

Modelos preditivos de vida útil de estruturas de concreto sujeitas à iniciação da corrosão de armaduras por cloretos: contribuição ao estado da arte por meio de revisão sistemática da literatura – Parte 2

Service life prediction models of concrete structures subjected to the initiation of reinforcing steel corrosion by chloride ions: contribution to the state of the art through systematic literature review – Part 2

Rayane Campos Lopes¹ , Andrielli Morais de Oliveira¹ , Oswaldo Cascudo¹ 

¹Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Laboratório de Inovação Tecnológica em Construção Civil. Av. Universitária, nº 1488, Qd. 86, Lt. Área, Setor Universitário, 74.605-220, Goiânia, GO, Brasil.

e-mail: rayaneclopes@discente.ufg.br, andriellimorais@ufg.br, ocascudo@ufg.br

RESUMO

Vários modelos para predição de vida útil de estruturas de concreto armado simulam o ingresso de agentes agressivos, como os cloretos, geralmente baseados em leis de difusão modificadas ou em propostas de transporte de multi espécies, considerando diversos parâmetros. Sua aplicação pode aprimorar a eficiência e a otimização do projeto e da vida útil em serviço de estruturas em concreto armado. O presente artigo contempla a parte 2 de resultados de uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) com o objetivo de descrever, analisar e classificar os modelos selecionados em determinísticos ou probabilísticos e em empíricos, analíticos e/ou numéricos. Como resultado, observou-se que a maioria dos modelos considerados é baseada na Segunda Lei de Fick, modificada ou não. Além disso, 72% deles são analíticos. Entre os probabilísticos, o método numérico mais utilizado foi a simulação de Monte Carlo. Adicionalmente, outras análises foram realizadas, como os métodos para o cálculo do coeficiente de difusão (D), os teores críticos (C_{cr}) utilizados, a forma de consideração da não saturação do concreto, fixação de cloretos, fissuras, a direção de penetração dos cloretos, entre outros. Apesar de todos os modelos serem uma simplificação da realidade, trazendo algumas ponderações e limitações, observou-se uma evolução dessas ferramentas para maiores níveis de complexidade.

Palavras-chave: Concreto armado; Modelos preditivos; Vida útil; Corrosão da armadura; Cloretos.

ABSTRACT

Several models for predicting the service life of reinforced concrete structures model the entry of aggressive agents, such as chlorides, generally based on modified diffusion laws or on multi chemical species transport models, considering different parameters. The application of these models can improve the efficiency and optimization of the design and service life of reinforced concrete structures. This article contemplates part 2 of the Systematic Literature Review (RSL) results with the aim of describing, analyzing and classifying the selected models in deterministic or probabilistic and in empirical, analytical and/or numerical models. As a result, it was observed that most of the models considered are based on Fick's Second Law, modified or not modified. In addition, 72% of the models are analytical. Among the probabilistic models, the most used numerical method was the Monte Carlo simulation. Besides that, supplementary analyzes were made, such as the methods for calculating the diffusion coefficient (D), the critical contents (C_{cr}) used, the consideration of the non-saturation of the concrete by the models, chloride binding, cracks, the direction of penetration of the chlorides, among others. Although all models are a simplification of reality, attached some considerations and limitations, there was an evolution of predictive models to higher levels of complexity.

Keywords: Reinforced concrete; Predictive models; Service life; Reinforcement corrosion; Chlorides.

1. INTRODUÇÃO

O avanço do conhecimento em corrosão [1], penetração de íons cloretos [2, 3], dos mecanismos de transporte de agentes agressivos no concreto e dos mecanismos de deterioração das estruturas permitiu progresso no estudo da durabilidade de estruturas de concreto armado [4, 5] e possibilitou a criação de modelos preditivos de vida útil.

Em ambientes marinhos, em que a corrosão das armaduras em estrutura de concreto se destaca como o principal mecanismo de degradação [6], esses modelos preditivos, quando consideram somente o período de iniciação, em uma abordagem a favor da segurança [7, 8], geralmente consistem na modelagem do ingresso ou penetração de cloretos no concreto até a despassivação da armadura. Vários modelos que descrevem o ingresso de cloretos no concreto armado foram elaborados nos últimos anos, geralmente baseados em leis de difusão modificadas ou em modelos de transporte de multiespécies, sendo que o uso de uma abordagem probabilística vem aumentando [9].

BAROGHEL-BOUNY *et al.* [7] classificaram os modelos preditivos de carbonatação, outra forma de indução da corrosão, em empírico, analítico e numérico. O objetivo dos autores foi o de estabelecer categorias e complexidades diferentes nesses modelos. Assim, os modelos empíricos não se baseiam em dados físicos, possuem limitações e há a necessidade de calibração para prever o comportamento futuro. Os modelos analíticos consideram como dados de entrada os indicadores de desempenho quanto à durabilidade de forma direta ou indireta com boa representatividade no geral e com simplicidade, porém não representam de forma detalhada as reações. Eles consideram simplificada a dependência entre materiais e fatores ambientais. Já os modelos numéricos consideram os mecanismos de transporte em concreto não saturado e a cinética das reações, entre outros. Ademais, nos modelos numéricos, há a necessidade do uso de métodos numéricos para solução do alto grau de complexidade de interações e de efeitos sinérgicos de diferentes fatores.

Este artigo (Parte 2) apresenta resultados de uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) realizada com o objetivo de identificar, descrever e analisar (de forma detalhada) as principais características, usos e limitações de modelos preditivos de estruturas em concreto armado, situadas em ambientes marinhos, e que consideram somente a fase de iniciação da corrosão, induzida por cloretos. Foram apresentados na primeira parte do artigo (Parte 1) [10], a metodologia detalhada da RSL, os resultados bibliométricos e uma breve apresentação dos modelos obtidos. O presente artigo (Parte 2) completa a abordagem proposta, cumprindo os objetivos acima mencionados.

2. CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA REALIZADA

Os critérios e a metodologia de busca de artigos utilizada na RSL foram descritos na Parte 1 do artigo, trazendo o passo a passo dessa revisão para responder quais são os principais modelos preditivos de vida útil de estruturas de concreto em ambiente marinho, considerando somente a fase de iniciação da corrosão das armaduras induzida por cloretos, dentro do conceito contemporâneo de *vida útil de projeto*. A busca foi realizada em quatro bases de dados internacionais: *Engineering Village*, *Science Direct*, *Scopus* e *Web of Science*. Como critério de inclusão final foram selecionados artigos que calcularam o tempo de vida útil do concreto armado, devido à corrosão induzida por cloretos, somente no período de iniciação. Vários critérios de exclusão foram adotados, a saber: artigos que consideravam carbonatação, fase de propagação, saís de degelo como fonte de cloretos e concreto totalmente saturado, entre outros. Os concretos saturados foram excluídos com o objetivo de avaliar modelos utilizados em situações teoricamente mais complexas, em que outros mecanismos de transporte, além da difusão, estão presentes no ingresso de cloretos na rede porosa do concreto, como a convecção. Além disso, estruturas de concreto parcialmente submersas e/ou com ações de molhagem e secagem representam situações em que o ingresso de cloretos são mais severas. Após três fases de seleção, os artigos aderidos passaram por um levantamento bibliométrico, cujos resultados estão apresentados na Parte 1.

Na Parte 2, o foco é a análise qualitativa dos modelos obtidos, a partir da RSL, com a descrição detalhada e a classificação deles. De acordo com a abordagem e a aplicação, os modelos podem ser classificados em determinísticos ou probabilísticos, conforme HELENE [4] (visto na Parte 1). Os métodos determinísticos estimam à previsão de um valor único da vida útil da estrutura, já os probabilísticos consideram a variabilidade dos fenômenos e dão como resultado, geralmente, a previsão da vida útil baseada em uma probabilidade de falha da estrutura.

Os modelos preditivos de vida útil das estruturas de concreto, listados neste artigo seguem uma classificação adaptada de BAROGHEL-BOUNY *et al.* [7] (Tabela 1), sendo, portanto, classificados em empíricos, analíticos ou numéricos. Embora essa classificação seja inicialmente realizada para os modelos de carbonatação, ela foi escolhida e proposta também para modelos de cloretos, os quais também podem conduzir à corrosão das armaduras. Esse processo de corrosão por cloretos, geralmente são baseados nas leis de Fick em que a difusão é o principal mecanismo de transporte). Os modelos analíticos podem, em uma classificação secundária, ser específicos ou resolvidos numericamente.

3. RESULTADOS DA RSL – MODELOS PREDITIVOS DE VIDA ÚTIL

3.1. Resumo dos modelos

A busca feita retornou 1381 documentos e, após todas as etapas de exclusão, houve a adesão de 50 artigos.

Foram identificados 40 modelos diferentes, apresentados na Tabela 2, aplicados 68 vezes nos 50 artigos aderidos, sendo utilizados de forma determinística ou probabilística. Dentro desse total, existem modelos que já foram criados com uma abordagem probabilística, como o DuraCrete (2000), e também modelos que em princípio são determinísticos, porém também foram aplicados de forma probabilística, como a própria Segunda Lei de Fick (solução de Crank). Como mostrado no gráfico da Figura 1, 52 aplicações dos modelos (equivalente a 76%) foram de forma determinística, 15 aplicações (22%) foram probabilísticas e apenas uma aplicação (2%) ocorreu de forma semi-probabilística. Além disso, o mesmo modelo pode ser calculado considerando essas duas diferentes abordagens, como foi evidenciado em DO *et al.* [11] e KWON *et al.* [12]. KHATRI e SIRIVIVATNANON [13] utilizaram uma abordagem semi-probabilística, ao calcularem a variação da vida útil da estrutura de concreto a partir dos desvios-padrão do coeficiente de difusão (D), concentração superficial (C_s), teor crítico de cloretos (C_{cr}) e do cobrimento, em uma abordagem mais simples que a probabilística.

3.2. Descrição dos modelos

Pela Tabela 2, fica claro que a maioria dos modelos selecionados é baseada na Segunda Lei de Fick, com diversas modificações que tentam melhorar essa solução. Para facilitar a compreensão, os modelos apresentados anteriormente estão descritos a seguir, conforme a ordem apresentada na Tabela 2, que se baseia na complexidade dos modelos. No conteúdo que segue, a ideia é subsidiar o artigo com mais informações e detalhes dos modelos

Tabela 1: Critérios de classificação dos modelos preditivos, baseando-se na classificação adaptada de BAROGHEL-BOUNY *et al.* [7].

CLASSIFICAÇÃO PRINCIPAL	CARACTERÍSTICAS	CLASSIFICAÇÃO SECUNDÁRIA
Empírico	Não são baseados em mecanismos de transporte. São geralmente modelos matemáticos. Necessidade de calibração constante.	—
Analítico	Indicadores de desempenho de durabilidade, como dados de entrada. Consideração dos mecanismos de transporte de forma simplificada (somente difusão pela Segunda Lei de Fick). São modelos físicos.	Específico: modelo aplicado somente para tipo específico de concreto. Resolvido numericamente.
Numérico	Mecanismos de transporte no concreto não saturado. Simulação numérica do transporte de cloretos no concreto com o uso de métodos numéricos.	—

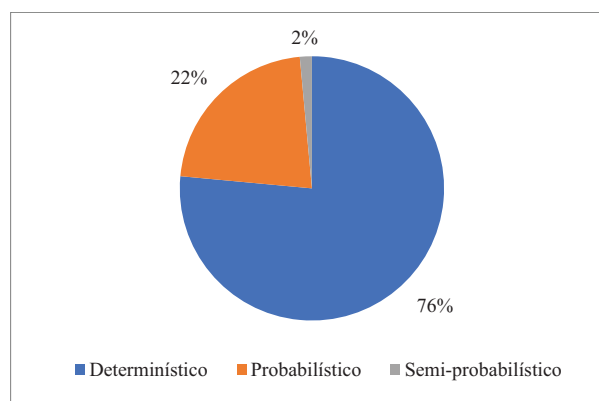


Figura 1: Classificação dos modelos utilizados em determinísticos, probabilísticos e semi-probabilísticos.

Tabela 2: Modelos preditivos de vida útil identificados.

MODELO	DESCRIÇÃO	EQUAÇÕES	CLASSIF.			APL.		VARIÁVEIS		TIPO DE CONCRETO	CÁLC. D	MECANISMO TRANSP.	FIXAÇÃO	ΔT	ΔH	FISSURAS
			A	N	E	D	P	ENTRADA	SAÍDA							
Segunda Lei de Fick* ^R	Fick – solução de Crank – D e Cs constantes	$C_x = C_s \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right)$	x		x	x		D, C _s , x, C _{cr}	C _x / t _i	–	lit / fit	D	–	–	–	–
RILEM (1996)	Fick – solução simplificada	$t_i = \frac{d^2}{12D} \left(\frac{1}{1 - \sqrt{\frac{C_{cr}}{C_s}}} \right)^2$	x		x	x		D, C _s , d, C _{cr}	t _i	–	lit	D	–	–	–	–
Ann <i>et al.</i> (2009)	Fick + C _s (t)	$C_s(t) = kt$ $C_s(t) = k\sqrt{t}$ $C_s(t) = C_0 + k\sqrt{t}$	x	Res: MDF		x		D _{app} , C _s , x, C _{cr} , k	C _x / t _i	–	lit	D	–	–	–	–
Software CIKS	Fick + C _s cíclico + fixação	$\frac{C_{cr}}{C_s} = \operatorname{erf} \left[\frac{d}{2\sqrt{Dt_i}} \right]$	x		x	x		D, C _s , d, C _{cr}	t _i	–	form / usuário	D	I.L.	–	–	–
Amey <i>et al.</i> (1998)	Fick + D (T)	$D(T) = D_0 \frac{T}{T_0} \exp \left[k \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right]$	x		x	x		D, C _s , x, C _{cr} , k	C _x / t _i	–	lit	D	–	D(T)	–	–
Kristiawan <i>et al.</i> (2017)	Fick + D (T)	$D_{fa}(T) = D_0 FA \exp \left[R \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right]$ $FA = 0,00014fa^3 - 0,0242fa^2 + 1,351fa - 23,8$	x	Res: MDF	x	x		D, C _s , C _s , x, C _{cr} , fa	C _x / t _i	Auto adensável com cinza volante (FA)	exp	D	–	D(T)	–	–
Magee <i>et al.</i> (1995) * ^R	Fick + D (t)	$D(t) = D_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^n$	x		x	x	SP	D _{app} , C _s , x, C _{cr} , fatores D	C _x / t _i	–	lit / exp / fit	D	–	–	–	–

