De 24/06/2026 a 27/06/2026
São Paulo
https://doi.org/10.67775/02paem69

Congresso Brasileiro de Patologia das Construções

DURABILIDADE DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO EXPOSTAS A AMBIENTES MARINHOS: REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Daniel Perin Lichy[1], Maria Emília da Silva Oliveira Araújo[2*]

[1] Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Presbiteriana Mackenzie, Campinas, Brasil
[2*] Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Presbiteriana Mackenzie, Campinas, Brasil, emiliajr@gmail.com

RESUMO

A longevidade e o desempenho de estruturas de concreto armado em ambientes marinhos são severamente desafiados pela intensa agressividade desses ecossistemas, sujeitas à ação contínua de fatores como a salinidade da água do mar, ciclos de molhagem e secagem, variações de temperatura, a presença de agentes químicos e biológicos, que criam um cenário propício para a degradação acelerada do concreto. A interação complexa entre o material e o ambiente leva a uma série de patologias que comprometem a segurança, a funcionalidade e a vida útil esperada das edificações e infraestruturas litorâneas. A motivação para este estudo reside na crescente preocupação com a deterioração dessas estruturas em regiões litorâneas, causada pela ação de agentes agressivos como os íons cloreto, que aceleram a corrosão das armaduras metálicas, gerando altos custos de manutenção e recuperação. A metodologia adotada foi de abordagem qualitativa e caráter exploratório e descritivo, com uma pesquisa bibliográfica que foi realizada nas bases de dados *Compendex* e *Scielo*. A revisão da literatura favorece a identificação de lacunas em pesquisas anteriores, contribuindo para a evolução do conhecimento técnico e científico da área, além de fornecer subsídios para decisões de projeto, manutenção e reabilitação de estruturas em zonas costeiras, promovendo maior segurança, economia e sustentabilidade na construção civil.
Palavras-chave: durabilidade; concreto Armado; ambientes marinhos.

ABSTRACT

The longevity and performance of reinforced concrete structures in marine environments are severely challenged by the intense aggressiveness of these ecosystems, subject to the continuous action of factors such as seawater salinity, wetting and drying cycles, temperature variations, and the presence of chemical and biological agents, creating a scenario conducive to accelerated concrete degradation. The complex interaction between the material and the environment leads to a series of pathologies that compromise the safety, functionality, and expected lifespan of coastal buildings and infrastructure. The motivation for this study lies in the growing concern about the deterioration of these structures in coastal regions, caused by the action of aggressive agents such as chloride ions, which accelerate the corrosion of metal reinforcement, generating high

maintenance and recovery costs. The methodology adopted was a qualitative approach of an exploratory and descriptive nature, with a bibliographic search conducted in the Compendex and Scielo databases. Literature reviews help identify gaps in previous research, contributing to the advancement of technical and scientific knowledge in the field, as well as providing support for decisions regarding the design, maintenance, and rehabilitation of structures in coastal areas, promoting greater safety, economy, and sustainability in civil construction.
Keywords: durability, reinforced concrete, marine environments.

1. INTRODUÇÃO

O concreto armado é amplamente empregado na construção civil devido à sua resistência e versatilidade. No entanto, quando exposto a ambientes marinhos, sua durabilidade pode ser severamente comprometida pela presença de agentes agressivos, como os íons cloreto, que penetram no concreto e aceleram o processo de corrosão das armaduras metálicas. Esse fenômeno representa uma das principais causas de degradação em estruturas situadas em regiões litorâneas (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A deterioração dessas estruturas gera impactos significativos, especialmente no que diz respeito aos altos custos com manutenção e recuperação ao longo da vida útil das edificações. Por esse motivo, cresce o interesse técnico e científico em compreender os mecanismos de deterioração e em desenvolver estratégias para prolongar a durabilidade das estruturas submetidas à ação do ambiente marinho. (TUUTTI, 1982).

Do ponto de vista financeiro, os custos associados à reparação de estruturas degradadas são significativos. Estudos indicam que a substituição do aço sem revestimento por aço galvanizado em estruturas de concreto armado pode aumentar o custo inicial da obra em até 2,8%. No entanto, essa medida resulta em uma redução significativa nos custos de manutenção ao longo da vida útil da estrutura, representando uma estratégia viável para prolongar a durabilidade e diminuir gastos com recuperação ao longo do tempo. (ABDALA *et al.*, 2014).

