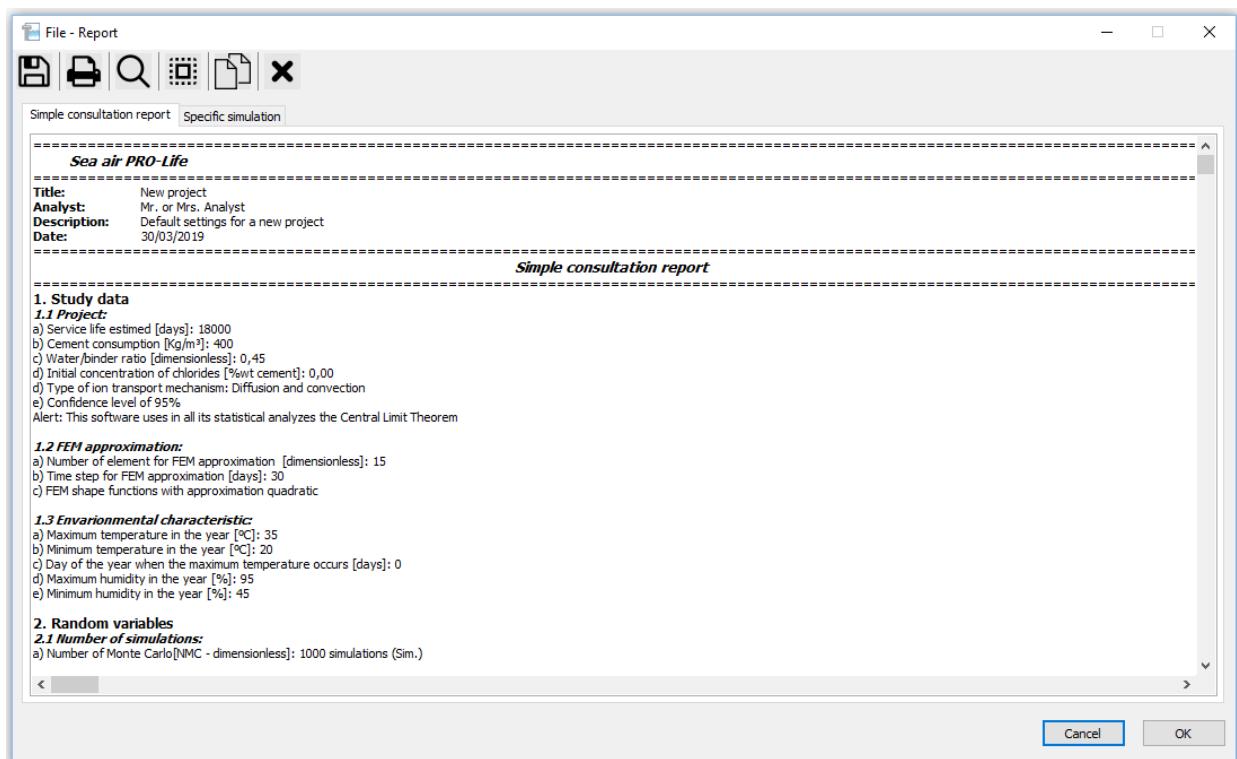


Figura 7.18 – Janela mostrando o relatório com os resultados pós-processamento apresentada pelo programa *Sea air PRO-Life*.

8 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Como todo programa de computador voltado a previsibilidade de vida útil de estruturas, seus resultados devem ser comparados com os resultados observados em situações reais, de modo que estes resultados reflitam, dentro de margens preestabelecidas, as reais condições de exposição e desempenho. Este procedimento se chama validação. É exatamente esta validação, que se apresenta e se discute neste capítulo.

A validação se dá através de análise estatística comparativa entre os resultados observados em estrutura de concreto armado em real condição de exposição em atmosfera marinha e os resultados gerados pelo software após alimentação com os parâmetros físico-químicos do material e do ambiente de exposição.

Em cada sessão, discute-se como as variáveis climáticas, o tempo de exposição, os mecanismos de transporte envolvidos no processo e as interações químicas que influenciam no transporte de massa (umidade e cloretos) e energia (temperatura) no interior do concreto. Também são apresentados os resultados de tempo para iniciação à corrosão, destacando o intervalo de confiança para que ocorra a despassivação da armadura, bem como o melhor ajuste a sua distribuição de probabilidade.

Como contribuição de destaque neste trabalho, além do software que ajudará profissionais da área na decisão de parâmetros de seus projetos e análise de situações já existentes, discute-se o grau de agressividade que a estrutura sofre à medida que se aproxima do mar e apresentam-se ábacos simplificados que ajudarão os profissionais no dimensionamento de suas estruturas frente à corrosão por cloretos na cidade de João Pessoa/PB e em locais com climatologia semelhante.

8.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Partindo da premissa de que o modelo de transporte de cloretos no interior do concreto envolve uma gama de variáveis atrelada às propriedades dos materiais, aos parâmetros de projeto, aos mecanismos de ingresso do agente agressivo e à severidade do ambiente de exposição, a validação prévia do programa proposto tem por objetivo comparar os resultados gerados para o usuário com alguns dados apresentados pela literatura.

O problema a ser estudado é o desempenho de uma estrutura de concreto armado frente à corrosão por cloretos, a ser construído na zona costeira de João Pessoa/PB (zona de atmosfera marinha) numa distância do mar de 10, 100, 200 e 500m. Os resultados do programa são comparados aos resultados apresentados nos trabalhos de Meira (2004), Meira *et al.* (2010) e Meira *et al.* (2020), que reportam estas mesmas condições de exposição e material. Estes

mesmos trabalhos forneceram os dados de entrada para o programa gerar os resultados de previsibilidade. Com o objetivo de facilitar o entendimento, os dados de entrada do *software* serão divididos em condições de exposição, propriedades dos materiais, parâmetros de projeto e parâmetros de cálculo.

8.1.1 Condições do ambiente de exposição

Como mostrado na sessão 2.3 vários fatores interferem na geração, transporte, captura e acumulação de íons cloretos na superfície do concreto. Muitos modelos simplificam estes processos através de uma única função matemática que representa a interação ambiente/estrutura, conforme apresentados no Capítulo 6. Uma vez capturados os íons cloretos na superfície do concreto, acontece o ingresso para o interior do material. Quando certa quantidade de cloretos livres se acumula nas proximidades da armadura, a corrosão se inicia (Figura 1.2).

Para este caso em estudo, adota-se o mesmo princípio. A interação entre o aerossol marinho e a estrutura de concreto armado será representada por um modelo que compile numa única fórmula matemática a geração, transporte, captura e acumulação de íons cloretos na superfície do concreto. Sendo assim, aplicaremos uma formulação adaptada do modelo de Akayama *et al.* (2009) (Equação 6.4), que relaciona a concentração de cloretos no limite entre a superfície de concreto e o ambiente de exposição ($C_{s \rightarrow 0}$) com a sazonalidade da deposição média de cloretos (Equação 2.2), o tempo de exposição, o consumo de cimento e o fator água/cimento. Esta mesma fórmula definirá uma das condições de contorno do problema matemático destinada a calcular o ingresso de cloretos no interior do concreto.

Entretanto, acopla-se, ao sistema, a interferência do efeito lavagem influenciado pela chuva dirigida na superfície do concreto, discutido na sessão 2.3.2.3. Para tal, faz-se uso do modelo simplificado proposto por Wattanapornprom e Ishida (2017), onde o efeito lavagem é influenciado pela pluviometria do local e gera três condições distintas para o valor da concentração de cloretos no limite entre o ambiente e a superfície do concreto (Figura 8.1):

- i. Pluviometria menor que 1,00 mm por hora não interfere na deposição de íons cloretos na superfície do concreto;
- ii. Pluviometria entre 1,00 e 4,99 mm por hora cria uma película de água na superfície do concreto, que impede a deposição de novos íons cloretos na superfície durante o período de incidência da chuva;

- iii. Pluviometria igual ou superior a 5,00 mm por hora cria um fluxo de água na superfície do concreto no sentido da gravidade, que impede a deposição de novos íons cloreto na superfície e faz zerar a concentração superficial de cloreto do concreto. Consequentemente, um gradiente de concentração (difusão) é gerado do interior para a superfície do concreto após a incidência pluviométrica.

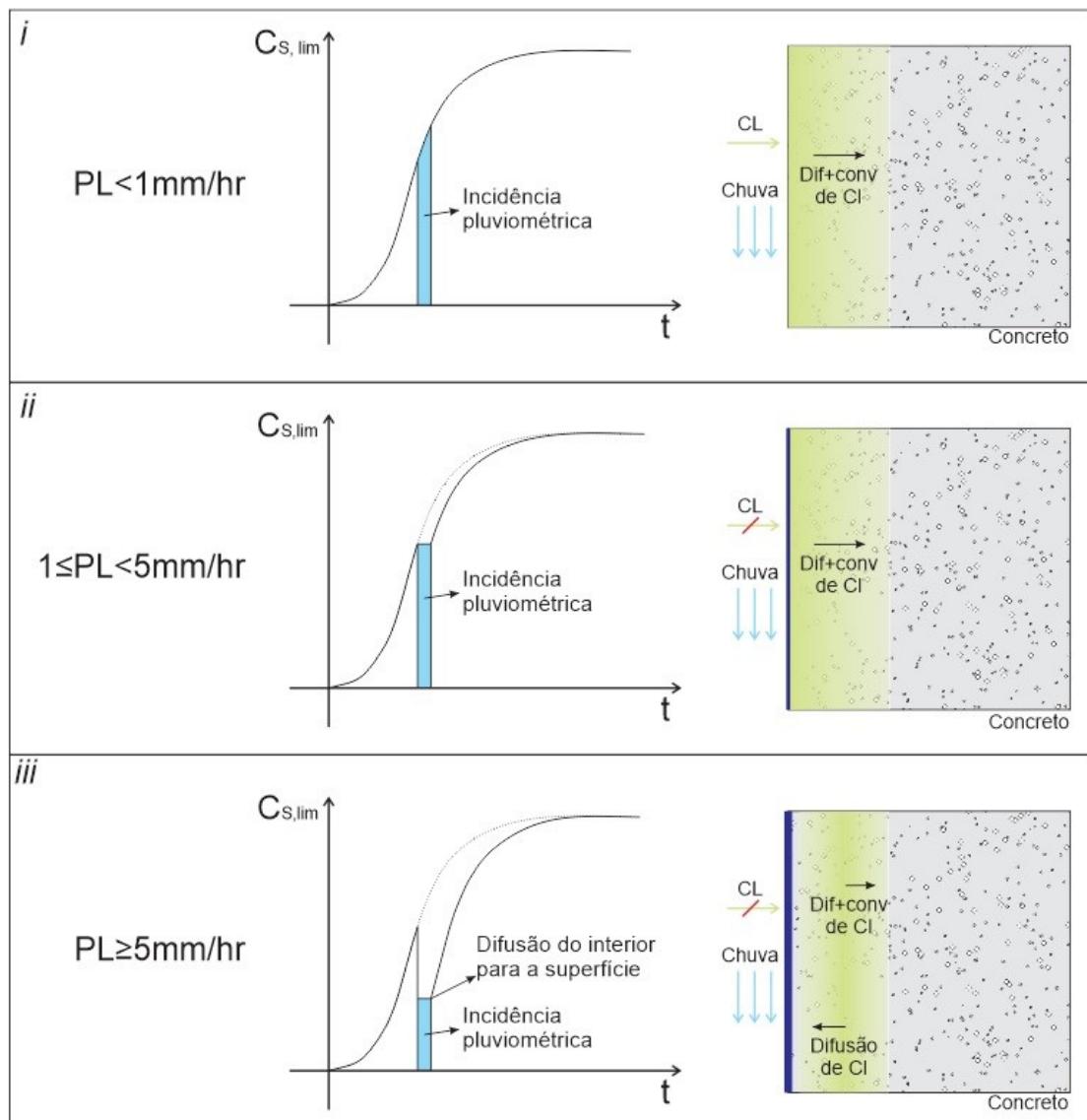


Figura 8.1 – Mecanismo de efeito lavagem na superfície do concreto. **Fonte:** Adaptado de Wattanapornprom e Ishida (2017).

Sendo assim, a equação que representará a interação aerossol/estrutura será dada por:

$$\begin{aligned}
 & C_{s \rightarrow 0}(DCl_{ext}, d, Cons, a/c, t_{t+\Delta t}) \\
 &= \begin{cases} c_0 \times DCl_{ext}^{c_1} \times \left[\frac{2}{1 + e^{c_2 \times dm}} \right] \times \left\{ 1 - e^{-\left[c_3 \times \left(\frac{a/c}{Cons} \right) \times (t+\Delta t) \right]^{c_4}} \right\}, & Pl < 1 \\ c_0 \times DCl_{ext}^{c_1} \times \left[\frac{2}{1 + e^{c_2 \times dm}} \right] \times \left\{ 1 - e^{-\left[c_3 \times \left(\frac{a/c}{Cons} \right) \times t \right]^{c_4}} \right\}, & 1 \leq Pl < 5 \\ 0 + \text{Difusão para a superfície}, & Pl \geq 5 \end{cases} \quad \text{Equação 8.1}
 \end{aligned}$$

Onde $C_{s \rightarrow 0}$ é a concentração de cloretos no limite entre a superfície de concreto e o ambiente de exposição, em % de massa de cimento; DCl_{ext} é a deposição média de cloretos, em mg de $\text{Cl}^-/\text{m}^2.\text{dia}$; dm é a distância da superfície de concreto para a fonte de cloretos, em metros; t é o tempo de exposição, em anos; Δt é o *time step*, em anos; $Cons$ é o consumo de cimento por volume de concreto, em kg/m^3 ; a/c é a relação água/cimento, é adimensional; e c_0, c_1, c_2, c_3 , e c_4 são coeficientes de regressão, em $\text{dia}.\%$ de massa de cimento/ Cl^-m^2 , adimensional, $1/\text{m}$, $\text{anos}.\text{m}^3/\text{kg}$ e adimensional, respectivamente.

Por fim, para que o modelo seja implementado, algumas variáveis climatológicas do ambiente de exposição precisam ser determinadas. A temperatura e umidade relativa externa foram calculadas conforme as Equações 3.60 e 3.61. O incremento na temperatura da superfície do concreto ocorrido em virtude da radiação solar foi calculado conforme o modelo proposto por Dominicini e Calmon (2017) (Equação 3.62). Os dados de radiação total diária emitida pelo sol na cidade de João Pessoa/PB, para cada mês do ano foram obtidos do Atlas Solarimétrico do Brasil (TIBA *et al.*, 2000). A pluviometria foi estimada com base na aplicação do Método de Holt-Winters Aditivo, ajustado a série histórica dos dados pluviométricos do local. Os parâmetros numéricos necessários para alimentação dos modelos estão na Tabela 8.1.

Tabela 8.1 – Parâmetros climatológicos constantes usados na validação do programa proposto.

Parâmetros		Valor
Temperatura	Máxima	31°C
	Mínima	23°C
	Dia de T_{max}	69
Umidade relativa	Máxima	100%
	Mínima	60%
	Latitude	-7,11°
Radiação solar	Azimute	90°
	Inclinação da superfície	90°
	Fator de absorção	60%
	α_s	25Kcal/ $\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}$
	I_{sc}	4870,8 KJ/ $\text{hm}^2^\circ\text{C}$
	Refletância	50%
Pluviometria (constantes de alisamento)	α	0,67
	β	0,79
	δ	0,08

8.1.2 Propriedade dos materiais e parâmetros de projeto

Uma vez discretizado o ambiente de exposição, partiu-se para as características dos materiais e os parâmetros de projeto que compõe a estrutura de concreto armado. O *software* foi alimentado com os mesmos dados apresentado no trabalho de Meira (2004). A Tabela 8.2 mostra as variáveis aleatórias utilizadas para alimentação do programa. Toda variável estatística é

composta de três atributos: média, covariância (COV) ou desvio-padrão e Função de Distribuição de Probabilidade (FDP). A média corresponde aos valores apresentado no trabalho de Meira (2004), tendo em vista que no trabalho citado são apresentados valores determinísticos, a COV e o tipo de FDP adotada foram semelhantes aos apresentados por Bastidas-Arteaga *et al.* (2011). A **Tabela 8.3** mostra as variáveis determinísticas empregadas como propriedade dos materiais e parâmetros de projeto.

Tabela 8.2 – Parâmetros dos materiais e de projeto randômicos usados na validação do programa proposto.

Parâmetros		Média	COV	Distribuição
Cobrimento (NBR 6118/2014)	Viga	30 mm	0,25	Normal truncada
	Laje	25 mm	0,25	Normal truncada
Transp. de cloreto	c_0	0,7845	0,20	Log-normal
	$D_{c,ref}$	$6,29e^{-10} \text{ cm}^2/\text{s}$	0,30	Log-normal
	Cl_{crit}	0,45% massa de cimento	0,20	Normal
	m	0,358	0,30	Beta
Transp. de umidade	$D_{c,ref,sec}$	$6,29e^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$	0,30	Log-normal
	$D_{c,ref,um}$	$10,1e^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$	0,30	Log-normal
Transporte de calor	ρ_c	2386 kg/m^3	0,04	Beta
	λ	$2,5 \text{ W}/(\text{m} \text{ }^\circ\text{C})$	0,20	Beta

Tabela 8.3 – Parâmetros dos materiais e de projeto constantes usados na validação do programa proposto.

Parâmetros		Valor
Tempo	Horizonte de projeto	50 anos
Armadura	Tipo de aço	CA50
	Bitola da armadura principal	20mm
Agressividade marinha	c_1	0,04276
	c_2	0,00383
	c_3	114,130
	c_4	1,1476
Dosagem	Concentração inicial	0,043%
	Consumo de cimento	406 kg/m^3
	Fator a/c	0,5
	Quantidade de C_3A (CPIIF)	7,83%
Coef. de difusão de cloreto	T_{ref}	25°C
	t_{ref}	90 dias
	U_c	$41,80 \text{ KJ/mol}$
	R	8,134
	n_{gs}	4,60
	h_c	0,75
Coef. de difusão de umidade	T_{ref}	25°C
	t_{ref}	90 dias
	U_h	$25,00 \text{ KJ/mol}$
	α_0	0,05
	n	11
Combinação de cloreto	Langmuir	α_l
		$5,64e^{-4} \text{ L/g}_{\text{cim}}$
Transporte de calor	c_q	$1000 \text{ J}/(\text{kg} \text{ }^\circ\text{C})$

8.1.3 Parâmetros de cálculo matemático

Até o presente momento não há uma solução analítica para resolução das EDP's que governam o transporte de massa e energia no interior do concreto em condições não saturadas. Sendo assim, o emprego do Método de Elementos Finitos (MEF) necessita da definição de alguns parâmetros para realização da sua solução numérica. A [Tabela 8.4](#) mostra estes parâmetros.

Tabela 8.4 – Parâmetros matemáticos usadas na validação do programa proposto.

Parâmetros		Valor
Malha	Tipo de função de forma	Linear
	Tamanho dos elementos	$\approx 4,06$ (1D) / 5,00 (2D) mm
	Número de nós	9 (1D) / 99 (2D)
Simulações	Número de Monte Carlo	3000
Estatístico	Nível de significância	5%
Passo temporal	θ	2/3
	Time Step	1 dia
Condição de contorno	Tipo de CC	Convectivo
	B_t	7,75 W/(m ² °C)
	B_h	3,00e-7 m ³ /(m ² s)
	B_c	1,00 m ³ /(m ² s)

A resolução das equações de transporte de cloretos, umidade e temperatura por MEF necessitam da definição de uma malha. A justificativa para escolha da malha usada neste trabalho está apresentada na [Tabela 8.5](#). Como critério para escolha da malha ótima, optou-se pelo menor tempo de processamento para cálculo da concentração de cloretos livres próximo a armadura no ato da despassivação, associado ao menor erro médio desta mesma concentração em relação ao teor crítico de cloretos. Para tal, considerou-se a estrutura de concreto armado localizada a uma distância de 10 m do mar, onde são encontradas as mais fortes oscilações ambientais, dentre as distâncias do mar estudadas. O erro máximo aplicado é de 0,1%, conforme estudo semelhante de admissibilidade de erro usada por Bastida-Arteaga *et al.* (2011).

Tabela 8.5 – Erro relativo para escolha da malha ótima em 1D.

Critério	Função de forma	3 nós	5 nós	7 nós	9 nós	11 nós	13 nós
Erro (%)	Linear	0,22	0,17	0,11	0,019	0,017	0,016
	Quadrático	0,19	0,14	0,09	0,013	0,012	0,012
Tempo (dias)	Linear	0,1667	0,2211	0,2820	0,6763	1,1705	1,8441
	Quadrático	0,1834	0,2299	0,3328	0,7981	1,4047	1,8625

Com base nos dados apresentados na [Tabela 8.5](#), entende-se que a utilização de nove nós com função de forma linear gera uma boa precisão, com um menor custo computacional. Portanto, para uma dimensão, o cobrimento foi dividido em oito partes iguais ($\approx 4,06$ mm), conforme ilustrado na [Figura 8.2\(a\)](#). Este mesmo raciocínio foi aplicado à malha em duas dimensões, representada na [Figura 8.2\(b\)](#).

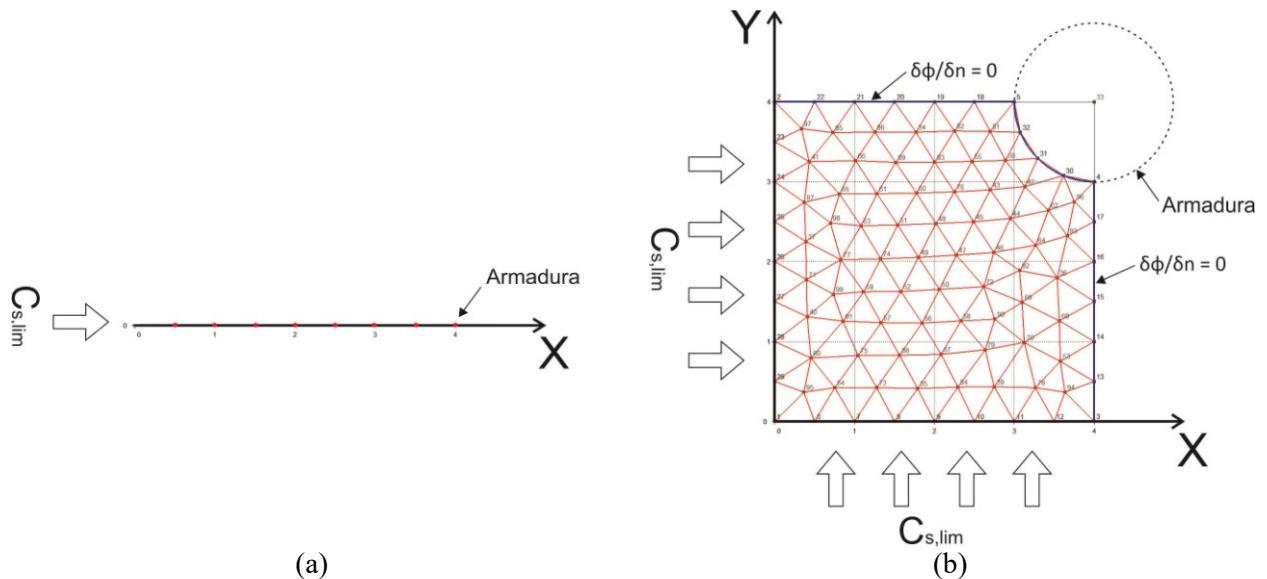


Figura 8.2 – Estrutura da malha 1D (a) e 2D (b) para calculo do MEF dos modelos estudados.

A malha 2D foi obtida com o auxílio do programa Gmesh®, com elementos finitos triangulares de lado da ordem de $\approx 5,00$ mm. Vale salientar que os cálculos em 2D foram feitos a parte do programa aqui apresentado (item 7.1), haja vista que na sua primeira versão publica, o *software* proposto calcula apenas o transporte em uma dimensão.

8.2 PREPARAÇÃO PARA PROCEDIMENTO DE CÁLCULO

Imputados os parâmetros de entrada, as variáveis aleatórias foram geradas pelo *software* proposto de modo independente. As Figuras 8.3 e 8.4 mostram os histogramas do coeficiente de difusão de cloretos de referência e do teor crítico de cloretos, seguindo as distribuições de probabilidade log-normal e normal, respectivamente.

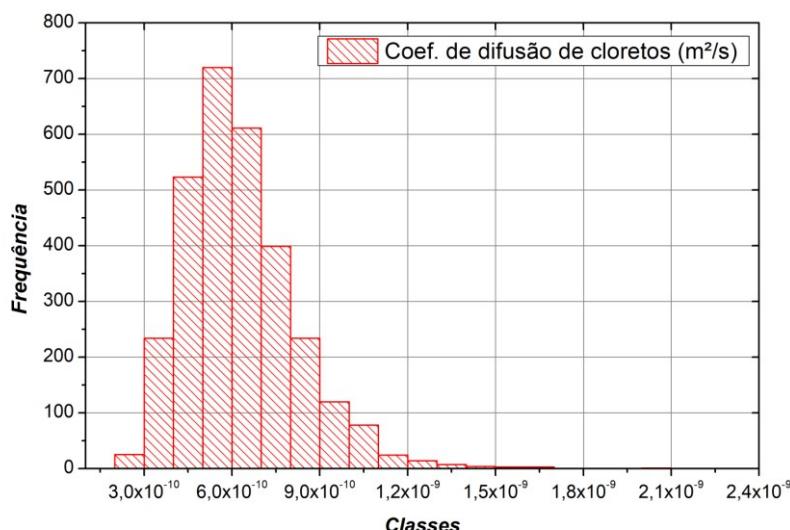


Figura 8.3 – Histograma do coeficiente de difusão de cloretos de referência seguindo distribuição de probabilidade log-normal.

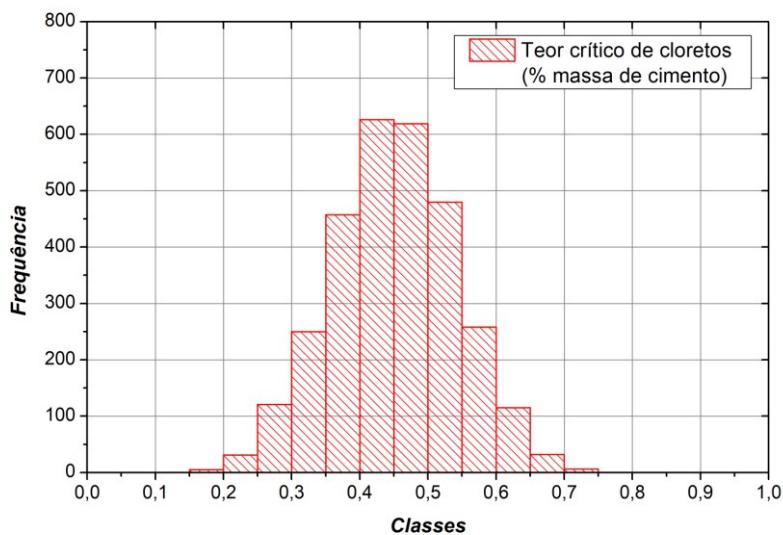


Figura 8.4 – Histograma do teor crítico de cloretos seguindo distribuição de probabilidade normal.

A geração das variáveis aleatórias usadas nas simulações (Tabela 8.2) seguiu os procedimentos impostos pelos itens: 5.3.1, para geração de números pseudoaleatórios com distribuição uniforme [0,1], seguido por 5.3.4, para distribuição de probabilidade contínua (normal, log-normal, beta, weibull, entre outras). Em cada modelo estudado, foram gerados 3000 números aleatórios por variáveis randômicas, cada qual com sua respectiva distribuição de probabilidade. Os demais histogramas das variáveis randômicas imputadas neste trabalho foram suprimidos, em virtude da semelhança gráfica com os demais apresentados acima ($D_{c,ref}$ e Cl_{crit}). Portanto, pouco agregaria, a este trabalho, a apresentação deles.

A seguir, são apresentados os resultados de transporte de massa e energia, destacando-se a influência dos parâmetros climáticos, dos mecanismos de transportes envolvidos, do tempo de exposição, das interações fisico-químicas (fixação de cloretos) nos perfis de temperatura, umidade e cloretos, quando se fizerem presentes.

8.3 INFLUÊNCIA DO TEMPO DE EXPOSIÇÃO E DAS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS NO TRANSPORTE

8.3.1 Temperatura e umidade no interior do concreto

A Figura 8.5 mostra a temperatura externa, bem como a temperatura no interior do concreto a 25 mm e 45 mm de profundidade, para a cidade de João Pessoa/PB. Os resultados considerados a longo prazo foram análogos ao apresentado na figura em discussão (Figura 8.5).

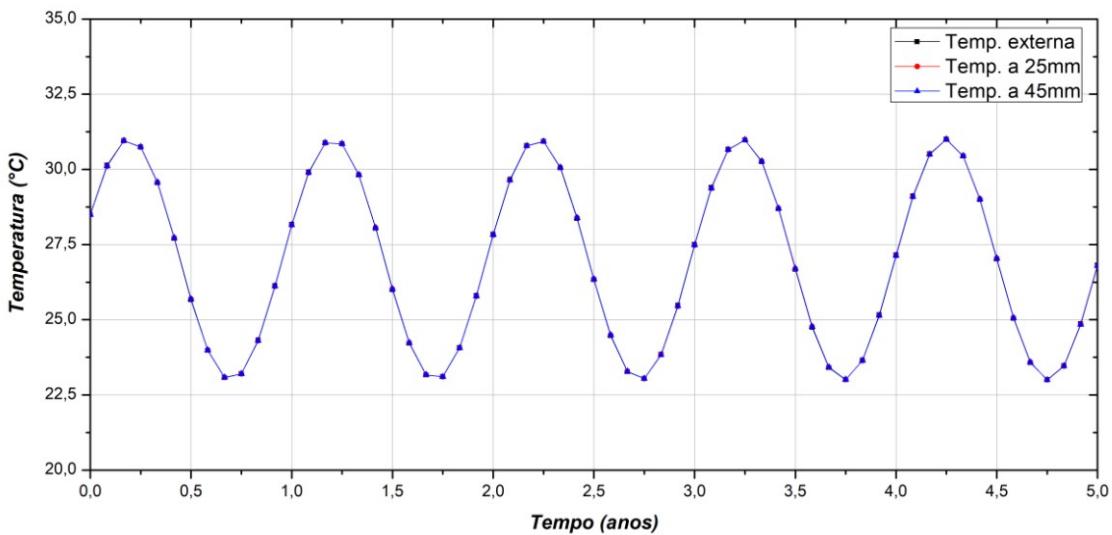


Figura 8.5 – Variação da temperatura externa e no interior do concreto (25mm e 40mm) para a cidade de João Pessoa/PB.

Dante deste fato, percebe-se que a variação entre a temperatura interna do concreto e a temperatura externa não apresenta diferenças significativas, devido as propriedades térmicas do material e ao intervalo de tempo entre as observações numa mesma simulação (*time step*). A diferença entre a temperatura externa e interna se dá apenas na terceira casa decimal. Estes resultados condizem com os valores observados em concretos dispostos em ambiente natural ou controlado, concluído que a temperatura no interior do concreto é bastante similar à externa, conforme observou o trabalho de Andrade *et al.* (1999).

