

ANÁLISE NUMÉRICA DA IMPERMEABILIZAÇÃO DE SUPERFÍCIE NA DIFUSÃO DE CLORETOS EM CONCRETO ARMADO: APLICAÇÃO DO MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS

Macioski, Gustavo¹; Araújo, Emanuel C.²; Medeiros, Marcelo H. F.³

¹ Doutor, UTFPR-DIRPPG, gmacioski@utfpr.edu.br

² Mestre, UFPR-PPGEC, emanoelcunhaa@gmail.com

³ Doutor, UFPR-PPGEC, mediros.ufpr@gmail.com

Resumo: Este estudo investiga, por meio de modelagem numérica, a influência do momento de aplicação de barreiras de impermeabilização superficial sobre o processo de difusão de íons cloreto em concreto armado, um dos principais mecanismos de deterioração em estruturas expostas a ambientes agressivos. A penetração de cloretos promove a despassivação das armaduras, desencadeando processos corrosivos que comprometem a durabilidade e a vida útil das estruturas. A avaliação foi realizada por meio de simulações unidimensionais, baseadas no método das diferenças finitas, considerando coeficiente de difusão efetivo constante e condições de contorno representativas da exposição ambiental. As simulações foram implementadas em MATLAB, com a aplicação da impermeabilização prevista em diferentes idades da estrutura (1 a 25 anos). Os resultados demonstram que intervenções precoces promovem reduções expressivas da concentração de cloretos nos cobrimentos críticos. A impermeabilização aplicada no primeiro ano limita a concentração de cloretos a níveis inferiores a 0,30% em profundidades usuais de cobertura, enquanto aplicações tardias (após cinco anos) apresentam eficácia significativamente reduzida, mesmo com maiores espessuras de recobrimento. Os achados reforçam a relevância do planejamento preventivo de medidas de proteção superficial e evidenciam a aplicabilidade de modelos numéricos simplificados como ferramenta de suporte à decisão na gestão da durabilidade de estruturas de concreto armado expostas à ação de cloretos.

Palavras-chave: Concreto, Difusão de cloretos, Impermeabilização, Durabilidade, Diferenças finitas.

Abstract: This study investigates, through numerical modeling, the influence of the timing of surface waterproofing application on the chloride diffusion process in reinforced concrete, one of the primary deterioration mechanisms in structures exposed to aggressive environments. Chloride ingress promotes steel depassivation, triggering corrosion processes that compromise structural durability and service life. The assessment was carried out using one-dimensional simulations based on the finite difference method, assuming a constant effective diffusion coefficient and boundary conditions representative of environmental exposure. Simulations were implemented in MATLAB, considering the application of waterproofing at different service ages (1 to 25 years). The results demonstrate that early interventions lead to significant reductions in chloride concentration at critical cover depths. Waterproofing applied within the first year limits chloride concentrations to levels below 0.30% at typical cover depths, while delayed interventions (after five years) show substantially reduced effectiveness, even at greater cover thicknesses. The findings highlight the importance of preventive planning for surface protection measures and emphasize the applicability of simplified numerical models as decision-support tools for durability management of reinforced concrete structures exposed to chloride-induced corrosion.

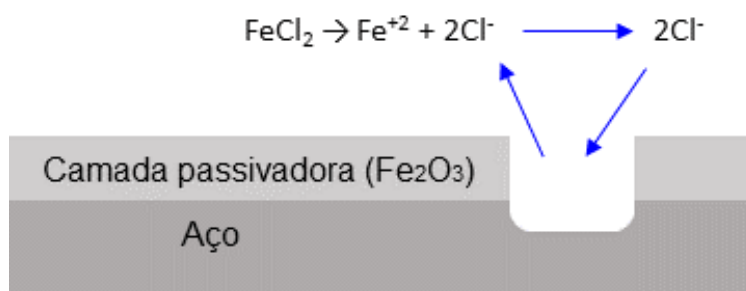
Keywords: Concrete, Chloride diffusion, Waterproofing, Durability, Finite differences

1. Introdução

A corrosão das armaduras é reconhecidamente uma das principais causas de degradação de estruturas de concreto armado em ambientes agressivos [1]. Estimativas internacionais indicam que os custos diretos e indiretos associados à corrosão superam bilhões de dólares anualmente, afetando desde pontes e viadutos até instalações industriais e portuárias [2]. No contexto brasileiro, a elevada exposição de estruturas a atmosferas marítimas intensifica esse processo, comprometendo a durabilidade e a segurança das construções. O custo anual para reparo de estruturas devido à ação da corrosão em todo o mundo supera 3% do Produto Interno Bruto (PIB) mundial [3].

