

Inspeção de estruturas de aço

Adriana de Araujo ^{1*}, Maurício Silveira Martins ², Marcio A. Bispo ³, Alexandre Beltrame ⁴

^{1,3} Instituto de Pesquisas Tecnológicas Escola/ Laboratório de Corrosão e Proteção, aaraujo@ipt.br

² Gerdau Aços Brasil, mauricio.martins@gerdau.com.br

⁴ Beltrame Engenharia, alexandre@beltrame.eng.br

Inspection of Steel Structures

Resumo

Na concepção de projetos de estruturas metálicas, o aço-carbono é amplamente preferido devido à sua resistência mecânica e versatilidade. Contudo, sua elevada suscetibilidade à corrosão atmosférica pode comprometer prematuramente a durabilidade e a segurança das estruturas, caso não sejam adotadas medidas de proteção adequadas. Para essa proteção, é comum aplicar revestimentos anticorrosivos e estabelecer rotinas de manutenção que são orientadas por inspeções técnicas que permitem a detecção precoce da corrosão e a avaliação da integridade dos revestimentos protetores. Este artigo explora a inspeção, a corrosão atmosférica e discute as principais formas de corrosão que afetam o aço-carbono, bem como revestimentos de proteção por pintura (revestimento orgânico) e por galvanização (revestimento de zinco por imersão a quente) e defeitos recorrentes.

Palavras-chave: Corrosão. Revestimento orgânico. Galvanização. Ensaios de campo. Defeitos

Abstract

Carbon steel is widely preferred in the design of steel structure projects due to its mechanical strength and versatility. However, its high susceptibility to atmospheric corrosion can prematurely compromise the durability and safety of the structures if adequate protective measures are not adopted. To protect against this, it is common to apply anticorrosive coatings and establish maintenance routines guided by technical inspections that allow for the early detection of corrosion and the assessment of the integrity of protective coatings. This article explores inspection, and atmospheric corrosion and discusses the main forms of corrosion that affect carbon steel, as well as protective coatings through painting (organic coating) and galvanization (hot-dip zinc coating), and recurring defects

Keywords: Corrosion. Organic coating. Galvanized. Field tests. Defects.

* autor correspondente

1 Introdução

A inspeção de estruturas metálicas expostas à atmosfera (estruturas aéreas) é um processo que geralmente se inicia com a análise da documentação técnica disponível e a coleta de informações relevantes sobre a estrutura, como seu histórico de manutenção e as características do projeto e de utilização. Frequentemente, realiza-se

uma visita preliminar ao local, com o objetivo de reconhecer a estrutura e avaliar o ambiente circundante. Com base nesses dados, é elaborado um plano de inspeção que detalha as ferramentas e equipamentos necessários, bem como os meios de acesso aos elementos da estrutura para a observação visual.

Essa observação é geralmente realizada de forma direta (a vista desarmada), com o registro detalhado do quadro patológico por meio de planilhas descritivas e fotografias. Em algumas situações, é necessário executar ensaios complementares para obter um diagnóstico preciso e fornecer as melhores recomendações técnicas de manutenção.

Na prática, muitas vezes se observa a corrosão da estrutura, mesmo que somente em áreas localizadas. A corrosão se destaca como um dos principais processos de degradação devido à sua natureza progressiva. Esse fenômeno, discutido mais adiante, causa uma perda gradual da seção resistente em elementos estruturais, conexões e ligações, podendo, em casos extremos, comprometer a integridade da estrutura e levar a rupturas. Portanto, as áreas de metal corroído demandam atenção especial.

Quando se observam indícios de corrosão intensa, é fundamental determinar a espessura remanescente do aço (seção residual). Essa avaliação pode ser realizada por métodos manuais ou por ultrassom, conforme estabelecido na ABNT NBR 15824:2020. Além disso, outros ensaios podem ser conduzidos, como a avaliação do torque das ligações e a identificação de descontinuidades superficiais (ABNT NBR 15691:2009) e subsuperficiais (ABNT NBR 6002:2015). Adicionalmente, podem ser realizados ensaios no revestimento de proteção superficial, além da identificação de defeitos.

A inspeção pode contemplar a extração de amostras para verificar a composição química do metal e caracterizar sua microestrutura em laboratório. Esse último é realizado com o uso de um microscópio óptico, a partir da preparação de corpos de prova metalográficos. Nos mesmos corpos de prova, é possível avaliar detalhadamente a morfologia da corrosão. Durante a inspeção, é possível realizar a raspagem de superfícies para análises químicas, objetivando identificar possíveis contaminantes. Para tanto, utiliza-se a espectroscopia de dispersão de energia (EDS- MEV) e a difratometria de raios X (DRX) para identificar os compostos presentes.

2 Corrosão atmosférica

A corrosão atmosférica é um processo de natureza eletroquímica, sendo essencial a presença de água (eletrólito) na superfície do metal. Essa água pode se manifestar como uma fina camada resultante da chuva, da condensação ou da adsorção (Roberge, 2011). No entanto, a presença de água na superfície metálica não é permanente, o que torna a corrosão atmosférica um processo descontínuo (Philip; Schweitzer, 1999).

O período em que a água permanece sobre a superfície do metal é conhecido como tempo de molhamento, o qual é influenciado por diversos fatores, incluindo a umidade relativa do ar, a temperatura ambiente, a intensidade e a frequência de ventos e chuvas, além da geometria do elemento e das condições de sua superfície. Os ventos têm efeito na distribuição e deposição de partículas e contaminantes corrosivos. Quando ocorre a incidência intensa de vento, contendo partículas de sal e areia, o metal está sujeito a um processo abrasivo. Essa ação combinada desencadeia um intenso processo de corrosão-erosão em revestimentos de zinco.