UCT (2001)	Fick + D (t)	$C_x = C_s \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_0 t^{(1-n)}}} \right) \right)$	x	x	x	x					D	-	-	-	-	-
HZM (2015)	Fick + D (t)	$D(t) = D_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^n$ $C_s = A(w/b) - \operatorname{ver}[14]$	x		x						D	-	-	-	-	-
Kwon <i>et al.</i> (2009)	Fick + D (t) + fissuras	$D_m(t) = \frac{D_0}{1-n} \left(\frac{t_0}{t} \right)^n (t < t_{\text{cte}})$ $D_m(t) = D_0 \left[1 + \frac{t_{\text{cte}}}{t} \left(\frac{n}{n-1} \right) \right] \left(\frac{t_0}{t_{\text{cte}}} \right)^n (t \geq t_{\text{cte}})$ $D(w) = (31,61w^2 + 4,73w + 1) D_m (w \geq 0,1 \text{ mm})$	x		x	x					D	-	-	-	-	x
Leung e Hou (2015)	Fick + D (t) + fissura	$D_{\text{eq}} = \frac{D_{\text{cr}} + D_{\text{unc}} AI \left(\frac{D_{\text{unc}} t}{x^2} \right)^{A2}}{1 + AI \left(\frac{D_{\text{unc}} t}{x^2} \right)^{A2}}$			x	MEF					D	-	-	-	-	x
CHLODIF (1995)	Fick + D (t) + $C_s(t)$	$D(t) = D_{w/c} D_f t^{-0.1}$ $c_x = [c_0 + k(t-1)] \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] + [\dots]^*$ *consultar [15]	x		x	x					D	-	-	-	-	-
CTDRC/ BHRC (2007)	Fick + D (t) + $C_s(t)$	$D(t) = D_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^n$ $C_s(t) = C_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^m$ Equação empírica em [16]	x		x	x					D	-	-	-	-	-
Paek <i>et al.</i> (2010)	Fick + D (t) + $C_s(t)$	$D_m(t) = \frac{D_0}{1-n} \left(\frac{t_0}{t} \right)^n$ $C_s(t) = k1 [\ln(k2t + 1)] + k3$	x		x	x					D	-	-	-	-	-

Duan <i>et al.</i> (2014)	Fick + D(t) + C _s (t)	$D(t) = D_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^n$ $C_s(t) = C_0 + k(1 - e^{-m(t-t_0)})$	x	Res: erf/ MEF		x	D, C _s , x, C _{cr} fatores D e C _s	C _x /t _i	-	-	-	-	-
Pang e Li (2016)	Fick + D(t) + C _s (t)	$D_{app}(t) = D_{app0} \left(\frac{t_0}{t} \right)^{n*}$ $C_s(t) = C_{s1} t^m *$ <p>* fórmulas empíricas em [17]</p>	x	x		x	D _{app} , C _s , x, C _{cr} fatores D e C _s	C _x /t _i	a/l: 0,40 – 0,65, com e sem adições mine- rais	fit	D	-	-
DuraCrete (2000)*R	Fick + D(t) + fatores K	$D_{app}(t) = K_c K_a K_{mi} D_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^n$	x			x	D, C _s , C _{cr} , x, C _{cr} , fatores D	C _x /t _i /β	-	exp/ fit/ lit	D	-	-
LNEC E465 (2007)	Fick + D(t) + fatores K	$D_{app}(t) = K_c K_{cl} K_{rl} D_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^n$	x			x	D, C _s , x, C _{cr} fatores D e C _s	C _x /t _i	-	exp / fit	D	-	K _T K _h
Smith (2001)	Fick + D(t, T)	$D_{eff} = D_0 f(T)$ $f(T) = \sqrt[1+2 \log(r+1)]{p_{m,orc}}$ $f(T) = \sqrt[1+(2+0,01 \cdot sf) \log(r+1)]{p_{m}}$ <p>concreto com sílica ativa</p> $f(T) = \frac{T}{T_0} \exp \left[k \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right]$	x	x		x	D _{app} , C _s , C _{cr} , x, C _{cr} , fatores D	C _x /t _i	OPC / RS / até 12,5% SF / ambiente mari- nho agressivo (form D ₀)	form	D	-	D(T)
Ferreira (2010)	Fick + D(t, T)	$D(t) = D_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^n$ $f(T) = \frac{T}{294} \exp \left[U \left(\frac{1}{294} - \frac{1}{T} \right) \right] \text{unid:K}$	x			x	D, C _s , x, C _{cr} fatores D	C _x /t _i	OPC de alta perf. / SF / FA / SG ¹	exp/ form	D	-	D(T)
Life-365**R	Fick + D(t, T) + C _s (t)	$D(t) = D_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^n$ $f(t) = \exp \left[R \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right]$	x	Res: MDF		x	D, C _s , x, C _{cr} fatores D e C _s	C _x /t _i	Diferentes a/l e adições minerais	form/ fit/ usuário	D	-	D(T)

Concrete Works	Fick + $D(t, T) + C_s(t)$	$D(t) = D_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^n + D_{ult} \left[1 - \left(\frac{t_0}{t} \right)^n \right] \text{ com } t_0 = 28 \text{ dias}$ $f(T) = \exp \left[\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right]$ $C_s(t) = C_{s,max} \frac{kt}{1 + kt}$	x	Res: MDF	x																
ClinCone	Fick + $D(t, T, x) + C_s(t)$ Senooidal	$C_s(t) = \frac{C_{s,max} + C_{s,min}}{2} + \frac{C_{s,max} - C_{s,min}}{2} \sin k(t + t_{exp})$ $D(x, t) = \frac{D_0}{N} f(x), f(t) f(T)$ $f(x) = \begin{cases} \varphi + (1 - \varphi) \left(\frac{x}{x_s} \right)^k & ; x < x_s \\ 1 & ; x \geq x_s \end{cases}$ $f(t) = \begin{cases} \left(\frac{t_{ate}}{t + t_{exp}} \right)^n & ; t < t_{ate} - t_{exp} \\ 1 & ; t \geq t_{exp} - t_{exp} \end{cases}$ <p style="text-align: center;">Equação de Arrhenius:</p> $f(T) = \exp \left[\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right]$	x	Res: MDF	x																
DuraPGulf (2008)	Fick + $D(t, T, h)$	$f(t): \text{Maage et al. (1995)}$ $f(T): \text{Equação de Arrhenius (ver ClimCone)}$ $f(h) = [1 + 256(1 - h)^4]^{-1}$	x	Res: MEF	x	x															

¹ Observação: segundo os autores que empregaram o modelo proposto por Ferreira (2010), sua aplicabilidade se dá apenas para concreto Portland de alto desempenho, composto com sílica ativa, cinza volante e escória de alto-forno. Porém, no original, não se encontrou claramente a delimitação desse escopo, razão pela qual o referido modelo de Ferreira (2010) não foi classificado como empírico.

Farahani <i>et al.</i> (2015)	Fick + D (t, T, h)	<p>f(t): Maage <i>et al.</i> (1995) f(T): Equação de Arrhenius</p> $f(h) = \left[1 + \left(\frac{100 - h}{100 - h_c} \right)^4 \right]^{-1}$ $D_0 = (-4,002 + 18,092w/b + 1,812(w/b)^2 - 0,09937sf + 0,01861sf^2 - 0,8558w/b sf) 10^{-12}$	x	x	x	x	D, C _s , X, C _{er} fatores D	C _s /t _i	tidal zone, w/l: 0,35 - 0,50, 5 a 12,5% SF	form / fit	D	-	D(T)	D(h)	-
Yu <i>et al.</i> (2015)	Fick + D (t, T, h)	<p>D_{eq} = D_{app}f(t)f(T)f(h)</p> $f(t) = \begin{cases} (t_0/t)^n; & t \leq 30 \text{ anos} \\ (t_0/t_{cte})^n; & t > 30 \text{ anos} \end{cases}$ $f(t) = \frac{T}{T_0} \exp \left[\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right]$ <p>f(h): Farahani <i>et al.</i> (2015)</p>	x	x	x	x	D _{app} , C _s , C _{er} fatores D	C _s /t _i	-	exp / fit	D	-	D(T)	D(h)	-
Shi <i>et al.</i> (2012)	Fick + D (t, T, h, fixação, fissura)	<p>D = f(T)f(h)f(C_b)f(w)D_{app} D_{app} = D₀f(t)* f(T): Equação de Arrhenius f(h): Farahani <i>et al.</i> (2015) f(w) = 31,61w² + 4,73w + 1</p> $f(C_b) = 1 + \frac{\partial C_b}{\partial C_f}$ <p>*consultar [18]</p>	x	x	x	x	D _{app} , C _s , C _{er} , X, fatores D	C _s /pf	-	-	D	D (Cb)	D(T)	D(h)	x
Van Dinh (2017)	Fick + D (t, T, h, fissuras) + C _s (t)	<p>D_{app} = D₀[exp(-0,165 sf)]f(T)f(h) + w/s_{er}D_{er} f(t): Maage <i>et al.</i> (1995) f(T): Equação de Arrhenius f(h): Farahani <i>et al.</i> (2015) n = 0,2 + 0,4(fb/50 + sg/70)</p> $C_s(t) = \begin{cases} kt; & t \leq t_{cte} \\ C_{s,max}; & t \geq t_{cte} \end{cases}$	x	x	x	x	D _{app} , C _s , X, fatores D, fissura	C _s /t _i	concretos com sílica ativa, escória ou sem adição mineral	exp / form	D	-	D(T)	D(h)	D _{er}

Dominicini (2016)	Fick + D (t, T, h) + diferentes Cs (t) + efeito radiação solar	$D = D_0 f(t) f(T) f(h)$ Farahani <i>et al.</i> (1995) / f(T): Equação de Arrhenius / f(h): Efeito radiação solar no [5]	x	x	x	x	x	fit	D	-	D(T) - F.S.	D(h) - F.S.	-
Zhang <i>et al.</i> (2019)	Fick + D (t) + Convecção*	$C_{s, \Delta X} = C_1 + k\sqrt{t}$ $\Delta X = kl + k2\ln t$ Equação empírica em [19]	x	x	x	x	x	fit	D C*	a/l: 0,55, forte tidal zone	-	-	-
fib (2006) **	Fick + D (t, T) + Convecção*	$C_x = C_1 + (C_{s, \Delta X} - C_1) \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x - \Delta X}{2\sqrt{D_{app} t}} \right) \right)$ $D_{app} = D_{RCM} f(t) f(T) K_{tm}$ $f(t) = \left(\frac{t_0}{t} \right)^n$ $f(T) = \exp \left[K \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right]$	x				x	exp / fit	D C*		D(T)		-
Da Costa <i>et al.</i> (2013)	Fick + Convecção	$\frac{\partial C(t,x)}{\partial t} + u \frac{\partial C(t,x)}{\partial x} - D \frac{\partial^2 C(t,x)}{\partial x^2} = 0$		x	x	x	x	fit	D C	-	-	C	-
Hong e Ann (2018)	Fick + Convecção + transporte de umidade	$\left(\frac{\partial C_b}{\partial C_r} + \theta N \right) \frac{\partial C_t}{\partial C_r} = \nabla(\theta ND_{eff} \nabla C_r) + \nabla(\theta NC_r D_h \nabla h)$ $\frac{\partial w'}{\partial t} = \nabla(-K'_1 \nabla P_c + K'_v \nabla P_v)$		x	x	x	x	lit	D C	-	-	T.U.	-
RMTC	Fick + Convecção + transporte de umidade + fissura	$\frac{\partial \theta C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} - D \frac{\partial^2 \theta C}{\partial x^2} = 0$ Altera entre o transporte na fissura e na matriz Fórmulas do transporte de umidade: [20]		x	x	x	x	lit	D C	-	-	T.U.	x

Saetta <i>et al.</i> (1993)	Fick + D (t, T, h) + Convecção + Transf. de calor + Transporte de umidade	$D(t) = D_0 \left[\zeta + (1 - \zeta) \left(\frac{28}{t} \right)^{1/2} \right]$ $f(T) = \exp \left[\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right]$ $f(h) = \left[1 + \left(\frac{1-h}{1-h_c} \right)^4 \right]^{-1}$	x MEF	C_x / t_i	-	lit / fit	D C	-	D(T) T.C.	D(h) T.U.	-
Lin, Liu e Xiang (2010) ^{MR}	Fick + D (t, T, h, de) + Convecção + Transf. de calor + Transporte de umidade	$D = D_0 f(t) f(T) f(h) f(de)$ $f(t)$: Maage <i>et al.</i> (1995) $f(T)$: Equação de Arrhenius $f(h) = h^k$ $f(de) = 1 + \frac{D_{max}}{D_0} \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{de}{K_1} \right)^{k_2} \right]^{-1} \right\}$	x MEF	C_x / t_i	-	exp	D C	I.F.	D(T) T.C. F.S.	D(h) T.U.	D.E.
Univer- sidade de Toronto (1999) ^{MR}	Fick + D (t, T) + Convecção + Permeab. + <i>Mickling</i>	$D(t, T) = D_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^n \exp \left[\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right]$ $\frac{\partial C_f}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C_f}{\partial x^2} - u \frac{\partial C_f}{\partial x} + \frac{\rho}{N} \frac{\partial C_b}{\partial t}$	x MDF	C_x / t_i	-	exp/ fit/ usuário	D C P	I.L.	D(T)	C, W	-
Sub-difusão	-	$\frac{\partial C}{\partial t} = D_e D^{-\alpha} t^{-\alpha} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$	x FTCS	C_x / t_i	-	fit	D	-	-	-	-

Bob (1996)		$d = 150 \left(\frac{cK_T K_h K_{C_s} / C_e}{f_c} \right) \sqrt{t_i}$			x	x	x, f _c , coeficientes, t _i	d	-	-	coef c	x K _T	x K _h	-
Fronte de ingresso de cloretos	-	Sem equações / graficamente se faz a frente de penetração de cloreto ao longo do tempo para cada tipo de concreto – únicos parâmetros: teor crítico obtido experimentalmente e cálculo da frente de penetração			x	x	-	-	Concreto com monitor de longa data	-	-	-	-	-