Esses íons, presentes na água do mar ou em ambientes urbanos por conta da pulverização de sais, penetram progressivamente na matriz porosa do concreto até atingirem a armadura [4,5]. Quando a concentração crítica de cloretos é ultrapassada na interface aço-concreto, ocorre a ruptura da camada passivadora naturalmente formada pelo elevado pH da solução intersticial, iniciando-se assim o processo de corrosão eletroquímica [6,7]. O mecanismo descrito pode ser observado na Figura 1.

Figura 1: Mecanismo de corrosão por cloretos no concreto armado



Durante a fase de iniciação, a difusão dos cloretos é predominantemente controlada por mecanismos físicos, sendo diretamente influenciada por propriedades do concreto como a porosidade, a relação água/cimento, o tipo de cimento, a presença de adições minerais e, especialmente, a espessura do cobrimento [1,8–10]. O cobrimento atua como barreira física à penetração de agentes agressivos e, quanto maior e mais denso, maior é o tempo necessário para que os cloretos atinjam a armadura. Entretanto, falhas de execução, fissuras ou carbonatação podem reduzir significativamente sua efetividade [11]. A importância da avaliação da difusão de cloretos decorre do fato de que essa fase define a vida útil de projeto da estrutura até o início da corrosão, que corresponde, segundo alguns modelos de durabilidade, a mais de 80% do tempo total de vida útil [12].

Nas últimas décadas, a modelagem computacional tem se consolidado como uma ferramenta essencial para a predição da vida útil de estruturas de concreto armado. A capacidade de prever o avanço de frentes de cloretos no interior do concreto permite que engenheiros e projetistas tomem decisões fundamentadas sobre estratégias de mitigação e escolha de materiais, promovendo construções mais duráveis e econômicas [4].

Entre os métodos numéricos empregados, o Método das Diferenças Finitas (MDF) destaca-se pela simplicidade de implementação e robustez para problemas unidimensionais e transientes [13,14]. Por meio da discretização do domínio espacial e temporal, o MDF permite simular o avanço dos íons cloreto ao longo do tempo, incorporando propriedades específicas dos materiais e condições de contorno representativas [15].

A modelagem da difusão de cloretos por esse método tem sido explorada em diferentes configurações, incluindo o uso de coberturas protetoras, adições pozolânicas e tratamentos de superfície [16]. O uso de coberturas protetoras e impermeabilizações superficiais é simulado considerando-as como uma camada que representa a resistência à entrada de cloretos [4,9,17]. Estudos demonstram que tais tratamentos são eficazes em limitar a penetração de cloretos e reduzir a permeabilidade do concreto, como os hidrofóbicos (silanos e siloxanos) [12,18]. Adicionalmente, a influência de adições minerais (pozolanas) na matriz do concreto é integrada na modelagem, uma vez que estas adições (como sílica ativa, cinza de casca de arroz e metacaulim) reagem com o hidróxido de cálcio para refinar a microestrutura e aumentar a capacidade de ligação de cloretos, resultando em menor difusividade e maior resistividade elétrica [8,19].

A aplicação de métodos numéricos, como o MDF, é particularmente relevante para a análise da fase inicial da corrosão, possibilitando a simulação de cenários de exposição variados, identificação de pontos críticos e a avaliação de técnicas preventivas — como impermeabilizações superficiais — sem a necessidade de longos períodos de ensaio experimental [8,9,17,20].

Este trabalho tem como objetivo avaliar o impacto da aplicação de barreiras de impermeabilização superficial na difusão de íons cloreto em estruturas de concreto armado expostas a ambientes agressivos. Para isso, será utilizado o método das diferenças finitas para simular, em MATLAB, o avanço da frente de cloretos ao longo do tempo em perfis de cobertura típicos de estruturas convencionais. As simulações consideram a aplicação da impermeabilização em diferentes idades do concreto, permitindo verificar seu efeito na redução da concentração de cloretos na profundidade da armadura [7,9,17,20].

A contribuição deste estudo está na abordagem quantitativa da influência da impermeabilização quando aplicada em momentos distintos da vida útil da estrutura, algo pouco abordado na literatura técnica. Enquanto muitos trabalhos consideram a impermeabilização como uma condição inicial do modelo [4,11,17,21], neste estudo busca-se representar cenários mais realistas, nos quais a intervenção ocorre em diferentes idades da estrutura já em uso, refletindo estratégias de manutenção preditiva [13]. Adicionalmente, o uso de ferramentas simples e acessíveis baseadas em MDF, reforça o potencial de aplicação prática por profissionais da engenharia civil. A adoção dessa metodologia pode ampliar a conscientização sobre o momento ideal para adoção de medidas protetivas, contribuindo para o prolongamento da vida útil e a redução de custos com intervenções corretivas.

