Unisanta Science and Technology, 2025, 6, November
Published Online 2025 Vol.14 Nº1 http://periodicos.unisanta.br/index.php/sat)

UNISANTA
Science and Technology
ISSN 2317-1316

Confiabilidade de Estruturas Metálicas: Integração entre Projeto, Patologias e Diagnóstico Estrutural

Samyra Regina de Oliveira [1, 2], Givanildo José Gomes da Silva [3], Willy Ank de Morais [1, 2, 3]

[1] **UNISANTA** – Universidade Santa Cecília – Faculdade de Engenharia – Pós-graduação em Engenharia da Confiabilidade
Rua Oswaldo Cruz, 266 - Boqueirão - SANTOS-SP, Brasil - CEP: 11045-100

[2] **UNAERP** – Universidade de Ribeirão Preto – Graduação em Engenharia Civil
Av. Dom Pedro I, 3.300 - Enseada, Guarujá-SP - CEP 11440-003

[3] **WILLY ANK –SOLUÇÕES PARA O SETOR METAL-MECÂNICO**
Rua Onze de Junho, 316 A.102 - Itararé - São Vicente-SP, Brasil-CEP: 11320-160

E-mail: samyraoliveira@gmail.com
Received Jul., 2025

Resumo: A confiabilidade estrutural de estruturas metálicas ao longo da vida útil depende não apenas de um projeto adequado, mas também da compreensão dos mecanismos de deterioração, da caracterização do ambiente de exposição e da adoção de estratégias sistemáticas de inspeção e manutenção. Este artigo apresenta uma abordagem integrada para a avaliação da confiabilidade de estruturas metálicas, articulando critérios normativos, manifestações patológicas e procedimentos de diagnóstico estrutural. São discutidos os fundamentos da confiabilidade estrutural com base no método dos estados-limite e a quantificação da corrosão atmosférica segundo a ISO 9223, com ênfase na estimativa da perda de espessura em ambientes agressivos. A metodologia é aplicada a um estudo de caso de estrutura metálica exposta a ambiente classificado entre C3 e C4, no qual são identificadas manifestações patológicas recorrentes. Complementarmente, realiza-se uma avaliação numérica simplificada dos efeitos da perda de seção, integrando a ISO 9223 às expressões geométricas da ABNT NBR 6355, evidenciando o impacto da corrosão na confiabilidade estrutural.

Palavras-chave: Estruturas metálicas; Confiabilidade estrutural; Corrosão atmosférica; Patologias estruturais.

Reliability of Steel Structures: Integration between Design, Pathologies, and Structural Diagnosis

Abstract: The structural reliability of steel structures throughout their service life depends not only on adequate design but also on the understanding of deterioration mechanisms, the characterization of the exposure environment, and the adoption of systematic inspection and maintenance strategies. This paper presents an integrated approach for assessing the reliability of steel structures by combining normative criteria, pathological manifestations, and structural diagnostic procedures. The fundamentals of structural reliability based on the limit states method are discussed, together with the quantification of atmospheric corrosion according to ISO 9223, with emphasis on estimating thickness loss in aggressive environments. The methodology is applied to a case study of a steel structure exposed to an environment classified between C3 and C4, in which recurrent pathological manifestations are identified. Additionally, a simplified numerical evaluation of the effects of section loss is performed by integrating ISO 9223 corrosion models with the geometric expressions of ABNT NBR 6355, highlighting the impact of corrosion on structural reliability.

Keywords: Steel structures; Structural reliability; Atmospheric corrosion; Structural pathologies

1. INTRODUÇÃO

As estruturas metálicas têm sido amplamente empregadas na engenharia civil em função de sua elevada resistência mecânica, precisão dimensional, versatilidade construtiva e rapidez de execução, sendo aplicadas em edificações industriais, comerciais, infraestruturas de transporte e sistemas especiais. O avanço da siderurgia e dos métodos de fabricação possibilitou a produção de

Copyright © 2025 ISESC.

perfis padronizados e de elevado desempenho estrutural, favorecendo a racionalização dos projetos e a previsibilidade do comportamento mecânico das estruturas [1,2]. No contexto brasileiro, a consolidação do uso de estruturas metálicas está diretamente associada ao desenvolvimento normativo e à ampliação das exigências relacionadas à segurança e ao desempenho ao longo da vida útil.

Entretanto, a confiabilidade estrutural dessas estruturas não depende exclusivamente de um dimensionamento adequado ou do atendimento às prescrições normativas em fase de projeto. Ao longo da vida útil, fatores como exposição ambiental, falhas construtivas, deficiências de detalhamento, ausência de manutenção e alterações no regime de carregamento podem comprometer o desempenho estrutural originalmente previsto, conduzindo ao surgimento de manifestações patológicas e à redução progressiva da capacidade resistente [3,4]. Nesse sentido, a confiabilidade estrutural deve ser compreendida como um conceito integrado, que envolve não apenas o projeto, mas também a durabilidade, a inspeção e a gestão da manutenção.

1.1. Projeto voltado à confiabilidade

Do ponto de vista normativo, o projeto de estruturas metálicas é fundamentado no método dos estados-limite, contemplando os Estados Limites Últimos (ELU), associados à segurança contra colapso, e os Estados Limites de Serviço (ELS), relacionados ao desempenho em uso, conforme estabelecido pelas normas técnicas vigentes [1]. Contudo, mesmo estruturas corretamente dimensionadas segundo esses critérios podem apresentar degradação significativa quando submetidas a ambientes agressivos, especialmente em regiões litorâneas ou industriais, onde a corrosão atmosférica se configura como o principal mecanismo de deterioração do aço estrutural [1,4].

A abordagem integrada necessária para assegurar a confiabilidade ao longo da vida útil das estruturas metálicas envolve a articulação entre as etapas de anteprojeto, projeto básico e executivo, fabricação, montagem e operação da estrutura, conforme ilustrado no fluxograma apresentado na Figura 1, que sintetiza as fases de trabalho típicas de empreendimentos em estruturas metálicas [4]. A adequada coordenação entre essas etapas é fundamental para minimizar falhas de concepção, execução e manutenção que podem comprometer o desempenho estrutural.

