

AVALIAÇÃO PROBABILÍSTICA DA VIDA ÚTIL DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO EXPOSTAS À AMBIENTE MARINHO

Pietra Guasti Vande Meerssche (FURG) E-mail: pietrameerssche@outlook.com

Resumo: A degradação acelerada das estruturas de concreto armado gera consequências ambientais e econômicas negativas para a sociedade. As abordagens de projeto avançam gradualmente para abordagens baseadas em desempenho. Devido à alta variabilidade dos fatores que influenciam diretamente na durabilidade do concreto exposto à ambientes agressivos, uma abordagem probabilística baseada no desempenho tende a apresentar resultados mais compatíveis com a realidade. Neste trabalho é utilizada a metodologia Duracon para a avaliação probabilística da vida útil de estruturas de concreto armado expostas ao ambiente marinho. O modelo Duracon para estimativa da penetração de cloretos é apresentado. Verificou-se que os concretos produzidos com adições pozolânicas em substituição parcial ao cimento apresentaram previsões de vida útil superiores ao concreto de referência.

Palavras-chave: Concreto, Avaliação probabilística, Abordagem com base no desempenho, Penetração de cloretos.

PROBABILISTIC ASSESSMENT OF SERVICE LIFE OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES EXPOSED TO MARINE ENVIRONMENT

Abstract: The accelerated degradation of reinforced concrete structures generates negative environmental and economic consequences for society. Design approaches gradually move towards performance-based approaches. Due to the high variability of factors that directly influence the durability of concrete exposed to aggressive environments, a probabilistic performance-based approach tends to present results that are more compatible with reality. In this work, Duracon methodology is used for the probabilistic assessment of the service life of reinforced concrete structures exposed to marine environments. The Duracon model for estimating chloride penetration is presented. It was found that concrete produced with pozzolanic additions as a partial replacement for cement presented longer service life predictions than the reference concrete.

Keywords: Concrete, Probabilistic assessment, Performance-based approach, Chloride penetration.

1. Introdução

A corrosão desencadeada por cloretos é o principal mecanismo de degradação das estruturas de concreto armado expostas aos ambientes marinhos. A degradação acelerada das estruturas de concreto armado gera consequências ambientais e econômicas negativas para a sociedade. As abordagens de projeto visando à durabilidade avançam gradualmente para abordagens baseadas em desempenho.

A penetração de cloretos no concreto é diretamente influenciada por características ambientais (concentração superficial de cloretos no concreto e temperatura), especificações de projeto (tipo de cimento, espessura da camada de cobrimento do concreto, presença de adições minerais etc.) e processo construtivo.

De acordo com a classe de agressividade ambiental (CAA) a que o elemento da estrutura de concreto armado será exposto, a ABNT NBR 6118:2023 prescreve cobrimentos nominais para as armaduras que variam desde 35 mm a 50 mm para CAA III (forte) e IV (muito forte), respectivamente, a depender da tolerância de execução. No presente trabalho, a CAA III corresponderia a um ambiente marinho e a CAA IV a um ambiente sujeito à respingos de

marés.

Somente no Brasil, são normatizados pela ABNT NBR 16697:2018 6 tipos de Cimento Portland (CP): comum (CP I e CP I-S), composto com escória granulada de alto-forno (CP II-E), composto com material pozolânico (CP II-Z), composto com material carbonático (CP II-F), de alto forno (CP III), pozolânico (CP IV), de alta resistência inicial (CP V), branco estrutural e não estrutural (CPB); totalizando 9 subtipos possíveis de serem utilizados para produção de concreto.

Portanto, devido à alta variabilidade dos fatores que influenciam diretamente na durabilidade do concreto exposto à ambientes agressivos, uma abordagem probabilística baseada no desempenho tende a apresentar resultados mais compatíveis com a realidade – quando comparada a uma abordagem meramente descritiva.

1.1. Indicadores de durabilidade

Em geral, os indicadores de durabilidade são parâmetros obtidos por métodos de ensaio padronizados, com o objetivo de avaliar o potencial de durabilidade de estruturas de concreto sujeitas a ambientes agressivos. A combinação de ensaios varia de acordo com as normas técnicas de cada país. Estudos recentes (WALLY 2019, PINTO et al. 2022 e SELL JUNIOR et al. 2021) apresentam como indicadores de durabilidade os parâmetros obtidos pelos seguintes ensaios: NT Build 492:1999 (coeficiente de difusão aparente em estado não-estacionário), ABNT NBR 5739:2018 (resistência à compressão), ABNT NBR 9779:2012 (absorção de água por capilaridade) e ABNT NBR 9778:2005 (absorção de água por imersão).

Na literatura, existem diversos métodos de ensaio para avaliar a penetração de cloretos no concreto. Dentre os métodos de ensaio padronizados, pode-se destacar os citados por Wally (2019), de acordo com o tipo de parâmetro a ser determinado: coeficiente de difusão aparente – NT Build 443:1995 e ASTM C 1556:2022, coeficiente de difusão nos estados estacionário e não-estacionário – UNE 83987:2014, coeficiente de difusão em estado não-estacionário – NT Build 355:1989 e coeficiente de difusão aparente em estado não-estacionário – NT Build 492:1999.