No campo acadêmico e científico, a realização de uma revisão sistemática da literatura permite identificar os principais mecanismos de degradação, como a penetração de cloretos e a carbonatação, além de compilar os métodos de prevenção e controle mais frequentemente aplicados. O estudo de Lopes *et al.* (2022), destacou a importância de modelos preditivos de durabilidade para estruturas expostas a ambientes agressivos, com foco na fase de iniciação da corrosão e nos parâmetros que influenciam a vida útil das construções.

Nesse contexto, o presente trabalho conduz uma revisão sistemática da literatura sobre a durabilidade de estruturas de concreto armado em ambientes marinhos. Através da análise de estudos científicos, busca-se identificar os principais fatores de degradação, as estratégias de mitigação utilizadas e as lacunas de conhecimento existentes, contribuindo para o avanço técnico da engenharia civil.

2. METODOLOGIA

Para a realização do levantamento bibliográfico foi conduzida uma ampla pesquisa bibliográfica, contemplando artigos disponibilizados em periódicos nacionais e internacionais. As coletas dos dados foram realizadas pesquisas nas bases de dados Compendex e Scielo. As palavras chaves selecionadas foram " durabilidade “, “concreto armado " e “ambiente marinho ", que foram

combinadas das mais variadas maneiras possíveis dentro das bases de dados, o intervalo de tempo utilizado para as pesquisas foi dos últimos 5 anos, onde no total foram encontrados 348 documentos.

Após a leitura dos títulos e resumos dos arquivos encontrados, buscando-se identificar os estudos que englobassem os fenômenos que afetam a durabilidade das estruturas de concreto armado presentes em ambientes marinhos, como houve muitos resultados encontrados, decidiu-se a escolha de 6 (seis) artigos, que foram analisados como os mais condizentes com os parâmetros explicados anteriormente.

Os critérios de escolha levaram em consideração os artigos que enfatizaram os fenômenos que afetam a durabilidade das estruturas de concreto armado presentes em ambientes marinhos, contemplando as palavras-chaves definidas para a pesquisa, além do recorte do tempo sendo considerados os últimos 5 anos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O desenvolvimento do trabalho foi fundamentado em publicações que englobam os fenômenos que afetam a durabilidade das estruturas de concreto armado presentes em ambientes marinhos, as publicações. O levantamento bibliográfico foi realizado a partir de publicações disponíveis nas plataformas Compendex, e Scielo, com período de publicação de 2020 a 2025. Os artigos selecionados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Artigos selecionados

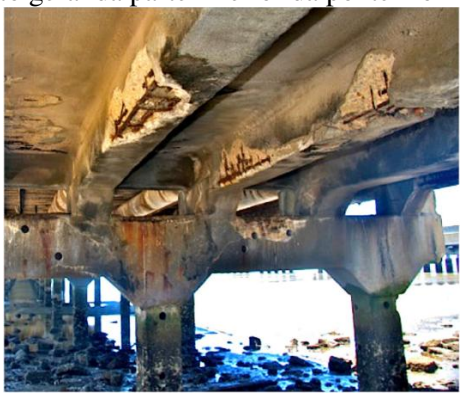
Artigo	Título	Autores	Ano	Periódico
A1	Durability of reinforced concrete bridges in marine environments	Melchers, Chaves	2020	Compendex
A2	Characteristics of pitting corrosion in an existing reinforced concrete beam exposed to marine environment	Zhao *et al.*	2020	Compendex
A3	Field test of a reinforced concrete bridge under marine environmental corrosion	Zhou *et al.*	2020	Compendex
A4	Comparative Study on the Durability of Pile, Beam and Slab Reinforced Concrete Structure in Marine Environment	Zhang *et al.*	2021	Compendex
A5	Modelos de estimativa do grau de saturação do concreto a partir das variáveis ambientais aplicados à análise de confiabilidade de estruturas de concreto armado atacadas por íons cloreto	Favretto *et al.*	2021	Scielo
	A fully coupled depth-dependent corrosion model for reinforced			

A6	concrete piles under marine environmental conditions	Annamalaisamy Sannasiraj *et al.*	2025	Compendex

Fonte: os autores.

