REVISTA Mundi
Engenharia, Tecnologia e Gestão
INSTITUTO FEDERAL Paraná

# MODELO DE ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL BASEADO NA PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO: UMA ANÁLISE PARAMÉTRICA

## *SERVICE LIFE MODEL BASED ON CHLORIDE ION PENETRATION: SENSITIVITY ANALYSIS*

Gustavo Bosel Wally[1]
Félix Krolow Sell Junior[1]
Leandro Candido de Lemos Pinheiro[2]
Fábio Costa Magalhães[3]
Mauro de Vasconcellos Real[4]

**Resumo:** O principal agente de degradação de estruturas de concreto armado expostas a ambientes marinhos é o íon cloreto. Frente a isso, nos últimos anos diversos modelos têm sido desenvolvidos e aprimorados visando descrever da melhor forma possível o complexo fenômeno da penetração de íons cloreto no concreto. Um desses modelos foi proposto pelo projeto europeu DuraCrete no ano 2000 e, após sofrer algumas modificações, tem sido incorporado por países da Europa em suas normas de concepção de projetos com vistas à durabilidade, propondo uma análise baseada na segunda lei da difusão de Fick combinada a um coeficiente de difusão variável no tempo. No presente trabalho foi realizada uma análise paramétrica desse modelo, visando avaliar a influência de cada um de seus parâmetros básicos na concentração de cloretos no interior da estrutura, considerando cada variável como uma grandeza aleatória que apresenta um valor médio e um desvio padrão característico. A análise foi realizada a partir de um método de simulação numérica (Simulação de Monte Carlo) afim de estimar a concentração de cloretos na profundidade da armadura da estrutura em um período de 50 anos. Verificou-se a convergência estatística do modelo e se concluiu que o cobrimento da armadura, a influência da idade na difusão e a temperatura à qual a estrutura é exposta são os parâmetros que atuam mais fortemente na concentração de cloretos e, portanto, necessitam de maior atenção.

**Palavras-chave**: Penetração de cloretos. Durabilidade. Análise paramétrica.

**Abstract:** The main agent of degradation of reinforced concrete structures exposed to marine environments is the chloride ion. In view of this, in the last years several models have been developed and improved in order to best describe the complex phenomenon of the penetration of chloride ions in the concrete. One such model was proposed by the European project DuraCrete in the year 2000 and, after undergoing some modifications, it has been incorporated by European countries in its codes of design of projects with a view to the durability, proposing an analysis based on Fick's second law combined to a time-varying diffusion coefficient. In the present work a sensitivity analysis of this model was carried out, aiming to evaluate the influence of each of its basic parameters on the concentration of chlorides inside the structure, considering each variable as a random quantity that presents a mean value and a characteristic

[1] Mestrando, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica – PPGEO/FURG, gustavo.wally@gmail.com
[2] Mestre, Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção Civil – LEMCC/IFRS.
[3] Doutor, Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção Civil – LEMCC/IFRS.
[4] Doutor, Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica – PPGEO/FURG.

standard deviation. The analysis was carried out using a numerical simulation method (Monte Carlo simulation) in order to estimate the chloride concentration in the depth of the reinforce in a period of 50 years. It was verified the statistical convergence of the model and it was concluded that the covering of the reinforce, the influence of the age in the diffusion and the temperature to which the structure is exposed are the parameters that act more strongly in the concentration of chlorides and, therefore, need bigger attention.

**Keywords**: Chloride penetration. Durability. Sensitivity analysis.

# 1 INTRODUÇÃO

A durabilidade do concreto de cimento Portland pode ser definida como sua capacidade de resistir à ação de intempéries, abrasão, ataques químicos ou qualquer outro processo de deterioração (Mehta & Monteiro, 2008). Um concreto durável manterá sua forma, qualidade e capacidade de utilização iniciais quando exposto a um meio ambiente por um período determinado em sua concepção (Hackl e Kohler, 2016).