Neste trabalho, será utilizado como indicador de durabilidade o coeficiente de difusão aparente em estado não-estacionário, obtido por Sell Junior et al. (2021) pelo método de ensaio de migração em estado não estacionário – NT Build 492:1999.

1.2. Níveis de abordagem

De acordo com Cascudo (2017) apud Ribeiro (2020), podem-se distinguir quatro níveis de abordagem de projeto visando à durabilidade de estruturas de concreto. O primeiro nível é a abordagem prescritiva, cujas recomendações envolvem o consumo mínimo de cimento, relação água/cimento máxima, cobrimento mínimo, resistência característica à compressão mínima, tipo de cimento etc. O segundo nível é a abordagem mista, que utiliza os indicadores de durabilidade, como por exemplo, a difusividade de cloretos, a resistividade elétrica, coeficientes de permeabilidade à água e aos gases etc. O terceiro nível é a abordagem de desempenho determinística, nos quais são empregados modelos preditivos de vida útil, como os modelos de carbonatação e penetração de cloretos, por exemplo. O quarto nível é a abordagem de desempenho probabilística, que emprega modelos preditivos de vida útil probabilísticos ou semi-probabilísticos.

A abordagem prescritiva é adequada para uma Vida Útil de Projeto (VUP) inferior ou igual a 50 anos, a abordagem mista para uma VUP entre 50 e 100 anos e a abordagem de desempenho (determinística ou probabilística) para uma VUP superior ou igual 100 anos.

1.3. Estimativa da penetração de cloretos no concreto

Os mecanismos de transporte de cloretos no concreto são bastante complexos (ZHANG 1996). Entretanto, pode-se estimar a concentração de cloretos no concreto a partir da 2ª Lei de Fick para a difusão. O modelo Duracon apresentado a seguir foi desenvolvido por Gjorv (2014), a partir de equações propostas por diversos autores. O modelo foi desenvolvido a partir do modelo Duracrete (2000) apud Real (2023).

Na Equação 2.1, $C_{(x,t)}$ 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, $D(t)$ é o coeficiente de difusão de cloretos no concreto e x_c é a distância do bordo da peça em que ocorre a concentração crítica de cloretos C_{cr} .

$$C_{(x,t)} = C_s \cdot \left[1 - erf \cdot \left(\frac{x_c}{2 \cdot \sqrt{D(t) \cdot t}} \right) \right] \quad (2.1)$$

O coeficiente de difusão de cloretos no concreto $D(t)$, dependente do tempo, pode ser obtido pela Equação 2.2, proposta por Takewaka e Mastumoto (1988) apud Gjorv (2014) e Tang e Gulikers (2007) apud Gjorv (2014):

$$D(t) = \frac{D_0}{1-\alpha} \cdot \left[\left(1 + \frac{t}{t_0} \right)^{1-\alpha} - \left(\frac{t}{t_0} \right)^{1-\alpha} \right] \cdot \left(\frac{t_0}{t} \right)^\alpha \cdot k_e \quad (2.2)$$

Na Equação 2.2, D_0 é o coeficiente de difusão determinado no tempo de referência t_0 , t é a idade do concreto quando exposto aos íons, α é o fator de envelhecimento do concreto e k_e é um parâmetro que introduz a influência da temperatura no processo de difusão, o qual pode ser obtido pela Equação 2.3, proposta por Kong et al. (2002) apud Gjorv (2014):

$$k_e = exp \left[\frac{E_A}{R} \cdot \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{273+T} \right) \right] \quad (2.3)$$

Na Equação 2.3, exp é a função exponencial, E_A é a energia de ativação da difusão de cloretos, R é a constante dos gases e T a temperatura.

A distância do bordo da peça em que ocorre a concentração crítica de cloretos pode ser obtida pela Equação 2.4:

$$x_c = 2 \cdot \sqrt{D(t) \cdot t} \cdot erf^{-1} \cdot \left(1 - \frac{C_s}{C_{cr}} \right) \quad (2.4)$$

Na Equação 2.4, erf^{-1} é a função inversa da função erro de Gauss e C_{cr} a concentração crítica de cloretos no concreto.

3. Avaliação probabilística

Para qualquer dimensionamento estrutural, é necessário estabelecer os efeitos combinados das solicitações externas e a resistência necessária para suportá-las. De acordo Gjorv (2014), o projeto de durabilidade segue a mesma abordagem do projeto estrutural. Neste caso, entretanto, as solicitações são os efeitos combinados das cargas de cloreto e das condições de temperatura, enquanto a resistência para suportá-las, é a resistência à penetração de cloretos. Desse modo, pode-se estabelecer a seguinte função de estado limite:

$$g(X) = C_{cr} - C_{(x,t)} \quad (3.1)$$

De acordo com Real (2023), quando $g(X) > 0$, a estrutura está segura quanto ao estado limite de despassivação, por outro lado, quando $g(X) \leq 0$ a estrutura atingiu o estado limite de despassivação da armadura, configurando uma situação de falha.

