

CORROSÃO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO E PROTENDIDO: MECANISMOS, MODELOS E IMPLICAÇÕES PARA A CONFIABILIDADE ESTRUTURAL DE PONTES

Uma Revisão da Literatura sobre Corrosão Generalizada, Corrosão por Pites e Avaliação Probabilística de Segurança Estrutural

Ana Carolina Cavalcanti Moraes¹

<https://orcid.org/0000-0002-6334-8958>

Renato de Siqueira Motta²

<https://orcid.org/0000-0001-5700-4174>

Silvana Maria Bastos Afonso da Silva³

<https://orcid.org/0000-0002-1618-8787>

RESUMO

A corrosão da armadura é um dos principais mecanismos de deterioração de pontes de concreto armado e protendido, sendo frequentemente representada, em modelos de avaliação estrutural, por uma perda uniforme e simplificada da seção transversal do aço, o que nem sempre corresponde ao comportamento observado em ambientes contaminados por cloretos.

Esta revisão tem como objetivo sintetizar a literatura técnica sobre os mecanismos de corrosão generalizada e por pites em estruturas de concreto, seus modelos de representação e suas implicações para a avaliação da confiabilidade estrutural de pontes. Foi realizada uma revisão narrativa da literatura, de caráter descritivo, reunindo publicações técnicas e científicas sobre durabilidade de estruturas de concreto, corrosão do aço e confiabilidade estrutural.

A revisão evidencia que a corrosão por pites, associada à ação de cloretos, tem impacto estrutural desproporcionalmente mais severo do que a corrosão generalizada associada à carbonatação, que os dois mecanismos frequentemente coexistem em ambientes reais, e que abordagens de corrosão combinada, aliadas a métodos probabilísticos como a simulação de Monte Carlo, permitem estimativas mais realistas do desempenho estrutural ao longo do tempo.

Conclui-se que modelos simplificados de corrosão uniforme tendem a subestimar o risco estrutural de pontes expostas a ambientes com cloretos, reforçando a relevância de abordagens combinadas e de avaliações de confiabilidade estrutural dependentes do tempo para subsidiar a gestão da infraestrutura existente.

Palavras-chave

Corrosão; concreto armado; concreto protendido; pontes; confiabilidade estrutural.

Submetido em: 27/07/2026 – Aprovado em: 31/08/2026 – Publicado em: 31/08/2026

- 1 Doutoranda em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Pernambuco, Brasil. ana.cavalcantimoraes@ufpe.br
- 2 Docente, Doutor, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Pernambuco, Brasil. renato.motta@ufpe.br
- 3 Docente, Doutora, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Pernambuco, Brasil. silvana.bastos@ufpe.br



CORROSION IN REINFORCED AND PRESTRESSED CONCRETE STRUCTURES: MECHANISMS, MODELS, AND IMPLICATIONS FOR THE STRUCTURAL RELIABILITY OF BRIDGES

A Literature Review on General Corrosion, Pitting Corrosion, and
Probabilistic Structural Safety Assessment

ABSTRACT

Reinforcement corrosion is one of the main deterioration mechanisms affecting reinforced and prestressed concrete bridges, and is frequently represented, in structural assessment models, as a uniform and simplified loss of the steel cross-section, which does not always correspond to the behaviour observed in chloride-contaminated environments.

This review aims to synthesise the technical literature on general and pitting corrosion mechanisms in concrete structures, their representative models, and their implications for the structural reliability assessment of bridges. A descriptive narrative literature review was carried out, gathering technical and scientific publications on the durability of concrete structures, steel corrosion, and structural reliability.

The review shows that chloride-induced pitting corrosion has a disproportionately more severe structural impact than carbonation-induced general corrosion, that both mechanisms frequently coexist under real exposure conditions, and that compound corrosion approaches, combined with probabilistic methods such as Monte Carlo simulation, allow more realistic estimates of structural performance over time.

It is concluded that simplified uniform-corrosion models tend to underestimate the structural risk of bridges exposed to chloride environments, reinforcing the relevance of compound approaches and time-dependent structural reliability assessments to support the management of existing infrastructure.

Keywords

Corrosion; Reinforced concrete; Prestressed concrete; Bridges; Structural reliability.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

O concreto protendido é um sistema estrutural amplamente empregado em pontes rodoviárias, por conferir flexibilidade de projeto e funcionalidade, permitindo a redução das dimensões da seção transversal, vãos mais longos e uso otimizado de materiais, características alinhadas às demandas contemporâneas por infraestruturas de baixo carbono (HUANG et al., 2025). Apesar desses benefícios, problemas de durabilidade relacionados à corrosão continuam representando desafios significativos em aplicações de pontes, uma vez que a corrosão da armadura de protensão é influenciada por um conjunto amplo e complexo de fatores, incluindo o tipo de elemento estrutural, o método de protensão, as práticas construtivas, deficiências dos materiais e as condições ambientais presentes tanto na construção quanto na fase de serviço (LAU; PERMEH; LASA, 2023).

