



Fator de Envelhecimento do Concreto e sua Influência na Estimativa de Vida Útil de Estruturas de Concreto Armado Expostas a Ambientes Marinhos

Leonardo R. W. Campos¹, Rita T. de Oliveira¹, Gustavo B. Wally²,
Fábio C. Magalhães³, Leandro C. L. Pinheiro³, Mauro de V. Real⁴

Resumo: Um importante parâmetro de grande relevância para o processo de modelagem da vida útil de estruturas de concreto armado é o fator de envelhecimento do concreto, que expressa a redução da difusividade do material ao longo do tempo. Diversos modelos de estimativa de vida útil propõem condições diferentes para considerar a variação da capacidade do concreto resistir ao ingresso de agentes agressivos ao longo do tempo. Neste artigo são apresentados valores de fator de envelhecimento obtidos experimentalmente, bem como são discutidos os principais fatores que afetam a difusividade do concreto, sendo eles: relação (a/c), presença de adições minerais, condicionamento prévio e grau de saturação do concreto, pela idade do concreto e pelas condições de cura e, também, a agressividade ambiental sobre a qual a estrutura é submetida. Ademais, a influência do fator de envelhecimento na estimativa de vida útil de concreto é avaliada através de uma abordagem probabilística. Os resultados obtidos indicam a necessidade de avaliações experimentais de longo prazo para reduzir as incertezas inerentes aos projetos de durabilidade e confiabilidade estrutural, proporcionando previsões mais precisas e realistas.

Palavras-chave: durabilidade; penetração de cloretos; fator de envelhecimento do concreto.

¹Mestrando, PPGeo – Universidade Federal do Rio Grande/FURG, RS, Brasil
leorc_05@hotmail.com.

²Prof. M.Sc., Universidade Católica de Pelotas/UCPel, RS, Brasil

³Prof. Dr., LEMCC – Instituto Federal do Rio Grande do Sul/IFRS, RS, Brasil

⁴Prof. Dr., PPGeo – Universidade Federal do Rio Grande/FURG, RS, Brasil

1 INTRODUÇÃO

A corrosão das armaduras é um dos principais processos de degradação que atingem as estruturas de concreto armado expostas a ambientes marinhos. Nesses ambientes, os principais agentes agressivos causadores da corrosão são os íons cloreto, oriundos principalmente da água do mar. Logo, os cloretos penetram nos poros do concreto e, ao atingirem certas concentrações em regiões próximas às armaduras, desencadeiam o processo corrosivo, reduzindo a vida útil da estrutura (Pinto, Ribeiro e Machado, 2018).

Embora as especificações acerca da durabilidade de estruturas ainda se baseie em, grande parte, em parâmetros prescritivos, atualmente avança em direção às abordagens de desempenho. Isso ocorre porque a abordagem prescritiva tradicionalmente adotada limita-se a estabelecer valores limite a parâmetros como resistência à compressão, consumo de cimento e relação (a/c). Esses limites, embora afetem propriedades relacionadas à durabilidade do concreto, não garantem que as estruturas cumpram com sua vida útil de projeto, sobretudo quando expostas a ambientes de severa agressividade (Beus Hausen *et al.*, 2021; Wally, Magalhães e Silva Filho, 2022).

Em abordagens com base no desempenho é fundamental que seja avaliada pelo menos uma propriedade diretamente relacionada à penetrabilidade do concreto, como a difusividade ou a permeabilidade (Baruchel-Bouny *et al.*, 2011). Essa medida tem o objetivo de verificar, ainda às primeiras idades do concreto, a conformidade do material executado quanto aos aspectos de durabilidade, de modo similar ao que ocorre com a resistência à compressão na avaliação da conformidade do concreto em termos estruturais.