Entre as manifestações patológicas mais recorrentes em estruturas metálicas destacam-se os diversos mecanismos de corrosão, as falhas em ligações soldadas e parafusadas, os processos de fadiga associados a carregamentos cíclicos e as instabilidades decorrentes da perda progressiva de seção resistente e do aumento da esbeltez dos elementos estruturais. Tais mecanismos, muitas vezes de evolução lenta e pouco perceptível em seus estágios iniciais, podem desenvolver-se de forma silenciosa quando não identificados e tratados precocemente, culminando em danos localizados ou, em situações mais críticas, no colapso estrutural [5,3]. Os principais mecanismos de corrosão que afetam estruturas

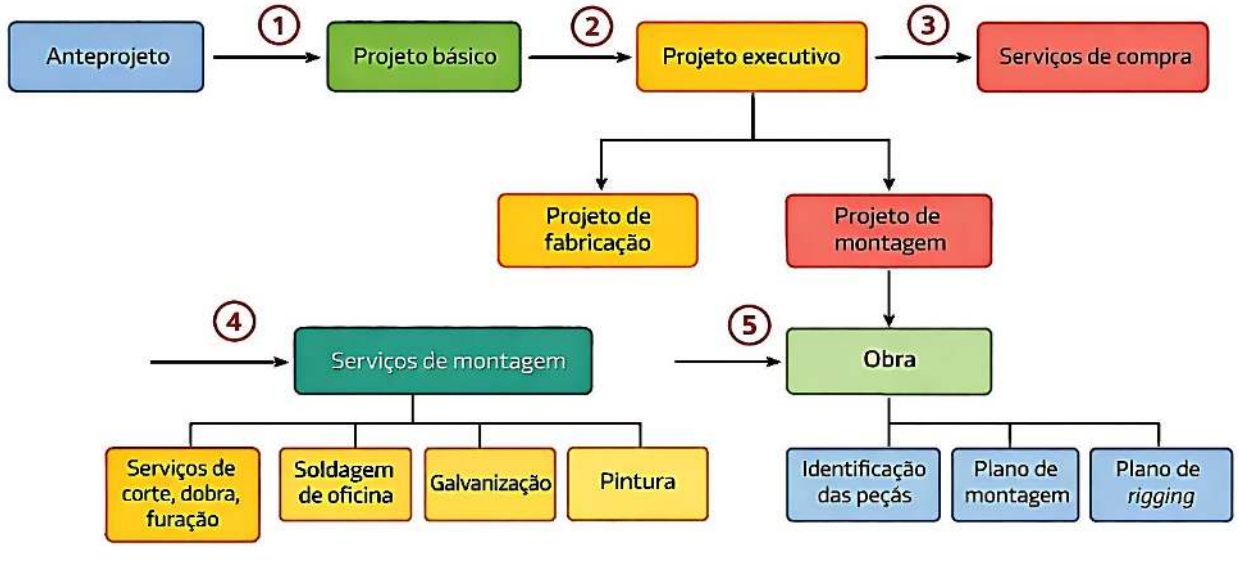


Figura 1. Fluxograma das fases de trabalho em estruturas metálicas. Adaptado de Xerez Neto [4].

Copyright © 2025 ISESC

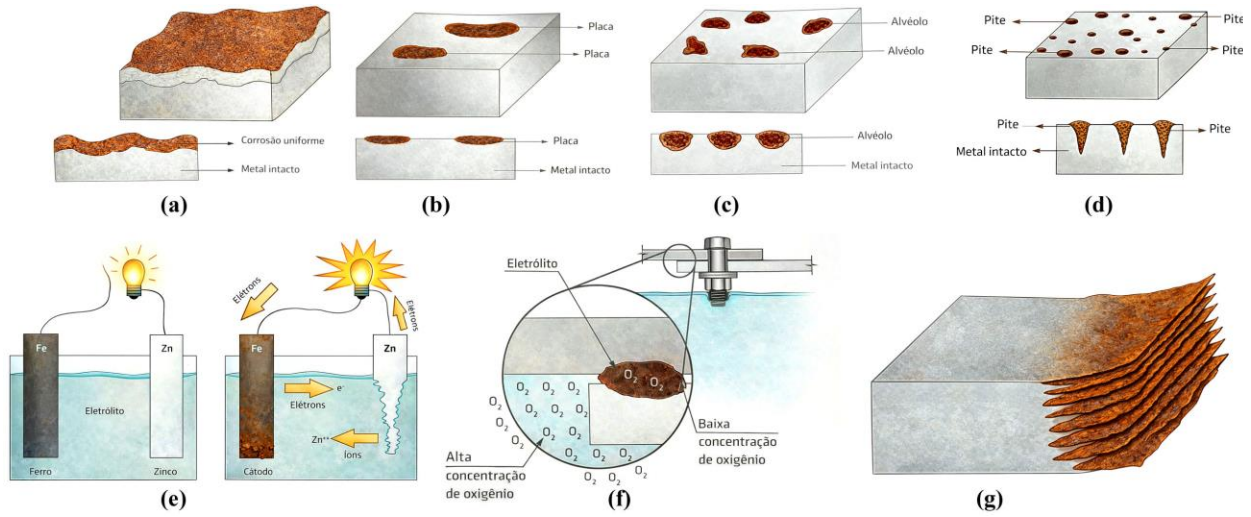


Figura 2. Representação esquemática dos principais mecanismos de corrosão em estruturas metálicas: (a) uniforme, (b) por placas, (c) por alvéolos, (d) por pites (*pitting corrosion*), (e) galvânica, (f) Corrosão por concentração diferencial de oxigênio (corrosão em frestas) e (g) em camadas (ou esfoliação). Adaptado de Xerez Neto [4].

metálicas encontram-se esquematicamente representados na Figura 2, evidenciando a diversidade de formas de ataque e sua relevância para a avaliação da confiabilidade estrutural ao longo do tempo.

1.2. Quantificação da corrosão generalizada segundo a ISO 9223 [6]

A avaliação da perda de integridade de estruturas metálicas expostas a ambientes atmosféricos requer, como etapa inicial, a caracterização quantitativa da agressividade do meio ao qual o material está submetido. Nesse contexto, a norma ISO 9223 [6] estabelece um sistema padronizado para a classificação, determinação e estimativa da corrosividade atmosférica, tendo como referência a taxa de corrosão ($r_{(corr)}$) observada no primeiro ano de exposição, conforme apresentada na Tabela A. Ressalta-se, contudo, que as taxas de corrosão do primeiro ano não podem ser extrapoladas diretamente para a previsão do comportamento da corrosão em longo prazo, sendo necessários modelos específicos que descrevam a evolução temporal do processo corrosivo.

A norma define a corrosividade atmosférica como a capacidade do ambiente em provocar corrosão em um sistema metal–ambiente, classificando-a em categorias crescentes de agressividade, de C1 (muito baixa) até CX (extrema), conforme descrito na Tabela A. Essa classificação baseia-se na perda de material observada no primeiro ano de exposição de metais padrão, como o aço carbono, permitindo associar diferentes ambientes atmosféricos a faixas típicas de taxas de corrosão.

Quando a determinação experimental direta por meio de corpos de prova não é viável, a ISO 9223 [6] admite a estimativa normativa da corrosividade atmosférica por meio de funções dose–resposta. Essas funções relacionam a taxa de corrosão anual a variáveis ambientais médias, tais como temperatura, umidade relativa, tempo de molhamento, deposição de dióxido de enxofre e deposição de cloretos. Esses parâmetros sintetizam os principais mecanismos físico-químicos que governam a corrosão atmosférica generalizada e permitem estimar, de forma racional, a perda de espessura ocasionada pela taxa de corrosão ($r_{(corr)}$) ao longo do tempo. Para o caso específico do aço, a norma propõe a seguinte expressão:

$$r_{(corr)} = 1{,}77 \cdot P_d^{0{,}52} \cdot \exp(0{,}020 \cdot RH + f_{St}) + 0{,}102 \cdot S_d^{0{,}62} \cdot \exp(0{,}033 \cdot RH + 0{,}040 \cdot T) \quad (1)$$

Na qual: $r_{(corr)}$ é a taxa de corrosão anual corrigida pelas variáveis ambientais médias; P_d e S_d são as deposições anuais médias de SO_2 e Cl^- em [mg/(m^2·dia)], respectivamente; T é a temperatura do ambiente [°C] e f_{St} é um fator de sensibilidade do metal à temperatura, que para o caso do aço vale:

$$f_{St} = 0{,}150 \cdot (T\text{-}10); \quad \text{para } T \leq 10°C \quad (2)$$

$$f_{St} = -0{,}054 \cdot (T\text{-}10); \quad \text{para } T > 10°C \quad (3)$$

Os valores da deposição de SO_2 (P_d) e Cl^- (S_d), ambos em [mg/(m^2·dia)] , representam, respectivamente, a influência de poluentes industriais e de aerossóis marinhos sobre a agressividade do meio.