Quanto à chuva, é crucial considerar que a água pode escorrer sobre a superfície metálica exposta, removendo produtos de corrosão e materiais particulados. Roberge (2011) expõe que a água de chuva nem sempre é corrosiva. Por outro lado, os níveis de umidade relativa que causam orvalho e condensação são sempre indesejáveis do ponto de vista da corrosão, caso não sejam acompanhados de chuvas frequentes que lavem e diluam ou eliminem a contaminação da superfície. Expõe que os materiais particulados também podem aumentar o tempo de molhamento, bem como reter espécies agressivas gasosas e/ou sais solúveis que aceleram a corrosão, por exemplo, modificar a natureza dos produtos de corrosão, tornando-os menos protetores.

Os cloretos são frequentemente encontrados em ambientes marinhos. Sua presença é principalmente atribuída à contaminação do ar por gotículas de água do mar, comumente chamadas de névoa salina ou maresia. Essas gotículas são geradas pela movimentação das ondas do mar, sendo lançadas na atmosfera e transportadas por correntes de ar, podendo secar ao longo do caminho. Quando essas gotículas se depositam sobre superfícies metálicas, os sais marinhos ou os cristais formados aumentam a condutividade da água de molhamento. No caso de ambientes de alta

incidência de ventos intensos, mesmo com pouca contaminação com areia, o aço ou o revestimento de zinco podem sofrer um processo acentuado de desgaste.

É importante mencionar que, no caso da água do mar, além do cloreto de sódio, há também a presença de cloreto de cálcio e de magnésio. Esses dois últimos são altamente higroscópicos, ou seja, têm a capacidade de reter água mesmo com uma umidade relativa de cerca de 30 %, enquanto o cloreto de sódio puro só retém água com uma umidade relativa em torno de 80 %. Essa característica contribui para a alta agressividade da água do mar (Panossian, 1993).

O SO_2 é gerado principalmente pela queima de combustíveis que contêm enxofre ou pela oxidação atmosférica do gás sulfídrico (H_2S). O H_2S é característico de ambientes em que ocorre a decomposição de material orgânico (condições anaeróbicas), como rios poluídos, estações de tratamento de esgoto e indústrias de biogás. A intensidade de ataque à superfície metálica é fortemente influenciada pela concentração do SO_2 na atmosfera e pelo tipo de material particulado presente na superfície metálica. Em condições de elevada concentração, quando o metal está coberto com uma fina camada de água e está em contato com materiais depositados, especialmente fuligem (alta capacidade de adsorção de SO_2), ocorre a formação de compostos ácidos, intensificando o processo corrosivo (Philip; Schweitzer, 1999).

Outros poluentes também desempenham um papel significativo na corrosividade da atmosfera, incluindo óxidos de nitrogênio (NO_x) e ácido nítrico (HNO_3). Em ambientes industriais, é comum encontrar altas concentrações desses poluentes, o que pode agravar ainda mais os riscos de corrosão nas estruturas metálicas. Roberge (2011) descreve que NO_x , SO_2 e partículas de aerossol no ar podem reagir com umidade, oxigênio e luz ultravioleta (UV) para formar novos produtos químicos em aerossóis.

2.1 Classificação da corrosividade da atmosfera

O conhecimento da corrosividade de uma atmosfera é fundamental para o desenvolvimento de projetos de estruturas metálicas e para a especificação de materiais mais resistentes. Em razão disso, uma etapa de grande importância é a classificação das atmosferas, que segundo a norma ABNT NBR ISO 9223:2024 pode ser feita por duas formas: com base na taxa de corrosão de materiais de referência

(metais-padrões de aço-carbono, zinco, cobre e alumínio) e com base na concentração de poluentes e de fatores climáticos.

A Tabela 1 apresenta as categorias de corrosividade dessa norma, enquanto a Tabela 2 apresenta as taxas de corrosão (r_{corr}) do aço-carbono e do zinco para o período de um ano de ensaio de campo no local de interesse. Quando isso não é viável, a corrosividade pode ser estimada com base da taxa de deposição média anual de íons cloreto (Cl^-) (conforme ABNT NBR 6211:2001) ou de dióxido de enxofre (SO_2) (segundo a ABNT NBR 6921:2002), além da determinação do valor médio anual da temperatura e da umidade relativa do ambiente (ao ar livre). A medição de parâmetros ambientais relevantes é especificada na ISO 9225:2012.

Tabela 1 – Categorias de corrosividade da atmosfera de acordo com a norma ABNT NBR ISO 9223:2024

| Categoria | Corrosividade | Atmosferas internas típicas | Atmosferas externas típicas |
|-----------|--------------------|---|--|
| C1 | Muito baixa | Espaços aquecidos com baixa umidade relativa e poluição insignificante, por ex. escritórios, escolas, museus. | Zona seca ou fria, ambiente atmosférico com poluição e tempo de molhamento muito baixos. |
| C2 | Baixa | Espaços não aquecidos com temperatura e umidade relativa variáveis. Baixa frequência de condensação e baixa poluição, por ex. armazenamento, pavilhões desportivos. | Zona temperada, ambiente atmosférico com baixa poluição ($SO_2 < 5 \mu g/m^3$). Zona seca ou fria, ambiente atmosférico com curto período de molhamento. |
| C3 | Média | Espaços com frequência moderada de condensação e poluição moderada do processo de produção, por ex. fábricas de processamento de alimentos, lavanderias, cervejarias, laticínios. | Zona temperada, ambiente atmosférico com poluição média ($SO_2: 5 \mu g/m^3$ a $30 \mu g/m^3$) ou algum efeito de cloretos. Zona subtropical e tropical, atmosfera com baixa poluição. |
| C4 | Alta | Espaços com alta frequência de condensação e alta poluição do processo de produção, por ex. plantas de processamento industrial, piscinas. | Zona temperada, ambiente atmosférico com elevada poluição ($SO_2: 30 \mu g/m^3$ a $90 \mu g/m^3$) ou efeito substancial de cloretos. Zona subtropical e tropical, atmosfera com poluição média. |
| C5 | Muito alta | Espaços com frequência muito elevada de condensação e/ou com elevada poluição proveniente do processo de produção, por ex. minas, cavernas para fins industriais, galpões não ventilados em zonas subtropicais e tropicais. | Zona temperada e subtropical, ambiente atmosférico com poluição muito elevada ($SO_2: 90 \mu g/m^3$ a $250 \mu g/m^3$) e/ou efeito significativo de cloretos. |
| CX | Extrema | Espaços com condensação quase permanente ou longos períodos de exposição a efeitos de humidade extrema e/ou com elevada poluição proveniente do processo de produção, por ex. galpões não ventilados em zonas tropicais úmidas com penetração de poluição externa, incluindo cloretos transportados pelo ar e material particulado que estimulam a corrosão | Zona subtropical e tropical (período de molhamento muito elevado), ambiente atmosférico com poluição muito elevada de SO_2 (superior a $250 \mu g/m^3$) incluindo fatores existentes e de produção e/ou forte efeito de cloretos. |

