

Projeto e Durabilidade



MANUAL DE

**CONSTRUÇÃO
EM AÇO**



Projeto e Durabilidade

Série “Manual de Construção em Aço”

- Galpões para Usos Gerais
- Ligações em Estruturas Metálicas
- Edifícios de Pequeno Porte Estruturados em Aço
- Alvenarias
- Painéis de Vedação
- Resistência ao Fogo das Estruturas de Aço
- Tratamento de Superfície e Pintura
- Transporte e Montagem
- Steel Framing: Arquitetura
- Interfaces Aço-Concreto
- Pontes e viadutos em vigas mistas
- Treliças tipo Steel Joist
- Viabilidade Econômica
- Dimensionamento de Perfis Formados a Frio conforme NBR 14762 e NBR 6355 (CD)
- Projeto e Durabilidade
- Estruturas Mistas Vol. 1 e 2
- Prevenção contra Incêndio no Projeto de Arquitetura • Projeto de Abertura em Almas de Vigas de Aço e Vigas Mistas de Aço e Concreto
- Estruturas Compostas por Perfis Formados a Frio. Dimensionamento pelo Método das Larguras Efetivas e Aplicação Conforme ABNT NBR 14762:2010 E ABNT NBR 6355:2012
- Tecnologias de Vedação e Revestimento para Fachadas
- Steel Framing Engenharia

FABIO DOMINGOS PANNONI

Projeto e Durabilidade

Segunda Edição

INSTITUTO AÇO BRASIL

CENTRO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO EM AÇO

RIO DE JANEIRO | 2017

© 2017 INSTITUTO AÇO BRASIL / CENTRO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO EM AÇO

Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida por quaisquer meio, sem a prévia autorização desta Entidade.

Ficha catalográfica preparada pelo Centro de Informações do AçoBrasil/CBCA

P194p

Pannoni, Fabio Domingos

Projeto e durabilidade / Fábio Domingos Pannoni. - Rio de Janeiro:
Instituto Aço Brasil / CBCA, 2017.

116p. ; 29 cm. -- (Série Manual de Construção em Aço)

Formato eletrônico

Bibliografia

ISBN 978-85-89819-40-4

1. Corrosão atmosférica 2. Aços estruturais 3. Aços carbono 4. Durabilidade 5.

Proteção das Estruturas Metálicas

I. Títulos (série)

CDU 620.196(035)

2ª. edição

1ª Edição , 2009

2ª Edição, 2017

Instituto Aço Brasil / Centro Brasileiro da Construção em Aço
Av. Rio Branco, 108 / 29º Andar
20040-001 - Rio de Janeiro - RJ
e-mail: cbca@acobrasil.org.br
site: www.cbca-acobrasil.org.br

1. Introdução à Corrosão Atmosférica dos Aços Estruturais
 - a. O Mecanismo Eletroquímico
 - b. A Corrosão Atmosférica dos Aços Carbono
 - c. O que Determina a Velocidade de Corrosão?
 - d. Influência da Composição da Atmosfera no Processo de Corrosão
 - i. A Atmosfera
 1. Umidade
 2. Tempo de umedecimento
 3. Camadas adsorvidas
 4. Camadas condensadas
 - a. Orvalho
 - b. Chuva
 5. Medida do Tempo de Umedecimento
 6. Composição do Eletrólito Superficial
 - a. Compostos de enxofre
 - b. Cloretos
 - c. Temperatura
 - e. Medidas Usuais na Prevenção da Corrosão
2. Formas Usuais de Proteção das Estruturas Metálicas
 - a. Pintura como Forma de Proteção
 - b. Galvanização por Imersão a Quente
 - c. A especificação de um sistema de proteção contra a corrosão
3. A Qualificação da Agressividade Ambiental
 - a. Classificação da Agressividade Ambiental Segundo a ISO 12944-2
 - b. Classificação dos Ambientes Segundo o Índice de Deterioração de Brooks
 - c. O Mapa de Corrosividade Ibero-americano – Projeto MICAT
4. A Escolha de um Sistema Adequado de Proteção por Pintura
5. A Galvanização por Imersão a Quente Como Proteção do Aço Estrutural
 - a. Pintura de revestimentos galvanizados por imersão a quente
6. O Controle da Corrosão Através do Detalhamento
 - a. Acessibilidade
 - b. Geometria
 - c. Compatibilidade
 - d. Soldagem
 - e. Superfície
 - f. Produtos destinados à galvanização por imersão a quente
7. Recomendações Finais
8. Anexo A
9. Referências Bibliográficas



O CBCA Centro Brasileiro da Construção em Aço tem a satisfação de oferecer aos profissionais envolvidos com o emprego do aço na construção civil a segunda edição do décimo sexto manual de uma série cujo objetivo é a disseminação de informações técnicas e melhores práticas.

A ação agressiva da atmosfera sobre os metais tem sido reconhecida já há muito tempo. Caio Plínio Segundo (conhecido como Plínio, o Velho) já mencionava, há cerca de 2000 anos atrás, que a ferrugem nascia pela ação simultânea da água e do ar sobre o ferro¹.

A corrosão dos metais afeta a vida de nossa sociedade tecnológica de diferentes formas – todas onerosas. O custo da corrosão em países industrializados tem sido estimado como sendo de aproximadamente 3,5% de seu produto interno bruto²⁻⁴; os mesmos autores consideram que cerca de 30% a 50% destas perdas poderiam ser evitadas através da simples adoção das técnicas de controle da corrosão atualmente existentes e já bem estabelecidas.

Esta realidade sempre nos causou forte impressão. Qual é a mensagem a ser extraída destes relatórios? A resposta é direta. Existe uma enorme demanda de nossa sociedade por informação, educação e transferência de conhecimento que deve ser atendida.

Outro fator vem contribuir a esta demanda. A norma brasileira que trata de projetos de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios foi revisada e apresentada à coletividade técnica em 2008⁵. Ela inclui um anexo normativo (o Anexo N) que trata da durabilidade de componentes metálicos frente à corrosão. Esta norma tem sido utilizada como referência por outras normas recentes, como, p.ex., a conhecida “Edificações habitacionais – Desempenho”⁶. A busca de soluções que prolonguem a durabilidade é, assim, um conceito cada vez mais generalizado em toda a sociedade contemporânea.

Este manual do CBCA foi escrito com o intuito de auxiliar os arquitetos e engenheiros no entendimento e atendimento do Anexo N. Mais que isso, ele objetiva colaborar, de algum modo, com a redução dos custos oriundos da corrosão. É um manual que expõe, de forma relativamente simples e racional, como o conhecimento disponível atualmente pode ser explorado de modo eficaz no controle da corrosão.

Os exemplos e ilustrações comentadas neste Manual são típicos de situações encontradas no dia a dia por arquitetos e engenheiros. Entretanto, atenção. Cada caso é um caso, e, assim, uma solução particular sempre deverá ser implementada. Cuidado com as generalizações.

Centro dinâmico de serviços, capacitado para conduzir e fomentar uma política de promoção do uso do aço na construção com foco exclusivamente técnico, o CBCA está seguro de que este manual enquadra-se no objetivo de contribuir para a difusão de competência técnica e empresarial no país.





CAPÍTULO 1

Introdução à Corrosão Atmosférica dos Aços Estruturais



1.1 - O Mecanismo Eletroquímico

As principais reações químicas que ocorrem por conta da corrosão de um metal M (considerado, aqui, por simplicidade, divalente) em uma solução aquosa contendo oxigênio dissolvido são representadas, de modo esquemático, na Figura 1.

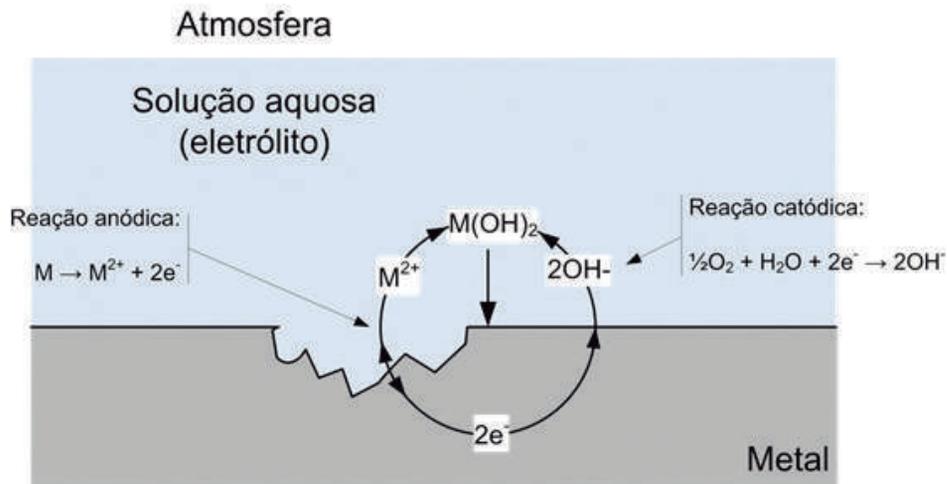


Figura 1: Corrosão úmida de um aço carbono em um eletrólito contendo oxigênio: o mecanismo eletroquímico.

O processo de corrosão eletroquímica consiste na existência de regiões anódicas (onde ocorre a reação de oxidação) e regiões catódicas (onde ocorre a reação de redução) - distribuídas sobre a superfície metálica. No processo anódico, o metal é dissolvido e transferido para a solução como íons M^{2+} . A reação catódica apresentada no exemplo da Figura 1 consiste da conhecida reação de redução do oxigênio. A observação da Figura leva à conclusão que o processo se assemelha a um circuito elétrico em que não ocorre qualquer acúmulo de cargas. Elétrons são gerados e consumidos. A corrosão é, assim, um “desperdiçador” de energia, e não um acumulador, como uma bateria. E, pior, esta energia não pode ser aproveitada.

Os elétrons liberados pela reação anódica são conduzidos através do metal até as áreas catódicas, onde são consumidos pela reação catódica.

Uma condição necessária à existência deste processo é que o ambiente externo ao metal seja composto por um líquido condutor de íons (isto é, um eletrólito), aerado, em contato direto com o metal.

O circuito elétrico é fechado através da condução de íons através do eletrólito. Temos, assim, condução de elétrons no metal e íons no eletrólito.

Este processo, aqui simplificado, é conhecido como corrosão úmida, e expõe um mecanismo tipicamente eletroquímico.

No exemplo da Figura 1, os íons metálicos M^{2+} são conduzidos ao encontro dos íons OH^- , e, juntos, formam um hidróxido metálico - $M(OH)_2$ - que pode se depositar sobre a superfície metálica (ou ser arrastado se o eletrólito estiver em movimento). Se, por acaso, o metal for o ferro (ou, do mesmo modo, o aço carbono utilizado nas estruturas) e o líquido for a água contendo oxigênio do ar dissolvido, o padrão é o seguinte: íons Fe^{2+} se juntam aos íons OH^- e precipitam na forma de $Fe(OH)_2$. O $Fe(OH)_2$ não é estável, assim, com o acesso da água e de oxigênio, ele é oxidado à $Fe_2O_3 \cdot nH_2O$ (ou $Fe(OH)_3$). Este composto é comumente descrito na literatura como $FeOOH + H_2O$. O $FeOOH$ é a ferrugem comum, que todos conhecemos, de cor avermelhada ou amarronzada.

Se o acesso do oxigênio for, de algum modo, dificultado, o óxido Fe_3O_4 será formado no lugar do $FeOOH$. O óxido Fe_3O_4 - conhecido como magnetita - tem a cor negra (quando isento de água) ou esverdeada (quando possui água) e é magnético.

A reação de redução do oxigênio é a reação catódica mais importante nos meios naturais, como a atmosfera, solo, água do mar ou água doce. Entretanto, sob certas condições, outra reação catódica importante pode ocorrer: a redução do hidrogênio, $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$. Esta reação acontece em ambientes (muito) ácidos, onde o pH é menor do que 3,8.

A Figura 1 ilustra o que é chamado de cela eletroquímica; o potencial termodinâmico para o processo de corrosão, isto é, a espontaneidade do processo, tem sua origem na diferença de potencial que ocorre entre as regiões anódicas e catódicas desenvolvidas sobre a superfície metálica.

1.2 - A Corrosão Atmosférica dos Aços Carbono

Como visto acima, a corrosão atmosférica de um aço carbono pode ser descrita, de forma simplificada, pela reação: $4Fe + 3O_2 + 2H_2O \rightarrow 4FeOOH$

O composto $FeOOH$ designa, de modo genérico, a ferrugem. Na realidade, a ferrugem é uma mistura complexa de várias fases cristalinas e amorfas de óxidos e hidróxidos e de ferro. Sua estequiometria corresponde aproximadamente à fórmula global $FeOOH$.

Os três principais componentes da ferrugem são, respectivamente, a lepidocrocita (γ - $FeOOH$), a goethita (α - $FeOOH$) e a magnetita (Fe_3O_4).

A composição da ferrugem varia em função das condições climáticas e da duração da exposição. Ela varia morfológicamente e quimicamente, do interior para o exterior da camada. A parte exterior é geralmente porosa, desagregada e friável, sendo constituída principalmente de goethita e lepidocrocita. A parte interior, adjacente ao metal, é, em geral, relativamente densa e mais aderente, sendo formada por magnetita e fases amorfas de $FeOOH$.

Quando a superfície de aço é exposta à atmosfera, ela é rapidamente recoberta por uma fina camada de produtos de corrosão, produzidos de acordo com o exposto na Figura 1. Esta reação acontece tão mais rapidamente quanto mais úmida e contaminada com poluentes atmosféricos for a superfície.

O oxigênio existente no ar possui uma solubilidade razoável na película líquida de água depositada sobre o metal. A solubilidade a 25°C, ao nível do mar, é de 8,1 mg.l⁻¹. Este oxigênio é reduzido a íons OH⁻ na superfície metálica, enquanto que o ferro é oxidado a íons Fe²⁺, que passa à solução, no eletrólito.

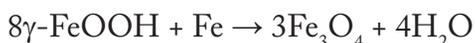
Os íons ferrosos em solução reagem com as hidroxilas, formando, após uma série de etapas, γ -FeOOH:



Desse modo, a camada de lepidocrocita vai sendo desenvolvida, recobrando a superfície, levando a uma diminuição dos sítios ativos onde ocorre a oxidação do ferro a íon ferroso. Ao mesmo tempo, a difusão do oxigênio vai sendo limitada pela barreira de lepidocrocita formada e depositada. Quando a concentração de oxigênio se torna suficientemente pequena, a lepidocrocita reage, por sua vez, com os íons Fe²⁺, em fase aquosa, gerando uma camada de magnetita, segundo a reação:



Como reação global, temos:



Esta reação acontece, costumeiramente, em períodos chuvosos, quando há excesso de água. A fase γ -FeOOH se comporta, desse modo, como um oxidante com respeito ao ferro, do mesmo modo que o oxigênio do ar, dissolvido na água.

Durante os períodos secos, quando há pouca água e a concentração de oxigênio é alta, a magnetita reage com o oxigênio do ar, de acordo com:



Assim, se observa um fenômeno cíclico entre as fases “úmidas” e “secas”, levando à transformação da lepidocrocita à magnetita (e, em seguida, da magnetita à lepidocrocita), com consumo metálico contínuo. O enferrujamento, assim, prossegue. A Figura 2 ilustra, de modo simplificado, a morfologia de uma cela de corrosão, típica dos aços carbono estruturais. Maiores detalhes mecânicos podem ser encontrados em literatura específica⁷.

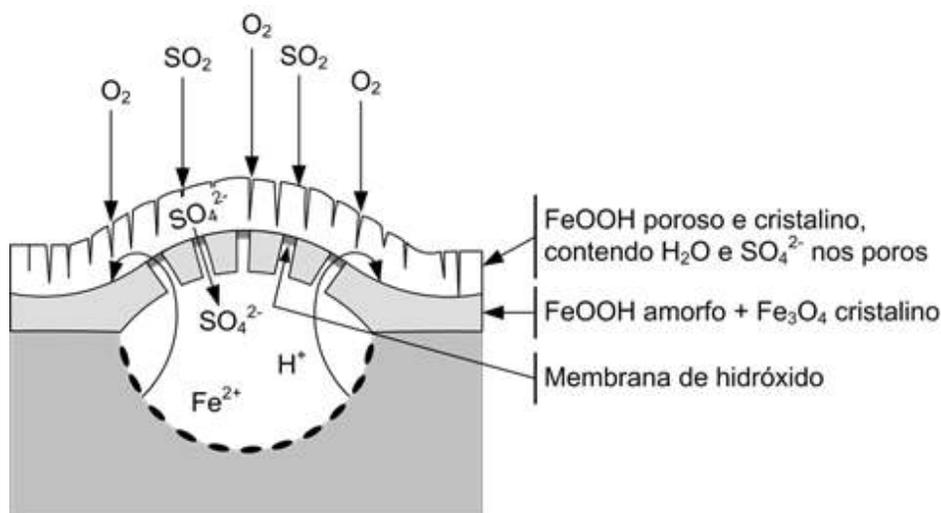


Figura 2: Célula de corrosão desenvolvida durante a exposição atmosférica dos aços estruturais⁷.

1.3 - O que Determina a Velocidade de Corrosão?

Como visto acima, o processo de corrosão depende da disponibilidade de oxigênio e água sobre a superfície metálica.

Quando produtos de corrosão, como os hidróxidos, são depositados sobre a superfície metálica, eles podem causar uma redução do suprimento de oxigênio que chega à interface metal-eletrólito. O oxigênio deve se difundir através destes depósitos, que formam, de modo geral, uma camada mais ou menos contínua e densa sobre a superfície metálica. Como a velocidade de dissolução do metal é igual à velocidade de redução do oxigênio, um suprimento limitado deste levará à redução da velocidade de perda metálica. Neste caso, diz-se que a corrosão está sob controle catódico. Este é um mecanismo muito comum de contenção da corrosão. Se os produtos de corrosão forem removidos da superfície metálica através de, p.ex., passagem de um líquido em alta velocidade, a velocidade de corrosão será, em contrapartida, muito aumentada.

Em certas situações rotineiras, os produtos de corrosão formam uma película superficial bastante densa e contínua, de óxidos cujas estruturas cristalográficas são bastante aparentadas àquelas apresentadas pelo metal (epitaxia). Películas deste tipo dificultam em muito saída de íons metálicos para a solução aquosa, de modo que a velocidade de corrosão, nestas condições, costuma ser muito pequena. O controle, agora, é dito anódico. O fenômeno é chamado de passivação e é frequentemente observado em materiais como os aços inoxidáveis e alumínio, expostos a ambientes naturais. Os aços estruturais comuns são passivados, em geral, em ambientes aquosos alcalinos (como, p.ex., o concreto). A passivação dos aços inoxidáveis e do alumínio é promovida e mantida pelo amplo acesso de oxigênio à camada de óxidos passivos. Em oposição, a passivação pode ser quebrada pela falta localizada de oxigênio. Isto ocorre frequentemente sob depósitos de óxidos ou frestas, que obstruem ou dificultam a reposição do oxigênio consumido pelo processo de corrosão. Espécies agressivas, como os cloretos, po-

dem causar o rompimento localizado da camada passiva, que pode levar a formas outras de corrosão, como pites, etc.

Quando metais diferentes são colocados em contato elétrico, o metal mais nobre oferece uma área extra para a reação catódica. Assim, o fluxo total de elétrons é aumentado; isto é balanceado através do aumento da dissolução metálica, que ocorre sobre o metal menos nobre. Se o metal mais nobre possuir uma área superficial muito maior do que aquela apresentada pelo metal menos nobre, uma grande quantidade de elétrons será consumida nestas regiões, fazendo com que a dissolução metálica (nas regiões anódicas) aconteça de modo bastante acelerado⁸. A intensidade da reação anódica, isto é, a velocidade de corrosão (dada pela perda de massa metálica por unidade de área e unidade de tempo) pode, assim, tornar-se bastante elevada. A razão de áreas entre as ligas metálicas anódicas e catódicas é algo considerado muito importante e deve ser mantida tão próxima da unidade quanto possível.

1.4 - Influência da Composição da Atmosfera no Processo de Corrosão

Como já abordado, a corrosão atmosférica é o resultado da interação entre o metal e a atmosfera que o circunda. Quando expostos à atmosfera, à temperatura ambiente, em um ambiente seco, a maior parte dos metais forma, espontaneamente, uma película muito fina de óxidos sólidos. Se o óxido é estável, a velocidade de crescimento cessa após determinado tempo, atingindo uma espessura máxima, estável, de 1 a 5 nm⁷ (1 nm = 10⁻⁹ m).

Entretanto, os poluentes atmosféricos podem alterar drasticamente este quadro. Foi o trabalho pioneiro de Vernon⁹ que levou a área da corrosão atmosférica ao nível de ciência. Ele descobriu que a velocidade de corrosão de diferentes ligas metálicas cresce rapidamente acima de certo nível de umidade relativa – a chamada “umidade relativa crítica”; ele também foi o primeiro cientista a demonstrar o efeito acelerador combinado da umidade relativa com o SO₂ (dióxido de enxofre) sobre a velocidade da corrosão atmosférica de metais. Em anos subseqüentes, Evans¹⁰, Rozenfeld¹¹, Kaesche¹² e outros demonstraram que os processos eletroquímicos desempenham papel fundamental no processo; tornou-se evidente que a corrosão atmosférica dos metais envolve um grande número de processos eletroquímicos, químicos e físicos.

1.4.1 - A Atmosfera

Os principais constituintes da troposfera – a região da atmosfera mais próxima ao solo – são o nitrogênio (N₂), o oxigênio (O₂) e os gases raros (Ne, Kr, He e Xe). Estes gases compreendem mais de 99,9% em peso de todas as moléculas envolvidas¹³. Entre estas, o nitrogênio e os gases raros não apresentam importância no processo de corrosão atmosférica, devido à sua incapacidade em reagir com as superfícies metálicas.

O oxigênio, por outro lado, é de fundamental importância, devido à sua participação na reação catódica e seu envolvimento nas transformações químicas que ocorrem na química da atmosfera. Outras espécies troposféricas que interferem no processo de corrosão atmosférica são a água (H₂O) e o dióxido de carbono (CO₂). A água é de importância crítica sob vários aspectos e sua função será detalhada mais adiante. Sua concentração na troposfera varia de algumas ordens de grandeza. A Tabela 1 fornece uma estimativa da quantidade de água existente sobre superfícies metálicas, em diferentes condições¹⁴.

Tabela 1: Estimativa da quantidade de água existente sobre as superfícies metálicas¹⁴.

Condição	Quantidade de água, g.m ⁻²
Umidade relativa crítica	0,01
Umidade relativa de 100%	1
Coberta pelo orvalho	10
Molhada pela chuva	100

Os outros constituintes de importância na corrosão atmosférica estão presentes na forma de gases, de modo geral em concentrações menores do que 10 ppm; estes incluem¹⁵⁻¹⁷ O₃, SO₂, H₂S, NO₂, HNO₃, NH₃, HCl e HCOOH. A Tabela 2 traz a concentração média, no ar, destas substâncias.

A presença destas espécies pode ser tanto devida a processos naturais quanto antropogênicos; estas espécies podem sofrer uma série de transformações durante seu transporte na troposfera. Como todas as espécies são reativas, elas possuem certo valor de vida-média, que muitas vezes é limitada pela habilidade destas espécies em reagir com oxidantes atmosféricos, principalmente o radical hidroxila, OH● e o ozônio (O₃).

Tabela 2: Concentração média de espécies agressivas no ar (ppb).

Espécie	Ambiente Externo	Ref.	Ambiente Interno	Ref.
O ₃	4 – 12	15	3 – 30	15
H ₂ O ₂	10 – 30	16	5	17
SO ₂	1 – 65	15	0,3 – 14	15
H ₂ S	0,7 – 24	15	0,1 – 0,7	15
NO ₂	9 – 78	15	1 – 29	15
HNO ₃	1 – 10	16	3	17
NH ₃	7 – 16	15	13 – 259	15
HCl	0,18 – 3	15	0,05 – 0,18	15
Cl ₂	< 0,005 – 0,08	15	0,001 – 0,005	15
HCHO	4 – 15	16	10	17
HCOOH	4 – 20	16	20	17

1.4.1.1 - Umidade

A corrosão atmosférica é um processo eletroquímico complexo que consiste do metal, de produtos de corrosão e possivelmente outros depósitos, de uma camada superficial de água (poluída em maior ou menor grau) e da atmosfera. Ela ocorre em células de corrosão contendo anodos e catodos. As células somente podem operar na presença de um eletrólito, o que significa dizer que a corrosão atmosférica somente pode operar quando a superfície do metal está molhada.

O processo de corrosão atmosférica pode ser visto como um processo intermitente, descrito, de modo conveniente, pela equação¹⁸:

$$K = \sum_1^n \tau_n v_k(n)$$

onde:

K = efeito acumulado da corrosão;

τ_n = tempo de umedecimento (Time Of Wetness - TOW), isto é, o período de tempo que uma superfície metálica fica recoberta por uma camada de eletrólitos, como a água;

v_k = velocidade média de corrosão durante os períodos individuais de umedecimento.

Assim, o efeito total da corrosão ao longo de um período de tempo é determinado pelo tempo total de umedecimento e pela composição do eletrólito, que, em conjunto com a temperatura, determinam a velocidade de corrosão. A Figura 3 ilustra efeito do umedecimento na corrosão do aço. Os parâmetros que afetam o tempo de umedecimento e a composição da película de eletrólitos superficiais serão brevemente descritos a seguir.