CABEÇALHO DA TABELA: A – modelo analítico / N – numérico / E – empírico / D – modelo aplicado de forma determinística / P – probabilística / Calc. D – forma de cálculo do coeficiente de difusão/ ΔT – como a variação da temperatura é considerada no modelo / Δh – como a variação da umidade é considerada no modelo – **LEGENDA EQUAÇÕES:** A – coeficiente com fórmula de fixação de cloretos em função do tipo de cimento / C_0 – concentração superficial inicial de cloreto / C_1 – concentração de cloretos fixos / C_a – teor crítico de cloretos / C_s – concentração de cloretos no ambiente / C_2 – concentração de cloretos inicial no concreto / C_3 – concentração superficial de cloretos / $C_{s,max}$ – concentração superficial máxima / $C_{s,min}$ – concentração superficial mínima / $C_{s,i}$ – concentração superficial depois de um ano de exposição / $C_{s,ax}$ – concentração de cloretos na profundidade Δx em um tempo específico / C_x – concentração de cloretos na profundidade x e tempo t / d – cobrimento / d_e – decaimento do desempenho da estrutura de concreto / D – coeficiente de difusão (m^2/s) / D_0 – D referência ou inicial / D_m – D aparente / D_m – D que leva em conta o tipo de cimento / D_{ar} – D na fissura / D_{af} – D efetivo / D_{ef} – D equivalente / D_{eq} – D de concreto auto adensáveis com alta substituição de cinza volante / D_h – D da umidade / D_m – D médio / D_{max} – D máximo devido decaimento estrutural / D_{oc} – coeficiente de migração / D_{inc} – D do concreto não fissurado / D_{in} – valor último de D , após 100 anos / D_{100} – D que leva em conta a influência da relação a/l / $D\alpha$ – coeficiente de sub-difusão do cloreto / Dt ($1-\alpha$) – termo derivado da fração / erf = função de erro de Gauss / f_a – teor de substituição de cinza volante / f_c – resistência à compressão do concreto / h – umidade relativa do concreto / h_c – umidade relativa crítica (geralmente 0.75) / k – constante / K – parâmetro do modelo / Ke – tipo de cura / Ke – ambiental / K_{im} – método para determinação do D / K^*v – permeabilidade do concreto à água líquida (kg/m.s.Pa) / K^*v – permeabilidade do concreto ao vapor da água (kg/m.s.Pa) / m – *age factor* do C_s / n – *age factor*, *aging factor*, fator de envelhecimento do D / N – porosidade do concreto / P_e – pressão capilar (Pa) / P_v – pressão do vapor d’água (Pa) / R – constante universal dos gases (8.314472 J/mol. K) / s_p – distância entre fissuras / sf – teor de substituição do cimento por sílica ativa / sg – teor de substituição do cimento de escória / t – tempo de referência ou inicial / t_c – tempo de exposição / t_{cc} – tempo referência ou inicial / t_{cr} – velocidade de convecção / U – energia de ativação do processo de difusão do concreto quando foi exposto ao ambiente com cloretos / t_i – tempo de início de corrosão / T – temperatura / T_0 – temperatura de referência / u – velocidade de convecção / v – profundidade da zona de convecção / v – nábila – operador diferencial parcial / $(J/mol) / w$ – abertura de fissuras / w^* – umidade no concreto (kg/m³) / w/b – relação água cimento / x – profundidade / x_s – profundidade da zona superficial / Δx – profundidade da zona de convecção / ∇ – nábila – operador diferencial parcial / ρ – densidade do concreto / – razão entre D da superfície e D dha zona interior do concreto / θ – grau de saturação do concreto / – coeficiente variando entre 0 e 1, que mostra quanto a difusividade decresce com o tempo – **LEGENDA**
TABELA: *R – Modelos citados pelos artigos de revisão aderidos / a/l – relação água/ligante / D (t, T, h, de) – coeficiente de difusão variando conforme tempo, temperatura, umidade e decaimento estrutural, respectivamente / C_s (t) – concentração superficial variando com o tempo / $Res.$ – método numérico utilizado na resolução, porém não classifica o modelo como numérico / FTCS – Forward-Time Central-Space método – um tipo de MDF / MDF – Método das diferenças finitas / MEF – Método dos elementos finitos / pf – probabilidade de falha / OPC – concreto com cimento Portland comum / FA – *fly ash* – cinza volante / RS – cimento resistente a sulfatos / SF – *silica fume* – sílica ativa / SG – escória / lit – literatura / fit – ajuste da equação com dados de campo / form – fórmula geralmente com base em alguns parâmetros da mistura do concreto / usuário – valor fornecido pelo usuário / exp – experimentalmente, por meio de teste de difusão de longa duração ou testes rápidos de migração ou difusão / D – Difusão / C* – Convecção / C – Convecção de forma simplificada / P – Permeabilidade / LL – isoterma de fixação de Langmuir / I.F. – Isoterma de fixação de Freundlich / T.D. – Fixação dependente do tempo / T.C – Transferência de calor / T.U. – Transporte de umidade / W – *wicking action* – ação capilar – transporte da água através do concreto de uma face úmida para uma face seca / F.S. – função senooidal / D.E. – decaimento estrutural considerado no transporte da umidade e no transporte de cloretos

levantados na literatura, de forma a produzir consistência técnica, visando com isso contribuir para uma melhor compreensão das diferentes propostas, na perspectiva de eventual aplicabilidade futura.

Na Parte 1, já foram apresentadas algumas propriedades da **Segunda Lei de Fick**. Resumidamente, essa lei considera a difusão de partículas em um meio homogêneo saturado (coeficiente de difusão independente da profundidade) devido a um gradiente de concentração [21]. Essa lei não consegue abordar interações físicas e químicas entre o íon cloro e a pasta de cimento, o movimento de íons em uma solução iônica [22] e nem outros mecanismos de transporte importantes em concretos não saturados, como a convecção [23]. Também, foi exibido o **modelo RILEM** (1996), uma solução simplificada da equação diferencial, sendo mais conservador que a solução de Crank. Os outros modelos foram agrupados por semelhanças e modificações na Segunda Lei de Fick e são apresentados a seguir.

3.2.1. Principal mudança na Segunda Lei de Fick: a variação da concentração superficial com o tempo – $C_s(t)$

Ann et al. (2009) [24] consideraram o crescimento da concentração superficial com o tempo, avaliando três modelos: linear, raiz quadrada do tempo e um modelo refinado, respectivamente na Tabela 2. Eles foram comparados com o modelo que prevê a concentração superficial (C_s) constante – solução de Crank. Observou-se que a consideração da dependência de C_s com o tempo aumentou o período para o início da corrosão. Entre os modelos propostos, os autores consideraram o modelo refinado como o mais realista, mas destacam a necessidade de se levar em consideração a dependência do coeficiente de difusão (D) com o tempo.

No *software online CIKS - computer integrated knowledge system*, utilizado por DOMINGUEZ e MENDOZA [25], o usuário pode optar por colocar a concentração externa de cloretos (C_s) de forma cíclica, variando entre dois valores. O CIKS é um *software* experimental de domínio público desenvolvido pelo *National Institute of Standards and Technology* (NIST), agência do Governo dos Estados Unidos. Ele está em operação até os dias atuais e teve sua última atualização em fevereiro de 2017 [26]. Além disso, os usuários podem dividir o concreto em duas camadas, uma camada superficial e a parte interna do concreto, podendo especificar D diferentes para essas duas situações. E eles também podem especificar parâmetros para calcular a quantidade de cloretos livres e totais, pela análise dos aluminatos presentes no cimento e tendo em vista as isotermas de adsorção (do tipo Langmuir), considerando assim os cloretos fixados (na forma de cloroaluminato de cálcio) e/ou adsorvidos em fases hidratadas do cimento. O programa também dá a opção de calcular o coeficiente de difusão a partir de equações para concretos sem adição ou com adição de sílica ativa, caso o usuário não tenha essa informação [26, 27].

3.2.2. Principal mudança na Segunda Lei de Fick: o coeficiente de difusão variando com a temperatura – $D(T)$

O modelo preconizado por **Amey et al. (1998)** foi um dos modelos utilizados por MEDEIROS-JUNIOR *et al.* [28], de forma mais simples que o original. Este artigo [28] não teve como foco os modelos preditivos, porém ele apresenta uma possível aplicação desses modelos como suporte na análise do impacto de mudanças climáticas na vida útil das estruturas de concreto armado em ambiente marinho. No modelo aplicado, a equação proposta de $D(T)$ é baseada na Equação de Nernst-Einstein. O modelo original, mais complexo, pode ser consultado em [29].

Kristiawan et al. (2017) [30] calcularam o tempo de início de corrosão da armadura em concretos autoadensáveis com alta substituição de cinza volante, por meio de modelo analítico específico, resolvido de forma numérica. Além da consideração da variação com o tempo, o D sofre influência do teor de substituição de cinza volante, conforme relação obtida experimentalmente. Os autores concluíram que o cobrimento é importante para aumentar a proteção frente à entrada de cloretos e que maiores temperaturas diminuem o tempo de início de corrosão.

3.2.3. Coeficiente de difusão variando com o tempo – $D(t)$

A equação $D(t)$ que mais aparece entre os modelos levantados é aquela que o D varia exponencialmente com o tempo, de acordo com um fator de envelhecimento – *ageing factor* (n). Há controvérsias na literatura sobre a autoria dessa relação, sendo apontados diferentes autores como: MAAGE *et al.* [31, 32]; SAETTA *et al.* [33]; MANGAT e MOLLOY [34]; e THOMAS e BAMFORTH [35]. Entre as referências consultadas, a primeira em que aparece explicitamente essa equação é **Maage et al. (1995)** [32]. Por isso, neste artigo, a equação será atribuída a ela.

O modelo de **Maage et al. (1995)** foi aplicado em quatro publicações. Pela análise sensitiva desse modelo, KHATRI e SIRIVIVATNANON [13] observaram que a vida útil é duas vezes mais sensível ao cobrimento do que ao D , assim como mais sensível ao teor crítico de cloretos (C_{cr}) do que ao C_s . ANGST [9] fez uma revisão

sobre a previsão do tempo de início de corrosão em concreto armado exposto a cloretos, com o foco na influência do valor do C_{cr} no tempo dado pelos modelos. NILSSON [36] fez uma revisão sobre as incertezas dos modelos preditivos, apresentando a evolução ao longo do tempo e calculando o cobrimento requerido por diferentes modelos, levando em conta dois teores críticos diferentes. Entre os modelos aplicados está o de Maage *et al.* (1995), considerado por ele um modelo empírico dos anos 90. MAAGE *et al.* [37] apresentaram um roteiro de como aplicar esse modelo para calcular a vida útil de estruturas existentes, incluindo instrução de como obter os parâmetros de entrada a partir do monitoramento dessa estrutura, destacando a diferença de tipos distintos de coeficientes de difusão e uma equação direta para calcular o tempo.

O **modelo UCT (University of Cape Town)**, diferentemente de outros modelos propostos anteriormente, assume que o valor do D_0 , presente na equação, é o coeficiente de difusão médio, correspondente ao valor integrado ao longo de todo o período de exposição e não o coeficiente de difusão instantâneo. Também apresenta um gráfico – diagrama com valores de D -, que correlaciona coeficientes de migração obtidos em testes rápidos de migração de cloretos a coeficientes de difusão representativos de estruturas de dois anos de serviço na África do Sul, de acordo com o tipo de concreto, com o procedimento de cura (úmida ou seca) e com a forma de exposição (severa, muito severa e extrema) [38]. HEATH [39], em sua aplicação desse modelo, adaptou alguns valores de parâmetros para a região do Golfo Árabe, como, por exemplo, D_0 e C_s .

O **modelo HZM** [14] apresenta a mesma formulação $D(t)$ que Maage *et al.* (1995) [32] e foi utilizado para prever a vida útil no projeto de ligação marítima HZM (Hong Kong–Zhuhai–Macau), com a estatística de seus principais parâmetros, no método totalmente probabilístico e com fatores parciais. Um dos destaques desse modelo foi que os parâmetros de entrada (principalmente a parte da variabilidade estatística) foram obtidos de monitoramento por 30 anos de região marinha similar, também localizada na China. No modelo, foi utilizado um valor constante para o C_s , porém é um valor obtido por meio de equação após o monitoramento do seu crescimento (valor médio assintótico). Esses valores foram comparados com os propostos pelo DuraCrete, que são menores e subestimam os valores reais.

3.2.4. Coeficiente de difusão dependente do tempo – $D(t)$ – e de fissuras

Kwon *et al.* (2009) [12] propõem um modelo analítico empírico com D variando conforme a abertura de fissuras, obtido de forma empírica, com o uso de regressão dos dados de duas estruturas de cais, com 8 e 11 anos de operação. Como esperado, observou-se que quanto maior a abertura da fissura, maior a probabilidade de corrosão e menor a vida útil prevista.

Leung e Hou (2015) [40], após análise numérica bidimensional (difusão ao longo e perpendicular à fissura), propuseram um coeficiente de difusão equivalente (D_{eq}) obtido por regressão linear. O D é substituído pelo D_{eq} , que considera a difusão unidimensional em um concreto fissurado (efeito isolado de uma fissura de abertura uniforme) e sofre influência do D_{cr} (coeficiente de difusão na fissura), do D_{unc} (coeficiente de difusão do concreto sã), da profundidade em relação à superfície, da abertura das fissuras e do tempo (ver coeficientes A1 e A2 na referência [40]). Porém, o modelo é limitado a pequenas aberturas de fissuras (até 0,4 mm). A equação com vários termos do D_{eq} gerou resultados próximo aos obtidos por resolução numérica. Assim, esse modelo se mostrou apurado para determinar a vida útil.

3.2.5. Coeficiente de difusão e concentração superficial dependentes do tempo – $D(t)$ e $C_s(t)$

CHLODIF é um *software* desenvolvido por pesquisadores da Universidade de Zagreb no final dos anos 80 e começo dos 90. Ele foi produzido para projetar novas estruturas, baseando-se em critérios de durabilidade, ou para calcular a vida útil residual de estruturas existentes, por meio de quatro formas diferentes (diferenciando-se pelas variáveis de entrada e saída). O coeficiente D pode ser calculado por meio de equação, conforme a relação água/ligante (a/l) e o tipo de cimento estudado [41]. Não se teve acesso a esse programa na *web* e nem maiores informações sobre o modelo no site da instituição; portanto, provavelmente é de uso interno para pesquisa. A sua habilidade de prever a vida útil foi avaliada por OSLAKOVIC *et al.* [15]. Nesta pesquisa, o modelo CHLODIF e os modelos Life-365 e DuraCrete foram comparados com dados obtidos de uma ponte da Croácia com 25 anos de serviço. O modelo CHLODIF considera que a C_s cresce até um valor máximo. O tempo de início de corrosão calculado, tanto com o uso do D teórico quanto do experimental (a partir de dados da estrutura real) foram muito altos, não correspondendo à realidade da ponte, principalmente devido ao valor do *ageing factor* (n) adotado (0,10). Os autores destacam a necessidade de calibrar os modelos com dados de estruturas reais, ao invés do uso de somente valores teóricos sugeridos por modelos e também do uso de dados locais.

O **CTDRC/BHRC** foi um modelo desenvolvido pelo *Concrete Technology and Durability Research Center* e *Building and Housing Research Center*, centros de pesquisas da Universidade de Tecnologia de Amirkabir no Irã e associado ao governo do Irã, respectivamente. Para chegar à equação empírica apresentada

por ASHRAFI e RAMEZANIANPOUR [16], válida para concretos com sílica ativa, expostos a ambientes marinhos agressivos, como o golfo pérsico, utilizou-se uma abordagem de rede neural artificial, um subcampo da inteligência artificial. Com ela, foi possível a previsão de algumas características do concreto, como coeficiente de difusão, a partir de um histórico de experimentos, pois ela aprende relações de causa e efeito complexas [16]. SAFEHIAN e RAMEZANIANPOUR [42] utilizaram esse modelo para calcular a vida útil de estruturas com diferentes concretos nesse mesmo ambiente agressivo.