No caso de estruturas de concreto armado expostas a ambientes marinhos, o coeficiente de difusão de cloretos do concreto é comumente adotado como indicador de durabilidade. Adicionalmente, em muitos casos a concentração de cloretos no interior da estrutura é estimada com base na solução da 2ª Lei da Difusão de Fick. Essa solução, no entanto, apresenta algumas especificidades, dentre as quais destaca-se a consideração de que o coeficiente de difusão de cloretos no concreto é constante. Sabe-se, porém, que a difusividade do concreto decresce ao longo do tempo (Mangá e Malloy, 1994; Gaal, Koenders e Polder, 2006; Zhang *et al.*, 2022).

Dessa forma, ao se realizar estimativas da vida útil de estruturas de concreto armado, é fundamental que seja considerada a dependência do tempo do coeficiente de difusão do material através da introdução do chamado fator de envelhecimento do concreto (α). A não consideração do fator de envelhecimento, embora ainda comum em alguns modelos de penetração de cloretos consolidados, conduz a valores superestimados acerca da velocidade de penetração de cloretos no concreto (Andrade, Castellote e D'andrea, 2011).

Na ausência de um consenso a respeito do comportamento da difusividade do concreto ao longo do tempo, diferentes modelos têm sido propostos. Ocorre, no entanto,

que a forma de consideração dessa variação difere consideravelmente entre os modelos disponíveis na literatura, fato que tende a levar a resultados divergentes dependendo do modelo adotado. Além disso, a escassez de dados experimentais de longo prazo da difusividade do concreto contribui para o cenário de incertezas na previsão de vida útil de elementos estruturais de concreto armado (Caffesse *et al.*, 2024).

Este trabalho aborda aspectos relacionados à variação temporal da penetração de cloretos no concreto, evidenciando lacunas ainda existentes no contexto de projetos de durabilidade baseados em desempenho. Uma compilação de resultados experimentais é apresentada, bem como são discutidos os principais fatores que influenciam a difusividade do concreto. Através de uma análise probabilística, é realizada uma avaliação da influência do fator de envelhecimento do concreto na estimativa de vida útil de estruturas expostas a ambientes marinhos.

2 ANÁLISES EXPERIMENTAIS DO FATOR DE ENVELHECIMENTO DO CONCRETO

Diversos estudos experimentais têm avaliado a variação temporal da difusividade do concreto (Thomas e Bamforth, 1999; Nokken *et al.*, 2006; Al-Alaily e Hassan, 2016). No entanto, ainda existem lacunas no entendimento do fator de envelhecimento do concreto. Esse fato se dá, principalmente, devido aos diferentes tipos de cimento, características de adições minerais e outros aspectos que influenciam a conformação microestrutural do concreto e a variação de sua difusividade. Além disso, a definição dos valores de α tomados para o projeto de novas estruturas deve, idealmente, basear-se na avaliação de concretos produzidos sob condições semelhantes e expostos a condições ambientais similares. A calibração do nível de redução da difusividade do concreto, portanto, exige análises complexas, incluindo a realização de estudos de longo prazo.

Thomas e Bamforth (1999) realizaram um estudo com blocos de concreto contendo cinza volante e escória de alto forno expostos ao ambiente marinho por períodos entre 6 meses e 8 anos. Foram também avaliados concretos mantidos em laboratório com idades de até 3 anos e amostras com 30 anos de idade extraídas de uma barragem. Os autores destacam que a redução da difusividade do concreto é consideravelmente mais acentuada em concretos que contêm cinza volante ou escória de alto forno, quando comparados a concretos produzidos sem adições minerais. Os resultados mostram que, quando avaliado em idades inferiores a um mês, o coeficiente de difusão de concretos contendo de 25 a 30 % de cinza volante é similar ao observado em concretos sem adições. Após cerca de dois anos, porém, a difusividade dos concretos produzidos com cinza volante pode ser de até uma ordem de grandeza inferior. Considerando concretos analisados até a idade de oito anos, foram obtidos valores de fator de envelhecimento de 0,1 para concretos sem adições minerais, 0,7 para concretos contendo cinza volante e 1,2 para concretos produzidos com escória de alto forno.