O artigo A1 aprofundou-se na compreensão dos mecanismos de corrosão do reforço, baseando-se em observações detalhadas em 2 pontes localizadas na Austrália. Melchers e Chaves (2020) contestam o modelo convencional de corrosão, enfatizando a importância da perda de alcalinidade do concreto como o principal fator para a corrosão ativa a longo prazo, com implicações significativas para a previsão da vida útil e inspeções. Foram detalhadas experiências de campo, como o estudo da ponte Hornibrook Highway, onde as estacas de concreto de alta qualidade (Classe A) mostraram pouca corrosão após décadas, enquanto os travessões (Classe B, com menor teor de cimento) apresentavam degradação significativa. Um achado crucial foi a corrosão severa e localizada em uma estaca com fissura transversal, onde houve perda total do aço sem sinais visíveis de corrsão, devido ao lixiviamento de cloretos ferrosos solúveis (Figura 1).

Figura 1 - Aspecto geral da parte inferior da ponte Hornibrook Highway

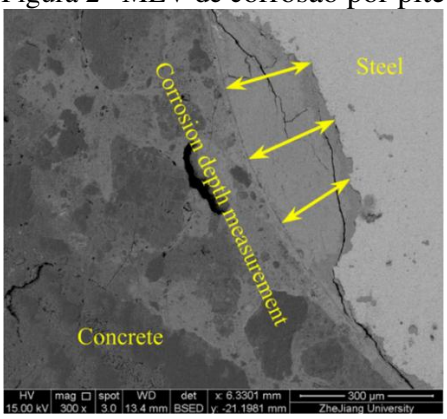


Fonte: Melchers; Chaves (2020)

Casos análogos na ponte Sorell Causeway e em barcaças de munição reforçaram a insuficiência da inspeção visual para detectar corrosão interna grave. A pesquisa conclui que a corrosão das armaduras está mais relacionada à perda de alcalinidade do concreto (redução do pH) do que diretamente à presença de cloretos. Concretos de alta qualidade mantêm pH elevado por décadas, retardando a corrosão. Fissuras são um fator crítico, pois permitem redução localizada do pH e corrosão acelerada. Em alguns casos, ocorre corrosão severa sem sinais visuais evidentes, devido à formação de compostos solúveis. Os autores propuseram investigar mais a fundo os potenciais benefícios da utilização de calcário ou dolomitas não reativas como agregados para concreto.

A pesquisa A2, Zhao *et. al.* (2020), analisaram detalhadamente as características e a morfologia de dois tipos distintos de corrosão por pites – o pite largo-raso e o pite estreito-profundo – encontrados em uma viga de concreto armado que esteve exposta a um ambiente marinho por quarenta anos. Este estudo é particularmente relevante por sua abordagem empírica sobre a morfologia, a distribuição e o desenvolvimento da corrosão localizada em estruturas reais e em serviço. Foi realizado uma investigação minuciosamente dos espécimes da viga, proveniente de uma edificação de 1970 na costa chinesa, onde foi identificada a correlação entre a distribuição dos pites de corrosão e a presença de defeitos no concreto, como fissuras na interface agregado-pasta. O programa experimental envolveu uma cuidadosa preparação de amostras, com aplicação de resina epóxi para preservar o estado original e subsequente corte em fatias para observação via microscopia eletrônica de varredura (MEV) (Figura 2).

Figura 2 –MEV de corrosão por pite

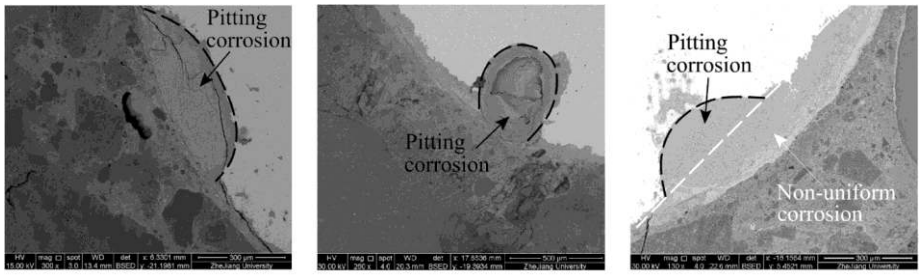


Fonte: Zhao *et. al.* (2020)

Os resultados experimentais são notáveis por identificarem e classificarem dois tipos distintos de pites de corrosão: o pite largo-raso e o pite estreito-profundo. Os autores propuseram e validaram um modelo elíptico para descrever a forma desses pites no sistema de coordenadas polares, apresentando um bom ajuste aos dados experimentais (R^2 médio de 0,832). Além disso, observou-se que o pite largo-raso se desenvolve mais em largura, enquanto o estreito-profundo se aprofunda mais significativamente com o avanço da corrosão (Figura 3).