Copyright © 2025 ISESC

Tabela A. Taxas de corrosão, $r_{(corr)}$, para o primeiro ano de exposição para as diferentes categorias de corrosividade segundo a ISO 9223 [6].

Categoria de corrosividade	Unidade	Aço carbono	Zinco	Cobre	Alumínio
C1 – Muito baixa	g/(m²·ano)	$r_{(corr)} \leq 10$	$r_{(corr)} \leq 0,7$	$r_{(corr)} \leq 0,9$	desprezível
	µm/ano	$r_{(corr)} \leq 1,3$	$r_{(corr)} \leq 0,1$	$r_{(corr)} \leq 0,1$	—
C2 – Baixa	g/(m²·ano)	$10 < r_{(corr)} \leq 200$	$0,7 < r_{(corr)} \leq 5$	$0,9 < r_{(corr)} \leq 5$	$r_{(corr)} \leq 0,6$
	µm/ano	$1,3 < r_{(corr)} \leq 25$	$0,1 < r_{(corr)} \leq 0,7$	$0,1 < r_{(corr)} \leq 0,6$	—
C3 – Média	g/(m²·ano)	$200 < r_{(corr)} \leq 400$	$5 < r_{(corr)} \leq 15$	$5 < r_{(corr)} \leq 12$	$0,6 < r_{(corr)} \leq 2$
	µm/ano	**$25 < r_{(corr)} \leq 50$**	$0,7 < r_{(corr)} \leq 2,1$	$0,6 < r_{(corr)} \leq 1,3$	—
C4 – Alta	g/(m²·ano)	$400 < r_{(corr)} \leq 650$	$15 < r_{(corr)} \leq 30$	$12 < r_{(corr)} \leq 25$	$2 < r_{(corr)} \leq 5$
	µm/ano	**$50 < r_{(corr)} \leq 80$**	$2,1 < r_{(corr)} \leq 4,2$	$1,3 < r_{(corr)} \leq 2,8$	—
C5 – Muito alta	g/(m²·ano)	$650 < r_{(corr)} \leq 1\,500$	$30 < r_{(corr)} \leq 60$	$25 < r_{(corr)} \leq 50$	$5 < r_{(corr)} \leq 10$
	µm/ano	$80 < r_{(corr)} \leq 200$	$4,2 < r_{(corr)} \leq 8,4$	$2,8 < r_{(corr)} \leq 5,6$	—
CX – Extrema	g/(m²·ano)	$1\,500 < r_{(corr)} \leq 5\,500$	$60 < r_{(corr)} \leq 180$	$50 < r_{(corr)} \leq 90$	$r_{(corr)} > 10$
	µm/ano	$200 < r_{(corr)} \leq 700$	$8,4 < r_{(corr)} \leq 25$	$5,6 < r_{(corr)} \leq 10$	—

1. A classificação baseia-se nos métodos normalizados de determinação das taxas de corrosão de corpos-de-prova padrão para avaliação da corrosividade atmosférica (ver ISO 9226 [8]).
2. As taxas de corrosão expressas em g/(m²·ano) são recalculadas e arredondadas para µm/ano.
3. Os materiais metálicos padrão utilizados estão definidos na ISO 9226 [8].
4. O alumínio pode apresentar corrosão uniforme e localizada; os valores apresentados referem-se à corrosão uniforme. A profundidade máxima de pites pode ser um indicador mais representativo do dano potencial, dependendo da aplicação.

Taxas de corrosão superiores aos limites da categoria C5 são consideradas extremas; a categoria CX refere-se a ambientes marinhos e marinho-industriais específicos.

Esses parâmetros podem ser obtidos por meio de medições ambientais normalizadas, conforme procedimentos descritos nas normas ISO 9225 [7] e ISO 9226 [8]. Quando medições diretas não estão disponíveis, a ISO 9223 [6] admite a utilização de estimativas indiretas baseadas em características do local, tais como proximidade de áreas industriais, distância da linha costeira, regime de ventos e condições climáticas predominantes.

Do ponto de vista da engenharia estrutural, a adoção dessa abordagem normativa é particularmente relevante, pois possibilita converter a agressividade ambiental em valores quantitativos de perda de seção ao longo do tempo. Dessa forma, estabelece-se um elo direto entre os fenômenos de degradação por corrosão e a análise da capacidade resistente residual das estruturas. Assim, a ISO 9223 [6] fornece o suporte conceitual e matemático necessário para integrar a caracterização ambiental, a avaliação da deterioração progressiva e as análises estruturais subsequentes, conforme desenvolvido nos itens seguintes deste trabalho.

1.3. Vínculo da confiabilidade estrutural com as dimensões dos elementos estruturais

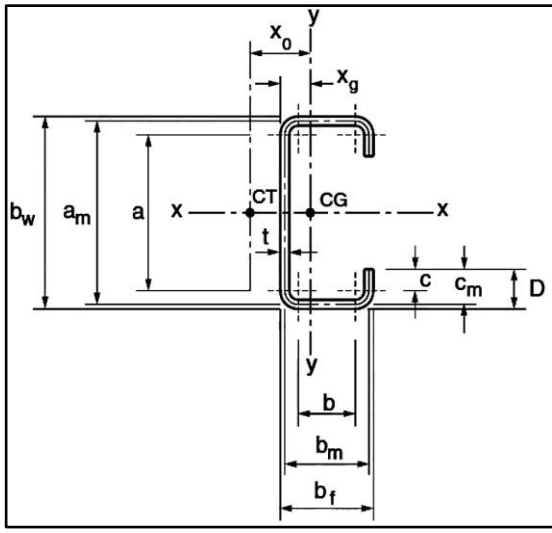
A confiabilidade estrutural de sistemas metálicos está diretamente associada à integridade geométrica de seus elementos constituintes, uma vez que as dimensões da seção transversal determinam as propriedades mecânicas responsáveis pela resistência, rigidez e estabilidade global da estrutura. Parâmetros como área da seção transversal (A), momentos de inércia (I_X e I_y) e módulos resistentes (W_x e W_y) exercem papéis fundamentais na definição da resposta estrutural a esforços de flexão, compressão e flambagem.