Pack et al. (2010) [43] propuseram um modelo com a diminuição exponencial do D até um valor constante quando chega a 30 anos e aumento da C_s de forma logarítmica com o tempo. Eles avaliaram o perfil de ingresso de cloretos de 11 pontes de concreto na *tidal zone* e obtiveram os parâmetros de entrada do modelo. Esse modelo foi comparado com o modelo independente (Segunda Lei de Fick – D e C_s constantes) e com o modelo do Life-365 ($D(t)$ e C_s constante). O modelo proposto previu bem a entrada de cloretos, apresentando valores maiores ou similares à Segunda Lei de Fick, de acordo com o tipo de cimento utilizado.

Duan et al. (2014) [44] formularam um modelo analítico de previsão de vida útil, resolvido de forma numérica, passando por validação. O modelo foi utilizado em dois estudos de caso, comparando os dados obtidos de duas estruturas reais da China e do Japão com os perfis previstos pelo modelo, utilizando dados obtidos na literatura. O modelo se mostrou consistente, com a maioria dos dados da estrutura dentro da zona $\mu \pm 2\sigma$ (média ± 2 desvios padrões), prevista pelo modelo, podendo ser usado para novas estruturas.

Pang e Li (2016) [17] propuseram um modelo analítico empírico, para concretos com e sem adições minerais, com relação água/ligante variando de 0,40 a 0,65, localizados em *splash zones* e *semi splash zones*, apresentando os valores dos coeficientes das equações $D(t)$ e $C_s(t)$. Eles monitoraram o ingresso de cloreto de uma estrutura existente e de espécies de laboratório em exposição em ambiente real (*exposure trial*), cujos resultados obtidos apresentaram uma mesma tendência, mas menor variabilidade do que da estrutura real. A maior probabilidade de corrosão ocorreu na *splash zone*. Os autores também destacam a importância de considerar D e C_s variando com o tempo.

3.2.6. Coeficiente de difusão influenciado pelo tempo – $D(t)$ e com diferentes fatores K

DuraCrete (2000) foi um projeto da União Europeia, realizado no final da década de 90, com o objetivo de desenvolver uma metodologia de projeto baseada no desempenho, a partir de solicitações ambientais e de materiais capazes de prever o comportamento das estruturas de concreto. Ele traz uma abordagem probabilística e considera diferentes aspectos da degradação, como a iniciação por carbonatação e a etapa de propagação da corrosão. Em relação ao ingresso de cloretos no concreto, o modelo é baseado na Segunda Lei de Fick, com o coeficiente de difusão variando com o tempo e recebendo correção por meio de alguns fatores relativos a condições ambientais (K_c – variável conforme tipo de exposição e tipo de cimento), ao método de medida do D (K_m) e ao tempo de cura (K_c). Para o cálculo de forma determinística, ele usa fatores parciais, como coeficientes de segurança, diminuindo a resistência e aumentando a solicitação [45], porém esses fatores não foram citados pelos autores que o utilizaram. Algo que pode dificultar sua aplicação é não ter esses fatores k tabelados, para determinadas situações e tipos de concretos. TANG e GULIKERS [46] destacam que a maior contribuição desse modelo é a sua abordagem probabilística, apesar da simplificação matemática utilizada.

Quatro artigos aplicaram esse modelo, todos de forma probabilística. OSKOVIC *et al.* [15] obtiveram um melhor ajuste com $n = 0,20$ e $0,25$, do que com os valores teóricos sugeridos pelo DuraCrete (200), que apresentaram grandes desvios da realidade da estrutura. Entre os modelos estudados por WU *et al.* [47] (Life-365, LNEC E465 e DuraCrete) e comparados com o perfil de cloretos de uma estrutura em serviço no Golfo de Beibu, na China, o que melhor se adequou foi o DuraCrete 2000. VAN BREUGEL *et al.* [48] testaram sua confiabilidade, por meio de comparação de curvas previstas pelo DuraCrete com dados de seis estruturas localizadas na Holanda, em *tidal* e *splash zones*. Nessa validação, o D e o *ageing factor* foram obtidos por ajuste da equação a perfis de amostras dessas estruturas (*fit*), e não de forma experimental, como é geralmente feito ao ser aplicado em estruturas novas. Por meio do ajuste de parâmetros, os perfis previstos e medidos de cloretos obtiveram uma boa relação. YU *et al.* [49] avaliaram a durabilidade de estruturas em ambientes marinhos por uma perspectiva probabilística, também aplicando esse modelo.

O LNEC E465 (2007)² foi um dos modelos aplicados por WU *et al.* [47]. É uma especificação que faz parte da norma europeia de concreto empregada em Portugal (NP EN 206-1), que regulamenta a metodologia de

² LNEC E465 (2007) Concrete. Methodology for estimating the concrete performance properties allowing to comply with the design working life of the reinforced or prestressed concrete structures under environmental exposures XC and XS. LNEC, Lisbon.

desempenho para calcular a vida útil das estruturas e faz contraste com a metodologia prescritiva (LNEC E464³). WU *et al.* [47] utilizaram como referência MARQUES *et al.* [50], que compararam essas duas metodologias para cálculo da vida útil de estruturas de concreto armado. O LNEC E465 prescreve um modelo, cujo valor de C_s pode ser obtido por equação proposta por essa norma e é considerado constante. O coeficiente de difusão potencial (D_0) é obtido pelo ensaio de migração de cloretos pela NT Build 492 [51] aos 28 dias de idade. Para se obter o D_{app} , ele é multiplicado por diferentes fatores, (K_c , K_h e K_T) prescritos pela norma para determinadas situações e tipos de exposição, além da função $f(t)$, parecido com o DuraCrete. Cabe ressaltar que a norma LNEC E465 prescreve modelos também para outros tipos de degradação, como corrosão induzida por carbonatação e a fase de propagação. Entre os modelos aplicados por WU *et al.* [47], LNEC E465 não foi o que melhor previu o comportamento de uma estrutura em serviço.

3.2.7. Coeficiente de difusão influenciado pelo tempo e pela temperatura – D (t, T)

Smith (2001) [52] apresentou modelos preditivos para concretos com sílica ativa e diferentes tipos de cimento, expostos a um ambiente marinho agressivo, o Golfo Pérsico. Na fase de projeto, o D_0 pode ser determinado aos 90 dias em laboratório e atualizado quanto ao tempo e temperatura, porém o modelo também propõe equações para calcular o D_0 para diferentes tipos de concreto. Ele gerou gráficos que mostram o tempo de início de corrosão de acordo com o cobrimento e tipo de concreto estudado. O modelo, apesar de mais informativo do que os códigos, precisaria de dados de estruturas existentes com 25 a 75 anos de serviço para sua validação, o que não foi possível na época. Esse modelo também apareceu aplicado em um artigo de revisão, escrito pelo mesmo autor, anos depois: SMITH *et al.* [53].

Ferreira (2010) [54] é um modelo analítico que teve um bom ajuste aos dados de estruturas reais, principalmente para baixas relações água/ligante, e foi comparado com outros modelos no artigo de FARAHANI *et al.* [55]. Esse modelo considera a influência da temperatura pela relação de Nernst-Einstein, com a temperatura referência de 20°C (294 K). O modelo original estima o valor do coeficiente de difusão pela aplicação de testes de laboratório acelerados e tem uma abordagem probabilística, porém na aplicação, D foi obtido por *fit* (ajuste da equação com dados de campo) e aplicado de forma determinística.

3.2.8. Coeficiente de difusão influenciado pelo tempo e pela temperatura e Concentração superficial influenciada pelo tempo – D (t, T) e C_s (t)

O **Life-365** é um *software* de uso livre desenvolvido para prever a vida útil e os custos de ciclo de vida de diferentes tipos de concreto, em fase de projeto. Ele foi desenvolvido por um consórcio norte americano formado por empresas e por diferentes associações. Sua primeira versão foi lançada em 2000 e atualmente encontra-se na versão 2.2.3, lançada em 2018, após algumas melhorias [56].

O Life-365 tem como base um modelo proposto anteriormente pela Universidade de Toronto. O *software* prevê o ingresso de cloretos pela difusão, unidimensional ou bidimensional, com o D dependente do tempo e da temperatura, resolvido numericamente. A C_s pode ser obtida de 3 formas: pela base de dados do programa, fornecida pelo usuário ou calculada com base em uma norma (ASTM C1556⁴). Ela pode ser considerada linearmente crescente, por meio de uma taxa, até atingir um valor máximo. É necessário o perfil da temperatura média do local estudado, seja ele presente na base de dados do programa, seja ele fornecido pelo usuário. Um dos parâmetros de entrada mais importantes, o D aos 28 dias, pode ser calculado por equações empíricas, que levam em conta a relação água/ligante e a quantidade de adições minerais, mas também podem ser fornecidos pelo usuário. Os efeitos de inibidores de corrosão e de selantes também podem ser levados em conta, assim como o uso de aço inoxidável e aço com proteção de epóxi. O *software* faz a validação do período de iniciação calculado, comparando, para a penetração em uma dimensão, com a solução de Crank da *Segunda Lei de Fick* e, para a penetração em duas dimensões, com a versão 1.1 do Life-365. Ele também prevê o período de propagação de forma simplificada [57].

O modelo em questão foi um dos mais aplicados (6 artigos), todos considerando a concentração superficial constante e a penetração unidimensional (1D). Entre os modelos aplicados por WU *et al.* [47], Life-365 não foi o que melhor representou os dados reais de estruturas de docas de concreto por eles estudados. Em OSKOVIC *et al.* [15], esse modelo correspondeu bem aos valores reais, com uma previsão para o lado da segurança. Já, ao ser comparado em PACK *et al.* [43] com o modelo proposto por eles, o Life-365 não apresentou bom ajuste com os

³ LNEC E464 (2007) Concrete. Prescriptive methodology for a design working life of 50 and 100 years. LNEC, Lisbon.

⁴ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM C1556 – 11a (2016). Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion. West Conshohocken, U.S.A., 2016.

valores de campo, devido à alta taxa de diminuição do D e ao C_s constante. Também foi aplicado por SAFEHIAN e RAMEZANIANPOUR [42], junto com mais três modelos, para estrutura no golfo pérsico, exposta a diferentes zonas. Por não ser o foco do artigo, eles não comparam os resultados, porém afirmam que ainda existem várias incertezas quanto aos parâmetros de entrada e que a calibração dos modelos com investigações de campo de longa duração é necessária. BURRIS e RIDING [58] também aplicaram o Life-365 utilizando os valores de D e n calculados por equações do programa (valores teóricos) e depois com esses parâmetros obtidos experimentalmente para mistura binárias e ternárias de cimento com adições minerais, em diferentes condições de cura. Os valores de tempo de início de corrosão calculados pelo programa com os coeficientes teóricos foram mais conservadores (menores) do que os experimentais, quando considerado o concreto com cura feita em laboratório. JACIR e NAGI [59] usaram esse *software* para prever o tempo de despasseamento da armadura de dois tipos de concreto estudados na região do Golfo Pérsico. Eles abasteceram o *software* com parâmetros experimentais e compararam os resultados com os obtidos em ciclos de molhagem e secagem pela ASTM G109⁵. Os autores consideraram que o modelo apresentou boa concordância com os dados de laboratório.

Outro *software* que pode ser usado para prever a vida útil é o **ConcreteWorks**, um *software* que também ajuda profissionais a otimizar a dosagem do concreto e a realizar análise térmica. A sua parte de previsão de vida útil é muito parecida com o Life-365, tendo-se as seguintes modificações: ele considera que o coeficiente de difusão diminui até o D_{ult} (aos 100 anos de idade); a equação $D(t)$ é um pouco diferente; ele possui outro banco de dados: assim as equações dos coeficientes de difusão iniciais aos 28 dias e do fator de envelhecimento n são também diferentes; o teor crítico de cloretos é 0,07% de cloretos em relação a massa de concreto (em oposição ao 0,05% do Life-365) e o crescimento da concentração superficial até um valor máximo também é diferente [60]. Ele foi usado por BURRIS e RIDING [58], sendo o mais conservador de todos os modelos utilizados, ao considerar os valores teóricos calculados pelo modelo.

3.2.9. Coeficiente de difusão variando com tempo, temperatura e profundidade e Concentração superficial influenciada pelo tempo de forma senoidal – $D(t, T, x)$ e $C_s(t)$

Na revisão feita por NILSSON [36], outro modelo aplicado foi o **ClinConc** (*chloride in concrete*), um modelo classificado por Nilsson como um modelo físico, em que o transporte e a fixação de cloretos são modelados com base nos conhecimentos em física e química disponíveis, feito na década de 90 por TANG e NILSSON [61]. O modelo se baseia principalmente nas leis de Fick, que simula o fluxo de cloreto livre, devido ao seu gradiente de concentração, através da solução de poros no concreto e na equação do balanço de massa combinada com a fixação não linear do cloreto no cálculo da distribuição do teor total de cloreto no concreto, resolvidas por método numérico. O modelo considera que o D se modifica conforme as seguintes variáveis: *profundidade do concreto* (somente nas camadas superficiais), *tempo* (até uma idade que permanece constante) e *temperatura*. Quanto ao parâmetro C_s , este varia com o tempo, conforme uma função periódica, senoidal. Outra característica é que as condições climáticas são colocadas dentro das equações de fluxo e de balanceamento de massa. A primeira versão do *ClinConc* foi feita somente para zona submersas, porém depois ele passou a considerar zonas de molhagem e secagem, incluindo *splash zones*, zonas atmosféricas e saís de degelo. Além disso, após monitoramento de estrutura por cinco anos, observou-se que a fixação de cloretos também é dependente do tempo, modificando o modelo e validando essas modificações [61, 62].