A corrosão de fios ou cordoalhas de protensão tornou-se uma das principais causas de deterioração de estruturas de concreto protendido em todo o mundo (BANSAL; TALAKOKULA; SARAVANAN, 2024). Em redes de transporte, as pontes desempenham papel crítico na manutenção da conectividade, e manutenções deficientes podem levar a interdições temporárias que desencadeiam efeitos negativos em cascata sobre a economia e a sociedade; o envelhecimento da infraestrutura, combinado ao desgaste decorrente do aumento do tráfego, constitui um dos principais fatores que afetam a longevidade e a segurança das pontes (PUGLIESE; DE RISI; DI SARNO, 2022). Além disso, as cargas de serviço atuais, com o crescimento do número e do peso dos veículos, são substancialmente mais pesadas do que aquelas consideradas quando muitas pontes existentes foram originalmente projetadas, e essas estruturas ainda precisam lidar com agentes ambientais agressivos capazes de acelerar sua degradação, aumentando a fragilidade de componentes-chave (NETTIS et al., 2024).

Prever com precisão a vida útil à fadiga de pontes de concreto armado é fundamental para garantir a segurança e subsidiar decisões de manutenção, particularmente em estruturas localizadas em regiões costeiras ou em áreas onde saís de degelo são aplicados. Os dois principais mecanismos que governam o início da corrosão da armadura em estruturas de concreto são a carbonatação e a penetração de cloretos: enquanto a corrosão uniforme, ou generalizada, é tipicamente induzida pela carbonatação, a corrosão induzida por cloretos, predominante em ambientes costeiros em razão da maresia e da exposição à água salgada, manifesta-se principalmente como corrosão por pites, de caráter localizado (SAAD et al., 2016; MA et al., 2013; GUO et al., 2024; MIAO et al., 2025; LIU et al., 2025).

Em comparação com a corrosão uniforme, a corrosão por pites tem impacto bem mais prejudicial sobre o desempenho estrutural de pontes de concreto armado, pois gera concentrações de tensão e reduz a espessura das barras de aço, acelerando o acúmulo de dano por fadiga e reduzindo substancialmente a vida útil da estrutura (SAAD et al., 2016; MA et al., 2013; GUO et al., 2024; MIAO et al., 2025; LIU et al., 2025).

1.2 Objetivo

Este artigo tem como objetivo apresentar uma revisão narrativa da literatura sobre os principais mecanismos de corrosão em estruturas de concreto armado e protendido, com foco em pontes, discutindo suas causas, os modelos empregados para sua representação, suas consequências para o desempenho estrutural e a importância da avaliação da confiabilidade estrutural como instrumento de apoio à gestão desses ativos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Concreto protendido em pontes e estados limites

No dimensionamento à flexão de elementos de concreto armado, costuma ser suficiente avaliar apenas o estado limite de resistência na ruptura, conhecido como estado limite último. Em contrapartida, o dimensionamento à flexão de elementos protendidos exige também a verificação do estado limite de serviço, de modo a evitar o início da fissuração e garantir que as cordoalhas de protensão permaneçam protegidas, já que sua exposição é indesejável por poder levar à corrosão e à consequente redução da resistência estrutural ao longo do tempo (NAWY, 1996). Embora o estado limite último à flexão geralmente não seja o condicionante do dimensionamento de vigas de pontes protendidas, exceto no caso de vãos muito curtos, sua verificação continua sendo obrigatória para confirmar que a capacidade estrutural é suficiente (CUADROS OLAVE, 2004; MOUTASSEM, 2022).

A segurança e a serviçabilidade contínuas de estruturas existentes de concreto armado expostas a ambientes marinhos ou salinos, assim como sua vida útil esperada, são de crescente interesse técnico. Prever a possibilidade e a extensão provável da degradação futura, e o comportamento estrutural associado, é preferível a realizar observações e extrapolações a partir de uma estrutura já danificada, e tais previsões devem, idealmente, ser ajustadas para refletir observações reais de campo (MELCHERS; LI; LAWANWISUT, 2008).

2.2 Mecanismos de corrosão do aço em concreto

A carbonatação do concreto é reconhecida como um dos principais elementos que contribuem para a despassivação da camada protetora da armadura, sendo sua incidência crescente em decorrência das elevadas emissões de gases de efeito estufa associadas à fabricação do concreto (DU et al., 2025).