Em estruturas de aço formadas por perfis dobrados a frio, as propriedades geométricas dependem diretamente das dimensões nominais da seção, em especial da espessura da chapa. A NBR 6355 [9] define as expressões para o cálculo dessas propriedades em diferentes tipologias de perfis, incluindo as apresentadas no Quadro A para perfis do tipo U enrijecido, amplamente utilizados em estruturas leves e de cobertura em função de sua adequada relação resistência-peso e facilidade de fabricação e montagem [10,11].

Ao longo da vida útil da estrutura, a exposição a ambientes agressivos pode induzir processos de corrosão generalizada que resultam na redução progressiva da espessura efetiva dos elementos metálicos. Conforme definido pela ISO 9223 [6], a taxa de corrosão atmosférica depende da categoria de corrosividade do ambiente, levando a uma perda de material, ainda que aparentemente pequena em termos absolutos, produz efeitos não lineares sobre as propriedades geométricas da seção transversal.

Copyright © 2025 ISESC

Quadro A. Propriedades geométricas de perfis U enrijecidos formados a frio, conforme a NBR 6355 [8].



$$A = t\,(a + 2b + 2c + 4u_1)$$

$$x_g = \frac{2t}{A}\left[b(0{,}5b + r_m) + (u_1 + c)\,(b + 2r_m)\right] + 0{,}5t$$

$$x_0 = b_m\left[\frac{3a_m{}^2\,b_m + c_m\left(6a_m{}^2 - 8c_m{}^2\right)}{a_m{}^3 + 6a_m{}^2\,b_m + c_m\left(8c_m{}^2 - 12a_m\,c_m + 6a_m{}^2\right)}\right] + x_g - 0{,}5t$$

$$I_x = 2t\left[\begin{matrix}0{,}042a^3 + b(0{,}5a + r_m)^2 + 2u_1\,(0{,}5a + 0{,}637r_m)^2 \\ + 0{,}298r_m{}^3 + 0{,}083c^3 + 0{,}25c\,(a - c)^2\end{matrix}\right]$$

$$I_y = 2t\left[\begin{matrix}b(0{,}5b + r_m)^2 + 0{,}083b^3 + 0{,}505r_m{}^3 + c\,(b + 2r_m)^2 \\ + u_1\,(b + 1{,}637r_m)^2\end{matrix}\right] - A\,(x_g - 0{,}5t)^2$$

$$C_w = \frac{a_m{}^2\,b_m{}^2\,t}{12}\left[\frac{\begin{matrix}2a_m{}^3\,b_m + 3a_m{}^2\,b_m{}^2 + 48c_m{}^4 + 112b_m\,c_m{}^3 + 8a_m\,c_m{}^3 \\ + 48a_m\,b_m\,c_m{}^2 + 12a_m{}^2\,c_m{}^2 + 12a_m{}^2\,b_m\,c_m + 6a_m{}^3\,c_m\end{matrix}}{6a_m{}^2\,b_m + (a_m + 2c_m)^3 - 24a_m\,c_m{}^2}\right]$$

A redução da espessura (t) provoca a diminuição progressiva dos parâmetros que governam a capacidade portante e os fatores de segurança dos elementos estruturais, podendo amplificar, ao longo do tempo, tensões inicialmente compatíveis com o estado de projeto e comprometer a confiabilidade estrutural.

Diante disso, a avaliação da confiabilidade de estruturas metálicas expostas à corrosão deve incorporar a evolução temporal das propriedades geométricas dos perfis, superando análises limitadas às condições iniciais de projeto. Nesse contexto, a integração entre os modelos de perda de espessura da ISO 9223 [6] e as equações geométricas da NBR 6355 [9] constitui um instrumento fundamental para quantificar os efeitos da corrosão generalizada sobre a capacidade resistente ao longo da vida útil.

Com base nessa abordagem, o presente artigo propõe um modelo integrado para a avaliação da confiabilidade de estruturas metálicas, articulando critérios normativos, mecanismos de deterioração e procedimentos de diagnóstico estrutural, de modo a subsidiar decisões técnicas relacionadas à inspeção e à manutenção preventiva.

2. METODOLOGIA

A abordagem metodológica adotada neste trabalho encontra-se sintetizada na Figura 3, que apresenta o fluxo integrado para a avaliação da confiabilidade estrutural de estruturas metálicas, contemplando desde a revisão normativa e conceitual até a identificação dos mecanismos de deterioração, a realização de inspeções visuais sistemáticas, o registro e a classificação das manifestações patológicas, culminando na análise da confiabilidade estrutural ao longo da vida útil.

Inicialmente, realizou-se uma revisão técnica da literatura, abrangendo normas e obras de referência sobre projeto, dimensionamento e desempenho de estruturas metálicas, com ênfase no método dos estados-limite, nos critérios de segurança estrutural e nos princípios de durabilidade ao longo da vida útil [1,2]. Essa etapa estabeleceu o arcabouço conceitual para a análise da confiabilidade estrutural sob a ótica do projeto e da normatização vigente.

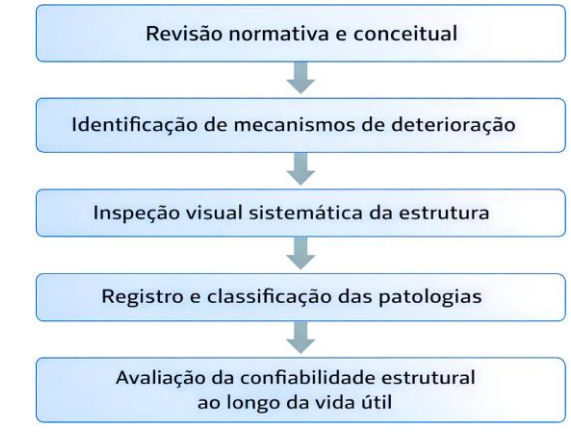


Figura 3. Fluxo metodológico para a avaliação da confiabilidade estrutural de estruturas metálicas ao longo da vida útil.

Copyright © 2025 ISESC

Em seguida, realizou-se a análise dos principais mecanismos de deterioração associados às estruturas metálicas, com ênfase nas manifestações patológicas mais recorrentes, tais como corrosão atmosférica, falhas em ligações soldadas e parafusadas, processos de fadiga induzidos por carregamentos cíclicos e instabilidades decorrentes da perda progressiva de seção resistente [3,4]. A classificação desses mecanismos baseou-se em literatura técnica consolidada, permitindo a identificação de padrões de degradação relevantes para a avaliação da confiabilidade estrutural.

A etapa aplicada da metodologia consistiu na análise de um estudo de caso envolvendo uma estrutura metálica inserida em ambiente agressivo, caracterizado por elevada umidade e presença de agentes corrosivos. A avaliação foi conduzida por meio de inspeção visual sistemática, com registro fotográfico das manifestações patológicas, priorizando regiões críticas da estrutura, como ligações, bases de pilares e elementos diretamente expostos às condições ambientais, em consonância com recomendações técnicas para diagnóstico estrutural [4,5].