De acordo com Medeiros *et al*. (2011), a vida útil das estruturas é uma análise ampla que engloba fatores como projeto, execução, materiais empregados, uso e outros, sendo esta um conceito quantitativo associado a um período de tempo.

O ambiente marinho é o mais severo às estruturas de concreto pois a ação de íons nocivos gera o dano inicial da estrutura. A penetração de íons cloreto é um processo complexo que depende de diversos parâmetros, incluindo as propriedades do concreto, a espessura do cobrimento sobre a armadura e as condições de exposição do concreto aos íons (Yu *et al*., 2017) e que, conforme Zhuo *et al*. (2010), gera a corrosão das armaduras, sendo esta a principal causa da diminuição do desempenho do concreto armado, reduzindo, também, sua vida útil.

Segundo Magalhães (2018) as preocupações acerca da vida útil das estruturas em sua fase de projeto são um procedimento recente, sendo introduzidas na Europa e nos Estados Unidos na década de 1990 e no Brasil em 2003, após a publicação da ABNT NBR 6118. Contribuem, também, para a introdução e consolidação de novos conceitos acerca da durabilidade e do aumento da vida útil das estruturas de concreto documentos internacionais sobre o tema e publicações de especialistas como Bertolini (2010), Gjørv (2015) e Ribeiro (2018).

O desenvolvimento de um modelo matemático geral que possibilite uma previsão de quanto tempo é necessário para que a capacidade de carga da estrutura seja reduzida devido à corrosão da armadura parece ser bastante difícil (Gjørv, 2015). Frente a isso, visto que todos os parâmetros de entrada necessários ao cálculo da taxa de penetração do cloreto através do cobrimento

sempre apresentam alta variabilidade e dispersão, é conveniente combinar esse cálculo a uma análise de probabilidade que considere, ao menos, parte dessa variabilidade e dispersão (DuraCrete, 2000).

Recentemente tem ocorrido um desenvolvimento veloz de modelos e procedimentos para o projeto de durabilidade de estruturas de concreto com base em probabiblidade (Gjørv, 2015) e, de acordo com Yu *et al*. (2017), a Simulação de Monte Carlo tem sido adotada para realização dessas análises probabilísticas.

Uma simulação de Monte Carlo pode ser adotada para a resolução de problemas envolvendo variáveis aleatórias que possuem distribuição de probabilidades conhecidas. Assim, é feito um processo computacional onde em cada simulação é utilizado um conjunto particular de valores gerados de acordo com a distribuição de probabilidade de cada variável (Ang & Tang, 1990).

À medida que se ganhou experiência prática com o modelo inicialmente proposto pelo projeto europeu DuraCrete (2000), sua base foi aprimorada e simplificada para aplicações mais práticas, sendo mantidos os princípios básicos. Este projeto foi adotado em 2004 pela *Norwegian Association for Harbor Engineers* (*Nahe*) como base às diretrizes para a construção de infraestruturas de concreto mais duráveis nos portos noruegueses. As lições aprendidas a partir dessas diretrizes foram incorporadas em edições subsequentes e, posteriormente, em sua terceira edição, no ano de 2009, adotada pelo capítulo norueguês da *Pianc*, a *World Association for Waterborne Transport Infrastructure* (Gjørv, 2015).

Tendo em vista as experiências positivas obtidas principalmente na Noruega e buscando fomentar a realização de projetos de durabilidade das estruturas no Brasil, o presente trabalho apresenta uma análise de sensibilidade (paramétrica) da concentração de cloretos às variáveis básicas do modelo de previsão de vida útil no período de iniciação de estruturas de concreto sujeitas ao ataque de íons cloreto proposto por Gjørv (2015).

Uma análise paramétrica tem como principal objetivo avaliar as respostas de um sistema quando um de seus parâmetros tem seus valores

alterados dentro de limites condizentes com a realidade e as demais variáveis têm seus valores mantidos constantes (Andrade, 2001).