Tabela 2 – Taxas de corrosão do aço-carbono e do zinco após um ano de exposição (r_{corr}) para diferentes categorias de corrosividade das atmosferas (ABNT NBR ISO 9223:2024).

| Metal padrão | Unidade | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | CX |
|--------------|-----------------------|---------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| Aço-carbono | g/(m ² ·a) | $r_{corr} \leq 10$ | $10 < r_{corr} \leq 200$ | $200 < r_{corr} \leq 400$ | $400 < r_{corr} \leq 650$ | $650 < r_{corr} \leq 1500$ | $1500 < r_{corr} \leq 5500$ |
| | μm/a | $\leq 1,3$ | $1,3 < r_{corr} \leq 25$ | $25 < r_{corr} \leq 50$ | $50 < r_{corr} \leq 80$ | $80 < r_{corr} \leq 200$ | $200 < r_{corr} \leq 700$ |
| Zinco | g/(m ² ·a) | $r_{corr} \leq 0,7$ | $0,7 < r_{corr} \leq 5$ | $5 < r_{corr} \leq 12$ | $12 < r_{corr} \leq 25$ | $25 < r_{corr} \leq 50$ | $50 < r_{corr} \leq 90$ |
| | μm/a | $\leq 0,1$ | $0,1 < r_{corr} \leq 0,7$ | $0,7 < r_{corr} \leq 2,1$ | $2,1 < r_{corr} \leq 4,2$ | $4,2 < r_{corr} \leq 8,4$ | $8,4 < r_{corr} \leq 25$ |

Segundo também a norma ABNT NBR ISO 9223:2024, a categoria de corrosividade determinada a partir dos corpos de prova expostos em campo reflete a condição ambiental específica do local avaliado, no período de exposição. Já a categoria de corrosividade estimada é influenciada pela incerteza das equações utilizadas para calcular a taxa de corrosão a partir de dados ambientais. Essas divergências podem estar relacionada com o fato de que a estimativa da corrosividade é feita considerando apenas a presença de cloretos e de sulfatos como agentes agressivos. No entanto, há muitos outros tipos de poluentes, que também influenciam a corrosividade da atmosfera, tais como os citados NO_x, HNO₃ e fuligem, em zonas povoadas e industriais ou ainda poluição específica de microclimas, como sulfeto de hidrogênio (H₂S) e ácidos orgânicos.

Como descreve a norma ISO 9224:2012, a taxa de corrosão diminui com o tempo de exposição para a maioria dos metais e ligas, devido ao acúmulo de produtos de corrosão na superfície do metal exposto. Para o aço, a proteção superficial conferida por camadas de ferrugem é fortemente influenciada pelos elementos de liga presentes na sua composição. Aços patináveis, em particular, possuem adições específicas de elementos de liga para promover a formação de uma camada protetora de ferrugem que se desenvolve durante a exposição. Outros aços-carbono e aços de baixo carbono variam significativamente em seu desempenho em exposições atmosféricas, dependendo do conteúdo específico de liga.

As ligas de zinco variam significativamente em seu desempenho atmosférico, no entanto, em praticamente todos os tipos de atmosferas, a resistência à corrosão é muito superior à do aço-carbono. Quando o revestimento de zinco é exposto em atmosferas limpas (presença de O₂, de CO₂ e de água), inicialmente, forma-se sobre a

superfície hidróxido de zinco, que é convertido em carbonatos de zinco e carbonatos básicos de zinco, que são produtos de corrosão insolúveis. Se a atmosfera estiver levemente contaminada com SO₂, o hidróxido de zinco é convertido em sulfato básico de zinco, ao passo que se estiver contaminada com cloretos, o hidróxido é convertido em cloretos básicos de zinco. Em ambos os casos, os compostos (sulfatos e cloretos) são insolúveis e, também, formam uma barreira que protege contra a corrosão (Panossian, 1993).

Em ambientes com alta concentração de SO₂ e NaCl, a formação de produtos de corrosão de caráter protetor na superfície do revestimento de zinco é comprometida. No caso de compostos de enxofre, a camada de água existente na superfície do revestimento torna-se ácida e o principal produto formado será o sulfato de zinco, que é solúvel em água e, portanto, não forma uma barreira efetiva contra a corrosão. No caso de contaminação com NaCl, como em regiões próximas ao mar, a camada de água da superfície do revestimento ficará saturada com este sal, propiciando maior período de molhamento. Características não protetoras do filme também ocorre pela exposição a gotas de água que se acumulam, como em elementos abrigados, em microambiente com restrição de ventilação e sujeitos a variações de temperatura (Panossian, 1993).