Nokken *et al.* (2006), por sua vez, resumem uma série de estudos acerca do fator de envelhecimento do concreto realizados na Universidade de Toronto. Foram avaliados concretos com relação água/aglomerante entre 0,30 e 0,40 e com utilização de cinza volante, metacaulim, sílica ativa e escória de alto forno. Após 1095 dias de imersão dos concretos em solução contendo cloretos, foram observados fatores de envelhecimento entre 0,57 e 0,91, sendo a maior redução da difusividade observada em um concreto com relação (a/c) = 0,4 e substituição de cimento por cinza volante no teor de 12 %.

Al-alaily e Hassan (2016) avaliaram a variação do coeficiente de difusão de cloretos ao longo do tempo em concretos com substituição de cimento Portland por metacaulim em teores entre 0 e 25 % e com relações água/aglomerante entre 0,3 e 0,5. Verificou-se que o uso de metacaulim é o principal responsável pela redução da difusividade do concreto em idades entre 360 e 720 dias, enquanto em idades iniciais (28 e 90 dias) a relação (a/c) mostra-se preponderante. Salienta-se ainda que dentre os 53 diferentes concretos avaliados no estudo foram identificados fatores de envelhecimento entre 0,078 e 0,797.

De maneira similar, Wally *et al.* (2023) avaliaram a difusividade de concretos produzidos com diferentes tipos de cimento, relação água/aglomerante e tipos de adição mineral. As análises experimentais foram realizadas às idades de 28, 91 e 180 dias, sendo as maiores reduções observadas em concretos contendo cinza volante e sílica ativa. Cabe salientar que os resultados apresentados por Wally *et al.* (2023) foram obtidos em laboratório, através de um ensaio de migração iônica. No entanto, o estudo é parte de um projeto maior, que contempla a exposição de amostras de concreto ao ambiente marinho na Praia do Cassino, Rio Grande/RS. No contexto do projeto, há o objetivo de avaliar as relações entre fatores de envelhecimento obtidos através de ensaios acelerados e por meio de exposição natural. Busca-se também, com resultados de longo prazo, determinar o tempo necessário para que cesse a redução da difusividade do concreto, passando o coeficiente de difusão a ser constante.

A Figura 1 e a Figura 2, ao sumarizar resultados obtidos experimentalmente por diversos autores, ilustram a elevada variabilidade dos valores de fator de envelhecimento. Enquanto a Figura 1 apresenta a relação entre o fator de envelhecimento do concreto e a relação água/aglomerante do material, a Figura 2 demonstra as influências do consumo de cimento na redução da difusividade do concreto.

De modo geral, percebe-se que os fatores que afetam o comportamento da difusividade do concreto ao longo do tempo estão bem esclarecidos. No entanto, os estudos mencionados limitam-se, em sua maioria, à avaliação da difusividade do concreto em idades inferiores a 10 anos, as quais são muito inferiores ao período para o qual estimativas de vida útil são realizadas, pois de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2023) é recomendada uma vida útil mínima de 50 anos para estruturas usuais e de 100 anos para obras especiais ou de grande vulto, salvo especificações diferentes no contrato. Além disso, os resultados dos diferentes estudos apresentam grande variabilidade, o que pode ser explicado pela utilização de parâmetros experimentais significativamente diferentes,

como a relação (a/c), as condições de cura e os métodos de medição. Portanto, é dificultada a definição de valores para a modelagem da vida útil de estruturas de concreto armado sujeitas à penetração de cloretos.

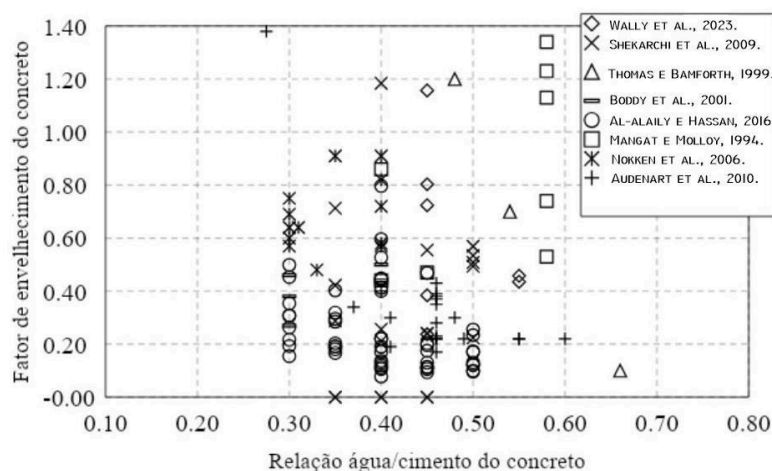


Figura 1: Relação entre o fator de envelhecimento (α) e a relação (a/c) do concreto.