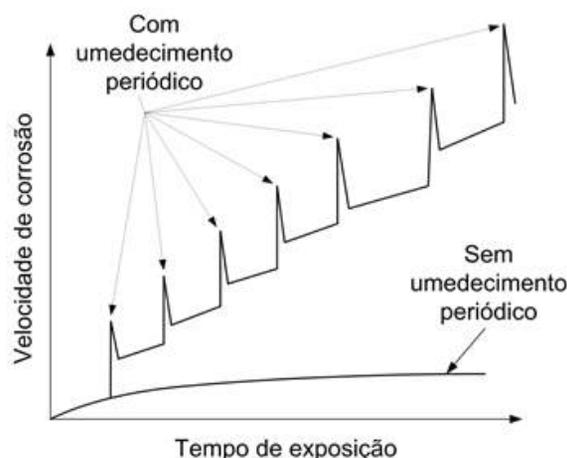


Figura 3: Efeito acumulado da corrosão, esquemático. Velocidade de corrosão do aço carbono exposto à umidade relativa de 90%, com e sem umedecimento periódico.

1.4.1.2 - Tempo de umedecimento

Existem várias definições para tempo de umedecimento (TOW), mas o conceito geralmente aceito diz que tempo de umedecimento corresponde ao tempo decorrido durante o qual a superfície metálica fica coberta por uma película de água líquida, o que torna a corrosão atmosférica possível.

O tempo de umedecimento varia com as condições climáticas locais. Ele depende da umidade relativa da atmosfera, da duração e freqüência da chuva, neblina e orvalho, da temperatura do ar e da superfície metálica, assim como da velocidade dos ventos e horas de insolação.

O tempo de umedecimento pode ser dividido em períodos em que o metal está umedecido devido à adsorção de vapor de água sobre a superfície e períodos quando a superfície está coberta por uma camada macroscópica de água, devido à chuva, neblina ou orvalho^{11,19}.

$$\tau_{\text{umedecimento}}^{\text{total}} = \tau_{\text{adsorvida}} + \tau_{\text{macroscópica}}$$

1.4.1.3 - Camadas adsorvidas

A quantidade de água adsorvida sobre a superfície metálica depende da umidade relativa da atmosfera e das propriedades químicas e físicas dos produtos de corrosão. A superfície metálica

pode ser umedecida por sais higroscópicos que, depositados ou formados através do processo de corrosão, reterão água da atmosfera. De modo geral, a velocidade de corrosão cresce muito quando a umidade relativa se eleva acima de certo valor, quando os sais começam a absorver água e se dissolver sobre o metal.

A quantidade de água existente sobre a superfície metálica é de grande importância na velocidade de corrosão. Vários pesquisadores têm mostrado que a velocidade de corrosão acima da umidade relativa crítica cresce drasticamente com o acréscimo da umidade relativa e da concentração dos agentes poluentes.

1.4.1.4 - Camadas condensadas

1.4.1.4.1 - Orvalho

A formação de orvalho ocorre quando a temperatura da superfície metálica está abaixo do ponto de orvalho da atmosfera. Isto pode ocorrer em áreas externas, durante a noite, quando a temperatura da superfície pode descer através da transferência de calor radiante entre a estrutura metálica e a atmosfera. Outra razão para a formação do orvalho pode ser encontrada no início das manhãs, quando a temperatura do ar aumenta mais rapidamente que a temperatura do metal, especialmente se a massa do metal – e, portanto, sua capacidade calorífica – for grande. O orvalho também pode se formar durante a estocagem em locais fechados, mais aquecidos do que o ambiente (frio) existente durante o transporte. O orvalho é considerado uma causa muito importante da corrosão, especialmente sob condições de abrigo. A quantidade de água sobre uma superfície coberta pelo orvalho é de aproximadamente 10 g.m^{-2} , que é consideravelmente maior do que aquela observada em camadas de adsorção. Os períodos de orvalho são considerados muito agressivos, pois o efeito benéfico da lavagem da superfície, ocasionada pela chuva, em geral, não acontece.

Um fator que contribui à alta corrosividade do orvalho pode ser a grande quantidade de contaminantes atmosféricos nele presentes; orvalhos muito ácidos ($\text{pH} < 3$) tem sido encontrados em atmosferas industriais muito poluídas¹.

1.4.1.4.1 - Chuva

A chuva cria películas ainda mais espessas que aquelas formadas pelo orvalho. A precipitação na forma de chuva afeta a corrosão através da deposição de uma camada macroscópica de água sobre a superfície e também pela adição de agentes estimuladores solúveis, como o SO_2 e o CO_2 . Em oposição, a chuva lava os poluentes depositados durante a fase seca anterior – o que diminui a velocidade do ataque. É fato relativamente comum observarmos, em corpos de prova submetidos à atmosfera, que o lado voltado à atmosfera se encontra em condições muito melhores do que a face voltada para o solo – onde a lavagem pelas águas de chuva não acontece.

1.4.1.5 - Medida do Tempo de Umedecimento

O tempo de umedecimento, como explanado anteriormente, corresponde ao espaço de tempo durante o qual a superfície metálica está coberta por uma película de água, permitindo a continuidade do processo de corrosão. Esta variável muda com as condições climáticas locais (umidade relativa da atmosfera, duração e frequência das chuvas, neblina, orvalho, temperatura do ar e da superfície metálica, horas de insolação, velocidade dos ventos, etc.).

Para fins práticos, o tempo de umedecimento é determinado com base em medidas meteorológicas de temperatura e de umidade relativa. Ele corresponde ao período de tempo transcorrido anualmente (em horas), em que a umidade relativa é $\geq 80\%$, e a temperatura é $> 0^{\circ}\text{C}$.

O tempo de umedecimento determinado por este método pode não ser o mesmo obtido por medidas experimentais, feita com o uso de sensores, pois o umedecimento é influenciado pelo tipo de metal, poluição da atmosfera, presença de produtos de corrosão específicos e grau de abrigo frente à chuva.

A expressão de tempo de umedecimento total apresentada anteriormente, embora não seja baseada em modelos teóricos, usualmente mostra boa correlação com medidas experimentais, em condições de exposição externa.

1.4.1.6 - Composição do Eletrólito Superficial

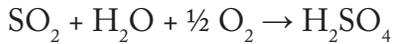
A película de eletrólito depositada sobre a superfície metálica contém várias espécies químicas, depositadas a partir da atmosfera ou ainda originadas a partir da corrosão do metal. Apresentam-se, abaixo, informações relevantes à corrosão atmosférica dos principais agentes poluentes atmosféricos.

1.4.1.6.1 - Compostos de enxofre

O SO_2 tem sido reconhecido, já há muito tempo, como o mais importante estimulante gasoso no processo de corrosão atmosférica dos metais em geral. Ele é originado de muitas fontes antropogênicas, como a combustão de carvão e derivados de petróleo que contenham enxofre (como a gasolina) e as emissões de certas indústrias, como a petroquímica e de papel e celulose. Ele também é originado da atividade vulcânica.

O dióxido de enxofre atua como poderoso estimulador da reação anódica, quando conjugado à umidade. Vários estudos têm mostrado ótima correlação entre a corrosão atmosférica de metais e a concentração do dióxido de enxofre no ar.

O SO_2 é oxidado, sobre partículas umedecidas (p.ex., fuligem) ou dentro de gotas de chuva ou orvalho, a ácido sulfúrico:



Esta reação é catalisada por O_3 , íons Fe^{3+} , Mn^{2+} , ou ainda em eletrólitos com pH alcalino²⁰. Assim, grandes centros urbanos ou regiões industriais, onde as emissões de dióxido de enxofre são significativas, apresentam uma agressividade ambiental bastante distinta daquela observada em ambientes rurais. O dióxido de enxofre é um gás bastante solúvel em água; sua solubilidade é de 9.4 g/100 ml (a 25 °C). Ele se dissolve facilmente nas gotas de chuva ou no orvalho formado sobre as superfícies metálicas. A chuva ou o orvalho, umedecendo superfícies enferrujadas (que contém íons férricos e manganosos), acabarão por gerar eletrólitos bastante ácidos (isto é, uma solução de ácido sulfúrico). Assim, metais que corroem em eletrólitos ácidos (p.ex., o zinco) não se mostram adequados à exposição em atmosferas industriais muito poluídas, sem a proteção adequada, como a oferecida pelas tintas.

A ordem de grandeza da deposição do SO_2 , em diferentes tipos de atmosfera, está descrita na Tabela 3²¹:

Tabela 3: Ordem de magnitude da velocidade de deposição do SO_2 em diferentes tipos de atmosfera²¹.

Tipo de atmosfera	Velocidade de deposição (mg $\text{SO}_2/\text{m}^2.\text{dia}$)
Rural	<10
Urbana	10-100
Industrial	Até 200

Do ponto de vista prático, o efeito estimulador do SO_2 é observado em áreas com grande população, grande número de veículos automotores, de indústrias e de estruturas. De modo geral, a corrosão atmosférica estimulada pelos compostos de enxofre está restrita às áreas onde estes compostos se originam, como ilustrado pela Figura 4²². O SO_2 é considerado um gás muito reativo, assim, ele reagirá com as ligas metálicas e materiais diversos localizados em pontos próximos à sua emissão, ficando aí retido.

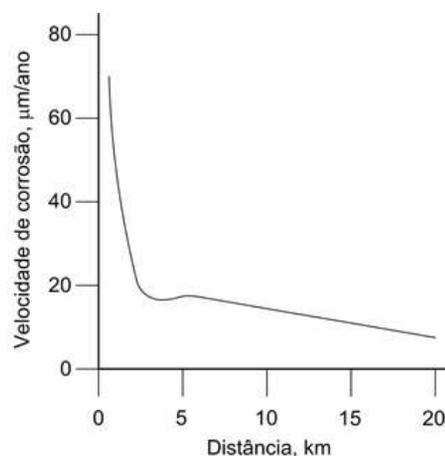


Figura 4: Velocidade de corrosão do aço carbono em função da distância da fonte de emissão do SO_2 ²².

A Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de São Paulo (CETESB) fornece relatórios anuais²³ onde o valor da deposição de SO_2 pode ser encontrado para diversas regiões – rurais, urbanas e industriais. Outros Estados Brasileiros possuem empresas assemelhadas, cujos relatórios anuais também são disponibilizados na Internet, tornando possível, assim, a obtenção de resultados reais, válidos para muitas regiões brasileiras.

O padrão da qualidade do ar de São Paulo, mantida pela CETESB, prescreve valores máximos de $80 \mu\text{g SO}_2 \cdot \text{m}^{-3}$ (de ar). Estes valores não têm sido ultrapassados já há muito tempo no Estado de São Paulo. Como exemplo, os valores médios, medidos na cidade de Cubatão (ambiente industrial) e na região metropolitana de São Paulo (ambiente urbano), no ano de 2007, são inferiores a $20 \mu\text{g SO}_2 \cdot \text{m}^{-3}$. Os piores resultados médios, obtidos desde 1998, foram registrados no ano de 2001, na região de Vila Parisi (a região de Cubatão que concentra as indústrias da região). O valor médio anual, ali medido, não ultrapassou $30 \mu\text{g SO}_2 \cdot \text{m}^{-3}$.

A Figura 5 ilustra o efeito do SO_2 na corrosão do ferro (e, naturalmente, do aço carbono). Se a superfície metálica estiver completamente limpa e não houver poluição na atmosfera, nenhuma corrosão significativa ocorrerá em umidades relativas abaixo de 100%. Na realidade, entretanto, o aço corrói quando a umidade relativa excede 50-70%. Isto ocorre parcialmente devido aos produtos de corrosão (que são higroscópicos e se hidrolisam, gerando acidificação da superfície metálica).

Se a superfície do aço estiver contaminada por cloretos, fuligem ou pós, a velocidade de corrosão será, assim, considerável quando a umidade exceder os 60%.

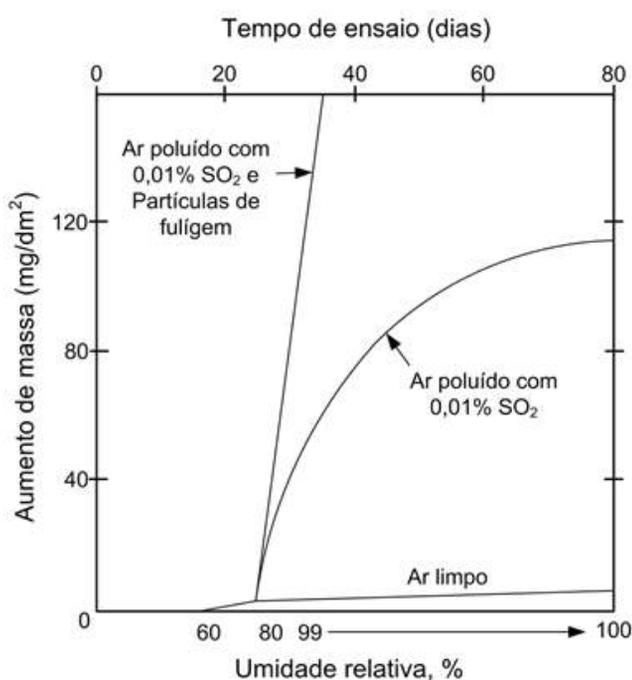


Figura 5: Efeito da umidade relativa e da poluição do ar sobre a corrosão atmosférica do ferro (Vernon apud Shreir⁹).

1.4.1.6.2 - Cloretos

A deposição de cloretos aumenta de modo muito característico a velocidade de corrosão dos aços carbono. Além de proporcionar um aumento da formação de eletrólitos superficiais - $MgCl_2$ e $NaCl$ são sais higroscópicos - o íon cloreto participa da ativação da corrosão de outra forma, muito mais importante. Para os metais ferrosos, os íons cloreto competem com as hidroxilas para se combinar com o cátion ferroso, produzido na reação anódica. No caso do grupo hidroxila, os produtos de corrosão tendem a promover, em maior ou menor grau, a passivação do substrato, através da formação da ferrugem comum ($FeOOH$).

Em contraste, os complexos ferro-cloreto que são formados em ambientes marinhos tendem a ser solúveis, resultando, agora, não na diminuição da velocidade de corrosão do aço, mas em seu aumento. Com base nesse fato, metais tais como o zinco e o cobre, cujos cloretos são menos solúveis do que os de ferro, devem ser menos susceptíveis ao ataque por cloretos. Esta observação é confirmada na prática.

Cloretos são depositados principalmente de atmosferas marinhas como pequenas gotas ou cristais formados a partir da evaporação da névoa salina, carregada pelos ventos a partir do mar. Outra fonte de emissão de cloretos é aquela oriunda da queima de carvões fósseis.

Em ambientes marinhos, a deposição de cloretos usualmente decresce fortemente com o acréscimo da distância da praia, pois as gotículas que compõe a névoa salina são decantadas por gravitação ou são filtradas quando o vento passa pela vegetação e edificações. A velocidade de deposição de cloretos em áreas marinhas está situada, de modo geral, de 5 a $1.500 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$.

1.4.1.6.3 - Temperatura

A influência da temperatura sobre a corrosão atmosférica é complexa e não tem sido estudada de modo sistemático. Parece, entretanto, que a influência da temperatura sobre a corrosão atmosférica do aço carbono é maior do que sobre outros metais, como o zinco ou o cobre¹⁴. Se, por um lado, o aumento de temperatura estimula o ataque corrosivo através do aumento das velocidades das reações químicas, eletroquímicas e processos de difusão como um todo, por outro lado, leva à evaporação mais rápida das películas de eletrólitos existentes sobre as superfícies metálicas – p.ex., orvalho ou chuva. Desse modo, o tempo de umedecimento (TOW) é encurtado e a velocidade de corrosão decresce.

Além disso, a solubilidade do oxigênio e dos gases corrosivos no eletrólito decresce com o aumento de temperatura. Em temperaturas abaixo de 0°C (fato incomum no Brasil), a película de eletrólito poderá congelar, levando à diminuição significativa da velocidade de corrosão.

1.5 - Medidas Usuais na Prevenção da Corrosão

As medidas costumeiramente utilizadas no controle da corrosão consistem da utilização de uma ou mais das seguintes receitas “genéricas”:

- Seleção de um material que apresente baixa taxa de corrosão naquele ambiente específico. Este é o caso do emprego estrutural dos aços patináveis, que apresentam uma maior resistência à corrosão atmosférica do que os aços estruturais comuns, para ambientes atmosféricos específicos;
- Alteração do ambiente, isto é, remoção do oxigênio, da água, ou ainda adição de algum agente químico inibidor de corrosão. Este caminho trata do controle da corrosão através da manutenção de componentes metálicos dentro de salas climatizadas, do tratamento das águas de caldeira (onde o oxigênio é eliminado da água) ou ainda do emprego de inibidores de corrosão em certas águas industriais;
- Alteração do potencial eletroquímico, tornando o metal imune à corrosão. O exemplo mais rotineiro é o do emprego da proteção catódica na proteção de oleodutos ou plataformas *offshore*;
- Aplicação de revestimentos adequados sobre a superfície metálica, de modo a criar uma barreira efetiva entre o metal e o ambiente agressivo. Este é o caminho mais amplamente empregado na proteção de estruturas. Ele consiste na aplicação de um revestimento orgânico (p.ex., tinta) ou inorgânico (p.ex., zinco, na galvanização por imersão a quente) sobre o aço;
- Detalhamento cuidadoso na etapa de projeto, fazendo com que os constituintes agressivos (como, p.ex., a água) não sejam mantidos em contato com a estrutura por mais tempo do que o estritamente necessário. Esta é a forma certamente menos onerosa de tratar a proteção frente à corrosão. Quando utilizado em conjunto com o item descrito acima, revela-se como sendo o melhor [benefício/custo] das formas de controle da corrosão.

O detalhamento cuidadoso e a escolha correta de um sistema de proteção são considerados fundamentais no controle da corrosão e constitui parte integrante de todo bom projeto.

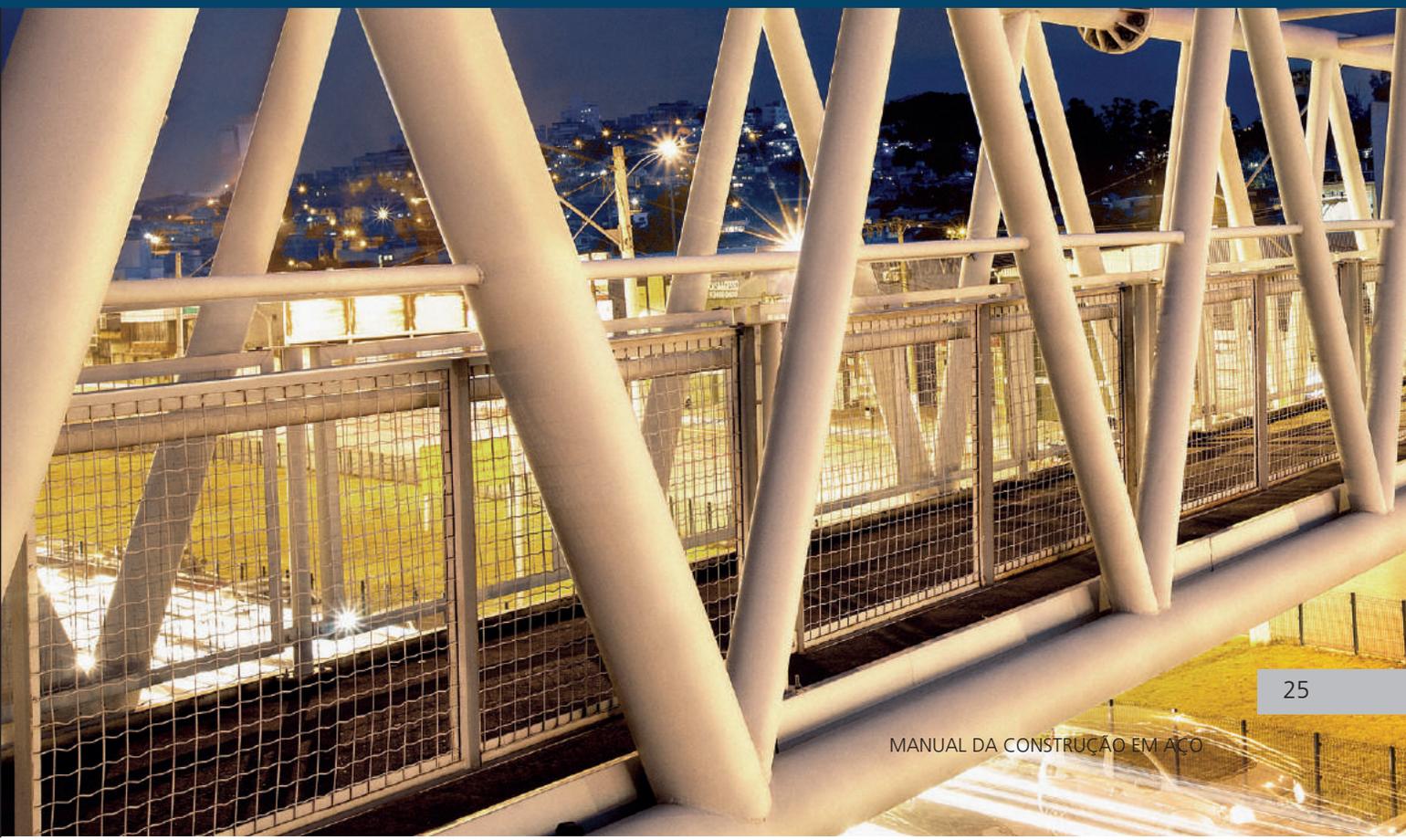
Este manual tratará, nas seções seguintes, de clarificar pontos relativos à aplicação de um revestimento adequado ao ambiente em questão e dos detalhes de projeto que auxiliarão em muito a longevidade de um projeto.





CAPÍTULO 2

Formas Usuais de Proteção das Estruturas Metálicas



2.1 - Introdução

Muitas estruturas metálicas tem se mantido em pleno uso ao longo do tempo, mesmo quando expostas às condições mais adversas. A ponte inglesa conhecida como Ironbridge, construída em 1779 no Condado de Shropshire, na Inglaterra, encontra-se em perfeitas condições após mais de 230 anos de uso.

A sociedade moderna tem, à sua disposição, grande variedade de recursos tecnológicos que permitem garantir a longevidade das estruturas de aço. Os três fatores fundamentais no sucesso na proteção são: 1. Qualificação correta da agressividade do ambiente, 2. Escolha de um sistema de proteção normatizado, escolhido em acordo com a agressividade do ambiente e sua correta aplicação, e, 3. Detalhamento de projeto bem feito.

Este capítulo discorre sobre alguns dos sistemas de proteção costumeiramente disponíveis para a proteção de uma estrutura de aço – a pintura e a galvanização por imersão a quente.

2.2 - Pintura como forma de proteção

A pintura é a mais importante forma de proteção das estruturas metálicas. Ela tem sido empregada há muitas décadas com sucesso, e sua evolução é notável.

A durabilidade de um sistema de pintura é fundamentalmente dependente da qualidade do preparo prévio da superfície do aço, da escolha correta das tintas que compõe o sistema, suas espessuras e, finalmente, a qualidade da aplicação. São dois os objetivos principais do preparo da superfície:

1. **Limpeza superficial:** Trata-se da remoção da superfície de materiais que possam impedir o contato direto da tinta com o aço, tais como pós (diversos), gorduras, óleos, combustíveis, graxas, ferrugem, carepa de laminação, resíduos de tintas, etc. O nível requerido de limpeza superficial variará de acordo com as restrições operacionais existentes, do tempo e dos métodos disponíveis para a limpeza, do tipo de superfície presente e do sistema de pintura escolhido, uma vez que diferentes tintas possuem diferentes graus de aderência sobre as superfícies metálicas.
2. **Ancoragem mecânica:** O aumento da rugosidade superficial proporciona um aumento da superfície de contato entre o metal e a tinta, contribuindo, desse modo, para o aumento da aderência. O perfil de rugosidade especificado está ligado à espessura (total) da camada seca de tinta.

A carepa de laminação é um contaminante muito especial, cujo efeito danoso é muitas vezes ignorado, razão pela qual trataremos desse assunto com algum detalhe.

O aquecimento do aço a temperaturas situadas entre 575°C e 1370°C provoca a formação de uma camada de óxidos denominada carepa de laminação. Esta película é formada por três camadas de óxidos sobrepostas: wustita (FeO), magnetita (Fe₃O₄) e hematita (Fe₂O₃).

Placas, tarugos, blocos, chapas, barras, perfis e vergalhões são laminados em temperaturas superiores a 870°C – em geral próximas à 1000°C. A carepa de laminação, formada ao ar, é uma película cinza-azulada, muito dura, aderente e lisa, que recobre completamente o aço e cuja espessura média pode variar de 10 µm a 1.000 µm (1.000 µm = 1 mm).

Este revestimento natural é, para muitos, sinal da existência de um ótimo revestimento de base para a pintura. Infelizmente esta é uma falsa ideia muito disseminada no meio técnico.

Devido ao fato da carepa possuir coeficiente de dilatação diferente daquele apresentado pelo aço, ela acaba trincando durante os ciclos naturais de aquecimento e resfriamento por que passa o aço após sua produção e estocagem. Estas pequenas fissuras, microscópicas, permitem a penetração de água, oxigênio e contaminantes variados até a superfície do aço. A presença de eletrólitos (p.ex., água condensada) propicia a formação de uma pilha galvânica, onde o aço é anodo (e é, conseqüentemente, oxidado) e a carepa é catodo (sobre a qual ocorre a reação de redução do oxigênio). Depois de algum tempo de ataque, a ferrugem progride por baixo da carepa, expulsando-a da superfície do aço. Como é volumosa, acaba por destacar a carepa, que, ao longo do tempo, vai sendo retirada, deixando, em seu lugar, a ferrugem.

Outro problema com a carepa é que, sendo muito lisa, não fornece a rugosidade necessária à perfeita ancoragem (mecânica) da tinta.

A carepa, como visto, não protege o aço da corrosão atmosférica. Ela precisa ser removida antes de se iniciar o processo de pintura, pois, uma vez trincada, ela reterá os constituintes necessários ao processo corrosivo – água, oxigênio e contaminantes diversos. A pintura sobre a carepa não evitará que o processo de corrosão continue, pois, toda tinta, seja ela qual for, é permeável à difusão de oxigênio e vapor de água. A formação contínua da ferrugem, volumosa, levará à ruptura da película de tinta, o que estimulará a corrosão.