Os resultados obtidos permitem verificar as variáveis que exercem maior influência na resposta do modelo analisado. Além disso, pode-se concluir que, embora o aumento da dispersão de determinado parâmetro de entrada não represente elevação substancial no valor médio da resposta do sistema, este pode resultar em um aumento na dispersão dos resultados. Esta maior dispersão acaba por reduzir a confiabilidade calculada.

# 2 METODOLOGIA

## 2.1 Cálculo da Concentração de Cloreto

A expressão matemática mais utilizada para descrever a penetração de cloretos no concreto é baseada na segunda lei da difusão de Fick combinada a um coeficiente de difusão do cloreto variável no tempo (Bastidas-Arteaga *et al*., 2011), como apresentado na Eq. 1:

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

Onde *C(x, t)* é a concentração de cloretos na profundidade $x_c$ depois de um tempo *t,* $C_s$ é a concentração superficial de cloretos, *D* é o coeficiente de difusão de cloretos no concreto (Eq. 2) e *erf* é a função de erro de Gauss.

$$D(t) = \frac{D_0}{1-\alpha}\left[\left(1+\frac{t'}{t}\right)^{1-\alpha} - \left(\frac{t'}{t}\right)^{1-\alpha}\right]\left(\frac{t_0}{t}\right)^{\alpha} k_e \quad (2)$$

Onde $D_0$ é o coeficiente de difusão após o tempo referência $t_0$ e *t'* é a idade do concreto quando exposto aos íons. A variável $\alpha$ representa a influência da idade no coeficiente de difusão e $k_e$ é um parâmetro que leva em consideração o efeito da temperatura, de acordo com Kong *et al*. (2002):

$$k_e = \exp\left[\frac{E_A}{R}\left(\frac{1}{293} - \frac{1}{273+T}\right)\right] \quad (3)$$

sendo *exp* a função exponencial, $E_A$ a ativação de energia para a difusão do cloreto, *R* a constante universal dos gases perfeitos e *T* a temperatura.

Desta forma, o critério para o início do processo de corrosão das armaduras, e consequentemente finalização do período de iniciação por cloretos, pode ser definido como:

$$C(x,t) = C_{CR} \quad (4)$$

onde $C(x,t)$ é a concentração do cloreto na profundidade da armadura após um período de tempo e $C_{CR}$ é concentração crítica do cloreto no concreto, sendo esta a causadora da despassivação da armadura e início da corrosão.

Como consequência, a função estado limite no período de iniciação *(g (x,t))* pode ser descrita na forma:

$$g(x,t) = C_{CR} - C(x,t) \quad (5)$$

## 2.2 Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade foi realizada considerando as variáveis básicas que compõem o modelo apresentado no item 2.1. Tendo em vista a quantidade de variáveis presentes e o fato de cada uma apresentar seus próprios parâmetros estatísticos, o cálculo da concentração de cloretos foi realizado por meio de uma combinação das Eq. 1, Eq. 2 e Eq. 3 com a simulação de Monte Carlo. Para tal, é necessário que todos os parâmetros de entrada envolvidos sejam descritos por uma função de densidade de probabilidade (Ang & Tang, 1990). Os valores médios adotados foram baseados em um estudo apresentado por Gjørv (2015) com dados obtidos em uma estrutura localizada na costa norueguesa e os coeficientes de variação (COV) de cada um dos parâmetros seguem os apresentados por Andrade (2001). Esses valores são apresentados na Tabela 1. As análises foram realizadas considerando um tempo de projeto de 50 anos.