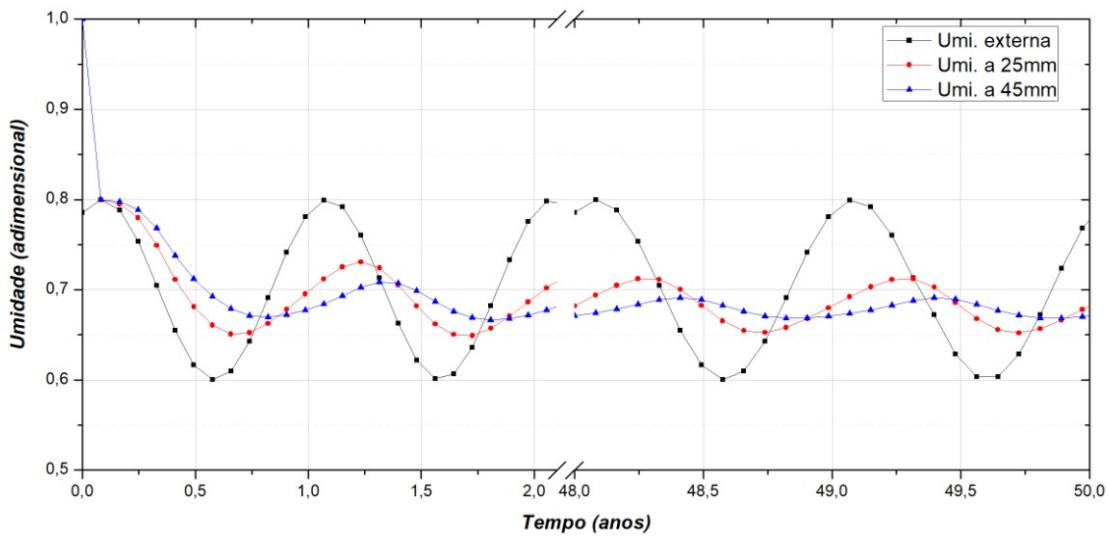


Figura 8.6 – Variação umidade relativa externa e no interior do concreto (25mm e 40mm) para a cidade de João Pessoa/PB.

Por outro lado, a umidade relativa apresenta diferenças substanciais entre a umidade externa e a interna no concreto, como pode ser visto na [Figura 8.6](#) para as profundidades de 25 mm e 45 mm. O tempo de observação da variável em análise na [Figura 8.6](#) mostra duas épocas distintas:

nas primeiras idades (0 – 2 anos) e em idades mais avançadas (48 – 50 anos), cujo objetivo é discutir o comportamento da matriz cimentícia com o passar do tempo.

Percebe-se que a umidade interna do concreto apresenta uma amplitude variacional inferior a UR externa, motivada pela resistência ao transporte de massa imposta pelo coeficiente de difusão de umidade. Esta propriedade do material age como um “freio” no ganho e na perda de água livre dos poros. Em épocas mais úmidas (outono - inverno), o concreto ganha umidade, com certa defasagem no tempo, e em épocas mais secas (primavera - verão), ele perde umidade. Este comportamento de perda e ganho demonstra a influência da sazonalidade da UR externa na umidade interna do concreto. Entretanto, mesmo com esta sazonalidade acontecendo na mesma proporção anualmente durante todo período de exposição, a hidratação do concreto reduz o coeficiente de difusão de umidade (Equação 3.41) e, consequentemente, diminui sutilmente a perda e o ganho de umidade no interior do concreto com o passar do tempo.

Comparado à umidade no interior do concreto em profundidades distintas, observamos uma maior resistência a ganho e perda de umidade com o aumento da profundidade, indicando uma tendência de estabilização no infinito. A explicação para tal comportamento se deve, mais uma vez, à resistência imposta do material, expressa matematicamente pelo coeficiente de difusão de umidade efetivo ao transporte de água livre no poro.

Por fim, tem-se a [Figura 8.7](#), que mostra os perfis de umidade no interior do concreto no verão (dia de maior temperatura) e no inverno (dia de menor temperatura), para o 1º e 25º ano de exposição, considerando às variações climáticas do ambiente de exposição. Os resultados mostram à média e seus respectivos intervalos de confiança (margem de incerteza) para cada profundidade observada, considerando um nível de significância de 0,05.

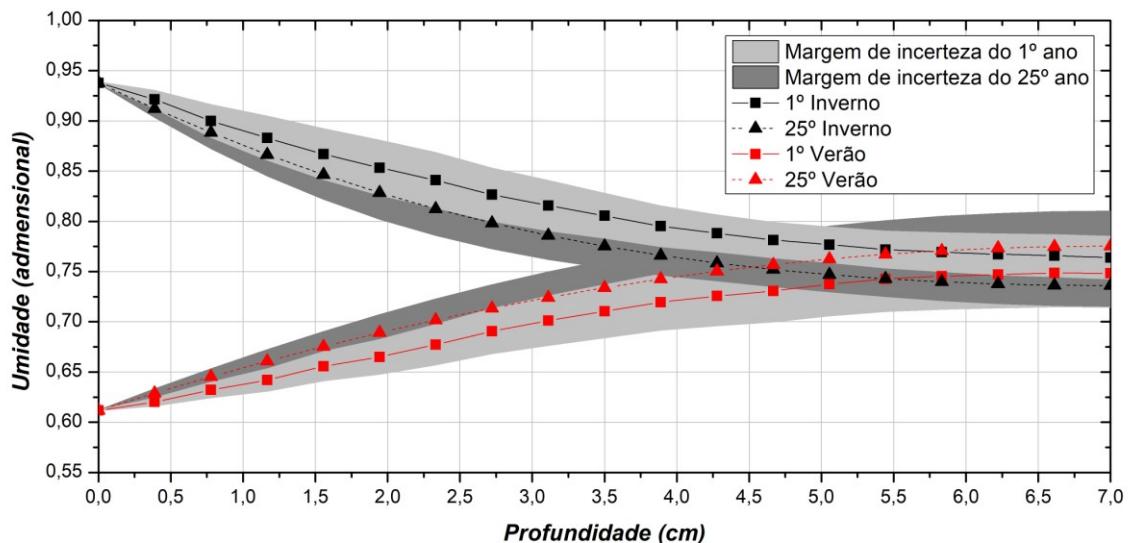


Figura 8.7 – Perfis de umidade relativa no interior do concreto, nas estações do verão e inverno, após 1 e 25 anos de exposição.

Diante disto, percebe-se que os resultados corroboram com os apresentados na [Figura 8.6](#), onde a forte influência das condições externas, capitaneada pelo coeficiente de transferência de umidade na superfície (B_c), regulam a umidade na superfície do concreto para ambas as idades. No dia de maior temperatura e menor UR externa (verão), o perfil de umidade registra a menor quantidade de água livre no interior do concreto. Por outro lado, no dia de maior UR externa (inverno), o concreto apresenta a maior quantidade de umidade no ano.

Comparando as idades de exposição percebemos um ganho de “resistência” na penetração de umidade com o tempo, motivado pela diminuição do coeficiente de umidade, gerada pelo refinamento dos poros. Com o aumento da profundidade, a UR relativa tende ao equilíbrio com a umidade no interior do concreto. Este padrão de comportamento se assemelha aos reportados na literatura, principalmente em relação à forma das curvas apresentadas por outros autores (MARTIN-PEREZ, 1999; SAETTA *et al.*, 1993).

8.3.2 Coeficiente de difusão de cloretos

A [Figura 8.8](#) mostra a variação do parâmetro $F1(T)$ ([Equação 3.16](#)) ao longo do ano. Os resultados mostram que $F1(T)$ variou entre 1,00 e 1,57. Uma variação em relação a média de cerca de 25% durante o ano, sempre para favorecer o processo de transporte de cloretos.

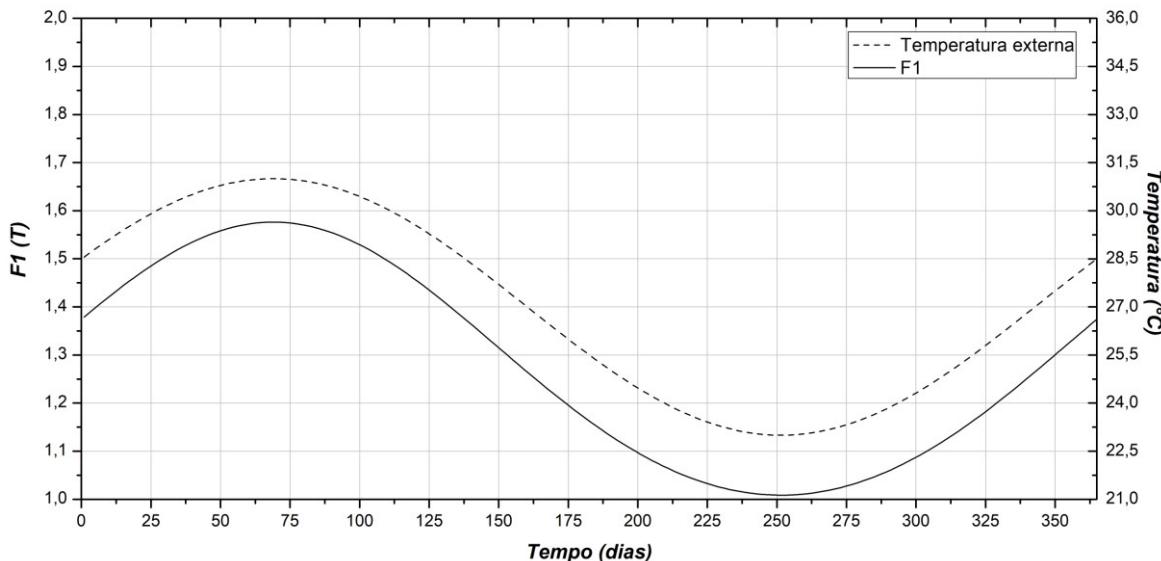


Figura 8.8 – Variação anual do fator que mostra a dependência do coeficiente de difusão efetivo de cloretos (D_c) em relação a temperatura.

Partindo da figura apresentada ([Figura 8.8](#)), percebemos que épocas do ano com temperaturas mais frias apresentam menores valores de $F1(T)$ e, consequentemente, menores coeficientes de difusão de cloretos, repercutindo diretamente num menor ingresso de cloretos para o interior do concreto. Portanto, vemos que em estações mais quentes como a primavera e o verão, o fator

$F1(T)$ cresce até o dia de temperatura máxima, 69º dia para a cidade em estudo. Em seguida, ele reduz até o período de menor temperatura anual, dada a sazonalidade das condições climáticas, representada pela dependência da função senoidal. Sendo assim, vemos que esse parâmetro tem influência potencializada na época mais quente e redutora na época mais fria.

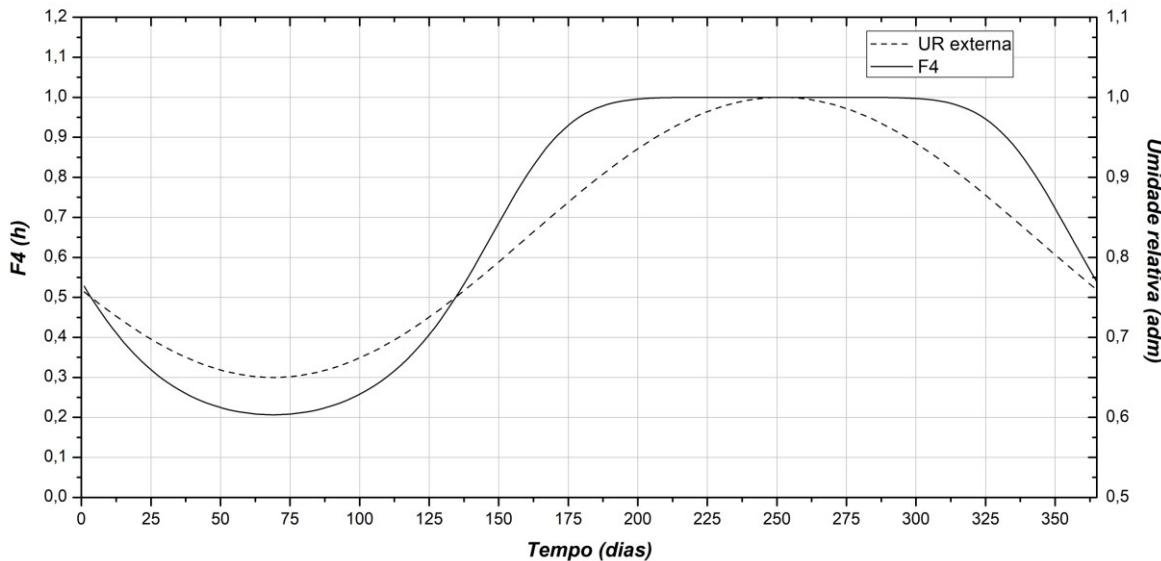


Figura 8.9 – Variação anual do fator que mostra a dependência do coeficiente de difusão efetivo de cloreto (D_c) em relação a umidade relativa.

A [Figura 8.9](#) mostra variação anual do parâmetro $F4(h)$ ([Equação 3.20](#)). Assim como para o fato $F1(T)$, a variação deste fator apresentou uma amplitude de 0,20 a 1,00. Estes valores representam uma variação de 45% em relação à média.

Diante da [Figura 8.9](#) percebemos que o parâmetro $F4(h)$ age sempre como fator de redução do coeficiente de difusão efetivo de cloreto. Sendo assim, quanto maior a umidade relativa do ambiente em que a estrutura esteja inserida menor a redução do parâmetro $F4(h)$ e, consequentemente, maior o ingresso de cloreto. Logo, períodos mais secos do ano ou climas mais secos apresentam forte redução no ingresso de cloreto. Fato interessante a ser abordado é que na estação do inverno a umidade relativa alta (acima de 90%), ver [Figura 3.10](#), deixou este fator com valor máximo ($F4(h) = 1,00$) durante o fim do outono, todo o inverno e início da primavera.

Analizando ambos os fatores em conjunto ($F1(T)$ e $F4(h)$), percebemos que climas quentes e úmidos, como os climas do litoral brasileiro, tendem a apresentar maior ingresso de cloreto se comparados a regiões mais frias. Isto se compararmos para o mesmo concreto e concentração de cloreto na atmosfera marinha. Esta ação conjunta reflete diretamente no coeficiente de difusão efetivo de cloreto, como pode ser vista na [Figura 8.10](#).

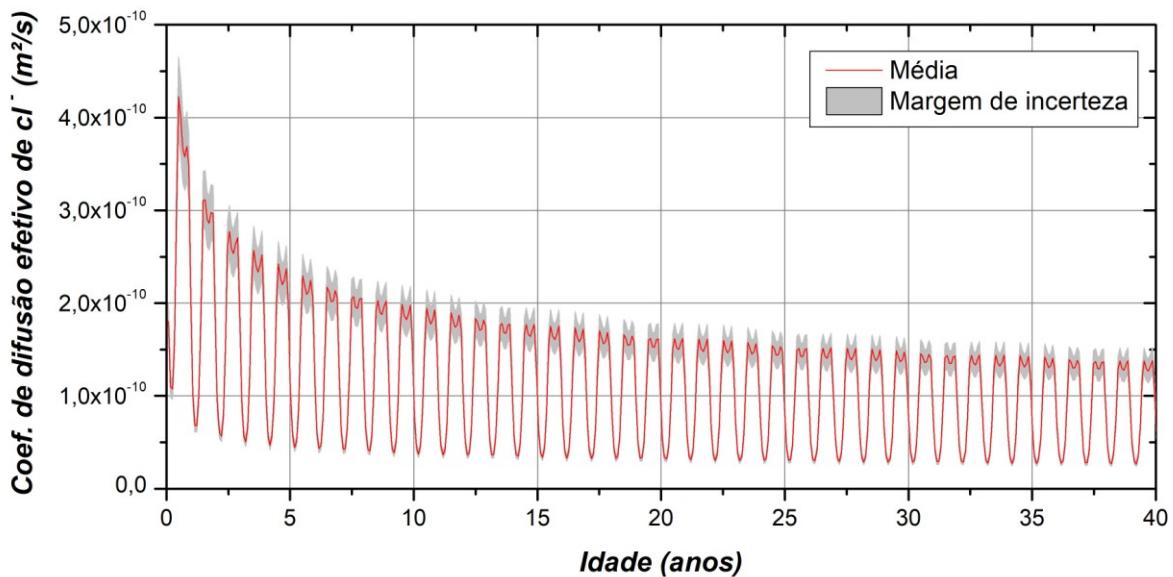


Figura 8.10 – Comportamento do coeficiente de difusão efetivo de cloretos (D_c) em relação a variação de temperatura, umidade relativa e tempo.

A partir da [Figura 8.10](#), percebe-se que o coeficiente de difusão efetivo de cloretos reduz significativamente com o tempo nas primeiras idades, mantendo essa tendência de redução com o transcorrer do tempo. Este comportamento se deve a influência do grau de hidratação do concreto, que refina os poros e compacta a matriz cimentícia (MAGAT e MOLLOY, 1994). Matematicamente, este comportamento é moldado pelo *aging factor* ([Equação 3.19](#)), função $F3(t)$ do modelo matemático. Também são observadas oscilações periódicas constantes, demonstrando a forte influência das condições climáticas (temperatura e umidade) na variável em análise.

Tendo em vista que a função $F2(GS)$ corrige o coeficiente de difusão do estado saturado para o estado não saturado e que o valor médio do coeficiente de difusão de cloretos de referência foi obtido a partir de ensaios experimentais em zona de atmosfera marinha, entende-se que não se faz necessário levá-lo em consideração, portanto a função $F2(GS)$ foi suprimida dos cálculos.

8.3.3 Perfil de cloretos totais

8.3.3.1 Influência do tempo de exposição

O cálculo do efeito do tempo de exposição foi estudado levando em consideração a fixação de cloretos pela matriz (Isoterma de Langmuir) e o mecanismo combinado de difusão e convecção como transporte de massa. A ação sazonal do ambiente (temperatura, pluviometria, umidade relativa e deposição de cloretos) e o efeito provocado pela radiação solar também foram considerados.

As Figuras 8.11 a 8.14 mostram os resultados do modelo para os perfis de cloretos totais em diversos meses de observação (18, 46 e 180 meses) e distâncias do mar (10, 100, 200 e 500m). Aos gráficos, foram adicionados os dados experimentais coletados nos trabalhos de Meira (2004) e Meira *et al.* (2010), que reportam as mesmas condições de exposição e característica do concreto. Conforme reportado pelo autor dos dados experimentais, uma concentração inicial de 0,043% de cloretos em relação à massa de cimento foi encontrada nos espécimes antes da exposição ao ambiente agressivo (MEIRA, 2004).

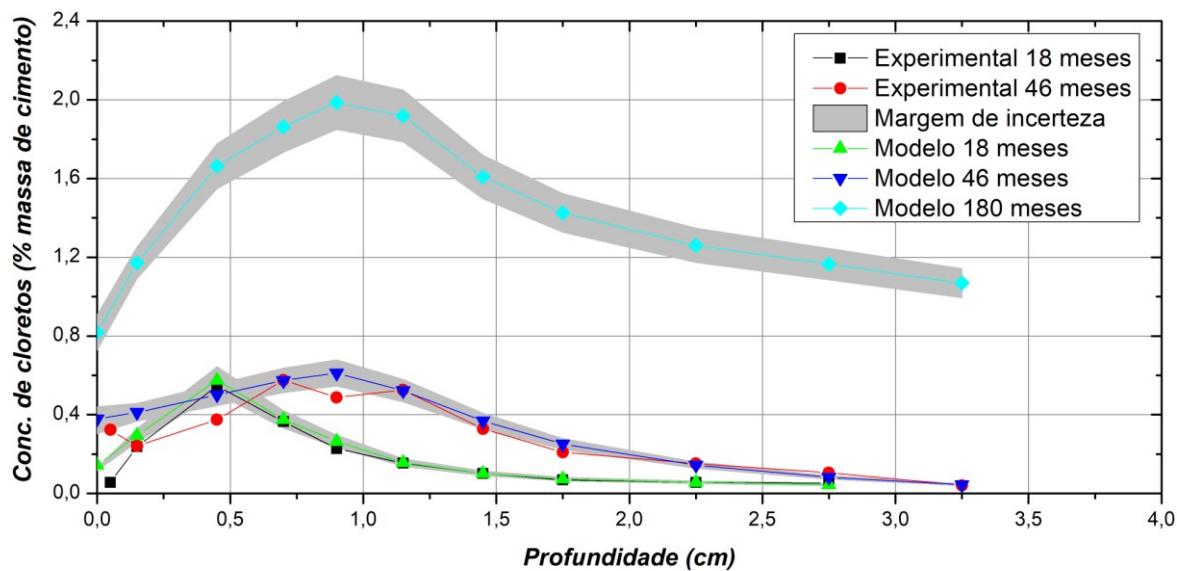


Figura 8.11 – Perfis de cloretos livres para 18, 46 e 180 meses de exposição a 10m de distância do mar.

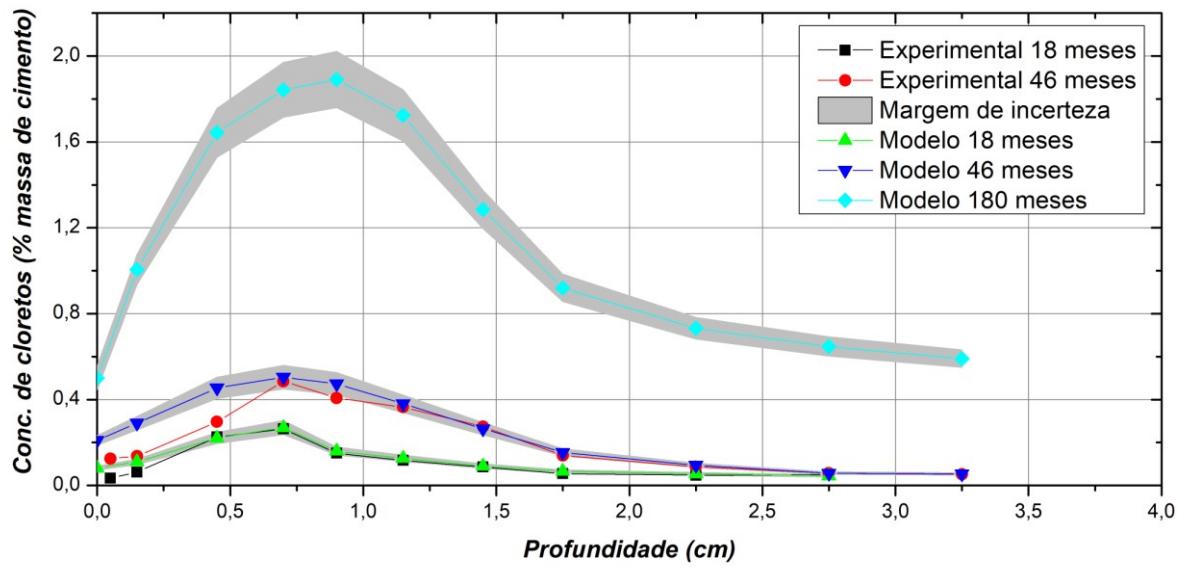


Figura 8.12 – Perfis de cloretos livres para 18, 46 e 180 meses de exposição a 100m de distância do mar.

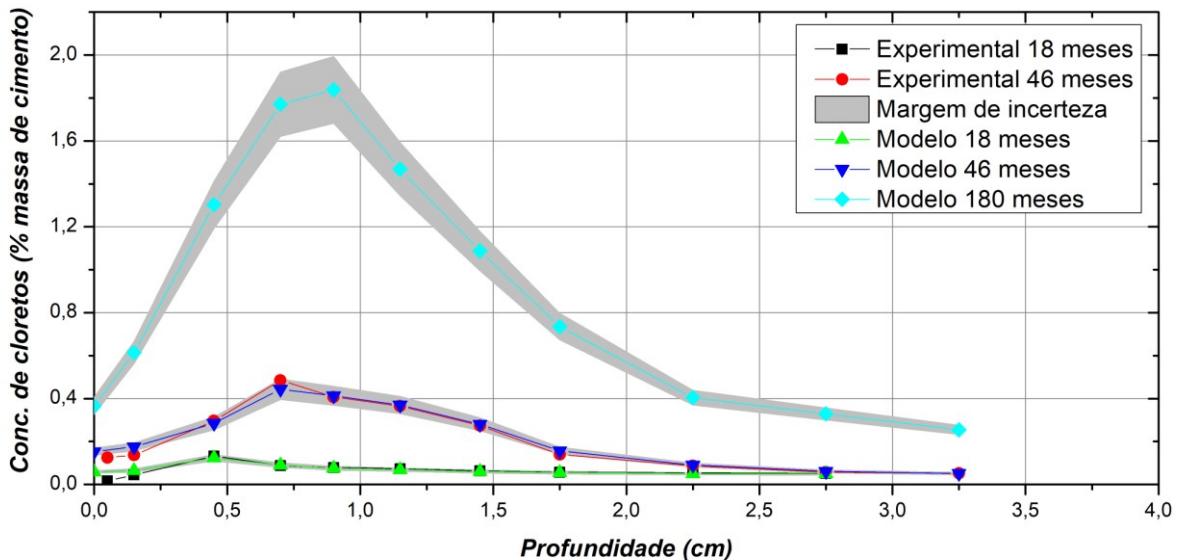


Figura 8.13 – Perfis de cloretos livres para 18, 46 e 180 meses de exposição a 200m de distância do mar.

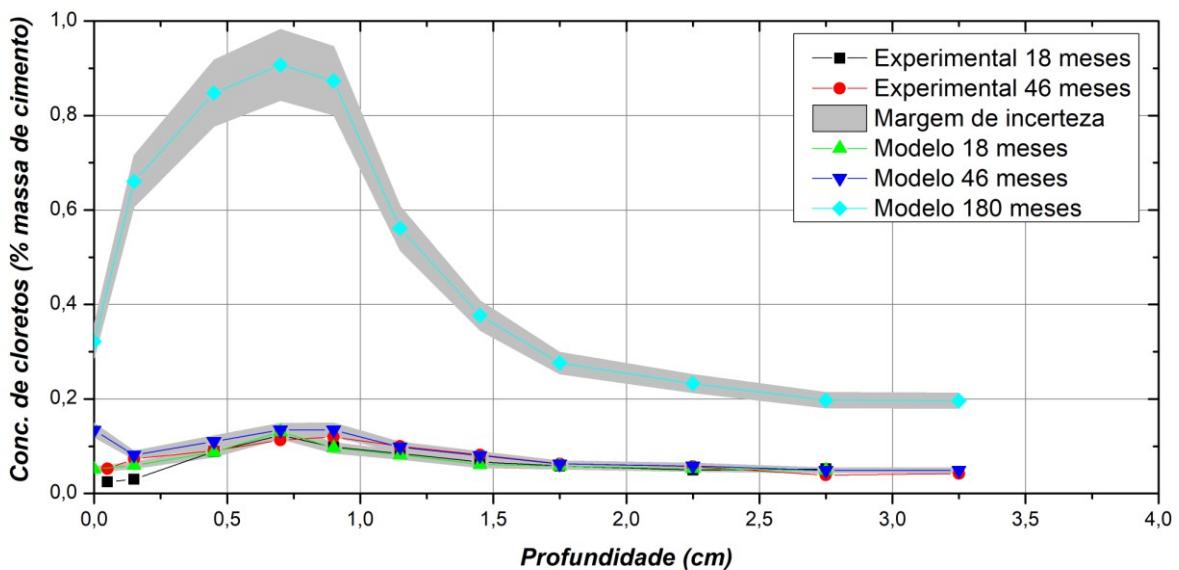


Figura 8.14 – Perfis de cloretos livres para 18, 46 e 180 meses de exposição a 500m de distância do mar.

Se comparado aos dados experimentais, os resultados mostram que o modelo matemático representou bem o comportamento do material sob a condição de exposição estudada, principalmente no interior do concreto onde as condições de contorno do problema são melhor definidas. Observa-se que, para cada tempo de exposição e distância do mar, os resultados experimentais ficaram dentro da margem de incerteza do modelo na maioria dos casos. Validando os resultados calculados.

De maneira geral, o aumento do tempo de exposição contribui para o crescimento das concentrações de cloretos para cada profundidade observada e distância do mar. Este padrão de comportamento, crescimento das concentrações de cloretos com o tempo de exposição, pode ser observado em muitos dos trabalhos dispostos na literatura (TAVARES, 2013; BASTIDAS-

ARTEAGA *et al.*, 2011; AKIYAMA *et al.*, 2009; VAL e TRAPPER, 2008; MARTIN-PEREZ e LOUNIS, 2003; entre outros). Como exemplificado na [Figura 8.15](#), onde o aumento do tempo de exposição, independente da estação do ano, contribui para o aumento das concentrações de cloretos no interior do concreto a cada profundidade analisada.

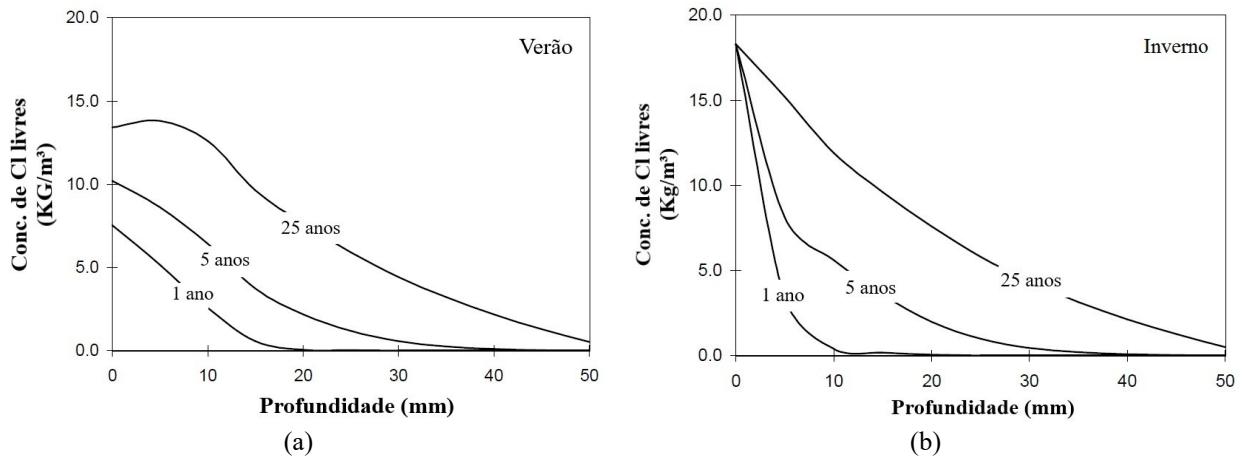


Figura 8.15 – Perfis de cloretos livres durante o verão (a) e inverno (b), em vários tempo de exposição ao ambiente agressivo. **Fonte:** Martin-Perez (1999).

Também, pode ser visto, nos perfis de cloretos obtidos com o modelo aqui proposto, o surgimento de um pico de concentração a poucos milímetros da superfície, que se torna mais profundo à medida que o tempo de exposição aumenta, demonstrando avanço da camada convectiva com o tempo de exposição. Este mesmo comportamento foi observado em perfis de cloretos livres coletados em vários estudos experimentais, sob reais condições de exposição e ensaios de laboratório (CAI *et al.*, 2020a).

Com o intuito de analisar a qualidade dos resultados calculados pelo modelo proposto, foi confeccionada a [Figura 8.16](#). Ela mostra o desempenho de previsibilidade do modelo frente aos resultados experimentais, obtidos matematicamente através da dispersão entre a concentração de cloretos totais calculado e o observado em situação real de exposição para as distâncias de 10, 100, 200 e 500m do mar, com 10 e 46 meses de exposição ao ambiente agressivo. Portanto, quanto mais próximo os pontos do gráfico (abcissa: experimental, ordenada: calculado) da linha de equidade, melhor a resposta da previsão do modelo em representar a fenomenologia estudada.