Outros contaminantes superficiais, como óleos, graxas, tintas para marcação, óleos de corte, etc., afetarão seriamente a adesão de revestimentos aplicados sobre o aço, e devem ser removidos. Um erro de avaliação muito comum é o que considera que a operação de limpeza subsequente eliminará o contaminante até então não eliminado. Esta prática faz com que os resíduos continuem sobre a superfície metálica, prejudicando a aderência do revestimento.

O grau mínimo de limpeza de uma superfície metálica varia de acordo com o tipo de tinta a ser aplicada e com as condições a que esta ficará exposta.

A norma internacional mais citada e empregada para o preparo da superfície do aço é a ISO

8501-124. Esta Norma se refere, essencialmente, à aparência da superfície do aço antes e após a limpeza manual, manual motorizada, jateamento abrasivo, etc.

Os padrões de grau de corrosão são definidos através de fotografias do estado de intemperismo em que o aço se encontra para pintura:

1. A - superfície com carepa de laminação ainda intacta;
2. B - superfície com carepa de laminação se destacando e com presença de ferrugem, em qualquer proporção;
3. C - superfície com corrosão generalizada e sem carepa;
4. D - superfície com corrosão generalizada contendo pontos profundos de corrosão (pites).

Os padrões de grau de limpeza também são definidos visualmente, através de fotografias do estado em que as superfícies ficam após o tratamento de limpeza:

1. St 2: Limpeza manual, executada com ferramentas manuais como escovas, raspadores, lixas e palhas de aço;
2. St 3: Limpeza mecânica executada com ferramentas mecanizadas como escovas rotativas, pneumáticas ou elétricas;
3. Sa 1: É o jato ligeiro (brush off). A superfície resultante deverá encontrar-se inteiramente livre de óleos, graxas e materiais como carepa, tinta e ferrugem soltas. A carepa e a ferrugem remanescentes poderão permanecer, desde que firmemente aderidas. O metal deverá ser exposto ao jato abrasivo por tempo suficiente para provocar a exposição do metal base em vários pontos da superfície sob a camada de carepa;
4. Sa 2: Chamado de jato comercial. A superfície resultante do jateamento poderá apresentar manchas e pequenos resíduos devidos à ferrugem, carepa e tinta. Pelo menos 2/3 da área deverá estar isenta de resíduos visíveis, enquanto o restante será limitado pelas manchas e resíduos;
5. Sa 2 ½: Chamado de jato ao metal quase branco. É definida como superfície livre de óleo, graxa, carepa, ferrugem, tinta e outros materiais, podendo apresentar pequenas manchas claras devidas a resíduos de ferrugem, carepa e tinta. Pelo menos 95% da área deverão estar isenta de resíduos visíveis, sendo o restante referente aos materiais acima mencionados;
6. Sa 3: Conhecido como jato ao metal branco. Após a limpeza, o aço deverá exibir cor

metálica uniforme, branco-acinzentada, sendo removidos 100% de carepas e ferrugens. A superfície resultante estará livre de óleos, graxas, carepa, tinta, ferrugem e de qualquer outro depósito.

A superfície metálica deverá ser, antes da limpeza mecânica, lavada com água e tensoativos neutros, esfregando-se com uma escova de nylon. Após a lavagem, secar a superfície naturalmente ou com ar comprimido limpo (isento de óleo) e seco. Esta providência é necessária, pois as operações de escovamento e jato não removem óleos, gorduras e sais da superfície.

O método do jateamento abrasivo é muito empregado na fabricação de estruturas metálicas. Ele é feito através do impacto de partículas, geralmente abrasivas, impelidas à alta velocidade contra a superfície a ser limpa. Esta técnica de limpeza possui duas grandes vantagens:

1. Elimina todas as impurezas superficiais, permitindo o contato do revestimento com o substrato;
2. Confere rugosidade à superfície, permitindo a ancoragem do revestimento.

Diversos materiais podem ser utilizados como abrasivos: granalha de aço, alumina sinterizada, vidro, ferro fundido, escórias variadas, etc.

A granalha de aço é o agente abrasivo normalmente utilizado em cabines de jato fechadas. Ela é feita de aços especiais, muito duros. O formato de suas partículas pode ser esférico (shot) ou angular (grit). As esféricas podem ser recicladas até 450 vezes e imprimem um perfil arredondado à superfície do aço. As angulares podem ser recicladas até 350 vezes e deixam um perfil mais anguloso e irregular sobre a superfície metálica.

Tintas são suspensões homogêneas de partículas sólidas (pigmentos) dispersas em um líquido (conhecido como veículo), em presença de componentes adicionados em menores proporções, chamados de aditivos.

Pigmentos são pós orgânicos ou inorgânicos finamente divididos (com aproximadamente 5 μm de diâmetro). Em suspensão na tinta líquida, eles são aglomerados pela resina após a secagem, formando uma camada uniforme sobre o substrato. Os pigmentos promovem a cor, opacidade, coesão e inibição do processo corrosivo e também a consistência, a dureza e resistência da película.

Alguns dos pigmentos comumente utilizados nas tintas de proteção ao aço carbono são os seguintes:

1. Fosfato de zinco. É um pigmento que, em contato com água, dissolve-se parcialmente, liberando os ânions fosfato que passivam localmente as áreas anódicas presentes sobre a superfície do aço, formando fosfatos de ferro;

2. Zinco metálico. É utilizado o zinco metálico de alta pureza disperso em resinas epoxídicas ou etil silicato. As tintas ricas em zinco são também chamadas de “galvanização a frio” e conferem proteção catódica ao substrato de aço. O zinco se corrói, protegendo o aço, em processo similar à proteção auferida pela galvanização a quente tradicional. Um risco na pintura e o zinco começará a se corroer, protegendo galvanicamente o aço;

3. Óxido de ferro. É um pigmento vermelho que não apresenta mecanismo de proteção anticorrosiva por passivação, alcalinização ou proteção catódica. Entretanto, por ser sólida e maciça, a partícula atua como barreira à difusão de espécies agressivas, como água e oxigênio. Este pigmento é muito utilizado nas tintas de fundo, não é tóxico, tem bom poder de tingimento e apresenta boa cobertura;

4. Alumínio e outros. O alumínio lamelar e outros pigmentos também lamelares tais como a mica, talco, óxido de ferro micáceo e certos caulins atuam pela formação de folhas microscópicas, sobrepostas, constituindo uma barreira que dificulta a difusão de espécies agressivas. Quanto melhor a barreira, mais durável será a tinta. A junção de resinas bastante impermeáveis com pigmentos lamelares oferece uma ótima barreira contra a penetração dos agentes agressivos.

Os solventes têm por finalidade dissolver a resina e, pela diminuição da viscosidade, facilitar a aplicação da tinta. Os solventes mais comuns utilizados em tintas são os líquidos orgânicos e a água.

Os ligantes mais comuns são as resinas e os óleos, mas também podem ser inorgânicos, como os silicatos solúveis. Eles têm a função de envolver as partículas de pigmento e mantê-las unidas entre si e o substrato. A resina proporciona impermeabilidade, continuidade e flexibilidade à tinta, além de aderência entre esta e o substrato. As resinas se solidificam através da simples evaporação do solvente ou pela polimerização, com ou sem a intervenção do oxigênio do ar. Em alguns casos, a resina é frágil e não possui boa aderência. Nestes casos, adicionam-se os chamados plastificantes, que, não sendo voláteis, permanecem na película após a secagem.

A classificação mais comum das tintas é feita pelo tipo de resina empregada ou pigmento utilizado.

As tintas de fundo, conhecidas como *primers*, são costumeiramente classificadas de acordo com o principal pigmento anticorrosivo participante, enquanto que as tintas intermediárias e de acabamento são usualmente classificadas de acordo com a resina empregada, como por exemplo, epoxídicas, acrílicas, alquídicas, etc.

Os tipos de tintas mais importantes para a proteção do aço carbono, tendo como classificação o tipo de resina, são:

1. Alquílicas. Conhecidas como esmaltes sintéticos, são tintas mono componentes de secagem ao ar. São utilizadas em interiores secos e abrigados, ou em exteriores não poluídos. Como as resinas utilizadas são saponificáveis, não resistem ao molhamento constante ou à imersão em água;
2. Epoxídicas. São tintas bicomponentes de secagem ao ar. A cura se dá pela reação química entre os dois componentes. O componente A é, de modo geral, à base de resina epoxídica, e o B, o agente de cura, pode ser à base de poliamida, poliamina ou isocianato alifático. São mais impermeáveis e mais resistentes aos agentes químicos do que as alquílicas. Resistem à umidade, imersão em água doce ou salgada, lubrificantes, combustíveis e diversos produtos químicos. As epoxídicas à base de água têm a mesma resistência daquelas formuladas à base de solventes orgânicos. De modo geral, não são indicadas para a exposição ao intemperismo (ação do sol e da chuva), pois desbotam e perdem o brilho (calcinação);
3. Poliuretânicas. São tintas bicomponentes em que o componente A é baseado em resina de poliéster ou resina acrílica, e, o B, o agente de cura, é à base de isocianato alifático. As tintas poliuretânicas são bastante resistentes ao intemperismo. Assim, são indicadas para a pintura de acabamento em estruturas expostas ao tempo. São compatíveis com primers epoxídicos e resistem por muitos anos com menor perda da cor e do brilho originais;
4. Acrílicas. São tintas monocomponentes à base de solventes orgânicos ou de água, e, assim como as tintas poliuretânicas, são indicadas para a pintura de acabamento. São tintas bastante resistentes à ação do sol.

As tintas de fundo são aplicadas diretamente sobre a superfície metálica limpa. Sua finalidade é a de promover aderência do esquema ao substrato, e contém, costumeiramente, pigmentos inibidores de corrosão. Elas são utilizadas na proteção dos aços estruturais, e são classificadas de acordo com os pigmentos inibidores adicionados em sua composição. Como exemplos, temos as tintas de fundo à base de fosfato de zinco, de zinco metálico ou de alumínio. Elas são formuladas com altos teores de pigmentos e, por isso, são semibrilhantes ou foscas. Cada um destes pigmentos inibidores pode ser incorporado a uma certa variedade de ligantes, gerando, por exemplo, tintas de fundo alquílicas à base de fosfato de zinco, tintas epoxídicas à base de fosfato de zinco, etc.

Tintas intermediárias não possuem as mesmas propriedades das tintas de fundo anticorrosivas, mas auxiliam na proteção, fornecendo espessura ao sistema de pintura empregado (isto é, proteção por barreira). De modo geral, quanto mais espessa a camada seca, maior a vida útil do revestimento, assim, várias demãos poderão ser aplicadas, até que se atinja a espessura adequada.

Tintas intermediárias e de acabamento são, normalmente, classificadas de acordo com seus

ligantes, como, por exemplo as epoxídicas, poliuretânicas, etc.

As tintas de acabamento têm a função de proteger o sistema contra o meio ambiente e também dar a cor e o brilho adequados. Elas devem ser resistentes ao intemperismo, a agentes químicos e ter cores estáveis. De modo geral, são tintas brilhantes com boa resistência à perda de cor e brilho.

As várias camadas de pintura devem, naturalmente, ser compatíveis entre si. Elas podem pertencer à mesma família ou podem ser muito diferentes. Uma precaução que sempre deve ser adotada é a de todas as tintas do sistema devem preferencialmente pertencer ao mesmo fabricante. Isso minimizará a possibilidade de ocorrência futura de defeitos tais como a delaminação (descolamento).

Os aditivos melhoram certas propriedades específicas das tintas. Existem aditivos antinata, secantes, plastificantes, antimofos, antisedimentantes, nivelantes, agentes tixotrópicos, etc.

Um mesmo aço, pintado com tipos diferentes de tintas, pode apresentar comportamento muito diferenciado quando exposto ao mesmo meio agressivo.

Esta diferença pode ser explicada admitindo-se que as tintas empregadas tenham diferentes mecanismos de ação contra a corrosão. Estes mecanismos, de maneira geral, são classificados em:

1. Proteção por barreira: A tinta deve ser a mais impermeável possível e aplicada em espessuras elevadas. Tintas de alta espessura, chamadas de HB (high build) tem como vantagem a economia de mão-de-obra para a aplicação. Além das tintas de alta espessura, as que oferecem melhor proteção por barreira são as betuminosas e as de alumínio. O inconveniente da proteção por barreira é que, se houver um dano à película, a corrosão se alastrará sob a película por aeração diferencial. Assim, é sempre recomendável que se utilizem tintas de fundo que permitam o desenvolvimento de mecanismos de proteção catódica ou anódica;
2. Proteção anódica: A proteção das regiões anódicas é proporcionada pelos pigmentos anticorrosivos, todos de caráter oxidante. A proteção pode ser dada através da dissolução do pigmento ou por ação oxidante;
3. Proteção catódica: A proteção é dada através da formação de pares galvânicos entre o aço carbono e partículas de zinco em pó (são as chamadas tintas ricas em zinco). Nestas, o zinco se corrói, protegendo o substrato de aço carbono. O teor mínimo recomendável de zinco na película seca é de 85% (o contato elétrico é fundamental à manutenção da proteção).

Na elaboração de um sistema de pintura, todos os dados devem ser considerados, como o ambiente, substrato, preparação de superfície, tintas, sequência de aplicação, número de demãos,

espessuras, tipos de aplicação e a que condições de trabalho estará submetida a superfície. Quanto melhor o preparo de superfície e maior a espessura, mais duradoura será a proteção que o sistema oferecerá ao aço. O bom preparo de superfície custa mais, porém a pintura durará mais.

2.3 - Galvanização por imersão a quente

Existem quatro métodos usuais de aplicação de revestimentos metálicos à base de zinco sobre superfícies de aço: galvanização por imersão a quente, metalização, eletrodeposição e sherardização. Destes, os últimos dois não são utilizados em estruturas de aço.

Galvanização por imersão a quente (por vezes chamada de galvanização a fogo) é um processo de aplicação de revestimentos de zinco a componentes de aço ou ferro fundido através da imersão do componente em um banho de zinco fundido. A simplicidade do processo de galvanização a quente é uma vantagem sobre outros métodos de proteção contra corrosão.

As principais vantagens da galvanização por imersão a quente são:

1. Custo inicial competitivo. A galvanização a fogo, de modo geral, possui custos muito competitivos quando comparados a outras formas de proteção especificadas na proteção do aço. O custo de aplicação de revestimentos que requerem mão de obra intensiva, como a pintura, tem crescido mais do que os custos de aplicação (em fábrica) da galvanização a fogo;
2. Pequena manutenção/custo menor a longo prazo. Mesmo nos casos onde o custo inicial da galvanização a fogo é maior do que revestimentos alternativos, a galvanização apresenta menores custos de manutenção ao longo da vida útil do componente/estrutura. A manutenção futura de sistemas tradicionais de proteção é ainda mais cara quando as estruturas estão localizadas em áreas remotas;
3. Vida longa. A expectativa de vida de revestimentos galvanizados aplicados sobre componentes estruturais excede facilmente os 40 anos em ambientes rurais e urbanos. Em ambientes agressivos, industriais ou marinhos, a vida do revestimento fica situada, de modo geral, entre 20 a 30 anos;
4. Preparo superficial. A imersão em ácido, como pré-tratamento, garante a limpeza uniforme das superfícies de aço. Em contraste, revestimentos orgânicos tradicionais devem ser aplicados sobre superfícies limpas com jato abrasivo (em geral, em grau Sa 2 ½) e inspecionadas. Adicionalmente, a aplicação de revestimentos orgânicos é limitada em termos das condições ambientais e umidade relativa na época da aplicação. Isto adiciona custo na aplicação de um sistema de pintura robusto;

5. Aderência. O revestimento obtido através da galvanização por imersão a quente está ligado metalurgicamente ao substrato de aço;
6. Contaminação ambiental. O revestimento não é tóxico e não contém substâncias voláteis;
7. Velocidade na aplicação do revestimento. Um revestimento protetor é aplicado em minutos. Um sistema de pintura tradicional pode levar vários dias. A aplicação do revestimento galvanizado não depende das condições do tempo;
8. Proteção uniforme. Todas as superfícies de um componente galvanizado a fogo são protegidas tanto internamente quanto externamente, incluindo rebaixos, cantos-vivos e áreas inacessíveis à aplicação de outros métodos de revestimento;
9. Proteção de sacrifício em áreas danificadas. Como dito anteriormente, o revestimento de sacrifício fornece proteção catódica às pequenas áreas de aço expostas à atmosfera, como poros e riscos. Diferentemente dos revestimentos orgânicos, pequenas áreas danificadas não necessitam de retoques; a corrosão sob o revestimento não é possível quando se utilizam revestimentos de sacrifício.

A técnica, entretanto, também possui algumas desvantagens. As principais podem ser descritas como:

1. A galvanização por imersão a quente não pode ser feita no canteiro de obras. O processo só pode ser feito em uma unidade industrial, a galvanizadora;
2. A coloração do zinco somente pode ser alterada através da pintura;
3. As dimensões dos componentes ou estrutura a galvanizar são limitadas pelas dimensões da cuba de zinco líquido;
4. A alta temperatura do banho pode causar distorções em certos componentes. Existe o risco de que, painéis grandes e planos, não enrijecidos, possam sofrer distorções, assim como o empenamento de perfis I, H ou U, de grandes dimensões e pequena espessura de alma/mesas. Um bom projeto aliado à boa prática de galvanização previne as distorções;
5. A soldagem de componentes de aço galvanizados por imersão a quente pode demandar procedimentos diferentes daqueles demandados pelos aços não revestidos. A soldagem de componentes galvanizados resultará na perda, em algum nível, de parte da camada de revestimento. A camada é volatilizada durante o processo. Torna-se necessário, assim, o condicionamento do revestimento ao longo do cordão de solda e áreas adjacentes, através da metalização, da utilização de tintas ricas em zinco ou outro método.

O processo de galvanização por imersão a quente compreende os seguintes estágios:

1. Óleos e graxas são removidos através do uso de um agente desengraxante adequado;
2. O aço é, então, submetido à decapagem ácida, com o objetivo de remover a carepa de laminação e a ferrugem. Em geral, se utiliza o ácido clorídrico inibido. Esta etapa pode ser precedida do jateamento abrasivo, feito com o objetivo de remover grande parte da carepa e criar rugosidade no material. De qualquer modo, estas superfícies são sempre submetidas à decapagem;
3. A superfície de aço é mergulhada em um fluxante, de modo a garantir o bom contato entre o aço e o zinco líquido, durante o processo de galvanização;
4. O componente é então mergulhado em um banho de zinco líquido à temperatura próxima de 450°C. Nesta temperatura, o zinco reage com o aço, formando uma série de ligas Zn/Fe que se ligam muito bem à superfície do aço;
5. Conforme o componente de aço é retirado do banho, uma camada de zinco relativamente puro é depositada no topo da última camada de liga Zn/Fe.

A Figura 6 ilustra as etapas de uma linha de galvanização a quente.

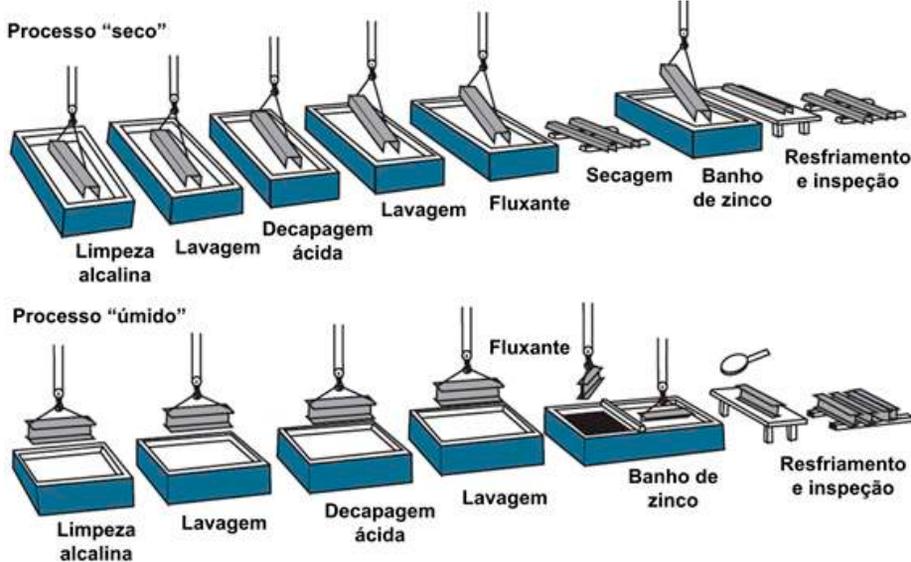


Figura 6: Processos unitários existentes em uma linha de galvanização a quente.

Conforme o zinco solidifica, ele assume um brilho metálico característico. A espessura do revestimento é influenciada por vários fatores, incluindo a dimensão e espessura do componente e o preparo de superfície empregado anteriormente. Espessuras maiores são obtidas em aços que passaram pela etapa de jateamento abrasivo comercial.

Os elementos químicos silício e fósforo presentes no aço também promovem um grande efeito

na espessura e aparência do revestimento. A espessura da camada depositada varia diretamente com o teor de silício do aço e com o tempo de imersão na cuba. Estes revestimentos mais espessos possuem, algumas vezes, uma coloração mais escura do que aquela obtida sobre aços contendo menores concentrações destes elementos de liga.

Em muitas aplicações, a galvanização por imersão a quente é utilizada sem qualquer tipo de proteção adicional, como a pintura. Entretanto, de modo a fornecer uma durabilidade extra, ou quando existirem requisitos de ordem estética, a pintura pode ser aplicada. A combinação de um revestimento metálico com um sistema de pintura é conhecida como “sistema duplex”. Tintas aplicadas sobre revestimentos galvanizados necessitam de um preparo de superfície adequado, para promover a aderência da tinta ao substrato. O pós-tratamento de cromatização não é recomendado quando se deseja pintar o componente galvanizado. O preparo da superfície inclui a “quebra de brilho” com lixa fina, para aumentar a rugosidade superficial (e melhorar o ancoramento) e a eventual aplicação de agentes químicos de ataque ao zinco.

Quando a reação entre o ferro e o zinco tiver virtualmente cessado e o componente retirado do banho de galvanização estiver recoberto por uma camada de zinco livre, o processo estará completo. Na realidade, não existe demarcação clara entre o aço e o zinco, mas uma transição gradual através de uma série de camadas de ligas (intermetálicos), que fornecem a ligação metalúrgica mencionada anteriormente. A Figura 7 ilustra a composição do revestimento.

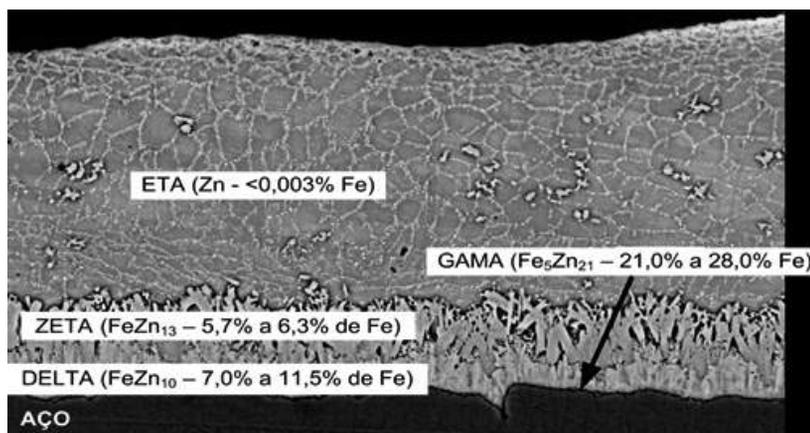


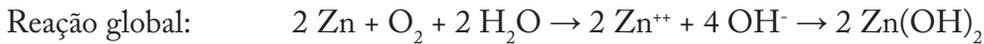
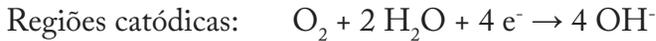
Figura 7: Seção de um revestimento galvanizado típico, mostrando as camadas de intermetálicos.

O mecanismo de corrosão atmosférica do zinco ocorre de acordo com o mecanismo descrito a seguir.

Em atmosferas úmidas, o zinco é oxidado, com a formação de hidróxido de zinco:



Esta reação é de natureza eletroquímica e envolve a redução catódica do oxigênio e a oxidação anódica do zinco:



O hidróxido de zinco assim formado reage com os constituintes presentes no do ar, como os gases CO_2 e SO_2 , ou o íon Cl^- , formando os sais básicos de zinco correspondentes a cada constituinte na interface hidróxido/ar. Isto ocorre desde que o pH da umidade superficial seja suficientemente alto (Figura 8).

Em atmosferas limpas, como aquelas encontradas nas áreas rurais, onde estão presentes o oxigênio, a água e o gás carbônico, teremos a formação do carbonato básico de zinco sobre o hidróxido de zinco formado:

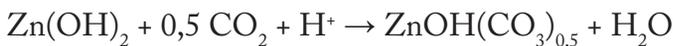
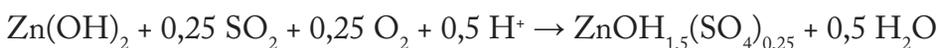
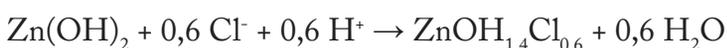


Figura 8: Produtos de corrosão formados sobre o zinco durante a exposição à atmosfera.

Em atmosferas urbanas e industriais, contaminadas com SO_2 , teremos a formação do sulfato básico de zinco sobre o hidróxido de zinco formado:



Finalmente, em atmosferas marinhas, contaminadas com cloretos, teremos a formação do cloreto básico de zinco sobre o hidróxido de zinco formado:



O hidróxido de zinco e os sais básicos formados, em conjunto chamados, por vezes, de “pátina do zinco”, protegem a superfície do ataque posterior. Eles são os agentes responsáveis pela proteção do zinco quando este é exposto à atmosfera

A taxa de corrosão do zinco (e de seus intermetálicos) é função das características da atmosfera. De modo geral, a perda metálica fica situada entre 0,5 a 3 $\mu\text{m}/\text{ano}$, o que faz com que um revestimento típico de zinco, com, no mínimo, 84 μm de espessura, garantirá proteção do aço por 40 anos ou mais. A Tabela 4 apresenta taxas de corrosão do zinco para diferentes ambientes do Brasil²⁸.