**Tabela 1** - Distribuições de probabilidade utilizadas

| Variável | Unidade | Distribuição | Média | COV |
|---|---|---|---|---|
| Coeficiente de Difusão ($D_0$) | $m^2/s$ | Normal | $7,0 \times 10^{-12}$ | 0,1<br>0,2<br>0,3<br>0,4<br>0,5<br>0,6 |
| Cobrimento Nominal ($x_c$) | mm | Normal | 70 | 0,1<br>0,2<br>0,3<br>0,4<br>0,5<br>0,6 |
| Concentração Superficial de Cloretos ($C_s$) | %[1] | Normal | 5,5 | 0,1<br>0,2<br>0,3<br>0,4<br>0,5<br>0,6 |
| Temperatura (T) | C | Normal | 20 | 0,1<br>0,2<br>0,3<br>0,4<br>0,5<br>0,6 |
| Influência da Idade ($\alpha$) | - | Normal | 0,60 | 0,1<br>0,2<br>0,3<br>0,4<br>0,5<br>0,6 |
| Concentração Crítica ($C_{CR}$) | %[1] | Normal | 0,40 | 0,1<br>0,2<br>0,3<br>0,4<br>0,5<br>0,6 |

[1] – Em relação à quantidade de cimento.
**Fonte:** Autores, 2018.

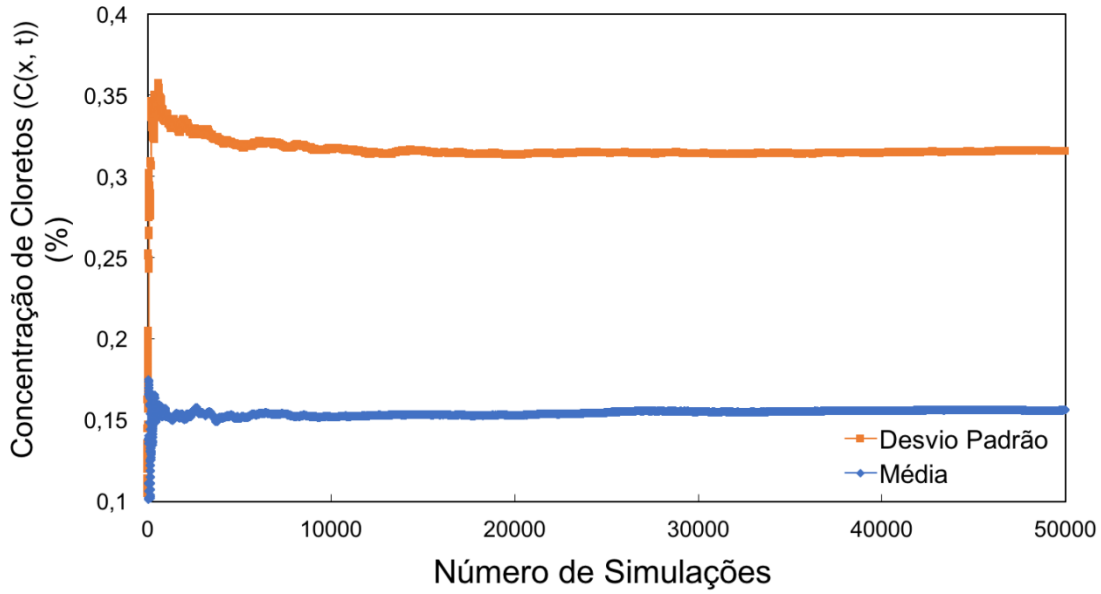
Para cada cenário foram realizadas 50000 simulações de Monte Carlo. Haldar e Mahadevan (2000) apresentam um modelo que relaciona o número de simulações de Monte Carlo necessárias para uma representação mais realística do fenômeno estudado e a probabilidade de falha admissível. Esse modelo é apresentado na Eq. 6.

$$\varepsilon\% = \sqrt{\frac{(1 - P_f)}{N \times P_f}} \times 200\% \quad (6)$$

Na Eq. 6, *N* é o número de simulações realizadas, $P_f$ é a probabilidade de falha e $\varepsilon\%$ é o percentual de erro admitido.

O número de 50000 simulações se mostra suficiente para a convergência estatística do valor esperado da concentração de cloretos e do seu desvio padrão. A Figura 1 apresenta a convergência estatística da média e do desvio padrão em um dos casos avaliados.