No geral, todos os resultados do modelo apresentado neste estudo foram capazes de prever o comportamento da concentração de cloretos totais com razoável precisão, conforme mostrado na [Figura 8.16](#). Isso é evidenciado pelo resultado do coeficiente de regressão (r^2), relativamente alto (variando entre 0,77 e 0,97) nas previsões feitas pelo modelo, e pelos limites de dispersão dos dados (20%), onde a maioria dos dados está dentro dos limites preestabelecidos, usados em outros trabalhos de análise comparativa de dados preditivos (CAI *et al.*, 2020b). O melhor

modelo observado foi a uma distância do mar de 200 m (Figura 8.16(c)) e o pior foi a uma distância do mar de 500 m (Figura 8.16(d)).

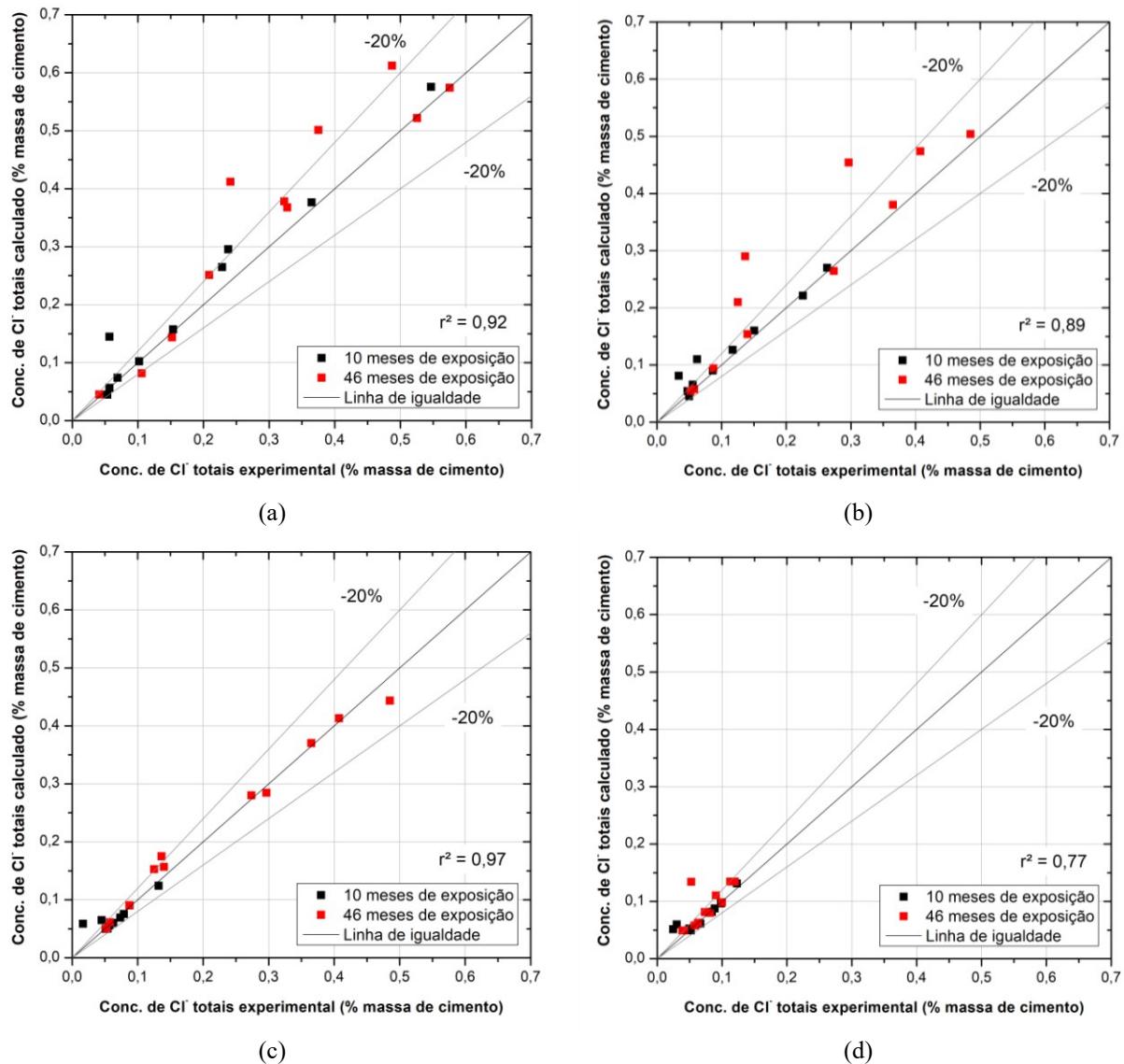


Figura 8.16 – Comparação entre os valores de concentração de cloreto totais calculado e experimental para as distâncias de 10 (a), 100 (b), 200 (c) e 500m (d) do mar.

8.3.3.2 Influência do efeito lavagem (EL)

Conforme discutido no item 2.3.2.3, o efeito lavagem tem forte influência nos resultados das concentrações de cloreto no interior do concreto, principalmente, na superfície onde atua diretamente. A principal causa deste fenômeno se deve a ação da chuva dirigida sobre a superfície do concreto (WATTANAPORNPROM e ISHIDA, 2017; SWATEKITITHAM, 2004). A seguir, serão apresentados os perfis de cloreto totais considerando e não considerando o efeito lavagem sobre a estrutura de concreto armado. Além da sua influência no tempo de iniciação a corrosão.

Como critérios para o cálculo, os resultados apresentados foram obtidos levando em consideração o efeito combinado de transporte de cloreto por difusão e convecção, a variação sazonal da deposição de cloreto na cidade de João Pessoa/PB, o efeito da radiação solar e a Isoterma de Langmuir, como curva de ajuste para a fixação de cloreto. O nível de significância dos cálculos foi de 0,05. Os dados de entrada estão apresentados nas Tabelas 8.1, 8.2, 8.3 e 8.4. Os resultados apresentados são para 15 anos de exposição a um ambiente situado a 100 m de distância do mar.

8.3.3.2.1 Perfil de cloreto totais

A Figura 8.17 mostra os perfis de cloreto totais considerando e não considerando a influência do efeito lavagem. Foram adicionadas ao gráfico as profundidades da zona convectiva (X_{conv}), para ambos os casos estudados.

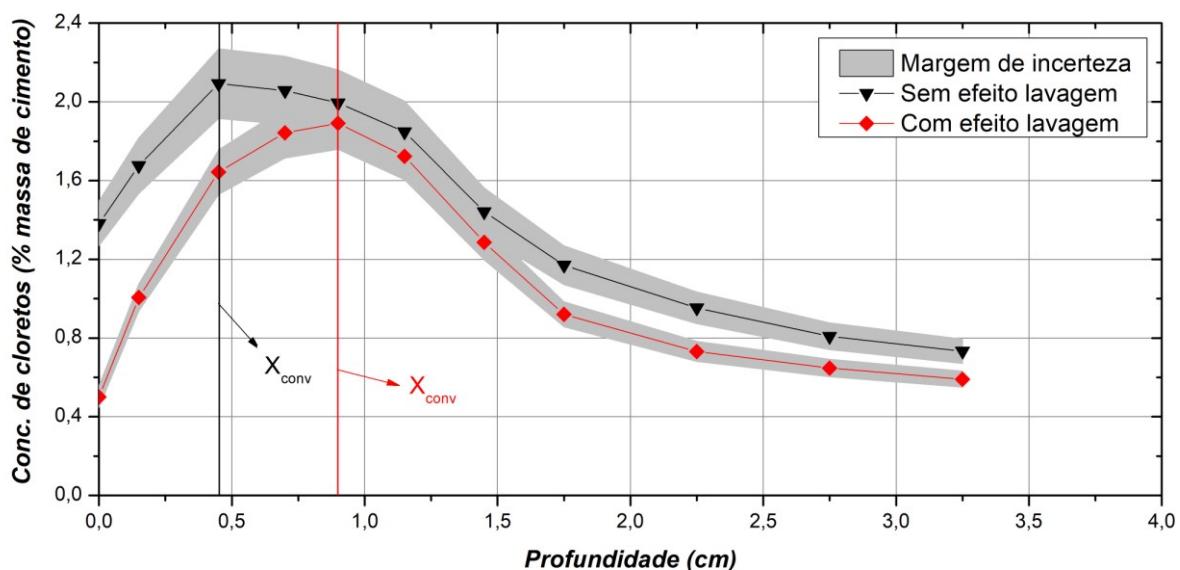


Figura 8.17 – Influência do efeito lavagem nos perfis de cloreto totais após 15 anos de exposição e a 100m de distância do mar.

Observamos que o efeito lavagem tem influência importante nos resultados apresentados a partir do modelo matemático proposto, de modo que sua consideração reduz consideravelmente as medições de concentração de cloreto totais a cada profundidade, principalmente na superfície do concreto. Como consequência, teremos um maior tempo para iniciar a corrosão e um melhor desempenho do material frente a estas condições. Este resultado se repetiu para as outras distâncias em relação ao mar (10, 200 e 500m).

Outro ponto a ser observado, é a profundidade da camada convectiva (linha vertical preta e vermelha da Figura 8.17), maior nos perfis onde se considera o efeito lavagem, com pico de concentração máxima de cloreto bem semelhante a perfil sem considerar o efeito lavagem.

O total de cloretos que penetrou 1m² de superfície de concreto, considerando e não considerando a ação da chuva lavando sua superfície está mostrado na [Figura 8.18](#). No modelo que representa o comportamento de concretos expostos em zona de atmosfera marinha semelhante às condições encontradas em João Pessoa/PB desconsiderando o efeito lavagem, observa-se uma pequena quantidade de íons cloretos penetrando a superfície nas primeiras idades, seguido de um crescimento acentuado nos demais anos. Comportamento este reflexo do modelo matemático que representa a concentração de cloretos no limite entre o ambiente e a superfície do concreto ([Equação 8.1](#)). Também, percebe-se que, a cada ano, há oscilações na quantidade de íons que penetra a superfície do concreto, decorrente da variação sazonal da deposição de cloretos.

O modelo considerando o efeito lavagem apresenta comportamento geral semelhante ao modelo sem efeito lavagem, porém com oscilações mais acentuadas em um curto espaço de tempo, função do regime pluviométrico da cidade. Em 50 anos de exposição, percebe-se uma redução de 56,1% na quantidade de íons cloretos que penetrou a superfície do concreto.

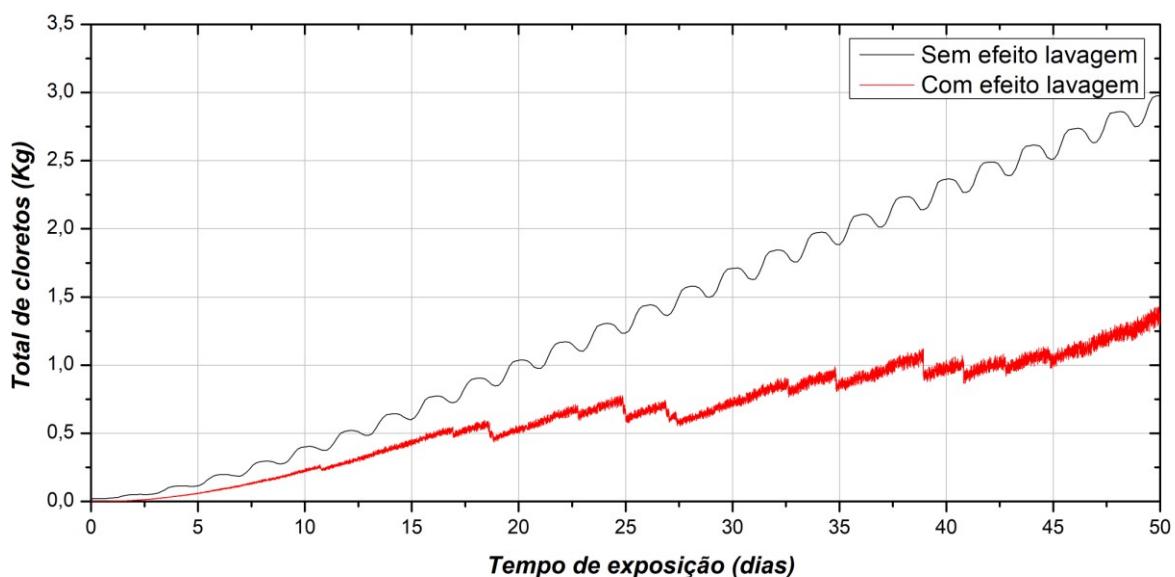
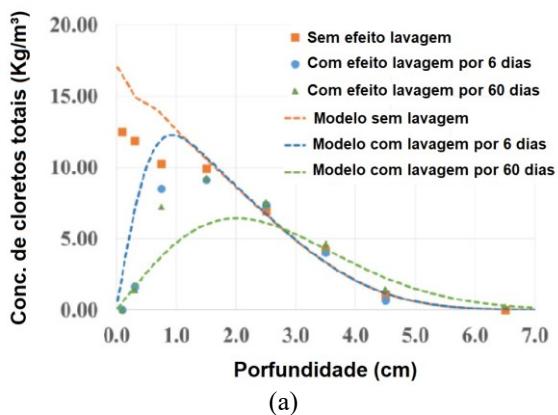
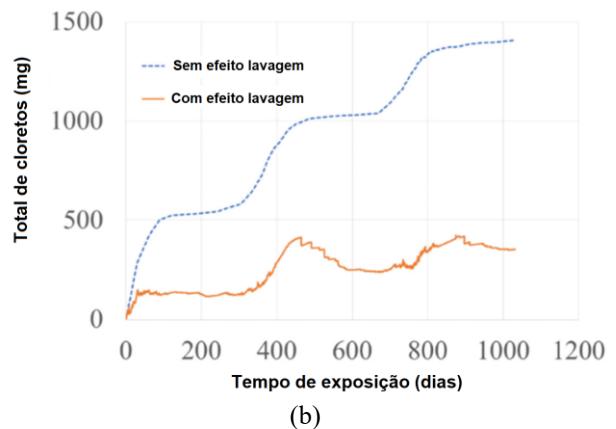


Figura 8.18 – Influência do efeito lavagem na quantidade de íons cloretos que penetrou uma área superficial de 1m² a 100m de distância do mar.

Devido às circunstâncias sazonais dos parâmetros climáticos, subentende-se que a maior penetração de cloretos no interior do concreto dar-se-ia em regiões mais quentes, com alta variação de UR externa e com baixo índice de pluviosidade, tendo em vista que o concreto apresenta menor efeito lavagem e maior difusividade com o aumento da temperatura e da umidade. Ao fim desta sessão, temos a [Figura 8.19](#). Ela mostra os resultados do trabalho de Wattanapornprom e Ishida (2017) para espécimes de argamassa ensaiados em laboratório (a) e dispostas a 150m de distância do Mar do Japão, levando ou não em consideração do efeito lavagem na superfície do concreto.



(a)



(b)

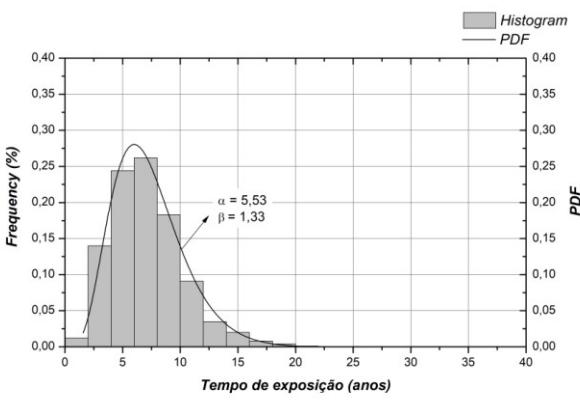
Figura 8.19 – Ação do efeito lavagem sobre perfis de cloreto totais (a) e total de íons cloreto (b).

Fonte: Wattanapornprom e Ishida (2017).

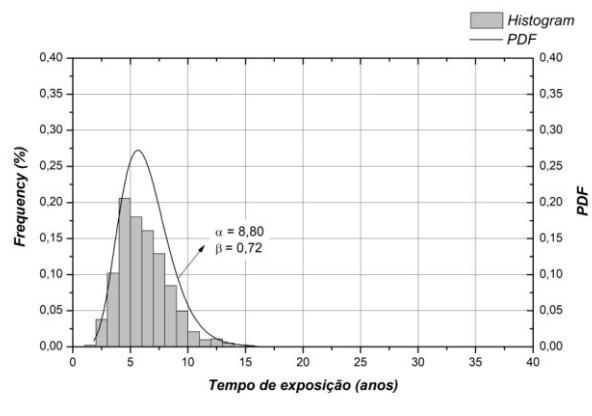
Comparando os resultados do modelo aqui apresentado com a literatura e ponderando-se as considerações dos modelos usados em cada trabalho, percebe-se certa semelhança no formato dos perfis de cloreto totais e a variação temporal da quantidade de íons que penetrou o concreto durante determinado tempo de exposição.

8.3.3.2.2 *Tempo de iniciação a corrosão*

Esta redução nas concentrações de cloreto, em virtude da lavagem da superfície, repercute no tempo de iniciação a corrosão. Diante disto, os resultados de tempo de iniciação da corrosão para os modelos com e sem o efeito lavagem foram ajustados a algumas distribuições de probabilidade contínuas (beta, exponencial, gamma, lognormal, normal e Weibull) através de teste de aderência por Kolmogorov-Smirnov (K-S), Anderson-Darling (A-D) e Qui-quadrado (χ^2). Estes testes verificam se os dados experimentais se ajustam bem ou não a certa distribuição de probabilidade. Para o cálculo dos ajustes foi utilizado o *software* MatLab R2013b. A [Figura 8.23](#) mostra graficamente os resultados após os testes de aderência ([Tabela 8.6](#)) para as distribuições de probabilidade analisadas, com intervalo de confiança de 95%.



(a)



(b)

Figura 8.20 – Histograma e FDP do tempo de iniciação da corrosão para espécimes com (a) e sem efeito lavagem (b), após Teste de Aderência.

Tabela 8.6 – Resultados dos ajustes ao tempo de iniciação da corrosão de concretos a curvas clássicas de distribuição de probabilidade, com e sem o efeito lavagem.

Distribuição de probabilidade	Variável analisada	A-K	A-D	χ^2	Aceitabilidade	Ranque
Beta	Com EL.	0,032935	0,775125	16,23	Aceitável	3
	Sem EL.	0,07459	13,526	23,717	Aceitável	2
Exponencial	Com EL.	0,162195	40,0225	101,56	Rejeitado	6
	Sem EL.	0,39257	21,131	1606,7	Rejeitado	6
Gamma	Com EL.	0,03291	0,771325	15,80375	Aceitável	1
	Sem EL.	0,07229	0,54923	31,09	Aceitável	1
Lognormal	Com EL.	0,047175	1,4843	17,73	Rejeitado	5
	Sem EL.	0,07463	5,9979	33,454	Rejeitado	3
Normal	Com EL.	0,046595	2,55925	10,24388	Rejeitado	4
	Sem EL.	0,10534	1,1868	32,184	Rejeitado	4
Weibull	Com EL.	0,038645	1,8407	9,54525	Aceitável	2
	Sem EL.	0,1102	1,4905	24,883	Rejeitado	5

Com os resultados apresentados na [Tabela 8.6](#), observa-se que a distribuição gamma se ajustou melhor aos dados de tempo de iniciação da corrosão para os cenários considerando e não considerando o efeito lavagem, com médias dos dados de 7,35 e 6,38 anos e desvios padrões de 3,12 e 2,15 anos, respectivamente. Já a [Figura 8.21](#) mostra a probabilidade do início de corrosão para os modelos com e sem efeito lavagem, considerando a função acumulada da densidade de probabilidade. Com base nos resultados é possível afirmar, com intervalo de 95% de confiança, que a corrosão iniciará até 13,3 anos de exposição ao ambiente agressivo, considerando o efeito lavagem. Sem considerar o efeito lavagem, tem-se algo próximo a 10,3 anos.

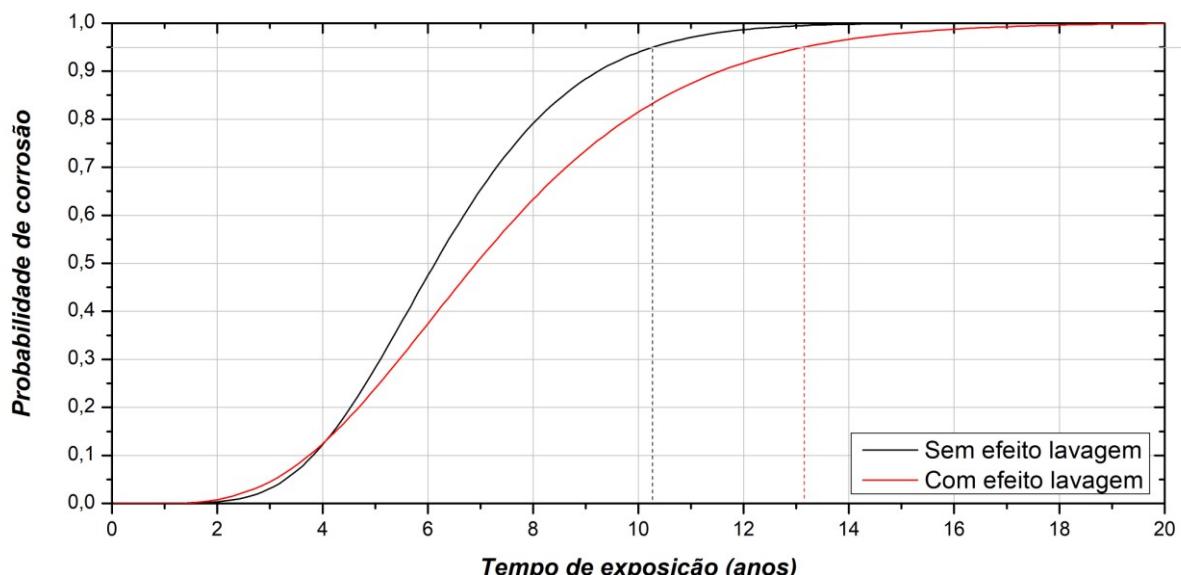


Figura 8.21 – Efeito da pluviometria na probabilidade de iniciação à corrosão para modelo com e sem ação do efeito lavagem a 100m de distância do mar.

Considerar o efeito lavagem aumenta em aproximadamente 13% o tempo de iniciação da corrosão, se comparado ao modelo sem considerar. Esse aumento no tempo para iniciação da corrosão se deve a indisponibilidade de íons cloretos na superfície, provocado pela lavagem

gerada pela chuva, consequentemente, menos cloretos estão disponíveis para transporte. Negligenciar tal efeito é minorar a capacidade do material em resistir à agressividade do ambiente, levando a maiores custos para a construção.

8.3.3.3 Influência da radiação solar

Com discutido no item 3.2.3.3, a radiação solar causa aumento na temperatura do ambiente em que a estrutura está inserida. O aumento da temperatura influencia diretamente na mobilidade dos íons dentro do concreto, repercutindo na concentração de cloretos livres (DOMINICINI e CALMON, 2017). A seguir, serão apresentados os perfis de cloretos totais considerando ou não o efeito da radiação solar. Como também sua influência no tempo de iniciação da corrosão.

Como critérios para o cálculo, os resultados apresentados foram obtidos levando em consideração o efeito combinado de transporte de cloretos por difusão e convecção, a variação sazonal da deposição de cloretos na cidade de João Pessoa/PB, o efeito lavagem e a Isoterma de Langmuir, como curva de ajuste para a fixação de cloretos. O nível de significância dos cálculos foi de 0,05. Os dados de entrada estão apresentados nas Tabelas 8.1, 8.2, 8.3 e 8.4. Os resultados apresentados são para 15 anos de exposição a um ambiente situado a 100 m de distância do mar.

8.3.3.1 Perfil de cloretos totais

A Figura 8.22 mostra a temperatura externa (T_{ext}) com e sem a consideração da radiação solar (T_{rs}) para a cidade de João Pessoa/PB. Os resultados mostram um incremento na temperatura durante todo o ano, da ordem de 4,05°C para o verão e 2,62°C no inverno, considerando a radiação solar.

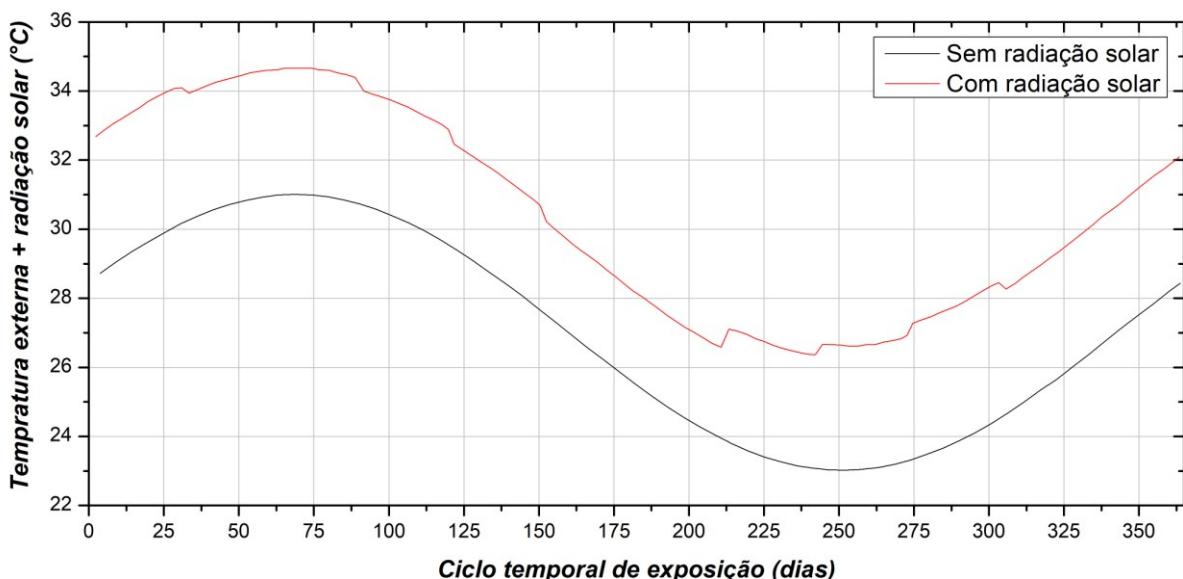


Figura 8.22 – Ciclo anual da temperatura externa e radiação solar para a cidade de João Pessoa/PB.

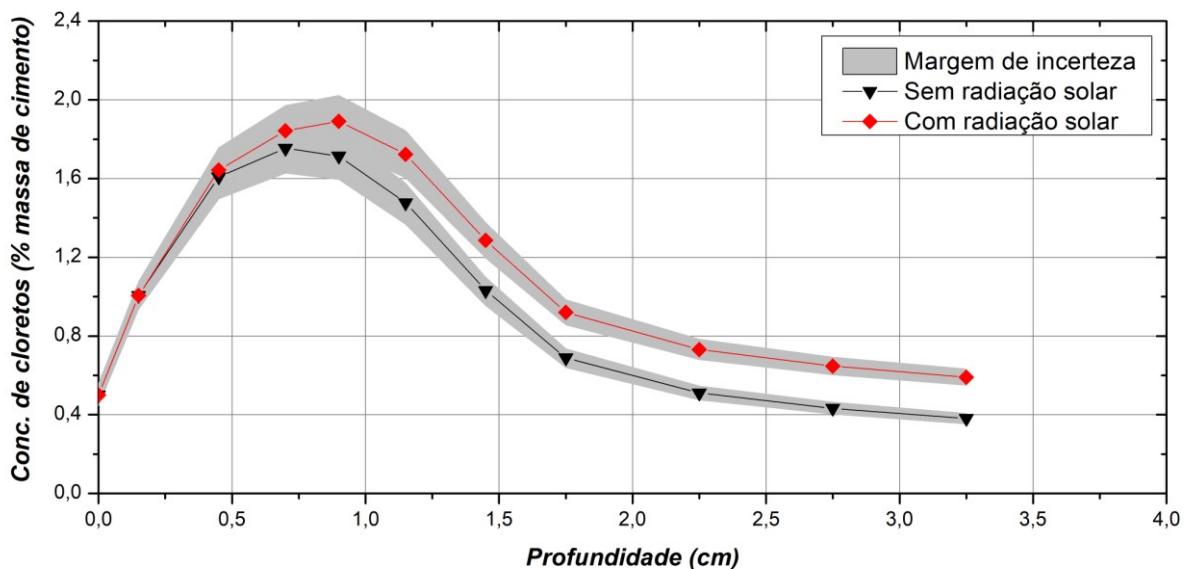


Figura 8.23 – Influência da radiação solar nos perfis de cloretos totais após 15 anos de exposição e a 100m de distância do mar.

A [Figura 8.23](#) mostra os perfis de cloretos totais com e sem radiação solar, após 15 anos de exposição e a 100 m de distância do mar. Os perfis foram calculados levando em consideração o efeito do transporte por difusão e convecção, a sazonalidade da deposição de cloretos e a Isoterma de Langmuir, como curva de representatividade da fixação de cloretos. O nível de significância dos cálculos é de 0,05.

Os resultados mostram um aumento crescente das concentrações de cloretos totais com a profundidade, a partir da camada superficial, quando comparados os perfis com e sem radiação solar. Este aumento foi da ordem de 29% nas proximidades da armadura. A motivação para tal comportamento se deve ao aumento da difusividade do concreto com o incremento da temperatura gerada pela radiação solar e da influência mais preponderante da difusão em relação à convecção nas camadas mais profundas. Resultados publicados por Dominicini e Calmon (2017) mostram esse mesmo comportamento, um aumento das concentrações de cloretos, quando considerado a radiação no modelo de transporte de cloretos.

8.3.3.3.2 *Tempo de iniciação a corrosão*

Este aumento das concentrações de cloretos livres gerado pela ação da radiação solar repercute fortemente no tempo de iniciação a corrosão, como mostrado na [Figura 8.24](#). Esta figura mostra que a radiação solar reduz em 16% o tempo para iniciar a corrosão, quando comparado ao modelo que não considera o efeito. Com a radiação solar, a armadura despassivará por volta de 13,3 anos de exposição. Por outro lado, sem considerar a radiação solar, a corrosão iniciar-se-á por volta de 15,8 anos de exposição, em 95% dos casos.