Tabela 4: Taxas de corrosão do zinco para diferentes ambientes do Brasil²⁸.

Local	Taxa de corrosão ($\mu\text{m}/\text{ano}$)		Razão aço/zinco	Tempo de exposição, anos
	Aço	Zinco		
Caratinga, MG	6,6	0,43	15,3	4
Belém, PA	17,3	1,18	14,7	2
Brasília, DF	8,7	1,12	7,8	2
Paulo Afonso, BA	17,3	1,6	10,8	1
Porto Velho, RO	4,3	2,0	2,2	2
São Paulo, SP	8,3	1,16	7,2	4
Ipatinga, MG	24,7	0,60	41,2	4
Cubatão, SP	85,2	0,94	90,6	4
Arraial do Cabo, RJ	437,7	1,74	251,6	4
Ubatuba, SP	400,3	2,08	192,5	4
Rio de Janeiro, RJ	58,5	1,21	48,3	4

A taxa de corrosão do zinco é única entre diversas ligas metálicas usuais. Ela varia de forma linear com o tempo. Isto permite prever com razoável precisão o comportamento futuro de proteção baseado em exposições reais de poucos anos.

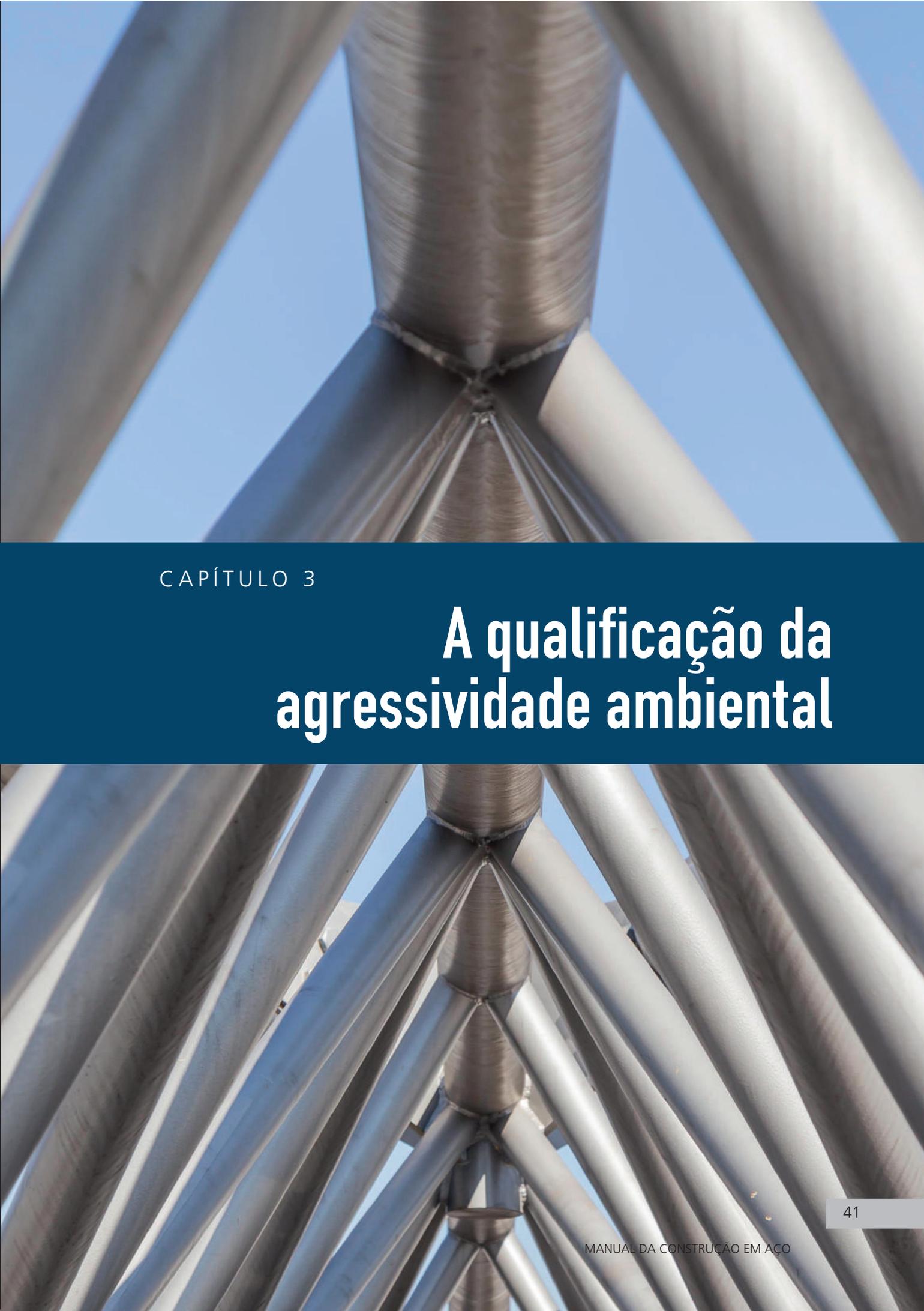
2.4 - A especificação de um sistema de proteção contra a corrosão

Para uma dada estrutura, os seguintes fatores devem ser pré-determinados:

1. A Vida Útil de Projeto (VUP) da estrutura, assim como a possibilidade de intervenções periódicas de manutenção;
2. O ambiente que circunda a estrutura;

3. A dimensão e a forma dos componentes estruturais;
4. As possibilidades de tratamento existentes no fabricante da estrutura ou no local da construção/montagem, para obras in situ;
5. O custo inicial da proteção e ao longo da vida útil de projeto. De modo geral, a galvanização e sistemas de pintura mais robustos custam muito menos ao longo da vida útil de projeto de uma dada estrutura do que sistemas mais simples de proteção.





CAPÍTULO 3

A qualificação da agressividade ambiental

3.1 Introdução

Como já discutido, a natureza e a velocidade da corrosão metálica são dependentes da composição e propriedades de películas superficiais de eletrólitos. O tempo de umedecimento, o tipo e a concentração dos poluentes gasosos e materiais particulados da atmosfera determinam a amplitude do ataque.

O conhecimento do grau de agressividade atmosférica não é somente importante para a especificação, ainda na etapa de projeto, de um sistema de proteção duradouro. Ele também é importante no gerenciamento da manutenção da edificação, de modo a garantir a vida útil de projeto.

Dois enfoques fundamentais têm sido utilizados na classificação da corrosividade de uma atmosfera. Eles são ilustrados na Figura 9. O primeiro deles trata de medir o tempo de umedecimento, o teor de dióxido de enxofre e o de cloretos de uma dada atmosfera. Trata, assim, do levantamento dos parâmetros ambientais que sabidamente influenciam diretamente no processo de corrosão. O segundo caminho trata da obtenção da taxa de corrosão de espécimes metálicos padronizados segundo norma, isto é, trata da experimentação.

Os caminhos para a classificação da corrosividade atmosférica podem ser utilizados de modo individual ou complementar, na derivação de relações entre as velocidades de corrosão atmosférica e as variáveis atmosféricas dominantes. A seguir, será apresentada a rota proposta pela ISO 12944-225, baseada em resultados de exposição de espécimes padronizados.

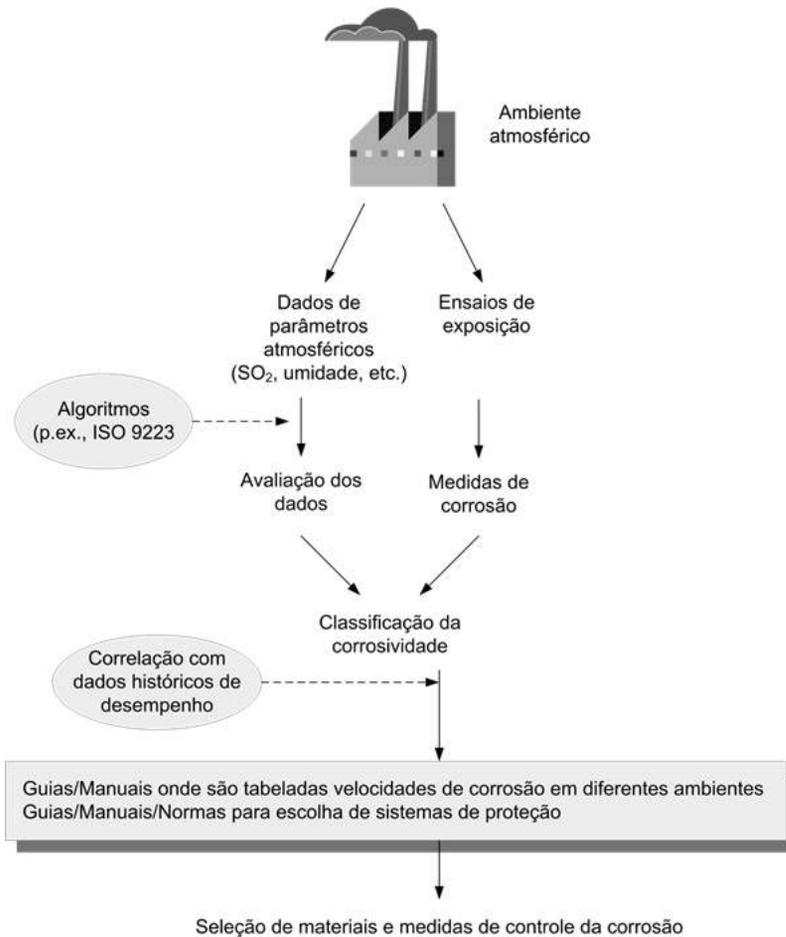


Figura 9: Os dois enfoques fundamentais utilizados na classificação da corrosividade de uma atmosfera.

3.2 - Classificação dos Ambientes Segundo a ISO 12944-2

Para a finalidade da ISO 12944-2, os ambientes atmosféricos são classificados em seis categorias de corrosividade:

- C1 Muito baixa agressividade
- C2 Baixa agressividade
- C3 Média agressividade
- C4 Alta agressividade
- C5-I Muito alta agressividade (industrial)
- C5-M Muito alta agressividade (marinha)

A Tabela 5 define as categorias de agressividade em termos da perda de massa (ou espessura) de espécimes padronizados, confeccionados em aço de baixo carbono ou em zinco, expostos à atmosfera e retirados após o primeiro ano de exposição. Os detalhes da confecção dos corpos-de-prova, assim como o tratamento anterior e posterior à exposição podem ser encontrados na ISO 9226²⁶.

Não é permitida a extrapolação da perda de massa ou da espessura para o tempo de um ano, a partir de tempos de exposição menores ou maiores do que este. As perdas de massa ou espessura obtidas para os espécimes de aço e de zinco expostos lado a lado podem, a princípio, pertencer a diferentes categorias de agressividade. Em tais casos, a categoria de agressividade mais elevada deverá sempre ser considerada.

Se, porventura, não for possível a exposição de corpos-de-prova padronizados no ambiente de interesse, a categoria de agressividade poderá ser estimada através da simples consideração de ambientes típicos, também descritos na Tabela 5. Os exemplos listados são informativos, e, ocasionalmente, podem ser falsos. Somente a medida da perda de massa ou da espessura fornecerá a classificação correta.

Corrosão dentro de edificações. A corrosão de estruturas metálicas localizadas internamente às edificações, abrigadas do ambiente externo, é considerada, de modo geral, insignificante.

Se o interior de uma edificação for, entretanto, parcialmente – e não completamente – abrigado do ambiente externo, deve-se considerar, então, que a estrutura estará sujeita à mesma agressividade ambiental imposta pelo ambiente externo.

O efeito da corrosão em um ambiente interno pode ser agravado pelo uso da edificação. Como exemplos, temos as coberturas de piscinas, criadouros de animais e outras edificações especiais.

Regiões da estrutura que apresentem “pontos frios” poderão promover a condensação de água, promovendo localmente o processo de corrosão.

Corrosão em seções fechadas ou tubulares. Componentes tubulares hermeticamente fechados não estão sujeitos à corrosão interna. O projeto deve, assim, garantir a estanqueidade (isto é, não se devem utilizar soldas descontínuas, as juntas devem ser bem parafusadas, etc.). Se esta precaução não for tomada, poderá haver a penetração e retenção de umidade (oriunda da condensação ou precipitação). Se houver alguma probabilidade de que isto aconteça, as superfícies internas deverão ser protegidas, com um sistema de pintura adequado à agressividade do ambiente.

Tabela 5 – Corrosividade dos ambientes para o aço carbono²⁵.

Categoria de corrosividade	Perda de massa por unidade de superfície/ perda de espessura para Aço de Baixo Carbono (após o 1º ano de exposição)		Perda de massa por unidade de superfície/ perda de espessura para Zinco (após o 1º ano de exposição)		Exemplos de ambientes típicos (informativo)	
	Perda de massa (g.m ⁻²)	Perda de espessura (µm)	Perda de massa (g.m ⁻²)	Perda de espessura (µm)	Exterior	Interior
C1 (muito baixa)	≤ 10	≤ 1,3	≤ 0,7	≤ 0,1	-	Edificações condicionadas para o conforto humano (residências, escritórios, lojas, escolas, hotéis).
C2 (baixa)	>10 a 200	>1,3 a 25	> 0,7 a 5	> 0,1 a 0,7	Atmosferas com baixo nível de poluição. A maior parte das áreas rurais.	Edificações onde a condensação é possível, como armazéns e ginásios cobertos.
C3 (média)	>200 a 400	> 25 a 50	> 5 a 15	> 0,7 a 2,1	Atmosferas urbanas e industriais com poluição moderada por dióxido de enxofre. Áreas costeiras de baixa salinidade.	Ambientes industriais com alta umidade e alguma poluição atmosférica, como lavanderias e fabricas de alimentos.
C4 (alta)	> 400 a 650	> 50 a 80	> 15 a 30	> 2,1 a 4,2	Áreas industriais e costeiras com salinidade moderada.	Ambientes como indústrias químicas e coberturas de piscinas.
C5 (muito alta - industrial)	> 650 a 1.500	> 80 a 200	> 30 a 60	> 4,2 a 8,4	Áreas industriais com alta umidade e atmosfera agressiva	Edificações ou áreas com condensação quase que permanente e com alta poluição
C6 (muito alta - marinha)	> 650 a 1.500	> 80 a 200	> 30 a 60	> 4,2 a 8,4	Áreas costeiras e offshore com alta salinidade	Edificações ou áreas com condensação quase que permanente e com alta poluição

limites da categoria C5-M. Nestes casos, precauções especiais devem ser tomadas na seleção de sistemas de pintura. Consulte um especialista para detalhes.

Efeitos químicos. A corrosão é agravada localmente por poluentes oriundos de vários tipos de indústrias, como, p.ex., ácidos, álcalis, sais, solventes orgânicos, gases agressivos ou pós diversos. De modo geral, esta agressividade ocorre nas proximidades da fonte emissora. Exemplos são as decapagens químicas, linhas de eletrodeposição, indústrias de papel e celulose e refinarias de petróleo.

3.3 - Classificação dos Ambientes Segundo o Índice de Deterioração de Brooks

Condições locais de umidade em conjunto com altas temperaturas favorecem notavelmente os processos de degradação dos materiais expostos à atmosfera. A disponibilidade de valores destas duas variáveis auxilia em muito na avaliação do risco potencial da corrosão.

O denominado Índice de Brooks²⁷ é obtido a partir de uma simples equação, desenvolvida a partir de dados meteorológicos:

$$I = \frac{(UR - 65)P}{100}$$

onde I é o Índice de Deterioração, UR é a umidade relativa média anual, em %, e, P, a pressão de saturação do vapor de água na atmosfera, em mbar, correspondente à temperatura média anual.

Os graus de deterioração são classificados como descrito na Tabela 6:

Tabela 6: Graus de agressividade, como proposto por Brooks²⁷

I	Índice de Deterioração	I	Agressividade do ambiente
< 1	Muito baixo	0 - 1	Não agressivo
1 - 2	Baixo	1 - 2	Muito pouco agressivo
2 - 5	Moderado	2 - 4	Pouco agressivo
> 5	Alto	4 - 5	Agressivo
		5 - 10	Muito agressivo

3.4 - O Mapa de Corrosividade Iberoamericano – Projeto MICAT²⁸

Já há muito tempo, os estudiosos da corrosão atmosférica e os engenheiros responsáveis pelo projeto de sistemas de proteção e manutenção de estruturas metálicas expostas à atmosfera tem tratado de utilizar mapas de corrosão atmosférica. Para os estudiosos do tema, isto era um meio de representação visual dos dados de corrosão atmosférica. Para os engenheiros, era ferramenta rica em informações sobre o alcance do fenômeno em um determinado ponto geográfico, e, assim, poderoso auxiliar na seleção do material metálico mais adequado, do sistema de proteção mais adequado e das operações de manutenção subseqüentes.

Na prática, como visto anteriormente, os mapas de corrosão atmosférica se servem de dois enfoques principais:

- Medida direta da corrosividade da atmosfera através de seu efeito sobre certos materiais típicos (p.ex., aço carbono, zinco, cobre, alumínio, etc.), que são expostos em múltiplos lugares, representativos de uma região geográfica;
- Estimativa da corrosão atmosférica de uma determinada região geográfica a partir de dados ambientais disponíveis e de seu efeito nos materiais mediante experimentação a nível laboratorial.

O Projeto MICAT (Mapa Ibero-americano de Corrosão Atmosférica) foi concebido em 1988 como o subprograma XV (ao lado de outros doze) de atividades do Programa Ibero-americano de Ciência y Tecnologia para El Desarrollo – CYTED.

Com 14 países envolvidos (Espanha, Argentina, Portugal, México, Costa Rica, Panamá, Colômbia, Venezuela, Equador, Peru, Chile, Cuba, Brasil e Uruguai), foram estabelecidas 75 estações de ensaio de corrosão atmosférica, envolvendo 110 instituições tais como universidades, institutos de pesquisas e empresas. O projeto contou com estações localizadas em praias, no campo, no centro de grandes cidades e zonas industriais, em pantanais, florestas, em regiões desérticas, montanhas, ao lado de vulcões e até mesmo na Antártica.

Os resultados do MICAT geraram centenas de publicações técnicas e apresentações em congressos e em distintos fóruns internacionais.

O projeto produziu, para o Brasil, dois mapas de agressividade distintos. O primeiro apresenta o mapeamento segundo o Índice de Deterioração de Brooks. O segundo mapa foi elaborado tendo como base a ISO 12944-2. Espécimes foram expostos em locais previamente determinados, cobrindo regiões com diferentes graus de agressividade. Estes resultados servem como ferramenta auxiliar à Tabela 4.

A Figura 10 traz o Índice de Corrosividade Atmosférica de Brooks. Embora de conceituação teórica mais simples do que o modelo apresentado pela ISO 12944-2 (pois somente considera a umidade e a temperatura como fatores intervenientes), ela pode ser de valia na qualificação da agressividade das grandes áreas rurais do Brasil, onde os dados são escassos ou inexistentes. Em contrapartida, certa reserva deve ser considerada quando avaliamos grandes cidades, áreas industriais e regiões costeiras. Como visto anteriormente, a água é o eletrólito necessário às reações eletroquímicas, mas são os agentes poluentes (não considerados no Índice de Brooks) que imprimem forte aumento na velocidade de corrosão.

A observação da Figura 10 indica que a maior parte de nosso território é de muito baixa, baixa ou moderada agressividade.

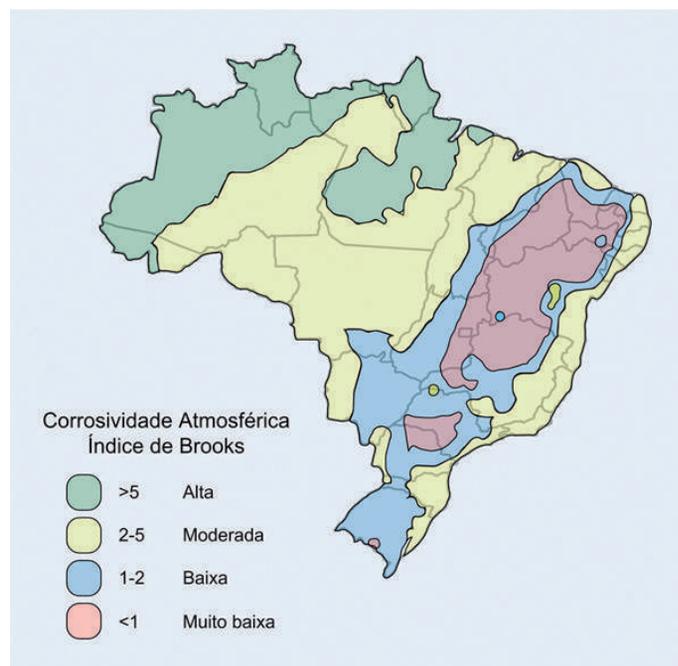


Figura 10: Índice de Corrosividade de Brooks para o Brasil²⁷.

A Figura 11 traz os resultados obtidos através da aplicação da ISO 12944-2. Este mapa é um poderoso auxiliar na escolha correta do grau de corrosividade de atmosferas, especialmente as industriais e costeiras. O mapa do Brasil traz, adicionalmente, a corrosividade atmosférica considerando-se somente como variável o tempo de umedecimento (TOW).

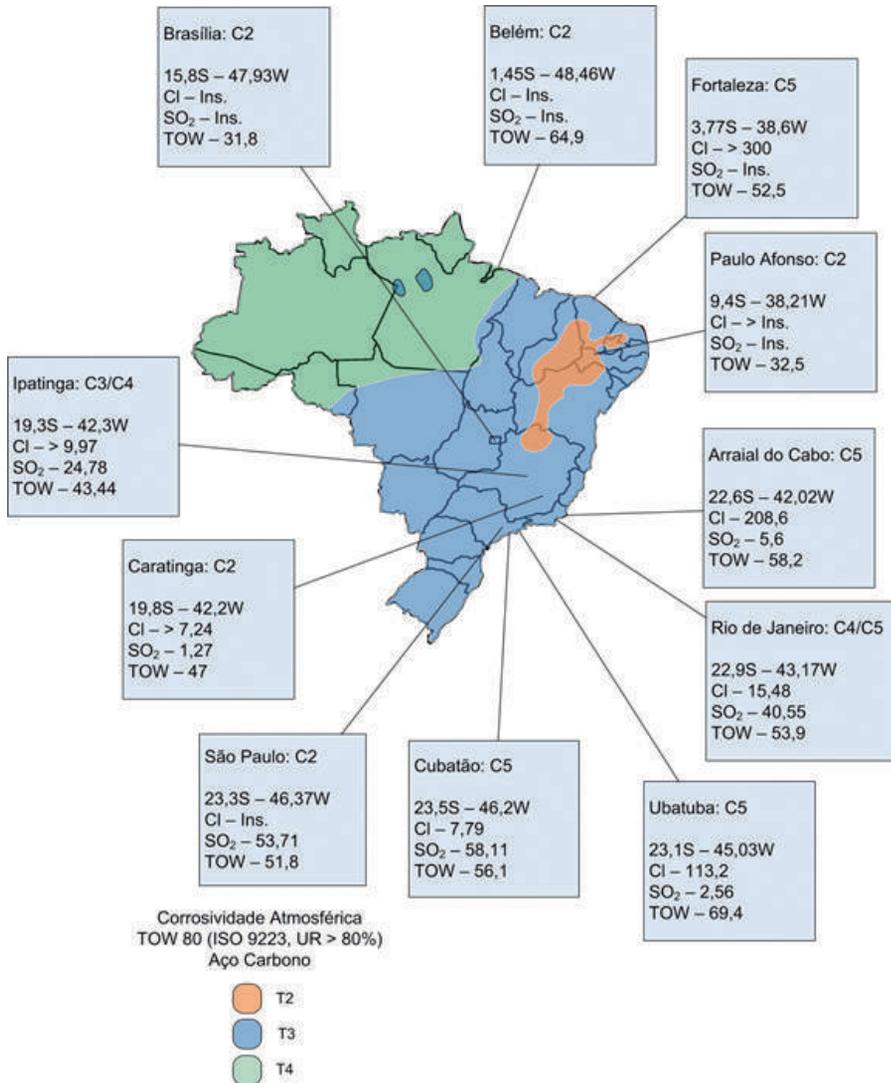


Figura 11: Mapa de corrosividade atmosférica para o Brasil²⁵, segundo a ISO 12944-2.

É importante ressaltarmos que existe relacionamento entre os dois mapas. Eles são, de fato, complementares. As grandes áreas rurais do Brasil podem ser classificadas segundo a metodologia da ISO 12944-2, de modo geral, como sendo de agressividade C2 (e C3). Médias e grandes cidades brasileiras podem ser consideradas como sendo de agressividade C3. Áreas industriais podem ser classificadas como C4 ou C5-I; áreas costeiras podem ser classificadas como sendo C4 ou C5-M.





CAPÍTULO 4

A Escolha de um Sistema Adequado de Proteção por Pintura



Estruturas de aço, expostas à atmosfera, sem proteção, estarão sujeiras à deterioração.

Existem diferentes formas de se proteger uma estrutura de aço. A forma mais amplamente empregada de proteção é a pintura. As primeiras questões que devem ser respondidas antes da seleção de um sistema de pintura são:

- Qual tratamento prévio será possível e qual será a condição do substrato antes da pintura?
- Como o ambiente ao redor da estrutura mudará ao longo do tempo? A que tipo de danos mecânicos e químicos o sistema de proteção estará exposto?
- Quais são as condições de aplicação e secagem/endurecimento da tinta, particularmente temperatura e umidade?
- Quais são os custos iniciais e de manutenção, ao longo da Vida Útil de Projeto (VUP)?