A probabilidade de falha da estrutura pode ser entendida, neste caso, como a probabilidade de se atingir o estado limite de despassivação da armadura. Dessa forma, pode-se estabelecer a seguinte equação:

$$p_f = P(C_{(x,t)} \geq C_{cr}) \quad (3.2)$$

Normalmente, a determinação da probabilidade de falha de um sistema envolve uma série de variáveis aleatórias, com os seus próprios parâmetros estatísticos, sendo necessário a utilização de software.

Existem diversos métodos matemáticos para avaliação da probabilidade de falha, como o Método de Confiabilidade de Primeira Ordem (FORM), Método de Confiabilidade de Segunda Ordem (SORM) e Simulação de Monte Carlo (MCS).

Para projetos de durabilidade, é comum a utilização do valor de 10% como limite superior da probabilidade de falha p_f . Portanto, neste trabalho, todos os resultados serão baseados no valor limite de 10%.

3.1. Metodologia Duracon

Duracon é um software para a análise de durabilidade de estruturas de concreto armado em ambientes agressivos. O software é baseado em uma Simulação de Monte Carlo da 2ª Lei de Difusão de Fick, para o cálculo da penetração de cloretos até o momento da despassivação (PIANC 2010). O programa pode ser utilizado tanto para o projeto de durabilidade como para avaliação da necessidade de manutenção das estruturas durante sua vida útil.

As simulações são realizadas a partir de um arquivo de entrada, contendo o tipo de distribuição das variáveis (normal, lognormal, beta ou determinística), os valores médios das variáveis e o desvio padrão das variáveis. A simbologia utilizada para os parâmetros de entrada no software Duracon é apresentada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Parâmetros de entrada do software Duracon.

Parâmetro	Unidade	Descrição
x_c	mm	Espessura da camada de cobrimento das armaduras
D_{coef}	$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Coefficiente de difusão de cloretos, baseado em ensaios (RCM: NT BUILD 492)
C_{CR}	%	Concentração crítica de cloretos
C_s	%	Concentração de cloretos na superfície do concreto
n	-	Fator de envelhecimento do concreto
t	Anos	Vida útil prevista da estrutura (p. e. 100-150 anos)
t_0	Dias	Idade do concreto quando ensaiado (p. e., 28 dias)
T	Celsius	Temperatura média anual no local
t_e	Dias	Idade do concreto quando exposto aos íons cloretos

Após a seleção do arquivo no software, dois arquivos de resultados são gerados. Os resultados apresentam a probabilidade de falha a cada intervalo de tempo, o desvio padrão da probabilidade de falha, o erro padrão, o índice de confiabilidade etc.

4. Resultados e discussões

Gjørsv (2014) fornece algumas diretrizes gerais para a determinação e seleção dos parâmetros de entrada utilizados no projeto de durabilidade de estruturas de concreto armado expostas ao ambiente marinho.

O valor médio e o desvio padrão para a concentração de cloretos na superfície do concreto C_s , em % por peso de cimento, são estimados a partir da agressividade ambiental, classificada em: forte (5,5; 1,3), média (3,5; 0,8) e moderada (1,5; 0,5). O valor médio e desvio padrão para o fator de envelhecimento do concreto α , são estimados a partir do tipo de cimento utilizado para produção do concreto, classificado em: cimentos portland (0,40; 0,08), cimentos de escória de alto forno (0,50; 0,10) e cimentos de cinza volante (0,60; 0,12). Para a concentração crítica de cloretos C_{CR} , o valor médio de 0,4 e desvio padrão de 0,1, em % por peso de cimento, é frequentemente utilizado em normas de concreto armado.

A Tabela 4.1 apresenta os parâmetros de entrada utilizados para as análises de durabilidade no software Duracon.

Tabela 4.1 – Parâmetros de entrada para as análises de durabilidade.

Parâmetro	Unidade	Distribuição	Média	Desvio Padrão
D_0	10^{-12} m ² /s	Normal	2,85 ⁽¹⁾	0,285 ⁽¹⁾
			1,75 ⁽²⁾	0,175 ⁽²⁾
			0,90 ⁽³⁾	0,09 ⁽³⁾
x_c	mm	Normal	40	4
			50	5
			60	6
C_{cr}	%	Normal	0,4	0,10
C_s	%	Normal	1,5	0,5
			3,5	0,8
			5,5	1,3
T	°C	Determinística	10	-
			20	-
			30	-
α	-	Normal	0,4	0,08

(1) Valores para REF; (2) Valores para SF-5; (3) Valores para SF-10.

As misturas REF, SF-5 e SF-10 se referem ao concreto produzido sem adições e concreto produzido com substituição parcial de cimento por sílica ativa (5%) e (10%), respectivamente. Os coeficientes de difusão de cloretos foram obtidos por Sell Junior et al. (2021), baseado no ensaio NT Build 492. Os concretos foram produzidos com Cimento Portland composto com material pozolânico (CP II Z-40).

4.1 Efeito da temperatura

Para analisar o efeito da temperatura foram avaliadas as três misturas (REF, SF-5 e SF-10) em temperaturas de 10 °C, 20 °C e 30 °C, com espessuras de cobrimento de 40 mm e concentração superficial de cloretos de 5,5%. A Figura 4.1 apresenta os resultados obtidos para a mistura de referência (REF).