2. Metodologia

Para a simulação do processo de difusão de íons cloreto no concreto, optou-se pela utilização do Método Implícito (Backward Euler). Essa escolha se justifica pela natureza difusiva do fenômeno analisado, cuja evolução é gradual ao longo do tempo, permitindo o uso de passos de tempo mais longos sem comprometer a estabilidade numérica. Diferentemente do método explícito, que impõe restrições severas de estabilidade (condição de Courant-Friedrichs-Lewy), o método implícito apresenta estabilidade incondicional, sendo ideal para a simulação de longos períodos — como os necessários para avaliar o impacto da impermeabilização em diferentes idades do concreto [15,16]. O modelo baseia-se na equação de difusão unidimensional de Fick com coeficiente de difusão constante:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

Discretizando-se o espaço com passo Δx e o tempo com passo Δt , e denotando C_i^j como a concentração no ponto x_i e no instante t_n , tem-se a seguinte formulação pelo Método Implícito (Backward Euler):

$$\frac{C_i^{j+1} - C_i^j}{\Delta t} = D \frac{C_{i+1}^{j+1} - 2C_i^{j+1} + C_{i-1}^{j+1}}{\Delta x^2} \quad (2)$$

Reorganizando, obtém-se a equação na forma de sistema linear, em que se define:

$$C_i^j = -\lambda C_{i-1}^{j+1} + (1 + 2\lambda)C_i^{j+1} - \lambda C_{i+1}^{j+1} \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{D \Delta t}{\Delta x^2} \quad (4)$$

As seguintes condições de contorno foram adotadas:

- Superfície exposta antes da impermeabilização ($x = 0; t = 0$): impõe-se uma concentração superficial constante C_s , representando o contato contínuo com o meio externo contaminado por cloretos.
- Superfície exposta após impermeabilização ($x = 0; t \geq t_{imp}$): considera-se que não há mais entrada de cloretos na superfície, mas a concentração existente permanece e passa a decair gradualmente devido à difusão interna. Essa condição é implementada no modelo por meio da aproximação de fluxo nulo, impondo-se que a concentração superficial assuma o mesmo valor do primeiro nó interno $C_1^j = C_2^j$, o que equivale a um gradiente nulo na fronteira.
- Face interna ($x = L$): adota-se uma condição de Neumann homogênea, representando ausência de fluxo de cloretos pela face oposta. Na forma discreta, essa condição é implementada impondo: $\frac{\partial C}{\partial x} = 0 \Rightarrow C_N = C_{N-1}$

Assim, o sistema de equações resultante pode ser representado na forma matricial:

$$A \cdot C^{j+1} = C^j \quad (5)$$

Em que os vetores C^j e C^{j+1} representam a concentração nos nós espaciais no tempo t_j e t_{j+1} :

$$C = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ \vdots \\ C_N \end{bmatrix} \quad (6)$$

E A é uma matriz tridiagonal composta por:

$$A = \begin{bmatrix} 1 + 2\lambda & -\lambda & 0 & \dots & 0 \\ -\lambda & 1 + 2\lambda & -\lambda & \ddots & \vdots \\ 0 & -\lambda & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & 1 + 2\lambda & -\lambda \\ 0 & \dots & 0 & -\lambda & 1 + 2\lambda \end{bmatrix} \quad (7)$$

A implementação numérica descrita foi realizada em MATLAB R2024b e a resolução do sistema matricial foi feita por meio da função “mldivide (\)” do MATLAB, que realiza a decomposição LU (forma de fatoração de uma matriz) da matriz tridiagonal, garantindo eficiência computacional mesmo para grandes períodos simulados.

A malha espacial foi composta por 101 nós, correspondendo a uma discretização de $\Delta x = 0,005m$ ao longo de 0,50 m de profundidade. A simulação foi realizada ao longo de 50 anos considerado como vida útil mínima para estruturas de concreto pela ABNT NBR 15575 [22], totalizando 1.576 passos de tempo $\Delta t = 10^6s$ (aproximadamente 0,38 meses).

Considerou-se uma concentração superficial fixa de $C_s = 3,5\%$ para simular um ambiente marinho (borrifação de sais) [3,12,23] e coeficiente de difusão fixo $D = 10^{-12}m^2/s$ para simular um concreto convencional de boa qualidade [12,17,19,24,25]. Na Tabela 1 são apresentadas as concentrações e profundidades críticas que serão avaliadas. Foram realizadas as simulações com tempos de impermeabilização de 1, 5, 10 e 25 anos. Não foi considerada acumulação de cloretos através de deposição e ciclos de molhagem/secagem ou lixiviação superficial que pode ocorrer em zona de maré [26].