Os valores de pH da matriz de concreto, naturalmente muito alcalina, podem cair quando o dióxido de carbono atmosférico penetra no concreto, dissolve-se na solução dos poros e reage com a portlandita, principal produto hidratado do cimento (PAN et al., 2018). A camada protetora ao redor das armaduras torna-se instável, podendo mesmo colapsar, quando o pH da matriz de concreto cai abaixo de aproximadamente 10,0, deixando a armadura embutida vulnerável à corrosão (ZHI et al., 2022). Durante a carbonatação, o hidróxido de cálcio do concreto reage com o dióxido de carbono, levando à quebra da camada passiva alcalina (JIANG et al., 2020).

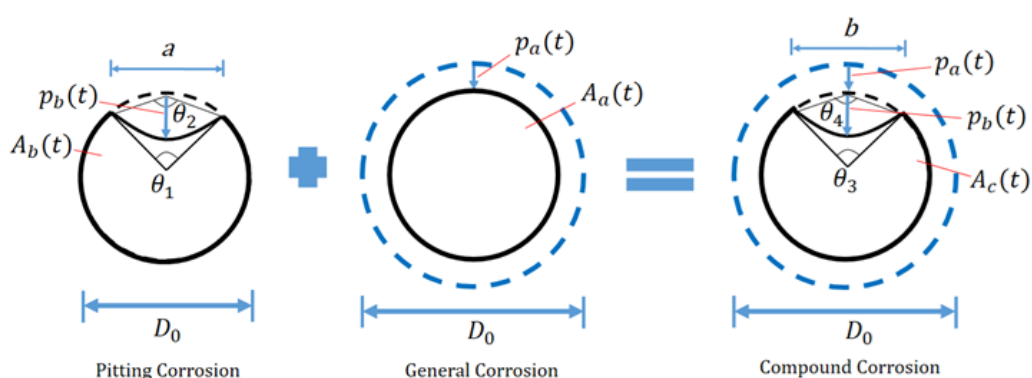
A fissuração do concreto pode ocorrer em decorrência dos novos materiais gerados pela corrosão da armadura, que podem produzir um aumento de volume de duas a seis vezes; além disso, quando a armadura corrói mais severamente, fissuras se formam e se propagam pelo concreto, removendo a camada protetora da armadura e expondo-a ao ar, o que agrava ainda mais o processo corrosivo. Como resultado, a capacidade portante e a durabilidade da estrutura de concreto são reduzidas à medida que a área resistente efetiva da armadura diminui, o que pode eventualmente causar dano ou até mesmo a falha da estrutura (VOGLER et al., 2020).

Em paralelo à corrosão por carbonatação, a corrosão do aço causada por cloretos, também conhecida como corrosão por pites, é uma das principais causas de deterioração em estruturas de concreto; cordoalhas de protensão, submetidas a tensões elevadas de forma permanente, são mais suscetíveis à corrosão do que o aço convencional, e a experiência de campo e resultados experimentais indicam que estruturas afetadas pela corrosão perdem sua serviçabilidade mais rapidamente do que sua segurança (DAI et al., 2016). Quando barras de aço são expostas à corrosão causada por cloretos, a corrosão por pites ocorre com frequência, podendo resultar em uma perda de seção altamente localizada e de grande extensão, o que é extremamente perigoso para a integridade estrutural (STEWART; AL-HARTHY, 2008). A ingestão de íons cloreto, impulsionada principalmente pela exposição marinha ou por sais de degelo, dá início a processos que comprometem a passivação de cordoalhas de aço de alta resistência, levando a fenômenos de corrosão avançada que se afastam significativamente da perda de massa uniforme (PEPENAR, 2022).

Além da corrosão por cloretos, a corrosão induzida por carbonatação também é apontada como fator relevante na deterioração de estruturas de concreto armado ao longo de sua vida útil, em diferentes condições climáticas; a interação entre o dióxido de carbono atmosférico e o hidróxido de cálcio do concreto é, em geral, responsável pela carbonatação, reduzindo a alcalinidade da solução dos poros (WANG; YUE; QIAN, 2024; LI et al., 2021; DE WEERDT et al., 2019). Quando a carbonatação se combina com a exposição a cloretos, a área de corrosão, a perda de massa e o potencial de corrosão das barras de aço apresentam diferenças distintas em relação à carbonatação ou à exposição a cloretos isoladamente, sendo a corrosão mais severa sob essas condições combinadas (MEI et al., 2022). A duração da vida útil de projeto de uma estrutura de concreto armado pode ser determinada por um estado limite e pelo grau de confiabilidade associado à sua violação; essas estruturas apresentam, em geral, duas fases de vida útil, um período de iniciação e um período de propagação, sendo a despassivação da armadura a condição limite comumente empregada no projeto de vida útil de construções de concreto armado sujeitas à carbonatação (REVERT; DANNER; GEIKER, 2024). No entanto, além da carbonatação, existem outras condições necessárias para que a corrosão ativa ocorra, havendo ainda a possibilidade de o período de propagação alternar entre corrosão ativa e passiva, a depender do teor de umidade (ANGST et al., 2020).