Como o avanço da corrosão do revestimento de zinco, o substrato de aço-carbono é exposto ao ambiente. Inicialmente, isso ocorre apenas em regiões de descontinuidades no revestimento, seja pelo desgaste total do zinco ou por danos mecânicos. Nessas regiões, o aço-carbono pode ser temporariamente protegido pela mencionada ação galvânica, o que aumenta o consumo do zinco ao redor das áreas desprotegidas. Com o passar do tempo, a área de exposição do aço aumenta progressivamente, tornando-se insuficiente para que a proteção galvânica seja efetiva, o que favorece o início de sua corrosão (corrosão vermelha).

3 Formas de corrosão

Quando um metal está em contato elétrico com uma solução agressiva (eletrólito), ocorre espontaneamente duas reações simultâneas: reação anódica – **A**, de corrosão do metal, que no caso do aço seria oxidação do ferro: $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$; e a reação catódica – **C**, de redução de oxigênio: $\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ em solução levemente

ácida e $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$ em solução neutra ou alcalina. Entre as áreas **A** (anodo) e as áreas **C** (catodo) se estabelece uma corrente elétrica. Esse arranjo é chamado de célula de corrosão, sendo comum a todos os tipos de corrosão eletroquímica, alguns deles apresentados a seguir.

A **corrosão uniforme** é frequentemente observada em metais mais reativos, como aço e zinco, quando expostos a ambientes corrosivos. Geralmente, essa corrosão afeta as superfícies expostas, que apresentam taxas de corrosão da mesma ordem de grandeza em toda a área afetada. As mencionadas áreas **A** e **C** da célula de corrosão estão distribuídas aleatoriamente e de forma dinâmica ao longo da superfície. O surgimento dessas áreas está relacionado à heterogeneidade da superfície do metal ou do meio.

A **corrosão uniforme** pode ser considerada generalizada, pois a perda de espessura não é totalmente uniforme ao longo da superfície afetada (Panossian, 1993). No entanto, a palavra generalizada é mais usual para referenciar que a corrosão compreende toda a área inspecionada do elemento. Como exemplo, a presença maciça de pequenas cavidades ao longo do elemento por ataque de cloretos (**corrosão por pite generalizada**) ou a presença de cavidades maiores, com formação de alvéolos (**corrosão alveolar generalizada**) (Gentil, 1996).

A Figura 1 apresenta uma **corrosão uniforme generalizada** de baixa intensidade, ou seja, somente uma perda superficial de espessura ao longo de elementos, sem nenhum tipo de revestimento de proteção superficial. A Figura 2, apresenta a mesma **corrosão**, porém de maior intensidade e somete em regiões localizadas de quina e de união de elementos revestidos. A união é uma região que propicia para formação de fresta, desencadeando uma corrosão localizada (**corrosão em fresta**).

Quando ocorre um intenso ataque corrosivo da superfície do aço, é possível que seus produtos volumosos formem placas paralelas à superfície, podendo esta ser chamada de **corrosão por esfoliação** (Gentil, 1996). Outra forma de descrevê-la é como uma **corrosão intensa** ou **severa**, aplicável quando do acúmulo significativo de produtos de corrosão e/ou uma clara perda expressiva do metal. Essa perda pode também ser decorrente, por exemplo, da formação de cavidades arredondadas com profundidades menores que o seu diâmetro, chamada de **corrosão alveolar** (Gentil, 1996). É possível

que os alvéolos evoluam em áreas localizadas de maneira a resultar em perfurações, denominada de **corrosão perfurante** (Gentil, 1996).



Figura 1 - **Corrosão uniforme** de baixa intensidade ao longo de aço sem revestimento.



Figura 2 - **Corrosão uniforme** intensa de aço exposto em regiões localizadas de união entre elementos e quinas de elemento revestido

A Figura 3 mostra um caso de **corrosão severa** que pode também ser chamada de **corrosão por esfoliação**, que se refere a desintegração do material em forma de placas paralelas à superfície do metal (Gentil, 1996). Observa-se a delaminação dos produtos de corrosão ao longo de quinas, região normalmente de maior molhamento e de maior variação da espessura do revestimento de proteção superficial.

As Figuras 4, 5 e 6 ilustram casos de formação de alvéolos (**corrosão alveolar**) e de perfurações (**corrosão perfurante**). Na Figura 6, observa-se restrição de produtos de corrosão, carreamento pelo impacto e escorrimento da água (desgaste mecânico). Esse evento, em associado à exposição a um meio corrosivo, leva a corrosão chamada de **corrosão-erosão** (ISO 8044:2020). O desgaste por erosão ocorre pelo movimento de um fluido com sólidos arrastados. Fluido com ar ou gás também incorporado exercem ação erosiva, por cavitação ou por impacto (Gentil, 1996).

Um mecanismo importante de corrosão localizada é a resultante da ação de cloretos, chamada de **corrosão por pite**. Os pites são pequenas áreas ativas de corrosão, que podem se distribuir isoladamente ou se agrupar, formando cavidades maiores, como os alvéolos mencionados. A nucleação de pites tende a ocorrer em áreas de maior heterogeneidade da superfície exposta do metal em contato com água contaminada com cloretos. Isso inclui regiões onde se formam depósitos de material particulado e produtos de corrosão permeáveis. Esses depósitos podem criar frestas, que são

aberturas estreitas, frequentemente formadas entre a superfície do metal e outra superfície, metálica ou não (ISO 8044:2020). A Figura 7 apresenta pequenas de cavidades, com acúmulo de produtos de corrosão do aço, formadas a partir da nucleação de pites



Figura 3 - **Corrosão severa** em aço exposto em regiões de quinas e elementos de fixação.



Figura 4 - **Corrosão severa** em aço exposto, com incidência de alvéolos rasos.