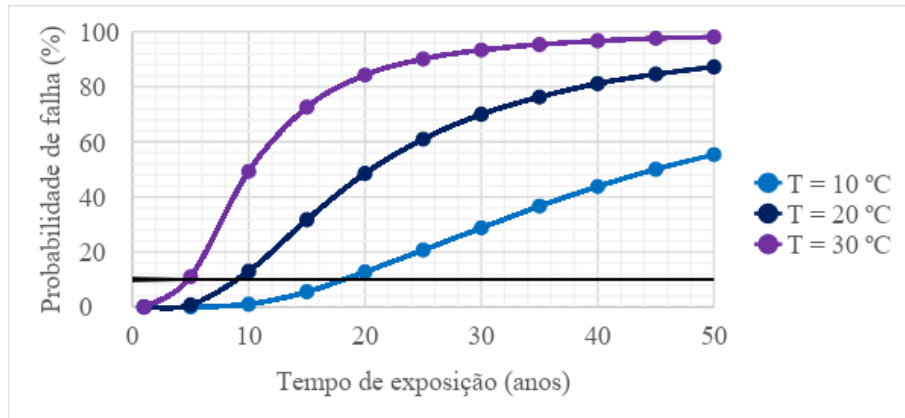


Figura 4.1 – Efeito da temperatura na probabilidade de falha (REF).

Para uma probabilidade de falha limite de 10%, o concreto de referência a uma temperatura de 10 °C apresenta uma estimativa de vida útil de aproximadamente 18 anos, a 20 °C de 9 anos e a 30 °C de 5 anos. A Figura 4.2 apresenta os resultados obtidos para a mistura com adição de 5% de sílica (SF-5).

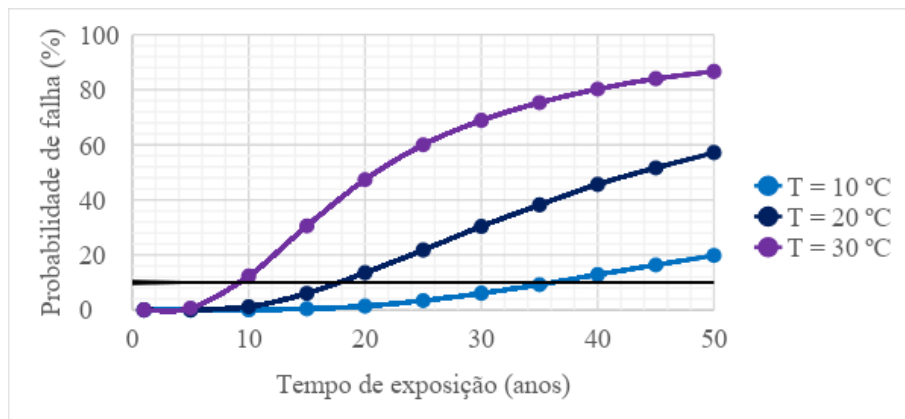


Figura 4.2 – Efeito da temperatura na probabilidade de falha (SF-5).

Para uma probabilidade de falha limite de 10%, o concreto com 5% de adição de sílica, a uma temperatura de 10 °C, apresenta uma estimativa de vida útil de aproximadamente 36 anos, a 20 °C de 18 anos e a 30 °C de 9 anos. A Figura 4.3 apresenta os resultados obtidos para a mistura com adição de 10% de sílica (SF-10).

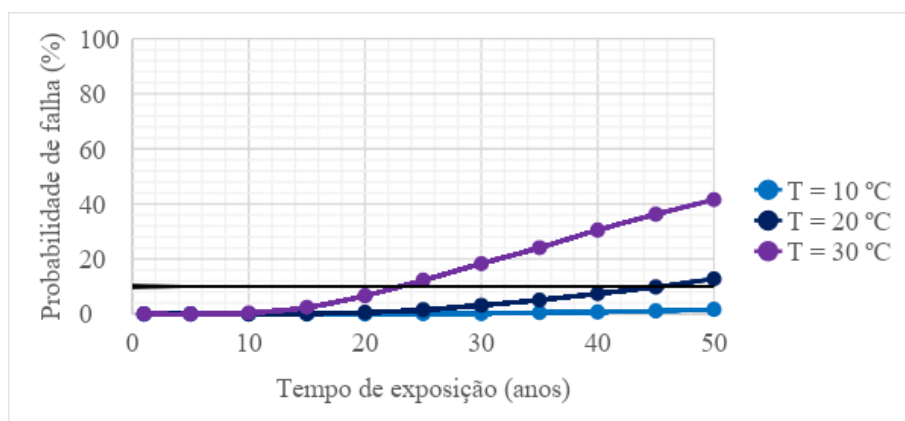


Figura 4.3 – Efeito da temperatura na probabilidade de falha (SF-10).

Para uma probabilidade de falha limite de 10%, o concreto com 10% de adição de sílica, a uma temperatura de 10 °C, apresenta uma estimativa de vida útil acima do limite estabelecido (50 anos), a 20 °C apresenta uma estimativa de vida útil de 45 anos e a 30 °C de 23 anos. A Figura 4.4 apresenta o resumo de dados obtidos para as três misturas.