Tabela 1: Pontos críticos na difusão de cloretos

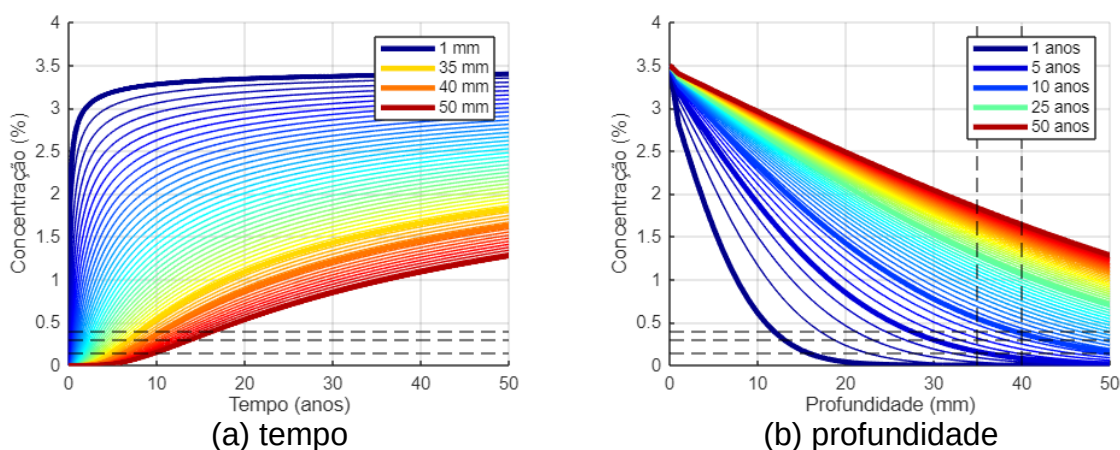
Parâmetro	Valor	Descrição
Concentração crítica* (ABNT NBR 12655:2022) [27]	0,05%	Concreto protendido
	0,15%	Concreto armado exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura
	0,30%	Concreto armado não exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura
	0,40%	Concreto armado em brandas condições de exposição (seco ou protegido da umidade nas condições de serviço da estrutura)
Cobrimento mínimo (ABNT NBR 6118:2023) [28]	45mm	Viga/pilar em concreto protendido com ambiente Marinho (classe de agressividade III-Forte)
	40mm	Laje em concreto protendido com ambiente Marinho (classe de agressividade III-Forte)
	40mm	Viga/pilar ou elementos estruturais em contato com o solo em concreto armado com ambiente Marinho (classe de agressividade III-Forte)
	35mm	Laje ou elementos estruturais em contato com o solo em concreto armado com ambiente Marinho (classe de agressividade III-Forte)

*sobre a massa de cimento

4. Resultados e discussão

A Figura 2a apresenta a concentração de cloretos na profundidade e a Figura 2b no tempo ao longo de 50 anos no concreto sem nenhum tipo de intervenção. As concentrações e profundidades críticas da Tabela 1 para concreto armado são representadas como linhas tracejadas nos gráficos.

Figura 2: Concentração em concreto sem impermeabilização



Neste caso, as concentrações críticas são atingidas entre 4 e 11 anos. Esta situação indica uma baixa vida útil da estrutura. Se o processo de impermeabilização da superfície ocorrer após 25, 10 e 5 anos de serviço da estrutura (Figuras 3 a 5), é possível verificar que após a impermeabilização ocorre a redução da concentração de cloretos na superfície e no interior do concreto devido a continuidade do processo de difusão sem a presença da fonte externa.

Mesmo reduzindo o tempo da execução da impermeabilização para 25, 10 e 5 anos, as concentrações/profundidades críticas seguem sendo atingidas entre 4 e 11 anos. Isso indica que períodos de exposição superiores a 5 anos permitem o ingresso de um teor elevado de íons cloreto. Assim, o tratamento por impermeabilização da superfície foi ineficaz.