Figura 5 - **Corrosão perforante** em regiões de aço revestido.

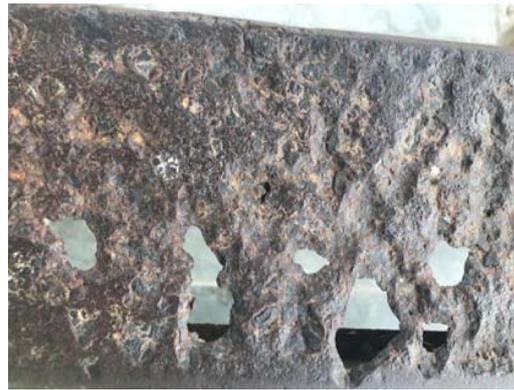
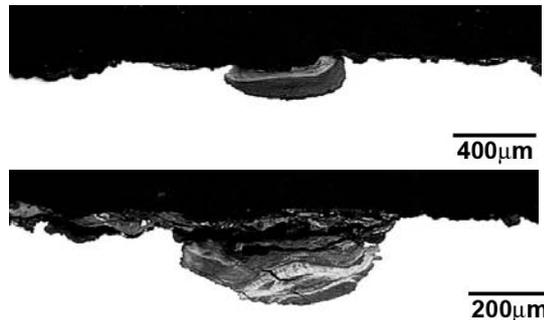


Figura 6 - **Corrosão perforante** em aço exposto.



Imagens geradas da seção transversal com uso de microscópio confocal

Figura 7 - **Corrosão por pite** generalizada. Observa-se pequenas cavidades e produtos de corrosão ao longo da superfície do aço. Nas imagens microscópicas, verificou-se uma variação de geometria e de profundidade das cavidades, parte delas com produtos de corrosão.

No caso da mencionada **corrosão em fresta**, esta pode ocorrer pelo simples fato do local ser propício à retenção de água por maior período do tempo, portanto, prover um maior tempo de molhamento da superfície do aço. Essa também se configura pela formação de uma célula oclusa, em que a solução da área **A** (anodo da célula de corrosão) tem dificuldade de se misturar com a da área **C** (catodo da célula de corrosão), estabelecendo-se uma diferença de composição e pH. As Figuras 8 e 9 apresentam casos de **corrosão em fresta**. Na Figura 8, observa-se também que os elementos estão galvanizados e apresentam **corrosão branca** (discutida mais adiante). Na Figura 9, observa-se também uma região com perfuração de um dos elementos.



Figura 8 - **Corrosão em fresta** com manchas de escoamento dos produtos de corrosão do aço a partir da união de elementos.



Figura 9 - **Corrosão em fresta** ao longo da união de elementos de aço revestido, formando uma fresta. Observa-se uma **corrosão perforante**.

Outro mecanismo de corrosão é o estabelecido pelo contato elétrico entre metais dissimilares imersos no mesmo meio, que é chamado de **corrosão galvânica**. Como toda célula de corrosão, é estabelecida uma diferença de potencial entre a área **A** (metal menos nobre) e a **C** (metal mais nobre), sendo esta diferença a força motriz para a dissolução eletroquímica do metal menos nobre (área **A** da célula galvânica). A corrosão será tão mais intensa quanto mais distante for a nobreza dos metais (ISO 8044:2020). A natureza e as características do meio também influenciam, inclusive qual dos metais será corroído preferencialmente e, ainda, o grau e a extensão da proteção galvânica conferida ao metal mais nobre (área **C** da célula galvânica).

A **corrosão galvânica** em estruturas aéreas geralmente se restringe a uma área estreita do metal anódico, próxima à junção bimetálica. Isso ocorre devido à alta resistência da fina camada formada pela condensação de água ou pela chuva. Mesmo em casos de metais altamente incompatíveis, a ação galvânica direta não se estende por mais do

que alguns milímetros a partir da junção. Essa ação é mais pronunciada em estruturas exposta a atmosferas marinhas, em que a alta condutividade da água contaminada com cloretos intensifica o processo corrosivo (Zhang, 2000).

Esse tipo de corrosão pode ser observada em regiões de contato de estrutura de aço galvanizado (que ainda preservam a camada de zinco) com elementos de fixação de aço zincado eletrolítico (que já perdeu a camada fina de zinco eletrolítico) ou elementos de metais mais nobres, como em cabos de aterramento de cobre, utilizado sem encapsulamento ou isolamento elétrico. Um exemplo desse fenômeno pode ser visualizado na Figura 10.

Muitas vezes é também considerada **corrosão galvânica** quando há deposição de produtos de corrosão de metais mais nobres, como do cobre sobre o aço ou aço zincado; nesse caso, o termo mais apropriado seria **corrosão por deslocamento galvânico**, (Panossian, 1993), ilustrado na Figura 11.



Figura 10 - **Corrosão galvânica** devido ao contato elétrico do revestimento de zinco com chapa de cobre do sistema de aterramento.



Figura 11 - **Corrosão por deslocamento galvânico** do revestimento de zinco em contato com depósito de produtos de corrosão do cabo de cobre de sistema de aterramento.

Cita-se ainda a **corrosão galvânica** em juntas soldadas, em que há diferenças nas composições e microestruturas. Essa situação pode ser denominada **corrosão preferencial em juntas soldadas**, afetando tanto o metal de solda (MS) quanto a zona termicamente afetada (ZTA), devido à diferença no potencial eletroquímico em relação ao metal de base (MB).