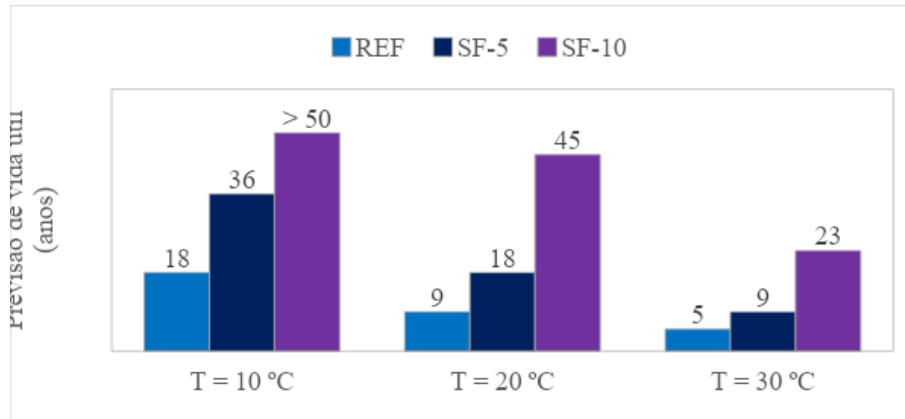


Figura 4.4 – Previsão de vida útil ($C_s = 5,5\%$; $x_c = 40\text{ mm}$).

Conforme esperado, todas as misturas avaliadas apresentaram uma redução na previsão de vida útil com o aumento da temperatura. Os concretos produzidos com adição de sílica ativa apresentaram desempenhos superiores ao concreto de referência. Entretanto, para as condições impostas, apenas uma mistura (SF-10) superou a expectativa de vida útil de 50 anos, a uma temperatura de 10 °C.

4.2 Efeito da espessura da camada de cobrimento

Para analisar o efeito do aumento da espessura da camada de cobrimento foram analisadas as três misturas (REF, SF-5 e SF-10) com espessuras de cobrimento de 40 mm, 50 mm e 60 mm, em temperatura de 20 °C e concentração superficial de cloretos de 5,5%. A Figura 4.5 apresenta o efeito da espessura da camada de cobrimento na probabilidade de falha para o concreto de referência (REF).

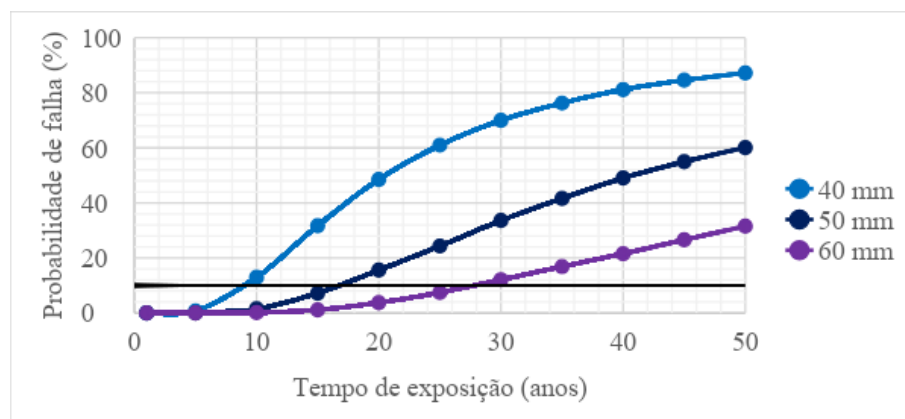


Figura 4.5 – Efeito da espessura da camada de cobrimento na probabilidade de falha (REF).

Para uma probabilidade de falha limite de 10%, o concreto de referência (REF) com espessura da camada de cobrimento de 40 mm apresenta uma estimativa de vida útil de aproximadamente 9 anos, com 50 mm de 17 anos e com 60 mm de 28 anos. A Figura 4.6

apresenta o efeito da espessura da camada de cobrimento na probabilidade de falha para o concreto com adição de 5% de sílica (SF-5).

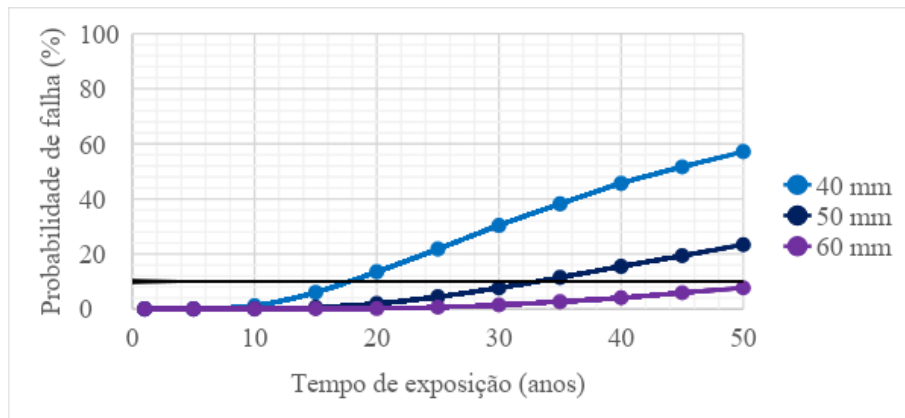


Figura 4.6 – Efeito da espessura da camada de cobrimento na probabilidade de falha (SF-5).