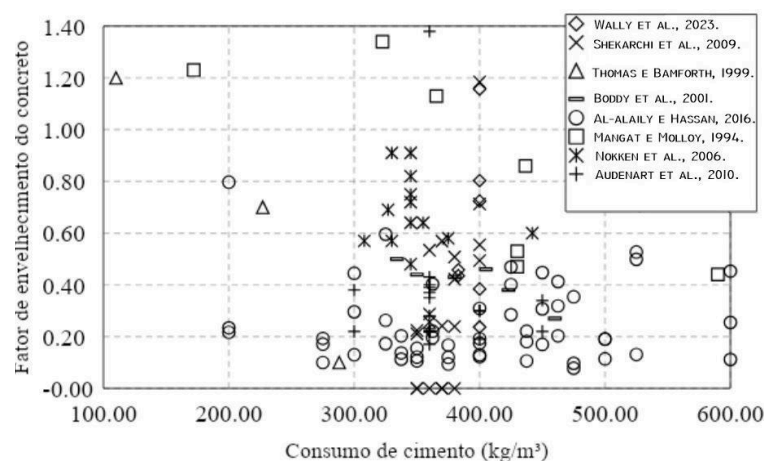


Figura 2: Influência do consumo de cimento no fator de envelhecimento do concreto.

3 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO FATOR DE ENVELHECIMENTO EM ESTIMATIVAS DE VIDA ÚTIL

A análise da durabilidade do concreto, especialmente no que tange à resistência à penetração de agentes agressivos, é crucial para a estimativa precisa da vida útil de estruturas de concreto armado. Neste contexto, a aplicação de modelos probabilísticos tem se mostrado fundamental, pois permite lidar com as incertezas inerentes ao comportamento do material ao longo do tempo. Esses modelos são frequentemente utilizados dentro da área da confiabilidade estrutural, um ramo da engenharia que se dedica à avaliação da probabilidade de falha das estruturas, considerando as

variabilidades dos parâmetros de durabilidade e as condições ambientais às quais a estrutura está submetida

Como discutido anteriormente, de modo a considerar a redução da difusividade do concreto decorrente da evolução da microestrutura do material, muitos modelos de estimativa da penetração de cloretos no concreto têm introduzido o fator de envelhecimento do concreto como parâmetro de entrada. No entanto, além da adequada definição do valor a ser atribuído a esse parâmetro, é necessário perceber que alguns modelos consideram que o coeficiente de difusão de cloretos sofre reduções por tempo indeterminado, até o fim da vida útil da estrutura – caso, por exemplo, do *fib* Model Code 2020 e do Duracon (Gjörv, 2014).

A relativa escassez de dados experimentais de longo prazo dificulta a definição da idade a partir da qual o coeficiente de difusão de cloretos passa a ser constante. Por esses motivos, certos modelos truncam a atuação do fator de envelhecimento e, conseqüentemente, a redução do coeficiente de difusão do concreto em certas idades. Pode-se mencionar, por exemplo, o projeto francês Perf DuB (2023), no qual considera-se que o coeficiente de difusão do concreto sofre reduções por até 10 anos após a concretagem. O modelo estadunidense *Life-365* (Bentz e Thomas, 2020), por sua vez, cessa a redução da difusividade do concreto à idade de 25 anos. De maneira similar, no contexto do projeto de durabilidade da ponte que liga Hong Kong-Zhuhai-Macau (Li *et al.*, 2015), adotou-se a idade de 30 anos como limite para a diminuição do coeficiente de difusão do concreto.