Cabe ressaltar que a **corrosão por deslocamento galvânico** e **corrosão preferencial em juntas soldadas** não são usualmente verificadas durante as inspeções de estruturas. Muitas vezes, isso também é válido para a corrosão sob fadiga e sob tensão, a saber:

- **Corrosão sob fadiga:** ataque localizado que acontece no metal submetido a cargas alternadas ou cíclicas, geralmente abaixo do limite de escoamento, e colocado em contato com um meio corrosivo, especialmente aquele que resulta na nucleação de pites. Nesse tipo de ataque, espera-se a formação de uma pequena trinca, geralmente num ponto de concentração de tensões, em direção perpendicular à tensão (Gentil, 1996). No caso de estruturas de aço, a fadiga assistida por corrosão não é muito usual e sua avaliação não é tarefa fácil, exigindo a realização de ensaios específicos. Como exemplo de estruturas sensíveis ao fenômeno, citam-se pontes sujeitas a cargas cíclicas devido ao próprio tráfego de veículos e ação do vento;
- **Corrosão sob tensão:** ataque localizado que acontece no metal submetido a tensão de tração, aplicada ou residual do processo de fabricação, que é colocado em contato com um meio corrosivo específico para cada liga metálica. Ocorre também sem indicação de uma fratura iminente porque as trincas, intergranulares ou transgranulares, se desenvolvem com quase nenhuma evidência de produtos de corrosão (Ramanathan, 1988). Nas estruturas de aço, é mais provável em estruturas protendidas, como em cabos de pontes estaiadas.

Na prática, as estruturas metálicas estão sujeitas a diversos processos de degradação que comprometem sua durabilidade e apresentam riscos à segurança. Entre as anomalias típicas que não decorrem da corrosão, destacam-se as deficiências nas ligações entre elementos, como folgas ou rupturas de parafusos e rebites (Figura 12). Outras anomalias comuns incluem danos a elementos estruturais, como ruptura (Figura 13) e empenamentos, que podem ocorrer devido a impactos ou esforços pontuais, como mostrado nas Figuras 14 e 15.



Figura 12 - **Ruptura** de rebite e de cantoneira de ligação e corrosão na área do dano.



Figura 13 - **Ruptura** de elemento e corrosão na área do dano.



Figura 14 - **Deformação** por esforços não previstos e corrosão ao longo dos elementos.



Figura 15 - **Deformação** por impacto de elemento e corrosão na área do dano.

4 Revestimento por pintura e por zincagem por imersão a quente

Dada a ampla utilização de elementos de aço-carbono em estruturas expostas à atmosfera, é essencial aplicar uma barreira protetora entre o metal e o ambiente para prevenir a corrosão. Para essa finalidade, revestimentos por pintura e por zincagem (galvanização), ou uma combinação de ambos são comumente empregados. Assim, é importante que o profissional responsável pela inspeção tenha um conhecimento básico sobre esses tipos de revestimentos e, principalmente, sobre os defeitos mais frequentes que podem ocorrer. A seguir, discutem-se as características desses revestimentos e os principais defeitos observados.

4.1 Revestimento orgânico – pintura

Os revestimentos orgânicos são amplamente utilizados para a proteção superficial anticorrosiva de estruturas expostas a atmosferas em geral. Essa proteção é alcançada por meio da formação de uma película contínua e uniforme que atua como uma barreira física, limitando a penetração de agentes agressivos. A película resulta da combinação de diferentes camadas de tintas em um esquema de pintura. Para tanto, existe uma grande variedade de formulações químicas de tintas que estão em constante evolução, associando tecnologias mais modernas do ponto de vista ambiental com melhor desempenho, rendimento e produtividade.

Entre as formulações, as tintas de base epóxi e ou as poliuretânicas são as mais conhecidas e tradicionalmente aplicadas na proteção de estruturas de aço. As tintas à base de resina epóxi destacam-se por suas excelentes propriedades de resistência

química e boa resistência à umidade. Já as tintas de poliuretano são reconhecidas por seu desempenho superior, especialmente em resistência química, além de um acabamento estético devido à maior retenção de brilho e cor, resultante da sua excelente resistência à radiação ultravioleta (poliuretano alifático).

O esquema de pintura para estruturas aéreas pode incluir ambas as tintas (ISO 12944-5:2019; ISO 11303:2002). Normalmente, a tinta de poliuretano é utilizada como acabamento, ficando exposta à atmosfera, enquanto a tinta epóxi é aplicada como camada intermediária ou de fundo (primer), podendo exercer dupla função quando aplicada em alta espessura. A camada intermediária tem a função de aumentar a espessura da película, reforçando a barreira física contra agentes corrosivos. A tinta de fundo promove aderência e proteção anticorrosiva ao substrato de aço, podendo ser uma tinta epóxi-alumínio ou uma tinta rica em zinco de nova geração.

Outra alternativa é a tinta poliaspártica, que atua tanto como fundo quanto como acabamento, proporcionando uma película de alto brilho e resistência química e à radiação ultravioleta. O polisiloxano também merece destaque, pois confere às superfícies pintadas características como facilidade de remoção de sujeiras e alta resistência ao intemperismo e à degradação, oferecendo retenção de cor e brilho.

4.1.1 Inspeção da pintura

Para as estruturas revestidas, é importante que a inspeção identifique os defeitos na pintura existente, que podem ser estéticos ou estruturais (ABNT NBR 15156:2015). Os defeitos estéticos alteram apenas as características visuais da pintura ou prejudicam a identificação pela cor conferida. Exemplos de defeitos estéticos incluem redução do brilho, alteração da cor, enrugamento, escorrimento, retenção de poeira e formação de pó (calcinação). Por outro lado, os defeitos estruturais referem-se à degradação progressiva do revestimento ou à mudança de suas propriedades, o que pode comprometer sua integridade e, conseqüentemente, levar à corrosão do substrato. Como principais defeitos estruturais, podem ser citados (ABNT NBR 14951:2018; Fernandes, 2020):

– **Espessura irregular:** refere-se à falta de uniformidade na película, em que regiões apresentam espessura fora dos limites de tolerância. Essas áreas podem exibir um

aspecto visual diferenciado. Esse defeito pode ser detectado pela medição da espessura do revestimento, conforme as diretrizes da ABNT NBR 10443:2023;