Uma abordagem de corrosão combinada, que integra os efeitos simultâneos da corrosão por pites e da corrosão generalizada, tal como ilustrado na Figura 1, reflete de forma mais realista a complexidade das condições de exposição encontradas em aplicações de engenharia no mundo real, nas quais carbonatação atmosférica e exposição a cloretos frequentemente coexistem ao longo da vida útil da estrutura (LI et al., 2022).

Figura 1. Representação esquemática dos mecanismos de corrosão por pites, generalizada e combinada em uma barra de aço



Fonte: adaptado de Li et al. (2022)

2.3 Corrosão por pites e interação corrosão-fadiga

Estruturas de concreto submetidas a carregamentos cíclicos de tráfego acumulam dano por fadiga por meio da nucleação e propagação de microfissuras que, com o tempo, podem coalescer em fissuras macroscópicas; a base teórica dos modelos contínuos de dano por fadiga remonta às formulações de dano por fluência de Kachanov (1967) e Rabotnov, Leckie e Prager (1970), posteriormente adaptadas para descrever a resposta mecânica de estruturas de concreto deterioradas sob demandas dinâmicas de tráfego (SU et al., 2022). A presença de pites de corrosão introduz um agravante adicional a esse processo: pites atuam como concentradores geométricos de tensão, amplificando a faixa de tensão cíclica localmente sentida pela armadura sob carregamento de tráfego, o que acelera de forma não linear a iniciação e a propagação de fissuras por fadiga (DARMAWAN; STEWART, 2007; NAAMAN, 1982).

Essa interação entre corrosão e fadiga é particularmente relevante para cordoalhas de protensão, submetidas a níveis de tensão permanentemente elevados: a combinação de perda de seção localizada com amplificação de tensão cíclica tende a deslocar o modo de falha de uma perda de massa gradual para uma redução mais abrupta da capacidade resistente residual do elemento (SU et al., 2022; DAI et al., 2016).

2.4 Consequências estruturais da corrosão

Como a armadura de reforço depende da aderência e da ancoragem para conferir resistência e ductilidade ao concreto, a corrosão do aço ou do concreto pode degradar essa conexão crítica; em razão do aumento substancial de volume causado pela ferrugem, criam-se tensões de expansão no concreto ao redor das armaduras corroídas, o que pode resultar em fissuração do cobrimento de concreto e na redução do seu confinamento (VOGLER et al., 2020). Como resultado do enfraquecimento da aderência entre as barras de aço e o concreto, o concreto armado se deteriora rapidamente, com redução significativa das propriedades mecânicas (VOGLER et al., 2020).

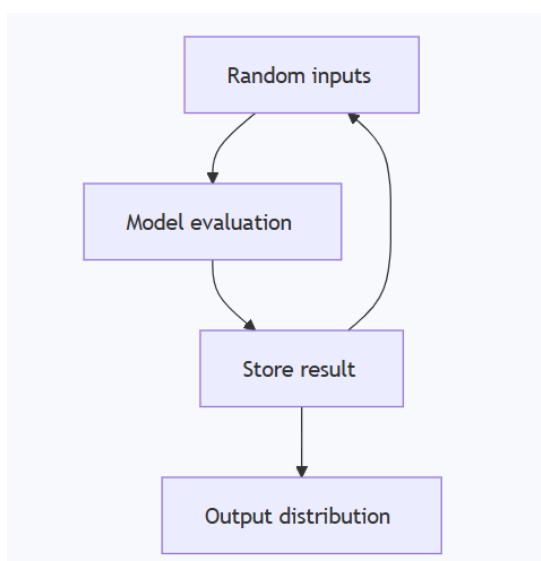
Em elementos protendidos, a perda de seção da armadura ativa também está associada à redução da força de protensão, o que pode antecipar a descompressão e a fissuração sob condições de carregamento de serviço, exigindo que as tensões de tração e compressão reais permaneçam dentro dos limites de tensão admissíveis para que os requisitos de serviço sejam atendidos (NAWY, 1996). Ainda assim, mesmo quando o estado limite último de flexão não governa o dimensionamento, sua verificação continua obrigatória para confirmar que a capacidade estrutural permanece suficiente ao longo da vida útil (CUADROS OLAVE, 2004; MOUTASSEM, 2022).