Por fim, os resultados da inspeção foram analisados sob a ótica da confiabilidade estrutural, correlacionando os mecanismos de deterioração identificados com seus impactos potenciais na capacidade resistente e no desempenho estrutural ao longo do tempo. Essa análise foi complementada por uma avaliação quantitativa da perda de integridade estrutural, na qual a redução de espessura decorrente da corrosão atmosférica foi estimada com base nas equações da ISO 9223 [6], e os efeitos dessa perda sobre as propriedades geométricas e a capacidade resistente dos elementos estruturais foram avaliados a partir das expressões normatizadas pela NBR 6355 [9].

A partir dessa abordagem integrada, discutem-se as implicações para a gestão da manutenção, a necessidade de intervenções preventivas e o papel da inspeção periódica como ferramenta para a preservação da segurança e da durabilidade das estruturas metálicas.

3. RESULTADOS

Os resultados apresentados a seguir decorrem da aplicação do fluxo metodológico descrito na seção anterior, integrando a revisão técnica com a análise diagnóstica de uma estrutura metálica exposta a ambiente agressivo. Inicialmente, são apresentados os aspectos gerais da estrutura e das condições ambientais de exposição, seguidos da identificação e classificação das manifestações patológicas observadas, estabelecendo a base para a discussão desenvolvida na seção subsequente.

3.1. Caracterização geral da estrutura analisada

A estrutura metálica analisada no estudo de caso corresponde a um sistema estrutural empregado em uma edificação exposta a ambiente agressivo, composta predominantemente por perfis de aço estrutural laminados, conectados por ligações parafusadas e soldadas. Trata-se de uma estrutura destinada a suportar cargas permanentes e variáveis associadas ao uso contínuo, apresentando configuração típica de estruturas metálicas empregadas em ambientes industriais e de infraestrutura, conforme ilustrado na Figura 4.

Do ponto de vista construtivo, observam-se elementos estruturais com diferentes níveis de exposição às condições ambientais, incluindo pilares, vigas e regiões de ligação, alguns deles posicionados próximos ao nível do solo e outros diretamente expostos à atmosfera externa.



Figura 4. Vista geral da estrutura metálica analisada no estudo de caso, acompanhada de representação esquemática de sua configuração estrutural e sistema de cobertura.

Copyright © 2025 ISESC

Essas características geométricas e construtivas são relevantes para a análise da confiabilidade estrutural, uma vez que influenciam diretamente a suscetibilidade aos mecanismos de deterioração ao longo da vida útil [1,2].

A avaliação preliminar da estrutura indica que, embora o sistema tenha sido concebido de acordo com práticas usuais de projeto, a ausência de um histórico sistemático de inspeção e manutenção preventiva contribuiu para a progressiva manifestação de patologias, especialmente em regiões críticas. Esse cenário reforça a importância de se analisar a confiabilidade estrutural não apenas sob a ótica do dimensionamento inicial, mas também considerando as condições reais de exposição e uso [3,4].

3.2. Caracterização do ambiente de exposição

A estrutura analisada ilustrada na Figura 4 encontra-se inserida em ambiente classificado como agressivo, caracterizado por elevada umidade relativa do ar, presença de agentes corrosivos e variações climáticas significativas. Tais condições favorecem a ocorrência de processos eletroquímicos associados à corrosão atmosférica do aço estrutural, sobretudo em regiões com ventilação limitada, acúmulo de umidade, presença de frestas e interfaces metálicas.

Com base na norma ISO 9223 [6], a caracterização da agressividade atmosférica foi realizada de forma estimativa, considerando as condições de exposição observadas no estudo de caso. A estrutura está localizada em região de clima úmido, com precipitação frequente e influência de ventos provenientes do litoral, a aproximadamente 3 km da linha costeira, o que possibilita a deposição de cloretos sobre as superfícies metálicas. Essas características são compatíveis com categorias de corrosividade atmosférica entre C3 (média) e C4 (alta), típicas de ambientes costeiros com baixo a substancial efeito de cloretos.

A literatura técnica destaca que ambientes dessa natureza aceleram os mecanismos de deterioração, especialmente quando associados à ausência de sistemas adequados de proteção superficial ou à degradação progressiva de revestimentos anticorrosivos ao longo do tempo [3,4]. No caso analisado, verificou-se que diferentes elementos da estrutura estão submetidos a graus distintos de agressividade ambiental, resultando em padrões variados de deterioração ao longo da edificação.

Além das condições ambientais gerais, a geometria da estrutura e sua interação com o meio contribuem para a formação de microambientes com corrosividade agravada. Regiões próximas à base dos pilares, especialmente aquelas parcialmente abrigadas da lavagem direta pela chuva, favorecem o acúmulo de umidade, contaminantes e agentes químicos, intensificando os processos corrosivos localizados. A Figura 5 ilustra de forma esquemática esse mecanismo, destacando a influência combinada da precipitação pluvial, do contato com o solo e do eventual derramamento de óleos e produtos químicos na formação de zonas críticas de deterioração concentradas na região inferior dos elementos estruturais.

De acordo com a ISO 9223 [6], estruturas de aço carbono expostas a ambientes classificados como C3 e C4 apresentam taxas típicas de corrosão no primeiro ano entre 25 e 50 µm/ano e 50 a 80 µm/ano, respectivamente, podendo ser superiores em microambientes desfavoráveis. Regiões abrigadas e não lavadas pela chuva, como bases de pilares, ligações e interfaces estruturais, tendem a intensificar a perda de seção resistente ao longo do tempo.

Nesse contexto, a Figura 6 apresenta simulações qualitativas feitas por Inteligência Artificial (IA) do comportamento esperado da estrutura após 10 anos de exposição a ambientes classificados entre C3 e C4, segundo a ISO 9223 [6], considerando diferentes soluções construtivas e níveis de proteção anticorrosiva. As simulações evidenciam a influência da escolha dos materiais e dos sistemas de proteção superficial na evolução dos processos corrosivos, destacando a maior vulnerabilidade de elementos em aço carbono apenas pintados em comparação com soluções que empregam pilares de concreto e telhas metálicas com maior resistência à corrosão.

Essas condições ambientais constituem um fator determinante para a redução da durabilidade e da confiabilidade estrutural, uma vez que intensificam a perda progressiva de material e afetam o desempenho das ligações estruturais.



Figura 5. Esquema de microambiente crítico de corrosão na base de pilar metálico, associado à umidade e a contaminantes. Adaptado de Xerez Neto [4].

Copyright © 2025 ISESC



(a) (b) (c)

Figura 6. Simulações do comportamento da estrutura após 10 anos de exposição à corrosividade atmosférica entre C3 (média) e C4 (alta), segundo a ISO 9223 [6] e realizada por IA: (a) estrutura integralmente em aço carbono apenas pintado; (b) uso de pilares em concreto pré-fabricado e (c) uso de pilares em concreto e cobertura em telhas galvalume, somente com as treliças em aço carbono pintado.

A correta caracterização do ambiente de exposição é essencial para interpretar os mecanismos de deterioração e seus impactos estruturais na vida útil da edificação [1,4].