3.2.10. Coeficiente de difusão variando com tempo, temperatura e umidade – $D(t, T, h)$

SHEKARCHI *et al.* [63] introduziram um modelo analítico determinístico (os autores o consideram semiempírico) chamado **DuraPGulf**, que ainda estava em desenvolvimento. Esse modelo foi concebido especificamente para uma região de alta agressividade, no Golfo Pérsico – Irã, devido à alta temperatura, alta salinidade da água do mar da região e grande flutuação diurna e sazonal da temperatura e umidade. Foi realizada uma investigação experimental para obtenção dos parâmetros D e C_s para diferentes tipos de concretos, dados estes utilizados para criar uma base de dados local. O modelo apresenta algumas fronteiras e limitações, a saber: a difusão é o único mecanismo de penetração, o concreto é considerado homogêneo e sem fissuras, o coeficiente de difusão é assumido como uniforme, considera-se a fixação de cloretos implícita (embutida) no coeficiente de difusão aparente e o teor crítico adotado (com base na literatura) é total e não cloretos livres. Muitos desses aspectos estão presentes em outros modelos, baseados na Segunda Lei de Fick. O coeficiente de difusão referência é calculado a partir de bases de dados específicas para diferentes tipos de concretos (tipos de revestimento, cura, condições de exposição, teor de substituição de sílica ativa, relação

⁵ AMERICAN STANDARD AND TESTING MATERIALS, ASTM G109–07(2013). Standard Test Method for Determining Effects of Chemical Admixtures on Corrosion of Embedded Reinforcement in Concrete Exposed to Chloride Environment. West Conshohocken, U.S.A., 2013.

a/l), sendo atualizado mês a mês para considerar a influência dos fatores principais: temperatura, umidade e tempo. O modelo foi verificado por comparação com dados de pesquisa local, apresentando bom ajuste, e sua aplicação indicou ser ele adequado para emprego na fase de projeto, para concretos daquela região, dentro de uma abordagem empírica (ou semiempírica). Outros dois artigos aplicaram o modelo DuraPGulf: ALIZADEH *et al.* [64], com o foco na influência das condições de cura no D; e SAFEHIAN e RAMEZANIANPOUR [42], juntamente com outros modelos.

Farahani *et al.* (2015) [55] propuseram um modelo analítico empírico para previsão da vida útil de concreto com sílica ativa em um ambiente de *tidal zone*. O modelo é do mesmo grupo de pesquisa do DuraPGulf. Por meio de regressão linear de dados de campo, ele propõe também uma equação para o coeficiente de difusão referência, aos 3 meses, tendo como parâmetros de entrada a relação água/ligante e o teor de sílica ativa. Esse modelo foi validado comparando-se o valor previsto com os dados experimentais, tendo apresentando um bom ajuste para uma margem de erro de mais ou menos 25%. Os autores também comparam seu modelo com outros dois modelos: Sietta *et al.* (1993) e Ferreira (2010).

Yu *et al.* (2015) [65] propuseram um teste acelerado de ingresso de cloretos e modelo preditivo analítico – D (t, T, h). Eles consideram que o D decresce até os 30 anos da estrutura, permanecendo depois constante. Eles obtiveram os perfis de ingresso de cloretos tanto em testes acelerados (ciclos de molhagem e secagem, com alta concentração de NaCl e elevadas temperaturas – até 60°C) quanto em estruturas reais, mostrando a existência da zona de convecção. No final, foi feita simulação considerando ensaio acelerado e natural para duas estruturas, com a determinação do fator de aceleração (λ).

3.2.11. Coeficiente de difusão variando com tempo, temperatura e umidade – D (t, T, h) mais outros fatores influentes

Shi *et al.* (2012) [18] propuseram um modelo probabilístico de ingresso de cloretos, considerando além do D (t, T, h), a influência da fixação de cloretos e a ocorrência de fissuras no concreto. O modelo não foi validado por comparação com um existente e nem aplicado em um exemplo, porém eles fizeram uma análise sensitiva dos principais parâmetros de entrada.

O modelo de **Van Dinh (2017)** [66] também considerou a influência das fissuras no D_{app} , com o uso do coeficiente de difusão na região fissurada (D_{cr}) e também a influência do teor de sílica ativa, cuja origem não foi especificada. A concentração superficial também foi considerada variável, crescendo linearmente até um valor máximo, para diferentes tipos de exposição, conforme proposto pelo Life-365. O artigo não apresenta exemplo do uso do modelo e nem uma validação para ele (comparando-o com outro modelo já existente). Apesar de considerar vários fatores, o modelo ainda precisa de ajustes.

VIEIRA *et al.* [5] aplicaram o modelo numérico proposto por **Dominicini (2016)** em um pilar de uma ponte na cidade de Vitória – Espírito Santo, com 36 anos de serviço. Esse modelo, desenvolvido por pesquisadores brasileiros, leva em conta a radiação solar e considera o D função de t , T e h , tendo-se as variações da temperatura e da umidade regidas por uma função senoidal. O modelo considera cinco diferentes abordagens em relação à concentração superficial: uma constante e quatro variando com o tempo, com diferentes equações [67], porém no artigo foi adotado um valor constante. O modelo é bidimensional, porém na aplicação ele foi unidimensional. O artigo mostrou que a radiação solar pode ter grande influência no ingresso de cloretos e que o modelo proposto mostra bons resultados quando comparado com os dados de campo.

3.2.12. Modelos que consideram outros mecanismos de transporte de cloretos pelo concreto, além da difusão

Zhang *et al.* (2019) [19] propuseram um modelo analítico empírico probabilístico, baseado em uma publicação anterior do mesmo autor que, além da difusão (D variando com o tempo), considera a convecção como um mecanismo de transporte também existente, de forma simplificada. O modelo foi proposto a partir de uma estrutura de 26 anos de serviço, com um concreto de relação a/l igual a 0,55 e exposta a um ambiente agressivo de *tidal zone*. A concentração superficial nesse modelo foi substituída pela concentração ($C_{s,\Delta x}$) e profundidade (Δx) do pico da zona de convecção. Os autores também fizeram uma análise sensitiva e apresentaram uma equação empírica, válida para concretos em situação semelhante.

O modelo **fib 2006** é um modelo proposto pela *Fédération internationale du béton* no *Bulletin 34 – Model Code for Service Life Design*. Esse documento propõe bases para o *Service Life Design* (SLD), apresentando diferentes modelos de degradação da estrutura, como corrosão induzida por carbonatação, por cloretos, ciclos de gelo e degelo, entre outros. Ele oferece quatro abordagens diferentes para o SLD: a) Probabilística completa; b) Semi-probabilística (por meio de fatores parciais, equivalentes aos coeficientes de segurança); c) Prescritiva (*deemed to satisfy design*); e d) Para evitar deterioração. Por ser o foco do artigo, apresenta-se aqui o modelo de

corrosão induzida por cloretos, em concreto não-fissurado, considerando somente a fase de iniciação – presente no Anexo B2 do código [68].

Esse modelo é baseado no DuraCrete. A convecção é considerada nos cálculos de forma simplificada, com o uso da profundidade da zona de convecção e de uma adaptação da C_s para $C_{s,\Delta x}$. Porém, nos três artigos aderidos que aplicaram esse modelo, não ficou clara essa consideração. O D_{app} pode ser obtido por meio de *fit* ou pode ser calculado por uma equação proposta, para projeto de novas estruturas. Nessa equação, o D_{app} é calculado a partir do D_{RCM} , coeficiente de migração obtido por um ensaio rápido de migração (NT BUILD 492 [51]) e influenciado pelo tempo, temperatura e fator de transferência (K). O modelo propõe o uso de alguns valores, nos parâmetros de entrada, como D_{RCM} , Δx , C_{cr} [68].

Três artigos aderidos aplicaram o modelo, todos de forma determinística, apesar do modelo original propor uma abordagem probabilística completa. SAFEHIAN e RAMEZANIANPOUR [42] utilizaram uma modificação do *fib* 2006 para a região específica do golfo pérsico, feita anteriormente pelos autores (Fib2012-M), além de outros três modelos. No presente levantamento, contabilizou-se Fib2012-M como *fib* 2006, por se tratar mais de uma aplicação para uma região específica. YOGALAKSHMI *et al.* [69] compararam o modelo de sub-difusão proposto por eles com o *fib* 2006, para alguns perfis de cloretos, concluindo que o *fib* pode ser um modelo mais conservador (menores tempo de iniciação) do que o modelo de sub-difusão. NIELSEN [70] apresentou proposta de *Service Life Design* (SLD) de forma adaptável e entendível para engenheiros estruturais, usando o *fib* 2006 para modelagem da corrosão iniciada por cloretos. Eles adotaram uma abordagem diferente, construindo um diagrama, em que ao se entrar com alguns parâmetros como: C_s , C_i , D_{app} , *ageing factor* do D e tempo de vida útil requerida, a resposta final é o cobrimento mínimo necessário. Essa é uma forma simplificada e mais rápida, mas útil de aplicar o modelo *fib*.

O modelo de **Da Costa *et al.* (2013)** [71] considera a difusão e a convecção como mecanismos de transporte, tendo sido baseado em GUZMÁN *et al.* [72]. Trata-se de um modelo mais complexo, que considera a transferência de calor e a fase de propagação da corrosão. O modelo adota D constante (característica intrínseca ao concreto), sendo a velocidade de convecção variável conforme a exposição (umidade interna, altura em relação ao nível médio do mar, face de exposição – predominância dos ventos). Essa abordagem mais ampla e complexa permitiu uma melhor compreensão dos dados experimentais, em relação a um modelo somente de difusão, mostrando a importância de se considerar a convecção em concretos não saturados, devido ao papel da sucção capilar na penetração dos cloretos, quando o concreto estiver submetido a ciclos de molhagem e seagem.

Hong e Ann (2018) [73] avaliaram a influência do nível da maré e da relação a/l na penetração de cloretos usando um modelo numérico combinado de transporte de umidade e cloretos. O transporte de umidade considera o movimento do líquido e do vapor d'água, e está associado à umidade relativa, tamanho dos poros e isotermas de adsorção e dessorção. Já o modelo de transporte de cloretos considera a difusão e a convecção como mecanismos de transportes. Na difusão, considera-se a fixação de cloretos pela isoterma de Langmuir.

O **modelo RMTC (Rational Model for Transport of Chloride ions in concrete)**, desenvolvido por BOULFIZA *et al.* [20], é um modelo racional de elemento finito que prevê o transporte de cloretos no concreto fissurado por difusão e advecção (*advection*, convecção), sob condições de saturação ou não saturação. A geometria da fissura (inclusive sua abertura variável) é levada em consideração, assim como propriedades de transporte na fissura e na matriz cimentícia não fissurada. A predição do fluxo de água no concreto fissurado, sob condições ambientais gerais, é feita com base na lei de Darcy. E para aplicar o modelo de uma forma mais fácil, os autores apresentaram um nomograma para concreto fissurado (com determinadas características), em que é possível saber o cobrimento necessário para se alcançar diferentes tempos de despassivação da armadura, tendo-se concentrações superficiais de cloretos distintas.

O modelo de **Saetta *et al.* (1993)** [33] é um modelo numérico que considera o transporte de cloretos por difusão e durante o fluxo de água (por convecção), juntamente com os efeitos da transferência de calor e umidade em concretos não saturados. Ele foi aplicado de forma simplificada em dois artigos. Para a situação estudada por FARAHANI *et al.* [55], o modelo superestimou os valores dos coeficientes de difusão. Em MEDEIROS-JUNIOR *et al.* [28], o modelo também foi utilizado para calcular a vida útil, junto com outros dois modelos, com o objetivo de analisar o impacto de mudanças climáticas. Apesar de ter sido aplicado em somente dois artigos, esse é um modelo citado por outros artigos, sendo base de alguns outros modelos, como os de Dominicini (2016) e Van Dinh (2017).

Lin *et al.* (2010) [74] desenvolveram um modelo numérico termo-higro-mecânico, que considera o decaimento da performance estrutural, transferência de calor e transporte de umidade na modelagem de ingresso de cloretos em concretos não saturados. O transporte de cloretos dentro do concreto é previsto considerando

a difusão e a convecção como mecanismos de transporte. Porém, além disso, o modelo leva em conta a transferência de calor pela lei de Fourier e o transporte de umidade, com a difusividade durante molhagem e secagem, com influência também do decaimento estrutural, da temperatura e do tempo. O decaimento estrutural considera deformação mecânica, contração e expansão devidas à temperatura e à molhagem e secagem, por meio da alteração na porosidade e permeabilidade do concreto. E dentro do modelo, a temperatura ambiente foi considerada como uma função senoidal. O modelo apresentou bom ajuste com dados experimentais. Os autores destacam que negligenciar o efeito da convecção em concreto não saturado superestima a vida útil, o que reforça a importância em considerar esta questão nos estudos preditivos de vida útil.

O modelo de transporte de cloretos da Universidade de Toronto (1999) é um programa de computador, introduzido por BODDY *et al.* [75], que considera alguns mecanismos de transporte: difusão – $D(t, T)$, convecção, permeabilidade e a ação capilar (*wicking action*), com a fixação de cloretos por isoterma de fixação não linear – Langmuir. Algumas fronteiras e limitações do modelo são: concreto homogêneo (sem fissuras), concreto saturado (exceto quando se considerar a ação capilar), líquido que carrega os cloretos é incompressível e D constante com a profundidade. Eles concluíram que o modelo proposto é versátil, capaz de considerar muitos aspectos do ingresso de cloretos no concreto e que existe a necessidade da entrada de dados condizentes com a realidade, pois todos afetam o modelo de alguma forma. Essa proposta foi aplicada de forma mais simples por THOMAS e BAMFORTH [35].

3.2.13. Modelos que não são diretamente baseados na Segunda Lei de Fick

O modelo numérico de **sub-difusão**, proposto por YOGALAKSHMI, *et al.* [69], foi baseado em estudo teórico de JANETT (2010)⁶. A sub-difusão abrange o refinamento das estruturas porosas do concreto, considerando que produtos de hidratação bloqueiam a conectividade dos poros e fazem o caminho tortuoso, o que retarda a difusão com o tempo. O método numérico utilizado foi *forward time and centred space scheme* (FTCS), um tipo de método das diferenças finitas. O modelo proposto pelos autores é comparado com o *fib* (2006). Nesses modelos, a difusão foi considerada o único mecanismo de transporte, por isso as curvas obtidas pelos modelos apresentaram grande divergência em relação aos dados reais obtidos em *splash zones*, em que a convecção é um importante mecanismo.

O modelo de **Bob (1996)** também foi outro aplicado por MEDEIROS-JUNIOR *et al.* [28], além de Saetta *et al.* (1993) [33] e Amey *et al.* (1998) [29]. Esse modelo calcula diretamente o cobrimento necessário, considerando a capacidade de fixação de cloretos em função do tipo de cimento (fator c), os efeitos da temperatura e umidade, além da resistência à compressão do concreto (parâmetro que só aparece nesse modelo, entre os levantados). O modelo em questão foi inicialmente empregado na análise da profundidade de carbonatação das estruturas, porém estudos de longa data mostraram que ele pode ser usado para modelar o processo de penetração de cloretos (BOB, 1996⁷ *apud* FERREIRA *et al.* [76]).

A **frente de ingresso de cloretos** é um modelo empírico, diferente dos anteriores, proposto por CHEEWAKET *et al.* [77]. Com dados de monitoramento de campo (*tidal zone*) durante 10 anos, foi possível acompanhar a frente de ingresso de cloretos, que equivale à profundidade que os cloretos penetraram no concreto no teor necessário para despassivar a armadura e começar a corrosão (teor crítico – parâmetro efetivamente medido nesse levantamento). Ao se considerar um valor para o cobrimento, é possível calcular o tempo de início de corrosão. É um modelo empírico simples, porém que requer um monitoramento de longo prazo, o que o tornaria impróprio para prever o tempo de início de corrosão na fase de projeto, caso não haja dados já levantados do monitoramento desse tipo de concreto sobre condições ambientais parecidas.