2.5 Confiabilidade estrutural e simulação de Monte Carlo

No estudo e no projeto de sistemas de engenharia, incertezas estão sempre presentes; tais incertezas são consideradas pela teoria da confiabilidade estrutural, que avalia a probabilidade de sobrevivência de uma estrutura ao longo de sua vida útil (MOUTASSEM, 2022). Diversos métodos permitem obter o índice de confiabilidade de uma estrutura, sendo a simulação de Monte Carlo um dos mais empregados, especialmente por sua taxa de convergência independe da dimensionalidade do problema e da não linearidade da função de estado limite (SONG; KAWAI, 2023). Abordagens mais recentes têm buscado aprimorar a eficiência computacional dessas análises por meio de métodos de superfície de resposta (LÜ; SUN; LOW, 2011), de estruturas hierárquicas de aprendizado (ZHOU et al., 2022) e de tratamentos específicos para situações de informação probabilística incompleta sobre os parâmetros de projeto (NI et al., 2023).

Essas análises permitem estimar, de forma mais realista, a possibilidade e a extensão provável da degradação futura de estruturas de concreto armado expostas a ambientes agressivos, sendo preferível prever esse comportamento a extrapolar informações a partir de uma estrutura já danificada, desde que os modelos preditivos sejam ajustados a partir de observações reais de campo (MELCHERS; LI; LAWANWISUT, 2008). A avaliação de confiabilidade dependente do tempo, nesse sentido, permite investigar o desempenho de serviço de pontes existentes ao longo de sua vida útil e fornecer subsídios técnicos para a elaboração de planos de manutenção (YUAN, 2019), sendo a análise de sensibilidade uma etapa complementar importante para identificar quais parâmetros mais influenciam o índice de confiabilidade obtido (RADOŃ; ZABOJSZCZA, 2025).

Figura 2. Representação esquemática do processo de simulação de Monte Carlo empregado na análise de confiabilidade estrutural



Fonte: elaborado pelos autores

3 METODOLOGIA

Trata-se de uma revisão narrativa da literatura, de caráter descritivo, elaborada a partir de publicações técnicas e científicas nacionais e internacionais sobre corrosão em estruturas de concreto armado e protendido e sobre a avaliação da confiabilidade estrutural de pontes, incluindo artigos publicados em periódicos indexados, capítulos de livro e trabalhos técnicos da área de engenharia de estruturas e durabilidade.

A seleção do material não seguiu critérios sistemáticos de revisão sistemática, priorizando-se estudos amplamente reconhecidos na literatura de corrosão do aço em concreto e de confiabilidade estrutural, de modo a compor um panorama abrangente do tema. Foram selecionados os trechos relativos aos mecanismos gerais de corrosão do aço em concreto, aos modelos empregados para representá-los, às suas consequências estruturais e aos métodos de avaliação probabilística de segurança, de modo a permitir uma síntese crítica dos principais achados relatados na literatura consultada.

4 RESULTADOS

A síntese da literatura consultada evidencia, em primeiro lugar, que os dois mecanismos de corrosão do aço mais estudados no contexto de estruturas de concreto — a corrosão generalizada, associada à carbonatação, e a corrosão por pites, associada à ação de cloretos — apresentam padrões de deterioração fundamentalmente distintos, e que essa distinção tem implicações estruturais relevantes que nem sempre são consideradas nos modelos simplificados de avaliação de durabilidade (LI et al., 2022; STEWART; AL-HARTHY, 2008).

Em segundo lugar, verifica-se um consenso relevante na literatura de que a corrosão por pites, por gerar concentrações de tensão e reduzir localmente a seção resistente da armadura, tem impacto estrutural desproporcionalmente mais severo do que a corrosão uniforme, mesmo quando a perda de massa total é comparável entre os dois mecanismos (SAAD et al., 2016; MA et al., 2013; GUO et al., 2024; MIAO et al., 2025; LIU et al., 2025). Esse achado é particularmente relevante para cordoalhas de protensão, submetidas a tensões permanentemente elevadas, nas quais a combinação entre perda de seção localizada e amplificação da tensão cíclica acelera o acúmulo de dano por fadiga (SU et al., 2022; DARMAWAN; STEWART, 2007).

Quadro 1 – Síntese comparativa dos mecanismos de corrosão do aço em concreto

Mecanismo	Agente desencadeante	Padrão de perda de seção	Referências
Corrosão generalizada	Carbonatação (redução do pH)	Perda aproximadamente uniforme ao longo da barra	Du et al. (2025); Pan et al. (2018); Zhi et al. (2022)
Corrosão por pites	Penetração de cloretos	Perda localizada e geometricamente irregular	Dai et al. (2016); Stewart e Al-Harthy (2008); Pepenar (2022)
Corrosão combinada	Carbonatação + cloretos	Superposição dos dois padrões anteriores	Wang, Yue e Qian (2024); Mei et al. (2022); Li et al. (2022)

Fonte: elaborado pelos autores, com base na literatura revisada.