Para uma probabilidade de falha limite de 10%, o concreto com 5% de adição de sílica (SF-5) e com espessura da camada de cobrimento de 40 mm, apresenta uma estimativa de vida útil de aproximadamente 17 anos, com 50 mm de 33 anos e com 60 mm superior a 50 anos. A Figura 4.7 apresenta o efeito da espessura da camada de cobrimento na probabilidade de falha para o concreto com adição de 10% de sílica (SF-10).

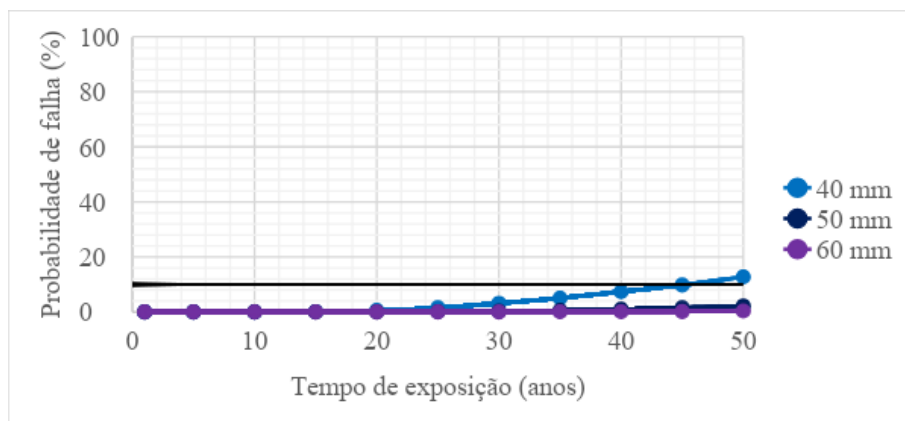


Figura 4.7 – Efeito da espessura da camada de cobrimento na probabilidade de falha (SF-10).

Para uma probabilidade de falha limite de 10%, o concreto com 10% de adição de sílica (SF-10) e com espessura da camada de cobrimento de 40 mm, apresenta uma estimativa de vida útil de aproximadamente 45 anos, com 50 mm e 60 mm apresenta uma estimativa de vida útil superior a 50 anos. A Figura 4.8 apresenta o resumo dos dados obtidos.

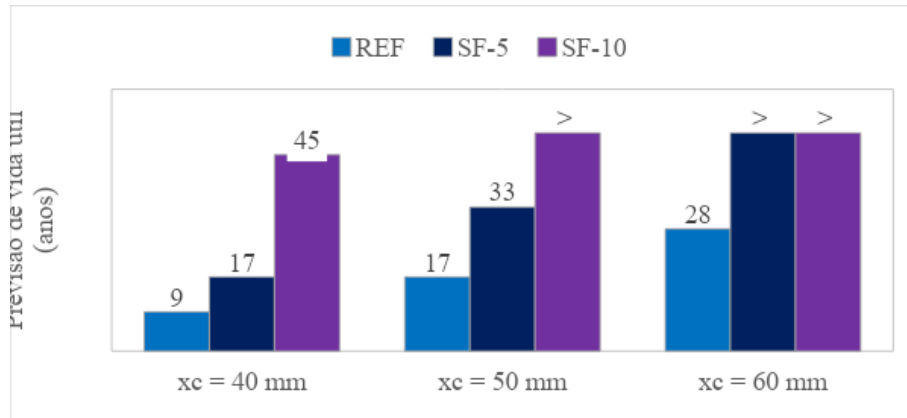


Figura 4.8 – Previsão de vida útil ($C_s = 5,5\%$; $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$).

Conforme esperado, todas as misturas avaliadas apresentaram um acréscimo na previsão de vida útil com o aumento da espessura da camada de cobertura. Os concretos produzidos com adição de sílica ativa apresentaram desempenhos superiores ao concreto de referência. Para as condições impostas, apenas a mistura com adição de 10% sílica (SF-10) superou a expectativa de vida útil de 50 anos, com espessura da camada de cobertura de 50 mm. Observa-se também que nenhuma das misturas superou a expectativa de vida útil de 50 anos para a espessura de 40 mm.

4.3 Efeito da agressividade ambiental

Para analisar o efeito da agressividade ambiental foram analisadas as três misturas – REF, SF-5 e SF-10 com espessuras de cobertura de 40 mm, em temperatura de $20\text{ }^\circ\text{C}$ e concentração superficial de cloretos de 1,5%, 3,5% e 5,5%. A Figura 4.9 apresenta os resultados obtidos para a concentração de 1,5% de cloretos na superfície do concreto.