**Figura 1** - Convergência estatística da média e desvio padrão da concentração de cloretos




**Fonte**: Autores, 2018.

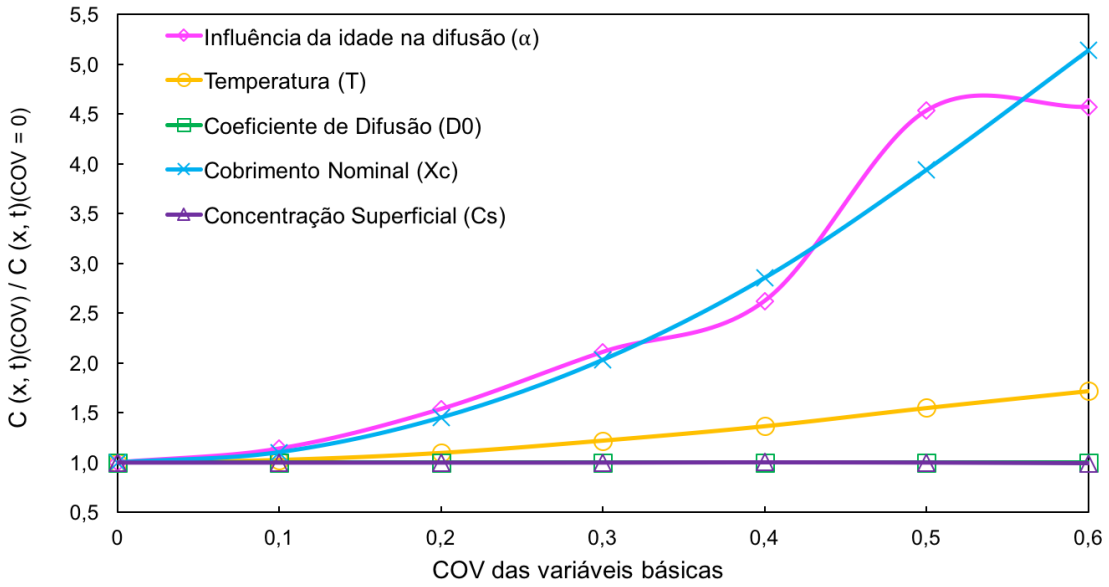
Inicialmente foram avaliados os efeitos das mudanças do coeficiente de variação das variáveis básicas na concentração de cloretos $C(x,t)$. Para tal, estabeleceu-se uma relação entre a concentração de cloretos obtida a partir das simulações considerando os coeficientes de variação apresentados na Tabela 1, chamada de $C(x,t)_{(COV)}$, e a concentração de cloretos sem considerar nenhuma variação dos parâmetros básicos, denominada $C(x,t)_{(COV\ =\ 0)}$. Após, foi analisado o efeito da mudança do COV de cada uma das variáveis básicas no coeficiente de variação de $C(x,t)$. Por fim, analisou-se a influência das alterações do COV na probabilidade de falha do modelo. A consideração da

probabilidade de falha foi realizada com base na função estado limite apresentada na Eq. 5 e refere-se à concentração de cloretos que dá início ao processo de corrosão. As variações dos valores da concentração crítica ($C_{CR}$) foram consideradas somente nesta última análise, visto que este parâmetro não influencia na concentração $C(x,t)$.