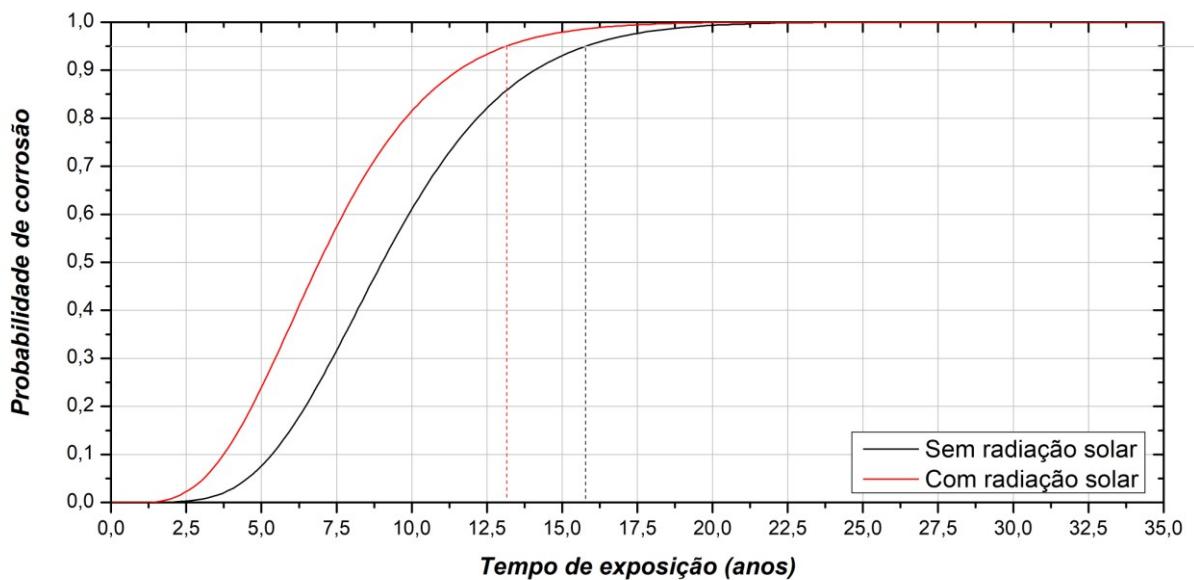


Figura 8.24 – Efeito da radiação solar na probabilidade de iniciação à corrosão para modelo com e sem ação do efeito da radiação solar a 100m de distância do mar.

Para cálculo da [Figura 8.24](#), foi necessário à determinação das distribuições de probabilidade que representasse cada modelo estudado. Esta determinação foi realizada de maneira semelhante ao apresentado no item [8.3.3.2.2](#). A [Tabela 8.7](#) mostra os resultados dos testes de aderência para as distribuições de probabilidade analisadas, com intervalo de confiança de 95%. Os Histogramas, Funções de Densidade de Probabilidade e parâmetros de forma da análise estatística estão apresentados na [Figura 8.25](#).

Partindo dos resultados mostrados na [Tabela 8.7](#), observa-se que a distribuição gamma se ajustou melhor aos dados de tempo de iniciação da corrosão para o cenário com e sem ação da radiação solar, com média de 7,35 e 9,46 anos e desvio padrão de 3,12 e 3,48 anos, respectivamente.

Tabela 8.7 – Resultados dos ajustes ao tempo de iniciação da corrosão de concretos a curvas clássicas de distribuição de probabilidade, com e sem o efeito radiação solar.

Distribuição de probabilidade	Variável analisada	A-K	A-D	χ^2	Aceitabilidade	Ranke
Beta	Com RS.	0,032935	0,775125	16,23	Aceitável	3
	Sem RS.	0,05673	0,99857	18,06	Aceitável	2
Exponencial	Com RS.	0,162195	40,0225	101,56	Rejeitado	6
	Sem RS.	0,36887	58,899	20,913	Rejeitado	6
Gamma	Com RS.	0,03291	0,771325	15,80375	Aceitável	1
	Sem RS.	0,0475	0,61474	20,913	Aceitável	1
Lognormal	Com RS.	0,047175	1,4843	17,73	Rejeitado	5
	Sem RS.	0,0507	0,47978	27,36	Aceitável	3
Normal	Com RS.	0,046595	2,55925	10,24388	Rejeitado	4
	Sem RS.	0,10392	4,4866	36,774	Rejeitado	5
Weibull	Com RS.	0,038645	1,8407	9,54525	Aceitável	2
	Sem RS.	0,0893	5,0325	29,724	Rejeitado	4

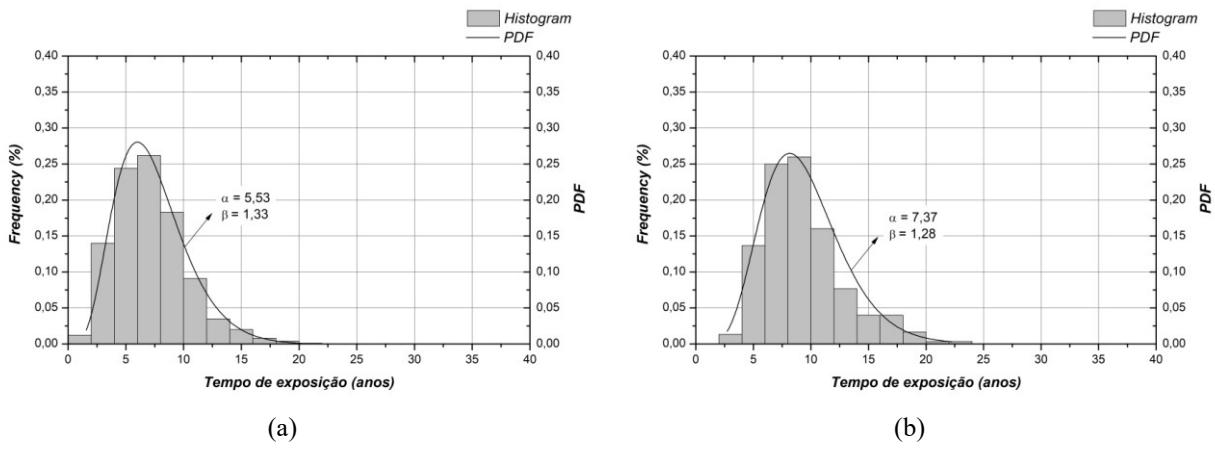


Figura 8.25 – Histograma e FDP do tempo de iniciação da corrosão para espécimes com (a) e sem efeito da radiação solar (b), após Teste de Aderência.

8.3.4 Concentração superficial de cloretos

Como reportado anteriormente, a concentração superficial de cloretos (C_s) é função direta das condições do contorno do problema, que por sua vez é influenciada pela sazonalidade da deposição média de cloretos, do tempo de exposição, da pluviometria, do consumo de cimento e do fator água/cimento. Após ajuste dos dados experimentais de C_s em zona de atmosfera marinha, reportados no trabalho de Meira *et al.* (2020), a [Equação 8.1](#) foi ajustada aos dados e projetada a longo prazo. Os resultados do ajuste estão apresentados na figura abaixo. Os ajustes tiveram boa correlação com os dados experimentais ($r^2 = 0,8905$), demonstrando a forte relação entre C_s e as variáveis usadas neste estudo para determinar sua influência.

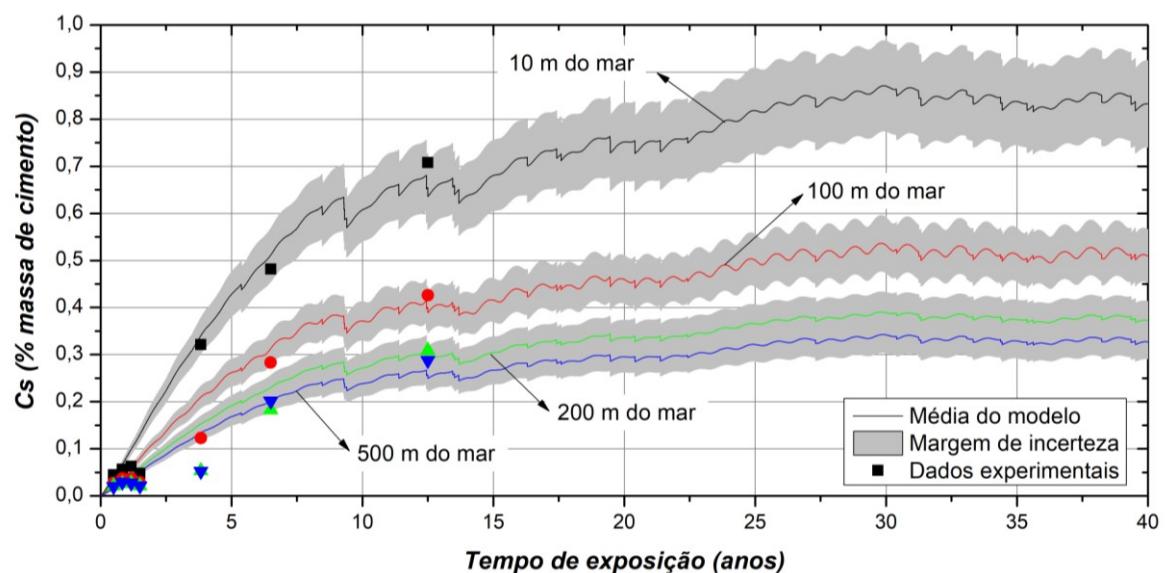


Figura 8.26 – Comportamento da concentração superficial de cloretos (C_s) ao longo do tempo.

Podemos observar, em relação ao tempo de exposição, um leve crescimento nas primeiras idades (0-2 anos), seguido de um forte crescimento (entre 2-10 anos) até sua tendência de estabilização (a partir de 20 anos). Durante todo o tempo, observamos oscilações nos valores de C_s calculados

pelo modelo em função da sazonalidade da deposição de cloretos e do efeito lavagem ocasionados pela variação anual de regime dos ventos e pela chuva dirigida na superfície do concreto, respectivamente. À medida que a estrutura de concreto se afasta do mar, as concentrações superficiais caem consideravelmente.

Outro ponto a ser destacado é a grande margem de incerteza (região hachurada em cinza) relacionado ao processo de previsibilidade da C_s , onde a interação entre várias variáveis estocásticas colabora para grande dispersão dos resultados. Uma boa previsibilidade desta variável é de fundamental importância para a previsão do tempo de iniciação da corrosão.

Comparando os resultados aqui obtidos com dados apresentados na literatura, observa-se um comportamento semelhante. A [Figura 8.27](#) mostra mesmo comportamento da C_s no tempo, após simulação de condição real de exposição de ponte construída a 150m do Mar do Japão. De modo análogo aos resultados do modelo deste trabalho e outros modelos já publicados, observa-se que C_s aumenta rapidamente durante a fase inicial e diminui com o aumento do tempo de exposição, estabilizando após certo período de tempo e oscilações sazonais decorrentes das características ambientais, principalmente pluviometria (chuva dirigida na superfície) e deposição de cloretos.

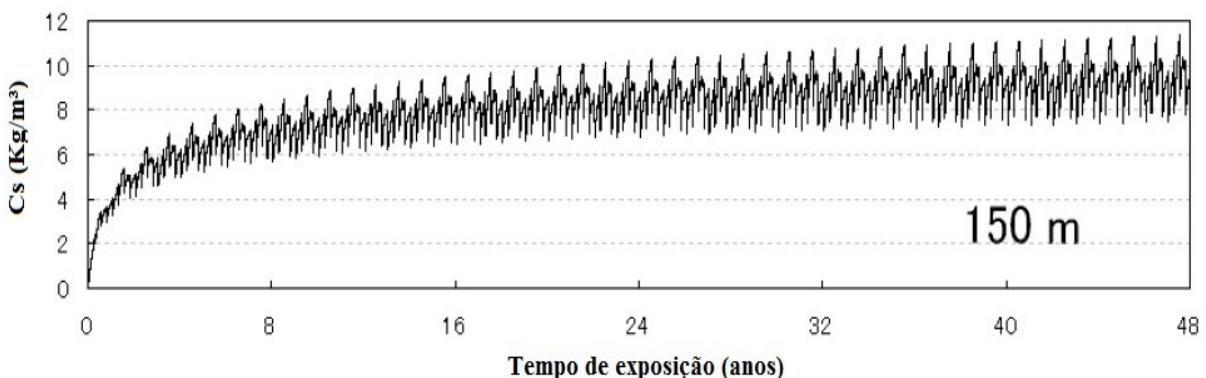


Figura 8.27 – Simulação da concentração superficial de cloretos (C_s) para uma ponte localizada a 150m do Mar do Japão. **Fonte:** Swatekititham *et al.* (2007).

A qualidade dos resultados calculados pelo modelo foi verificada por análise de confiabilidade, conforme realizado no item [8.3.3.1](#). A [Figura 8.28](#) mostra coordenadas no Plano Cartesiano, onde a abscissa (eixo X) são os dados experimentais de concentração superficial de cloretos e a ordenada (eixo Y) são os dados calculados pelo modelo de C_s no exato momento de cada aferição dos dados experimentais e nas distâncias de 10, 100, 200 e 500 m do mar.

No geral, todos os resultados do modelo apresentados neste estudo foram capazes de prever o comportamento da concentração superficial de cloretos com boa precisão. Isso é evidenciado pelo resultado de coeficiente de regressão (r^2) e pelos limites de dispersão dos dados (20%), onde a maioria dos dados está dentro dos limites preestabelecidos, usados em outros trabalhos de análise comparativa de dados preditivos (CAI *et al.*, 2020b).

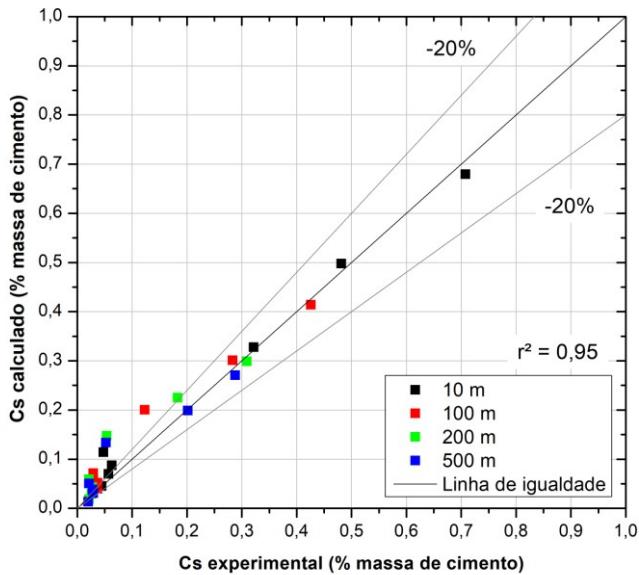


Figura 8.28 – Comparação entre os valores de conc. superficial de cloretos calculado e experimental.

8.4 INFLUÊNCIA DA COMBINAÇÃO DE CLORETOES NO TRANSPORTE DE MASSA

Segundo Nivelle (1995), os cloretos podem ser encontrados no interior do concreto sobre três formas distintas: ligados quimicamente, ligados fisicamente ou dissolvidos na solução do poro do concreto (cloretos livres). Apenas os cloretos livres, presentes em certa quantidade no entorno da armadura, são responsáveis por iniciar a corrosão (ANGST *et al.*, 2009; BERTOLINI *et al.*, 2004).

Partindo dessa premissa e sabendo que a consideração do efeito da fixação de cloretos na matriz tem importância significativa nos modelos preditivos de vida útil, analisar-se-á sua importância através de três diferentes cenários: primeiro, negligenciando o efeito; segundo, considerando que a isoterma de equilíbrio segue o ajuste proposto por Langmuir ($\alpha_L = 0,1185$ e $\beta_L = 0,090$); e, terceiro, considerando que a isoterma de equilíbrio segue o ajuste proposto por Freundlich ($\alpha_F = 0,256$ e $\beta_F = 0,397$). Nos cálculos foram consideradas a variação sazonal dos parâmetros climáticos e a ação conjunta de transporte de massa por difusão e convecção. Os resultados apresentados nesta sessão são do modelo com distância do mar de 100m, para as demais distâncias do mar (10, 200 e 500m) os resultados são análogos aos aqui apresentados.

8.4.1 Perfil de cloretos livres

A [Figura 8.29](#) mostra os perfis de cloretos livres para o modelo em estudo, negligenciando e considerando a combinação de cloretos com ajuste para as Isotermas de Langmuir e Freundlich.

Os dados apresentados representam as concentrações de cloretos livres, após 15 anos de exposição ao ambiente agressivo.

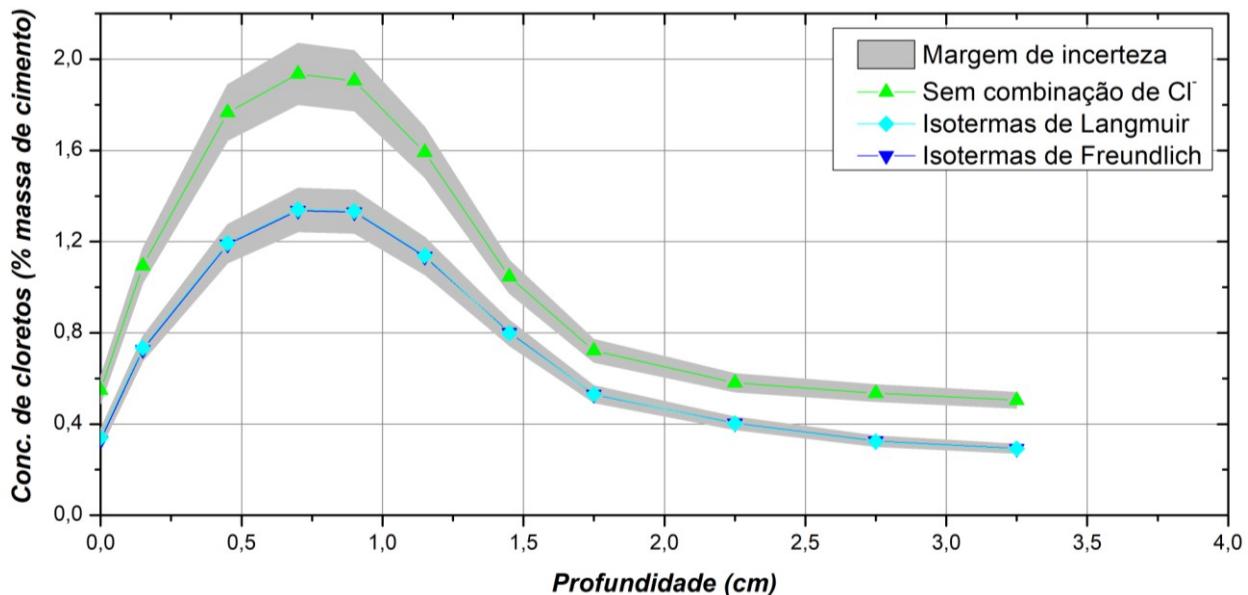


Figura 8.29 – Influência do efeito da combinação nos perfis de cloretos livres após 15 anos de exposição e a 100m de distância do mar.

Como esperado, a concentração de cloretos livres para o primeiro caso (sem combinação) é maior do que para os demais casos (Langmuir e Freundlich). A diferença entre as concentrações de cloretos livres, com e sem combinação, foi da ordem de 35% no entorno da profundidade da armadura. Este comportamento foi observado para as outras distâncias do mar aqui analisadas e por outros autores em modelos de ingresso de cloretos (BASTIDAS-ARTEAGA *et al.*, 2011; LIN *et al.*, 2010; MARTIN-PEREZ, 1999), como pode ser visto no exemplo apresentado na [Figura 8.30](#).

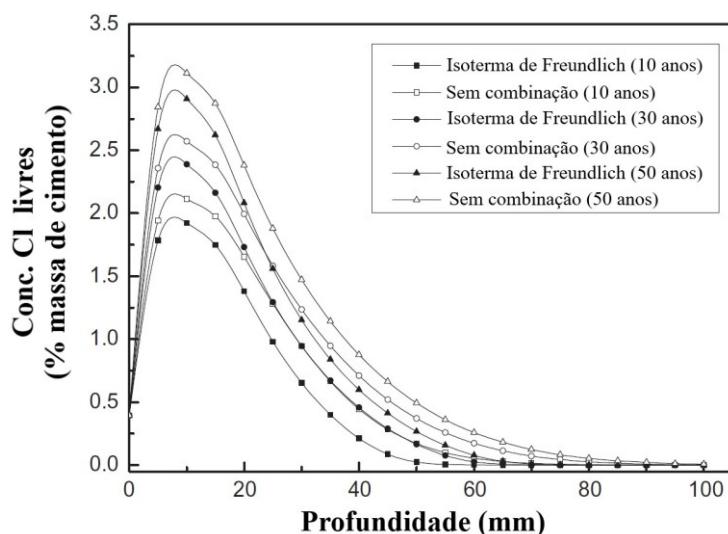


Figura 8.30 – Perfis de cloretos livres sem e com combinação (Isotermas de Freundlich) para 10, 30 e 50 anos de exposição (difusão + convecção, $D_{c,ref} = 2e^{-12} m/s$). **Fonte:** Lin *et al.* (2010).

Entre as duas isotermas de combinação (Langmuir e Freundlich), praticamente não houve diferença entre os perfis de cloretos livres, já que as constantes usadas neste trabalho foram determinadas para um concreto com características idênticas. Vale salientar que o aumento da temperatura reduz a capacidade de fixação (DOUSTI e SHEKARCHI, 2015). Porém, este modelo não leva em consideração o efeito da temperatura na fixação de cloretos.

8.4.2 Tempo de iniciação da corrosão

Após a concentração de cloretos livres no entorno da armadura atingir certa quantidade, a armadura passa a apresentar um estado ativo de corrosão (CASCUDO, 1997). Quando esta concentração é atingida, o software registra esse tempo, dando a ele o nome de tempo de iniciação da corrosão.

Os resultados de tempo de iniciação da corrosão para os modelos com e sem combinação de cloretos foram ajustados a algumas distribuições de probabilidade contínuas (beta, exponencial, gamma, lognormal, normal e Weibull) através de teste de aderência por Kolmogorov-Smirnov (K-S), Anderson-Darling (A-D) e Qui-quadrado (χ^2). Estes testes verificam se os dados experimentais se ajustam bem ou não a certa distribuição de probabilidade. Para o cálculo dos ajustes foi utilizado o software MatLab R2013b. A [Tabela 8.8](#) mostra os resultados dos testes de aderência para as distribuições de probabilidade analisadas, com intervalo de confiança de 95%.

Tabela 8.8 – Resultados dos ajustes ao tempo de iniciação da corrosão de concretos com e sem combinação de cloretos a curvas clássicas de distribuição de probabilidade.

Distribuição de probabilidade	Variável analisada	A-K	A-D	χ^2	Aceitabilidade	Ranke
Beta	Sem comb.	0,03845	1,4693	16,18125	Aceitável	2
	Langmuir	0,032935	0,775125	16,23	Aceitável	3
	Freundlich	0,02588	0,671925	5,343625	Aceitável	1
Exponencial	Sem comb.	0,185105	47,0625	176,475	Rejeitado	6
	Langmuir	0,162195	40,0225	101,56	Rejeitado	6
	Freundlich	0,15555	35,7325	101,2788	Rejeitado	6
Gamma	Sem comb.	0,034645	1,43645	10,67063	Aceitável	1
	Langmuir	0,03291	0,771325	15,80375	Aceitável	1
	Freundlich	0,03202	0,9296	9,42025	Aceitável	3
Lognormal	Sem comb.	0,045655	1,771225	8647,375	Aceitável	3
	Langmuir	0,047175	1,4843	17,73	Rejeitado	5
	Freundlich	0,047745	2,75425	15,29	Rejeitado	5
Normal	Sem comb.	0,0463	2,9745	39,30375	Rejeitado	4
	Langmuir	0,046595	2,55925	10,24388	Rejeitado	4
	Freundlich	0,03991	1,881875	5,479125	Aceitável	4
Weibull	Sem comb.	0,05036	3,41675	48,02875	Rejeitado	5
	Langmuir	0,038645	1,8407	9,54525	Aceitável	2
	Freundlich	0,02628	0,844025	4,88675	Aceitável	2

Com os resultados apresentados na [Tabela 8.8](#), observa-se que a distribuição gama se ajustou melhor aos dados de tempo de iniciação da corrosão para o cenário sem considerar a combinação e com a Isoterma de Langmuir, com médias de 6,05 e 7,35 anos e desvios padrões de 2,32 e 3,12 anos, respectivamente. Já para a Isoterma de Freundlich o melhor ajuste foi a distribuição beta, com média de 7,42 e desvio-padrão de 3,38 anos. Os Histogramas, Funções de Densidade de Probabilidade e parâmetros de forma estão apresentados na [Figura 8.31](#).

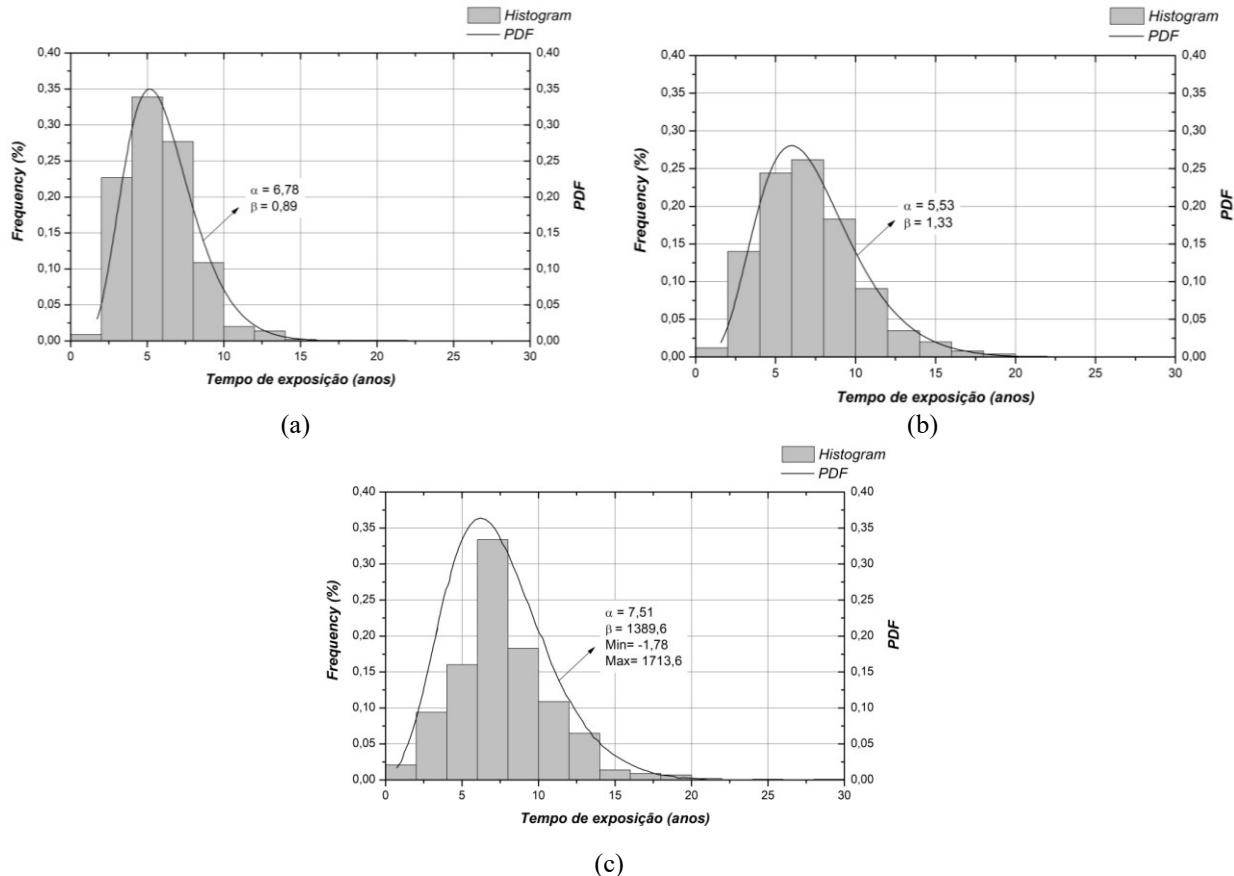


Figura 8.31 – Histograma e FDP do tempo de iniciação da corrosão para espécimes sem combinação de cloretos (a) com Isoterma de Langmuir (b) e Isoterma de Freundlich (c), após Teste de Aderência.

A [Figura 8.32](#) mostra a probabilidade do início de corrosão para os diferentes cenários de combinação de cloretos, considerando a função acumulada da densidade de probabilidade. Com base neste gráfico é possível dizer com intervalo de 95% de confiança, que a corrosão iniciará até 10,3 anos sem considerar a combinação de cloretos, considerando a Isoterma de Langmuir a corrosão terá início até 13,3 anos, já para a Isoterma de Freundlich teremos algo entre 13,6 anos.

Os resultados indicam que negligenciar o efeito da ligação de cloreto reduz o tempo de iniciação da corrosão em comparação com o ato de considerar o efeito de fixação de cloretos, subestimando o real desempenho da estrutura frente ao ambiente. Considerar a combinação de cloretos aumenta em aproximadamente 23% o tempo de iniciação da corrosão para ambas as isotermas. Tal comportamento parece plausível, já que ignorar a combinação resulta no ingresso

de todos os cloreto envolvidos no fluxo de massa (combinados e livres). Portanto, a iniciação da corrosão ocorre mais cedo. Um dimensionamento da estrutura negligenciando a combinação de cloreto pode resultar em mais gasto de material (consumo de cimento, cobrimento, etc.).

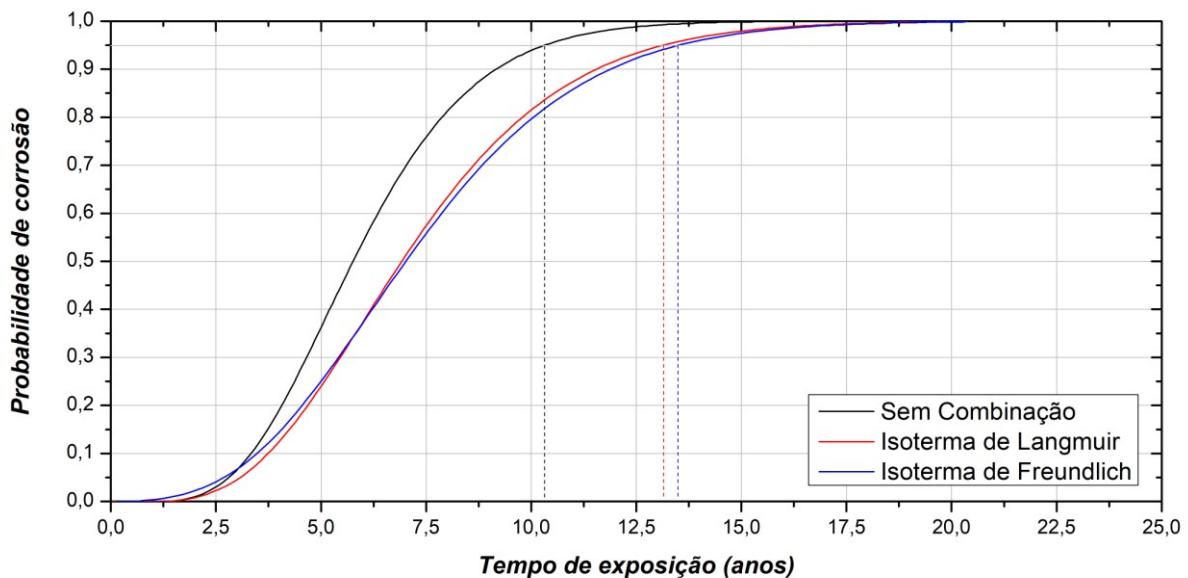


Figura 8.32 – Efeito da combinação de cloreto na probabilidade de iniciação à corrosão para modelo com e sem combinação a 100m de distância do mar.

Com base em dados da literatura, a melhoria da capacidade de ligação do cloreto com o concreto pode-se dar através do uso de cimentos com maiores teores de aluminatos, prolongando significativamente a vida útil das estruturas de concreto neste aspecto (BERTOLINI *et al.*, 2004).