Figura 3: Concentração em concreto impermeabilizado após 25 anos

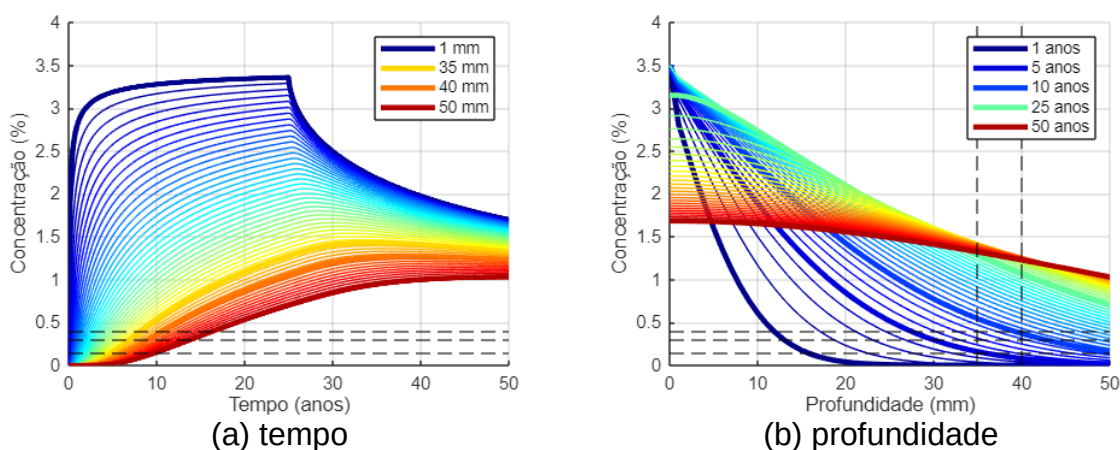


Figura 4: Concentração de cloretos em concreto impermeabilizado após 10 anos

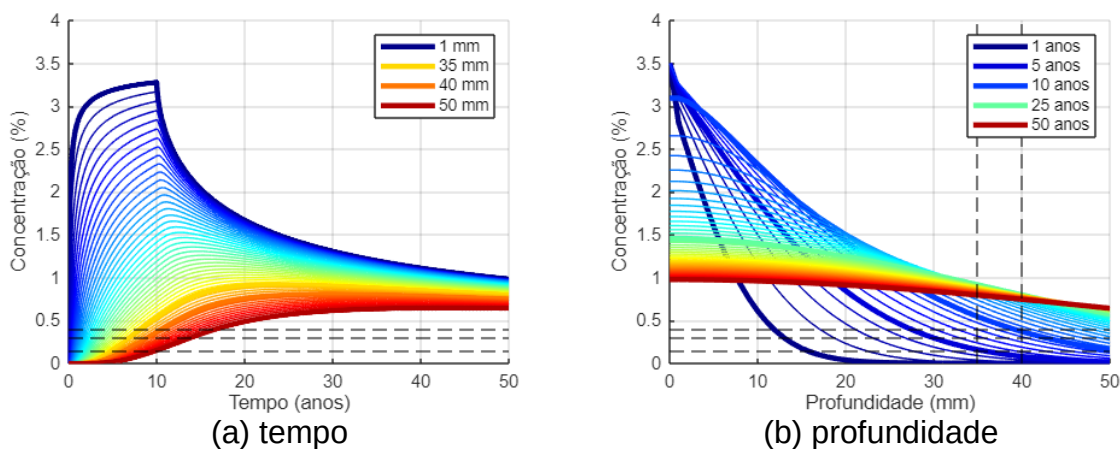
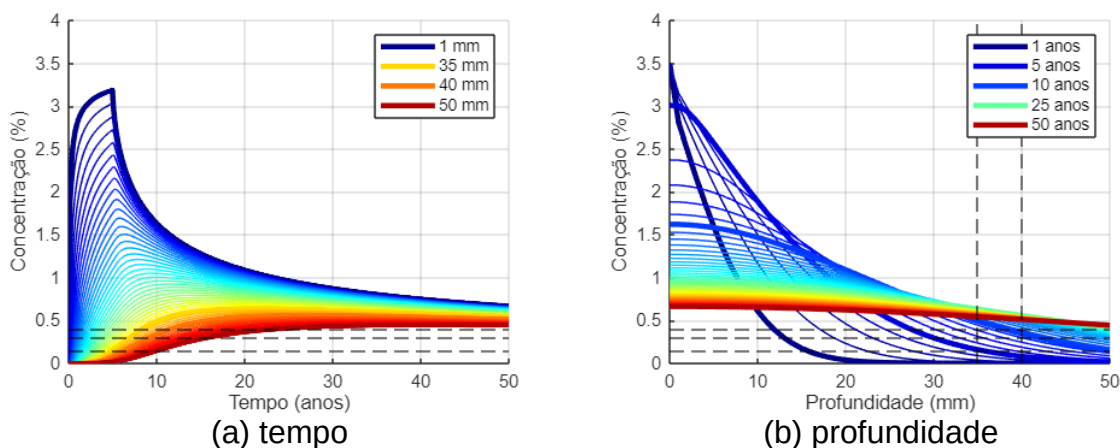