## 3 RESULTADOS

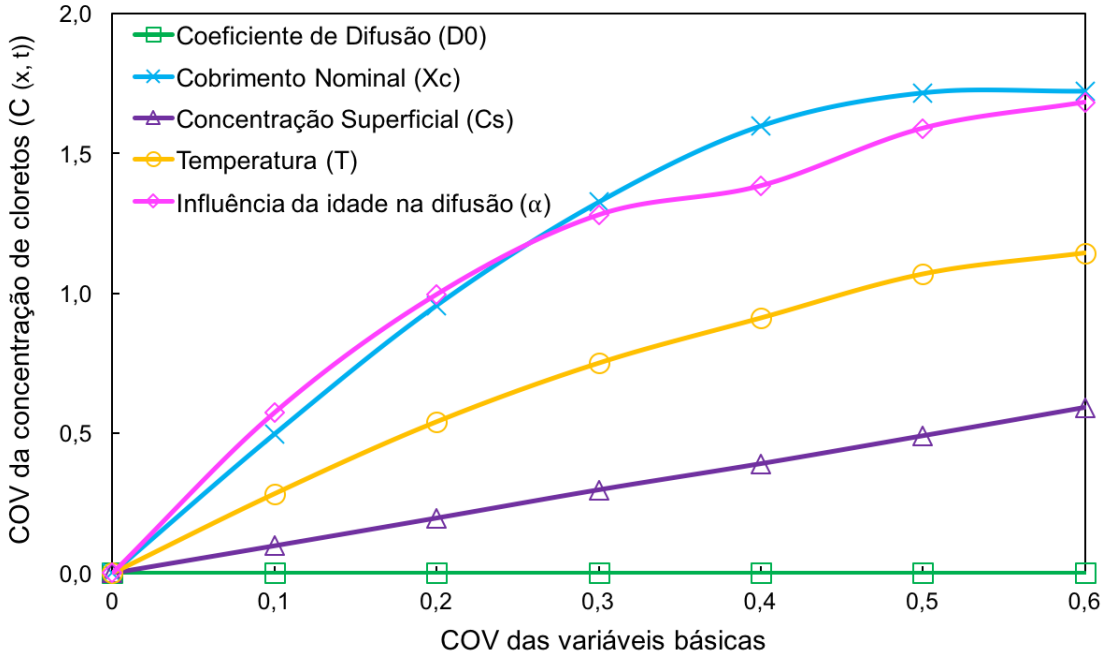
A Figura 2 apresenta o aumento da concentração de cloretos na profundidade da armadura, em relação à situação referência (COV = 0), devido aos diferentes COV adotados às variáveis básicas. Na Figura 3 são apresentadas as alterações sofridas pelo COV de $C(x,t)$ devido às variações dos parâmetros de entrada do modelo. A Figura 4 demonstra a relação entre o COV de cada variável e a probabilidade de falha.