Vários produtos conhecidos como “estabilizadores de ferrugem” ou “conversores de ferrugem” estão disponíveis no mercado. Sua eficiência depende de várias condições. Eles são feitos para serem aplicados em substratos enferrujados, mas é importante remover toda a ferrugem solta antes da sua aplicação. Esta tarefa pode ser feita pelo escovamento com escova de aço. Alguns produtos são baseados em ácido fosfórico. Eles devem ser aplicados na quantidade correta, pois o excesso de ácido deverá ser retirado por lavagem com água limpa antes da pintura.

Existem várias fontes de consulta para uma correta especificação de pintura. A Steel Structures Painting Council (SSPC) possui várias normas e guias para esta finalidade. Outra fonte de referência conceituada é a Norma ISO 12944-529.

A Tabela 7 traz alguns sistemas que atendem a esta última referência. Foram descritos três sistemas para cada uma das categorias de agressividade ambiental descritas na ISO 12944-229. Incluiu-se, também, sistemas de pintura adequados à imersão em água doce (Im1), água do mar ou água salobra (Im2).

Uma regra muito difundida na repintura de estruturas de aço diz que devemos utilizar, sempre, o mesmo tipo de tinta anteriormente utilizado. Esta regra, entretanto, pode ser flexibilizada em muitas situações práticas, descritas nas normas.

O custo da tinta corresponde a 5-15% do custo total da operação de pintura, incluindo o pré-tratamento e aplicação. É importante que o pré-tratamento e o tipo de tinta sejam compatíveis. As tintas mais sofisticadas dependem de um bom pré-tratamento para que se obtenha o processo de ancoragem ao substrato. A Tabela 8 traz a qualidade de pré-tratamentos mínimos, descrita na Norma ISO 8501-1²⁴; ela mostra os limites inferiores de temperatura para aplicação, o tempo recomendado para a aplicação da próxima camada e para que categoria de agressividade ambiental os tipos de tintas são adequados. De qualquer modo, os boletins

técnicos, fornecidos pelos fabricantes de tintas, deverão ser consultados.

A velocidade das reações químicas decresce, em geral, com o decréscimo da temperatura. Assim sendo, tintas bi componentes e tintas que endurecem por mecanismos de oxidação podem exigir uma temperatura de aplicação acima de certo mínimo. Os limites de temperatura normalmente utilizados são, para as tintas epoxídicas, de 10°C, para as poliuretânicas, de 0°C, e para as tintas de endurecimento por oxidação (como as alquídicas), de 0°C. Se for absolutamente necessário pintar em baixas temperaturas, tintas de secagem física (isto é, aquelas que secam por evaporação do solvente) devem ser utilizadas preferencialmente, pois elas secam relativamente rápido mesmo em baixas temperaturas.

Tabela 7: Sistemas de Pintura que Atendem à ISO 12944-5²⁹

Sistema No.	Grau de Preparo de Superfície		Primer				Acabamento Incluindo Camada intermediária			Sistema		Durabilidade Estimada		
	St 2	Sa 21/2	Resina	Tipo	Demãos	Espessura seca (µm)	Resina	Demãos	Espessura seca (µm)	Demãos	Espessura seca (µm)	Baixa 2 a 5 anos	Média 5 a 15 anos	Alta >15 anos
Sistemas de Pintura – Categoria de Agressividade C2														
C2.03	X		A	Vários	1-2	80	A	2-3	120	2-5	200			X
C2.04		X	A	Vários	1-2	80	A	1-2	80	2-4	160			X
C2.05		X	EP	Vários	1-2	80	EP, P ²	1-2	80	2-4	160			X
Sistemas de Pintura – Categoria de Agressividade C3														
C3.02	X		A	Vários	1-2	80	A	2-3	120	3-5	200		X	
C3.04		X	EP	Vários	1-2	80	EP, P ²	2-3	120	3-5	200			X
C3.05		X	EP	Vários	1-2	80	EP, P ²	2-3	160	3-5	240			X
Sistemas de Pintura – Categoria de Agressividade C4														
C4.03		X	EP	Vários	1	160	AC	1	120	2	280			X
C4.04		X	EP	Vários	1-2	80	EP, P ²	2-3	200	3-5	280			X
C4.05		X	EP	Vários	1-2	80	EP, P ²	3-4	240	4-6	320			X
Sistemas de Pintura – Categoria de Agressividade C5-I														
C5I.02		X	EP, P	Vários	1	80	EP, P ²	3	200	4	280			X
C5I.03		X	EP, P	Zn(R)	1	40	EP, P ²	3	200	4	240			X
C5I.05		X	ES	Zn(R)	1	80	EP, P ²	2-4	240	3-5	320			X
Sistemas de Pintura – Categoria de Agressividade C5-M														
C5M.03		X	EP, P	Vários	1	250	EP, P ²	1	250	2	500			X
C5M.04		X	EP, P	Zn(R)	1	40	EP, P ²	3-4	280	4-5	320			X
C5M.05		X	ES	Zn(R)	1	80	EP, P ²	2-4	240	3-5	320			X
Sistemas de Pintura – Categoria de Imersão Im1, Im2 e Im3														
Im.01		X	EP	Vários	1	80	EP, P ²	2	300	3	380		X	
Im.02		X	EP	Vários	1	80	EP	1	400	2	480			X
Im.03		X	EP	Vários	1	800	-	-	-	1	800			X
Resinas Para Fundo														
			Tintas Líquidas				Resinas para Acabamento				Tintas Líquidas			
			No. de componentes		Possibilidade de base água	No. de componentes					Possibilidade de base água			
1 lata	2 latas	1 lata	2 latas											
A = Alquídica	X		X		X		A = Alquídica	X		X		X		
AC = Acrílica	X		X		X		AC = Acrílica	X		X		X		
EP = Epóxi		X	X		X		EP = Epóxi		X	X		X		
ES = Etil Silicato	X	X	X		X		P = Poliuretano	X	X	X		X		
P = Poliuretano	X		X		X									
1) Zn(R) = primer rico em zinco														
2) Se brilho e retenção de cor forem necessários, recomenda-se que a última demão seja baseada em poliuretano alifático														
3) St 2 = limpeza manual, executada com ferramentas manuais, como escovas, raspadores, lixas e palhas de aço														
4) Sa 2 ½ = jato abrasivo ao metal quase-branco														

Tabela 8: Tipo de tinta, pré-tratamento requerido, temperatura de aplicação, tempos-limite para demãos subsequentes e categoria ambiental de uso, como definido na Norma ISO 12944-5²⁹

Tipo de tinta	Pré-tratamento ¹	Temperatura de aplicação	Pode ser repintada após, mínimo/máximo	Categoria de corrosividade
Alquídica	St 2-3, Sa 2 ½		8 h / 8	C1-C4
Vinílica	Sa 2 ½		2 h / 8	C4-C5
Borracha Clorada	Sa 2 - Sa 2 ½	Mínimo 10-15°C	4 h / 8	C4-C5
Epóxi	Sa 2 ½ - Sa 3	Mínimo 10°C	18 h / 3 dias	C4-C5
Epóxi Alcatrão de Hulha	St 2, Sa 2 ½		16 h / 3 dias	C4-C5
Epóxi Mastique	St 3, Sa 2 ½ - Sa 3			C4-C5
Poliuretano	Sa 2 ½ - Sa 3			C4-C5
Poliéster	Sa 2 ½			C5
Silicato de Zinco	Sa 3		24 h	C4
1 ISO 8501-1 ²⁴ : St = limpeza mecânica, Sa = jateamento abrasivo				

A umidade é um fator adverso na aplicação da tinta, e a condensação pode, algumas vezes, ser um sério problema. Todas as tintas produzem o melhor resultado quando aplicadas sobre uma superfície limpa e seca. Entretanto, certas tintas baseadas em certo solvente (um álcool) são mais tolerantes que outras frente à umidade. Além disso, o etil silicato de zinco necessita absorver água do ar para se tornar seco, e, neste caso, a umidade relativa do ar não deve ser tão baixa. Tintas vinílicas puras são particularmente sensíveis a altas umidades.

A espessura adequada e os períodos entre a aplicação de camadas sucessivas são fatores importantes, mas dependem do tipo de tinta. Os Boletins Técnicos (Data Sheets) fornecidos pelos produtores de tintas fornecem informações importantes, que devem ser atendidas. A espessura deve ser checada durante a execução da pintura.

Superfícies galvanizadas podem ser pintadas. Dois motivos justificam seu emprego: a necessidade de cores, com fins estéticos, de sinalização ou identificação, ou, a máxima durabilidade em meios agressivos.

Uma entidade australiana, a Australian Zinc Development Association, efetuou um interessante estudo, demonstrando a grande vantagem de se pintar o aço galvanizado. Um aço carbono, protegido por certo sistema de pintura, desenvolveu corrosão vermelha (ferrugem) após três anos de exposição a um ambiente industrial agressivo. O mesmo aço, galvanizado por imersão

a quente, levou quatro anos para apresentar os primeiros sinais de corrosão vermelha. Quando este aço foi galvanizado a quente e pintado (mesmo sistema de pintura utilizado anteriormente), os primeiros sinais de corrosão vermelha aconteceram após 11 anos de exposição. A explicação é a sinergia: os produtos de corrosão do aço são mais volumosos, possuem maior solubilidade, e, em 3 anos levantam e destroem a tinta. Já os produtos de corrosão do zinco são menos volumosos, menos solúveis, e, após 3 anos, ainda não afetam a camada de tinta, que continua protegendo o aço. O tempo total de proteção, antes da primeira manutenção, é, assim, maior do que a soma das parcelas individuais proporcionadas pela tinta e galvanização, individualmente ($3 + 4 = 7$ anos).

Aços protegidos por aspersão térmica também podem ser protegidos pela pintura. Do mesmo modo que na galvanização, o efeito sinérgico aqui também é verificado. Os sistemas numerados na Tabela 7 como C2.05 (para ambientes C2), C3.04 e C3.05 (para ambientes C3), C4.03, C4.04 e C4.05 (para ambientes C4), C5I.01, C5I.02 (para ambientes C5-I) e C5M.01, C5M.02 e C5M.03 (para ambientes C5-M) são recomendados pela ISO 12944-5 para esta aplicação, alternativamente, sobre metais ou ligas depositadas sobre o aço, na forma de aspersão térmica.

Recomenda-se que o leitor busque informações sobre pintura de aços estruturais e aços galvanizados em publicações técnicas disponíveis no sítio do Centro Brasileiro da Construção em Aço – CBCA. Lá pode ser encontrado o manual denominado “Tratamento de Superfícies e Pintura”, de autoria do Eng. Celso Gnecco e colaboradores³⁰.





CAPÍTULO 5

A galvanização por imersão a quente na proteção do aço estrutural



Galvanização por imersão a quente, como visto anteriormente, é um processo de aplicação de revestimentos de zinco a componentes de aço ou ferro fundido através da imersão do componente em um banho de zinco fundido. A simplicidade do processo de galvanização por imersão a quente é uma vantagem sobre outros métodos de proteção contra corrosão: todas as superfícies de um componente galvanizado a fogo são protegidas tanto internamente quanto externamente, incluindo rebaixos, cantos-vivos e áreas inacessíveis à aplicação de outros métodos de revestimento. A Figura 12 ilustra este conceito.

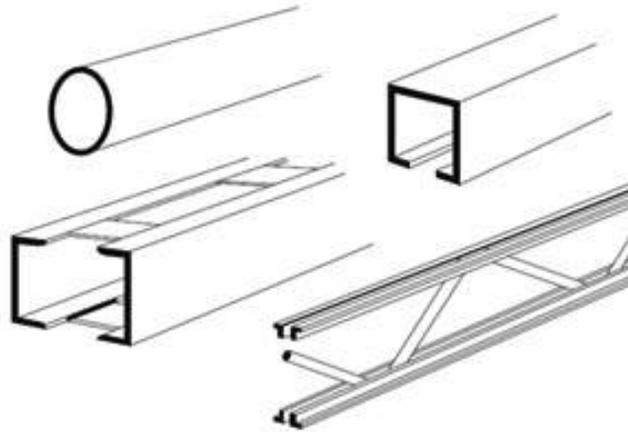


Figura 12: Exemplos de componentes estruturais que apresentam dificuldade de acesso à limpeza mecânica.

O revestimento é mais espesso nos cantos-vivos que em superfícies planas (Figura 13). Espessura, adesão do revestimento e uniformidade são características importantes do processo de galvanização a fogo.

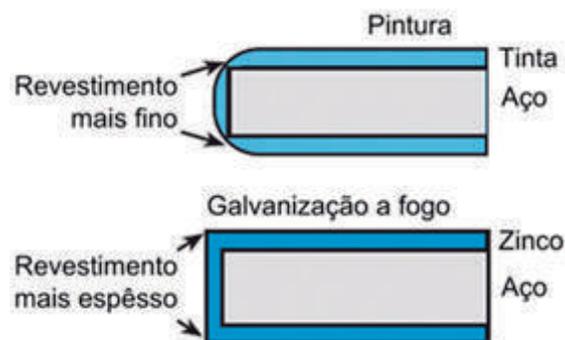


Figura 13: Os revestimentos orgânicos - as tintas - apresentam, de modo geral, menor espessura nos cantos-vivos, devido à tensão superficial. Os revestimentos obtidos pela galvanização a quente, por outro lado, são, no mínimo, tão espessos (ou mais) nestes locais.

Um ponto que merece atenção é o que se refere ao uso do termo galvanização. Erroneamente, o termo galvanização tem sido utilizado na descrição de diferentes revestimentos de zinco, como a galvanização por imersão a quente, a galvanização eletrolítica, a sherardização, aspersão térmica, etc. A Figura 14 ilustra como os diferentes tipos de revestimentos em zinco podem variar em termos de espessura.

Como a expectativa de vida útil de um revestimento de zinco está diretamente relacionada à sua espessura, revestimentos mais espessos têm uma vida útil muito mais longa do que revestimentos de pequena espessura. A galvanização por imersão a quente oferece grande proteção através do desenvolvimento de revestimentos de maior espessura e que são formados sem a introdução de hidrogênio nascente na microestrutura do aço, que pode levar à sua fragilização.

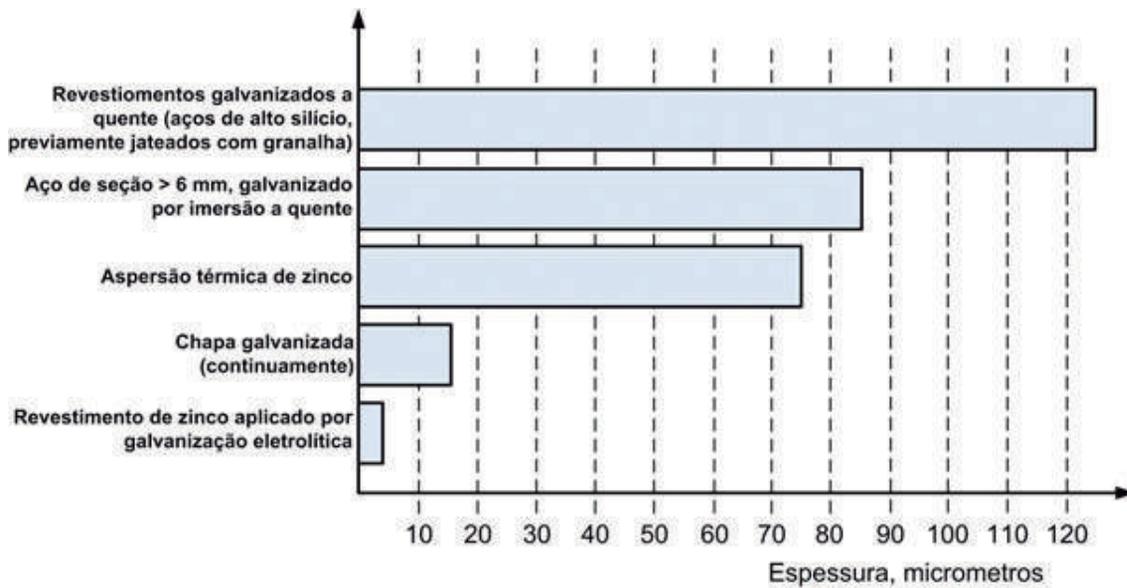


Figura 14: Espessuras de revestimento de zinco passíveis de aplicação sobre o aço, adaptado³².

A galvanização por imersão a quente permite obter revestimentos de grande espessura. Para tal, basta que a superfície seja jateada com granalha (jato comercial, padrão Sa 2) para aumentar a rugosidade superficial. Aços contendo teores medianos de silício também promovem o aumento da camada de zinco e seus intermetálicos. Assim, a composição química do aço aliada ao jateamento prévio da superfície permite a obtenção de revestimentos cuja espessura pode ultrapassar facilmente os 130 μm .

A taxa de corrosão para o zinco é geralmente linear em um determinado ambiente, permitindo, portanto, estimar o tempo de vida do revestimento com base em avaliações da perda de espessura obtida por experimentos de curta duração (1 – 4 anos). A Tabela 5 traz taxas de corrosão que permitem estimar a vida útil de um revestimento aplicado sobre os componentes metálicos pertencentes a uma estrutura; a Figura 15 coloca estas informações em forma gráfica.

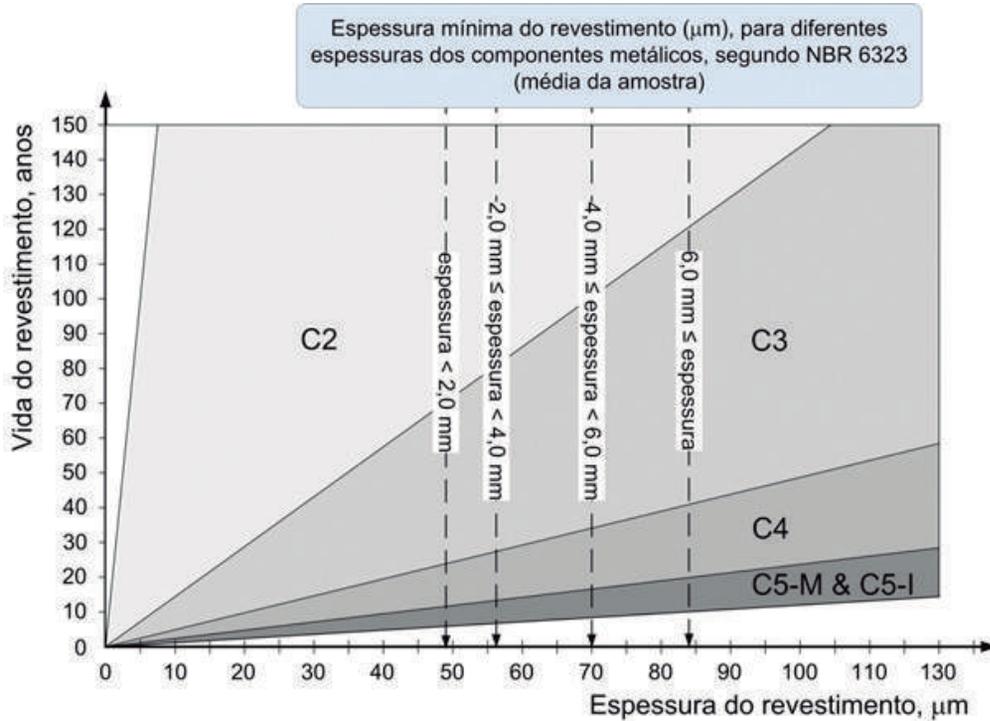


Figura 15: Tempo de vida esperado do revestimento de zinco, de acordo com sua espessura e agressividade do ambiente onde está inserido. A vida útil é definida como o tempo para que ocorra corrosão (vermelha) em até 5% da área do aço. Figura construída de acordo com a ISO 12944-2.

A especificação utilizada para a galvanização por imersão a quente de artigos de aço e ferro fundido é a NBR 6323³³. Ela prescreve que o revestimento uniforme obtido possua uma espessura mínima, determinada através da espessura dos componentes do aço a ser galvanizado. Estas espessuras mínimas são apresentadas na Figura 15. Componentes estruturais que possuam mais do que 6 mm de espessura receberão uma camada de zinco (e seus intermetálicos) mínima de 84 μm (média das amostras). A Figura 15 realça a grande proteção oferecida pelos revestimentos de zinco, especialmente em ambientes classificados como de agressividade C2, C3 e C4. É importante ressaltar que as espessuras reais obtidas pela galvanização a quente são, de modo geral, superiores às mínimas prescritas na ABNT NBR 6323, o que torna a Figura 15 bastante conservadora com respeito à durabilidade do revestimento.

Pintura de revestimentos galvanizados por imersão a quente

O pré-tratamento da superfície galvanizada é fundamental para que ocorra a perfeita aderência entre o zinco e a tinta. A operação de limpeza não deve deixar resíduos sobre a superfície limpa e qualquer mancha pelo armazenamento com umidade deve ser removida, usando-se uma escova. A lavagem com água ajudará a remover sais solúveis.

Existem quatro métodos reconhecidos de pré-tratamento de superfície que produzem um substrato adequado à pintura:

1. Fosfatização. O processo de fosfatização pode ser definido como o tratamento de uma superfície metálica que fornece um revestimento razoavelmente duro, não condutor de eletricidade, constituído de um fosfato insolúvel, contíguo e altamente aderido ao substrato metálico. É considerado o melhor pré-tratamento para a pintura do aço galvanizado a quente.
2. Jateamento abrasivo. O jateamento abrasivo leve (conhecido como brush-off) pode ser empregado para o desenvolvimento de rugosidade da camada de zinco. O abrasivo, a pressão de trabalho (e o próprio operador da máquina) devem ser cuidadosamente escolhidos, de modo a remover a menor quantidade de zinco possível.
3. Intemperismo. Este método é adequado quando se dispõe de tempo. A exposição à atmosfera deve ser de no mínimo 6 meses. Em seguida, a superfície é preparada com esponjas abrasivas, para a remoção de todos os materiais soltos. A superfície brilhante do zinco não deve ser restaurada. Em seguida, deve-se proceder à lavagem com água potável e detergente. Finalmente, procede-se o enxágue com água potável. Este método não deve ser feito em ambientes onde exista alta deposição de sais marinhos, pois sua completa eliminação, em atendimento às etapas descritas acima, é bastante dificultado.

A tinta de fundo frequentemente empregada na pintura do aço galvanizado é o epóxi-isocianato, aplicado em pequenas espessuras secas (25 μm , ou próximo disto). Em seguida, deve-se aplicar a tinta intermediária (em geral, um epóxi) e de acabamento (em geral, um poliuretano acrílico alifático) em atendimento à ISO 12944-5²⁹.





CAPÍTULO 6

O Controle da Corrosão Através do Detalhamento



6.1 Introdução

Esta parte do Manual trata do detalhamento de projeto como forma de se evitar a criação de condições que favoreçam o aparecimento da corrosão. Ela fornece exemplos de detalhamento apropriados e inapropriados, indicando ainda como alguns dos mais corriqueiros problemas de aplicação, inspeção e manutenção de um sistema de pintura podem ser evitados.

O objetivo do projeto estrutural é garantir que a estrutura seja adequada à sua função, que possua estabilidade adequada, resistência e durabilidade, que seja construída a um custo aceitável e seja esteticamente bonita. Naturalmente, o projeto deve ser feito de modo a facilitar o preparo de superfície, a pintura, inspeção e manutenção futura.

A forma de uma estrutura pode influenciar sua susceptibilidade à corrosão. Assim, as estruturas devem ser projetadas de modo que a corrosão não possa se estabelecer em um local em particular, de onde possa se espalhar. Recomenda-se, desse modo, que os projetistas considerem o detalhamento anticorrosivo já no início do projeto.

As formas dos elementos estruturais e os métodos utilizados para uni-los devem ser tais que a fabricação, a união e qualquer tratamento subsequente não promovam a corrosão. Do mesmo modo, considerações devem ser feitas com respeito à forma da estrutura e de seus elementos com respeito à categoria ambiental, quando se especifica um sistema de proteção de pintura.

O projeto deve ser simples, evitando-se a complexidade excessiva. Onde os componentes metálicos estão em contato, imersos ou enclausurados em outros materiais de construção, p.ex., tijolos, eles não estarão acessíveis, assim, as medidas de proteção frente à corrosão devem ser efetivas ao longo de toda a vida útil da estrutura.

6.2 Acessibilidade

Os componentes de aço devem ser projetados para a acessibilidade, com a finalidade da aplicação, inspeção e manutenção futura do sistema de pintura. Parece simples, mas nem sempre nos damos conta da importância da acessibilidade.

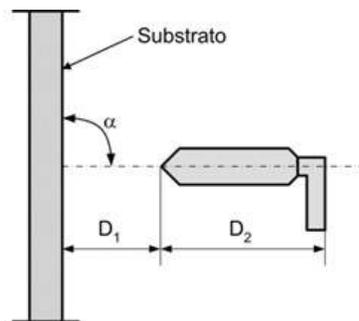
Todas as superfícies da estrutura que serão pintadas devem ser visíveis e acessíveis por meios seguros. As pessoas envolvidas no preparo de superfície, pintura e inspeção devem estar aptas a se moverem de modo seguro por todas as partes da estrutura, em condições de boa iluminação.

As superfícies que serão tratadas devem ser acessíveis, para permitir ao operador espaço suficiente para o trabalho. A Tabela 9 e a Figura 16 tratam das dimensões mínimas recomendadas para que se possa efetuar a pintura e a manutenção futura.

Tabela 9: Distâncias típicas requeridas para ferramentas, no trabalho de proteção frente à corrosão.