Figura 5: Concentração de cloretos em concreto impermeabilizado após 5 anos

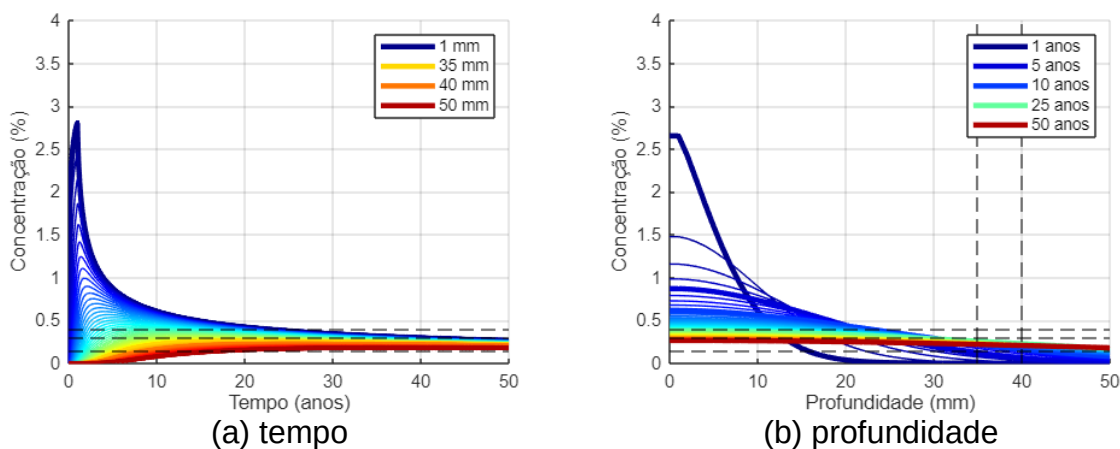


Observa-se, ainda, que a impermeabilização entre 5 e 25 anos permitiu que o sistema atingisse um estado estacionário com concentrações entre 0,5 e 1% após 50 anos. Embora as variações observadas possam parecer modestas, elas podem ser relevantes em cenários onde pequenos atrasos da difusão têm impacto operacional ou econômico significativo. A Figura 6 apresenta os perfis de difusão após 1 ano.

Quando realizada após um ano, a impermeabilização limitou a concentração em valores inferiores a 0,30% para os cobrimentos críticos. De acordo com as simulações realizadas, considerando uma estrutura de concreto armado em ambiente marinho, é possível verificar que a impermeabilização só se torna efetiva se for realizada nos primeiros anos de serviço da estrutura. Assim, para idades mais avançadas o tratamento por impermeabilização da superfície é ineficaz, sendo indicado, então, algum processo de extração de cloretos ou impregnação para seu tratamento [11,12].

Os resultados também indicam uma maior eficácia do tratamento por impermeabilização em estruturas que possam apresentar cobrimentos elevados, que podem ocorrer em estruturas de obras de arte especial, quando são utilizadas barras de diâmetros elevados, agregados de diâmetros elevados e classes de exposição severas.

Figura 6: Concentração em concreto impermeabilizado após 1 ano



Os perfis de concentração de cloretos obtidos neste estudo apresentam comportamento semelhante ao reportado na literatura, com decaimento exponencial com a profundidade [29–33] para concretos sem tratamento superficial. Após a aplicação da barreira, Liao et al. [34] observaram a redução da concentração de cloretos em diversos sistemas de impermeabilização, destacando sua eficácia na redução da penetração, mesmo após longos períodos de exposição. Mottl et al. [35] confirmam ainda que sistemas cristalinos, mesmo aplicados sobre concreto envelhecido e carbonatado, promovem redução significativa do fluxo de cloretos, semelhante à redução observada neste estudo.

Vale destacar que o modelo assume difusão unidimensional com coeficiente constante, o que representa uma aproximação simplificada da realidade. A consideração de variabilidade do coeficiente de difusão, efeitos de umidade e fissuração podem ser incorporadas em modelos mais complexos para estudos futuros.

5. Conclusões

Este trabalho avaliou numericamente o efeito da aplicação de barreiras de impermeabilização superficial sobre a difusão de íons cloreto em estruturas de concreto armado, utilizando o Método das Diferenças Finitas (MDF) implementado em MATLAB. As simulações demonstraram que a impermeabilização aplicada em diferentes idades da estrutura pode influenciar significativamente a concentração de cloretos ao longo do tempo e da profundidade.

Os resultados indicaram que, embora o ganho absoluto no tempo de iniciação da corrosão seja modesto quando a impermeabilização é aplicada tardiamente, sua adoção precoce pode contribuir para a redução das concentrações internas e para o retardo do avanço da frente de cloretos. Os resultados reforçam a importância de parâmetros como o cobrimento da armadura, o coeficiente de difusão (relacionado à qualidade e porosidade do concreto [36]) e a proteção superficial de elementos estruturais, comprovando que eles impactam a durabilidade das estruturas de concreto armado.