– **Enferrujamento/corrosão vermelha:** caracteriza-se por manchas na película resultantes do afloramento de produtos de corrosão ou pelo aparecimento de pequenos pontos ou áreas de aço exposto corroído. Para a avaliação da corrosão, costumam-se adotar os padrões fotográficos da ASTM D610:2019 e da ISO 4628-3:2022;

– **Destacamento/descolamento:** refere-se ao desprendimento/descamação da película, que pode ocorrer entre demãos ou em contato com o substrato exposto. Isso geralmente resulta em perda de aderência ou falhas adesivas, frequentemente devido à aplicação ou especificação inadequada do esquema de pintura. O destacamento pode estar associado a outros defeitos, como o enrugamento da película e perda de aderência. As normas ISO 4628-5:2022 e ASTM D772:2018 podem ser utilizadas para avaliar esse defeito por meio de padrões fotográficos;

– **Desgaste:** exposição de demão subjacente do esquema de pintura ou do substrato. A região afetada apresenta aspecto visual diferenciado, podendo ser identificada pela variação da espessura (ABNT NBR 10443:2018);

– **Empolamento:** bolhas ou saliências em forma de semiesfera, ocorrendo na interface substrato/tinta de fundo ou entre demãos, podendo reter sólidos, líquidos ou gases. Na área da bolha, pode ocorrer corrosão do substrato, podendo ocorrer destacamento da tinta na área da bolha. A ISO 4628-2:2016 e ASTM D714:2017 podem ser adotadas para avaliação do defeito por padrões visuais fotográficos;

– **Craqueamento/fendimento:** rede de fissuras, trincas e fendas superficiais ou profundas. A ASTM D660: 2019 e a ASTM D661:2019 podem ser adotadas para avaliar por padrões fotográficos o fendimento até o substrato (*cracking*) ou superficial (*checking*);

– **Dano mecânico ou queimas:** corte, risco ou rasgo da película por ação mecânica ou queimadura da película por trabalhos de solda. Esses defeitos, são aqueles causados por ações alheias ao processo de pintura e envelhecimento da proteção.

Além dos ensaios citados, pode-se avaliar a aderência utilizando o método de tração, conhecido como *Pull-off* (ABNT NBR 15877:2020, Anexo A2; ASTM D4541:2017, método D), ou o método de corte em X (ABNT NBR 11003:2023, método A). Cita-se

também o ensaio *Holiday Detector* (ABNT NBR 16172:2023) de verificação de descontinuidades, como porosidade, crateras, bolhas, trincas e impregnações. Esses ensaios são geralmente realizados em áreas selecionadas, onde também são identificados os tipos de defeitos e a porcentagem da área afetada.

4.2 Revestimento metálico - galvanização

A galvanização do aço-carbono (ABNT NBR 6323:2016) consiste em sua imersão em um banho de zinco metálico fundido, resultando em uma reação metalúrgica resultando na formação de camadas intermediárias de liga de zinco e ferro e uma camada externa de zinco puro. Desse modo, garante-se que todas as superfícies expostas ao zinco sejam revestidas, incluindo aquelas geralmente inacessíveis por pintura. Além disso, o revestimento não apresenta a diminuição da espessura em cantos vivos, um problema comum em esquemas de pintura tradicionais.

A proteção conferida ao aço pelo revestimento de zinco ocorre tanto por uma barreira física quanto pela mencionada proteção catódica galvânica. Essa última se manifesta quando pequenas áreas do substrato de aço ficam expostas, permitindo que o zinco ao redor corra preferencialmente, atuando como anodo de sacrifício. Um efeito similar é observado em tintas ricas em zinco com novas tecnologias ou as tradicionais, utilizadas inclusive para reparo do revestimento de zinco.

4.2.1 Formas de corrosão

Em estruturas de aço galvanizado, a inspeção é realizada de maneira semelhante àquela aplicada a revestimentos orgânicos. É possível definir áreas específicas para uma avaliação mais detalhada dos defeitos e para ensaio de determinação da espessura efetiva do revestimento (ABNT NBR 7399:2015).

Os defeitos do revestimento podem ser classificados em estéticos e estruturais. Para os defeitos estéticos, podem ser adotados os critérios da ABNT NBR 6323:2016 que aceitam imperfeições que não afetam a proteção anticorrosiva nem a durabilidade do revestimento. Geralmente, o requisito estético exige uma superfície lisa, uniforme e contínua, sendo aceitáveis variações visuais ao longo do elemento/elementos. À medida que o revestimento é consumido pela corrosão atmosférica, os defeitos estéticos tendem a desaparecer, resultando em uma coloração uniforme (cinza fosco).

Os defeitos estéticos mais comuns incluem manchas esbranquiçadas de corrosão incipiente do zinco durante o armazenamento e manchas avermelhadas do contato com elementos de aço ou seus produtos de corrosão. Diferenças de brilho ou cristalização na superfície do revestimento de zinco são comuns, sendo atribuídos à presença de outros elementos de liga durante o processo de aplicação. Além disso, são considerados defeitos as pequenas áreas com grumos ou escorrimentos, assim como os pontos com ausência de revestimento.