Operação	Comprimento da ferramenta (D2), mm	Distância entre a ferramenta e o substrato (D1), mm	Ângulo de operação (α), graus
Jateamento abrasivo*	800	200 a 400	60 a 90
Ferramental elétrico			
-Pistola de pinos	250 a 350	0	30 a 90
-Lixadeira elétrica	100 a 150	0	-
Limpeza manual			
-Escovamento	100	0	0 a 30
-Lixa manual	100	0	0 a 30
Metalização	300	150 a 200	90
Aplicação de tinta			
-spray	200 a 300	200 a 300	90
-pincel	200	0	45 a 90
-rolo	200	0	10 a 90

(*): o jateamento *com areia (seca ou úmida)* está proibido no Brasil, de acordo com a Portaria no. 99, de 19 de outubro de 2004, do Ministério do Trabalho e Emprego (publicado no DOU de 21/10/2004, Seção 1)



- α Ângulo formado pelo eixo da ferramenta com o substrato
 D_1 Distância da ferramenta ao substrato
 D_2 Comprimento da ferramenta

Figura 16: Distâncias típicas requeridas para ferramentas costumeiramente utilizadas na proteção frente à corrosão.

Atenção especial deve ser dada à garantia de acesso a caixas e tanques. As aberturas devem ser de tamanho suficiente para garantir o acesso seguro para os operadores e seu equipamento, incluindo seus equipamentos de segurança. Além disso, devem existir aberturas de ventilação suplementares com dimensões e em locais adequados, que permitam a aplicação do sistema de proteção escolhido.

A Figura 17 trata das dimensões mínimas recomendadas para aberturas de acesso em áreas confinadas.

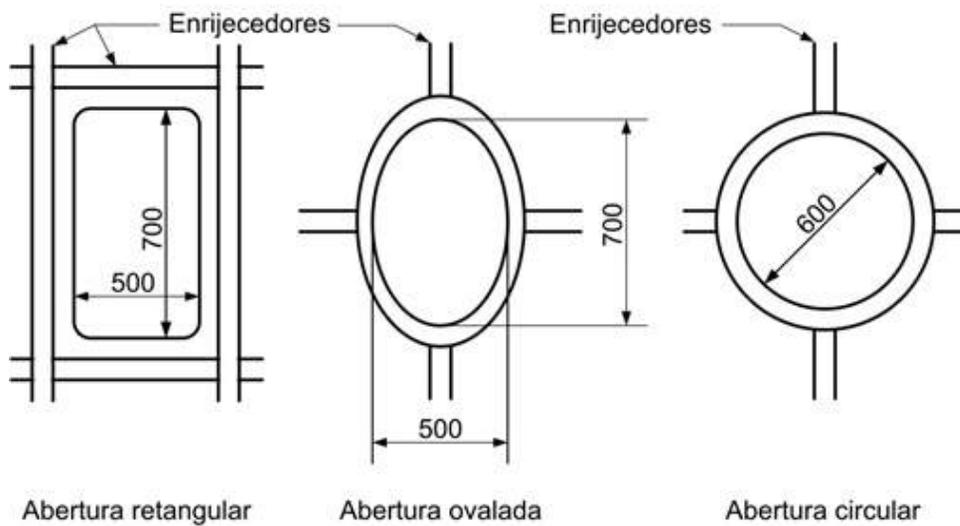
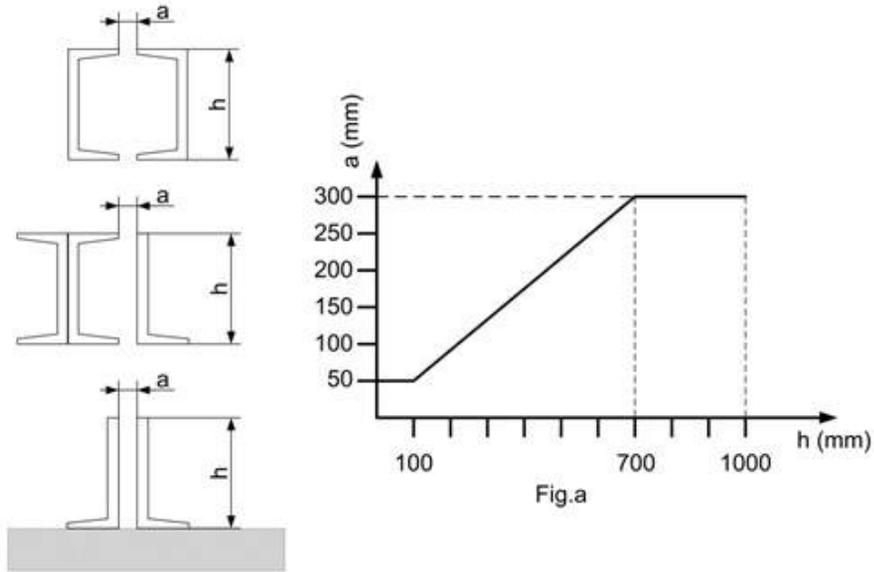
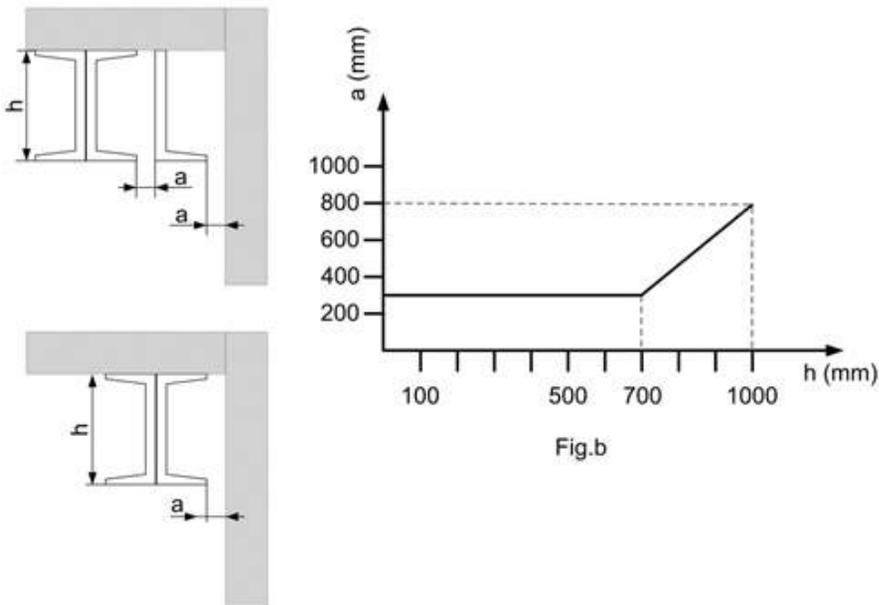


Figura 17: Dimensões mínimas recomendadas de aberturas, para áreas de acesso confinado.

Espaços estreitos entre elementos devem ser evitados tanto quanto possível. A manutenção futura em tais regiões poderá ser impossível. Onde não seja possível evitar espaços restritos, por razões estruturais ou práticas, as recomendações descritas na Figura 18 devem ser avaliadas.



A Distância mínima permitida entre os perfis ou entre um perfil e uma superfície adjacente
 h Distância máxima que um operador pode atingir em espaços restritos (mm)
 A distância mínima permitida a entre dois perfis é dado pelo gráfico de a "versus" h , até 1000 mm (Fig.a) acima



A distância mínima permitida a entre o perfil e a superfície adjacente é dada pela Fig.b.

Nota 1 Se o operador deve atingir distâncias maiores do que 1000 mm, a (Fig.b) deve ser preferivelmente no mínimo de 800 mm.

Nota 2 Quando o projetista não puder utilizar estas recomendações, medidas especiais deverão ser tomadas.

Figura 18: Dimensões mínimas para espaços restritos entre superfícies.

Boas práticas em acessibilidade. Algumas regras devem ser, sempre que possível, obedecidas:

- Todas as precauções de controle da corrosão incluídas no projeto devem ser “inspecionáveis”, “repetíveis e reparáveis” com facilidade, para uma dada localização e ambiente. A Figura 19 ilustra uma situação em que o acesso para inspeção e reparo é inexistente;



Figura 19: Situação em que o acesso para inspeção e reparos é muito dificultado. Não existe espaço para o trabalho com o ferramental de manutenção. Trata-se da cobertura de uma piscina aquecida.

- A manutenção da pintura anticorrosiva deve requerer o menor tempo para sua execução (para a minimização de interferências), ou, então, deve ser tão espaçada (no tempo) quanto possível. Esta última opção é especialmente útil para as estruturas, equipamentos e componentes localizados em pontos de difícil acesso;
- O projeto deve contemplar a redução do custo e do grau de dificuldade da manutenção subsequente a um mínimo, incluindo o desmonte e remonte de componentes estruturais e equipamentos, limpeza, preparo superficial, etc.;
- Componentes que, por alguma razão, estão sujeitos à corrosão acelerada – ou componentes críticos – não devem ser localizados em pontos inacessíveis. Estes componentes ou conjuntos devem ser facilmente removíveis (Figura 20);

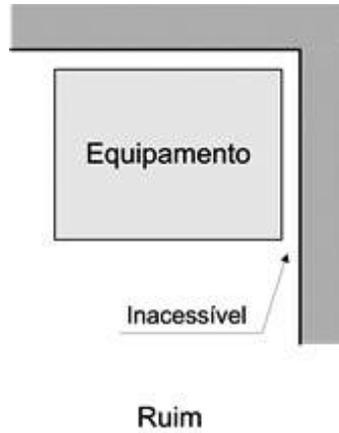


Figura 20: Exemplo de disposição inadequada de equipamento, obstruindo a inspeção e manutenção de componentes.

- Obstruções à manutenção da estrutura ou de equipamentos devem ser divididas em partes menores, de modo que a manutenção seja possível (Figura 21);

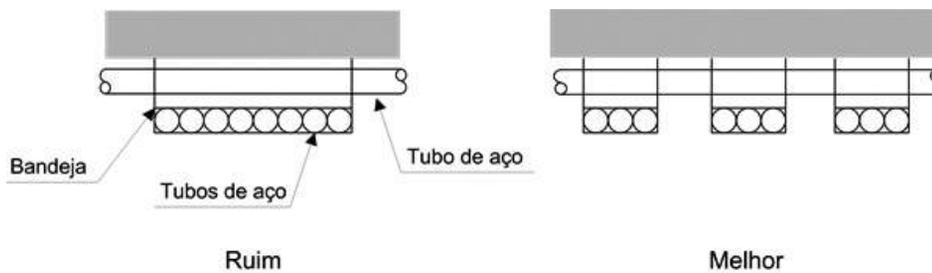


Figura 21: Faça, do projeto, um aliado da manutenção. Abra espaço!

- Bases de equipamentos muito baixas devem ser evitadas, especialmente se houver possibilidade de entrada e manutenção de eletrólitos sob estas. Promova aberturas para drenagem e ventilação.
- Áreas inacessíveis após a montagem devem ser protegidas por um sistema de pintura projetado para durar tanto tempo quanto a vida útil de projeto da estrutura.

6.2 - Geometria

A incorporação do controle da corrosão na etapa de projeto pode ser atingida de modo muito eficiente através da geometria. Configurações geométricas que propiciem o acúmulo de água e de materiais estranhos devem ser evitadas.

O responsável pelo projeto deve estar consciente de possíveis efeitos secundários, como, por exemplo, a deposição de produtos de corrosão dos aços estruturais sobre componentes de aço inoxidável, o que poderá levar à corrosão destes últimos.

As principais precauções a serem tomadas são as seguintes:

- A geometria de um componente não deve ser analisada de forma isolada do restante da estrutura (ou do sistema). Ele não existe em “plena isolação” do restante do conjunto. Sua interdependência com outros componentes da edificação, como, p.ex., o sistema de ar condicionado, deve ser considerado;
- A complexidade excessiva deve ser evitada. Assim, “menos, em geral, é mais”. Dê preferência à simplicidade e praticidade. A Figura 22 mostra como a complexidade pode dificultar – ou até impedir – a manutenção da estrutura.

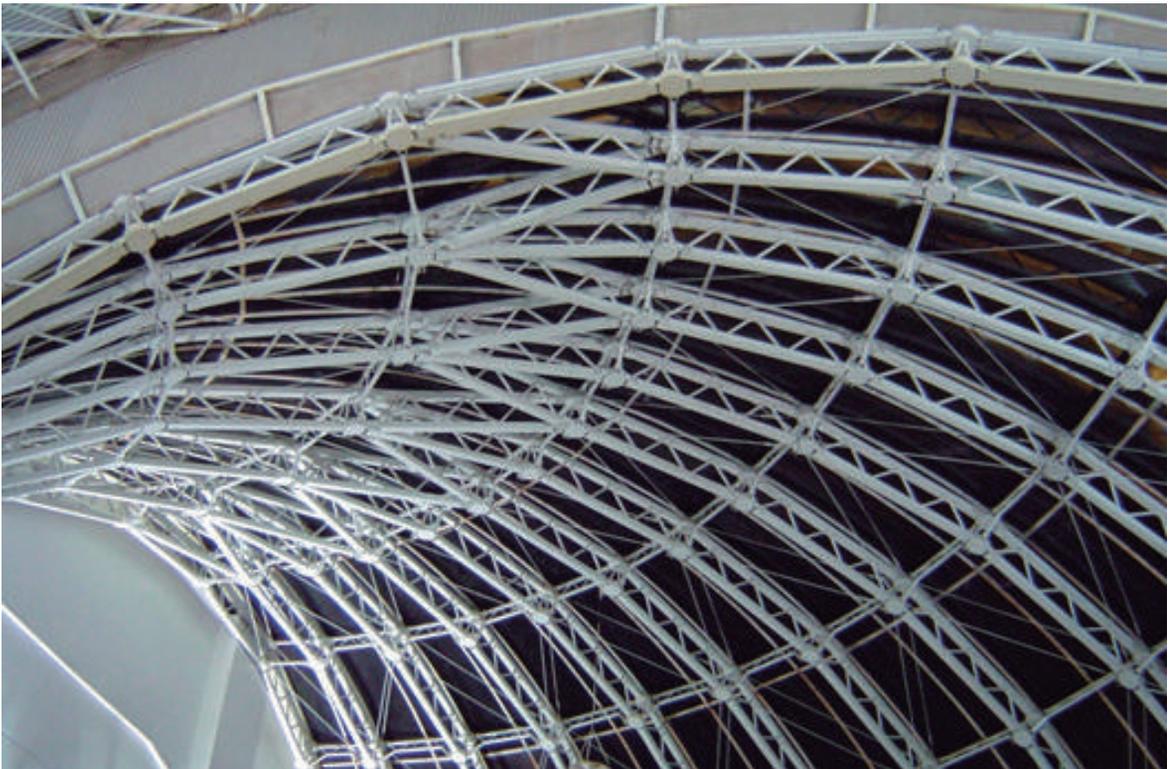


Figura 22: Menos, em geral, é mais. Simplifique as formas!

- Todas as condições funcionais e ambientais devem ser tornadas tão uniformes quanto possível. Não crie desnecessariamente condições em que grandes tensões residuais, grandes gradientes de temperatura, grandes diferenças de fluxo, grandes diferenças de seções estruturais, etc., possam acontecer;
- A limpeza (e o tratamento anticorrosivo) de um componente deve ser facilitada tanto internamente quanto externamente, na montagem e durante o uso. A Figura 23 (a) ilustra uma passarela, e, em (b), um detalhe externo que ilustra o acúmulo de água e sujeira. Não há como proceder à limpeza de certos componentes externos da estrutura. Não foi feito sequer um pequeno furo para a drenagem da água.

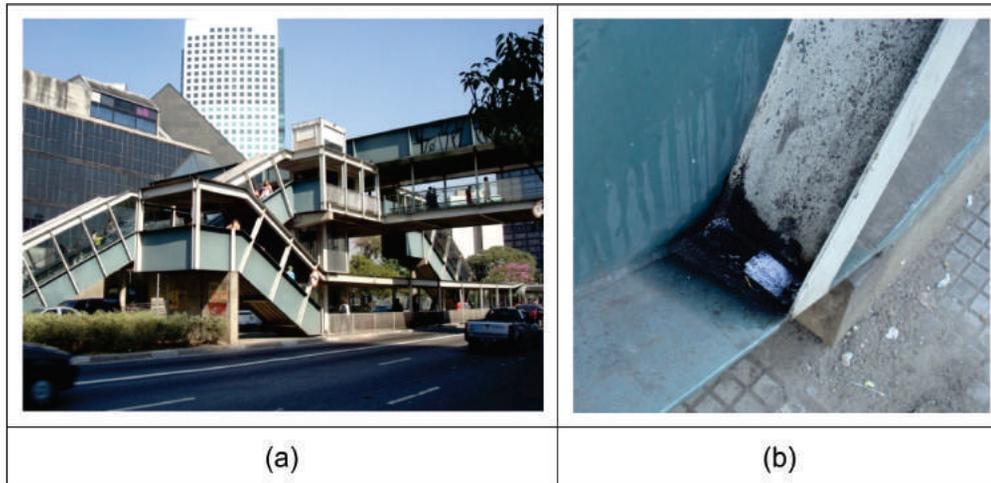


Figura 23: A limpeza deve ser facilitada. A passarela representada em (a) possui componentes externos que promovem o acúmulo de água e sujeira. Um simples furo poderia promover a drenagem da água de chuva.

- O projeto deve considerar a influência adversa de um componente não-estrutural (p.ex., utilidades, em geral), sobre a estrutura. Gotejamento de líquidos condensados, emissão de gases oriundos de combustão, vapores, efeitos químicos ou térmicos, etc., podem ser agentes causadores da corrosão (Figura 24);

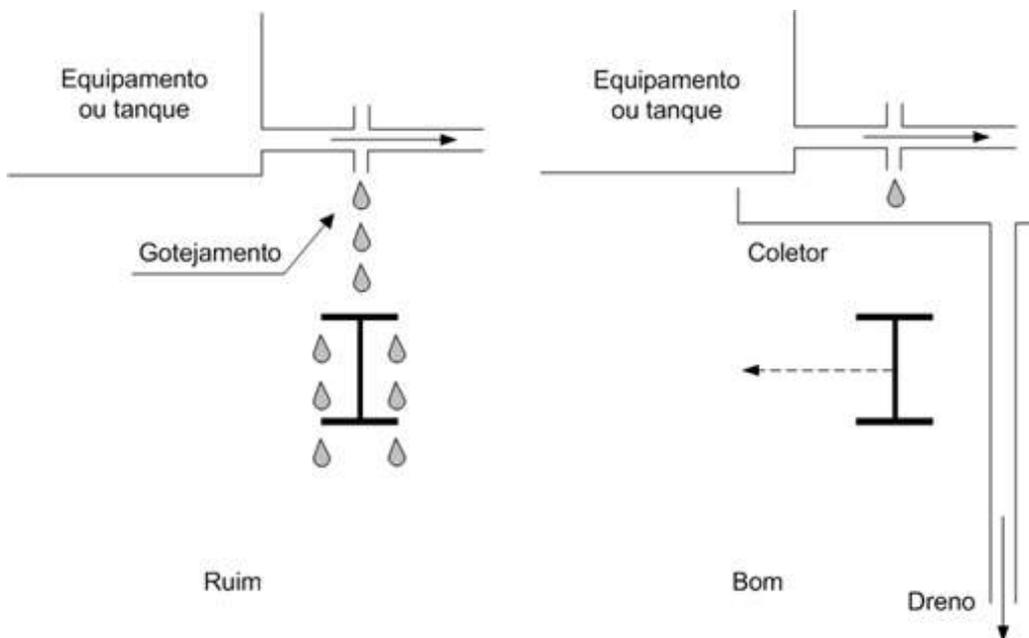


Figura 24: Não permita o gotejamento de líquidos sobre a estrutura.

- Sempre que possível, disponha a estrutura onde ela não possa ser afetada adversamente pelas condições climáticas locais ou por agentes poluentes, como gases, líquidos ou sólidos (Figura 25);

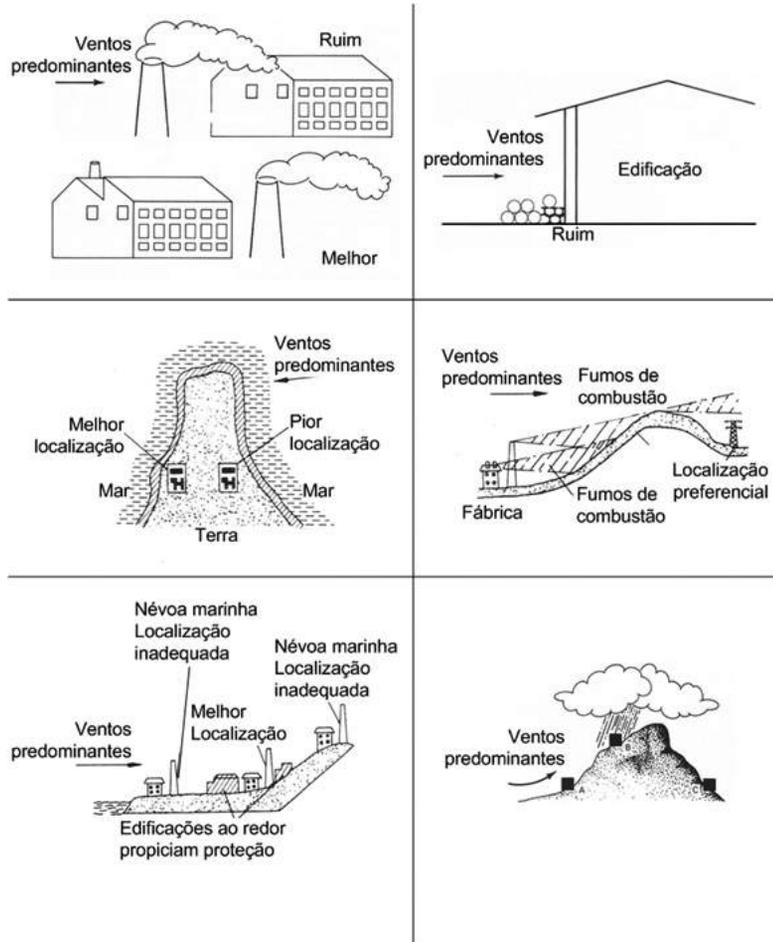


Figura 25: Sempre que possível, disponha a estrutura de modo a que ela não possa ser afetada por agentes adversos.

- Geometrias que retenham eletrólitos e ar devem ser evitadas. As Figuras 26 a 30 ilustram alguns exemplos de arranjos geométricos considerados bons e ruins;

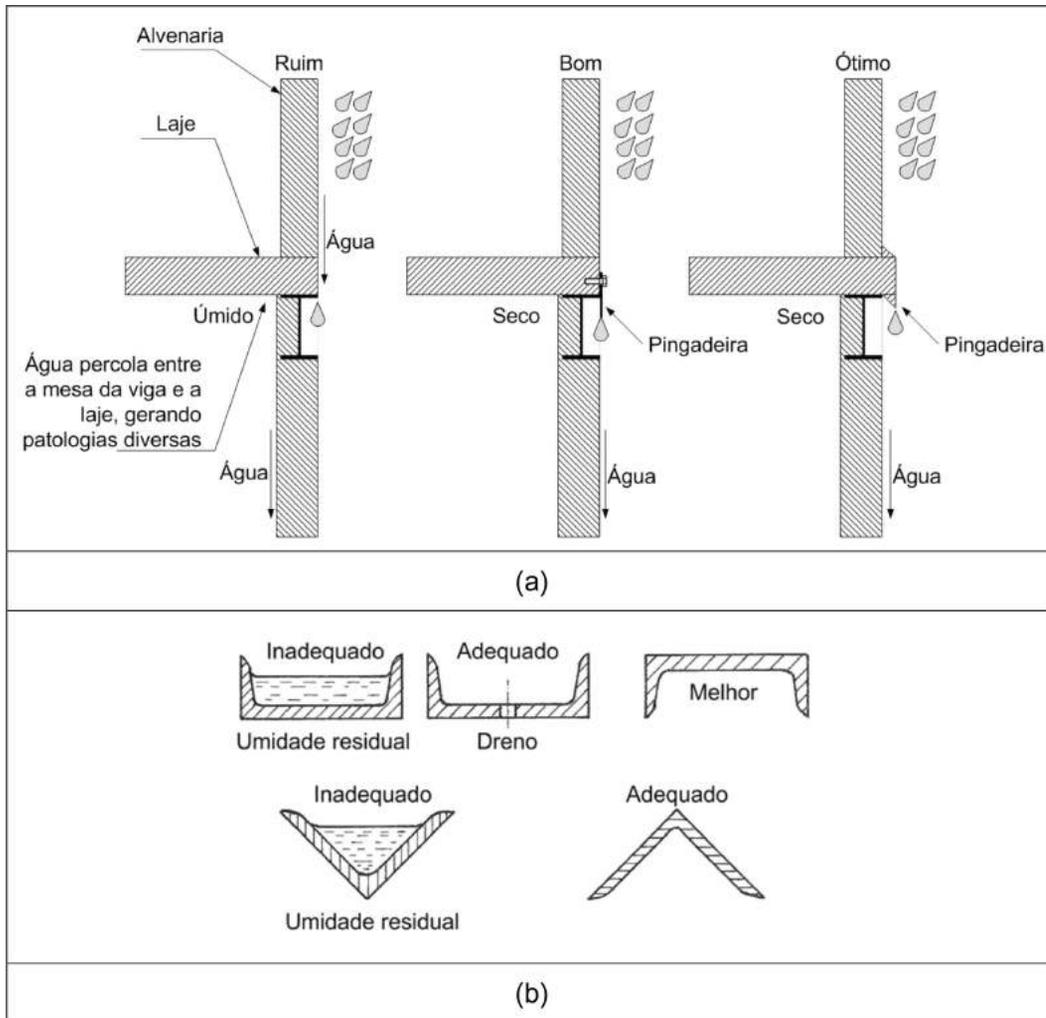


Figura 26: Geometrias que facilitem o acúmulo de água devem ser evitadas: (a) uma simples pingadeira pode minimizar ou evitar o ingresso de água na alvenaria; (b) a disposição dos componentes pode promover ou não o acúmulo de água.