**Figura 2** - Efeito do coeficiente de variação das variáveis básicas na concentração de cloretos média



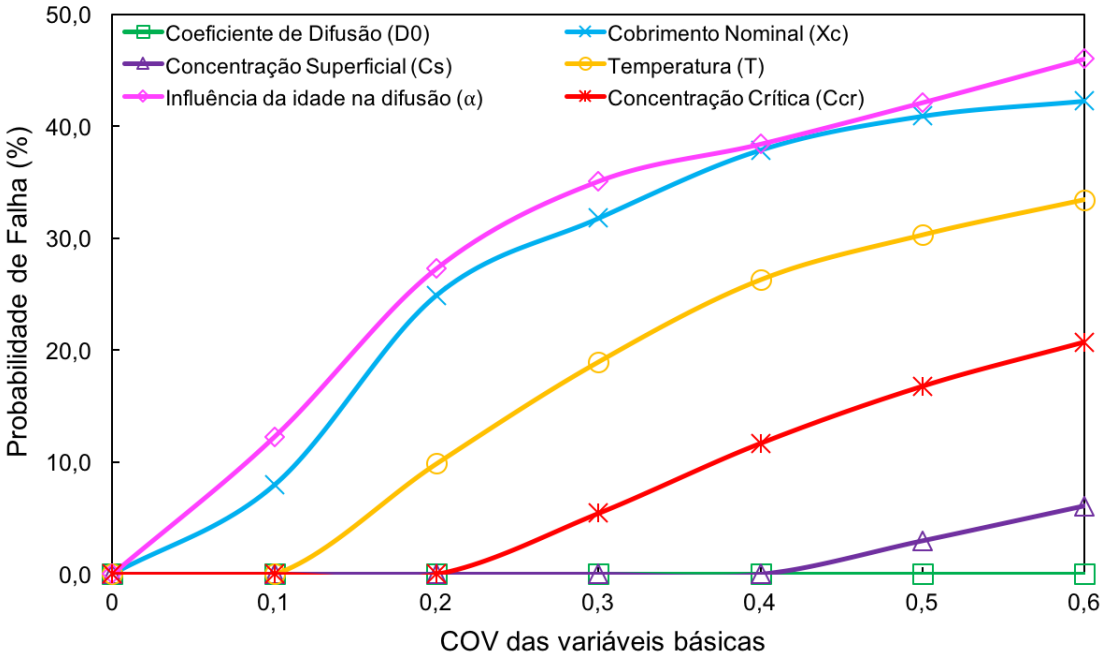

**Fonte**: Autores, 2018.

**Figura 3** – Efeito do coeficiente de variação das variáveis básicas na variabilidade da concentração de cloretos




**Fonte**: Autores, 2018.

**Figura 4** - Efeito do coeficiente de variação das variáveis básicas na probabilidade de falha




**Fonte**: Autores, 2018.

Na Figura 2, analisando as variações de $C(x,t)$ devido às mudanças do COV, percebe-se a grande influência gerada pelas variações do cobrimento da armadura, que ao ter COV = 0,2 gera um aumento de aproximadamente 50 %

na concentração de cloretos, e da influência da idade na difusão, responsável por aumentos da concentração de cloretos na ordem de 5 vezes quando seu COV atinge 0,6. Salienta-se que as variabilidades do coeficiente de difusão inicial e da concentração superficial de cloretos não apresentaram alterações significativas no valor médio de $\mathrm{C}(\mathrm{x},\mathrm{t})$.

Com base na Figura 3, observa-se que as variáveis $x_c$ e $\alpha$, além de apresentarem aumento nos valores médios de $\mathrm{C}(\mathrm{x},\mathrm{t})$ devido às mudanças do COV, também fazem com que a amostra da concentração de cloretos tenha seu coeficiente de variação elevado. Destaca-se ainda o comportamento das variações de $C_S$ que, apesar de não gerarem alterações na concentração de cloretos média, elevam o coeficiente de variação desta, que atinge aproximadamente 0,59 quando $C_S$ tem COV = 0,6.

Por fim, na Figura 4, verifica-se que as variabilidades no cobrimento da armadura e na influência da idade da difusão são as que mais interferem na probabilidade de falha do modelo, fato que está ligado ao que foi apresentado na Figura 2 e Figura 3. As oscilações da temperatura, que geram um aumento próximo a 50 % em $\mathrm{C}(\mathrm{x},\mathrm{t})$ ao ter COV = 0,6, apresentam grande influência na probabilidade de falha, fazendo com que esta ultrapasse 30 %, fato que está ligado ao COV ($\mathrm{C}(\mathrm{x},\mathrm{t})$) gerado por estas variabilidades. Ainda se salienta que pequenas variações (até COV = 0,2) na $C_{CR}$ não influenciaram na probabilidade de falha da estrutura, mas valores superiores (COV = 0,6) ocasionaram em uma $\mathrm{P}_f$ de pouco mais de 20 %.

## 4 CONCLUSÕES

Realizada a análise paramétrica proposta neste trabalho verifica-se a grande influência do cobrimento nominal da armadura no modelo, obtendo-se concentrações de cloretos até cinco vezes superiores quando este parâmetro apresenta dispersões muito grandes, corroborando a necessidade de um controle de qualidade cada vez mais rigoroso na execução de estruturas de concreto armado, principalmente quando expostas a ambientes agressivos.

A consideração da temperatura média no ambiente para o qual a estrutura é projetada também se mostra importante, visto que quando esta variável apresenta COV próximo de 0,2 já há aumento considerável de $\mathrm{C}(\mathrm{x},\mathrm{t})$ e que a concentração de cloretos sofre variações significativas devido a este parâmetro, ocasionado probabilidades de ocorrência da corrosão também elevadas.