Em conclusão foi demonstrado que os pites de corrosão são frequentemente iniciados próximos a falhas estruturais ou defeitos no concreto, e que a morfologia desses pites, possui implicações diretas nas taxas de desenvolvimento e no fator de pite. Com o desenvolvimento da corrosão do aço, o crescimento da largura no topo da cavidade é mais rápido do que a profundidade da cavidade larga e rasa, enquanto a tendência de evolução para a cavidade estreita e profunda é inversa.

Figura 3 - Características da corrosão de pites: (a) pite largo-raso, (b) pite estreito-profundo e (c) corrosão por pite de formato largo-raso e corrosão não uniforme.



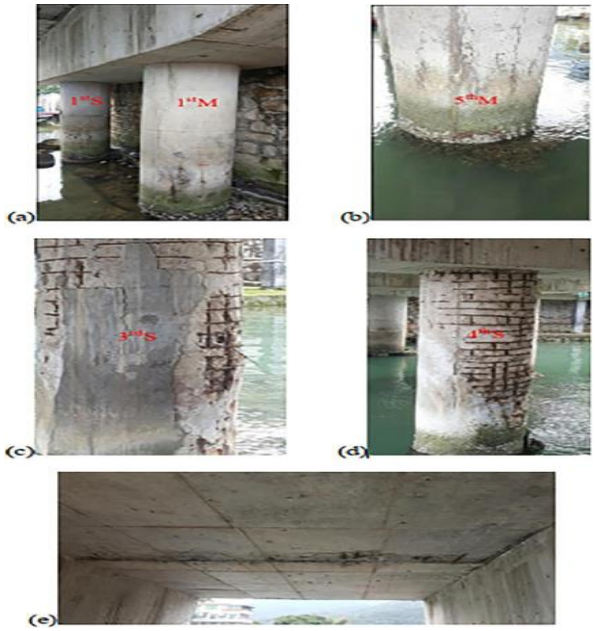
Fonte: Zhao *et. al.* (2020)

Na pesquisa realizada no artigo A3, foi realizado um estudo de caso aprofundado sobre a falha de uma ponte de concreto armado localizada na província de Guangdong na China, que operou por mais de 20 anos em ambiente marinho agressivo. Este estudo oferece dados empíricos cruciais sobre a durabilidade e o desempenho de estruturas em condições extremas, sendo de grande relevância para a compreensão da degradação de elementos estruturais. Zhou et. al. (2020) detalharam o perfil e os danos por corrosão da ponte numa amostra de 29 barras de aço corroídas e 13 estribos corroídos, coletados da ponte, também são investigados quanto à perda de massa por corrosão e ensaios mecânicos em laboratório (Figura 4).

A forte corrosão nas armaduras, com perda de seção e até ruptura de estribos, as propriedades mecânicas do aço degradam com o aumento da corrosão, a resistência do concreto permaneceu relativamente estável e, por fim, a ponte foi classificada como inadequada (BCI ≈ 62,9) e demolida.

A investigação, realizada em 2011 e 2014, revelou corrosão severa nos pilares, com mais de 85% do cobrimento de concreto fissurado ou destacando-se. Apesar da degradação visual, a resistência à compressão do concreto permaneceu relativamente estável ao longo do tempo (aproximadamente 55 MPa na laje e 39 MPa no pilar), enquanto a profundidade de carbonatação aumentou ligeiramente entre 2011 e 2014. Medições de potencial de corrosão indicaram probabilidade de atividade corrosiva em algumas áreas (Figura 4).

Figura 4 - Componentes da ponte: (a) 1º pilar; (b) 5º pilar; (c) 3º pilar; (d) 4º pilar; (e) Laje da ponte.



Fonte: Zhou *et. al.* (2020)