A simplicidade do modelo numérico utilizado, associada à sua implementação acessível, destaca o potencial de sua aplicação prática em diagnósticos e estratégias de prolongamento da vida útil de estruturas. Estudos futuros podem explorar modelos com coeficiente de difusão variável e condições de contorno mais refinadas, como fluxos dependentes da concentração ou acoplamento com efeitos de umidade.

6. Agradecimentos

A Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação da UTFPR pela viabilização do treinamento em simulação computacional junto a RILEM e TU Darmstadt; ao Centro de Estudos de Engenharia Civil (CESEC) da UFPR pelo apoio a pesquisa.

Referências

- [1] P. Lehner, M. Kubzová, V. Křivý, P. Konečný, D. Bujdoš, P. Rovnaníková, Correlation between surface concentration of chloride ions and chloride deposition rate in concrete, *Constr Build Mater* 320 (2022) 126183. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.126183>.
- [2] J.P. Broomfield, *Corrosion of steel in concrete : understanding, investigation and repair*, 2nd ed., Taylor & Francis, New York, 2007.
- [3] A. Calvo Valdés, M.H. F. Medeiros, G. Macioski, Sensor de corrosão para monitoramento de estruturas de concreto armado: Testes em corpos de prova de concreto armado, *Revista ALCONPAT* 11 (2021). <https://doi.org/10.21041/ra.v11i3.529>.
- [4] J. Marchand, E. Samson, Predicting the service-life of concrete structures – Limitations of simplified models, *Cem Concr Compos* 31 (2009) 515–521. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2009.01.007>.
- [5] M. Zhang, S. Sun, K. Liu, T. Li, H. Yang, Research on the critical chloride content of reinforcement corrosion in marine concrete — A review, *Journal of Building Engineering* 79 (2023) 107838. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2023.107838>.
- [6] G.R. Meira, P.R.R. Ferreira, Revisão sobre ensaios acelerados para indução da corrosão desencadeada por cloretos em concreto armado, *Ambiente Construído* 19 (2019) 223–248. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212019000400353>.
- [7] L. Jiang, K. Tu, Y. Chen, W. Yuan, X. Li, T. Xiao, X. Tan, Long-term protection of concrete via facile spray-based superhydrophobic modification: Exceptional waterproofing and anti-corrosion performance, *Chem Eng Sci* 311 (2025) 121590. <https://doi.org/10.1016/J.CES.2025.121590>.
- [8] C.S. Das, H. Zheng, J.G. Dai, A review of chloride-induced steel corrosion in coastal reinforced concrete structures: Influence of micro-climate, *Ocean Engineering* 325 (2025) 120794. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2025.120794>.
- [9] X. Chen, Q. Zhang, A novel method to prevent chloride from accumulating on surface of reinforcement in concrete: Embedding diaphragm, *Constr Build Mater* 411 (2024) 134423. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.134423>.

- [10] M.T. Liang, K.L. Wang, C.H. Liang, Service life prediction of reinforced concrete structures, *Cem Concr Res* 29 (1999) 1411–1418. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00109-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00109-X).
- [11] M.H.F. Medeiros, F.C. Rocha, R.A. Medeiros-Junior, P. Helene, Corrosion potential: influence of moisture, water-cement ratio, chloride content and concrete cover, *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais* 10 (2017) 864–885. <https://doi.org/10.1590/s1983-41952017000400005>.
- [12] L. Bertolini, B. Elsener, P. Pedferri, E. Redaelli, R. Polder, *Corrosion of steel in concrete : prevention, diagnosis, repair*, Wiley, Weinheim, 2013.
- [13] S. Feliú, J.A. González, C. Andrade, *Techniques to assess the corrosion activity of steel reinforced concrete structures*, 1st ed., ASTM, West Conshohocken, PA, 1996.
- [14] J.C. Park, H.J. Jung, Finite element method-based numerical study utilizing experimental data on chloride solution transport in concrete under hydraulic pressure, *Constr Build Mater* 418 (2024) 135270. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2024.135270>.
- [15] R.J. LEVEQUE, *Finite Difference Methods for Ordinary and Partial Differential Equations: Steady-State and Time-Dependent Problems*, SIAM, 2007.
- [16] H.P.; L.S. LANGTANGEN, *Finite Difference Methods for Diffusion Processes*, Simula Research Laboratory, 2016.
- [17] D. Li, L. yuan Li, P. Li, F. Xing, Analytical modelling of chloride ingress in surface-treated concrete, *Ocean Engineering* 250 (2022) 111091. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2022.111091>.
- [18] N.Z. Muhammad, A. Keyvanfar, M.Z. Muhd, A. Shafaghat, J. Mirza, Waterproof performance of concrete: A critical review on implemented approaches, *Constr Build Mater* 101 (2015) 80–90. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.10.048>.
- [19] L.M. Wosniack, L.V. Real, M.D. Silva, G. Macioski, J. Hoppe Filho, M.H.F. de Medeiros, Resistividade elétrica do concreto pelo ensaio de migração de cloretos: comparação com o método dos quatro eletrodos, *Ambiente Construído* 21 (2021) 321–340. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212021000300554>.
- [20] H.W. Song, H.B. Shim, A. Petcherdchoo, S.K. Park, Service life prediction of repaired concrete structures under chloride environment using finite difference method, *Cem Concr Compos* 31 (2009) 120–127. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2008.11.002>.
- [21] Roberto J. Torrent, Rui D. Neves, Kei-ichi Imamoto, *Concrete Permeability and Durability Performance From Theory to Field Applications*, CRC Press, 2022.
- [22] ABNT, NBR 15575 - Desempenho de edificações habitacionais, (2021) 71.
- [23] G. Macioski, D. V. Jusi, E.P. Vidal, N.T.A. Soto, W. Mazer, *Análise Da Influência Do Ambiente Marinho Em Estruturas De Concreto Armado*, in: 1º Encontro Luso-Brasileiro de Degradação Em Estruturas de Concreto, Bahia, Salvador, 2014.