4. DISCUSSÃO

Apesar das limitações comentadas, a Segunda Lei de Fick, junto com suas modificações, é a base da maioria dos modelos levantados. Assim, o mecanismo de transporte mais relevante considerado é a difusão, apesar da existência de outros mecanismos importantes, como a convecção em zonas de molhagem e secagem, por exemplo. O conteúdo deste item, disposto na sequência, consolida os pontos mais importantes obtidos dos modelos levantados, dentro do contexto da análise preditiva de vida útil das estruturas de concreto atacadas por cloretos.

⁶ JANETT, P. **Diffusion on fractals and space-fractional diffusion equations**. Chemnitz University of Technology, Dissertation, 2010.

⁷ BOB, C. (1996) **Probabilistic assessment of reinforcement corrosion in existing structures**. *In*: International conference: concrete repair, rehabilitation and protection. Proceedings, Dundee, pp.17–28.

4.1. Classificação dos modelos

Em uma classificação geral, 29 modelos, equivalentes a 72% do total, têm um caráter essencialmente analítico e se baseiam na Segunda Lei de Fick, sendo que alguns deles consideram a convecção de forma simplificada (Figura 2). Entre esses modelos, sete apresentaram resolução numérica dessa lei, por meio dos métodos das diferenças finitas ou dos elementos finitos, porém não se caracterizaram como modelo numérico em si. Além disso, nove modelos foram classificados como analíticos empíricos, que por meio de equações ou coeficientes restringiam a aplicação do modelo a determinados tipos de concretos e situações (Tabela 2). Por fim, houve 9 modelos numéricos (23%) e 2 modelos puramente empíricos (5%) (Bob – 1996 e frente de ingresso de cloretos).

4.2. Parâmetros principais de entrada nos modelos

A Segunda Lei de Fick possui como principais dados de entrada os seguintes parâmetros: coeficiente de difusão (D), concentração superficial de cloretos (C_s), cobrimento (x , d) e o teor crítico de cloretos (C_{cr}). Existem diferentes métodos de calcular o D ; na literatura, é possível identificar revisões e estudos sobre o tema ou, de forma geral, sobre testes de resistência do concreto à penetração de cloretos [78–80]. Neste artigo, foram levantados os métodos de cálculo (Tabela 2). O método mais utilizado pelos autores foi o ajuste da equação (geralmente Segunda Lei de Fick) ao perfil de ingresso de cloretos obtidos de estruturas reais ou espécies de monitoramento submetidas a ambientes reais (*fit*). Em seguida, o que mais apareceu foram D calculados experimentalmente, por ensaios acelerados de difusão ou migração (NT BUILD 443 [81], NT BUILD 492 [51]), que poderiam ser utilizados no projeto de estruturas novas. Além disso, alguns autores optaram por utilizar valores de outros estudos na literatura, valores calculados por equações empíricas ou, no caso de programas computacionais, os usuários podem ter a opção de indicar o valor do D .

Também foi feito um levantamento sobre os teores críticos de cloretos (C_{cr}) utilizados nas aplicações dos modelos. A maioria utilizou o parâmetro se referindo aos cloretos totais e somente três artigos se referiram a cloretos livres [19, 74, 77]. Foi considerado que se o artigo não especificava a forma de ocorrência dos cloretos no concreto, tratava-se então de cloretos totais. Quanto à fonte, a maioria dos autores optou por utilizar dados da literatura ou da base do programa utilizado, sendo que apenas quatro artigos mediram os próprios teores de cloreto [14, 19, 59, 77], a partir de amostras retiradas da estrutura em estudo ou similar, ou provenientes de ensaio acelerado. Por exemplo, CHEEWAKET *et al.* [77] consideraram o teor crítico equivalente ao teor livre médio de cloretos relacionados a uma área corroída de até 2% de sua área total, apresentando valores diferentes para cada tipo de concreto, e JACIR e NAGI [59] consideraram como critério de despassivação da armadura a medição de uma corrente de 10 μ A na macrocélula, em um ensaio acelerado de corrosão, com ciclos de molhagem e secagem.

Entre os teores de cloretos levantados, três unidades apareceram:

- porcentagem de cloretos em relação à massa do concreto (% íons Cl – massa concreto);
- porcentagem de cloretos em relação à massa de cimento (% íons Cl – massa cimento); e
- kg de cloreto por m^3 de concreto (kg/m^3).

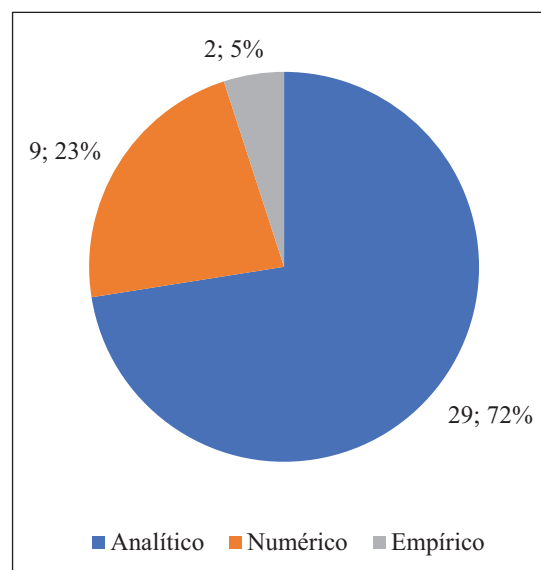


Figura 2: Classificação geral dos modelos.

As duas primeiras unidades apareceram praticamente à mesma quantidade de vezes, sendo 0,40% de Cl^- em relação à massa de cimento e 0,05% de Cl^- em relação à massa do concreto os valores mais repetidos. O histograma da Figura 3 mostra a frequência absoluta dos teores de cloretos totais e livres, nessas duas unidades. Apareceram somente seis teores críticos em kg/m^3 de concreto, variando de 0,52 a 1,25.

Em relação a esse parâmetro, ANGST [9] afirma que não existe consenso sobre valores. Constata-se alta variabilidade em diferentes estudos da literatura, o que pode ser em parte explicado pelo fato de não existir um método consensuado de medição em laboratório do C_{cr} . Porém, essa variabilidade continua alta para um mesmo método e concreto, o que pode ser indicativa de uma forte influência dos aspectos locais que caracterizam a complexa interface aço-concreto, no momento do início da corrosão. ANGST [6] destaca que o gargalo para modelos preditivos mais precisos são as limitações do conceito envolvendo o C_{cr} , as quais indicam uma falta de conhecimento do que realmente controla o início da corrosão.

4.3. Parâmetros de saída dos modelos

Os modelos podem considerar diferentes parâmetros de entrada e saída. A maioria calcula a vida útil (tempo de início de corrosão) de forma determinística ou associada a uma probabilidade de falha da estrutura, quando se têm como parâmetros de entrada as características do concreto e do meio ambiente, tais como: D , C_s , cobrimento e C_{cr} . Porém, existiram alguns modelos diferentes. No modelo HZM [14], o cobrimento e o D são as variáveis desconhecidas, calculadas para determinada vida útil requerida (50 e 120 anos) e índice de confiabilidade β (1,3; 1,5 e 1,8), gerando gráficos úteis na fase de projeto. YU *et al.* [49] aplicaram o modelo DuraCrete, ao calcular o β para determinada vida útil requerida (até 100 anos), buscando-se o valor alvo de 1,5. NIELSEN [70] aplicou o modelo *fib* (2006) [68], de forma diferente, como descrito anteriormente. BOULFIZA *et al.* [20], adicionalmente, usaram um nomograma (gráfico com curvas que mostram soluções possíveis de equações) para aplicar o modelo proposto por eles (RMTC) de uma forma mais fácil, em que o dado de saída é o cobrimento necessário. Assim, para determinada vida útil requerida, o cobrimento pode ser calculado, fixando-se os outros parâmetros.

4.4. Consideração da não saturação do concreto nos modelos

Pelos critérios de seleção utilizados nessa RSL, modelos que consideravam somente concreto saturado foram eliminados. Porém, observou-se, entre os modelos identificados, que a maioria considerou a não saturação do concreto (em *tidal e splash zones*, por exemplo) de forma implícita no coeficiente de difusão, como, por exemplo, em funções $D(h)$. Neste tipo de função, quanto maior a umidade interna do concreto, maior o D . Essa não saturação está de forma mais explícita nos modelos que consideraram outros mecanismos de transporte, como a convecção e a capilaridade (*wicking action*), e, de forma mais complexa, quando o transporte de umidade foi modelado: Hong e Ann (2018) [73], Lin *et al.* (2010) [74] e RMTC (2003).

O grau de saturação (GS) exerce uma grande influência no coeficiente de difusão, pois o transporte por esse mecanismo acontece em meio aquoso. MERCADO-MENDOZA *et al.* [82] obtiveram experimentalmente coeficientes de difusão com variações de até quatro ordens de magnitude, quando o GS variou entre 16% e 100%. FAVRETTO *et al.* [3] formularam modelos de estimativa do GS baseados em variáveis ambientais, para situações específicas e observaram que a vida útil é sensível a essa variável: ao se considerar o concreto saturado, a probabilidade de falha aumenta em relação ao concreto com menor grau de saturação.

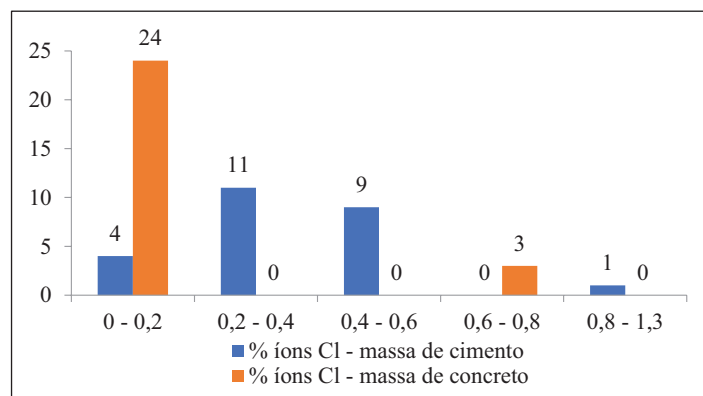


Figura 3: Histograma dos teores críticos de cloretos, totais e livres, utilizados pelos artigos aderidos.

4.5. Fatores influentes no coeficiente de difusão e na concentração superficial

Muitos modelos propuseram diferentes funções que estabelecem a influência de fatores sobre o D , principalmente tempo, temperatura e umidade. As funções mais repetidas foram: $f(t)$ de Maage *et al.* (1995) [32], uma função decrescente exponencial; $f(T)$ baseada na equação de Arrhenius, que calcula a velocidade de uma reação química com a temperatura; e $f(h)$ de Saetta *et al.* (1993) [33], em que o D diminui com a umidade relativa interna até certa umidade crítica (h_c), geralmente tomada como 75%.

TANG e GULIKERS [46] analisaram matematicamente a dependência com o tempo do coeficiente de difusão, considerando os erros causados por expressões matemáticas simplificadas e seu impacto na vida útil. A função $D(t)$ mais utilizada, proposta por Maage *et al.* (1995) [32], não pode ser colocada dentro da função de erro sem passar por integração, sendo assim uma solução matemática simplificada. Essa simplificação subestima significativamente o coeficiente de difusão aparente, podendo levar a uma superestimativa do tempo de vida útil, dependendo do *ageing factor* utilizado. Porém, ela pode ser corrigida ao se acrescentar outros termos na equação.

A dependência do C_s em relação ao tempo foi contabilizada de diferentes formas nos modelos, com uma variedade maior que as funções do D . Considerou-se a C_s crescente com o tempo de forma linear, exponencial, logarítmica ou ainda cíclica e periódica por meio de uma função senoidal.

4.6. Fixação de cloretos

Em relação à fixação de cloretos, somente 7 modelos a consideraram de forma explícita. Os modelos *software* CIKS, Universidade de Toronto (1999) e Hong e Ann (2018) [73] utilizaram a isoterma de Langmuir, que descreve a relação não linear entre cloretos fixos e livres; o modelo Lin *et al.* (2010) [74] considerou a isoterma de Freundlich, também não linear. Clinconc considera a fixação de cloretos dependente do tempo; Shi *et al.* (2012) [18], como um fator de correção do coeficiente de difusão; e Bob (1996), de forma ainda mais simplificada, pelo fator c , que indica a capacidade de fixação de cloretos em função do tipo de cimento. Nos demais modelos, essa capacidade de fixação provavelmente é considerada implícita no coeficiente de difusão.

A interação do cloreto com a matriz cimentícia, seja ela por fixação química ou física, é uma das justificativas do coeficiente de difusão diminuir com o tempo. Essa capacidade de fixação varia com a profundidade e o tempo, além de sofrer influência de vários fatores como concentração de cloretos, composição do cimento, materiais cimentícios suplementares, temperatura, carbonatação e uso de campo elétrico [83–85]. Essa interação pode induzir mudanças na estrutura de poro do concreto e afetar a difusão de íons. Em geral, a relação matemática entre cloretos fixos e livres é descrita por quatro tipos de isotermas: linear, Langmuir, Freundlich e BET (Brunauer, Emmett, Teller) [86].

YUAN *et al.* (2009) [83] ressaltam que “nenhuma isoterma de fixação sozinha pode expressar com precisão a relação entre cloreto livre e fixo dentro da faixa de concentração completa”. A isoterma de Langmuir é mais recomendada para baixa concentração de cloreto [83, 86]. A relação linear parece simplificar demais esse complexo processo. A isoterma de Freundlich corresponde bem aos resultados experimentais para concentrações da água do mar. E a isoterma de BET é pouco utilizada em modelos preditivos, devido à sua complexidade numérica. A não consideração da fixação de cloretos ou sua consideração de forma linear subestima o tempo de vida útil da estrutura [83].

4.7. Fissuras

Em relação ao efeito das fissuras, somente 6 modelos contabilizaram essa influência. Kwon *et al.* (2009) [12] e Shi *et al.* (2012) [18] utilizaram funções da abertura de fissuras – $f(w)$, que influenciam o D ; Leung, Hou (2015) [40] calcularam, por meio de um método numérico, um D_{eq} , dependente de vários fatores; Van Dinh (2017) [66] considerou um coeficiente de difusão do concreto fissurado (D_{cr}) dentro do D_{app} ; e BOULFIZA *et al.* [20] modelaram a fissura de forma discreta, considerando largura, profundidade e espaçamento, em um modelo numérico – RMTTC. Por fim, Lin *et al.* (2010) consideraram as fissuras de forma indireta, dentro do decaimento estrutural.