3.3. Identificação e classificação das manifestações patológicas na estrutura metálica analisada

A inspeção visual da estrutura metálica *in loco* [12] permitiu identificar manifestações patológicas predominantemente associadas à corrosão atmosférica em diferentes estágios de evolução, distribuídas de forma não uniforme na edificação em regiões similares às obtidas na simulação, apresentada na Figura 6(c). Esse comportamento reflete a influência combinada das condições ambientais, da geometria estrutural e da ausência de manutenção preventiva ao longo da vida útil.

De modo geral, observou-se corrosão superficial ativa, caracterizada pela degradação do revestimento protetor e pela formação de produtos de corrosão aderidos à superfície dos elementos estruturais. Em diversos pontos, esse processo evoluiu para corrosão localizada com perda progressiva de seção resistente, especialmente em perfis metálicos que compõem as treliças e vigas da cobertura. A Figura 7(a) ilustra esse mecanismo, evidenciando corrosão avançada na mesa e na alma do perfil, com exposição direta do aço ao ambiente agressivo.

Em regiões mais críticas, associadas ao acúmulo de umidade, à deficiência de drenagem ou à exposição indireta à precipitação pluvial, identificaram-se casos de corrosão severa com redução significativa da espessura original dos perfis, conforme exemplificado na Figura 7(b). Nesses casos, a perda expressiva de material compromete a integridade geométrica do elemento estrutural e, potencialmente, sua capacidade resistente.

Observou-se que as manifestações patológicas se concentraram, sobretudo, em regiões de ligação, interfaces entre componentes e zonas parcialmente abrigadas da lavagem direta pela chuva, favorecendo a formação de microambientes com maior tempo de permanência da umidade e concentração de agentes agressivos. Esse comportamento é coerente com o modelo conceitual apresentado na Figura 5 e com os cenários de degradação projetados nas simulações qualitativas da Figura 6, reforçando a representatividade do estudo de caso para ambientes com corrosividade entre C3 e C4.

Do ponto de vista da classificação, as manifestações observadas podem ser agrupadas em: (i) corrosão uniforme em estágio inicial; (ii) corrosão localizada com perda de seção moderada; e (iii) corrosão severa com redução significativa da seção resistente, esta última configurando situação potencialmente crítica sob o aspecto da confiabilidade estrutural [1,3,4].

Esses resultados indicam que, embora a estrutura ainda preserve sua configuração global, determinadas regiões já apresentam degradação suficiente para justificar intervenções corretivas. Nesse contexto, a identificação qualitativa das manifestações patológicas fornece a base necessária para a etapa seguinte, na qual se procede à avaliação quantitativa da perda de integridade estrutural, por meio da estimativa da perda de espessura por corrosão e de seus efeitos sobre a capacidade resistente dos elementos estruturais, conforme apresentado a seguir.

3.4. Avaliação numérica do efeito da perda de seção na tensão solicitante

Com o objetivo de complementar a análise qualitativa das manifestações patológicas identificadas nos itens anteriores e ampliar a compreensão de seus impactos estruturais, é apresentada uma avaliação numérica simplificada dos efeitos da corrosão sobre a confiabilidade dos perfis U enrijecidos dobrados a frio, como os empregados na estrutura avaliada (Figuras 6 e 7).

Copyright © 2025 ISESC



(a) **(b)**

Figura 7. Manifestações patológicas observadas *in loco* na estrutura metálica avaliada: (a) corrosão atmosférica avançada em elemento da cobertura, com degradação do revestimento protetor e perda localizada de seção; (b) corrosão severa em elemento estrutural da cobertura, com redução significativa da seção transversal.

A análise fundamenta-se em um modelo mecânico simplificado, no qual se assume o comportamento elástico linear do material, a manutenção das condições globais de carregamento e a aplicabilidade das expressões apresentadas no Quadro A, conforme a ABNT NBR 6355 [9]. A deterioração por corrosão é representada pela redução progressiva da espessura (t) dos elementos estruturais, admitindo-se, para fins de análise, uma perda uniforme da seção transversal, em consonância com as condições ambientais previamente caracterizadas nas categorias C3 e C4 segundo a ISO 9223 [6].

Na ausência de projeto detalhado e de levantamento dimensional em campo, adotou-se a seguinte referência dimensional para perfis U enrijecidos empregados como:

- banzos das treliças da cobertura - alturas (b_w) entre 200 e 300 mm e espessuras (t) entre 2,65 e 4,75 mm.
- elementos secundários - alturas (b_w) entre 100 e 170 mm e espessuras (t) entre 2,00 e 2,65 mm.

Da mesma forma, adotou-se o menor limite de escoamento (f_y) de 230 MPa, como considerado pela NBR 8800 [13], e um fator de segurança (f_s) igual à 2,0 (dois). Tais parâmetros levam a uma tensão de 115 MPa, considerada com tensão solicitante inicial para o ELS.

A tensão solicitante (σ_s) efetivamente aplicada à estrutura nas condições de uso (viga em flexão), pode ser quantificada como:

$$\sigma_s = \frac{M_d}{W_i} \tag{4}$$

Sendo: M_d momento aplicado que é considerando constante e W_i o momento resistente atual do elemento, calculado conforme descrito no Quadro A e que será reduzido pela corrosão ao longo do tempo.

A Tabela B ilustra o que ocorre ao longo de 10 anos de emprego dos perfis U enrijecidos, com estimados para o uso da estrutura avaliada (Figuras 6 e 7), com mínima proteção por tinta. A taxa de corrosão média foi estimada como $r_{(corr)}$ = 122 µm/ano, considerando a Eq. (1) e utilizando os valores médios dos parâmetros da NBR 9223 [6]

- P_d = 75,6 g/(m^3·dia);
- RH = 63,5%;
- f_{st} = -0,95 (adim.);
- S_d = 380 g/(m^3·dia) e
- T = 28°C

Copyright © 2025 ISESC

Tabela B. Variação da tensão solicitante (σ_s) e do fator de segurança (f_s) ao longo de 10 anos de uso dos perfis U enrijecidos, como estimados no uso da estrutura avaliada (Figuras 6 e 7).