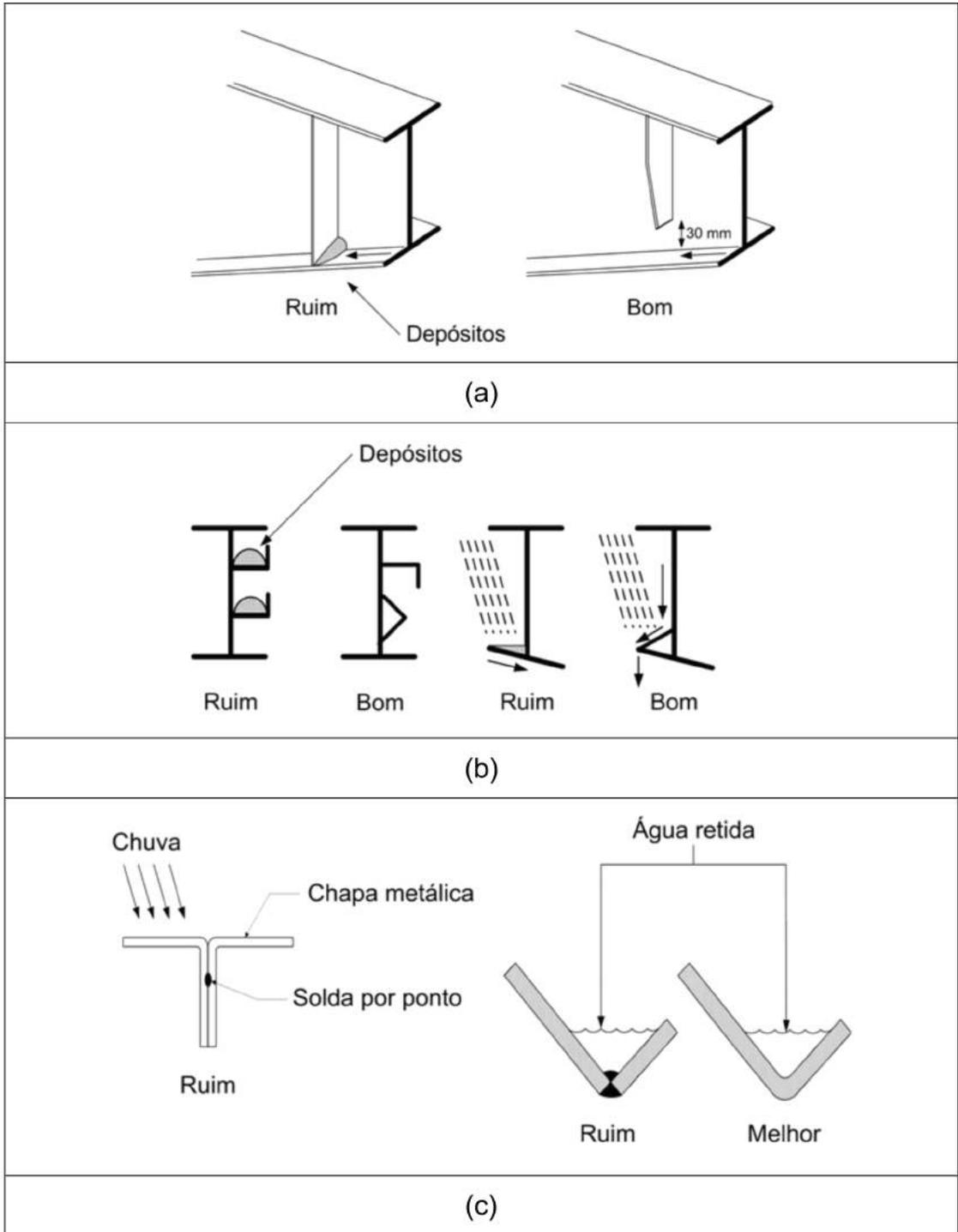


Figura 27: Geometrias que facilitem o acúmulo de água devem ser evitadas: (a) e (b) o detalhe do enrijecedor pode ou não promover o acúmulo de sujeira e água; (c) arranjos que podem promover o ataque corrosivo.

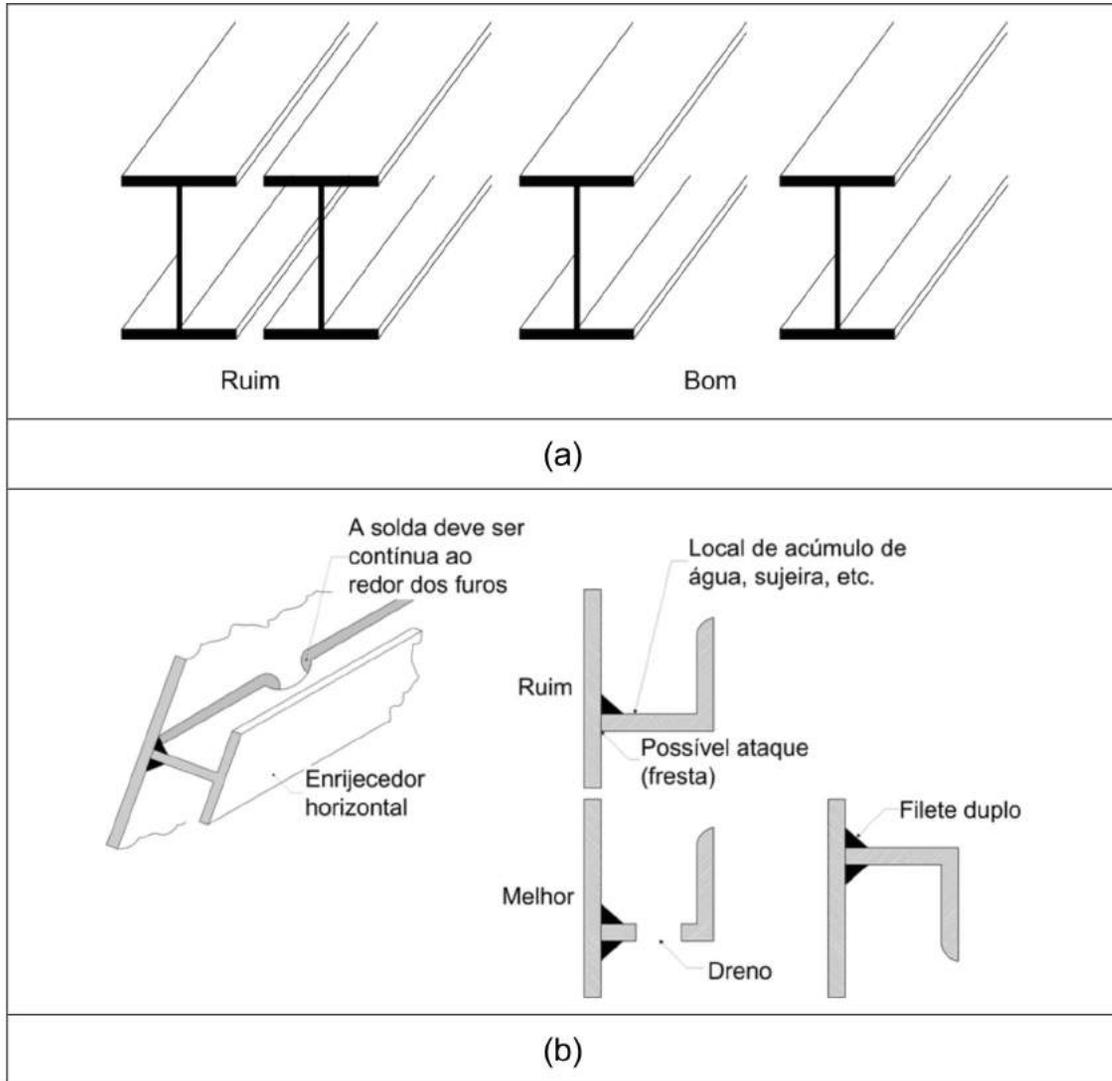


Figura 28: Geometrias que facilitem o acúmulo de água devem ser evitadas: (a) permita a ventilação (e a inspeção, e a manutenção) e, por conseguinte, a secagem dos componentes; (b) promova situações onde a água possa deixar a estrutura.

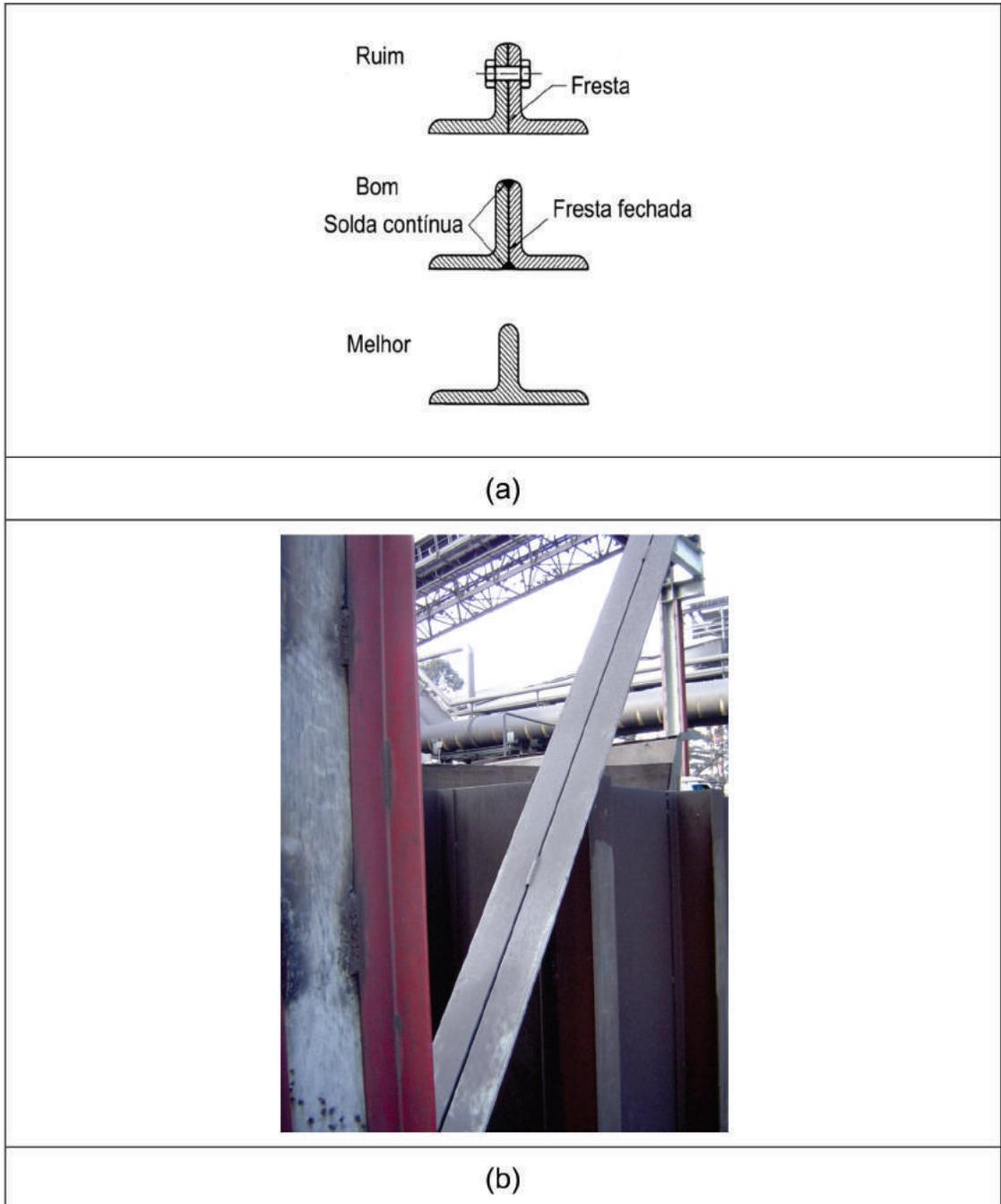


Figura 29: Geometrias que facilitem o acúmulo de água devem ser evitadas: (a) deve-se evitar utilizar cantoneiras costa a costa; (b) como pintar o interior de cantoneiras com esta disposição?

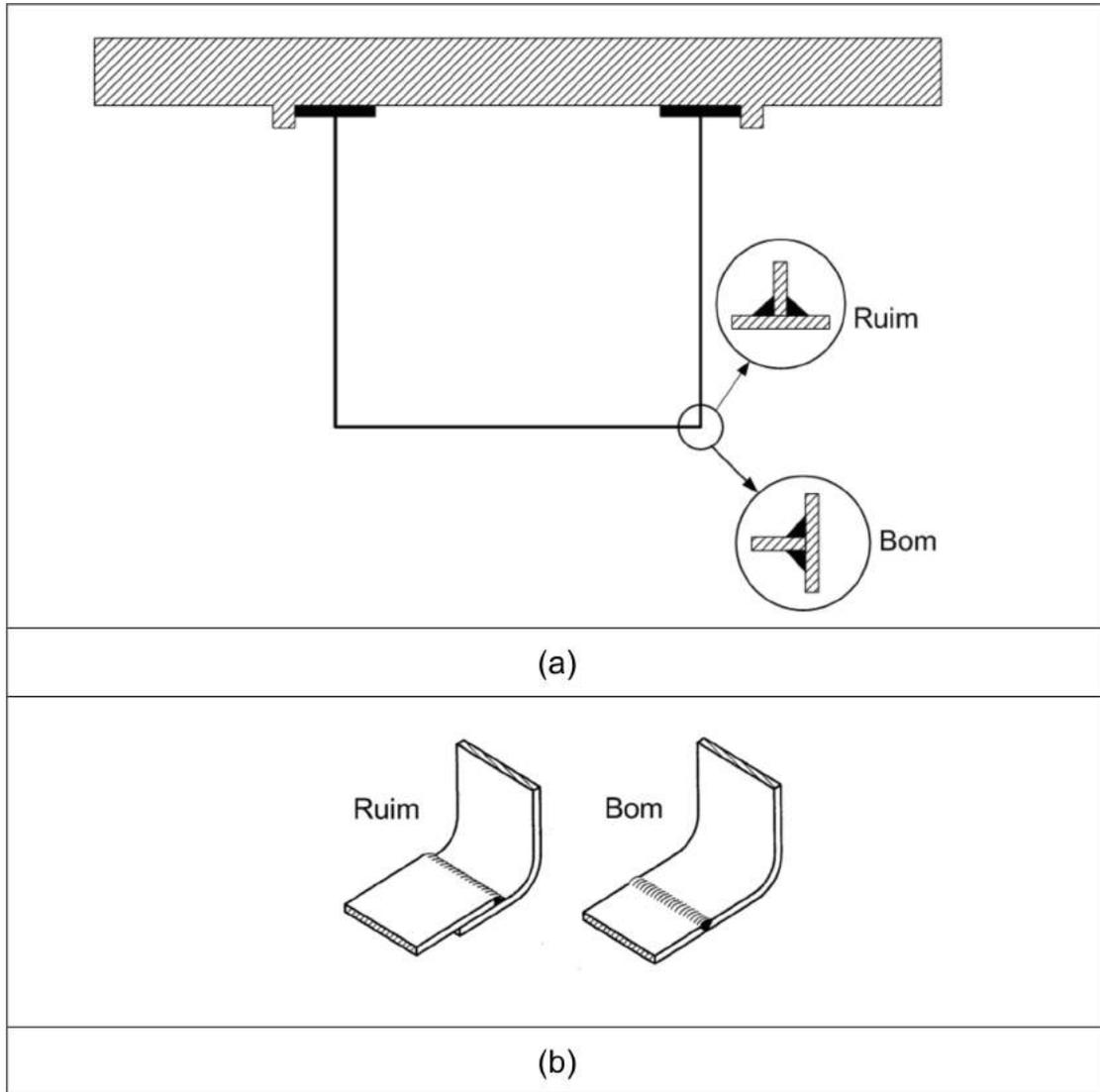


Figura 30: Geometrias que facilitem o acúmulo de água devem ser evitadas: (a) detalhes de projeto podem promover ou dificultar o processo de corrosão; (b) evite tanto quanto possível a criação proposital de frestas.

- Evite a criação proposital de pontos quentes e pontos frios na estrutura, pois esta situação poderá promover a condensação de eletrólitos, levando à corrosão (Figura 31);

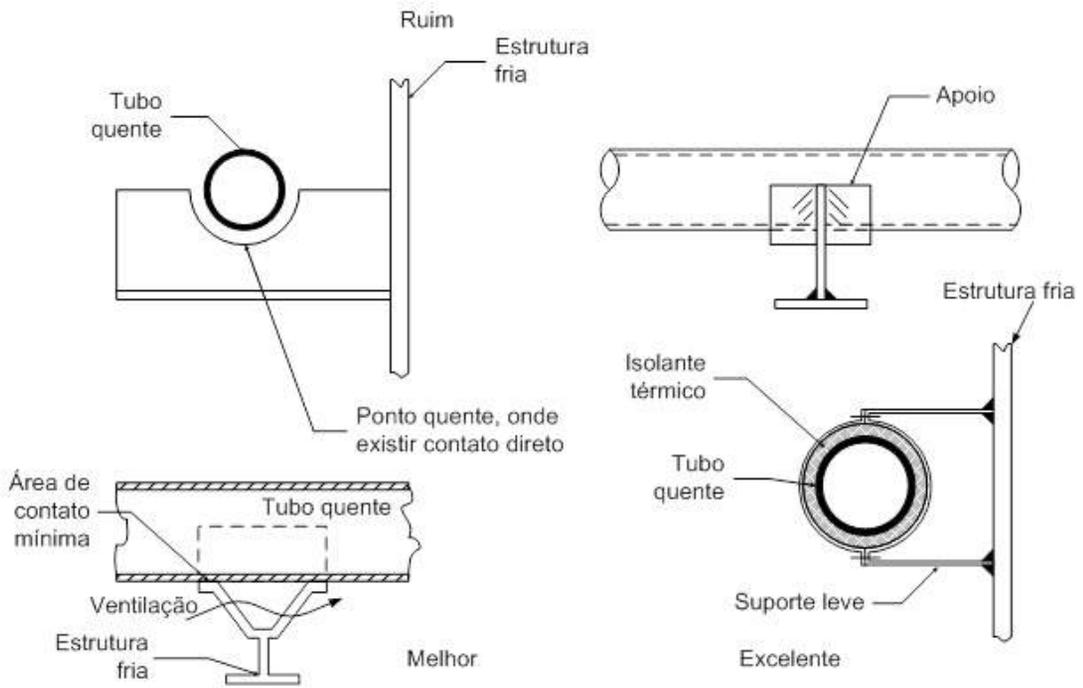


Figura 31: Evite a ocorrência de pontos quentes e frios, que podem promover o desenvolvimento de tensões e condensação de eletrólitos.

- Evite recobrimentos inadequados e a criação de frestas (Figura 32);

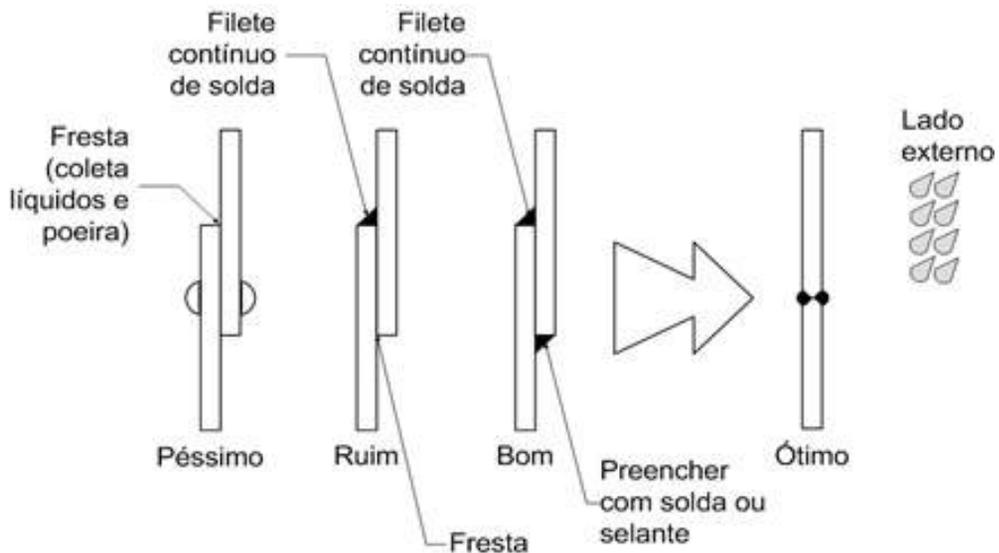


Figura 32: Não promova a criação de frestas, onde a água possa ficar coletada.

- Evite juntas, dielétricos ou materiais porosos incorretamente dimensionados, pois eles podem promover a corrosão por aeração diferencial – uma forma de ataque aparentada com a corrosão por frestas (Figura 33);

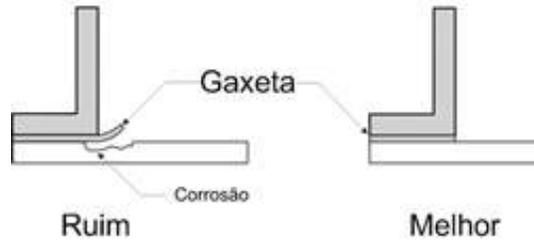


Figura 33: Dimensione corretamente juntas, dielétricos e materiais porosos.

- Se estiverem secos e hermeticamente fechados, as superfícies internas de tubos não necessitam de proteção. Quando tubos são expostos às intempéries e não forem hermeticamente fechados, considerações de projeto devem ser feitas para a proteção externa e interna, evitando-se depósitos internos e com aberturas que permitam a drenagem de qualquer água que porventura possa adentrar o tubo;
- Previna a corrosão por frestas entre a base e o tanque (Figura 34);

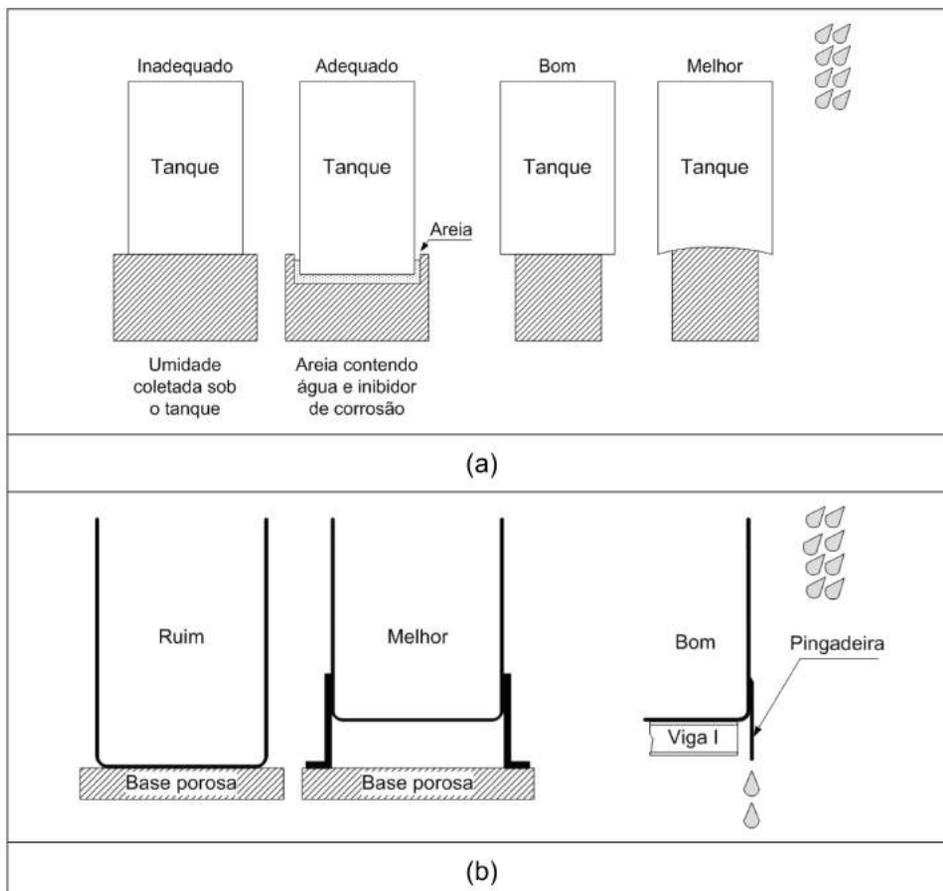


Figura 34: Previna a corrosão entre as bases e os tanques. (a) uso de inibidor de corrosão e de geometria (favorável) para o controle da corrosão; evite a colocação de tanques diretamente sobre bases porosas (como o concreto).