Em terceiro lugar, observa-se que a literatura tem se afastado progressivamente da adoção isolada de um único mecanismo de corrosão, favorecendo abordagens combinadas que superpõem corrosão generalizada e corrosão por pites, de modo a representar de forma mais realista as condições de exposição observadas em estruturas reais, frequentemente submetidas simultaneamente à carbonatação atmosférica e à presença de cloretos (LI et al., 2022; MEI et al., 2022).

Por fim, a literatura converge para a importância de métodos probabilísticos, como a simulação de Monte Carlo, na avaliação da confiabilidade estrutural de pontes ao longo do tempo, permitindo estimar a evolução da probabilidade de falha frente à incerteza inerente às propriedades dos materiais, às cargas atuantes e aos próprios mecanismos de deterioração (MOUTASSEM, 2022; SONG; KAWAI, 2023; MELCHERS; LI; LAWANWISUT, 2008; YUAN, 2019).

5 DISCUSSÃO

Os resultados sintetizados nesta revisão indicam que a adoção de modelos simplificados de corrosão uniforme, embora computacionalmente convenientes, tende a subestimar sistematicamente o risco estrutural de pontes de concreto armado e protendido expostas a ambientes com cloretos. Essa subestimação decorre do fato de que tais modelos não conseguem representar a natureza localizada e geometricamente irregular da corrosão por pites, que produz concentrações de tensão capazes de comprometer significativamente a integridade estrutural mesmo diante de perdas de massa total relativamente modestas (STEWART; AL-HARTHY, 2008; SAAD et al., 2016).

A coexistência frequente entre carbonatação e exposição a cloretos em ambientes reais reforça a relevância prática de modelos de corrosão combinada, capazes de capturar o efeito cumulativo de ambos os mecanismos ao longo do tempo (LI et al., 2022; MEI et al., 2022; ANGST et al., 2020).

Do ponto de vista da gestão de ativos rodoviários, essa constatação sugere que estratégias de inspeção e manutenção baseadas exclusivamente em critérios de perda de massa podem não identificar adequadamente elementos estruturais em risco, especialmente cordoalhas de protensão sujeitas à interação entre corrosão localizada e fadiga sob carregamento cíclico de tráfego (SU et al., 2022; DARMAWAN; STEWART, 2007).

A incorporação de métodos probabilísticos de avaliação de confiabilidade estrutural, apoiados em simulação de Monte Carlo, surge como caminho relevante para qualificar a tomada de decisão sobre pontes existentes, ao permitir estimativas mais realistas da evolução da probabilidade de falha ao longo da vida útil da estrutura (MOUTASSEM, 2022; MELCHERS; LI; LAWANWISUT, 2008). Tais análises são particularmente úteis para orientar a priorização de intervenções de manutenção diante de recursos financeiros limitados e de uma malha de infraestrutura que envelhece progressivamente (YUAN, 2019; PUGLIESE; DE RISI; DI SARNO, 2022; NETTIS et al., 2024), ainda que sua aplicação prática dependa da disponibilidade de dados estatísticos confiáveis sobre cargas, materiais e mecanismos de deterioração, uma limitação reconhecida mesmo em estudos que tratam de informação probabilística incompleta (NI et al., 2023).

Outro aspecto que merece destaque é a interação entre corrosão e fadiga discutida na literatura, particularmente relevante para cordoalhas de protensão submetidas a carregamento cíclico de tráfego ao longo de décadas de operação (SU et al., 2022; DARMAWAN; STEWART, 2007; NAAMAN, 1982). Modelos que tratam a corrosão e a fadiga como fenômenos independentes tendem a não capturar o efeito de amplificação de tensão introduzido pelos pites de corrosão, o que pode levar a uma superestimação da vida útil remanescente de elementos protendidos. Nesse sentido, a literatura recente aponta para a necessidade de frameworks que integrem explicitamente a geometria da corrosão localizada, o carregamento cíclico e a análise probabilística de confiabilidade, de modo a produzir estimativas de vida útil mais próximas do comportamento real das estruturas em serviço (SU et al., 2022; ZHOU et al., 2022).

6 CONCLUSÃO

Esta revisão permitiu sintetizar, a partir da literatura técnica e científica consultada, os principais mecanismos de corrosão do aço em estruturas de concreto armado e protendido, evidenciando que a corrosão generalizada, associada à carbonatação, e a corrosão por pites, associada à ação de cloretos, apresentam padrões de deterioração fundamentalmente distintos e nem sempre adequadamente representados pelos modelos simplificados ainda utilizados na prática de avaliação estrutural.