Para avaliar a influência do período de atuação do fator de envelhecimento do concreto nas estimativas de vida útil, uma análise probabilística foi realizada. Para as análises, adotou-se o modelo Duracon (Gjörv, 2014), apresentado na Equação (1). A escolha por um único modelo teve por objetivo possibilitar a comparação entre as estimativas realizadas considerando diferentes idades de atuação do fator de envelhecimento.

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

Na equação (1) $C_{(x,t)}$ é a concentração de cloretos na profundidade x_c após um tempo t , C_s é a concentração de cloretos na superfície do concreto, erf é a função erro de Gauss e $D(t)$ é o coeficiente de difusão de cloretos no concreto, calculado de acordo com a equação (2).

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

Na equação (2), D_0 é o coeficiente de difusão determinado no tempo t_0 , t' é a idade da estrutura quando exposta aos íons, α é o fator de envelhecimento do concreto e

k_e é o parâmetro que introduz a influência da temperatura no processo de difusão (equação (3)).

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

Na equação (3), \exp é a função exponencial, E_A é a energia de ativação da difusão de cloretos, R é a constante dos gases e T é a temperatura média.

A despassivação das armaduras foi tomada como estado limite de durabilidade. Assim, a probabilidade de falha (P_f), isto é, a probabilidade de despassivação das armaduras, foi calculada com base na equação (4).

$$P_f = P(C_{(x,t)} \geq C_{CR}) \quad (4)$$

Na equação (4), $C_{(x,t)}$ é a concentração de cloretos na profundidade x_c após um tempo t , calculada a partir da equação (1), e C_{CR} é a concentração crítica de cloretos, isto é, a concentração capaz de desencadear o processo corrosivo.

A determinação da probabilidade de falha foi realizada utilizando o método de Simulação de Monte Carlo (técnica de simulação estatística usada para modelar fenômenos complexos e sistemas que envolvem incerteza ou variabilidade). Os cálculos foram realizados através de uma classe Python chamada Realpy (*Reliability Analysis Library in Python*), desenvolvida por Real (2023) para a solução de problemas de confiabilidade estrutural. Os parâmetros de entrada considerados na análise são apresentados na Tabela 1. Adotou-se C_s com valor médio de 3,0 %, sugerido pelo *fib* Bulletin 76 (2015) para estruturas sujeitas à classe de agressividade ambiental (CAA) XS3, similar à CAA IV apresentada na NBR 6118 (ABNT, 2023). Dessa forma, tomou-se 50 mm como valor médio da espessura da camada de cobrimento da armadura. O valor de $D_0 = 1,75 \times 10^{-12}$ m²/s, refere-se a um concreto contendo 5 % de sílica ativa e foi obtido por Sell Junior *et al.* (2021) utilizando o método de migração de cloretos apresentado pela NT Build 492 (Nordtest, 1999). A definição por $\alpha = 0,4$ teve como base os resultados de Gjrv (2014).

Foram considerados como parâmetros determinísticos a energia de ativação da difusão de cloretos ($E_A = 35.000$ J/mol), a constante universal dos gases perfeitos ($R = 8,314$ J/(mol \times K)), a idade do concreto no início da exposição ao ataque de cloretos ($t' = 28$ dias), a idade do concreto na avaliação do coeficiente de difusão de cloretos ($t_0 = 28$ dias) e a temperatura média ($T = 20$ °C).

Tabela 1: Dados utilizados na análise probabilística.

Parâmetro	Unidade	Distribuição	Média	Desvio Padrão	Referência
D_0	$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Normal	1,75	0,18	Sell Junior <i>et al.</i> (2021)
C_s	%	LogNormal	3,00	1,35	<i>fib</i> Bulletin 76 (2015)
C_{cr}	%	Normal	0,40	0,10	Angst <i>et al.</i> (2009)
x_c	mm	Normal	50,00	5,00	NBR 6118 (ABNT, 2023)
α	-	Normal	0,40	0,08	Gjørv (2014)

Foram simuladas situações de atuação do fator de envelhecimento do concreto limitadas às idades de 10, 25, 30 e 100 anos. Logo, os resultados obtidos na análise probabilística realizada são apresentados a seguir (figura 3).