Ao se comparar os resultados para as Isotermas de Langmuir e Freundlich, observa-se que não há diferença significativa entre os modelos. Outros autores observaram este mesmo comportamento (BASTIDAS-ARTEAGA *et al.*, 2011; VAL e TRAPPER, 2008). Ressalta-se que a diferença entre estas isotermas apenas acontece em concentrações de cloreto muito baixas, onde a formulação matemática da isoterma de Freundlich facilita o transporte (VAL e TRAPPER, 2008).

8.5 INFLUÊNCIA DO MECANISMO DE TRANSPORTE NO INGRESSO DE CLORETO

Os modelos de difusão são ferramentas válidas para estimar perfis de cloreto em concretos sob condições saturadas (BERTOLINI *et al.*, 2004; CRANK, 1975). No entanto, quando o concreto é submetido principalmente a ambientes com variação de umidade, o transporte de íons cloreto devido ao fluxo de água que penetra o concreto não pode ser ignorado (LIN *et al.*, 2010).

Sendo assim, analisa-se a influência do efeito convectivo sobre o transporte de cloretos através da comparação entre os resultados obtidos considerando apenas a difusão (saturado) e a ação conjunta da convecção e da difusão (não saturado). Para o cálculo, foi usada a Isoterma de Langmuir como função de ajuste para previsão da fixação de cloretos, uma estrutura localizada a 100m do mar e um nível de confiança de 95%. Para a difusão, os modelos preveem que o concreto está sempre saturado, ou seja, a umidade do poro é constante e igual a 100% durante todo o tempo. Para o modelo “difusão + convecção”, empregou-se à variação climática sazonal e seu impacto na umidade interna do concreto.

8.5.1 Perfil de cloretos totais

Os resultados dispostos na [Figura 8.33](#) mostram os perfis de cloretos totais após 15 anos de exposição ao ambiente agressivo a 100 m de distância do mar. Pode-se observar, para uma mesma profundidade, que concretos em zonas não saturadas, onde atua em conjunto a ação da difusão e da convecção, tendem a apresentar concentrações de cloretos maiores que em zonas saturadas, onde atua apenas a difusão. Tais resultados corroboram com outros resultados publicados em ensaios de laboratório ou modelos matemáticos de previsão de vida útil (LIN *et al.*, 2010; MEIJERS *et al.*, 2005; MARTIN-PEREZ, 1999).

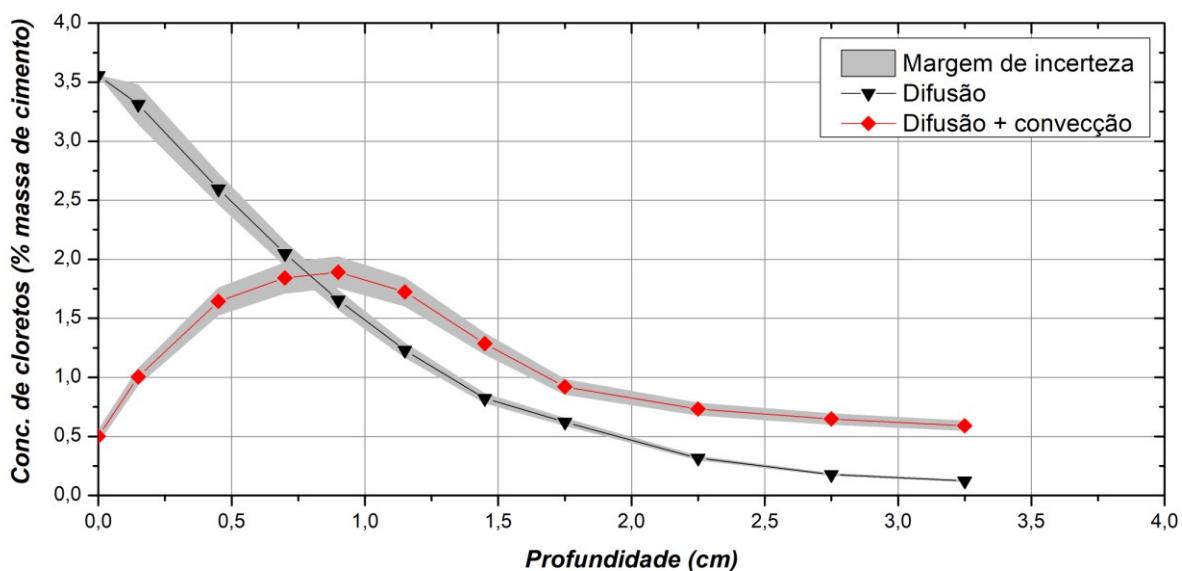


Figura 8.33 – Influência do mecanismo de transporte nos perfis de cloretos totais após 15 anos de exposição e 100m de distância do mar.

Logo, negligenciar o efeito da convecção na entrada de cloretos no concreto não saturado superestima a vida útil das estruturas de concreto. Este ponto pode ser essencial para o projeto de durabilidade e avaliação de estruturas de concreto armado em zonas de agressividade marinha. Segundo Bastidas-Arteaga *et al.* (2011), o efeito convectivo no ingresso de íons cloretos é mais relevante quando a estrutura é submetido a ciclos de secagem e molhagem, onde o efeito

convectivo se torna mais preponderante. Tais condições, sobre determinadas circunstâncias, aceleram consideravelmente a penetração de íons cloretos no interior das estruturas, como pode ser visto na [Figura 8.34](#).

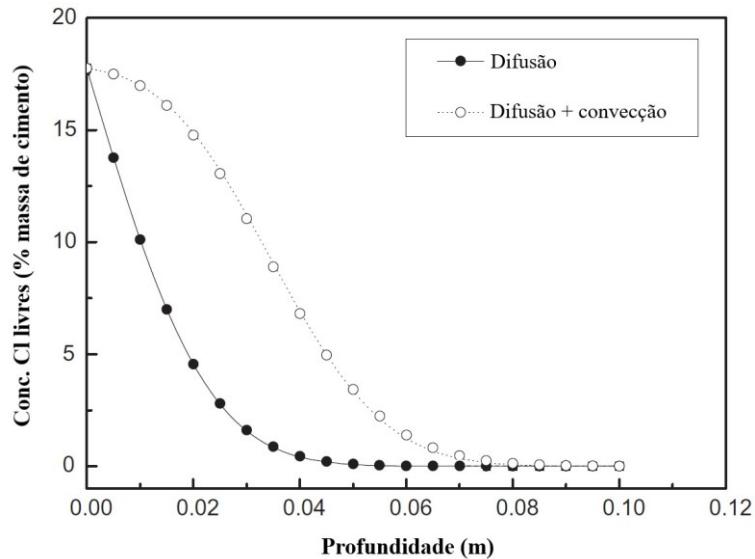


Figura 8.34 – Influência da convecção nos perfis de cloretos livres com ciclos de secagem e molhagem.
Fonte: Adapatado de Lin *et al.* (2010).

Observa-se na [Figura 8.34](#), a diferença de concentração de cloretos entre concretos saturados e não saturados, principalmente nas primeiras camadas, onde a influência do fluxo de umidade é maior, devido aos ciclos de molhagem e secagem.

8.5.2 Tempo de iniciação da corrosão

A consequência do efeito combinado de transporte por difusão e convecção no tempo para iniciação à corrosão pode ser visto na [Figura 8.35](#). Ela mostra os Histogramas, as Funções de Densidade de Probabilidade e parâmetros de forma, após Teste de Aderência para as distribuições de probabilidade analisadas com intervalo de confiança de 95% ([Tabela 8.9](#)).

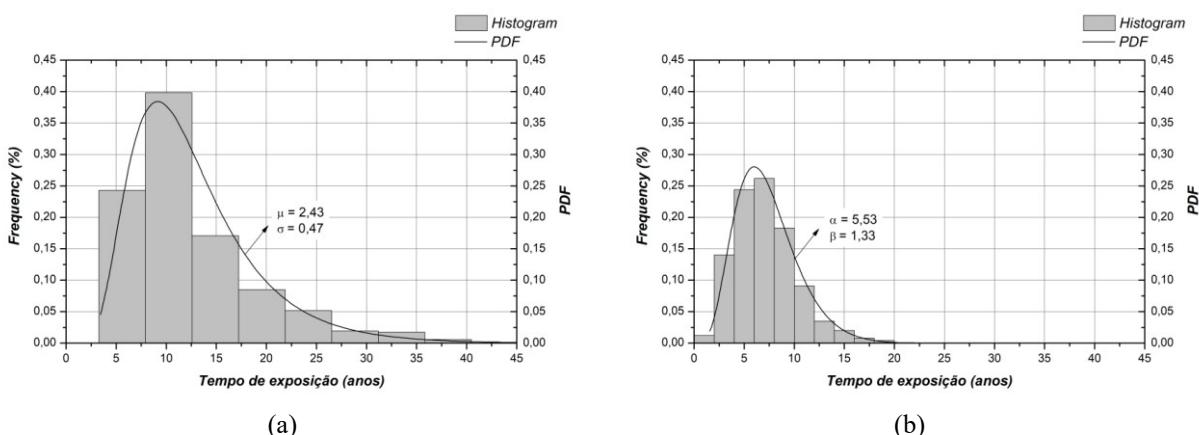


Figura 8.35 – Histograma e FDP do tempo de iniciação da corrosão para espécimes de concreto armado saturados (difusão) (a) e não saturados (difusão + convecção) (b), após Teste de Aderência.

Tabela 8.9 – Resultados dos ajustes ao tempo de iniciação da corrosão de concretos saturado (difusão) e não saturado (difusão + convecção) a curvas clássicas de distribuição de probabilidade.

Distribuição de probabilidade	Variável analisada	A-K	A-D	χ^2	Aceitabilidade	Ranke
Beta	Dif.	0,0331	1,23625	5,58	Aceitável	2
	Dif. + conv.	0,032935	0,775125	16,23	Aceitável	3
Exponencial	Dif.	0,156005	34,055	96,39	Rejeitado	6
	Dif. + conv.	0,162195	40,0225	101,56	Rejeitado	6
Gamma	Dif.	0,0452	4,25775	20,55	Rejeitado	3
	Dif. + conv.	0,03291	0,771325	15,80375	Aceitável	1
Lognormal	Dif.	0,03174	1,1173	6,0545	Aceitável	1
	Dif. + conv.	0,047175	1,4843	17,73	Rejeitado	5
Normal	Dif.	0,07885	11,10575	39,32625	Rejeitado	5
	Dif. + conv.	0,046595	2,55925	10,24388	Rejeitado	4
Weibull	Dif.	0,06615	8,40775	19,85375	Rejeitado 1	4
	Dif. + conv.	0,038645	1,8407	9,54525	Aceitável	2

Com base nos resultados apresentados na [Tabela 8.9](#), observa-se que a distribuição gamma se ajustou melhor aos dados de tempo de iniciação da corrosão para o cenário não saturado, com média dos dados de 7,35 anos e desvios padrões de 3,12 anos. Para concretos saturados o melhor ajuste foi à distribuição lognormal, com média dos dados de 12,9 e desvio-padrão de 7,1 anos. Percebe-se que o ingresso de cloreto por convecção diminui o tempo para início da corrosão, motivado pela inclusão de um segundo mecanismo de transporte de íons cloretos, que apresenta maior velocidade de transporte. Tal inclusão repercute num maior ingresso de cloretos que, por consequência, aumenta a concentração de tais íons ao redor da armadura e reduz o tempo de iniciação da corrosão.

Concluindo esta sessão, apresenta-se a [Figura 8.36](#), que mostra a variação acumulada da probabilidade de se iniciar a corrosão ao longo do tempo para estrutura de concreto armado em condição saturada e não saturada, considerando a função acumulada da densidade de probabilidade e intervalo de confiança de 95%.

Diante dos resultados, pode-se afirmar que a corrosão acontecerá em até 13,3 anos para concretos com mecanismo de transporte associado de difusão e convecção (não saturados). Para concretos apenas com transporte por difusão (saturados) a corrosão acontecerá em até 24,9 anos. Com essas informações, o profissional da área poderia, por exemplo, readequar a dosagem do concreto e/ou o cobrimento das armaduras para definir melhor relação entre a durabilidade e o custo de execução.

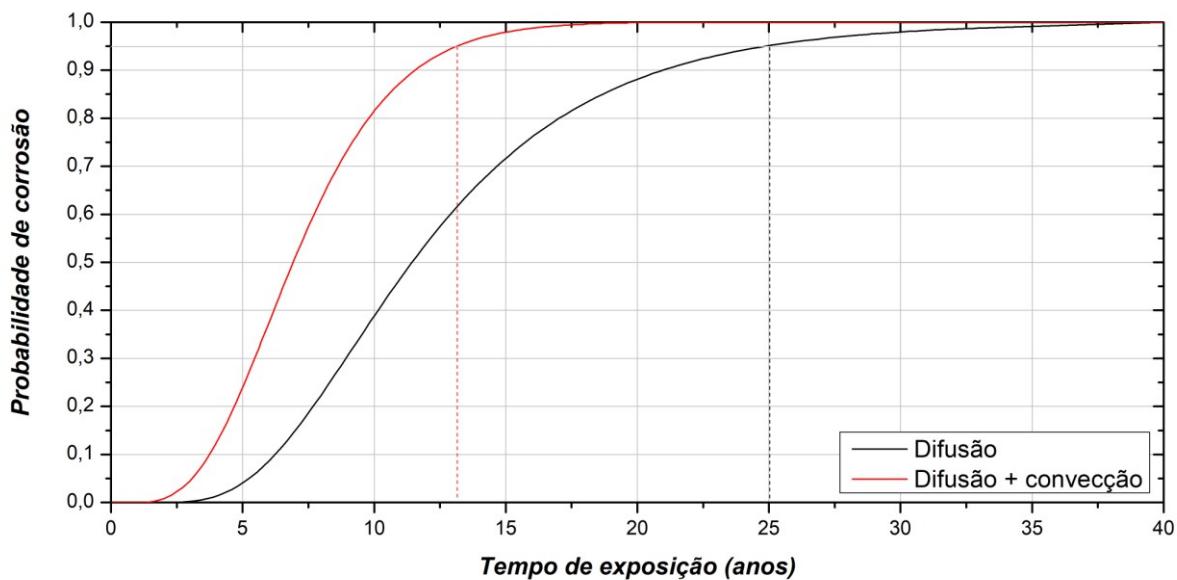


Figura 8.36 – Efeito do mecanismo de transporte de cloreto na probabilidade de iniciação à corrosão para modelo que representam concretos saturados e não saturados.

8.6 PROBABILIDADE DE CORROSÃO PARA CONCRETOS EM ZONA DE ATMOSFERA MARINHA

A estimativa do tempo de iniciação da corrosão em estruturas de concreto armado é função de diversos parâmetros, estando eles relacionados à combinação de fatores físico-químicos associados tanto ao concreto, como ao ambiente de exposição (VAL e TRAPPER, 2008). Além de fatores relacionados ao projeto e às condições de cálculo. Essa gama de variáveis confere ao processo de corrosão uma natureza estocástica de difícil determinação e solucionável através de modelos numéricos probabilísticos (BASTIDAS-ARTEAGA *et al.*, 2011).

Nesta sessão, apresentam-se os resultados de probabilidade de início da corrosão para estrutura de concreto armado inserida na zona atmosfera marinha pessoense (João Pessoa/PB), que podem ser extrapolados para climas tropicais semelhantes. Para tal, estuda-se a probabilidade de falha (inicio da corrosão) no concreto já definidos no item 8.1.2 (modelo padrão) e um modelo generalista, que possibilitam, ao leitor, ter uma noção de como um dado concreto pode se comportar sob determinado grau de agressividade do ambiente e auxiliará os profissionais da engenharia na confecção de seus projetos. Um comparativo com outros modelos publicados na literatura também é apresentado.

8.6.1 Modelo específico

Os modelos apresentados e discutidos nesta sessão refletem o cenário apresentado no item 8.1, tanto para os modelos em 1D (lajes), quanto para os modelos em 2D (viga). O concreto dos

elementos estruturais (laje e vigas) terão características idênticas aos descritos no item 8.1.2. A título de exemplo, apresentam-se os resultados do modelo para o tempo de iniciação da corrosão simulados em 1D. Eles foram ajustados a algumas curvas de distribuições de probabilidade contínuas (beta, exponencial, gamma, lognormal, normal e Weibull) através de teste de aderência por Kolmogorov-Smirnov (K-S), Anderson-Darling (A-D) e Qui-quadrado (χ^2).

A Tabela 8.10 mostra os resultados dos testes de aderência para as distribuições de probabilidade analisadas, com intervalo de confiança de 95%. Os resultados em 2D são semelhantes aos apresentados aqui, portanto foram suprimidos.

Tabela 8.10 – Resultados dos ajustes ao tempo de iniciação da corrosão de concretos em zona de atmosfera marinha a curvas clássicas de distribuição de probabilidade.

Distribuição de probabilidade	Variável analisada	A-K	A-D	χ^2	Aceitabilidade	Ranke
Beta	10m	0,032195	1,15765	16,16375	Aceitável	1
	100m	0,032935	0,775125	16,23	Aceitável	3
	200m	0,025425	0,543375	7,51575	Aceitável	2
	500m	0,02734	0,45905	4,40225	Aceitável	3
Exponencial	10m	0,165455	36,4475	88,8175	Rejeitado	6
	100m	0,162195	40,0225	101,56	Rejeitado	6
	200m	0,19023	52,0725	163,6	Rejeitado	6
	500m	0,21827	68,15	280,4625	Rejeitado	6
Gamma	10m	0,034265	1,16795	14,46625	Aceitável	2
	100m	0,03291	0,771325	15,80375	Aceitável	1
	200m	0,02439	0,5434	8,68	Aceitável	1
	500m	0,026815	0,456375	4,517625	Aceitável	2
Lognormal	10m	0,05043	1,89835	7,96225	Aceitável	3
	100m	0,047175	1,4843	17,73	Rejeitado	5
	200m	0,035325	0,902475	4,803625	Aceitável	3
	500m	0,034535	0,680875	6,13025	Aceitável	4
Normal	10m	0,05291	3,2935	33,53625	Rejeitado	5
	100m	0,046595	2,55925	10,24388	Rejeitado	4
	200m	0,040015	1,76365	11,93513	Aceitável	5
	500m	0,02573	0,8887	8,49975	Aceitável	1
Weibull	10m	0,04109	2,13385	26,7125	Aceitável	4
	100m	0,038645	1,8407	9,54525	Aceitável	2
	200m	0,03898	2,71225	14,175	Aceitável	4
	500m	0,03611	2,120725	12,42638	Aceitável	5

Com os resultados apresentados na Tabela 8.10, observa-se que a distribuição gama se ajustou melhor aos dados de tempo de iniciação da corrosão para as distâncias do mar de 100 e 200m, com médias dos resultados de 7,35 e 10,97 anos e desvios padrões de 3,12 e 3,73 anos, respectivamente. Para a distância de 10m, a distribuição beta melhor se ajustou, com média dos resultados de 5,13 e desvio-padrão de 2,31 anos. Para 500m, o melhor ajuste foi com a distribuição normal, com média dos resultados de 19,30 e desvio-padrão de 4,59 anos. Os Histogramas, Funções de Densidade de Probabilidade e parâmetros de forma são apresentados na Figura 8.37.

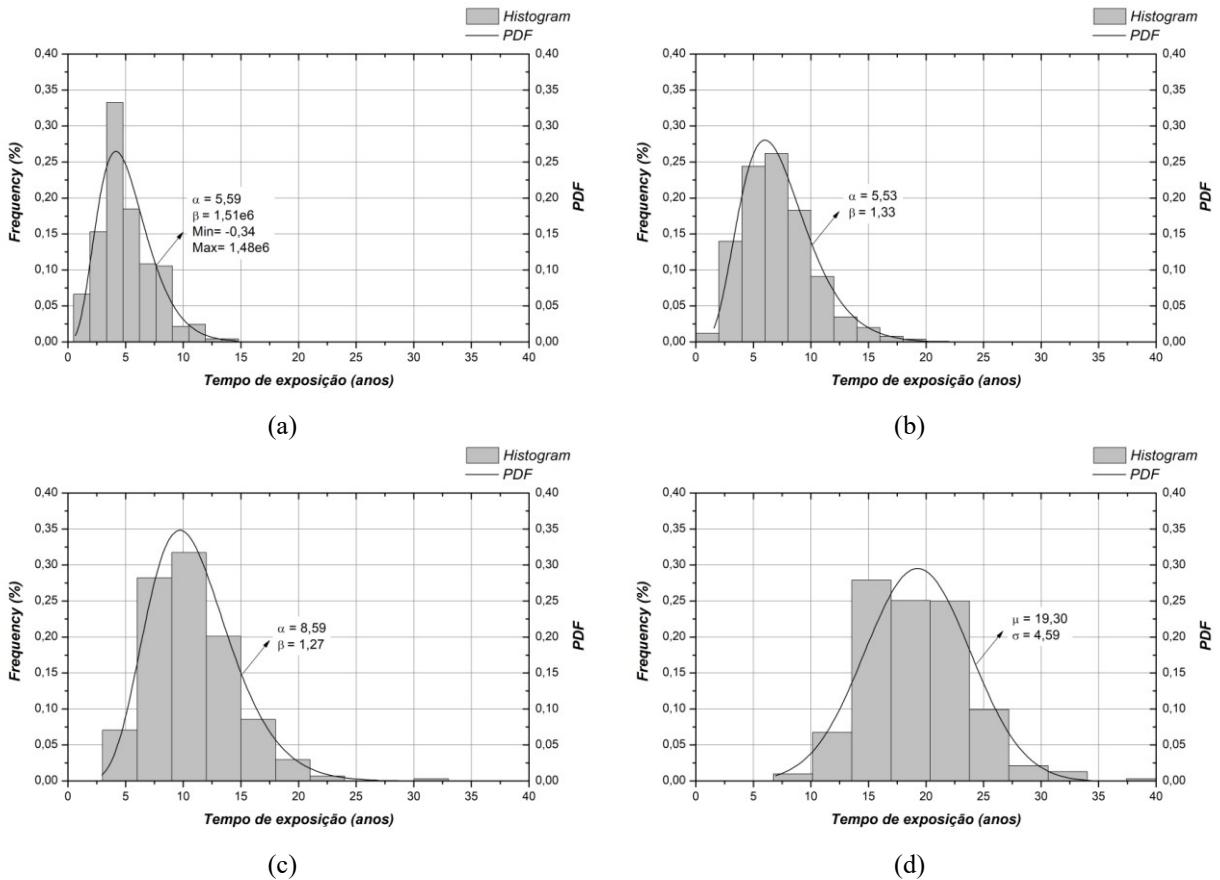


Figura 8.37 – Histograma e FDP do tempo de iniciação da corrosão para lajes a 10m (a), 100m (b), 200m (c) e 500m (d), após Teste de Aderência.

As Figuras 8.38 e 8.39, a seguir, mostram a probabilidade do início de corrosão para lajes (1D) e vigas (2D) submetidas a zona de atmosfera marinha na cidade de João Pessoa/PB em diferentes distâncias do mar (10, 100, 200 e 500m). No cálculo das probabilidades foi considerada a Função acumulada da densidade de probabilidade que melhor se ajustou aos dados.

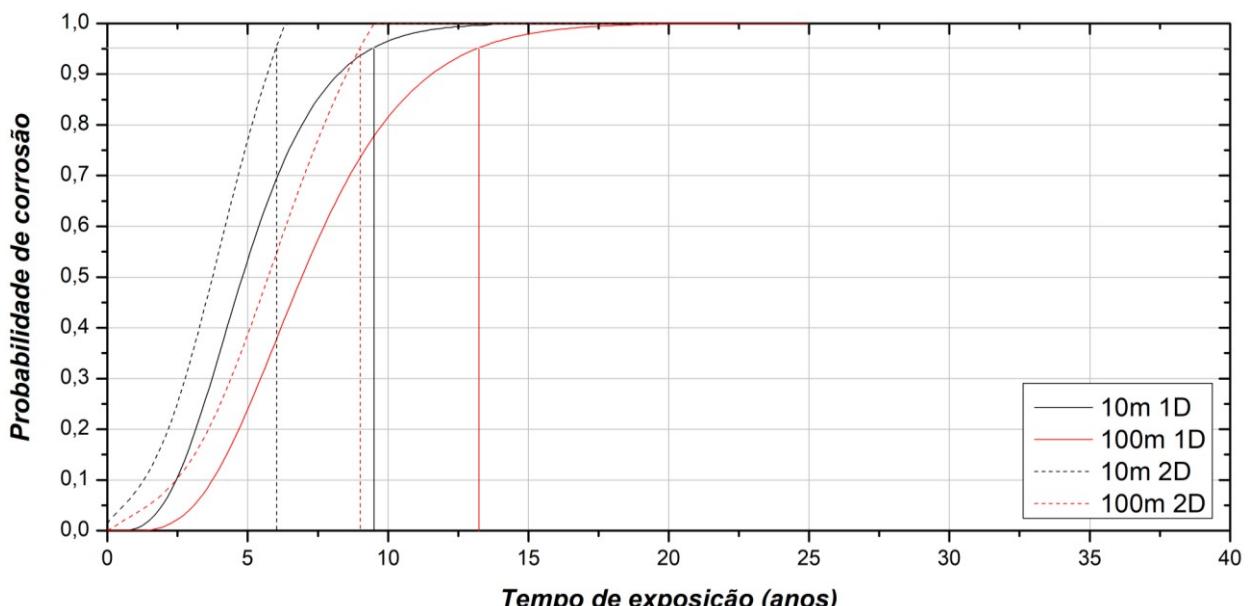


Figura 8.38 – Probabilidade de iniciação da corrosão calculado para laje (1D) e viga (2D) em concreto armado submetida a atmosfera marinha na cidade de João Pessoa/PB a 10 e 100m de distância do mar.

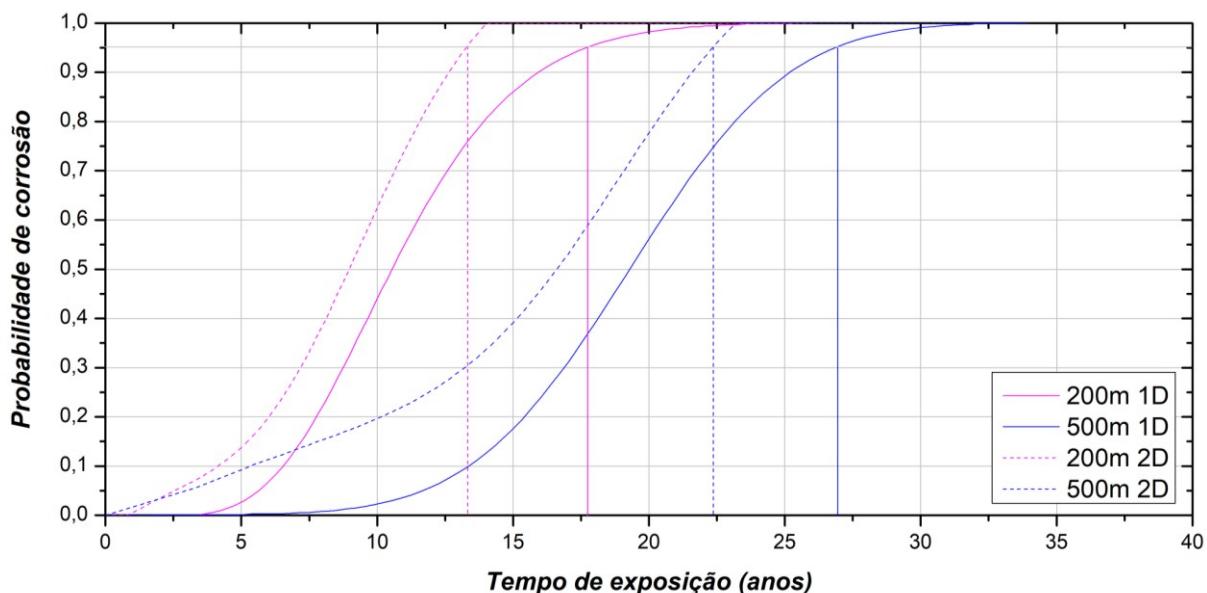


Figura 8.39 – Probabilidade de iniciação da corrosão calculado para laje (1D) e viga (2D) em concreto armado submetida a atmosfera marinha na cidade de João Pessoa/PB a 200 e 500m de distância do mar.

Com base nestes gráficos é possível dizer, com 95% de confiança, que a corrosão iniciará nas lajes em até 9,5, 13,14, 17,91 e 26,96 anos para estruturas de concretos dispostas a 10, 100, 200 e 500m de distância do mar, respectivamente. Para vigas a estas mesmas distâncias, a despassivação ocorrerá a 6,01, 8,93, 13,18 e 22,49 anos, respectivamente.

Como esperado, as probabilidades de iniciação à corrosão, para mesmas idades, são mais altas quando se considera o transporte em 2D. A redução do tempo de iniciação da corrosão deve-se à exposição aos cloreto em ambos os lados do elemento estrutural. Por exemplo, no ato da despassivação das vigas, a probabilidade de início de corrosão aumenta em 37, 32, 26 e 17% quando se considera o transporte em 2D, para 10, 100, 200 e 500m do mar, respectivamente. Esses resultados reforçam a importância de incluir uma análise bidimensional na previsão correta do tempo de iniciação da corrosão em estruturas de concreto armado, tais como vigas e pilares.

Modelos probabilísticos de vida útil observaram este mesmo comportamento, redução no tempo de iniciação da corrosão em estruturas de concreto armado sob ação de íons cloreto, quando analisado o transporte em uma e duas dimensões (BASTIDAS-ARTEAGA *et al.*, 2011; VAL e TRAPPER, 2008).

8.6.2 Comparativo entre modelos

Os resultados apresentados na sessão anterior são comparados com outros modelos publicados na literatura, tanto modelos em meio saturado, como em meio não-saturado. Para tal, os dados de temperatura (Tabela 8.1), umidade relativa (Tabela 8.1), concentração superficial de cloreto de João Pessoa/PB (Figura 8.26 - 100 m de distância do mar) e combinação de cloreto (Isoterma de

Langmuir com parâmetros de $\alpha_L = 0,1185$ e $\beta_L = 0,09$) foram empregados no cálculo, quando necessário. Os modelos utilizados na comparação foram:

- i. **Solução analítica da Segunda Lei de Fick:** modelo de difusão em uma dimensão, baseado na [Equação 3.5](#), onde o coeficiente de difusão de cloretos é considerado constante no tempo e não influenciável pelos fatores climáticos. Nos cálculos, considerou-se o coeficiente de difusão de cloretos como a média do coeficiente de difusão do modelo proposto. Para mais detalhes consultar a referência Crank (1975);
- ii. **Life-365:** modelo norte-americano baseado no transporte por difusão em uma dimensão, com resolução por método numérico, onde o coeficiente de difusão de cloretos é considerado variável no tempo ([Equação 3.19](#)) e influenciável pela temperatura ([Equação 3.16](#)). Este modelo os parâmetros de *aging factor* não pode ser arbitrado e o coeficiente de difusão de cloretos de referência é função da relação água/cimento em concretos sem adição. Para mais detalhes consultar a referência Life-365 (2020);
- iii. **CEB-FIP Bulletin nº 34:** Modelo probabilístico europeu, baseado no transporte por difusão em uma dimensão ([Equação 3.5](#)), onde o coeficiente de difusão de cloretos é considerado variável no tempo ([Equação 3.19](#)) e influenciável pela temperatura ([Equação 3.16](#)). Para mais detalhes consultar a referência CEB-FIP Bulletin nº 34(2006);
- iv. **Bastidas-Arteaga *et al.* (2011):** Modelo probabilístico francês, baseado na solução numérica da [Equação 3.10](#), onde o transporte por difusão e convecção é levado em consideração em uma e duas dimensões. O coeficiente de difusão de cloretos e umidade é função do tempo ([Equação 3.19](#)), da temperatura ([Equação 3.16](#)) e da umidade relativa do poro ([Equação 3.20](#)). Para mais detalhes consultar a referida referência;
- v. **Modelo proposto neste trabalho:** Modelos probabilístico semelhante ao apresentado por Bastidas-Arteaga *et al.* (2011), com a incorporação do efeito provocado pela radiação solar, pela ação higrotérmica da temperatura no transporte de umidade e pela diferenciação do coeficiente de difusão de umidade na secagem e na umectação. O efeito lavagem foi considerado no cálculo da concentração superficial de cloretos e aplicado a todos os modelos de modo a torná-los comparáveis sobre as mesmas condições de exposição.