Entre os modelos, percebe-se uma baixa quantidade que considera a presença de fissuras. Isso se deve, provavelmente, à dificuldade em se avaliar a influência das fissuras nas características de difusão do cloreto. Porém, como a fissuração precoce pode ocorrer em estruturas de concreto armado, essa relação deveria ser considerada em modelos preditivos [12]. Em especial porque a presença de fissuras no concreto de cobrimento, principalmente quando localizada sobre a armadura, reduz a vida útil, dependendo de seu tamanho e profundidade [87].

4.8. Direção de penetração de cloretos no concreto

Todos os modelos levantados consideraram a penetração do cloreto no concreto somente em uma direção, com exceção do Dominicini (2016), que faz a modelagem em duas direções simultaneamente e dos modelos de

Leung e Hou (2015) [40] e RMTc, nos quais o transporte na região da fissura é considerado em duas direções, levando-se em conta também o movimento perpendicular em relação ao plano da fissura. O *software* Life-365 oferece a opção de modelagem em 1D e 2D. Os modelos unidimensionais representam melhor o ingresso em elementos planos, como lajes e paredes, porém no canto de elementos retilíneos, como pilares e vigas, há a sobreposição dos efeitos da penetração por duas direções, contribuindo para aumentar a complexidade do processo e de sua modelagem.

4.9. Aplicação de modelos

Entre os modelos que foram aplicados mais de uma vez, têm-se as recomendações de códigos ou de projetos internacionais (DuraCrete [45] e *fib* – 2006 [68]), *softwares* (Life-365 e DuraPGulf) e as pesquisas que serviram de base para outros modelos (Maage *et al.* – 1995 [32] e Saetta *et al.* – 1993 [33]), entre outros. Porém, os destaques em termos de aplicação foram os modelos que empregam a Segunda Lei de Fick, usando a solução de Crank, com D e C_s constantes.

A grande utilização do Life-365 (no levantamento realizado), por exemplo, pode ser explicada pela praticidade de cálculo, realizada pelo *software* gratuito e de fácil acesso. Uma vantagem desse *software* é o cálculo do custo do ciclo de vida, que leva em conta o custo inicial da construção, mas, também, o de operação e manutenção, de acordo com sua vida útil. Essa abordagem econômica é importante e pode ajudar na tomada de decisão de projetistas e contratantes.

Além desses, cabe destacar os modelos mais complexos e completos entre os levantados, que levam em consideração uma série de fatores e têm uma parte matemática mais complexa: Lin *et al.* (2010) [74] e o modelo de transporte de cloretos da Universidade de Toronto. Modelos mais complexos, baseados em equações de fluxos e que procuram simular os processos físicos e químicos que acontecem, dão as previsões teóricas mais precisas, porém as suas condições de fronteiras podem ter complicada modelagem e eles requerem uma grande quantidade de parâmetros de entradas, tanto do material testado quanto do ambiente de exposição. Esses dois fatores dificultam a aplicação comercial e ampla desse tipo de modelo preditivo [88].

Em modelos menos complexos, como os analíticos e empíricos, seus parâmetros de entrada devem ser obtidos por meio de ensaios ou monitoramento de estruturas reais para os concretos estudados ou concretos semelhantes. Para melhorar sua precisão é preciso dados de exposição de qualidade de longa duração [88], o que muitas vezes não está disponível para o tipo de concreto e ambiente de exposição requerido.

4.10. Modelos aplicados de forma probabilística

Entre os modelos aplicados de forma probabilística, que considera a variabilidade presente no ingresso de cloreto no concreto, diferentes métodos foram utilizados. O mais recorrente foi a Simulação de Monte Carlo, que apareceu em nove artigos diferentes [12, 14, 17, 19, 44, 47, 49, 89, 90]. Esse método numérico simula diferentes cenários considerando a variabilidade dos parâmetros, descrevendo os domínios de segurança e falha existentes [90]. A Simulação Monte Carlo também foi realizada com diferentes quantidades de repetições, variando entre 5000 e 1 000 000 de vezes, sendo a mais comum 100 000 simulações.

Outros métodos utilizados foram *fuzzy arithmetic approach* (DO *et al.* [11]), FORM – *first order reliability method* [17, 49, 90] e *Markov chains* [90]. O *fuzzy arithmetic* é um método mais simples que transforma os parâmetros de entrada com distribuição normal e lognormal em *triangular fuzzy number* (TFN). YU *et al.* [49] compararam o FORM com o SORM (*second order reliability method*) e a simulação Monte Carlo, sendo o primeiro método mais eficiente, por apresentar bons resultados (erro relativo de 5%) e menor custo operacional.

Na análise probabilística, a vida útil da estrutura está associada à probabilidade de falha (pf), ou seja, probabilidade de início de corrosão nesses casos. Os valores adotados da pf foram 7%, 10% e 50%, sendo 10% o mais recorrente. A pf é inversamente associada a um índice de confiabilidade (β). Os valores de β que apareceram foram 1,3; 1,5 e 1,8, sendo 1,3 o mais recorrente (corresponde a 10% de probabilidade de falha). A escolha desse índice β deve levar em consideração as consequências possíveis devido a uma falha da estrutura, considerando prejuízos a vida humana, perdas econômicas e o grau de inconveniência social [91]. O código *fib* 2006 [68] sugere 10% de probabilidade de falha para a despassivação da armadura.

Em comparação a uma abordagem determinística, considerando os mesmos parâmetros de entrada, o tempo de vida útil calculado pelo método probabilístico é menor que o determinístico, ao se considerar uma probabilidade de falha de 7 ou 10% [12].

Outro ponto importante na análise probabilística é que a entrada das variáveis não é feita com um valor único e sim com um conjunto de dados que apresenta média, desvio padrão, coeficiente de variação e um tipo de distribuição. Foram levantados quatro tipos de distribuição: lognormal e normal (mais recorrentes), beta e

gama. O coeficiente de difusão e a concentração superficial tiveram em sua maioria uma distribuição lognormal; o cobrimento, uma distribuição normal; e o teor crítico, distribuição normal e lognormal (na mesma quantidade de vezes).

5. CONCLUSÕES

Quantificar a durabilidade de estruturas em ambientes marinhos se torna um grande desafio, devido à alta variabilidade dos fatores envolvidos. Assim, pela análise qualitativa, observou-se que a maior parte dos modelos levantados consideram as seguintes simplificações:

- os cloretos penetram no concreto, o qual, geralmente, encontra-se livre da contaminação inicial de cloretos;
- o principal mecanismo de transporte considerado é a difusão;
- a corrosão da armadura começa quando a concentração de cloretos na superfície da armadura ultrapassa o teor crítico de cloretos, o que traduz uma abordagem a favor da segurança em termos do fim da vida útil da estrutura;
- a maioria dos modelos se baseou na Segunda Lei de Fick, propondo modificações com vistas ao aperfeiçoamento da previsão da vida útil da estrutura.

Em relação à forma de aplicação desses modelos, pôde-se constatar que:

- houve a predominância da abordagem determinística (76%);
- 22% dos autores optaram por uma análise probabilística, que leva em consideração as incertezas existentes no processo, como as heterogeneidades do concreto e as variações da espessura do cobrimento e da concentração de cloretos livres na vizinhança da armadura. Ela é uma abordagem mais completa, porém mais trabalhosa e que requer uma maior base de dados, para uma previsão realista.

Observou-se a evolução dos modelos preditivos, desde os modelos analíticos, baseados na solução de Crank para a Segunda Lei de Fick, até modelos numéricos mais complexos, que consideram outros mecanismos de transporte (convecção, permeabilidade) – além de modelarem o transporte de umidade e a transferência de calor. Porém, entre os modelos levantados, ainda predominam, com 72%, os modelos analíticos, tais como apresentados por Pack *et al.* (2010) [43], DuraPGulf (2008) e Yu *et al.* (2015) [65].

Os modelos analisados são uma simplificação da realidade e um adequado equilíbrio entre complexidade e aplicabilidade deve ser buscado, para se obter modelos mais precisos, porém possíveis de serem aplicados na prática.

Percebeu-se, também, na previsão da vida útil, a importância do monitoramento de estruturas existentes em diferentes locais e da atualização dos perfis de ingresso de cloretos, uma vez que isso possibilita a construção de uma base de dados com os valores médios e suas distribuições, o que contribui para retroalimentar e calibrar os modelos existentes.

No contexto da corrosão das armaduras iniciada por cloretos, o presente artigo contribuiu, então, com um panorama dos modelos preditivos de vida útil de estruturas de concreto, produzindo um estado da arte sobre o tema a partir de um criterioso trabalho de revisão sistemática da literatura. Os modelos mais empregados utilizados em escalas nacional e internacional foram identificados, descritos e analisados, com avanços propostos em termos de classificações gerais e específicas em face das diversas abordagens consideradas. Sem a pretensão de esgotar o assunto, certamente a proposição deste conteúdo atualizado representa uma contribuição para estudiosos e pesquisadores da durabilidade de estruturas de concreto, notadamente os que se dedicam aos estudos de desempenho e de previsão comportamental.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FURNAS Centrais Elétricas e à ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, pelo fomento e apoio à pesquisa, bem como à CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – e ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela concessão de bolsa aos autores.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] TEIXEIRA, F.R., WALLY, G.B., MAGALHÃES, F.C., *et al.*, “Avaliação de propriedades relacionadas à penetração de cloretos em concretos produzidos com substituição parcial de cimento por resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais”, *Matéria (Rio J.)*, v. 26, n. 3, e13029, 2021.
- [2] TREVISOL, C.A., SILVA, P.R.P., PAULA, M.M.S., *et al.*, “Avaliação de inibidores de corrosão para estruturas de concreto armado”, *Matéria (Rio J.)*, v. 22, n. 4, e-11904, 2017.

- [3] FAVRETTO, F., MAGALHÃES, F.C., GUIMARÃES, A.T.C., *et al.*, “Modelos de estimativa do grau de saturação do concreto a partir das variáveis ambientais aplicados à análise de confiabilidade de estruturas de concreto armado atacadas por íons cloreto”, *Matéria (Rio J.)*, v. 26, n. 3, e13001, 2021.
- [4] HELENE, P.R.L., “Introdução da durabilidade no projeto de estruturas de concreto”, *Ambiente Construído*, v. 1, n. 2, pp. 45–57, 1997.
- [5] VIEIRA, D.R., MOREIRA, A.L.R., CALMON, J.L., *et al.*, “Service life modeling of a bridge in a tropical marine environment for durable design”, *Construction and Building Materials*, v. 163, pp. 315–325, 2018.
- [6] MEHTA, P.K., MONTEIRO, P.J.M., *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. 2 ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2014.
- [7] BAROGHEL-BOUNY, V., CAPRA, B., LAURENS, S., “A durabilidade das armaduras e do concreto de cobrimento”, In: OLLIVER, J.P., VICHOT, A. (ed), *Durabilidade do Concreto: Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo como ambiente*. 1 ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2014.
- [8] HELENE, P., “A Nova ABNT NBR 6118 e a Vida Útil das Estruturas de Concreto”, In: *Anais do Seminário de Patologia das Construções*, Porto Alegre, 2004.
- [9] ANGST, U.M., “Predicting the time to corrosion initiation in reinforced concrete structures exposed to chlorides”, *Cement and Concrete Research*, v. 115, pp. 559–567, 2019.
- [10] LOPES, R.C., OLIVEIRA, A.M., CASCUDO, O., “Modelos preditivos de vida útil de estruturas de concreto sujeitas à iniciação da corrosão de armaduras por cloretos: contribuição ao estado da arte por meio de revisão sistemática da literatura – Parte 1”, *Matéria (Rio J.)*, in press, 2022. <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2022-44821>
- [11] DO, J., SONG, H., SO, S., *et al.*, “Comparison of deterministic calculation and fuzzy arithmetic for two prediction model equations of corrosion initiation”, *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, v. 4, n. 2, pp. 447–454, 2005.
- [12] KWON, S.J., NA, U.J., PARK, S.S., *et al.*, “Service life prediction of concrete wharves with early-aged crack: Probabilistic approach for chloride diffusion”, *Structural Safety*, v. 31, n. 1, pp. 75–83, 2009.
- [13] KHATRI, R.P., SIRIVIVATNANON, V., “Characteristic service life for concrete exposed to marine environments”, *Cement and Concrete Research*, v. 34, n. 5, pp. 745–752, 2004.
- [14] LI, Q., LI, K., ZHOU, X., *et al.*, “Model-based durability design of concrete structures in Hong Kong–Zhuhai–Macau Sea link Project”, *Structural Safety*, v. 53, pp.1–12, 2015.
- [15] OSLAKOVIC, I.S., BJEGOVIĆ, D., MIKULIĆ, D., “Evaluation of service life design models on concrete structures exposed to marine environment”, *Materials and Structures*, v. 43, n. 10, pp. 1397–1412, 2010.
- [16] ASHRAFI, H.R., RAMEZANIANPOUR, A.A., “Service life prediction of silica fume concretes”, *Internacional Journal of Civil Engineering*, v. 5, n. 3, pp. 182–197, 2007.
- [17] PANG, L., LI, Q., “Service life prediction of RC structures in marine environment using long term chloride ingress data: Comparison between exposure trials and real structure surveys”, *Construction and Building Materials*, v. 113, pp. 979–987, 2016.
- [18] SHI, W., YU, Z., KUANG, Y., *et al.*, “Probability-based durability analysis of structural concrete under chloride salt environment”, *Applied Mechanics and Materials*, v. 166, pp. 1843–1847, 2012.
- [19] ZHANG, Y., ZHOU, X., ZHANG, Y., *et al.*, “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, 116707, 2019.
- [20] BOULFIZA, M., SAKAI, K., BANTHIA, N., *et al.*, “Prediction of chloride ions ingress in uncracked and cracked concrete”, *ACI Materials Journal*, v. 100, n. 1, pp. 38–48, 2003.
- [21] OLLIVIER, J.P., TORRENTI, J.M., “A estrutura porosa dos concretos e as propriedades de transporte”. In: OLLIVER, J.P., VICHOT, A. (ed), *Durabilidade do Concreto: Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo como ambiente*. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2014.
- [22] SHI, X., XIE, N., FORTUNE, K., *et al.*, “Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview”, *Construction and Building Materials*, v. 30, pp. 125–138, 2012.
- [23] LU, C., GAO, Y., CUI, Z., *et al.*, “Experimental analysis of chloride penetration into concrete subjected to drying-wetting cycles”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 27, n. 12, 2015.