Banzo principal da treliça: Ue 200×75×25×2,65 (perfil menor)												
t =	2,65	2,60	2,55	2,50	2,45	2,39	2,34	2,29	2,24	2,19	2,14	mm
A =	1014	995	950	905	860	815	769	723	677	631	584	mm²
x_g =	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	mm
I_x =	622	611	584	558	531	504	477	449	421	393	365	cm⁴
W_x =	62	61	58	56	53	50	48	45	42	39	37	cm³
σ_s =	**115**	**117**	**122**	**128**	**135**	**142**	**150**	**159**	**170**	**182**	**196**	**MPa**
f_s =	**2,00**	**1,96**	**1,88**	**1,79**	**1,71**	**1,62**	**1,53**	**1,44**	**1,36**	**1,27**	**1,17**	**(adim.)**
Banzo principal da treliça: Ue 300×100×30×4,75 (perfil maior)												
t =	4,75	4,70	4,65	4,60	4,55	4,49	4,44	4,39	4,34	4,29	4,24	mm
A =	2512	2486	2425	2364	2302	2241	2179	2117	2055	1992	1930	mm²
x_g =	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	mm
I_x =	3341	3309	3232	3155	3078	3000	2921	2842	2763	2683	2602	cm⁴
W_x =	223	221	215	210	205	200	195	189	184	179	173	cm³
σ_s =	**115**	**116**	**119**	**122**	**125**	**128**	**132**	**135**	**139**	**143**	**148**	**MPa**
f_s =	**2,00**	**1,98**	**1,94**	**1,89**	**1,84**	**1,80**	**1,75**	**1,70**	**1,65**	**1,61**	**1,56**	**(adim.)**
Elementos secundários: Ue 100×50×20×2,00 (perfil menor)												
t =	2	1,95	1,90	1,85	1,80	1,74	1,69	1,64	1,59	1,54	1,49	mm
A =	454	443	416	390	363	336	309	282	254	227	199	mm²
x_g =	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	mm
I_x =	71	70	66	62	58	54	50	45	41	37	32	cm⁴
W_x =	14	14	13	12	12	11	10	9	8	7	6	cm³
σ_s =	**115**	**118**	**125**	**133**	**142**	**153**	**166**	**181**	**200**	**224**	**254**	**MPa**
f_s =	**2,00**	**1,95**	**1,84**	**1,73**	**1,62**	**1,51**	**1,39**	**1,27**	**1,15**	**1,03**	**0,91**	**(adim.)**
Elementos secundários: Ue 170×65×25×2,65 (perfil maior)												
t =	2,65	2,60	2,55	2,50	2,45	2,39	2,34	2,29	2,24	2,19	2,14	mm
A =	881	865	826	788	748	709	670	630	590	550	510	mm²
x_g =	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	mm
I_x =	388	381	365	349	332	315	299	281	264	247	229	cm⁴
W_x =	46	45	43	41	39	37	35	33	31	29	27	cm³
σ_s =	**115**	**117**	**122**	**128**	**134**	**141**	**150**	**159**	**169**	**181**	**195**	**MPa**
f_s =	**2,00**	**1,97**	**1,88**	**1,80**	**1,71**	**1,63**	**1,54**	**1,45**	**1,36**	**1,27**	**1,18**	**(adim.)**
tempo	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**anos**

Os resultados numéricos indicam que reduções relativamente moderadas de espessura podem resultar em incrementos expressivos das tensões atuantes, com potencial aproximação dos limites resistentes do material ($f_s \rightarrow 1$), especialmente para os elementos mais finos, como visto na prática (Figura 7). Essa constatação torna-se particularmente relevante quando associada às condições ambientais caracterizadas no Item 3.2 e às manifestações patológicas identificadas no Item 3.3, sobretudo em ambientes classificados com maior severidade de corrosão.

Nessas condições, a progressão da perda de seção ao longo do tempo tende a intensificar o aumento das tensões solicitantes, elevando o risco estrutural caso não sejam adotadas medidas adequadas de inspeção, manutenção ou reforço. Tal comportamento evidencia que a corrosão atmosférica, além de comprometer a durabilidade, afeta diretamente a segurança estrutural, reduzindo a margem de confiabilidade dos elementos analisados mesmo antes que ocorram colapsos visíveis ou falhas globais.

Essa abordagem tem caráter ilustrativo e visa evidenciar, de forma quantitativa, a relação direta entre a deterioração geométrica decorrente da corrosão e a redução da confiabilidade estrutural ao longo da vida útil da edificação. Com base nos resultados obtidos, a seção seguinte discute os mecanismos de deterioração observados e suas implicações para a confiabilidade estrutural da edificação analisada.

Copyright © 2025 ISESC

4. DISCUSSÃO

A discussão a seguir integra os resultados obtidos, relacionando as manifestações patológicas observadas aos mecanismos de deterioração e às implicações para a confiabilidade estrutural da edificação analisada.

4.1. Relação entre ambiente de exposição, mecanismos de deterioração e manifestações patológicas

A análise integrada dos resultados evidencia que as manifestações patológicas observadas na estrutura metálica analisada decorrem da interação entre as condições ambientais de exposição, as características geométricas e construtivas do sistema estrutural e a ausência de um programa sistemático de inspeção e manutenção. A caracterização do ambiente como pertencente às categorias de corrosividade atmosférica entre C3 (média) e C4 (alta), conforme a ISO 9223 [6], constitui um referencial técnico consistente para a interpretação dos mecanismos de deterioração identificados.

A literatura sobre patologia das construções destaca que, em ambientes caracterizados por elevada umidade relativa do ar e presença de agentes agressivos, a corrosão atmosférica do aço carbono tende a evoluir de forma progressiva, inicialmente com a degradação dos sistemas de proteção superficial e, posteriormente, com perda efetiva de seção resistente [3,7]. Esse processo é intensificado em regiões onde a geometria estrutural favorece o acúmulo de umidade, contaminantes e produtos de corrosão, como bases de elementos, interfaces metálicas, regiões nodais e ligações estruturais [4,5].

Do ponto de vista dos mecanismos físico-químicos, a intensificação dos processos eletroquímicos associados à presença simultânea de umidade e cloretos é coerente com os modelos clássicos de corrosão atmosférica descritos na literatura especializada [8, 14]. Em estruturas localizadas em ambientes costeiros ou sujeitos à influência marinha, estudos de caso relatam padrões semelhantes de corrosão acelerada [15], com ocorrência simultânea de corrosão uniforme e localizada, em consonância com as observações *in loco* apresentadas neste estudo.

As Figuras 5 e 7 ilustram, de forma complementar, essa relação entre ambiente, mecanismo e manifestação patológica. Enquanto a Figura 5 apresenta um modelo conceitual da formação de microambientes críticos, a Figura 7 documenta as consequências práticas desses mecanismos, evidenciando corrosão avançada e perda localizada de seção resistente em elementos estruturais da cobertura. Esse padrão de deterioração não homogêneo é amplamente descrito na literatura como característico de estruturas metálicas expostas a ambientes agressivos sem manutenção preventiva adequada [3, 16].

4.2. Implicações para a confiabilidade estrutural e estratégias de mitigação

Sob a ótica da confiabilidade estrutural, os resultados discutidos indicam que a avaliação do desempenho da edificação não pode se restringir às condições de projeto originalmente adotadas, devendo incorporar a evolução temporal dos mecanismos de deterioração. A perda progressiva de seção resistente observada em elementos estruturais críticos afeta diretamente a capacidade portante, a rigidez global do sistema e o comportamento das ligações, com reflexos tanto nos estados-limite de serviço quanto nos estados-limite últimos [1,5].

Manuais clássicos de projeto de estruturas de aço destacam que a redução da seção efetiva dos perfis, decorrente de processos corrosivos, deve ser considerada na avaliação da segurança estrutural, especialmente em estruturas existentes submetidas a longos períodos de exposição ambiental [Pinheiro]. Nesse contexto, as simulações apresentadas na Figura 6 permitem uma visualização prospectiva dos efeitos acumulados da corrosão ao longo de aproximadamente 10 anos, considerando diferentes soluções construtivas e níveis de proteção anticorrosiva, em consonância com os princípios de concepção estrutural e durabilidade [2,6].