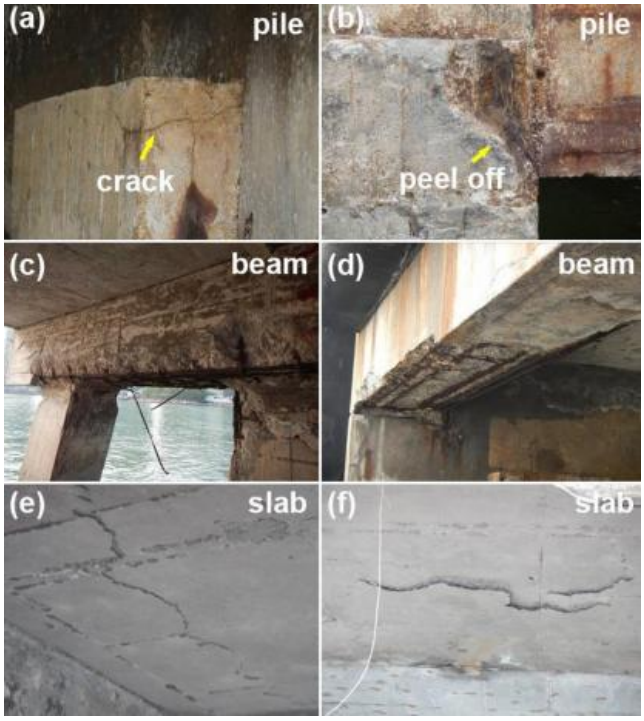
As implicações dessas descobertas permitem analisar a relação direta entre a exposição ambiental, a penetração de cloretos e a degradação das propriedades mecânicas das armaduras. A constatação da perda significativa de ductilidade é crucial para a discussão sobre a segurança estrutural e o risco de falhas frágeis em estruturas corroídas. Adicionalmente, a análise da ponte, construída antes de códigos de durabilidade mais rigorosos, sublinha a importância de considerar questões de durabilidade em projetos de engenharia civil e a necessidade de atualização de normas.

No artigo A4, os autores investigaram uma estrutura de cais real, em serviço há 20 anos, para entender os padrões de degradação devido à corrosão atmosférica, penetração de cloretos e fadiga de carga. A pesquisa trouxe uma visão prática da deterioração de componentes estruturais específicos em condições reais, permitindo comparações com dados de laboratório ou modelos teóricos (Figura 5).

Adicionalmente, foi medida a espessura do cobrimento do concreto, o potencial de corrosão da armadura por método de semicélula, o teor de cloretos no concreto em diferentes profundidades, e

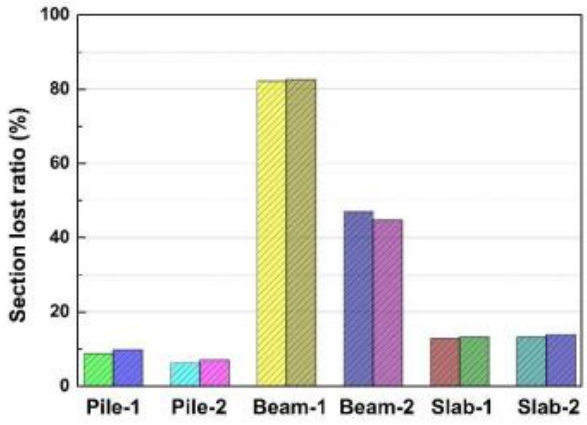
a perda de seção do vergalhão por análise microscópica. Os resultados revelaram graus distintos de deterioração: lajes estavam em sua maioria intactas, enquanto pilares mostraram 52,38% de degradação. As vigas apresentaram a pior performance, com 100% de degradação superficial, falha no cobrimento e armadura exposta. A penetração de cloretos foi mais acentuada nas vigas, excedendo a concentração crítica. A corrosão do vergalhão foi evidente em todos os elementos, sendo mais crítica em pilares e, especialmente, nas vigas, onde a perda de seção do aço ultrapassou 80%, indicando grave comprometimento mecânico.

Figura 5 - Morfologias superficiais de esruturas em ambiente marinho durante 20 anos.



Fonte: Zhang *et. al.* (2021)

Figura 6 - A relação comparativa de perda de seção transversal do aço em estruturas de estacas, vigas e lajes.



Fonte: Zhang *et. al.* (2021)

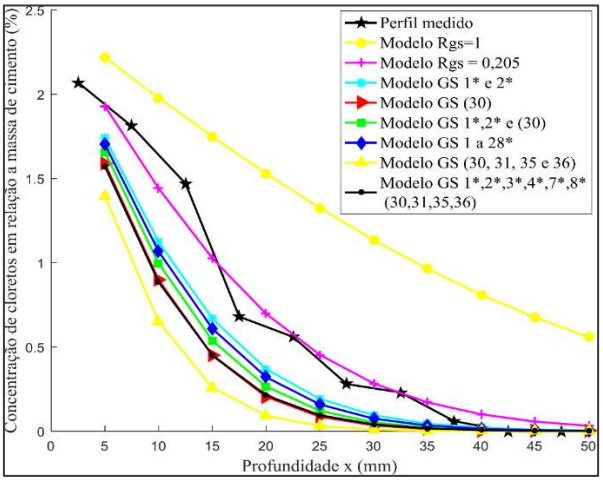
Zhang et. al. (2021), concluíram que a estrutura de concreto do cais, após 20 anos em ambiente marinho, sofreu corrosão severa. Eles destacaram que a estrutura da viga exibiu o pior desempenho em todas as frentes avaliadas: aparência superficial, cobrimento do concreto, penetração de cloretos e corrosão do aço, em comparação com os pilares e as lajes. A principal implicação desta conclusão é a necessidade crítica de um projeto de proteção adicional contra corrosão, especificamente para as vigas, a fim de garantir a consistência da vida útil de todo o cais.