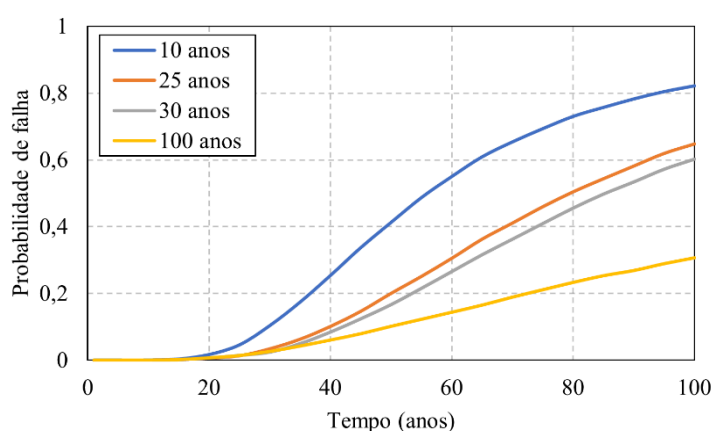


Figura 3: Influência do tempo de atuação do fator de envelhecimento na probabilidade de despassivação.

Observa-se, com base na Figura 3, a forte influência do fator de envelhecimento do concreto na estimativa de vida útil de estruturas sujeitas à penetração de cloretos. Nota-se que a consideração da redução da difusividade do concreto até o fim da sua vida útil (aqui representada pela idade de 100 anos), pode conduzir a valores subestimados da probabilidade de despassivação das armaduras decorrente da ação dos cloretos.

Conforme é destacado em estudos relevantes, devido a mudanças na microestrutura do concreto, a redução da difusividade é mais significativa nas primeiras idades. Após o período de estabilização da hidratação do cimento, a difusividade continua a apresentar melhorias, embora estas sejam pouco evidentes. Portanto, é necessário escolher modelos adequados, com base em dados experimentais para obter previsões precisas, como demonstrado no artigo de Yh, Huang e Chang (1994). No estudo conduzido por Wally *et al.* (2023), mencionado anteriormente, a difusividade de cloretos apresentou reduções mínimas entre 91 e 180 dias, sugerindo que a maior variação no coeficiente de migração ocorre nos primeiros meses após a produção do concreto.

Analisando-se sob a perspectiva de projetos de durabilidade baseados em desempenho, verifica-se a importância de estabelecer, com maior precisão, o momento em que a difusividade do concreto tem seu processo natural de redução cessado – ou, ao menos, quando esse parâmetro passa a não sofrer reduções substanciais. Estimativas imprecisas do comportamento da difusividade ao longo do tempo podem acarretar projetos estruturais menos viáveis economicamente ou, em uma situação ainda pior, em casos de estruturas sem a capacidade de cumprir sua vida útil requerida.

Em um cenário de inúmeras incertezas como o da estimativa de vida útil de estruturas de concreto em ambientes agressivos, estabelecer de forma precisa parâmetros que possam ser determinados e analisados experimentalmente pode garantir resultados mais precisos e, portanto, uma menor probabilidade de ocorrência de processos de deterioração em idades precoces.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi abordada a problemática do fator de envelhecimento do concreto e sua introdução em modelos de estimativa de vida útil de estruturas de concreto armado. Resultados experimentais disponíveis na literatura foram discutidos e a elevada variabilidade do fator de envelhecimento (α) foi observada.

Os resultados apresentados evidenciam a necessidade de que parâmetros de difusividade do concreto, e sua variação temporal, sejam avaliados de forma mais criteriosa. Ademais, faz-se fundamental a realização de avaliações experimentais de longo prazo para minimizar as incertezas relacionadas aos ensaios, a fim de compreender a idade em que, de fato, esse parâmetro se estabiliza. Já que essas incertezas nos impedem de prever, com precisão, por quanto tempo o processo de cura do concreto continuará a fazer diferença no processo da redução da difusividade. Essa falta de precisão pode impactar negativamente a segurança, a durabilidade e a confiabilidade das construções ao longo do tempo, evidenciando a necessidade de abordagens mais robustas para mitigar esses riscos.