Após os cálculos de transporte de cloretos, umidade e temperatura em uma dimensão, observou-se que os tempos para iniciação da corrosão foram em média de $13,15 \pm 5,16$, $10,08 \pm 3,70$, $9,72 \pm 4,28$, $7,79 \pm 2,41$ e $7,35 \pm 3,12$ anos, para os modelos baseado na 2º Lei de Fick, Life-365, CEB-FIP Bulletin nº 34, Bastidas-Arteaga *et al.* (2011) e o modelo proposto neste trabalho,

respectivamente. Demonstrando que há uma redução no tempo médio de iniciação da corrosão à medida que o modelo os modelos vão se tornando mais complexos e considerando o caráter estocástico do processo de corrosão.

Após tratamento estatístico dos dados e ajuste das distribuições de probabilidade mais usadas, conforme realizado no item 8.3.3.2.2, foi confeccionada a [Figura 8.40](#). Ela mostra a probabilidade de início da corrosão por cloretos (probabilidade de falha) para os modelos acima citados. Com o objetivo de facilitar a leitura do gráfico, as margens de incerteza foram suprimidas de todos os modelos. Linhas verticais foram adicionadas ao gráfico para cada modelo, representando o exato momento em que a corrosão se inicia num determinado nível de confiança. O intervalo de confiança do estudo foi de 95%.

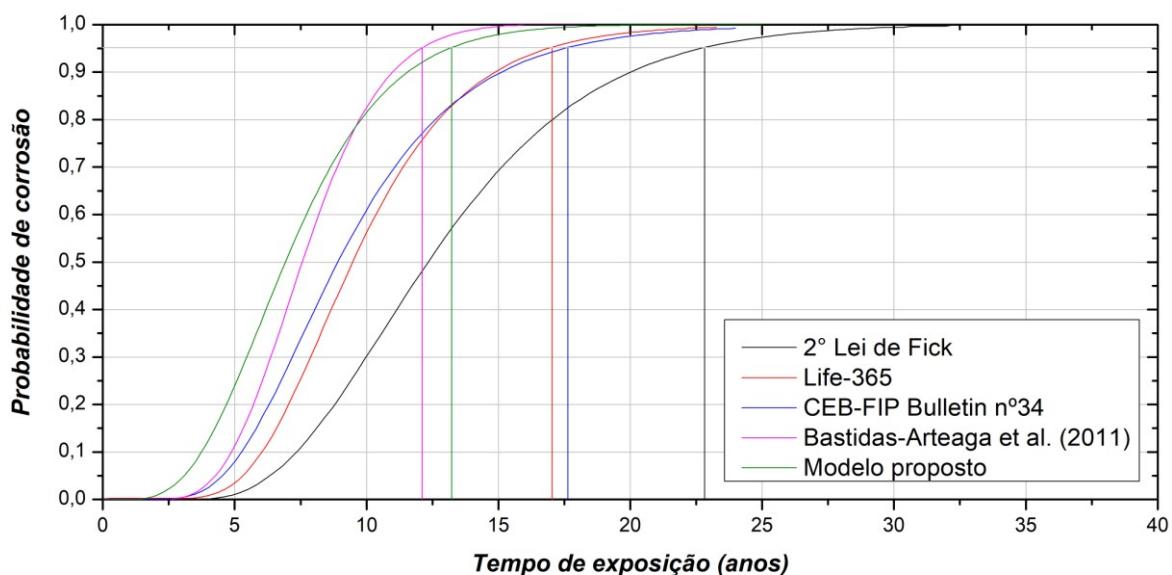


Figura 8.40 – Probabilidade de início da corrosão para vários modelos já publicados na literatura em comparação com o modelo proposto (100m de distância do mar).

Os resultados do gráfico mostram que a corrosão acontecerá em até 22,60, 17,11, 17,35, 12,17, 13,3 anos, para os modelos baseado na 2º Lei de Fick, Life-365, CEB-FIP Bulletin n° 34, Bastidas-Arteaga *et al.* (2011) e o modelo proposto, respectivamente, em 95% dos casos analisados. Comparando os modelos com transporte de cloretos por “difusão” (2º Lei de Fick, Life-365 e CEB-FIP Bulletin n° 34) e com “difusão + convecção” (Bastidas-Arteaga *et al.* (2011) e o modelo proposto), observa-se que o tempo de iniciação a corrosão diminui consideravelmente, quando adicionado o mecanismo de transporte por convecção. A influência do tipo de mecanismo de transporte de cloretos sobre o tempo de iniciação a corrosão foi discutida com mais detalhes no item 8.5.2.

Este mesmo comportamento de redução acentuado no tempo de iniciação da corrosão é observado também, quando se considera ação da temperatura e da hidratação do cimento no

coeficiente de difusão de cloretos, para os modelos com o mesmo fenômeno de transporte associado. Isso demonstra a influencia da temperatura, principalmente, em curto prazo, e da hidratação do cimento (*aging factor*), principalmente, em longo prazo, sobre o coeficiente de difusão de cloretos.

Comparando os modelos com certa semelhança (mecanismo de transporte e ação climática sobre o coeficiente de difusão), percebe-se que os resultados de tempo de iniciação da corrosão foram bem próximos para o grupo I (Life-365 e CEB-FIP Bulletin n° 34) e grupo II (modelo proposto e de Bastidas-Arteaga *et al.* (2011)). No grupo I, observamos essa pequena diferença no tempo de iniciação da corrosão, em virtude das características peculiares de cada modelo, onde a determinação do *aging factor* e do coeficiente de difusão em função do fator a/c do modelo Life-365 pode ter refletido nos resultados. Tendo em vista que no modelo da CEB-FIP Bulletin n° 34 pode ser arbitrado pelo usuário do modelo e determinado com mais precisão através de ensaios de laboratório.

No grupo II, observa-se que a probabilidade de corrosão é maior para o modelo proposto por este trabalho em relação ao modelo de Bastidas-Arteaga *et al.* (2011), até aproximadamente 10 anos de exposição (80% de probabilidade de falha). A partir deste ponto, a probabilidade de corrosão do modelo de Bastidas-Arteaga *et al.* (2011) é superior. Este comportamento é explicado pela diferenciação do coeficiente de difusão de umidade na secagem e na molhagem, onde o transporte de umidade impulsiona o transporte de cloretos, principalmente nas primeiras idades. Este comportamento pode ou não ter sido acentuado pelo efeito da radiação solar, que aumenta a difusividade de cloretos e umidade em virtude do aumento da temperatura interna. Entretanto, este efeito pode influenciar na evaporação da água interna do concreto.

Diante disto, faz-se necessário observar a evolução das concentrações de cloretos livres em razão do tempo de exposição. Sendo assim, a [Figura 8.41](#) mostra a concentração de cloretos livres no entorno da armadura para os modelos comparados. As margens de incerteza foram suprimidas do gráfico para todos os modelos. Os resultados mostram um aumento da concentração de cloretos livres com o tempo de exposição, comportamento este já observado em vários modelos (TAVARES, 2013; BASTIDAS-ARTEAGA *et al.*, 2011; VAL e TRAPPER, 2008; MARTIN-PEREZ, 1999). Nos modelos em condições saturadas (difusão pura), percebe-se a concentração de cloretos livres sempre crescentes com o tempo, seguido de uma estabilização das concentrações após 30 anos de exposição. Já os modelos em condições não saturadas (difusão + convecção), percebe-se um aumento crescente com o tempo até o período de tempo estudado (50 anos), entretanto este crescimento é oscilatório, em função da sazonalidade ambiental.

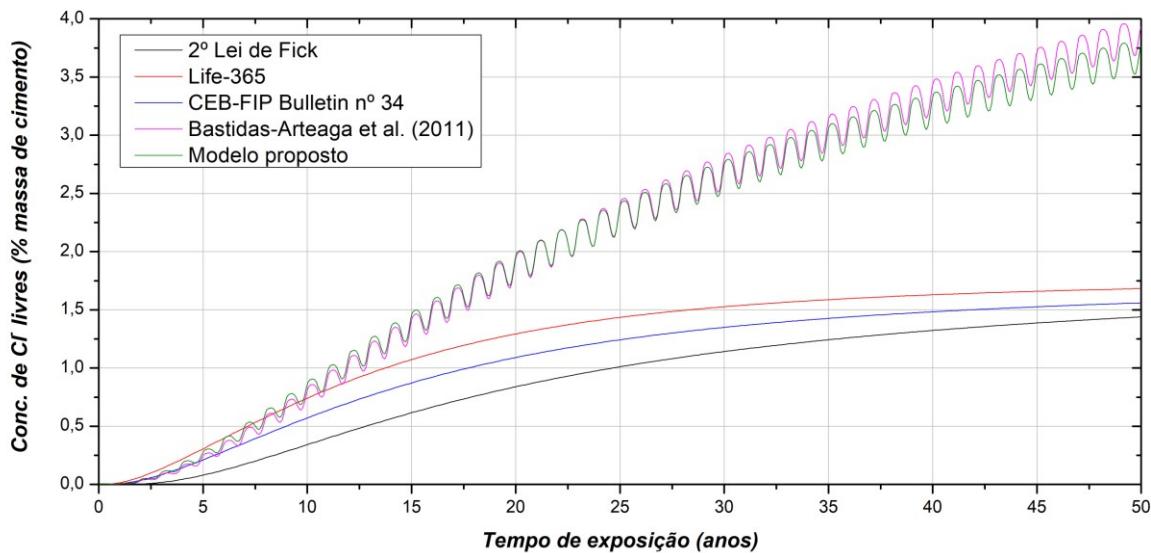


Figura 8.41 – Concentração de cloretos livres na profundidade da armadura para vários modelos já publicados na literatura em comparação com o modelo proposto (100m de distância do mar).

8.6.3 Modelo generalizado para climatologia local

Com o intuito de auxiliar o profissional da construção civil que projeta estruturas de concreto armado, foram confeccionados ábacos que correlacionam o tipo de elemento estrutural (laje-1D ou viga-2D), diferentes tipos de concreto e diversos graus de agressividade do ambiente de atmosfera marinha com o cobrimento da armadura necessário, para atingir determinado tempo de iniciação da corrosão. Assim facilita-se o enquadramento da estrutura de concreto armado nas classes de agressividade ambiental proposta pela ABNT NBR 6118/14 (Tabelas 6.1 e 7.2 da referida norma).

Como parâmetro para controlar as características do concreto foi escolhido o coeficiente de difusão de cloretos aos 28 dias de idade ($D_{c,ref}$). Esta variável é reflexo principalmente do fator a/c, consumo cimento, tempo de cura, tipo de cimento, uso de adições, grau de porosidade e etc. (CASCUDO, 1997; NIVELLE, 1995). As classes de concreto foram escolhidas com base na velocidade de transporte de cloretos, matematicamente expressos pelo coeficiente de difusão de referência ($D_{c,ref}$): $1e^{-11}$ m²/s (altíssima velocidade de transporte), $1e^{-12}$ m²/s (alta velocidade de transporte), $7,5e^{-13}$ m²/s (moderada velocidade de transporte), $5e^{-13}$ m²/s (baixa velocidade de transporte) e $1e^{-13}$ m²/s (baixíssima velocidade de transporte).

A título ilustrativo e objetivando um melhor balizamento na escolha da dosagem mais adequada ao grau de agressividade do ambiente foi confeccionada a [Tabela 8.11](#), ela mostra valores do coeficiente de difusão de cloretos, obtidos através de ensaio de laboratório por difusão pura, para vários tipos de dosagem e fatores a/c. Os resultados mostram que reduzir o fator água/cimento,

aumentar o tempo de cura, usar adições e aumentar o consumo de cimento reduzem o coeficiente de difusão de cloretos no estado estacionário.

Tabela 8.11 – Coeficiente de difusão de Cl^- ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) em concretos submetidos a ensaio de difusão.

Referência	ME (%)	AS (%)	CV (%)	EA (%)	Tempo de cura (dias)	Tempo de ensaio (dias)	CC kg/m ³	a/c	D _{ns} (m ² /s)
Guignome <i>et al.</i> (2019)	0	0	0	0	28	150	325	0,55	1,97
	4	0	0	0	28	150	312	0,55	2,05
	8	0	0	0	28	150	299	0,55	1,40
	12	0	0	0	28	150	286	0,55	1,79
Dousti <i>et al.</i> (2013)	0	0	0	0	150	450	400	0,40	3,13
	0	0	0	0	150	450	400	0,40	4,31
	0	0	0	0	150	450	400	0,40	7,97
	0	5	0	0	150	450	400	0,40	1,57
	0	5	0	0	150	450	400	0,40	2,09
	0	5	0	0	150	450	400	0,40	3,89
	0	10	0	0	150	450	400	0,40	1,09
	0	10	0	0	150	450	400	0,40	1,23
	0	10	0	0	150	450	400	0,40	2,32
	0	12,5	0	0	150	450	400	0,40	0,78
	0	12,5	0	0	150	450	400	0,40	1,15
	0	12,5	0	0	150	450	400	0,40	1,85
Elahi <i>et al.</i> (2010)	0	0	0	0	3	35	485	0,30	3,10
	0	0	0	0	3	35	485	0,30	0,85
	0	8	0	0	3	35	485	0,30	0,73
	0	0	0	50	3	35	485	0,30	0,98
	0	0	0	70	3	35	485	0,30	0,73
	0	8	0	50	3	35	485	0,30	0,20
	0	0	20	0	3	35	485	0,30	1,17
	0	0	40	0	3	35	485	0,30	1,52
	0	8	20	0	3	35	485	0,30	0,72
	0	8	40	0	3	35	485	0,30	0,55
Ghods <i>et al.</i> (2005)	0	0	0	0	28	150	400	0,40	6,55
	0	0	0	0	28	150	400	0,50	10,15
	0	7,5	0	0	28	150	370	0,40	2,97
	0	7,5	0	0	28	150	370	0,50	2,79
	0	12,5	0	0	28	150	350	0,40	1,32
	0	12,5	0	0	28	150	350	0,50	2,37
Tang e Sorensen (2001)	0	0	0	0	28	35	380	0,50	15,60
	0	8	0	0	28	35	420	0,40	2,80

Onde: ME é metacaulim, SA é sílica ativa, CV é cinza volante, EA é escoria de alto forno e CC é consumo de cimento.

Para determinar o nível de agressividade do ambiente de exposição foi escolhida a deposição média de cloretos diária com variável de controle (MEIRA, 2004). As faixas de agressividade relacionadas à deposição de cloretos foram tomadas com base nas especificações de Meira (2004). A Tabela 8.12 mostra essa correlação.

Tabela 8.12 – Faixas de agressividade obtida com base na taxa média de deposição de cloretos na cidade de João Pessoa/PB. **Fonte:** adaptado de Meira (2004).

Nível de agressividade	Deposição média (mgCl/m ² .dia)	Distância aproximada do mar (m)
Elevada	Acima 150*	Entre 10 e 100
Moderada	Entre 150 e 40	Entre 100 e 250
Baixa	Entre 40 e 10	Entre 250 e 1000
Mínima	Menor que 10	Acima de 1000

* Teto de 1000 mgCl/m².dia

Para aplicação do ábaco, além de climatologia semelhante a da cidade de João Pessoa/PB (temperatura, UR, radiação solar e pluviometria) das limitações do modelo expostas nos itens 1.3 e 8.1, faz-se necessário determinar:

- i. O coeficiente de difusão de cloretos na idade de 28 dias (referência) de ensaio de laboratório com difusão pura em condição saturada¹ no concreto a ser utilizado na estrutura, por exemplo, as normalizações NT Build 443 (NORDTEST, 1995) ou ASTM C1556-11A (ASTM, 2016);
- ii. A deposição média de cloretos diária do ambiente, obtido a partir de ensaios *in loco*, conforme NBR 6211 (ABNT, 2001) ou ASTM G140 – 02 (ASTM, 2014), discutido no item 2.4.1.2;
- iii. O tipo de elemento estrutural alvo do estudo, sendo 1D para lajes e paredes e 2D para vigas e pilares;
- iv. O tempo de vida útil da estrutura especificado em projeto. Conforme discutido no item 4.2, a vida útil da estrutura é composta do tempo para iniciação à corrosão mais o tempo de propagação. Modelos que consideram a propagação da corrosão estimam que esta fase é relativamente curta se comparada à fase de iniciação à corrosão (VAL e TRAPPER, 2008). Algo entre 10 a 6% do tempo de iniciação da corrosão (LIFE-365, 2020).

Para cálculo dos ábacos, o modelo considerou os mesmos parâmetros do ambiente discutidos no item 8.1.1 e as mesmas condições de cálculos expostas no item 8.1.3. Para as características de projeto e do concreto reportado no item 8.1.2, foram alterados os coeficientes de referência de difusão de cloretos ($D_{c,ref}$), umidade na secagem ($D_{h,ref,sec} = 300 \times D_{c,ref}$) e umidade na umecção ($D_{h,ref,um} = 300 \times D_{c,ref}$). A relação entre o coeficiente de difusão de umidade e de cloretos empregada neste modelo é semelhante ao usados por Lin *et al.* (2010). Para o cálculo, usou-se a Isoterma de Langmuir como função de ajuste para previsão de fixação de cloretos, o

¹ O coeficiente de difusão de cloretos obtidos pelos ensaios NT Build 443 (NORDTEST, 1995) e ASTM C1556-11A (ASTM, 2016) são obtidos em condições saturadas, sua correção para a condição não saturada é feita pela função $F2(GS)$ (Equação 3.17), viabilizando sua empregabilidade.

efeito da radiação solar, o efeito lavagem, o mecanismo de transporte combinado de difusão e convecção e um nível de confiança de 95%. Para correção do coeficiente de difusão de referência da condição saturada para a condição não saturada, considerou-se $GS_{max} = 76\%$, $GS_{min} = 62\%$ e $DGS_{max} = 41$ dias, conforme ensaios realizados por Meira (2004).

As Figuras 8.42 a 8.45 mostram os ábacos com as condições acima discutidas, tanto para elementos em 1D (lajes e paredes) como para em 2D (viga e pilares). As relações apresentadas nesta sessão demonstram o comportamento médio do modelo. Com o objetivo de facilitar o seu uso e minimizar a sobreposição das áreas dos ábacos, a margem de incerteza foi suprimida.

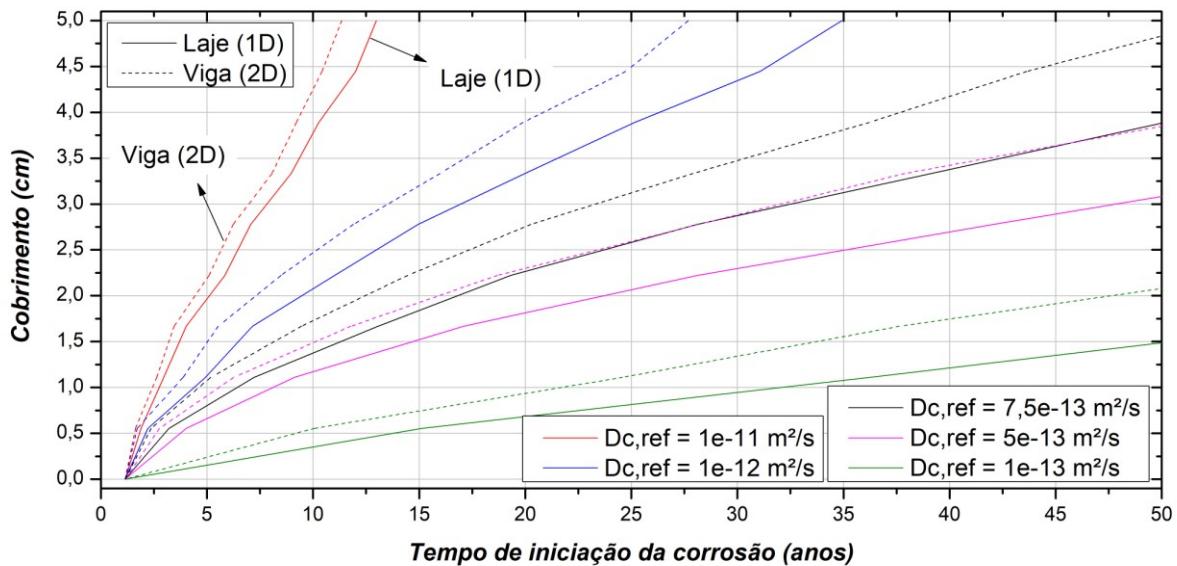


Figura 8.42 – Tempo de iniciação da corrosão *versus* cobrimento calculado para diferentes concretos moldados em laje (1D) e viga (2D) submetidos a atmosfera marinha com deposição média de cloretos de $1000\text{mg de Cl}^+/\text{m}^2\cdot\text{dia}$.

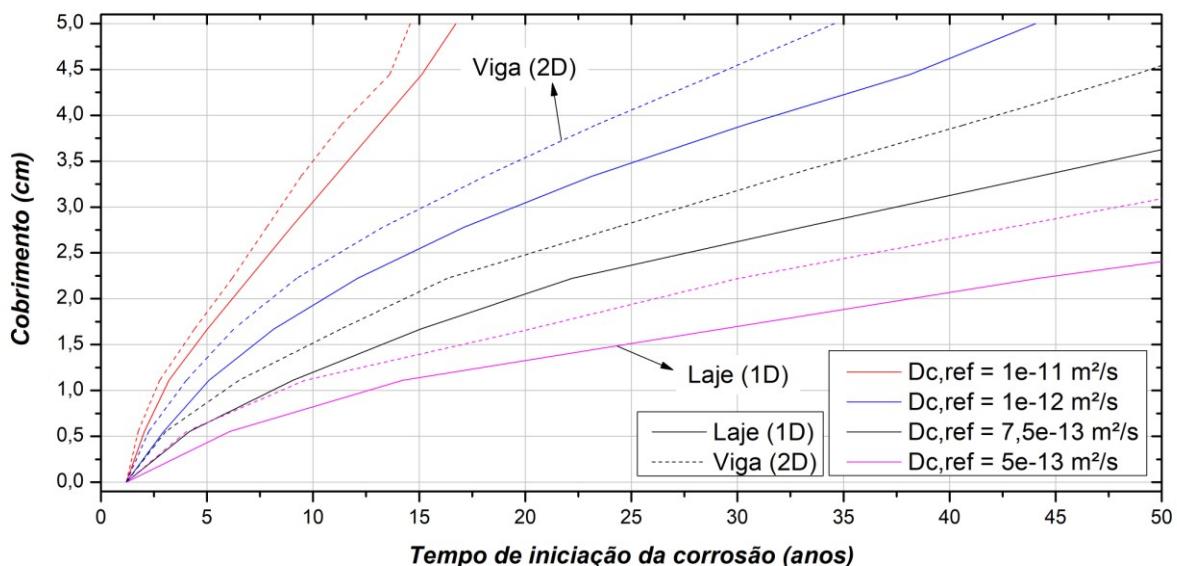


Figura 8.43 – Tempo de iniciação da corrosão *versus* cobrimento calculado para diferentes concretos moldados em laje (1D) e viga (2D) submetidos a atmosfera marinha com deposição média de cloretos de $150\text{mg de Cl}^+/\text{m}^2\cdot\text{dia}$.

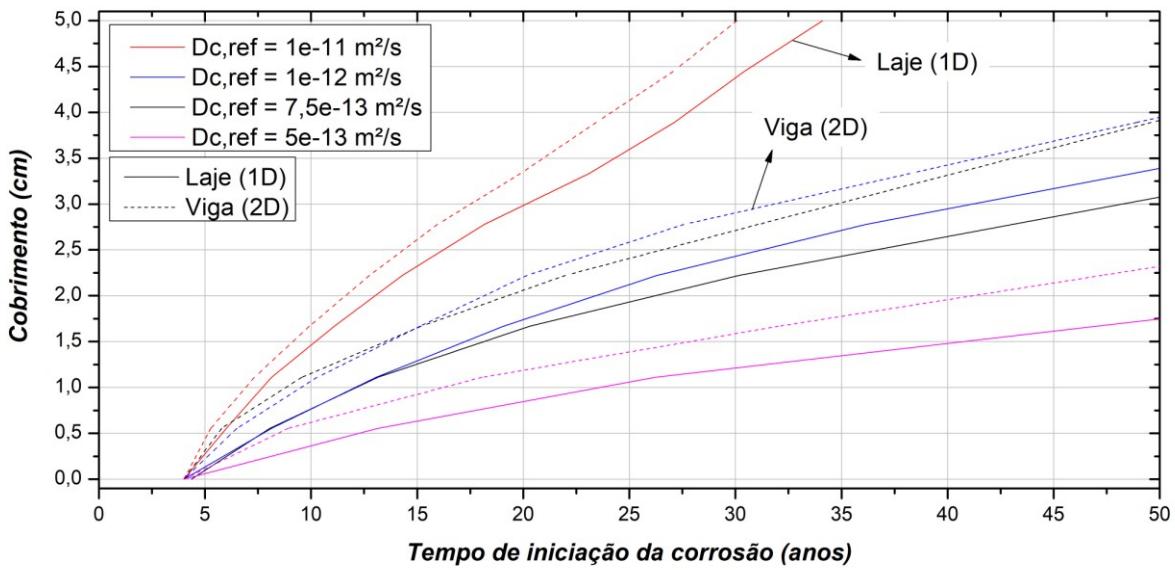


Figura 8.44 – Tempo de iniciação da corrosão *versus* cobrimento calculado para diferentes concretos moldados em laje (1D) e viga (2D) submetidos a atmosfera marinha com deposição média de cloreto de $40\text{mg de Cl}^-/\text{m}^2\text{.dia}$.

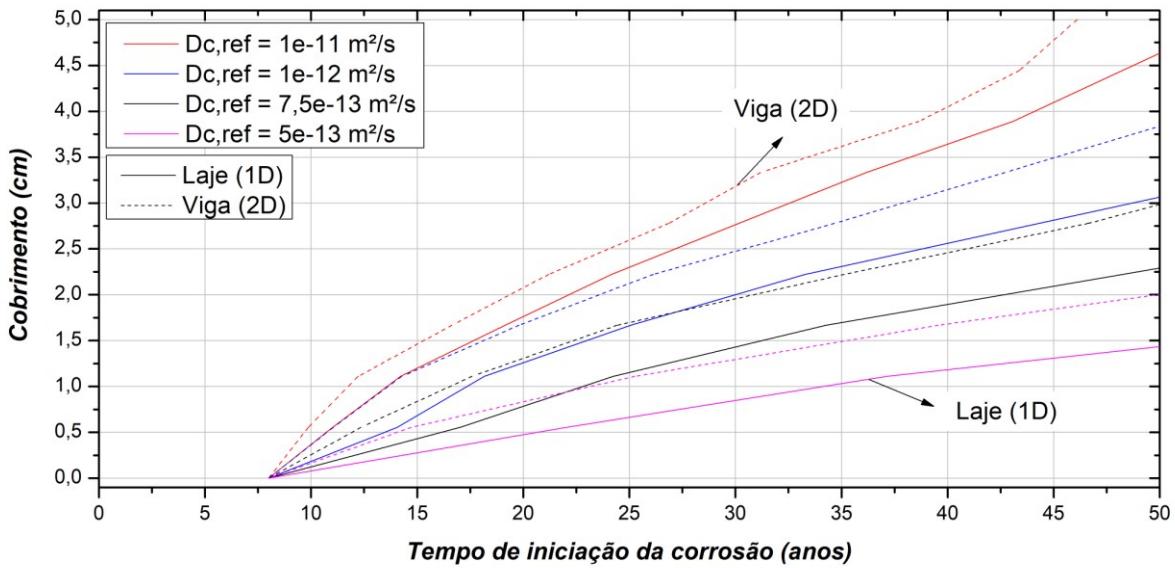


Figura 8.45 – Tempo de iniciação da corrosão *versus* cobrimento calculado para diferentes concretos moldados em laje (1D) e viga (2D) submetidos a atmosfera marinha com deposição média de cloreto de $10\text{mg de Cl}^-/\text{m}^2\text{.dia}$.

Com base num tempo de iniciação da corrosão de 45 anos (fase de iniciação + propagação igual à VUP de 50 anos), tempo este que deveria representar o início das primeiras intervenções corretivas, podemos observar que concretos com coeficiente de difusão de referência ($D_{c,\text{ref}}$) próximos a $1\text{e}^{-11}\text{ m}^2/\text{s}$ não atendem as condições mínimas de durabilidade, para quaisquer dos graus de agressividade representados aqui. Por outro lado, concretos com coeficiente de difusão de referência ($D_{c,\text{ref}}$) entre 1e^{-13} e $5\text{e}^{-13}\text{ m}^2/\text{s}$ apresentam comportamento excepcional a qualquer grau de agressividade estudado. Concretos com $D_{c,\text{ref}}$ próximos a $1\text{e}^{-11}\text{ m}^2/\text{s}$ não atendem as condições mínimas de durabilidade para deposições superiores a $100\text{ mg de Cl}^-/\text{m}^2\text{ dia de}$

cloreto. Por fim, concretos com $D_{c,ref}$ próximos a $1e^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ atenderam a todos os graus de agressividade, entretanto para o grau elevado de agressividade ($D_{ep} \geq 150 \text{ mg de Cl}^-/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$), foi necessário um cobrimento mais acentuado.

Como resumo dos estudos apresentados nesta sessão e com caráter sugestivo, apresenta-se a [Tabela 8.13](#). Ela correlaciona a agressividade do ambiente com o fator a/c e o cobrimento, principais itens estipulados pela classe de agressividade da NBR 6118 (ABNT, 2014), em relação a durabilidade. Tomando como referência o nível de agressividade da atmosfera marinha pessoense, as faixas limites de $D_{c,ref}$ e os critérios de normalização para as classes de agressividade.

Tabela 8.13 – Critérios de enquadramento de especificação do material com base no modelo estudado.

Nível de agress.	Correlação com a NBR 6118/2014	Deposição média ($\text{mgCl}/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$)	$D_{c,ref} (\text{m}^2/\text{s})$	Classe do concreto	Fator a/c	Cobrimento mínimo [#] (cm)	
						Laje	Viga / Pilar
Elevada	IIIa - Marinha	Até 1000	$D_{c,ref} \leq 5e^{-13}$	$\geq \text{C45}$	$\leq 0,33$	3,50	4,00
			$5e^{-13} \leq D_{c,ref} < 7,5e^{-13}$	$\geq \text{C40}$	$\leq 0,35$	4,00	4,50
Moderada	IIIb - Marinha	Entre 150 e 40	$5e^{-13} \leq D_{c,ref} < 7,5e^{-13}$	$\geq \text{C35}$	$\leq 0,40$	3,50	4,00
Baixa	IIIc - Marinha	Entre 40 e 10	$7,5e^{-13} \leq D_{c,ref} < 1e^{-12}$	$\geq \text{C30}$	$\leq 0,50$	3,00	3,50
Mínima	II - Urbana	Menor que 10	$D_{c,ref} \leq 1e^{-12}$	$\geq \text{C25}$	$\leq 0,55$	3,00	3,50

* Teto de 1000 $\text{mgCl}/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$;

Para determinação do cobrimento nominal, deve-se acrescentar aos cobrimentos mínimos (c_{min}) uma tolerância de execução (Δc) maior ou igual a 1,00 cm, conforme recomenda o item 7.4.7 da NBR 6118/14 (ABNT), ressalvado o rígido controle de qualidade na execução e medidas ($\Delta c=0,50 \text{ cm}$).