O artigo A5 abordou a complexidade da durabilidade de estruturas de concreto armado em ambientes marinhos. Os autores se dedicam a investigar a corrosão de armaduras induzida por íons cloreto, destacando a influência crucial do grau de saturação (GS) do concreto no coeficiente de difusão de cloretos (Figura 7). Dada a dificuldade e o custo de medir o GS in situ, o estudo propõe o desenvolvimento de modelos de estimativa do GS baseados em variáveis ambientais, aplicando-os à análise probabilística da vida útil dessas estruturas.

O processo de difusão de íons cloreto, regido pela 2ª Lei de Fick, é fortemente influenciado pelo grau de saturação (GS) do concreto. Para investigar isso, a metodologia experimental incluiu a exposição de corpos de prova de concreto em Rio Grande (Brasil) e Santa Pola (Espanha), a coleta de dados meteorológicos e a aplicação de análise de correlação e regressão linear múltipla para criar modelos de estimativa do GS. A avaliação da vida útil é realizada utilizando a teoria da confiabilidade e simulações de Monte Carlo, considerando o atingimento do teor crítico de cloretos na armadura como o Estado Limite de Serviço (ELS) (Figura 8).

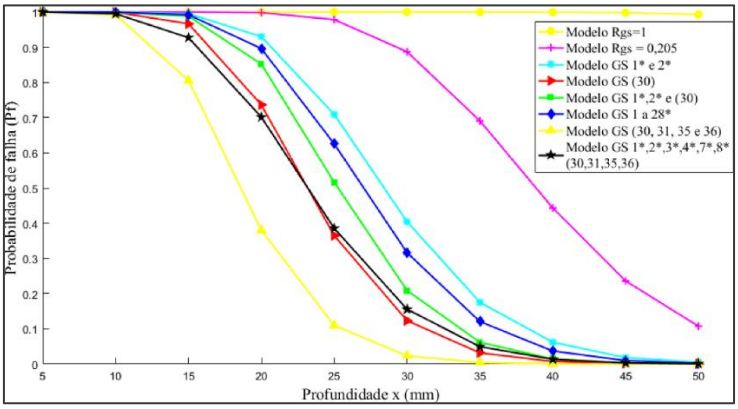
Nas conclusões, Favretto *et. al.* (2021) sintetizam que é possível obter boas estimativas do grau de saturação a partir de variáveis meteorológicas, sendo os modelos de regressão linear múltipla com médias sazonais os mais eficazes. Eles destacam a natureza local do comportamento do GS, que variam tanto entre macroambientes distintos quanto dentro de um mesmo microambiente, influenciado por fatores como a distância da costa. A pesquisa reforça a relevância do uso do GS na avaliação da vida útil de estruturas de concreto armado expostas a cloretos, alertando que a suposição de concreto saturado pode levar a probabilidades de falha irrealisticamente elevadas.

Figura 7 - Perfis de penetração de cloretos obtidos da simulação de cada modelo proposto e perfil medido por GUIMARÃES.



Fonte: Favretto *et. al.* (2021)

Figura 8 - Probabilidade de falha dos modelos utilizados na simulação para diferentes cobrimentos.