A literatura técnica enfatiza que estratégias de mitigação baseadas exclusivamente em intervenções corretivas tendem a ser menos eficazes e economicamente mais onerosas do que abordagens preventivas. A adoção de programas sistemáticos de inspeção e manutenção, conforme diretrizes técnicas e normativas, é apontada como elemento central para a gestão da confiabilidade estrutural ao longo da vida útil [12, 17]. Nesse sentido, a identificação precoce de manifestações patológicas permite intervenções mais pontuais e tecnicamente adequadas, reduzindo o risco de evolução para estágios avançados de deterioração.

Assim, a integração entre diagnóstico técnico, compreensão dos mecanismos de deterioração e tomada de decisão fundamentada em confiabilidade emerge como requisito essencial para a preservação da segurança, do desempenho e da durabilidade de estruturas metálicas expostas a ambientes agressivos, conforme evidenciado pelos resultados dos estudos analisados.

A Figura 8 apresenta, de forma sintética, o fluxo de tomada de decisão recomendado na avaliação da

Copyright © 2025 ISESC

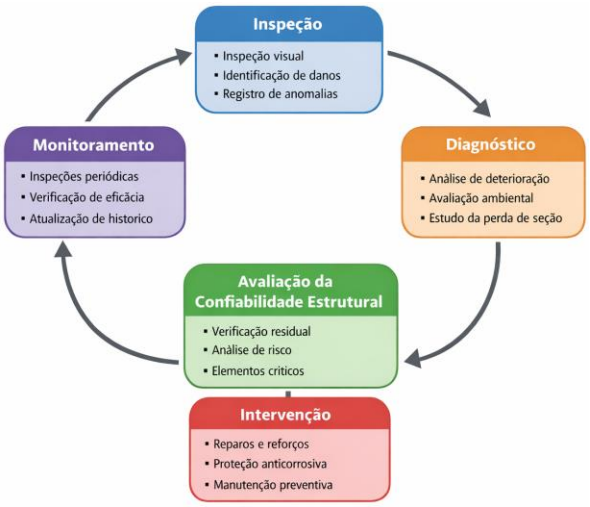


Figura 8. Fluxo de tomada de decisão para a confiabilidade estrutural de estruturas metálicas.

confiabilidade estrutural de estruturas metálicas ao longo da vida útil. As etapas iniciais de inspeção e diagnóstico estão diretamente associadas à caracterização da estrutura e do ambiente de exposição (Itens 3.1 e 3.2) e à identificação e classificação das manifestações patológicas observadas *in loco* (Item 3.3).

A partir dessas informações, procede-se à avaliação da confiabilidade estrutural, que subsidia a definição de estratégias de intervenção compatíveis com o grau de deterioração identificado. O fluxo evidencia ainda o caráter cíclico e contínuo do processo, no qual ações de intervenção devem ser acompanhadas por monitoramento sistemático, assegurando a manutenção do desempenho estrutural em ambientes de elevada agressividade.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho demonstrou que a confiabilidade estrutural de estruturas metálicas expostas à corrosão atmosférica deve ser analisada de forma evolutiva, considerando a interação entre ambiente, geometria estrutural e estratégias de proteção e manutenção. Em ambientes classificados entre C3 e C4 segundo a ISO 9223, a corrosão atmosférica mostrou-se capaz de promover perda progressiva de espessura e redução relevante da capacidade resistente, mesmo em prazos moderados de exposição.

A integração entre os modelos de corrosão da ISO 9223 [6] e as equações geométricas da ABNT NBR 6355 [9] permitiu estabelecer uma relação quantitativa entre agressividade ambiental e desempenho estrutural residual. Os exemplos numéricos indicaram que reduções graduais de espessura podem resultar em aumentos significativos das tensões solicitantes, reduzindo as margens de segurança originalmente previstas em projeto.

Os resultados evidenciam que a corrosão atmosférica não deve ser tratada apenas como um problema de durabilidade, mas como um fator diretamente associado à segurança estrutural. A abordagem integrada proposta, baseada em inspeção, diagnóstico patológico e avaliação quantitativa da perda de integridade, oferece subsídios técnicos consistentes para a gestão de estruturas existentes.

Conclui-se que a adoção de programas sistemáticos de inspeção e manutenção preventiva, apoiados por modelos normativos de corrosão e desempenho estrutural, é essencial para preservar a confiabilidade, a segurança e a vida útil de estruturas metálicas em ambientes atmosféricos agressivos.

REFERÊNCIAS

[1] PFEIL, Walter; PFEIL, Michele. *Estruturas de aço: dimensionamento prático*. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

[2] VOLPATO, Olidio Renato. *Curso básico de concepção estrutural para estruturas metálicas*. Porto Alegre: Evangraf, 2022.

[3] BOLINA, Fabricio Longhi; TUTIKIAN, Bernardo Fonseca; HELENE, Paulo Roberto do Lago. *Patologia de estruturas*. São Paulo: Oficina de Textos, 2019.

[4] XEREZ NETO, Jary de; CUNHA, Alex Sander. *Estruturas metálicas: manual prático para projetos, dimensionamento e laudos técnicos*. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2020.

[5] QUEIROZ, Geraldo; VILELA, Paulo Márcio Lacerda. *Ligações, regiões nodais e fadiga de estruturas de aço*. Belo Horizonte: Código Editora, 2012.

[6] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 9223***: Corrosion of metals and alloys — Corrosivity of atmospheres — Classification, determination and estimation*. Geneva: ISO, 2012.

[7] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 9225**: *Corrosion of metals and alloys — Corrosivity of atmospheres — Measurement of environmental parameters affecting corrosivity of atmospheres*. Geneva: ISO, 2012.

[8] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 9226**: *Corrosion of metals*

Copyright © 2025 ISESC

and alloys — Corrosivity of atmospheres — Determination of corrosion rate of standard specimens for the evaluation of corrosivity. Geneva: ISO, 2012.

[9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6355**: *Perfis de aço formados a frio - Padronização*. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

[10] AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE (AISI). *Design of Cold-Formed Steel Structures*. 2016 ed. Washington, DC: AISI, 2016.

[11] AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. *Steel Construction Manual*. 15th ed. Chicago: AISC, 2017.

[12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 10921: Inspeção de estruturas de aço — Procedimento*. 4. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

[13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações*. 3. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

[14] GENTIL, Vicente. *Corrosão*. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

[15] SOARES, André J.; DIAS, Marcos M.; FONSECA, Rodrigo R. Análise de patologias em estruturas metálicas expostas à atmosfera marinha. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, São Paulo, v. 14, n. 6, p. 1129–1144, 2021.

[16] MARQUES, Eduardo P.; PINHEIRO, Lucas M. *Patologia das estruturas metálicas: diagnóstico, prevenção e recuperação*. São Paulo: Oficina de Textos, 2018.

[17] PINHEIRO, Lucas M.; PAES, Luís E. T. Inspeção e manutenção de estruturas metálicas: diretrizes práticas. *Revista ALCONPAT*, v. 9, n. 2, p. 139–152, 2019.

Copyright © 2025 ISESC