Os defeitos estruturais mais comuns nas estruturas revestidas por zinco incluem:

- **Espessura irregular:** defeito semelhante ao observado em revestimentos orgânicos. A espessura do revestimento de zinco geralmente apresenta variações, especialmente em elementos mais expostos a condições ambientais adversas. Durante a inspeção, é possível selecionar elementos/áreas específicas para o exame visual e para determinar a espessura efetiva (ABNT NBR 7399:2015), assegurando o cumprimento das especificações e a avaliação da vida útil residual do revestimento;
- **Corrosão branca:** manchamento pelo acúmulo de produtos de corrosão do zinco, o que em geral ocorre em associado a um aumento da aspereza superficial. Na inspeção, além do exame visual, pode ser determinada a espessura efetiva;
- **Enferrujamento/Corrosão vermelha:** defeito que ocorre em áreas em que a camada de zinco já foi consumida ou de danos mecânicos, com exposição do aço. Também pode ser decorrente de defeitos localizados gerados no processo industrial e na concepção/soldagem. Para distinguir esses defeitos das mencionadas manchas avermelhadas decorrentes do contato do revestimento com elementos de aço, depósitos etc., pode-se avaliar a perda de espessura.

5 Referências bibliográficas

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D4541:** Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers. Philadelphia, 2017
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D610:** Standard Practice for Evaluating Degree of Rusting on Painted Steel Surfaces. Rio de Janeiro, 2019
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D660:** Standard Test Method for Evaluating Degree of Checking of Exterior Paints. Philadelphia, 2019
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D661:** Standard Test Method for Evaluating Degree of Cracking of Exterior Paints. Philadelphia, 2019
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D714:** Standard Test Method for Evaluating Degree of Blistering of Paints. Philadelphia, 2017

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D772**: Standard Test Method for Evaluating Degree of Flaking (Scaling) of Exterior Paints. Philadelphia, 2018, 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **ABNT NBR 10443**: Tintas e vernizes - Determinação da espessura da película seca sobre superfícies rugosas - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2023

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11003**. Tintas – Determinação da aderência. Rio de Janeiro, 2010

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14951**: Pintura Industrial - Defeitos e correções. Parte 1: Tintas líquidas. Rio de Janeiro, 2013

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15156**: Pintura industrial – Terminologia. Rio de Janeiro, 2015

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15691**: Ensaio não destrutivo - Líquido penetrante - Prática padronizada. Rio de Janeiro, 2009

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15824**: Ensaio não destrutivo – Ultrassom – Procedimento para medição de espessura. Rio de Janeiro, 2020

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15877**: Pintura industrial — Ensaio de aderência por tração. Rio de Janeiro, 2020

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16172**: Revestimentos anticorrosivos — Determinação de descontinuidades em revestimentos anticorrosivos aplicados sobre substratos metálicos. Rio de Janeiro, 2023

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6002**: Ensaio não destrutivo - Ultrassom - Detecção de descontinuidades em chapas metálicas. Rio de Janeiro: ABNT, 2015

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6211**: Determinação de cloretos na atmosfera pelo método da vela úmida - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2001

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6323**: Galvanização por imersão a quente de produtos de aço e ferro fundido – Especificação. Rio de Janeiro, 2016

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6921**: Corrosão atmosférica - Taxa de sulfatação – determinação pelo método de vela de dióxido de chumbo. Rio de Janeiro, 2002

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7399**: Produto de aço ou ferro fundido revestido de zinco por imersão a quente - Verificação da espessura do revestimento por processo não destrutivo - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2015

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 9223**: Corrosion of metals and alloys — Corrosivity of atmospheres — Classification, determination and estimation. Rio de Janeiro, 2024

FERNANDES, F. **Pintura anticorrosiva**: apostila de treinamento. CORZIN. 2020. 74 p.

FERRARI, J.V. **Contaminação com sal de cloreto e cromatização da superfície do aço zincado no processo não-contínuo de zincagem por imersão a quente: influência no desempenho de tintas e determinação de pré-tratamentos para pintura adequados**. 2006. 210 p. Dissertação. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, São Paulo, 2006

GENTIL, V. **Corrosão**. São Paulo: Afiliada. 3 eds. 1996. 345 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 11303**: Corrosion of metals and alloys: guidelines for selection of protection methods against atmospheric corrosion. Switzerland, 2002

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 12944-5**: Paints and varnishes — Corrosion protection of steel structures by protective paint systems - Part 5: Protective paint systems. Switzerland, 2019

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 4628-2**: Paints and varnishes

— Evaluation of degradation of coatings — Designation of quantity and size of defects, and of intensity of uniform changes in appearance — Part 2: Assessment of degree of blistering. Switzerland, 2016

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 4628-3**: Paints and varnishes — Evaluation of degradation of coatings — Designation of quantity and size of defects, and of intensity of uniform changes in appearance — Part 3: Assessment of degree of rusting. Switzerland, 2022

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 4628-5**: Paints and varnishes — Evaluation of degradation of coatings — Designation of quantity and size of defects, and of intensity of uniform changes in appearance — Part 5: Assessment of degree of flaking. Switzerland, 2022

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 8044**: Corrosion of metals and alloys — Vocabulary. Switzerland, 2020

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 9224**: Corrosion of metals and alloys — Corrosivity of atmospheres — Guiding values for the corrosivity categories. Switzerland, 2012

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

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 9226**: Corrosion of metals and alloys — Corrosivity of atmospheres — Determination of corrosion rate of standard specimens for the evaluation of corrosivity. Switzerland, 2012

PANOSSIAN, Z. **Corrosão e proteção contra corrosão em equipamentos e estruturas metálicas**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1993. v.1, 280 p. (IPT Publicação, 2032).

PHILIP, A.; SCHWEITZER, P. E. **Atmospheric Degradation and Corrosion Control**. CRC Press. 1999 272 p.

RAMANATHAN, L. V. **Corrosão e seu controle**. Hemus. 1988, 339 p.

ROBERGE, P.R. **Atmospheric corrosion**. In: Uhlig's Corrosion Handbook Winston R. 3 Ed. p. 331-326, 2011

ZHANG, X. G. **Galvanic Corrosion**. In: Revie, W. R. Uhlig's Corrosion Handbook, 2 ed. John Wiley & Sons, Inc., p. 137-162, 2000