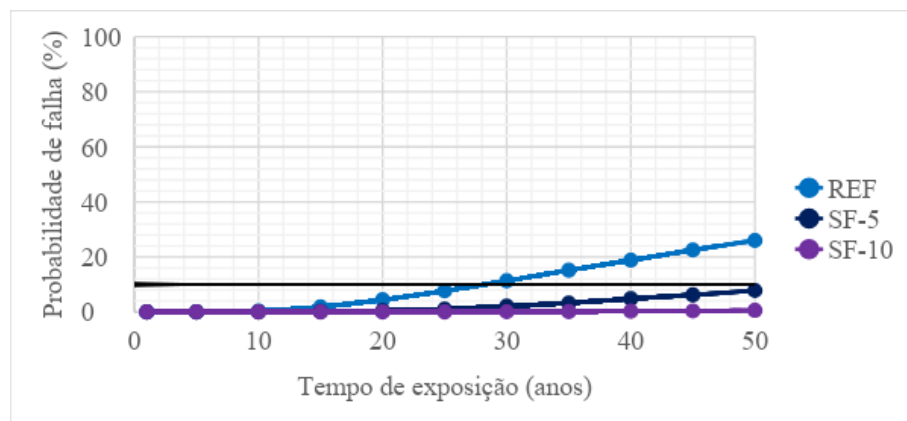


Figura 4.9 – Efeito da agressividade ambiental na probabilidade de falha ($C_s = 1,5\%$).

Para uma probabilidade de falha limite de 10%, o concreto de referência (REF) apresenta uma estimativa de vida útil de aproximadamente 28 anos, os concretos com adição de sílica (SF-5 e SF-10) apresentam uma estimativa de vida útil superior à expectativa de 50 anos. A Figura 4.10 apresenta os resultados obtidos para a concentração de 3,5% de cloretos na superfície do concreto.

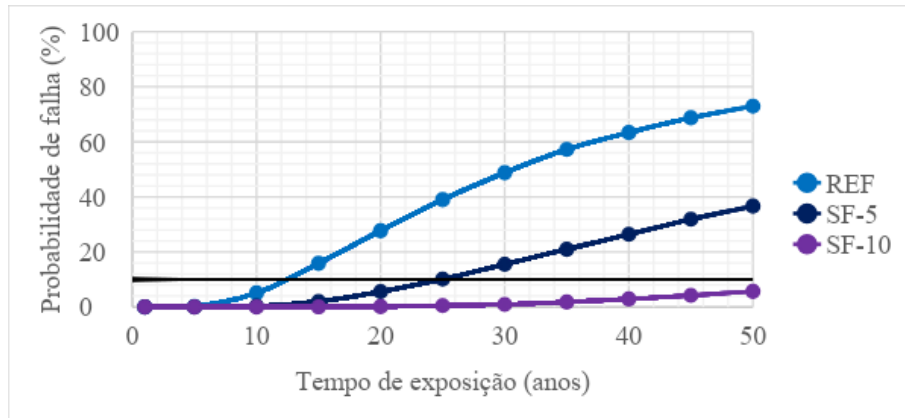


Figura 4.10 – Efeito da agressividade ambiental na probabilidade de falha ($C_s = 3,5\%$).

Para uma probabilidade de falha limite de 10%, o concreto de referência (REF) apresenta uma estimativa de vida útil de aproximadamente 12 anos, o concreto com adição de 5% de sílica (SF-5) de 25 anos e o concreto com adição de 10% de sílica (SF-10) apresenta uma estimativa de vida útil superior a expectativa de 50 anos. A Figura 4.11 apresenta os resultados obtidos para a concentração de 5,5% de cloretos na superfície do concreto.

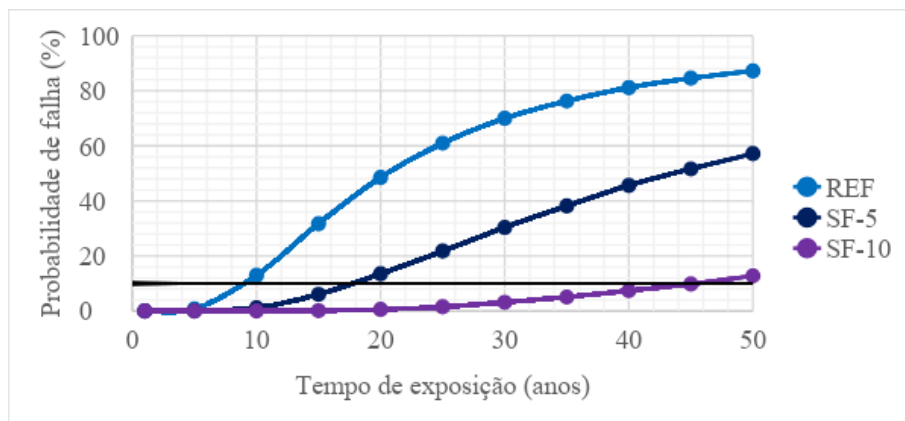


Figura 4.11 – Efeito da agressividade ambiental na probabilidade de falha ($C_s = 5,5\%$).

Para uma probabilidade de falha limite de 10%, o concreto de referência (REF) apresenta uma estimativa de vida útil de aproximadamente 9 anos, o concreto com adição de 5% de sílica (SF-5) de 18 anos e o concreto com adição de 10% de sílica (SF-10) 45 anos. A Figura 4.12 apresenta o resumo dos resultados obtidos.