Fonte: Favretto *et. al.* (2021)

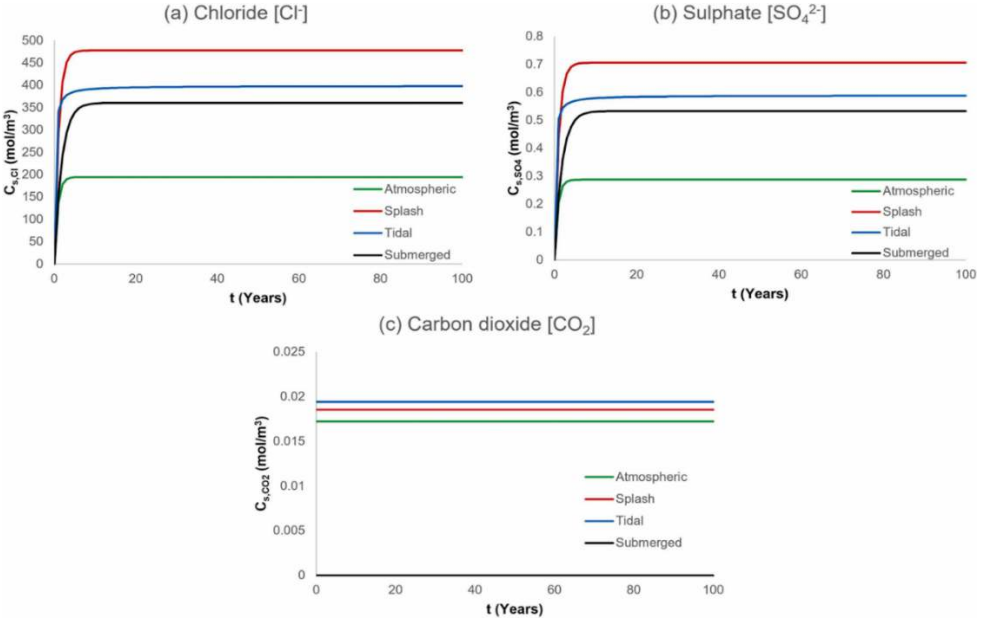
O artigo A6, que aborda a necessidade crítica de modelagem abrangente para mitigar riscos e aumentar a segurança estrutural de estacas de concreto armado em condições marinhas. O estudo desenvolve um modelo de corrosão reativa multi-íons totalmente acoplado e dependente da profundidade (MiRC), fundamentado na teoria poroelástica, para capturar as interações de íons cloreto, sulfato e carbonatação nas distintas zonas de exposição marinha: atmosférica, respingos, maré e submersa.

Annamalaisamy Sannasiraj *et. al.* (2025) apresentam seu detalhado modelo de corrosão reativa multi-íon (MiRC), que prevê a Vida Útil Residual simulando a degradação acoplada do concreto e do reforço. Este modelo descreve os mecanismos de corrosão do concreto e detalha as leis de ação de massa para cloreto, sulfato e carbonatação, incorporando equações governantes para conservação de massa, variação de porosidade dependente do tempo e difusão reativa com interação iônica competitiva. A despassivação do reforço de aço, devido a cloretos e carbonatação, é explicada, e a RSL é estimada com base em um critério de perda de 10% da área transversal do reforço (Figura 9). O estudo modela uma estaca circular de concreto armado, especificando propriedades de material e definindo condições de contorno dependentes do tempo para as concentrações superficiais de cloreto, sulfato e dióxido de carbono nas quatro zonas marinhas.

Os resultados do estudo validam o modelo MiRC com dados experimentais de campo, confirmando a zona de respingos como a mais vulnerável, enquanto a zona atmosférica demonstrou ser a menos suscetível à deterioração. Análises paramétricas revelaram que o aumento do diâmetro da barra de reforço melhora significativamente a vida útil (um aumento de 4 mm pode estendê-la em 15-20%), e a redução da porosidade do concreto, por exemplo, através do uso de concreto de alto desempenho (HPC), pode prolongar a vida útil em até 80%.

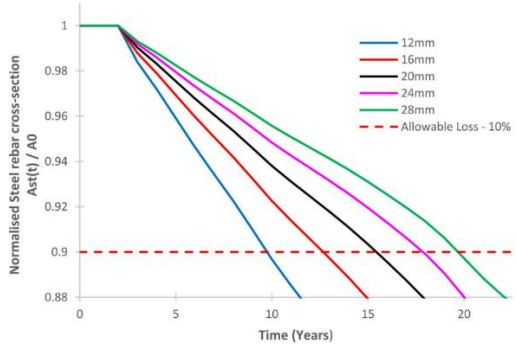
O aumento da espessura do cobrimento também contribui, de forma mais moderada (8-10% a cada 10 mm adicionais). Uma análise de sensibilidade indicou que a porosidade do concreto é o fator mais influente, seguido pelo tamanho da barra de reforço e pela profundidade do cobrimento. A discussão ressalta a inovação do modelo MiRC em integrar os efeitos de múltiplos íons e as concentrações superficiais variáveis no tempo, destacando a necessidade de estratégias de durabilidade integradas (Figura 10).