- [24] ANN, K.Y., AHN, J.H., RYOU, J.S., “The importance of chloride content at the concrete surface in assessing the time to corrosion of steel in concrete structures”, *Construction and Building Materials*, v. 23, n. 1, pp. 239–245, 2009.
- [25] DOMINGUEZ, J.G., MENDOZA, C.G., “Durability of reinforced concrete applying some expert systems from the world wide web”, In: *Proceedings of the International Conference Achieving Sustainability in Construction*. Dundee, 2005. pp. 299–306.
- [26] NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY (NIST), “Computer Integrated Knowledge System for High Performance Concrete”, last updated February 24, 2017, *The National Institute of Standards and Technology (NIST) is an agency of the U.S. Commerce Department*. <https://ciks.cbt.nist.gov/~bentz/welcome.html>.
- [27] BENTZ, D.P., CLIFTON, J.R., SNYDER, K.A., “A Prototype Computer-Integrated Knowledge System: Predicting the Service Life of Chloride-Exposed Concrete”, *Concrete International*, v. 18, n. 12, pp. 42–47, 1996.
- [28] MEDEIROS-JUNIOR, R.A., LIMA, M.G., MEDEIROS, M.H.F., “Service life of concrete structures considering the effects of temperature and relative humidity on chloride transport”, *Environment development and sustainability*, v. 17, pp. 1103–1119, 2015.
- [29] AMEY, S.L., JOHNSON, D.A., MILTENBERGER, M.A., *et al.*, “Predicting the service life of concrete marine structures: An environmental methodology”, *ACI Structural Journal*, v. 95, n. 2, pp. 205–214, 1998.
- [30] KRISTIAPAN, S., GAN, B.S., NURROHMAH, S., “Estimating Corrosion Initiation Period Due to Chloride Ingress into Reinforced Self-Compacting Concrete Incorporating High Volume Fly Ash”, In: *Proceedings of the International Symposium on Civil and Environmental Engineering, ISCEE 2016*, Shenzhen, 2017.
- [31] MAAGE, M., HELLAND, S.T., CARLSEN, J.E., “Chloride penetration in high performance concrete exposed to marine environment”, In: *International RILEM Workshop on Durability of High Strength Concrete*, pp. 194–207, Lillehammer, 1993.
- [32] MAAGE, M., HELLAND, S., CARLSEN, J.E., “Practical non-steady state chloride transport as a part of a model for predicting the initiation period”, In: NILSSON, L.O., OLLIVIER, J.P. (org), *RILEM International Workshop on Chloride Penetration into concrete*, pp. 398–406, 1995.
- [33] SAETTA, A.V., SCOTTA, R.V., VITALIANI, R.V. “Analysis of chloride diffusion into partially saturated concrete”, *ACI Materials Journal*, v. 90, n. 5, pp. 441–451, 1993.
- [34] MANGAT, P.S., MOLLOY, B.T., “Prediction of long-term chloride concentration in concrete”, *Materials and structures*, v. 27, n. 6, pp. 338–346, 1994.
- [35] THOMAS, M.D.A., BAMFORTH, P.B., “Modelling chloride diffusion in concrete: Effect of fly ash and slag”, *Cement and Concrete Research*, v. 29, n. 4, pp. 487–495, 1999.
- [36] NILSSON, L.O., “On the uncertainty of service-life models for reinforced marine concrete structures”, In: *Proceedings of the International Rilem Workshop on Life Prediction and Aging Management of Concrete Structure*, Paris, 2000.
- [37] MAAGE, M., HELLAND, S., POULSEN, E., *et al.*, “Service life prediction of existing concrete structures exposed to marine environment”, *ACI Materials Journal*, v. 93, n. 6, 1996.
- [38] MACKECHNIE, J.R. *Predictions of reinforced concrete durability in the marine environment*. Tese (Doutorado em Filosofia), University of Cape Town, Cape Town, 1995.
- [39] HEATH, K. “Marinas in the Arabian Gulf region”, In: Alexander, M. (org) *Marine Concrete Structures*. 1 ed. United Kingdom: Woodhead Publishing, 2016. pp. 215–240.
- [40] LEUNG, C.K., HOU, D., “Numerical simulation of chloride-induced corrosion initiation in reinforced concrete structures with cracks”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 27, n. 3, 04014122, 2015.
- [41] BJEGOVIĆ, D., KRSTIĆ, V., MIKULIĆ, D., *et al.*, “C-D-c-t diagrams for practical design of concrete durability parameters”, *Cement and Concrete Research*, v. 25, n. 1, pp. 187–196, 1995.
- [42] SAFEHIAN, M., RAMEZANIANPOUR, A.A., “Assessment of service life models for determination of chloride penetration into silica fume concrete in the severe marine environmental condition”, *Construction and Building Materials*, v. 48, pp. 287–294, 2013.
- [43] PACK, S.W., JUNG, M.S., SONG, H.W., *et al.*, “Prediction of time dependent chloride transport in concrete structures exposed to a marine environment”, *Cement and Concrete Research*, v. 40, pp. 302–312, 2010.

- [44] DUAN, A., DAI, J.G., JIN, W.L., “Probabilistic approach for durability design of concrete structures in marine environments”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 27, n. 2, A4014007, 2015.
- [45] ENGELUND, E., MOHR, L., EDVARDSEN, C., et al., General Guide-lines for Durability Design and Redesign: DuraCrete, Probabilistic Performance based Durability Design of Concrete Structures. Gouda: CUR, 2000.
- [46] LUPING, T., GULIKERS, J., “On the mathematics of time-dependent apparent chloride diffusion coefficient in concrete”, *Cement and Concrete Research*, v. 37, n. 4, pp. 589–595, 2007.
- [47] WU, L., LI, W., YU, X., “Time-dependent chloride penetration in concrete in marine Environments”, *Construction and Building Materials*, v. 152, pp. 406–413, 2017.
- [48] VAN BREUGEL, K., POLDER, R.B., DE ROOIJ, M.R., “Long-term performance of marine structures in the Netherlands - validation of predictive models for chloride ingress”, In: *Proceedings of 5th International Symposium on Life-Cycle Engineering*, pp. 1285–1294, Delft, 2016.
- [49] YU, B., NING, C.L., LI, B., “Probabilistic durability assessment of concrete structures in marine environments: Reliability and sensitivity analysis”, *China Ocean Engineering*, v. 31, n. 1, pp.63–73, 2017.
- [50] MARQUES, P.F., COSTA, A., LANATA, F., “Service life of RC structures: chloride induced corrosion: prescriptive versus performance-based methodologies”, *Materials and Structures*, v. 45, pp. 277–296, 2012.
- [51] NORDTEST., “Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments”, *N.T. BUILD 492*. Espoo: NORDTEST, 1999.
- [52] SMITH, B.G., “Durability of silica fume concrete exposed to chloride in hot climates”, *Journal of materials in civil engineering*, v. 13, n. 1, pp. 41–48, 2001.
- [53] SMITH, B.G., CREVELING, M., TEIG, J.W. “Sustainable Concrete Mix Designs for 100-year Service Life for Bridges in San Diego County Coastal Environments”, In: *Proceedings of Conference on Coastal Engineering Practice*, pp. 184–197, San Diego, 2011.
- [54] FERREIRA, R.M., “Optimization of RC structure performance in marine environment”, *Engineering Structures*, v. 32, n. 5, pp. 1489–1494, 2010.
- [55] 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, pp. 10–17, 2015.
- [56] LIFE-365. *Life-365 Consortium*. <http://www.life-365.org/index.html>.
- [57] LIFE-365, “LIFE-365™ Service Life Prediction Model™”, version 2.2.3, *Life-365*. http://www.life-365.org/download/Life-365_v2.2.3_Users_Manual.pdf
- [58] BURRIS, L.E., RIDING, K.A., “Diffusivity of binary and ternary concrete mixture blends”, *ACI Materials Journal*, v. 111, n. 4, pp. 373–382, 2014.
- [59] JACIR, U., NAGI, M., “Evaluation of Service Life of Reinforced Concrete in the Middle East – Five Year Testing”, In: *Proceedings of European Corrosion Congress, EUROCORR 2016*, Paris, 2016.
- [60] RIDING, K., SCHINDLER, A., PESEK, P., et al., *ConcreteWorks v3 training/user manual*. College Station: Texas A&M Transportation Institute, 2017. <https://library.ctr.utexas.edu/ctr-publications/0-6332-p1p2.pdf>
- [61] TANG, L., NILSSON, L.O., “A numerical method for prediction of chloride penetration into concrete structures”. In: Jennings, H., Kropp, J., Scrivener, K. (org), *The Modelling of Microstructure and its Potential for Studying Transport Properties and Durability*. Saint-Rémy-lès-Chevreuse: Kluwer Academic Publisher, 1994. pp. 539–552.
- [62] LUPING, T., “ClinConc model for prediction of chloride penetration into concrete—From the original to the latest modifications”, In: Nilsson, L.O. (org) *Prediction models for chloride ingress and corrosion initiation in concrete structures*. Göteborg: Chalmers University of Technology, 2001.
- [63] SHEKARCHI, M., GHODS, P., ALIZADEH, R., et al., “Duragulf, a local service life model for the durability of concrete structures in the south of Iran”, *The Arabian Journal for Science and Engineering*, v. 33, pp.78–88, 2008.
- [64] ALIZADEH, R., GHODS, P., CHINI, M., et al., “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, n. 1, pp. 2–8, 2008.
- [65] YU, Z., CHEN, Y., LIU, P., WANG, W., “Accelerated simulation of chloride ingress into concrete under drying–wetting alternation condition chloride environment”, *Construction and Building Materials*, v. 93, pp. 205–213, 2015.

- [66] VAN DINH, D., “Initiation time of corrosion in reinforced concrete structures exposed to chloride in marine environment”, *International Journal of Civil Engineering and Technology*, v. 8, n. 9, pp. 564–571, 2017.
- [67] DOMINICINI, W.K., CALMON, J.L., “Computational modeling for predicting corrosion initiation in reinforced concrete structures”, *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 10, n. 6, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952017000600006>
- [68] FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON (fib). *fib Bulletin 34: Model code for Service Life Design*. Lausanne: fib, 2006.
- [69] YOGALAKSHMI, N.J., RAO, K.B., ANOOP, M.B., “Durability-Based Service Life Design of RC Structures – Chloride-Induced Corrosion”, In: *Proceedings of the International Conference on Reliability, Safety and Hazard, ICRESH 2019*, pp. 580–590, Chennai, 2020.
- [70] NIELSEN, C.V., “Service Life Modelling for Chloride Ingress in Reinforced Concrete”, In: *Proceedings of the 2017 fib Symposium*, pp. 2234–2243, Maastricht, 2017.
- [71] DA COSTA, A., FENAUX, M., FERNÁNDEZ, J., *et al.*, “Modelling of chloride penetration into non-saturated concrete: Case study application for real marine offshore structures”, *Construction and Building Materials*, v. 43, pp. 217–224, 2013.
- [72] GUZMÁN, S., GÁLVEZ, J.C., SANCHO, J.M., “Cover cracking of reinforced concrete due to rebar corrosion induced by chloride penetration”, *Cement and Concrete Research*, v. 41, n. 8, pp. 893–902, 2011.
- [73] HONG, S.I., ANN, K.Y., “Numerical Prediction of Chloride Penetration in Concrete Exposed to a Marine Environment at Tide”, *Advances in Materials Science and Engineering*, v. 2018, 7591576, 2018.
- [74] 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, pp. 571–579, 2010.
- [75] BODDY, A., BENTZ, E., THOMAS, M.D.A., *et al.*, “An overview and sensitivity study of a multimechanistic chloride transport model”, *Cement and Concrete Research*, v. 29, pp. 827–837, 1999.
- [76] FERREIRA, C.F., PALIGA, C.M., TORRES, A.S., “Avaliação da penetração de cloretos em elementos de concreto na cidade de Pelotas/RS”, *Revista ALCONPAT*, v. 8, n. 2, pp. 123–137, 2018.
- [77] CHEEWAKET, T., JATURAPITAKKUL, C., CHALEE, W., “Initial corrosion presented by chloride threshold penetration of concrete up to 10 year-results under marine site”, *Construction and Building Materials*, v. 37, pp. 693–698, 2012.
- [78] ANDRADE, C., CASTELLOTE, M., ALONSO, C., *et al.*, “Non-steady-state chloride diffusion coefficients obtained from migration and natural diffusion tests. Part I: Comparison between several methods of calculation”, *Materials and Structures*, v. 33, n. 1, pp. 21–28, 2000.
- [79] NARSILIO, G.A., LI, R., PIVONKA, P., *et al.*, “Comparative study of methods used to estimate ionic diffusion coefficients using migration tests”, *Cement and Concrete Research*, v. 37, n. 8, pp. 1152–1163, 2007.
- [80] STANISH, K.D., HOOTON, R.D., THOMAS, M.D., “Testing the Chloride Penetration Resistance of Concrete: A Literature Review”, *FHWA Contract DTFH61-97-R-00022*. Washington: Federal Highway Administration, 2001.
- [81] NORDTEST, “Concrete, Hardened: accelerated chloride penetration”, *N.T. BUILD 443*. Espoo: NORD-TEST, 1995.
- [82] MERCADO-MENDOZA, H., LORENTE, S., BOURBON, X., “The Diffusion Coefficient of Ionic Species Through Unsaturated Materials”, *Transport in Porous Media*, v. 96, n. 3, pp. 469–481, 2013.
- [83] YUAN, Q., SHI, C., DE SCHUTTER, G., *et al.*, “Chloride binding of cement-based materials subjected to external chloride environment – A review” *Construction and Building Materials*, v. 23, n. 1, pp. 1–13, 2009.
- [84] ANDRADE, C., CASTELLOTE, M., D’ANDREA, R., “Measurement of ageing effect on chloride diffusion coefficients in cementitious matrices”, *Journal of Nuclear Materials*, v. 412, n. 1, pp. 209–216, 2011.
- [85] WANG, J., NG, P.L., SU, H., *et al.*, “Influence of the coupled time and concrete stress effects on instantaneous chloride diffusion coefficient”, *Construction and Building Materials*, v. 237, 117645, 2020.
- [86] ZHANG, Y., ZHANG, M., “Transport properties in unsaturated cement-based materials – A review”, *Construction and Building Materials*, v. 72, pp. 367–379, 2014.

- [87] JONES, S., MARTYS, N., LU, Y., *et al.*, “Simulation studies of methods to delay corrosion and increase service life for cracked concrete exposed to chlorides”, *Cement and Concrete Composites*, v. 58, pp. 59–69, 2015.
- [88] TANG, L., NILSSON, L.O., BASHEER, P.A.M., *Resistance of concrete to chloride ingress: Testing and modelling*. Abingdon: Taylor and Francis, 2012.
- [89] NOGUEIRA, C.G., LEONEL, E.D., “Probabilistic models applied to safety assessment of reinforced concrete structures subjected to chloride ingress”, *Engineering Failure Analysis*, v. 31, pp. 76–89, 2013.
- [90] POSSAN, E., ANDRADE, J.J.O., “Markov Chains and Reliability Analysis for Reinforced Concrete Structure Service Life”, *Materials Research*, v. 17, n. 3, pp. 593–502, 2014.
- [91] FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON (fib). *fib Model Code for Concrete Structures*. Lausanne: fib, 2010.