Através de uma análise probabilística, exemplificou-se a influência da “idade final” da redução da difusividade do concreto na estimativa de vida útil de elementos estruturais expostos a ambientes agressivos. Dessa forma, observou-se que quanto maior for considerado o período de redução da difusividade, menos precisa será a previsão de vida útil de uma estrutura, visto que um maior tempo de redução de difusividade, é sinônimo de uma estrutura mais resistente à ação de agentes agressivos. Contudo, na prática, a redução da difusividade tem um curto período relevante, o que limita a redução da difusividade ao longo do tempo. Assim, nota-se que uma “idade final” mal dimensionada pode gerar expectativas equivocadas sobre a resistência real da estrutura, resultando em estimativas de vida útil inconsistentes.

A estimativa de vida útil de estruturas de concreto armado, sujeitas a ambientes de severa agressividade, apresenta elevada complexidade. Trata-se de um fenômeno que sofre influência de fatores ambientais, muitos deles de difícil estimativa ou mensuração.

A fiel previsão das características ambientais, as quais os elementos estruturais estarão sujeitos ao longo de suas vidas úteis, é bastante complexa. Apesar disso, é fundamental assegurar a correta determinação dos parâmetros, os quais pode-se controlar tecnicamente.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Rio Grande do Sul (FAPERGS) pelo auxílio financeiro (Edital PqG 07/2021). M. V. Real agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio através de bolsa de Produtividade em Pesquisa (Processo 302548/2021-1). O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- AL-ALAILY, H. S.; HASSAN, A. A. A. Time-dependence of chloride diffusion for concrete containing metakaolin. **Journal of Building Engineering**, v. 7, p. 159-169, 2016.
- ANDRADE, C.; CASTELLOTE, M.; D'ANDREA, R. Measurement of aging effect on chloride diffusion coefficients in cementitious matrices. **Journal of Nuclear Materials**, v. 412, p. 209-216, 2011.
- ANGST, U.; ELSENER, B.; LARSEN, C. K.; VENNESLAND, Ø. Critical chloride content in reinforced concrete — A review. **Cement and Concrete Research**, v. 39, p. 1122-1138, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.
- AUDENAERT, K.; YUAN, Q.; DE SCHUTTER, G. On the time dependency of the chloride migration coefficient in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 396-402, 2010.
- BAROGHEL-BOUNY, V.; KINOMURA, K.; THIERY, M.; MOSCARDELLI, S. Easy assessment of durability indicators for service life prediction or quality control of concretes with high volumes of supplementary cementitious materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, p. 832-847, 2011.
- BENTZ, E. C.; THOMAS, M. D. A. **Life-365 Service Life Prediction Model and Computer Program for Predicting the Service Life and Life-Cycle Cost of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides**. Version 2.2.3. Life-365™ Consortium III, 2020.