A concentração superficial de cloretos, diretamente ligada ao ambiente ao qual a estrutura é exposta, apesar de não apresentar variações significativas na concentração de cloretos média para o caso analisado, gera aumento do coeficiente de variação da concentração de cloretos e, assim, influencia na confiabilidade da estrutura.

Ainda se observa que oscilações no coeficiente de difusão inicial do concreto não apresentaram mudanças significativas na concentração média e em seu COV para a situação avaliada, no entanto é importante observar o fato de que outros fatores de correção que também influenciam na variável $D(t)$ e, portanto, deve-se atentar às variações de $D_0$, variável que está diretamente relacionada à qualidade do concreto utilizado.

## AGRADECIMENTOS

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

## REFERÊNCIAS

Andrade, J. J. O. (2001). **Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: iniciação por cloretos**. Porto Alegre, 2001. 277p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Ang, A. H-S., & Tang, W. H. (1990). **Probability Concepts in Engineering Planning and Design – Decision, Risk and Reliability**, Vol. II, John Wiley and Sons, Inc., New York, EUA.

Bastidas-Arteaga, E., Chateauneuf, A., Sanchez-Silva, M., Bressolette, P., & Schoefs, F. (2011). A comprehensive probabilistic model of chloride ingress in unsaturated concrete. **Engineering Structures**, 33(3), 720-730. http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.11.008.

Bertolini, L. (2010). **Materiais de construção: patologia, reabilitação e prevenção**. São Paulo, Oficina de Textos.

DuraCrete. (2000). **General Guidelines for Durability Design and Redesign, the European Union – Brite EuRam III, Research Project BE95-1347: Probabilistic Performance Based Durability Design of Concrete Structures**, Document R 15.

Gjørv, Odd E. (2015). **Projeto da durabilidade de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade**. Trad. Leda Maria Marques Dias Beck, São Paulo, Oficina de Textos.

Hackl, J., Kohler, J. (2016). Reliability assessment of deteriorating reinforced concrete structures by representing the coupled effect of corrosion initiation and progression by Bayesian networks. **Structural Safety**, 62, 12-23. http://dx.doi.org/10.1016/j.strusafe.2016.05.005.

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

Kong, J. S., Ababneh, A. N., Frangopol, D. M., & Xi, Y. (2002). Reliability Analysis of Chloride Penetration in Saturated Concrete. **Probabilistic Engineering Mechanics**, 17(3), 305-315. https://doi.org/10.1016/S0266-8920(02)00014-0.

Magalhães, F. C. (2018). **Proposição de um modelo para a penetração de íons cloreto em concreto: estudo dos parâmetros intervenientes e análise probabilística**. Porto Alegre, 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Medeiros, M. H. F., Andrade, J. J. de O., & Helene, P. (2011). **Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto**. In: Isaia, G. C. Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo, IBRACON, v. 1, p. 773-808.

Mehta, P. K. & Monteiro, P. J. M. (2008). **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo, IBRACON, 573p.

Ribeiro, D. V. (Org.). (2018). **Corrosão e degradação em estruturas de concreto: Teoria, Controle e Técnicas de Análise e Intervenção**. 2ª Ed. Rio de Janeiro, Elsevier, 370p.

Yu, B., Ning C., & Li, B. (2017). Probabilistic Durability Assessment of Concrete Structures in Marine Environments: Reliability and Sensitivity Analysis. **China Ocean Eng.**, 31(1), 63-73. https://doi.org/10.1007/s13344-017-0008-3.

Zhuo, Z., Feng, X., Dawang, L. (2010). Stochastic durability analysis of pre-stressed concrete structure under marine environment. In: 2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, **Proceedings…**, 765-767, Wuhan, China.

---

**Edição especial** - 8º MCSul - Conferência Sul em Modelagem Computacional e VIII SEMENGO - Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica.

**Enviado em:** 05 fev. 2019

**Aceito em:** 05 fev. 2019

**Editores responsáveis:** João Paulo Silva Lima / Liércio André Isoldi / Mateus das Neves Gomes