Os resultados reunidos mostraram que a corrosão por pites tem impacto estrutural desproporcionalmente mais severo do que a corrosão uniforme, mesmo diante de perdas de massa comparáveis, por gerar concentrações de tensão que aceleram o acúmulo de dano por fadiga em cordoalhas de protensão submetidas a carregamento cíclico de tráfego. Evidenciou-se, também, que os dois mecanismos — carbonatação e cloretos — frequentemente coexistem em condições reais de exposição, o que justifica a adoção progressiva, na literatura, de modelos de corrosão combinada em detrimento de abordagens de mecanismo único. Por fim, verificou-se que métodos probabilísticos, como a simulação de Monte Carlo, permitem estimativas mais realistas da evolução da probabilidade de falha ao longo da vida útil da estrutura, constituindo ferramenta relevante para subsidiar decisões de manutenção.

Conclui-se, portanto, que modelos simplificados de corrosão uniforme tendem a subestimar o risco estrutural de pontes expostas a ambientes com cloretos, e que a adoção de abordagens combinadas de corrosão, associadas a avaliações de confiabilidade estrutural dependentes do tempo, constitui caminho relevante para qualificar a gestão da infraestrutura rodoviária existente, sobretudo diante de recursos financeiros limitados para manutenção e de uma malha de pontes que envelhece progressivamente. Ressalta-se, contudo, que a aplicação prática desses métodos permanece dependente da disponibilidade de dados estatísticos confiáveis sobre cargas, materiais e mecanismos de deterioração. Recomenda-se que estudos futuros aprofundem a aplicação desses métodos a estudos de caso nacionais, incorporando dados de campo de pontes brasileiras expostas a ambientes costeiros, de modo a subsidiar a gestão da malha rodoviária diante dos desafios impostos pelo envelhecimento das estruturas e pelo aumento da demanda de tráfego.

REFERÊNCIAS

- ANGST, U. et al. Corrosion of steel in carbonated concrete: mechanisms, practical experience, and research priorities – a critical review by RILEM TC 281-CCC. RILEM Technical Letters, [S.l.], v. 5, p. 85-100, 2020.
- BANSAL, T.; TALAKOKULA, V.; SARAIVANAN, T. J. Identification of structural parameters in a prestressed concrete beam under chloride-induced corrosion using embedded and smart-probe-based piezo sensors. Measurement: Sensors, [S.l.], v. 35, p. 101284, 2024.
- CUADROS OLAVE, G. Evaluation of high strength concrete prestressed bridge girder design. 2004. Tese (Doutorado) – Texas A&M University, College Station, 2004.
- DAI, L. et al. A global model for corrosion-induced cracking in prestressed concrete structures. Engineering Failure Analysis, [S.l.], v. 62, p. 263-275, 2016.
- DARMAWAN, M.; STEWART, M. G. Spatial time-dependent reliability analysis of corroding pretensioned prestressed concrete bridge girders. Structural Safety, [S.l.], v. 29, n. 1, p. 16-31, 2007.
- DE WEERDT, K. et al. Effect of carbonation on the pore solution of mortar. Cement and Concrete Research, [S.l.], v. 118, p. 38-56, 2019.
- DU, T. et al. Time-dependent model for in-situ concrete carbonation depth under combined effects of temperature and relative humidity. Case Studies in Construction Materials, [S.l.], p. e04379, 2025.
- GUO, Z. et al. Contribution of spatially variable pitting corrosion on fatigue life prediction of RC beams. In: STRUCTURES. [S.l.]: Elsevier, 2024. p. 107399.
- HUANG, Z. et al. Long-term deformation and prestress loss of PRC beam under vari-humidity environment: preliminary experiments and multi-scale simulations. Engineering Structures, [S.l.], v. 322, p. 119122, 2025.
- JIANG, L. et al. Effect of Ca^{2+} and Na^{+} on the curing performance of chloride ions in cement under carbonization. Case Studies in Construction Materials, [S.l.], v. 13, p. e00430, 2020.
- KACHANOV, L. M. The theory of creep (teoriya polzuchesti). [S.l.]: National Lending Library for Science & Technology, 1967.
- LAU, K.; PERMEH, S.; LASA, I. Corrosion of prestress and posttension reinforced concrete bridges. In: Corrosion of steel in concrete structures. [S.l.]: Woodhead Publishing, 2023. p. 81-105.

LI, J. et al. Temporal-spatial reliability analysis of RC bridges with corroded steel reinforcement bars. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, [S.l.], v. 236, n. 23, p. 11345-11357, 2022.

LIU, Y. et al. Dynamic response of concrete beams considering spatial variability of pitting corrosion damages subjected to impact loads. *Engineering Structures*, [S.l.], v. 332, p. 120026, 2025.

LÜ, Q.; SUN, H.-Y.; LOW, B. K. Reliability analysis of ground-support interaction in circular tunnels using the response surface method. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, [S.l.], v. 48, n. 8, p. 1329-1343, 2011.

MA, Y. et al. Probabilistic prediction with Bayesian updating for strength degradation of RC bridge beams. *Structural Safety*, [S.l.], v. 44, p. 102-109, 2013.