Figura 9 - Concentração aparente na superfície (Cs) em diferentes zonas marinhas: Cloreto (a), Sulfato (b), Dióxido de carbono (c).



Fonte: Annamalaisamy Sannasiraj *et. al.* (2025)

Figura 10 - Influência das dimensões das barras de reforço na perda por corrosão da armadura.



Fonte: Annamalaisamy Sannasiraj *et. al.* (2025)

As conclusões dos autores reforçam a criticidade da zona de respingos e a eficácia de uma abordagem combinada: concreto de porosidade reduzida, barras de reforço otimizadas e aumento da espessura do cobrimento podem substancialmente aumentar a durabilidade e longevidade das estruturas de concreto armado. Este estudo fornece uma estrutura robusta para a compreensão da degradação multifatorial e dependente da profundidade.

4. CONCLUSÕES

Os principais achados da pesquisa propõem uma nova interpretação do mecanismo de corrosão, centrada na alcalinidade do concreto. Além da demonstração que cloretos têm papel indireto, contrariando modelos tradicionais. Há evidencia da baixa confiabilidade de inspeções visuais para diagnóstico de corrosão.

A pesquisa destaca a importância da qualidade do concreto (baixa porosidade e alto teor de cimento) para durabilidade, apontando implicações práticas para avaliação da vida útil de pontes, demonstra que defeitos no concreto controlam a localização da corrosão e contribuição para modelagem da perda de resistência e previsão de falhas frágeis e avaliação de segurança e decisão de demolição/reabilitação.

Os artigos demonstraram que os modelos práticos para estimativa do grau de saturação do concreto, com a integração de variáveis ambientais à análise de durabilidade e vida útil. Demonstra a importância do GS na difusão de cloretos, frequentemente negligenciada, introduzindo uma abordagem probabilística (confiabilidade estrutural) na análise da durabilidade de concretos. E permite reduzir custos e tempo, substituindo medições diretas por modelos preditivos.

REFERÊNCIAS

ABDALA, L.; ALBAGLI, D.; OLIVAN, L. I.; SCANDIUZZI, L. Estudo comparativo de custos para estruturas de concreto armado usando vergalhão comum ou de aço galvanizado. In: INTERCORR, 2012, Fortaleza. **Anais**.... Fortaleza, 2012.

ANNAMALAISAMY SANNASIRAJ, D. R.; SHUANGMIN, S.; LIU, X.; GRYLLIAS, K.; C D, VANDEPITTE, D.; CHRONOPOULOS, D.; ZHANG, L. A fully coupled depth-dependent corrosion model for reinforced concrete piles under marine environmental conditions. **Construction and Building Materials**, Volume 472, 18 April 2025, 140795.

FAVRETTO, F.; MAGALHÃES, F. C.; GUIMARÃES, A. T. C.; CLIMENT, M. A.; REAL, M. V. Modelos de estimativa do grau de saturação do concreto a partir das variáveis ambientais aplicados à análise de confiabilidade de estruturas de concreto armado atacadas por íons cloreto. Artigos • **Matéria** (Rio J.) 26 (03) • 2021.

LOPES, R. C.; OLIVEIRA, A. M.; CASCUDO, O. Modelos preditivos de vida útil de estruturas de concreto sujeitas à iniciação da corrosão de armaduras por cloretos: contribuição ao estado da arte por meio de revisão sistemática da literatura–Parte 1. **Matéria (Rio de Janeiro),** v. 27, n. 2, p. e202244821, 2022.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto. Microestrutura, propriedades e materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MELCHERS, R. E; CHAVES, I. A. Durability of reinforced concrete bridges in marine environments. **Structure and Infrastructure Engineering,** v. 16, n. 1, p. 169- 180, 2020.

TUUTTI, K. Corrosion of steel in concrete. **Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute**, 1982.

ZHANG, D.; XIONG, J.; WANG, S.; WU, Q.; SHI, H. Comparative Study on the Durability of Pile, Beam and Slab Reinforced Concrete Structure in Marine Environment. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,** v. 719, n. 2, 2021.

ZHOU, H.; CHEN, S.; DU, Y.; LIN, Z.; LIANG, X.; LIU, J.; XING, F. Field test of a reinforced concrete bridge under marine environmental corrosión. **Engineering Failure Analysis**. Volume 115, September 2020, 104669.