- BEUSHAUSEN, H.; NDAWULA, J.; HELLAND, S.; PAPWORTH, F.; LINGER, L. Developments in defining exposure classes for durability design and specification. **Structural Concrete**, v. 22, p. 2539-2555, 2021.
- BODDY, A.; HOOTON, R. D.; GRUBER, K. A. Long-term testing of the chloride-penetration resistance of concrete containing high-reactivity metakaolin. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 759-765, 2001.
- FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. **fib bulletin 76**: Benchmarking of deemed-to-satisfy provisions in standards – Durability of reinforced concrete structures exposed to chlorides. Ostfildern: DCC Siegmund Kästl, 2015.
- FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. **fib Model Code for Concrete Structures 2020**. New Jersey: Ernst & Sons, 2023.
- GAAL, G. C. M.; KOENDERS, E. A. B.; POLDER, R. B. Ageing effect of chloride diffusion coefficient. In: CONCRETELIFE'06 - INTERNATIONAL RILEM SEMINAR ON CONCRETE DURABILITY AND SERVICE LIFE PLANNING, Ein-Bokek, 2006. **Anais [...]**. RILEM, 2006. p. 41-50.
- GJØRV, O. E. **Durability Design of Concrete Structures in Severe Environments**. 2 ed. Boca Ratón: CRC Press, 2014. 268 p.
- IREX / PROJET NATIONAL PERFDUB. **Approche performantielle de la durabilité des ouvrages em béton**: De la qualification en laboratoire au suivi d'exécution. Paris: Éditions Eyrolles, 2023. 585 p.
- LI, Q.; LI, K.; ZHOU, X.; ZHANG, Q.; FAN, Z. Model-based durability design of concrete structures in Hong Kong–Zhuhai–Macau sea link project. **Structural Safety**, v. 53, p. 1-12, 2015.
- MANGAT, P. S.; MOLLOY, B. T. Prediction of long term chloride concentration in concrete. **Materials and Structures**, v. 27, p. 338-346, 1994.
- NOKKEN, M.; BODDY, A.; HOOTON, R. D.; THOMAS, M. D. Time dependent diffusion in concrete—three laboratory studies. **Cement and Concrete Research**, v. 36, p. 200-207, 2006.
- NORDTEST. **NT Build 492**: Concrete, Mortar and Cement-based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Non-steady-state Migration Experiments. Espoo: NORDTEST, 1999.
- PINTO, S. A.; RIBEIRO, D. V.; MACHADO, S. L. Influência do teor de argamassa nos parâmetros de transporte de concretos submetidos ao ensaio de migração de íons cloro. 3º Encontro Luso-Brasileiro de Degradação em Estruturas de Concreto Armado, São Carlos, ago. 2018.
- REAL, M. V. **Reliability** - A Python class for Reliability analysis including Monte Carlo and FORM methods. Disponível em <https://github.com/mvreal/Reliability>.
- SELL JUNIOR, F. K.; WALLY, G. B.; TEIXEIRA, F. R.; MAGALHÃES, F. C. Experimental assessment of accelerated test methods for determining chloride diffusion coefficient in concrete. **IBRACON Structures and Materials Journal**, v. 14, e14407, 2021.

- SHEKARCHI, M.; RAFIEE, A.; LAYSSI, H. Long-term chloride diffusion in silica fume concrete in harsh marine climates. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, p. 769-775, 2009.
- TAFFESE, Woubishet Zewdu; WALLY, Gustavo Bosel; MAGALHÃES, Fábio Costa; ESPINOSA-LEAL, Leonardo. Concrete aging factor prediction using machine learning. **Materials Today Communications**, v. 40, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.109527>
- THOMAS, M. D. A.; BAMFORTH, P. B. Modelling chloride diffusion in concrete: Effect of fly ash and slag. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 487-495, 1999.
- WALLY, G. B.; LARROSSA, M. C.; PINHEIRO, L. C. L.; REAL, M. V.; MAGALHÃES, F. C. 6-month evaluation of concrete aging factor using chloride migration test: Effects of binder type and w/b ratio. **Materialia**, v. 30, 101841, 2023.
- WALLY, G. B.; MAGALHÃES, F. C.; SILVA FILHO, L. C. P. From prescriptive to performance-based: An overview of international trends in specifying durable concretes. **Journal of Building Engineering**, v. 52, 104359, 2022.
- YEIH, W.D.; HUANG, R.; CHANG, J.J. A Study of Chloride Diffusion Properties of Concrete at Early Age. *Journal of Marine Science and Technology*: Vol. 2: Iss. 1, Article 8. 1994. DOI: 10.51400/2709-6998.2489
- ZHANG, J.; WU, J.; ZHANG, Y.; GAO, Y.; WANG, J. Time-varying relationship between pore structures and chloride diffusivity of concrete under the simulated tidal environment. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, v. 26, p. 501-518, 2022.