MEI, K. et al. Study on electrochemical characteristics of reinforced concrete corrosion under the action of carbonation and chloride. *Case Studies in Construction Materials*, [S.l.], v. 17, p. e01351, 2022.

MELCHERS, R. E.; LI, C.-Q.; LAWANWISUT, W. Probabilistic modeling of structural deterioration of reinforced concrete beams under saline environment corrosion. *Structural Safety*, [S.l.], v. 30, n. 5, p. 447-460, 2008.

MIAO, X. et al. Feature extraction and quantitative analysis of steel corrosion in reinforced concrete components based on XCT scanning and deep learning model. *Journal of Building Engineering*, [S.l.], p. 112652, 2025.

MOUTASSEM, F. High strength concrete prestressed bridges: exposure conditions, mechanical properties, modified design equations, parametric study, and structural reliability. In: *STRUCTURES*. [S.l.]: Elsevier, 2022. p. 1369-1382.

NAAMAN, A. Fatigue in partially prestressed concrete beams. In: *Recent research in fatigue of concrete structures*. Detroit: ACI Special Publication, 1982. p. 25-46.

NAWY, E. G. *Prestressed concrete: a fundamental approach*. [S.l.]: [s.n.], 1996.

NETTIS, A. et al. Corrosion-induced fragility of existing prestressed concrete girder bridges under traffic loads. *Engineering Structures*, [S.l.], v. 314, p. 118302, 2024.

NI, P. et al. Reliability assessment of civil structures with incomplete probability distribution information. *Probabilistic Engineering Mechanics*, [S.l.], v. 74, p. 103541, 2023.

PAN, Z. et al. Three-dimensional lattice modeling of concrete carbonation at meso-scale based on reconstructed coarse aggregates. *Construction and Building Materials*, [S.l.], v. 192, p. 253-271, 2018.

PEPENAR, I. Chloride-induced corrosion damage of reinforced concrete structures: case studies and laboratory research. *Materials Today: Proceedings*, [S.l.], v. 58, p. 1588-1593, 2022.

PUGLIESE, F.; DE RISI, R.; DI SARNO, L. Reliability assessment of existing RC bridges with spatially-variable pitting corrosion subjected to increasing traffic demand. *Reliability Engineering & System Safety*, [S.l.], v. 218, p. 108137, 2022.

RABOTNOV, Yu. N.; LECKIE, F. A.; PRAGER, W. Creep problems in structural members. [S.l.]: [s.n.], 1970.

RADOŃ, U.; ZABOJSZCZA, P. The application of structural reliability and sensitivity analysis in engineering practice. *Applied Sciences*, [S.l.], v. 15, n. 1, p. 342, 2025.

REVERT, A. B.; DANNER, T.; GEIKER, M. R. Carbonation and corrosion of steel in fly ash concrete, concluding investigation of five-year-old laboratory specimens and preliminary field data. *Cement*, [S.l.], v. 16, p. 100105, 2024.

SAAD, L. et al. Reliability-based optimization of direct and indirect LCC of RC bridge elements under coupled fatigue-corrosion deterioration processes. *Engineering Failure Analysis*, [S.l.], v. 59, p. 570-587, 2016.

SONG, C.; KAWAI, R. Monte Carlo and variance reduction methods for structural reliability analysis: a comprehensive review. *Probabilistic Engineering Mechanics*, [S.l.], v. 73, p. 103479, 2023.

STEWART, M. G.; AL-HARTHY, A. Pitting corrosion and structural reliability of corroding RC structures: experimental data and probabilistic analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, [S.l.], v. 93, n. 3, p. 373-382, 2008.

SU, X. et al. Fatigue life prediction for prestressed concrete beams under corrosion deterioration process. In: *STRUCTURES*. [S.l.]: Elsevier, 2022. p. 1704-1715.

VOGLER, N. et al. Alternative pH-indicators for determination of carbonation depth on cement-based concretes. *Cement and Concrete Composites*, [S.l.], v. 109, p. 103565, 2020.

WANG, D.; YUE, Y.; QIAN, J. Effect of carbonation on the corrosion behavior of steel rebar embedded in magnesium phosphate cement. *Composites Part B: Engineering*, [S.l.], v. 268, p. 111088, 2024.

YUAN, Y. et al. Time-dependent reliability assessment of existing concrete bridges including non-stationary vehicle load and resistance processes. *Engineering Structures*, [S.l.], v. 197, p. 109426, 2019.

ZHI, F. et al. Effect of polyacrylamide on the carbonation behavior of cement paste. *Cement and Concrete Research*, [S.l.], v. 156, p. 106756, 2022.

ZHOU, C. et al. A general hierarchical ensemble-learning framework for structural reliability analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, [S.l.], v. 225, p. 108605, 2022.