Diante dos resultados apresentados, recomenda-se na Tabela 6.1 da NBR 6118 (ABNT, 2014), a divisão da classe de agressividade III-marinha em outras de três subclasses (IIIa-marinha, IIIb-marinha e IIIc-marinha). A classe de agressividade II-urbana foi considerada o nível de agressividade mínima. Todas elas em função da deposição média de cloreto diária do ambiente. A cada classe, houve uma revisão de todos ou partes dos parâmetros de classe do concreto, relação a/c e cobrimento. Além da inclusão da velocidade transporte de cloreto, objetivando balizar a melhor condição de custo/durabilidade.

Apesar da [Tabela 8.13](#) facilitar a consideração da durabilidade nos projetos de estrutura para obras corriqueira, recomenda-se sempre um estudo mais detalhado da interação entre o ambiente e a estrutura, de modo a estabelecer o melhor custo com a maior durabilidade, dentre a gama de traços, cobrimentos e produtos que podem ser adotados na confecção dos critérios de projeto e dosagem.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões finais relativas ao desenvolvimento deste trabalho e sugestões para trabalhos futuros envolvendo a confecção de modelos de previsão de vida útil em ambientes com agressividade marinha.

9.1 CONCLUSÕES

Até o presente momento, este estudo propôs o desenvolvimento de um *software* com interface gráfica amigável, baseado num modelo abrangente com características físico-químico e probabilística para previsão do tempo de iniciação da corrosão em estruturas de concreto armado expostas em zona de atmosfera marinha. Uma gama de modelos numéricos e analíticos já foram propostos desde a década de 90, entretanto ainda não há uma abordagem amplamente aceita pelo mercado e/ou comunidade acadêmica. Tomando como base as referências estudadas, percebe-se que há um esforço mundial no desenvolvimento de um modelo de predição de vida útil de estruturas de concreto armado mais generalista possível, sem perder a simplicidade e a precisão dos resultados.

Fornecer uma boa estimativa do ingresso de cloretos no interior do concreto e do tempo de vida útil de uma estrutura de concreto armado é de suma importância para tomada de decisão dos profissionais da construção na concepção de estruturas mais duráveis e econômicas. Além de estabelecer critérios padronizados de qualidade e aceitabilidade dos materiais empregados.

Um modelo probabilístico para a estimativa de vida útil de estruturas de concreto armado submetidas a zonas de atmosfera marinha é apresentado, onde variações climatológicas são consideradas (temperatura UR, radiação solar, pluviometria e deposição de cloretos). Este modelo leva em consideração as incertezas relacionadas às propriedades do material, os parâmetros de projeto, as condições de exposição e as simplificações matemáticas do modelo físico para resolver as EDP's que regem o mecanismo de transporte de cloretos, umidade e temperatura no interior do concreto. O modelo determinístico composto por estas EDP's, resolvido por elementos finitos no domínio do espaço e diferenças finitas no domínio do tempo, é acoplado ao modelo probabilístico, onde o Método de Monte Carlos é usado para explicar a aleatoriedade relacionada ao processo corrosivo.

Sendo assim, o programa desenvolvido neste trabalho, intitulado *Sea air PRO-Life*, apresenta um modelo representativo da fenomenologia estocástica do processo de corrosão por cloretos, implementado em duas etapas: a probabilística, baseada na natureza aleatória do processo, e a

determinística, baseado na resolução numérica das EDP's que representam os fenômenos de transporte de massa e energia, proposta por Martin-Perez (1999) e Saetta *et al.* (1993).

Ensaios experimentais foram coletados na literatura de modo validar o modelo preditivo e analisar estatisticamente os principais parâmetros relacionados ao transporte de cloretos. Com base no estudo de validação do algoritmo computacional, o modelo de simulação de ingresso de cloretos se mostrou promissor como ferramenta para estimativa do tempo de iniciação da corrosão e dos perfis de cloretos, umidade e temperatura ao longo do período de projeto, demonstrando a sensibilidade de diversos parâmetros relacionados à fase de projeto e uso da estrutura.

Os resultados mostram que a temperatura no interior do concreto é bastante similar a temperatura externa em todas as profundidades analisadas. Em relação à distribuição de umidade no interior do concreto, observa-se que a umidade na superfície se aproxima muito da umidade externa, influenciada diretamente pelo parâmetro B_h . À medida que adentra-se o concreto, a “resistência” imposta pelo coeficiente de difusão de umidade freia o ganho e a perda de água livre no interior do poro, fazendo com que o perfil de umidade se assemelhe com a média da UR externa, quando o tempo e a profundidade tendem para o infinito.

Avaliando o ingresso de cloretos, percebe-se que a ação da temperatura, umidade e período de hidratação têm efeito significativo na penetração de cloretos, dada sua relação com o coeficiente de difusão de cloretos. Destaque principal para o período de hidratação, no qual o *ageing factor*, ($m = 0,358$ e $COV = 0,3$), ainda exerceu forte influência no ingresso de cloreto, principalmente nas primeiras idades do concreto.

A consideração da radiação solar na superfície do concreto mostra um aumento nas concentrações de cloretos com a profundidade, quando comparamos os modelos com e sem a aplicação da radiação solar. Este aumento nas concentrações de cloretos é maior, camada a camada, à medida que nos aprofundamos no concreto. Este comportamento é decorrente do aumento da difusividade do concreto com o incremento da temperatura gerada pela radiação solar e da influência mais preponderante da difusão em relação à convecção nas camadas mais profundas do concreto.

Observamos que o efeito lavagem tem influência importante nos resultados gerados pelo modelo matemático, de modo que sua consideração reduz consideravelmente as medições de concentração de cloretos a cada profundidade, principalmente na superfície do concreto onde ela tem atuação direta. Como consequência, tem-se um maior tempo para iniciar a corrosão e um melhor desempenho do material frente às condições de agressividade do ambiente.

A concentração de cloretos no limite entre a superfície e o ambiente é condição de contorno para resolução da EDP, sofrendo ela forte influência do tempo, da deposição de cloretos, do efeito lavagem e da distância do mar. Em relação ao tempo, ocorre um leve crescimento nas primeiras idades, seguido de um forte crescimento até sua tendência de estabilização no longo prazo. Com relação a influência da pluviometria e da deposição de cloretos na C_s , observam-se oscilações nos valores calculados pelo modelo em função da sazonalidade ocasionada pela variação anual do regime de ventos e da chuva dirigida na superfície do concreto. À medida que a estrutura de concreto se afasta do mar, as concentrações superficiais caem consideravelmente, em função, principalmente, do decréscimo de salinidade do aerossol marinho. Uma boa previsibilidade desta variável é de fundamental importância para previsão do tempo de iniciação da corrosão.

A fixação de cloretos na matriz cimentícia repercutiu na diminuição da disponibilidade de cloretos livres ao longo da profundidade, evidenciando a necessidade de determinação das condições de ligação para cada matriz cimentícia em específico. Parâmetros relativos à fixação de cloretos na matriz cimentícia bem ajustados com a realidade repercutem diretamente nos modelos de previsão de vida útil e, consequentemente, no desempenho da estrutura. A subestimação do tempo de vida útil repercutem em características mais conservadoras da estrutura induzindo a gastos desnecessários. Por outro lado, outras condições de parâmetros que superestimam o tempo de vida útil podem requerer manutenções nas estruturas em estudo antes do tempo previsto.

No que diz respeito à combinação de mecanismos de transporte em concretos não saturados, os resultados obtidos aparentam estar em conformidade com os perfis de cloretos encontrados na literatura e evidenciaram o incremento considerável no ingresso de cloretos, quando se leva em consideração o efeito associativo da convecção com a difusão. Enfatizando a importância de estabelecer corretamente no modelo estudado as condições de contorno, para que os perfis de cloretos possam ser os mais próximos possíveis da realidade.

Considerar o transporte de cloretos no interior do concreto em duas dimensões reduziu significativamente o tempo para iniciação à corrosão, variando de acordo com o grau de agressividade do ambiente. Quanto mais agressivo o ambiente mais rápido é a despassivação, quando comparado o 2D com 1D. Demonstrando importância de considerar a segunda dimensão nas análises de transporte de cloretos no interior do concreto.

A partir de um modelo generalista, foi possível criar critérios simples para confecção de projetos de estrutura de obras corriqueira, levando em consideração o ambiente agressivo no qual a obra está inserida. Além de enfatizar, estudos mais detalhados da interação entre o ambiente e a

estrutura de concreto armado, objetivando sempre o menor custo com a maior durabilidade possível.

Por fim, enfatiza-se a importância de incluir os efeitos das variações sazonais do ambiente (temperatura, UR, pluviometria, deposição de cloretos e radiação solar), a natureza aleatória das propriedades do material e do ambiente, a consideração da ligação de cloreto com a matriz cimentícia, o mecanismo de transporte em concretos não saturados (difusão + convecção) e análise em duas dimensões na avaliação abrangente da vida útil de estruturas de concreto armado.

9.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Levando em consideração a complexidade do fenômeno de corrosão desencadeada por cloretos, as simplificações empregadas e as limitações físicas, químicas e matemáticas que os modelos de previsibilidade adotam, alguns pontos não foram o alvo desta pesquisa pelos mais diversos motivos. Logo, abre-se espaço para maior estudo pela comunidade científica. Entre eles, podemos citar:

- i.* Ensaios experimentais que busquem aferir as características dos materiais e do ambiente, de modo a servir de alimentação e validação dos modelos de previsão de vida útil de estruturas de concreto armado;
- ii.* Consideração da natureza estocástica dos parâmetros climáticos (temperatura, UR, pluviometria, radiação solar, velocidade do vento, etc.) no modelo probabilístico;
- iii.* A influência da temperatura na capacidade de fixação de cloretos com a matriz cimentícia;
- iv.* Refinamento das condições de contorno do problema, principalmente a concentração de cloretos que chega na superfície do concreto. Um modelo que leve em consideração as variáveis ambientais que repercutem na geração, transporte, deposição e acumulação de cloretos na superfície do concreto em zonas de atmosfera de marinha;
- v.* A adição do tempo de propagação da corrosão no modelo, de modo a determinar a vida útil da estrutura com mais precisão;
- vi.* A ação combinada dos íons cloretos com outros agentes agressivos, como o gás carbônico responsável pela carbonatação;
- vii.* A variabilidade da modelagem espacial das incertezas, que tem sido reconhecida como uma questão que influencia diretamente a avaliação do modelo.

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABABNEH, A. N; BENBOUDJEMA, F; XI, Y. Chloride penetration in unsaturated concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE)**. V.15. p.183–191, 2003.
- ABRAMOWITZ, M.; STEGUM, I. A. **Handbook of mathematical functions: Formulas, graphs and mathematical tables**. 1^a edição, New York: Ed. Dover, 1965. p.991-996.
- AKITA, H.; FUJIWARA, T.; OZAKA, Y. A practical procedure for the analysis of moisture transfer within concrete due to drying. **Magazine of Concrete Research**. V. 49(179), p. 129-137, 1997.
- AKIYAMA, M.; FRANGOPOL, D. M.; YOSHIDA, I. Time-dependent reliability analysis of existing RC structures in a marine environment using hazard associated with airborne chlorides. **Engineering Structures**. V. 32, p. 3768–3779, 2010.
- ALBUQUERQUE, A. T.; OTOCH, S. Proposta de classificação da agressividade do ambiente na cidade de Fortaleza. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 47. 2005, Olinda. **Anais...** Olinda: IBRACON, 2005. p.743-748
- ALIZADEH, R.; GHODS, P.; CHINI, M.; HOSEINI, M.; GHALIBAFIAN, M.; SHEKARCHI, M. Effect of curing conditions on the service life design of RC structures in the Persian gulf region. **Journal of Materials in Civil Engineering**. V. 20, p. 2-8, 2008.
- ALMENAR, G. V. (2000) **Chloride ingress into concrete: analyse methods, non-destructive detection and transport modelling under a limited first approach**. Thesis doctoral of Alicante University, 2000.
- ALONSO, M. C.; SANCHEZ, M. Analysis of the variability of chloride threshold values in the literature. **Materials and Corrosion**. V. 60 (8), p. 631-637, 2009.
- ALVES, A. M. C. (2007). **Contribuição à análise da perspectiva de vida útil de estruturas em concreto face ao teor de cloreto registrado em Maceió-AL**. Dissertação de Mestrado em Engenharia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, 121p.
- AMBLER, H. R.; BAIN, A. A. J. Corrosion of metals in the tropics. **Journal of Applied Chemistry**. V. 5 (9), p. 437- 467, 1955.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM)**. ASTM C150M: Standard Specification for Portland Cement. West Conshohocken, 2018.
- _____. **ASTM C1556-11A**: Standard test methods for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion. West Conshohocken, 2016.

_____. **ASTM D512-89:** Standard test methods for chloride ion in water. West Conshohocken, 1989.

_____. **ASTM G-140-02:** Standard test method for determining atmospheric chloride deposition rate by wet candle method. West Conshohocken, 2014.

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

_____. **NBR 6211:** Corrosão atmosférica - Determinação de cloretos na atmosfera pelo método da vela úmida. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR 14643:** Corrosão atmosférica - Classificação da corrosividade de atmosferas. Rio de Janeiro, 2001.

ANDRADE, C. Reinforcement corrosion: Research needs. **Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II** - Alexander et al. (eds). 8 p. 2009.

ANDRADE, J. J. O. Critérios Probabilísticos para a Previsão da Vida Útil das Estruturas de Concreto Armado. **Engenharia Civil – UM.** V. 22, p.35-47, 2005.

ANDRADE, C.; SAGRERA, J. L.; SANJUÁN, M. A. Several years study on chloride ion penetration into concrete exposed to Atlantic Ocean water. In: SECOND INTERNATIONAL RILEM WORKSHOP ON TESTING AND MODELLING CHLORIDE INGRESS INTO CONCRETE. **Proceedings...** Paris: RILEM, 2000.

ANDRADE, C.; ALONSO, M. C. Modelling of skin effects on diffusion process in concrete. In: Nilsson, L. O.; Ollivier, J. P., editors. International RILEM workshop on chloride penetration into concrete, **Proceedings...**, Paris: RILEM; 1997. p.182–194.

ANDRADE, M. C.; PAGE, C. L. Pore solution chemistry and corrosion in hydrated cement systems containing chloride salts: a study of cation specific effects. **British Corrosion Journal.** V. 21 (1), p.49-53, 1986.

ANGST, U. M.; Predicting the time to corrosion initiation in reinforced concrete structures exposed to chlorides. **Cement and Concrete Research.** V. 115, p. 559-567, 2019.

ANGST, U. M.; ELSENER, B.; LARSEN, C. K.; VENNESLAND, Ø. Critical chloride content in reinforced concrete — A review. **Cement and Concrete Research.** V. 39 (12), p. 1122-1138, 2009.

ANGST, U.; ELSENER, B. The size effect in corrosion greatly influences the predicted life span of concrete infrastructures. **Science advances.** V. 39 (8), p. 1-9, 2017.

ANGST, U.; WAGNER, M.; ELSENER, B.; LEEMANN, A.; NYGAARD, P.V. **Method to Determine the Critical Chloride Content of Existing Reinforced Concrete Structures.** Swiss Federal Roads Office, Berne, Switzerland (2016).

ANN, K.Y.; SONG, H.W. Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete. **Corrosion Science**, V. 49 (11), p. 4113-4133, 2007.

ASADI, I.; SHAHIGH, P.; FITRI, HASSAN, Z. F. B. A.; MAHYUDDIN, N. B. Thermal conductivity of concrete – A review. **Journal of Building Engineering**. V. 20, p.81-93, 2018.

BALESTRA, C. E. T.; REICHERT, T. A.; PANSERA, W. A.; SAVARIS, G. Chloride profile modeling contemplating the convection zone based on concrete structures present for more than 40 years in different marine aggressive zones **Construction and Building Materials**. V.198, p. 345-358, February, 2019.

BANFORTH, P.B. The derivation of input data for modeling chloride ingress from eight-year UK coastal exposure trials. **Magazine of Concrete Research**. V. 51, p. 87–96, 1999.

BASTIDAS-ARTEAGA, E.; CHATEAUNEUF, A.; SANCHEZ-SILVA, M.; BRESSO-LETT, P.; SCHOEFS, F. A comprehensive probabilistic model of chloride ingress in unsaturated concrete. **Engineering Structures**. V. 33 (3), pp.720-730, 2011.

BAZANT, A. P.; NAJJAR, L. J. Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete. **Matériaux et Constructions**. V. 5(25), p. 3-20, 1972.

BENTZ, D. P.; CLIFTON, J. R., SNYDER, K. A. Predicting Service Life of Chloride-Exposed Steel-Reinforced Concrete. **Concrete International Journal**. V. 18(12), p. 42-47, 1996.

BERTOLINI, L.; ELSENER, B.; PEDEFERRI, P.; POLDER, R. B. **Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair.** 2^a Edição, Weinheim: Ed. Wiley-VCD, 2004. p. 21-39, 49, 64, 71-104, 193-208.

BORBA Jr., J. C. (2011). **Agressividade ambiental em zona de atmosfera marinha: estudo da deposição de cloretos e sua concentração em concretos na região sudeste.** Dissertação de Mestrado em Engenharia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, 121p. 2011.

BOUBITSAS, D.; TANG, L. P.; UTGENANNT, P. **Chloride Ingress in Concrete Exposed to Marine Environment: Field Data Up to 20 Years Exposure.** Sweden, 2014.

BREIT, W. Critical corrosion inducing chloride content – state of the art and new investigation results. **Betontechnische Berichte.** Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ), Düsseldorf, Germany (2001).

BREITENBÜCHER, R.; GEHLEN, C.; SCHIESSL, P.; HOONAARD, J. V. D.; SIEMES, A.J.M. Service life design for the Western Scheldt Tunnel. In: Proceedings of the 8th International Conference on Durability of Building Materials and Components (Edited by LACASSE, M.A.; VANIER, D.J.), **Proceedings....**, Ottawa: 8DBMC - Service Life and Durability of Materials and Components, V.1, 1999, p. 3–15.

BRENNA, A.; BOLZINI, F.; BERETTA, S.; ORMELLESE, M. Long-term chloride-induced corrosion monitoring of reinforced concrete coated with commercial polymer-modified mortar and polymeric coatings. **Construction and Building Materials.** V.48, p. 734-744, November, 2013.

BRILHWILER E.; DENARI E.; CONCIATORI D. Simulation of the corrosion behaviour of concrete elements reinforced with high performance steel. Symposium Concrete and Environment, **Proceedings....**, Berlim: FIB: 2001. p. B3-3.

BRUNAUER, S.; SKALNY, J.; BODOR, E. E. Adsorption in nonporous solids. **Journal of Colloid and Interface Science.** V. 34 (4), p.546-552, 1969.

BUENFELD, N. R. (1984). **Permeability of concrete in marine environments.** Thesis doctoral of University of London, 267p, 1984.

BUKAÇI, E.; KORINI, T. H.; PERIKU, E.; ALLKJA, S.; SHEPERI, P. Number of iterations needed in Monte Carlo Simulation using reliability analysis for tunnel supports. **Journal of Engineering Research and Applications.** Vol. 6(6-3),p.60-64, 2016.

CAI, R.; HU, Y., YU, M.; LIAO, W.; YANG, L.; KUMAR, A.; MA, H. Skin effect of chloride ingress in marine concrete: A review on the convection zone. **Construction and Building Materials.** V.262, p. 1-14, March, 2020.

CAI, R.; HAN, T.; LIAO, W.; HUANG, J.; LI, D.; KUMAR, A.; MA, H. Prediction of surface chloride concentration of marine concrete using ensemble machine learning. **Cement and Concrete Research.** V. 136, p. 529-537, October, 2020.

CASCUDO. O. **Controle da corrosão de armaduras em concreto - Inspeção e Técnicas Eletroquímicas.** Co-edição, São Paulo; Ed. PINI, 1997. p. 39-76.

CASTAÑEDA, A.; CORVO, F.; HOWLAND, J. J.; MARRERO, R. Penetration of marine aerosol in a tropical coastal city. **Havana. Atmosfera.** V. 31 (1), p.87-104, 2018.

CASTELLOTE, M. ANDRADE, C. ALONSO, C. Accelerated simultaneous determination of the chloride depassivation threshold and of the non-stationary diffusion coefficient values. **Corrosion Science.** V. 44, p. 2409–2424, February, 2002.

CASTRO, P.; VÉLEVA, L.; BALANCÁN, M. Corrosion of reinforced concrete in tropical Marie environment and accelerated test. **Construction and Building Materials.** V.11 (2), p. 75-81, March, 1997.

CASTRO, P.; De RINCON, O. T.; PAZINI, E. J. Interpretation of chloride profiles from concrete exposed to tropical marine environments. **Cement and Concrete Research.** V. 31, p. 529-537, January, 2001.

CHALEE, W.; JATURAPITAKKUL, C.; CHINDAPRASIRT, P. Predicting the chloride penetration of fly ash concrete in seawater. **Marine Structures**, V. 22, p. 341-353, 2009.

CIGNA, R.; ANDRADE, C.; NÜRNBERGER, U.; POLDER, R.; WEYDERT, E.; SEITZ, E. Corrosion and protection of metals in contact with concrete. **COST Action 509 – Final Report.** European Community: Luxembourg, 1997.

CHEN, Y.; CHIU, H.; CHAN, Y.; CHANG, Y.; YANG, C. The correlation between air-borne salt and chlorides cumulated on concrete surface in the marine atmosphere zone in north Taiwan. **Journal of Marine Science and Technology.** V. 21 (1), p. 23-34, 2013.

CHEN, X.; YUAN, L. Z.; WEILIANG, J.; YI, Z.; CHANGJIAN, Y. Chloride ion ingress distribution within an alternate wetting-drying marine environment area. **Cement and Concrete Research.** V. 55, p. 970-976, April, 2012.

CHIANG, C. T.; YANG, C. C. Relation between the diffusion characteristic of concrete from salt ponding test and accelerated chloride migration test. **Materials Chemistry and Physics.** V. 106 p. 240–246, 2007.

CHWIF, L. MEDINA, A. C. **Modelagem e simulação de eventos discretos.** 4^a Edição, Rio de Janeiro: Ed. Elsevier, 2015. p.185-189, 243-283.

CLAISSE, P. A. **Transport Properties of Concrete: Measurements and Applications.** 1^o Edition, Cambridge: Ed. Elsevier, 2014. p.2-13.

COLE, I. S.; PATERSON, D. A.; GANTHER, W. D. Holistic model for atmospheric corrosion. Part 1 - Theoretical framework for production, transportation and deposition of marine salts. **Journal Corrosion Engineering, Science and Technology.** V. 38 (2), p.129-134, 2003a.

COLE, I. S.; GANTHER, W. D.; PATERSON, D. A.; FURMAN, S. A.; LAU, D. Holistic model for atmospheric corrosion. Part 2 - Experimental measurement of deposition of marine salts in a number of long range studies. **Journal Corrosion Engineering, Science and Technology.** V. 38 (4), p.259-266, 2003b.

COLLINS, F.; GRACE, W. Specifications and testing for corrosion durability of marine concrete: the Australian perspective. In: ACI International Conference on durability of concrete, **Proceedings...**, Farmington Hills: ACI; 1997. p. 757-776.

COMITE EURO-INTERNACIONAL DU BETON - CEB. Model code for service life design. Bulletin D'Information n° 34, Stuttgart, 2006.

_____. **CEB.** Durable Concrete Structure: Design Guide - Bulletin D'Information n° 192, Paris, 1992.

CORVO, F.; BETANCOURT, N.; MENDOZA, A. The influence of airborne salinity on the atmospheric corrosion of steel. **Corrosion Science.** V. 37(12), p. 1889-1901, 1995.

COSTA, A.; APPLETON, J. Chloride penetration into concrete in marine environment – part I: Main parameters affecting chloride penetration. **Materials and Structures**, V.32, p. 252-259, 1999a.

COSTA, A.; APPLETON, J. Chloride penetration into concrete in marine environment – part II: Prediction of long term chloride penetration. **Materials and Structures**, V.32, p. 354-359, 1999b.

COSTA, A.; APPLETON, J. Análises da penetração de cloretos em estruturas de betão armado expostas a ambiente marítimo. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas.** V. 46, p. 3-13, 2007.

COSTA, A.; FERNAUX, M.; FERNANDEZ, J. SANCHEZ, E.; MORAGUES, A. Modelling of chloride penetration into non-saturated concrete: Case study application for real marine offshore structures. **Construction and Building Materials.** V.43, p. 217-224, June, 2013.

CRANK, J. The mathematics of diffusion. 2º ed. Oxford: Oxford University Press, 1975.

DI BELLA, C.; VILLANI, C.; HAUSHEER, E.; WEISS, J. Chloride transport measurements for a 27 plain and internally cured concrete mixture. **ACI Special Publication**, V. 290, p.1-16, 2012.

DOMINICINI, M. K.; CALMON, J. L. Computational modeling for predicting corrosion initiation in reinforced concrete structures. **Revista IBRACON de estruturas e materiais.** V10 (6), p. 1205-1244, dezembro, 2017.

DORNELLES FILHO, A. A. (2000). **A simulação de variáveis aleatórias e os métodos de Monte Carlo e Quase-Monte Carlo na Quadratura Multidimensional.** Dissertação de Mestrado em Matemática Aplicada, Departamento de Matemática, Universidade Federal de Caxias do Sul, 144p.

DOUSTI, A.; SHEKARCHI, M. Effect of exposure temperature on chloride-binding capacity of cementing materials. **Magazine of Concrete Research.** V. 67 (15), p. 821-832, 2015.

DOUSTI, A.; RASHETNIA, R.; AHMADI, B.; SHEKARCHI, M. Influence of exposure temperature on chloride diffusion in concretes incorporating silica fume or natural zeolite. **Construction and Building Materials.** V.49 p. 393-399, December, 2013.

DURACRETE. Probabilistic performance based durability design of concrete structures. The European Union-Brite EuRam III; 2000.

DJERBI, A.; BONNET, S.; KHELIDJ, S.; BAROGHEL-BOUNY, V. Influence of traversing crack on chloride diffusion into concrete. **Cement and Concrete Research.** V. 38(6), p. 877-886., 2008.

EL-DESOUKY, M. I.; TSUBAKI, T. Durability Improvement of Concrete Structures by Wash-away of Chloride. **Society for Social Management Systems Internet Journal.** V 8, 2012. Disponível em:<<http://hdl.handle.net/10173/991>>. Acessado em 02 de janeiro de 2019.

ENRIGHT, M.; FRANGOPOL, D. Service-Life Prediction of Deteriorating Concrete Bridges. **Journal of Structural Engineering.** V. 124(3), p.309- 317, 1998.

ERIKSSON, E. The yearly circulation of chloride and sulfur in nature: meteorological, geochemical and pedological implications. **Tellus.** V. 2 (4), p. 375-403, 1959.

FARAHANI, A.; TAGHADDOS, H.; SHEKARCHI, M. Prediction of Long-Term Chloride Diffusion in Silica Fume Concrete in a Marine Environment. **Cement and Concrete Composites.** V.59, p. 10-17, May, 2015.

FATTAH, A. A.; AL-DUAIS, I.; RIDING, K. THOMAS, M. Field evaluation of corrosion mitigation on reinforced concrete in marine exposure conditions. **Construction and Building Materials.** V.165 (20), p. 663-674, March, 2018.

FELIU, S; MORCILLO, M.; CHICO, B. Effect of Distance from Sea on Atmospheric Corrosion Rate. **Corrosion Engineering.** V. 55(9), p.883-891, 1999.

FERREIRA, P. R. R. (2015). **Análise da indução da corrosão por cloreto em concretos armados com adição de resíduo de tijolo moído a partir de ensaios acelerados.** Dissertação de Mestrado em Engenharia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, 229p. 2015.

FERREIRA, R. M. (2004) **Probability-based durability analysis of concrete structures in marine environment.** Thesis doctoral of University of Minho, 339p, 2004.

FITZGERALD, J. W. Marine aerosols: a review. **Atmospheric Environment**. V. 25A (3-4), p. 533-545, 1991.

FRANKOWSKI, P. K. Corrosion Detection and Measurement Using Eddy Current Method. In: 2018 International Interdisciplinary PhD Workshop, **Proceedings...**, Swinoujście: 18th IIPhDW; 2018. p. 398-400.

FRIER, C.; SORENSE, J. D. Finite element reliability analysis of chloride ingress into reinforced concrete structures. **Structure and Infrastructure Engineering**. V. 3(4), p. 355-366, 2007.

FROBERG, C. E. **Introduction to numerical analysis**. 2º Edition, London: Ed. Addison-Wesley, 1965. p.391-394.

GARCIA, R. B. (2008). **Avaliação da atmosfera marinha em estruturas de concreto na região de Florianópolis - SC**. Dissertação de mestrado em Engenharia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 184p.

GAO, Y.; ZHENG, Y.; ZHANG, J.; WANG, J. ZHOU, X; ZHANG, Y. Randomness of critical chloride concentration of reinforcement corrosion in reinforced concrete flexural members in a tidal environment. **Ocean Engineering**. v. 172, p. 330–341, 2019.

GAO, Y. H.; ZHANG, J. Z.; ZHANG, S.; ZHANG, Y. R. Probability distribution of convection zone depth of chloride in concrete in a marine tidal environment. **Construction and Building Materials**. V.140, p. 485-495, June, 2017.

GENTIL, V. **Corrosão**. 3ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 1996.

GHANEM, R.G.; SPANOS, P.D. **Stochastic finite elements: a spectral approach**. Rev Ed. New York: Dover, 2003.

GHODS, P.; CHINI, M.; ALIZADEH, R.; HOSEINI, M.; SHEKARCHI, M.; RAMEZANIANPOUR, A. The effect of different exposure conditions on the chloride diffusion into concrete in the Persian Gulf region, **Proceedings...** of the ConMAT Conference, Iran, 2005.

GLASS, G. K.; BUENFELD, N.R. The influence of chloride binding on the chloride induced corrosion risk in reinforced concrete. **Corrosion Science**. V. 42(2), p. 329–344, 2000.

GUIMARÃES, A. T. C. (2000). **Vida útil de estruturas de concreto armado em ambientes marítimos**. 241p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo.

GOÑI, S.; ANDRADE, C. Synthetic concrete pore solution chemistry and rebar corrosion rate in the presence of chlorides. **Cement and Concrete Research**, V. 20, p. 525-539, 1990.

GUIMARÃES, A. T. C., CASTRO, P. e NUNES, J. L.O. Teor de Cloretos Próximos a Superfície do Concreto em Ambientes Marítimos. In: 49º Congresso Brasileiro do Concreto, 2007, Bento Gonçalves. 49º Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2007.

GUSTAFSSON, M. E. R.; FRANZÉN, L. G. Dry deposition and concentration of marine aerosols in a coastal area, SW Sweden. **Atmospheric Environment**. V. 30, N. 6, p. 977- 989, 1996.