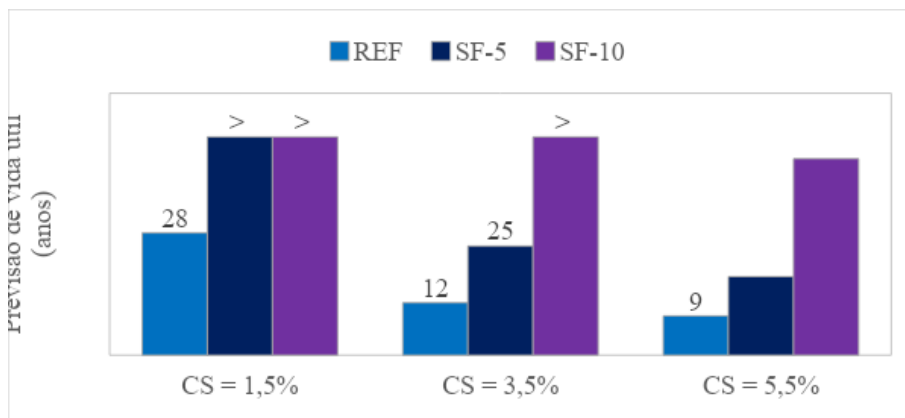


Figura 4.12 – Previsão de vida útil ($T = 20\text{ }^\circ\text{C}$; $x_c = 40\text{ mm}$).

Conforme esperado, todas as misturas avaliadas apresentaram uma redução na previsão de vida útil com o aumento da agressividade ambiental. Os concretos produzidos com adição de sílica ativa apresentaram desempenhos superiores ao concreto de referência.

5. Conclusões

Este artigo apresentou discussões acerca da durabilidade do concreto exposto ao ambiente marinho. Foram apresentados os indicadores de durabilidade do concreto e os níveis de abordagem de projeto. Uma definição da probabilidade de falha para o cenário de estruturas de concreto armado em ambiente marinho foi apresentada. A metodologia Duracon foi apresentada e aplicada em exemplos práticos. Foram analisadas as influências da temperatura, espessura da camada de cobrimento e da agressividade ambiental na estimativa de vida útil de amostras de concreto com diferentes teores de adição de sílica ativa. Conforme esperado, os resultados indicam que a adição de sílica ativa é útil para garantir maior durabilidade do concreto exposto ao ambiente marinho.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6118: *Projeto de estruturas de concreto*. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16697: *Cimento Portland - Requisitos*. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

WALLY, G. B. *Vida útil de concretos produzidos com utilização de sílica ativa e metacaulim frente ao ataque por cloretos: indicadores de durabilidade e análise probabilística*. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2019.

PINTO, S. A.; MACHADO, S. L.; RIBEIRO, D. V. *Correlation between diffusion coefficient values of chloride ions obtained through column and ion migration tests in cementitious matrices with varying contents of silica fume and mortar*. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 15, n. 3, e15307, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952022000300007>. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952022000300007>.

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*. Revista IBRACON De Estruturas E Materiais, v. 14, n. 4, e14407, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952021000400007>. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952021000400007>.

NORDTEST. *NT Build 492: Concrete, Mortar and Cement-based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Non-steady-state Migration Experiments*. NORDTEST, Espoo, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5739: *Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9779: *Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade*. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9778: *Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

NORDTEST. *NT Build 443: Concrete, Hardened: Accelerated Chloride Penetration*. NORDTEST, Espoo, 1995.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM C 1556: Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion*. ASTM, 2022.

SPANISH STANDARD. *UNE 83987: Concrete durability. Test methods. Measurement of chloride diffusion coefficient in hardened concrete. Multiregime method.* UNE, 2014.

NORDTEST. NT Build 355: Concrete, Repairing Materials and Protective Coating: Diffusion Cell Method, Chloride Permeability. NORDTEST, Espoo, 1989.

CASCUDO, O. *Vida útil das estruturas de concreto e abordagem baseada no desempenho.* Notas de aula da disciplina Durabilidade das Estruturas de Concreto, no âmbito do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, da Universidade Federal de Goiás. PPG-GECON/UFG, Goiânia, 30 p., 2017.

RIBEIRO, D. V. et al. *Corrosão e degradação em estruturas de concreto: teoria, controle e técnicas de análise e intervenção.* 2nd ed. Rio de Janeiro: GEN, 2020.

ZHANG, T.; GJØRV, O. E. *Diffusion behavior of chloride ions in concrete.* Cement and Concrete Research, v. 26, ed. 6, p. 907-917, 1996. DOI: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(96\)00069-5](https://doi.org/10.1016/0008-8846(96)00069-5). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0008884696000695>.

GJØRV, O. E. *Durability Design of Concrete Structures in Severe Environments.* 2nd ed. Florida: CRC Press, 2014.

DURACRETE. *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. 2000.

REAL, M. V.; WALLY, G. B.; MAGALHÃES, F. C. *A Python program for probabilistic service life assessment of reinforced concrete structures under chloride penetration.* Anais do 64º Congresso Brasileiro do Concreto. Rio Grande, 2023.

PIANC. *Duraconme – Quick Userguide.* 8 p. Belgium: 2010. Disponível em: <https://pianc.no/duracon/>.