- [24] J. Li, Y. Guo, T. Zhang, P. Gao, J. Wu, Q. Ren, J. Wei, Q. Yu, Clarifying the effects of volume proportion and surface area of aggregate on chloride diffusivity of concrete through microstructural design, *Cem Concr Compos* 143 (2023) 105248. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2023.105248>.
- [25] A. Poursaei, *Corrosion of steel in concrete structures*, Matthew Deans, Cambridge, 2016.
- [26] A. Costa, J. Appleton, Chloride penetration into concrete in marine environment - Part I: Main parameters affecting chloride penetration, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 32 (1999) 252–259. <https://doi.org/10.1007/BF02479594/METRICS>.
- [27] ABNT, NBR 12655 - Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento, (2015) 23.
- [28] ABNT, NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento, (2014) 238.
- [29] D. Liu, C. Wang, T. Guo, J. Gonzalez-Libreros, Y. Ge, Y. Tu, L. Elfgren, G. Sas, Time–depth dependent chloride diffusion coefficient of self-compacting concrete, *Magazine of Concrete Research* 76 (2023) 600–616. <https://doi.org/10.1680/JMACR.23.00237;SUBPAGE:STRING:ABSTRACT;WGROU:STRING:PUBLICATION>.
- [30] X. Ju, L. Wu, M. Liu, H. Jiang, W. Zhang, Modelling of Chloride Concentration Profiles in Concrete by the Consideration of Concrete Material Factors under Marine Tidal Environment, *Journal of Marine Science and Engineering* 2022, Vol. 10, Page 917 10 (2022) 917. <https://doi.org/10.3390/JMSE10070917>.
- [31] M. Nokken, A. Boddy, R.D. Hooton, M.D.A. Thomas, Time dependent diffusion in concrete—three laboratory studies, *Cem Concr Res* 36 (2006) 200–207. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2004.03.030>.
- [32] X. Cheng, J. Peng, C.S. Cai, J. Zhang, Experimental Study on Chloride Ion Diffusion in Concrete under Uniaxial and Biaxial Sustained Stress, *Materials* 13 (2020) 5717. <https://doi.org/10.3390/MA13245717>.
- [33] K.A.A. Al-Sodani, M.M. Al-Zahrani, M. Maslehuddin, O.S.B. Al-Amoudi, S.U. Al-Dulaijan, Chloride diffusion models for plain and blended cement concretes exposed to laboratory and atmospheric marine conditions, *Journal of Materials Research and Technology* 17 (2022) 125–138. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2021.12.136>.
- [34] J. Liao, Y. Wang, X. Sun, Y. Wang, Chloride Penetration of Surface-Coated Concrete: Review and Outlook, *Materials* 2024, Vol. 17, Page 4121 17 (2024) 4121. <https://doi.org/10.3390/MA17164121>.
- [35] M. Mottl, J. Pazderka, P. Reiterman, Crystalline Coating and Its Influence on Chloride Ion Diffusion Resistance of Carbonated Concrete, *Coatings* 2025, Vol. 15, Page 163 15 (2025) 163. <https://doi.org/10.3390/COATINGS15020163>.
- [36] M. Amaral, I. Aguiar Oliveira, D.H. de Bem, G. Costa Réus, G. Macioski, M. Miranda Farias, M.H. Farias de Medeiros, Influence of Silica Fume (SF) Content on Passive Film Formation of Steel Reinforcement Inside Hardened Concrete, *Corrosion and Materials Degradation* 2025, Vol. 6, Page 3 6 (2025) 3. <https://doi.org/10.3390/CMD6010003>.