HAUSMANN, D. A. Steel corrosion in concrete: how does it occur? **Materials Protection**. p. 19-23, 1967.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Anual da Indústria da Construção (PAIC)** - **2016**. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/paic/quadros/brasil/2016>>. Acessado em: 01 de abril de 2019.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Órgão governamental com informações sobre o tempo e o clima no Brasil. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br>>. Acessado em: entre novembro de 2018 e fevereiro de 2019.

IZQUIERDO, D.; ALONSO, C.; ANDRADE, C. CASTELLOTE, M. Potentiostatic determination of chloride threshold values for rebar depassivation Experimental and statistical study. **Electrochimica acta**. V. 49, p. 2731-2739, May, 2004.

JAEGERMANN, C. Effect of water-cement ratio and curing on chloride penetration into concrete exposed to mediterranean sea climate. **ACI Materials Journal**. V. 87, N. 4, p.333-339, 1990.

JANSSEN, H.; BLOCKEN, B.; CARMELIET, J. Conservative modelling of the moisture and heat transfer in building components under atmospheric excitation. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. V. 50 (5-6), p.1128–1140, March, 2007.

JERONIMO, V. L (2014). **Estudo da durabilidade de concretos com adição de resíduos da indústria de cerâmica vermelha com foco na corrosão de armaduras.** Tese de Doutorado em Engenharia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 209p.

JOHANNESSON, B. F. A theoretical model describing diffusion of a mixture of different types of ions on pore solution of concrete coupled to moisture transport. **Cement Concrete Research**. V. 33 (4), p. 481–488, 2003.

JOSELINE, D.; KARUPPANASAMY, J.; DHANY, B. S.; PILLAI, R. G. Chloride Threshold of Prestressing Steel and Corrosion Initiation Time-Laboratory Tests and Case Study. In: NIGIS/CORCON, **Proceedings...**, New Delhi: CORCON; 2016. p. 1-9.

KASSIR, M. K.; GHOSN, M. Chloride-induced corrosion of reinforced concrete bridge decks. **Cement and Concrete Composites**. V 32 (1), p. 139-143, 2002.

KIÉSSÉ, T. S.; BONNET, S.; AMIRI, O.; Ventura, a. Analysis of corrosion risk due to chloride diffusion for concrete structures in marine environment. **Marine Structures**. V. 73, p. 1-12, July, 2020.

KIRKPATRICK, T. J.; WEYERS, R. E.; ANDERSON-COOK, C. M.; SPRINKEL, M. M. Probabilistic model for the chloride-induced corrosion service life of bridge decks. **Cement and Concrete Research**. V. 32, p. 1943-1960, 2002.

KOCH, G.H.. THOMPSON, N.G.; MOGHISSI, O.; PAYER, J.H.; VARNEY, J. **Impact - International Measures of Prevention Application and Economics of Corrosion Technology**, Technical Report, Houston: NACE International Institute, 2016. Disponível em: <<http://impact.nace.org/documents/Nace-International-Report.pdf>>. Acessado em 04 de abril de 2019.

KOKUBO, S.; ONO, M. Calculation model of airborne chloride ion for bridge. **Society for Social Management Systems Internet Journal**. V. 5 (1), 2009. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10173/1785>>. Acessado em 20 de dezembro de 2018.

KONG, J. S.; ABABNEH, A.; FRANGOPOL, D.; XI, Y. Reliability analysis of chloride penetration in saturated concrete. **Probabilistic Engineering Mechanics**. V. 17(3), p. 305-315, 2002.

KWON, S. J.; NA, U. J.; PARK, S. S.; JUNG, S. H. Service life prediction of concrete wharves with early-aged crack: Probabilistic approach for chloride diffusion. **Structural Safety**. V. 31 p. 75–83, 2009.

LARSEN, C. K. (1998). **Chloride Binding in Concrete – Effect of Surrounding Environment and Concrete Composition**. Thesis doctoral of Norwegian University of Science and Technology, 325p, 1999.

LEVY, S. M. (2001). **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. Tese de doutorado da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1999 p. 2001.

LIFE-365. Service Life Prediction Model and Computer Program for Predicting the Service Life and Life-Cycle Cost of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides. Users Manual. Version 2.2.3. December, 2020. Disponível em: <http://www.life-365.org/download/Life-365_v2.2.3_Users_Manual.pdf>. Acessado em 23 de dezembro de 2021.

LIN, G.; LIU, Y.; XIANG, Z. Numerical modeling for predicting service life of reinforced concrete structures exposed to chloride environments. **Cement and Concrete Composites.** V 32 (8), p. 571-579, 2010.

LINDVALL, A. Chloride ingress data from field and laboratory exposure—Influence of salinity and temperature. **Cement and Concrete Composites.** V. 29, p. 88-93, 2007.

LIU, J.; JIANG, Z.; ZHAO, Y.; ZHOU, H.; WANG, X.; ZHOU, H; XING, F.; LI, S.; ZHU, J.; LIU, W. Chloride Distribution and Steel Corrosion in a Concrete Bridge after Long-Term Exposure to Natural Marine Environment. **Materials.** V 13 (17), p. 3900-1-16, September, 2020.

LIU, J.; OU, G.; QIU, Q.; XING, F.; TANG, K.; ZENG, J. Atmospheric chloride deposition in field concrete at coastal region. **Construction and Building Materials.** V.190, p. 1015-1022, October, 2018.

LIU, J.; TANG, K.; PAN, D.; LEI, Z.; WANG, W.; XING, F. Surface Chloride Concentration of Concrete under Shallow Immersion Conditions. **Materials.** V 7 (9), p. 6620-6631, September, 2014.

LOUNIS, Z. Probabilistic Modeling of Chloride Contamination and Corrosion of Concrete Bridge Structures. Proceedings of the Fourth International Symposium on Uncertainty Modeling and Analysis, **Proceedings...**, Maryland: ISUMA '03, p. 1-5, 2003.

LU, C.; GAO, Y.; CUI, Z.; LIU, R. Experimental Analysis of Chloride Penetration into Concrete Subjected to Drying–Wetting Cycles. **Journal of materials in civil engineering.** V. 27(12), p. 1-10, April, 2015.

MAHESWARAN, T.; SANJAYAN, J. G. A semi-closed-form solution for chloride diffusion in concrete with time-varying parameters. **Cement and Concrete Research.** V. 56(6), p. 359–366., 2004.

MALHEIROS, R. L. M. C. (2008). **Influência do revestimento de argamassa no transporte de cloretos em estruturas de concreto armado inseridas no meio urbano.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 144f.

MANGAT, P. S.; MOLLOY, B. T. Prediction of long term chloride concentration in concrete. **Materials and Structures.** V. 27, p.338-346, 1994.

MARKESET, G. Critical chloride content and its influence on service life predictions. **Materials and Corrosion.** V. 60 (8), p. 593-596, 2009.

MARKESET, G.; SKJØLSVOLD, O. Time Dependent Chloride Diffusion Coefficient – Field Studies of Concrete Exposed to Marine Environment in Norway, Norway, 2010.

MARTIN-PEREZ, B (1999). **Service life modeling of RC highway structures exposed to chloride.** Thesis doctoral of University of Toronto, 185p, 1999.

MARTIN-PEREZ, B.; Pantazopoulou, s. j. Thomas, m. d. Numerical solution of mass transport equations in concrete structures. **Computers & Structures.** v. 79, n 13 p 1251-1261, 2001.

MARTIN-PEREZ, B.; LOUNIS, Z. Numerical modelling of service life of reinforced concrete structures. In: Proceedings of 2nd international RILEM workshop on Life prediction and aging management of concrete structures, **Proceedings...**, Paris, 2003, p. 71–79.

McKAY, W. A.; GARLAND, J. A; LIVESLEY, D.; HALLIWELL, C. M.; WALKER, M. I. The Characteristics of the shore-line sea spray aerosol and the landward transfer of radionuclides discharged to coastal sea water. **Atmospheric Environment.** v. 28, n 20 p 3299-3309, 1994.

MEDEIROS-JR, R. A.; LIMA, M.G.; BRITO, P. C.; MEDEIROS, M. H. F. Chloride penetration into concrete in an offshore platform-analysis of exposure conditions. **Ocean Engineering**, V. 103 (115), p. 78-87, July, 2015.

MEIJERS, S. J. H; BIJEN, J. M. J. M; DE BORST, R.; FRAAIJ, A. L. A. Computational results of model for chloride ingress in concrete including convection, drying-wetting cycles and carbonation. **Materials Structure.** V. 38(276). p. 145–54, 2005.

MEIRA, G. R.; PADARATZ, I. J. Efeito do distanciamento em relação ao mar na agressividade por cloretos. In: 44º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. **Anais...** Belo Horizonte, IBRACON, 2002.

MEIRA G. R.; PADARATZ I. J.; ALONSO, C.; ANDRADE, C. Effect of distance from the sea on chloride aggressiveness in concrete structures in Brazilian coastal site. **Materiales Construcción.** V. 53 (271–272), p.179–88, 2003.

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, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 369p.

MEIRA, G. R.; PADARATZ I. J.; ALONSO, C.; ANDRADE, C. Effect of distance from the sea on chloride aggressiveness in concrete structures in Brazilian coastal site. **Construction and Building Materials.** V. 53(271–272), p.179–188, 2005.

MEIRA, G. R.; ANDRADE, C.; PADARATZ I. J.; ALONSO, C.; BORBA Jr., J. C. Measurements and modelling of marine salt transportation and deposition in a tropical region in Brazil. **Atmospheric Environment**. V.40, p.5596-5607, 2006.

MEIRA, G. R.; ANDRADE, C.; PADARATZ, I. J.; ALONSO, C.; BORBA Jr., J. C. Chloride penetration into concrete structures in the marine atmosphere zone – Relationship between deposition of chlorides on the wet candle and chlorides accumulated into concrete. **Cement and Concrete Composites**. V.29, p. 667-676, 2007.

MEIRA, G. R.; ANDRADE, C.; ALONSO, C.; PADARATZ, I. J.; BORBA Jr., J. C. Modelling sea-salt transport and deposition in marine atmosphere zone - A tool for corrosion studies. **Corrosion Science**. V 50 (9), p. 2724-2731, 2008.

MEIRA, G. R.; ANDRADE, C.; PADARATZ, I. J.; ALONSO, M. C.; BORBA Jr., J. C. Durability of concrete structures in marine atmosphere zones – The use of chloride deposition rate on the wet candle as an environmental indicator. **Cement and Concrete Composites**. V. 27, p. 667 – 676, 2010.

MEIRA, G. R.; ANDRADE, C.; VILAR, E. O.; NERY, K. D. Analysis of chloride threshold from laboratory and field experiments in marine atmosphere zone. **Construction and Building Materials**. V. 55, p. 289 -298, 2014.

MEIRA, G. R.; PINTO, W. T. A., LIMA, E. E. P. ANDRADE, C.; Vertical distribution of marine aerosol salinity in a Brazilian coastal area – The influence of wind speed and the impact on chloride accumulation into concrete. **Construction and Building Materials**. V.135, p. 287-296, 2017a.

MEIRA, G. R. **Corrosão de armaduras em estruturas de concreto: Fundamentos, diagnóstico e prevenção**. João Pessoa; Ed. IFPB, 2017b. p. 25-26, 31-42,49-74.

MEIRA, G. R.; FERREIRA, P. R. R.; FREITAS, M. S.; ANDRADE, C. Behaviour of Surface Chloride Concentration in Concretes Subjected to Field Exposure in Marine Atmosphere Zone. In: Proceedings of XV International Conference on Durability of Building Materials and Components (DBMC 2020). **Proceedings...**, Barcelona, 2020, p. 1–8.

METROPOLIS, N.; ULAM, S. The Monte Carlo method. **Journal of American Statistical Association**. V. 44(247), p. 335-341, 1949.

MORCILLO, M.; CHICO, B.; OTERO, E.; MARIACA, L. Effect of marine aerosol on atmospheric corrosion. **Materials Performance**. V. 38, p. 72-77, 1999.

- MUSTAFA, M. A.; YUSOF, K. M. Atmospheric chloride penetration into concrete in semitropical marine environment. **Cement and Concrete Research.** V. 24(4), p.661-670, 1994.
- NANUKUTTAN, S.V.; BASHEER, L.; MCCARTER, W.J.; ROBINSON, D.J.; MUHAMMED BASHEER, P.A. Full-scale marine exposure tests on treated and untreated concretes-initial 7-year results. **ACI Materials Journal.** V. 105, p.81-87, 2008.
- NEVILLE, A. Chloride attack of reinforced concrete: an overview. **Materials Structure.** V. 28, p. 63-70, 1995.
- NIELSEN, E. P.; GEIKER, M. Chloride diffusion in partially saturated cementitious material. **Cement and Concrete Research.** V. 33 p.133-138, 2003.
- NILSSON, L. O.; SANDBERG, P. POULSEN, E.; SORENSEN H. E.; KLINGHOFFER, O. HETEK, chloride penetration into concrete: state of the Art. **Proceedings ...** Copenhagen: Danish Road Directorate, p.21–35, 1996.
- NILSSON, L. O.; ANDERSEN, A.; TANG, L; UTGENANNT, P. Chloride ingress data from field exposure in a Swedish road environment. In: 2nd International RILEM Workshop on Testing and Modelling Chloride Ingress into Concrete. **Proceedings...** Paris: RILEM, 2000.
- NITHIARASU, P.; LEWIS, R. W.; SEETHARAMU, K. N. **Fundamentals of Finite Element Method for heat and mass transfer.** 2º edition, West Sussex: Ed. Wiley, 2016. p. 39-86, 321-342.
- OH, B. H.; JANG, S. Y. Effects of material and environmental parameters on chloride penetration profiles in concrete structures. **Cement and Concrete Research.** V. 37, p. 47–53, 2006.
- PACK, S.; JUNG, M.; SONG, H.; KIM, S. H.; ANN, K. Y. Prediction of time dependent chloride transport in concrete structure exposed to a marine environment. **Cement and Concrete Research.** V. 40(2), p. 302–312, 2010.
- PAGE, C.; SHORT, N.; TARRAS, A. E. Diffusion of chloride ions in hardened cement pastes. **Cement Concrete Research.** V. 11, p.395–406, 1981.
- PARK, J.; LEE, K.; KWON, S.; BAE, S.; JUNG, S.; YOO, S. Diffusion Decay Coefficient for Chloride Ions of Concrete Containing Mineral Admixtures. **Advances in Materials Science and Engineering.** V. 2016, p. 1-11, 2016.
- PETCHERDCHOO, A. Probability-Based Sensitivity of Service Life of Chloride-Attacked Concrete Structures with Multiple Cover Concrete Repairs. **Advances in Civil Engineering.** V. 2018, p.1-17, 2018.

PETELSKI, T.; CHOMKA, M. The Marine aerosol over the coastal zone. **Journal of Aerosol Science**. V.29(1), p. S697-S698, 1998.

PHAM, N. D.; KURIYAMA, Y.; KASAI, N.; OKAZAKI, S.; SUZUKI, K. A new analysis of wind on chloride deposition for long-term aerosol chloride deposition monitoring with weekly sampling frequency. **Atmospheric Environment**. V.198, p.46-54, 2019.

PIAZZOLA, J. DESPIAU, S. Contribution of marine aerosol in the particle size distribution observed in Mediterranean coastal zone. **Atmospheric Environment**. V. 18, p. 2991-3009, 1997.

PIDD, M. **Computer Simulation in Management Science**. 5º edition. West Sussex: Ed. Wiley, 2004. p. 145-211.

POLDER, R. B. Critical chloride content for reinforced concrete and its relationship to concrete resistivity. **Materials and corrosion**. V. 60 (8). p. 623-630, 2009.

POLDER, R. B.; PEELEN, W. H. A. Characterization of chloride transport and reinforcement corrosion in concrete under cyclic wetting and drying by electrical resistivity. **Cement & Concrete Composites**. V. 24 p. 427–435, 2002.

POMIANOWSKI, M.; HEISELBERG, P.; JENSEN, R. L.: CHENG, R.; ZHANG, Y. A new experimental method to determine specific heat capacity of inhomogeneous concrete material with incorporated microencapsulated-PCM. **Cement and Concrete Research**. V. 55, p. 22–34, 2014.

PONTES, R. B. (2006). Disseminação de íons cloretos na orla marítima do bairro de Boa Viagem, Recife-PE. Dissertação de Mestrado em Engenharia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Católica de Pernambuco, 123p.

POURBAIX, M. **Lecciones de corrosión electroquímica**. 3º edition. Bruxelas: CEBELCOR, 1987, p.387.

PRATA, A. L. C. (2017). **Medição da concentração de cloreto na atmosfera urbana de Aracaju/SE**. Monografia de Bacharelado em Engenharia, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Federal de Sergipe, 148p.

ROMERO, F. B. et al. **Estudo e diagnóstico do comportamento do aço carbono 1010 nas condições atmosféricas de Fortaleza**. Relatório UFC & NUTEC, 1991.

ROSS, S. M. **A First Course in Probability**. 8º edition, New Jersey: Ed. Pearson Education, 2008. p. 186-219.

ROY, S. K.; CHYE, L. K.; NOTHWOOD, D. O. Chloride ingress in concrete as measured by field exposure tests in the atmospheric, tidal and submerged zones of a tropical marine environment. **Cement and Concrete Research.** V. 23(6), p. 1289-1306, November, 1993.

SALTA, M. M.; MELO, A. P.; RICARDO, J.; POVOA, A. Chloride profiles in a coastal bridges. **Structure and Infrastructure Engineering.** V. 8 (6), p. 583-594, November, 2008.

SALTA, M. M.; MELO, A. P.; GARCIA, N.; PEREIRA, E. V.; RIBEIRO, A. B. Chloride transport in concrete from lab test in situ performace. Proceedings of International RILEM Workshop on Performace Based Evaluation and Indicators for concrete Durability. **Proceedings...** Madrid: RILEM, 2006, p. 19-21.

SANDBERG, P.; TANG, L.; ANDERSEN, A. Recurrent studies of chloride ingress in uncracked marine concrete at various exposure times and elevations. **Cement and Concrete Research.** V. 28, p. 1489-1503, October, 1998.

SAFEHIAN, M.; RAMEZANIANPOUR, A.A. Prediction of RC structure service life from field long term chloride diffusion. **Computers and Concrete.** V. 15 p. 589-606, 2015.

SAETTA, A.V.; SCOTTA, R.V; VITALIANI, R.V. Analysis of chloride diffusion into partially saturated concrete. **ACI Mater Journals.** V 90 (5), p. 441–451, 1993.

SENGUL, O. Probabilistic Design for the Durability of Reinforced Concrete Structural Elements Exposed to Chloride Containing Environments. **Teknik Dergi.** V. 22 (2), p. 5409-5423, 2011.

SHAKOURI, M.; TREJO, D. A time-variant model of surface chloride build-up for improved service life predictions. **Cement and Concrete Composites.** V. 84, p.99-110, November, 2017.

SICA, Y. C. (2006). Mapeamento da corrosividade atmosférica de São Luís – MA e a correlação das variáveis ambientais que influenciaram na degradação dos materiais metálicos. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Ciências dos Materiais – Universidade Federal do Paraná – UFPR, 145p.

SILVA, F. A. de S. (2011). **Avaliação do teor de íons cloretos no ar atmosférico da praia do futuro em Fortaleza/CE.** Monografia de Bacharelado em Engenharia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ceará, 71p.

SILVESTRO, L.; ROMANO, F. S.; DAL MOLIN, D. C. C. Penetração de cloretos em concretos expostos em zona de atmosfera marinha por um período de 9 anos. **Ambiente Construído.** V. 21(1), p. 101-118, Janeiro-Março, 2021.

SONG, H.; LEE, C.; ANN, K. Y. Factors influencing chloride transport in concrete structures exposed to marine environments. **Cement and Concrete Composites.** V 30 (2), p. 113-121, 2008.

SONG, H.; PACK, S.; ANN, K. Y. Probabilistic assessment to predict the time to corrosion of steel in reinforced concrete tunnel box exposed to sea water. **Construction and Building Materials.** V.23, p. 3270-3278, 2009.

SPIEL, D. E.; LEEUW, G. Formation and production of sea spray aerosol. **Journal of Aerosol Science,** V. 27(1), p. S65-S66, 1966.

STEWART, M. G.; ROSOWSKY, D. V. Time-Dependent Reliability of Deteriorating Reinforced Concrete Bridge Decks. **Structural Safety.** V. 20, p. 91-109, 1998.

STEWART, N. G.; MULLARD, J. A. Spatial time-dependent reliability analysis of corrosion damage and the timing of first repair for RC structures. **Engineering Structures.** V. 29, p.1457-1464, 2007.

STEWART, N. G.; SOU, Q. Extent of spatially variable corrosion damage as an indicator of strength and time-dependent reliability of RC beams. **Engineering Structures.** V. 31, p.198-207, 2009.

STIPANOVIC, I.; BJEGOVIC, D.; MIKULIC, D.; SERDAR, M. Time dependent changes of durability properties os concrete from Maslenica Bridge at The Adriatic Coast. Proceedings of International RILEM Workshop on Integral Service Life Modelling of Concrete Structures. **Proceedings...** Paris: RILEM, 2013, p. 87-96.

SWAMY, R. N.; HAMADA, H.; LAIW, J. C. A critical evaluation of chloride penetration into concrete in marine environment. In: Proceedings of The International Conference On Corrosion And Corrosion Protection Of Steel In Concrete (Edited by Swamy, 1994: Sheffield - UK). **Proceedings ...** Sheffield: Sheffield Academic Press, 1994. p. 404 – 419.

SWATEKITITHAM, S.; OKAMURA, H.; NASU, S. Modeling of the surface chloride reduction due to excess absorbability. **Society for Social Management Systems Internet Journal.** V 3 (1), 2007. Disponível em:< <http://hdl.handle.net/10173/1658>>. Acessado em 15 de janeiro de 2019.

SWATEKITITHAM, S.; OKAMURA, H. Low chloride distribution in concrete structure near seashore. **Journal of Japan Society of Civil Engineers.** V. 62 (1), p. 221-229, 2006.

SWATEKITITHAM, S. **Computational model for chloride concentration at surface of concrete under actual environmental condition.** Thesis doctoral of Kochi University of Technology, 178p, 2004.

TADAYON, M. H.; SHEKARCHI, M.; TADAYON, M. Long-term field study of chloride ingress in concretes containing pozzolans exposed to severe marine tidal zone. **Construction and Building Materials.** V. 123 p. 611-616, October, 2016.

TAVARES, F (2013). **Coupled model of initiation and propagation of corrosion in reinforced concrete.** Tesis doctoral of Universidad Politécnica de Madrid, 166p, 2013.

TANG, L.; ANDERSEN, A. 2000, Chloride ingress data from five years field exposure in a Swedish marine environment. Proceedings of the 2nd International RILEM Workshop on Testing and Modelling the Chloride Ingress into Concrete. **Proceedings...** Paris: RILEM, 2000, p. 105-119.

TANG, L.; NILSSON, L.-O. Chloride binding capacity and binding isotherms of OPC pastes and mortars. **Cement and Concrete Research.** V. 23, p. 247-253, 1993.

TANG, L.; NILSSON, L. O. Service life prediction for concrete structures under seawater by a numerical approach. In: Durability of Building Materials and Components (Edited by SJÖSTRÖM). **Proceedings...,** London: E & FN Spon, 1996, p. 97-106.

TANG, L. P. **Chloride Ingress in Concrete Exposed to Marine Environment: Field Data Up to 10 Years Exposure.** Sweden, 2003.

TIBA, C.; FRAIDENRAICH, N.; MOSZKOWICZ, M.; CAVALCANTE, E. S. C.; LYRA, F. J. M.; NOGUEIRA, A. M. B.; GALLEGOS, H. G. **Atlas Solarimétrico do Brasil : banco de dados solarimétricos.** Recife: Ed. Universitária da UFPE, p.116, 2000.

THOMAS, M. D. A.; BAMFORTH, P B. Modelling chloride diffusion in concrete: effect of fly ash and slag. **Cement and Concrete Research.** V. 29(4), p. 487-495, 1999.

THOMAS, M. D. A.; MATTHEWS, J.D.; HAYNES, C. A. Chloride diffusion and reinforcement corrosion in marine exposed concretes containing pulverized-fuel ash. In: Corrosion of Reinforcement in Concrete, 1990, Warwickshire (Edited by PAGE, C. L., TREADAWAY, K. W. J.; BAINFORT, P. B) **Proceedings...** Warwickshire: SCI, 1990. p. 198-212.

TREADAWAY, K. Corrosion period. In: SCHIESSL, P., Ed. Corrosion of steel in concrete. **Proceedings...** London, Chapman and Hall, 1988. p. 56-59.

TREJO, D.; PILLAI, R. G. Accelerated Chloride Threshold Testing: Part I - ASTM A 615 and A 706 Reinforcement. **ACI Materials Journal**. V 100. n 1. p. 519 – 527, 2003.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. Sweden: CBI, 1982. p. 468.

TUUTTI, K. 1993. The effect of individual parameters on chloride induced corrosion. In: Chloride Penetration Into Concrete Structures (Edited by NILSSON, L.O.). **Proceedings...** Goteborg, 1993, p.18–25.

UJI, K.; MATSUOKA, Y.; MARUYA, T. Formulation of equation for surface chloride content of concrete due to permeation of chloride. In: Corrosion of Reinforcement in Concrete. (Edited by Page, 1990: UK). **Proceedings...** Belfast: SCI, 1990. p. 258-267.

UNECE - United Nations Economic Commission for Europe. **Ranking of the Economy Indicator of 2018: Statistical Database**. Genebra, 2019. Disponível em:<<https://w3.unece.org/PXWeb/en/CountryRanking?IndicatorCode=8>>. Acessado em 06 de abril de 2019.

US BEA - United States Bureau of Economic Analysis. **Digital Economy Accounted for 6.9 Percent of GDP in 2017**. Disponível em: <<https://www.bea.gov/data/gdp/gdp-industry>> ou <<https://www.bea.gov/news/blog/2019-04-04/digital-economy-accounted-69-percent-gdp-2017>>. Acessado em 06 de abril de 2019.

VAL, D. V.; TRAPPER, P. A. Probabilistic evaluation of initiation time of chloride-induced corrosion. **Reliability Engineering and System Safety**. V. 93, pp. 364–372, 2008.

VERA, G.; ANTON, C.; LOPEZ, M. P.; CLIMENT, M. A. Depassivation time estimation in reinforced concrete structure exposed to chloride ingress: A probabilistic approach. **Cement and Concrete Research**. V. 79, p. 21-33, 2017.

VILASBOAS, J. M. L. (2013). **Estudo dos mecanismos de transporte de cloreto no concreto, suas inter-relações e influência na durabilidade de edificações na cidade do Salvador-BA**. Tese de Doutorado em Energia e Ambiente – Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, 323p.

VITALI, M. R. V. (2013). **Efeito do distanciamento ao mar da contaminação do concreto por cloreto**. Dissertação de Mestrado em Engenharia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 208p.

VALIPOUR, M.; PARGAR, F.; SHEKARCHI, M.; KHANI, S.; MORADIAN, M. In situ study of chloride ingress in concretes containing natural zeolite, metakaolin and silica fume exposed to

various exposure conditions in a harsh marine environment. **Construction and Building Materials.** V. 46, p. 63-70, 2013.

WAI, K.; TANNER, P. A. Wind-dependent sea salt aerosol in a Western Pacific coastal area. **Atmospheric Environment.** V.38, p.1167-1171, 2004.

WANG, Y.Z.; WU, L.J.; WANG, Y.C.; LI, Q.M.; XIAO, Z. Prediction model of long-term chloride diffusion into plain concrete considering the effect of the heterogeneity of materials exposed to marine tidal zone. **Construction and Building Materials.** V. 159 p. 297-315, 2018.

WATTANAPORNPROM, R.: ISHIDA, T. Comprehensive numerical system for predicting airborne chloride generation and its ingress in concrete under actual environmental conditions. **Journal of Advanced Concrete Technology.** V. 16, p.18-35, January, 2018.

WATTANAPORNPROM, R.: ISHIDA, T. Modeling of chloride penetration into concrete under airborne chloride environmental conditions combined with washout effects. **Journal of Advanced Concrete Technology.** V. 15, p.126-142, March, 2017.

WILKINS, N. J. M.; SHARP, J. V. Localized corrosion of reinforcement in marine concrete. In: Corrosion of Reinforcement in Concrete, 1990, Warwickshire (Edited by PAGE, C. L., TREADAWAY, K. W. J.; BAINFORT, P. B.) **Proceedings...** Warwickshire: SCI, 1990, p.3-18.

WU, L.; WEI, L.; YU, X. Time-dependent chloride penetration in concrete in marine environments. **Construction and Building Materials.** V. 152, p. 406-413, 2017.

WU, L.; KOU, X.; JIANG, M. Probabilistic corrosion initiation time assessment of existing concrete structure under marine environment. **Arabic journal of science engineering.** V. 40, p. 3099-3105, July, 2015.

XI, Y.; BAZANT, Z. P.; JENNINGS, H. M. Moisture diffusion in cementitious materials: Adsorption isotherms. **Advanced Cement Based Materials.** V. 1 (6), p. 248-257, 1994.

YANG, L. F.; CAI, R.; YU, B. Investigation of computational model for surface chloride concentration of concrete in marine atmosphere zone. **Ocean Engineering.** V.38, p.1167-1171, 2017.

YATES, R. D.; GOODMAN, D. J. **Probabilidade e processos estocásticos.** 3º Edição, Rio de Janeiro: Ed. LTC, 2016.

ZEZZA, F.; MACRI, F. Marine aerosol and stone decay. **The Science of the Total Environment,** V. 167, p. 123-143, 1995.

ZIBARA, H. (2001). **Binding of External Chlorides by Cement Pastes.** Thesis doctoral of University of Toronto, 342p, 2001.

ZIENKIEWICZ, O. C.; MORGAM, K. **Finite elements and approximation.** Co-edição, New York: Ed. Dover, 1983. p. 1-118, 161-169, 266-308.

ZHANG. Y.; ZHOU, X.; ZHANG. Y.; ZOU, C.; CAO, Y.; ZHANG. J. Randomness of bidirectional chloride corrosion of sluice gate and time to corrosion initiation of reinforcement in a strong tidal environment. **Construction and Building Materials.** V.227, p. 1-12, August, 2019.

ZHANG, Y.R.; ZHANG, Y.; HUANG, J.; ZHUANG, H.X.; ZHANG, J.Z. Time dependence and similarity analysis of peak value of chloride concentration of concrete under the simulated chloride environment. **Construction and Building Materials.** V. 181, p. 609-617, 2018.

ZHANG, B.L.; WEI, S.S. Decade exposure test of harbor reinforced concrete for 10 years. **South China Harbour Engineering.** V. 98, p. 32-40, 1998.

ZHOU, S. Analytical Model for Square Root Increase of Surface Chloride Concentration and Decrease of Chloride Diffusivity. **Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE).** V. 28(4), p.040151811-040151817, 2016.

ZIMMERMANN, L. **Korrosionsinitierender Chloridgehalt von Stahl in Beton.** ETH Zurich, Switzerland (2000).

ZUQUAN, J.; XIA, Z.; TIEJUN, Z.; JIANQING, L. Chloride ions transportation behavior and binding capacity of concrete exposed to different marine corrosion zones. **Construction and Building Materials.** V.177(20), p. 170-183, July, 2018.