- Tanques devem ser completamente drenados. Líquidos acumulados indefinidamente dentro dos tanques poderão promover sua corrosão (Figura 35);

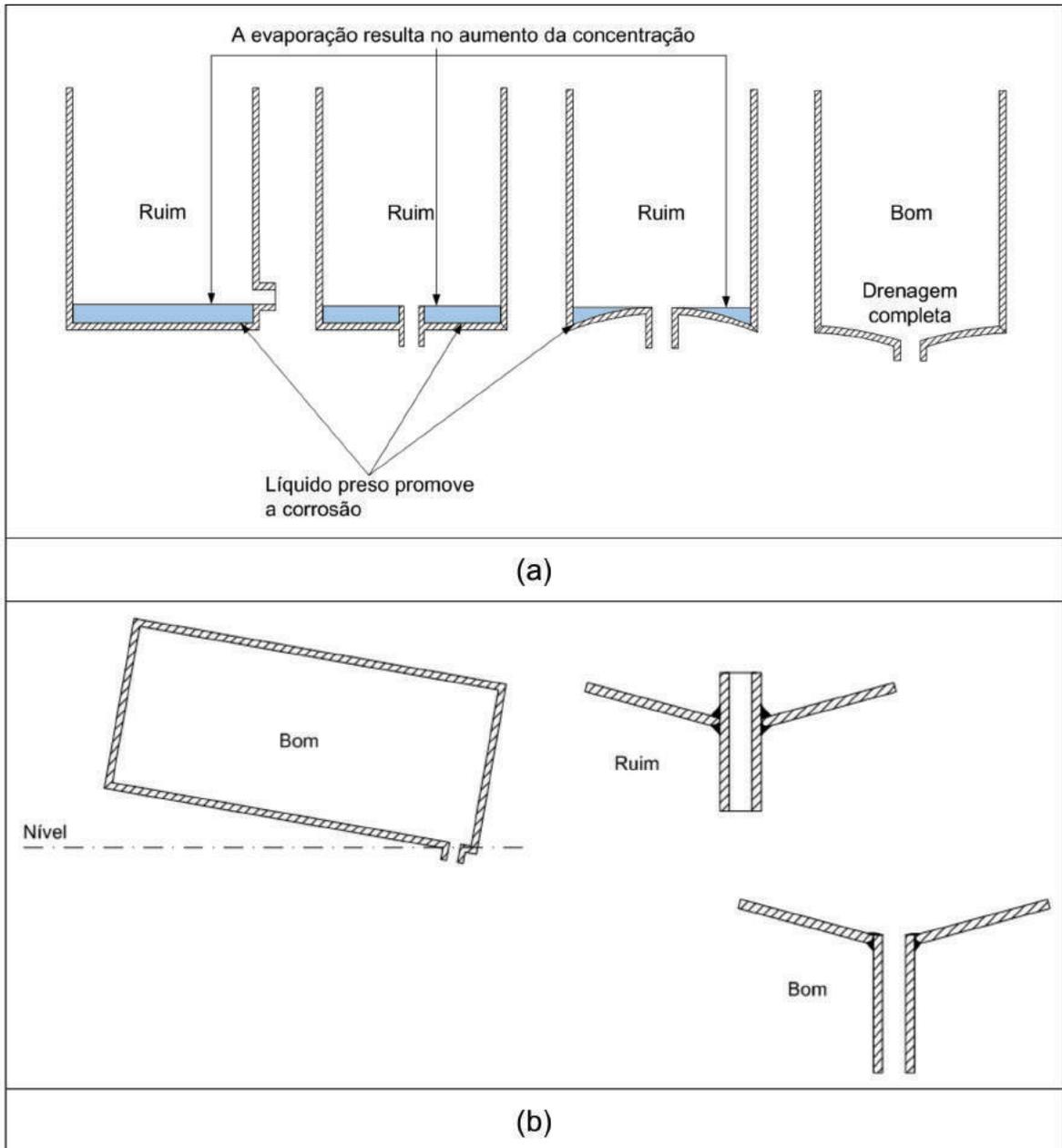


Figura 35: Os tanques devem permitir a completa drenagem (a); (b) detalhe para evitar o acúmulo de líquidos.

- Frestas estreitas e juntas sobrepostas são pontos potenciais para o ataque corrosivo, devido à retenção de umidade e sujeira - incluindo a existência de qualquer abrasivo utilizado no preparo superficial. O problema potencial deve ser evitado selando-se a fresta. Pode-se utilizar um selante epoxídico, poliuretânico, ou mesmo um silicone que não libere ácido acético durante a polimerização. Na maior parte dos ambientes agressivos, o volume deve ser preenchido com um calço de aço que se projeta do perfil e é soldado por toda sua volta. Superfícies de acoplamento devem ser seladas através de solda contínua, para prevenir o armazenamento de abrasivos e ingresso de umidade. A Figura 36 ilustra a promoção proposital, desnecessária, de frestas;



Figura 36: Frestas devem ser evitadas sempre que possível.

- Atenção especial deve ser dada aos pontos de transição do concreto ao aço, particularmente no caso de estruturas compostas sujeitas às condições severas de corrosão. A Figura 37 ilustra o detalhe para transição;

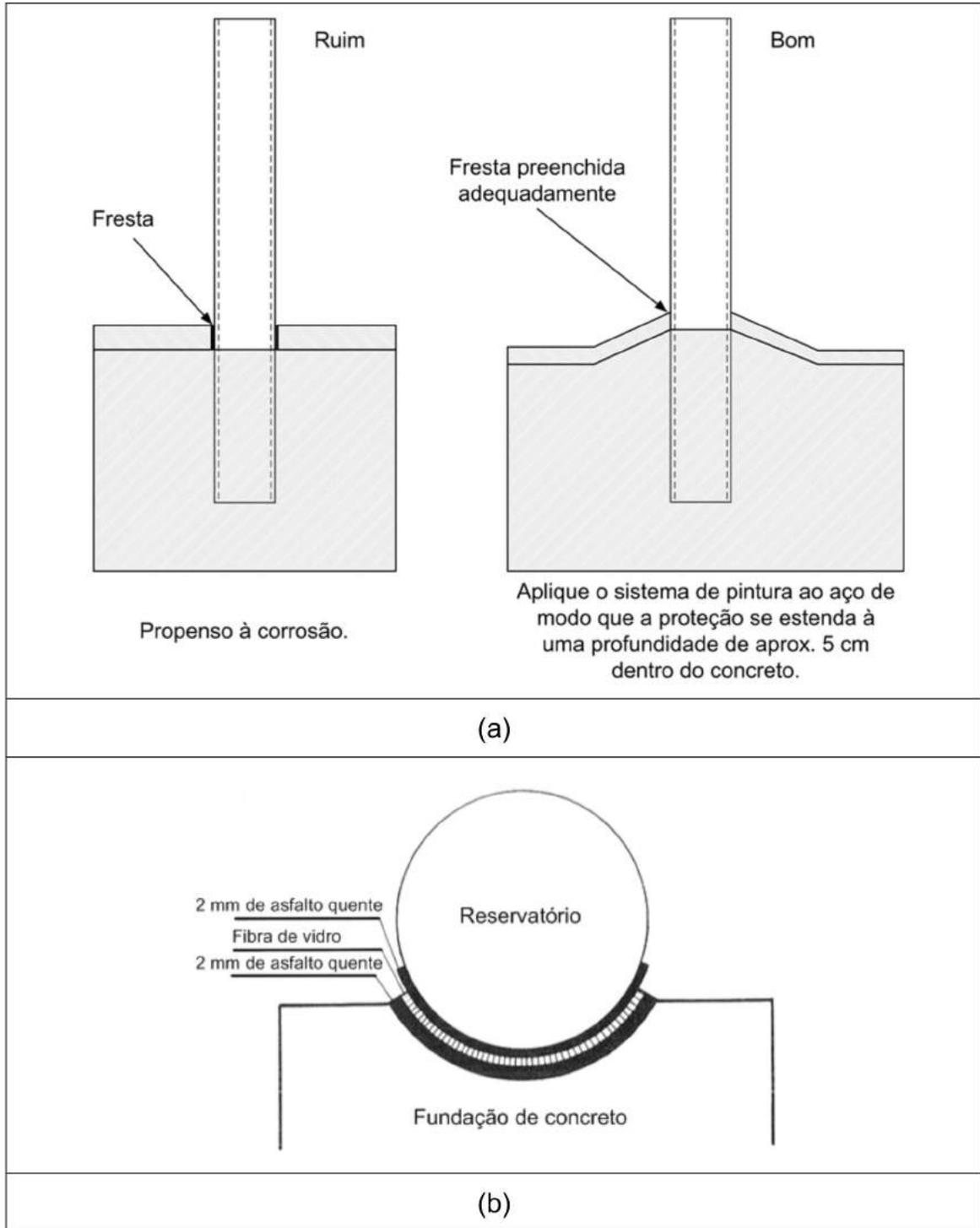


Figura 37: Atenção à transição entre o concreto e o aço. (a) a água não deve adentrar a interface aço/concreto; (b) um reservatório pode ser apoiado sobre uma transição flexível, hidrófuga, constituída por asfalto e fibra de vidro.

- Crie disposições construtivas que promovam a secagem de qualquer água condensada em painéis acústicos, não criando grandes restrições ao fluxo de ar (Figura 38).

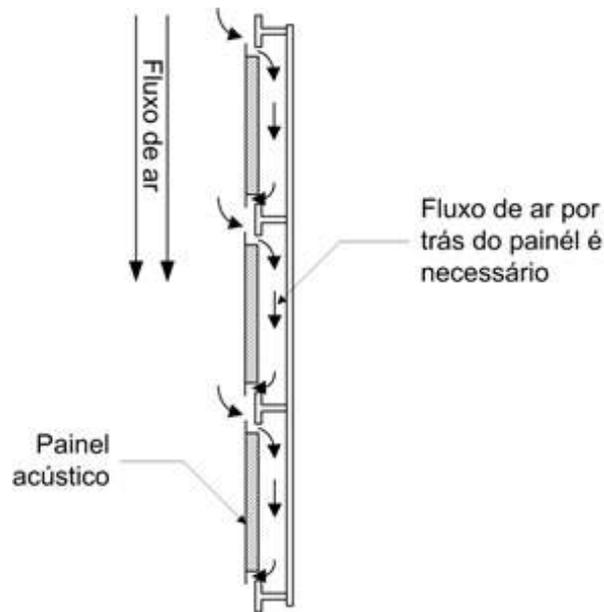


Figura 38: Promova a ventilação em painéis acústicos, de modo a permitir sua livre secagem.

6.4 - Compatibilidade

Pensando no desenvolvimento de componentes individuais, por vezes nos esquecemos da estrutura como um todo. Os componentes individuais não ficam isolados eletricamente. Eles estão em contato elétrico, isto é, permitem o fluxo de elétrons entre os componentes. O problema é que, assim como ocorre no relacionamento humano, relacionamentos ruins também acontecem entre os materiais, fazendo com que, mesmo o melhor projeto, apresente patologias, por vezes graves.

É importante que a influência entre materiais seja apreciada e avaliada antes que a decisão final do projeto seja tomada. Medidas post mortem são sempre custosas. Um exemplo? A utilização de aços patináveis, não pintados, em ambientes marinhos, utilizando-se nas ligações, parafusos estruturais galvanizados.

A construção em aço cria, por vezes, situações em que diferentes ligas metálicas, unidas (p.ex., por parafusos ou solda), estão presentes em um mesmo sistema. Um bom exemplo é observado nas ligações, onde parafusos estruturais “pretos”, galvanizados a fogo, ou, ainda, em aço ASTM A325 Tipo 3 (aço patinável) são empregados nas uniões de componentes estruturais em aço carbono comum ou em aço patinável.

Esta mistura de materiais ocorre, principalmente, por duas diferentes razões: <1>-Experiência prévia de uso, e, <2>-Indisponibilidade local dos itens julgados, *a priori*, como sendo adequados.

Em certas circunstâncias, a união de diferentes ligas metálicas pode levar à corrosão acelerada de um dos componentes. Este fenômeno é conhecido como corrosão galvânica; as diferentes ligas metálicas formam, então, o que se chama de par galvânico. Como resultado da formação de um par galvânico, temos o aumento da velocidade de corrosão do elemento menos nobre do par. Em contrapartida, a liga mais nobre (do par) tem sua velocidade de corrosão diminuída. Este tipo de corrosão pode promover danos “cosméticos” à aparência da liga menos nobre ou, em casos extremos, uma perda de massa considerável, levando à redução drástica da vida útil do componente.

Os aços patináveis são sabidamente “mais nobres” do que os aços estruturais comuns. Isto é devido à sua composição química diferenciada. Eles podem, a princípio, desenvolver corrosão galvânica quando conectados aos aços estruturais comuns – fato extensivamente divulgado na literatura. Seria isto verdadeiro para todas as condições de uso? Não. Isto não é verdadeiro, para boa parte das situações vivenciadas pelo engenheiro projetista.

O risco da corrosão galvânica depende de uma série de fatores. Além do aço utilizado, as características do ambiente e o detalhe de projeto são cruciais. É difícil, senão impossível, fazer um julgamento a priori a respeito da compatibilidade de materiais.

6.4.1 - Os princípios da corrosão galvânica

Para que a corrosão galvânica ocorra, três condições devem ser satisfeitas simultaneamente:

1. Duas ou mais ligas metálicas que apresentem diferentes potenciais de corrosão (ou, potenciais eletroquímicos) devem ser conectadas;
2. A conexão deve ser tal que permita o fluxo de elétrons entre as ligas;
3. As ligas metálicas, conectadas “eletricamente”, devem ser banhadas por uma mesma solução condutora de íons – o eletrólito.

A Figura 39 ilustra os três pré-requisitos de forma gráfica.

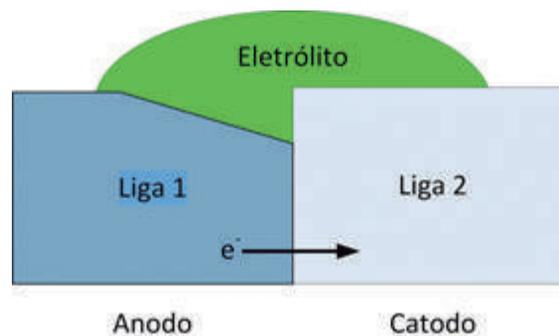
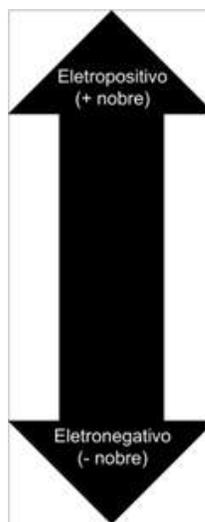


Figura 39: Os três pré-requisitos da corrosão galvânica: ligas metálicas com diferentes potenciais de corrosão, conectadas eletricamente e banhadas pelo mesmo eletrólito.

Se a corrosão galvânica puder se desenvolver, a liga menos nobre – o anodo – é preferencialmente corroída. Em oposição, a liga mais nobre – o catodo – é protegida. Sua taxa de corrosão diminui muito. De fato, o princípio da proteção catódica é baseado em anodos de sacrifício, promovendo a proteção a partir da corrosão.

O contato das duas ligas metálicas, com diferentes potenciais eletroquímicos, imersos em um eletrólito, leva ao desenvolvimento de um fluxo de elétrons do anodo para o catodo. As reações eletroquímicas são as mesmas que ocorrem enquanto as ligas metálicas estão isoladas, expostas ao ambiente particular – reações anódicas e catódicas. Entretanto, a corrosão sobre o anodo é acelerada. Em alguns casos, a formação de elementos galvânicos (conhecidos como “pares galvânicos” ou “pilhas galvânicas”) pode levar à corrosão em ligas que seriam resistentes à corrosão em dado ambiente. Este pode ser o caso de ligas consideradas passivas em ambientes atmosféricos, como alumínio, que pode ser levado à corrosão pela formação de pares galvânicos. Em tais casos, a corrosão localizada (como a corrosão por frestas ou pites) pode ser observada, o que não ocorreria sem que houvesse alteração de potencial, ausada pela formação de um par galvânico.

Contrariamente ao que se acredita, a diferença de potencial existente no par galvânico, por si só, não é um bom indicador do risco da ocorrência deste tipo de corrosão. Ela somente indica quando este risco deve ser considerado. Neste contexto, deve ser lembrado que as várias tabelas publicadas – chamadas de “Série Eletroquímica”, somente oferecem uma aproximação à questão da diferença de potenciais. O fator decisivo não é diferença de potencial observada em condições experimentais normatizadas, rigidamente controladas, mas a diferença real de potencial, de ligas reais, sob condições reais. Esta é a razão pela qual as tabelas empíricas de “Série Galvânica” foram feitas para certo número de ambientes típicos – como, p.ex., a água do mar. A Figura 40 ilustra a série galvânica, para água do mar, a 25°C. O Anexo A fornece uma série galvânica complementar, contendo várias ligas metálicas comumente encontradas na indústria⁴¹.



Grafite
Titânio
Aços inoxidáveis (passivos)
Bronze níquel alumínio
Cuproníquel (70/30 e 90/10)
Bronzes
Latões
Estanho
Chumbo
Ferro fundido austenítico
Aços inoxidáveis (ativos)
Ferro fundido
Aços estruturais patináveis
Aços estruturais
Ligas de alumínio
Zinco
Magnésio

Figura 40: Série galvânica para diferentes ligas imersas em água do mar, a 25°C.

O conhecimento dos fatores necessários ao desenvolvimento da corrosão galvânica e entendimento dos exemplos relacionados na Figura 41 torna possível a determinação de ações preventivas, que serão discutidas a seguir.

6.4.2 - Fatores relevantes ao desenvolvimento da corrosão galvânica

De acordo com a Lei de Faraday, os processos de corrosão eletroquímica estão diretamente relacionados à transferência de cargas elétricas, isto é, ao fluxo de correntes. Correntes ou densidades de corrente são, assim, frequentemente utilizadas para medir a velocidade de corrosão. Se as condições para a ocorrência da corrosão galvânica forem satisfeitas, em princípio, a corrente de corrosão total, I_{tot} , é composta de uma corrente parcial de “auto corrosão” I_s (isto é, a parte da corrosão que independe do contato com a outra liga metálica) e a corrente parcial da cela, I_{el} , (isto é, a parte da corrosão originada pela união das ligas metálicas que compõe o par galvânico). Isto é descrito pela equação abaixo:

$$I_{tot} = I_s + I_{el}$$

A intensidade da corrosão em dado elemento é determinada pela diferença de potencial entre os dois metais (ΔV), a resistência do eletrólito (R_{el}) e a resistência de polarização no anodo ($R_{p,a}$) e no catodo ($R_{p,c}$), respectivamente:

$$I_{el} = \frac{\Delta V}{R_{el} + R_{p,a} + R_{p,c}}$$

Podemos fazer inferências, utilizando a equação acima, a respeito dos fatores que determinam a corrosão galvânica. Estes fatores são críticos na avaliação da possível ocorrência ou não da corrosão galvânica. O efeito destes fatores será discutido individualmente, a seguir. A Figura 41 ilustra os fatores intervenientes no aparecimento da corrosão galvânica.

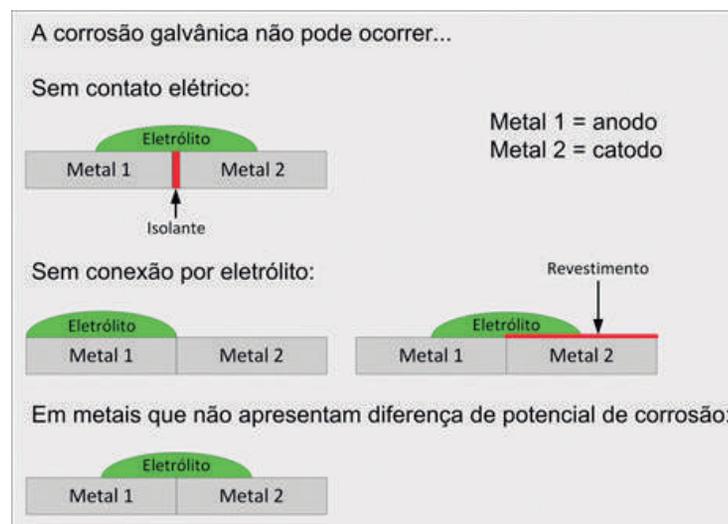


Figura 41: Condições nas quais a corrosão galvânica não pode ocorrer.

6.4.3 Resistividade do eletrólito

O risco da corrosão galvânica diminui com o aumento da resistividade do eletrólito. Isto acontece porque o alcance da corrente galvânica (iônica, no eletrólito) é reduzido e a mudança de potencial (V) no ânodo é limitada, tal como ilustrado na Figura 42.

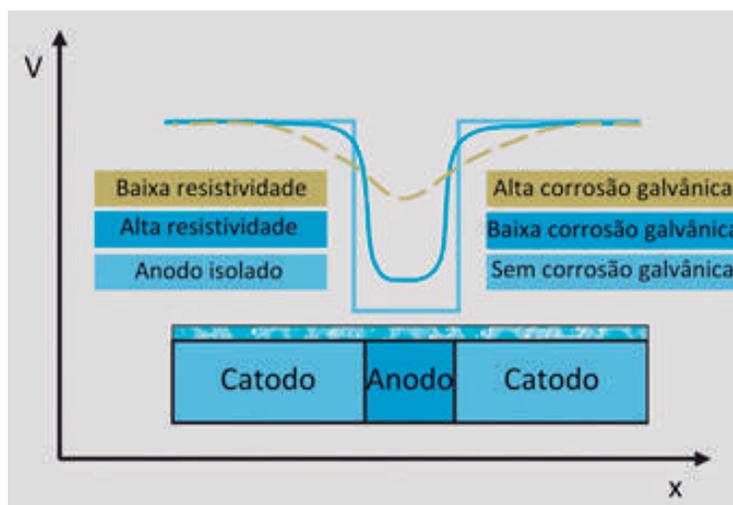


Figura 42: Influência da resistividade do eletrólito sobre a corrosão (ou, des-polarização) do anodo (V corresponde ao potencial medido).

É importante lembrar que a resistividade é inversamente proporcional à quantidade de sais dissolvidos em solução. Ambientes mais poluídos levam a eletrólitos de menor resistividade, e vice-versa.

Para eletrólitos com maior resistividade (como películas de água resultantes de condensação de vapor de água, como o orvalho), haverá, conseqüentemente, uma menor velocidade de corrosão. Assim, quanto mais sais dissolvidos no eletrólito, maior será a corrosão do anodo, causada pelo efeito galvânico.

Ambientes atmosféricos classificados como de muita alta agressividade, industriais ou marinhos (C5-I e C5-M, segundo a norma ISO 9223) são aqueles em que, devido à menor resistividade do eletrólito superficial, a corrosão galvânica se desenvolve com certa frequência. A Tabela 10 traz valores específicos de condutividade (o inverso da resistividade), para vários tipos de eletrólitos aquosos.

Tabela 10: Valores típicos de condutividade específica em diferentes tipos de água.

Ambiente	Condutividade específica ($\Omega \cdot \text{cm}^{-1}$)
Água pura	$5 \cdot 10^{-8}$
Água desmineralizada	$2 \cdot 10^{-6}$
Água de chuva	$5 \cdot 10^{-5}$
Água potável	$2 \cdot 10^{-4}$ a $1 \cdot 10^{-3}$
Água salobra	$5 \cdot 10^{-3}$
Água do mar	$3,5 \cdot 10^{-2}$ a $5 \cdot 10^{-2}$

6.4.4 Duração do umedecimento

Existe uma forte interação entre a resistividade do eletrólito e a duração do umedecimento. Menor resistividade implica em maior quantidade de sais em solução no eletrólito que, por sua vez, resiste mais ou menos à desidratação completa. Não é possível secar completamente uma superfície metálica previamente exposta, p.ex., à deposição de sais marinhos (a névoa salina). Isto é de grande importância sempre que os componentes do par galvânico não estiverem permanentemente umedecidos por líquidos aquosos. Como descrito anteriormente, a película de eletrólito desempenha papel fundamental no processo. Sem a película, a corrosão galvânica não ocorrerá.

Isto implica, na prática, que qualquer combinação de materiais metálicos não é problema, a princípio, desde que não exista película de eletrólito presente. Esta é uma situação típica para interiores sem condensação. Componentes de iluminação (p.ex., lustres), em ambientes interiores, costumam unir diferentes ligas metálicas (latão, alumínio, etc.). A corrosão galvânica raramente é observada nestas condições. De modo geral, ambientes secos, aerados (e, eventualmente, aquecidos) não impõe restrição à união de diferentes ligas metálicas. A Figura 43 ilustra um caso de união de aço inoxidável com aço carbono pintado em um ambiente interior. Não haverá o desenvolvimento de corrosão galvânica.

O tempo de exposição à determinada umidade e a resistividade do eletrólito são muito dependentes das condições locais. Em ambientes marinhos, industriais ou internos às piscinas cobertas, p.ex., a probabilidade da ocorrência da corrosão galvânica é significativamente maior que em condições mais brandas, como aquelas observadas nos ambientes rurais ou mesmo de cidades médias a grandes (agressividade atmosférica classificada como C2 e C3 segundo

a ISO 9223). A Tabela 11 mostra a influência do ambiente sobre a velocidade de corrosão do zinco, com e sem contato com o aço inoxidável – um par galvânico normalmente considerado “perigoso”. Podemos observar que a parcela da corrosão proporcionada pela formação do par galvânico (isto é, a diferença entre as velocidades de corrosão entre componentes isolados e unidos) excede a da auto corrosão (isto é, a velocidade de corrosão do zinco sem qualquer contato com o aço inoxidável) em atmosferas marinhas e regiões sujeitas à forte deposição de sais marinhos.



Figura 43: Eletrólitos são, de modo geral, ausentes em ambientes internos aerados e aquecidos. A combinação de ligas metálicas tais como aços inoxidáveis e aços carbono (pintado ou não) não envolvem riscos do aparecimento da corrosão galvânica.

Além do ambiente em si, detalhes de projeto desempenham um papel decisivo na proteção. Fatores que auxiliam a secagem rápida de películas de unidade (aeração adequada, prevenção de frestas, drenagem das águas, etc.) reduzem o risco da corrosão. Áreas permanentemente úmidas, contidas em frestas, áreas protegidas (mas contendo água estagnada) ou superfícies contendo resíduos tais como terra, podem acelerar consideravelmente a corrosão galvânica.

Tabela 11: Velocidades de corrosão do aço carbono galvanizado a quente com e sem contato com aço inoxidável, em diferentes ambientes.

Situação	Velocidade de corrosão, $\mu\text{m}/\text{ano}$			
	Atmosfera urbana	Atmosfera industrial	Atmosfera marinha	Região de arrebentação costeira
Aço carbono galvanizado a quente	2,5	6,5	5,1	10,2
Aço carbono galvanizado a quente conectado a aço inoxidável (razão de superfície anodo/catodo = 1:6)	3,0	8,5	10,1	27,0

6.4.5 - A cinética das reações de eletrodo

A cinética das reações de eletrodo (entenda-se velocidade de corrosão) é sintetizada na Equação 3. Diferenças de potencial por vezes consideradas pequenas, como 100 mV, podem levar à corrosão, enquanto que ligas metálicas com diferenças de potencial consideravelmente mais elevadas (p.ex., 800 mV) podem ser unidas sem dificuldade. Porque isto acontece?

De fato, a diferença de potencial não fornece informação sobre a cinética da corrosão galvânica. A cinética da reação depende da liga metálica em particular. O titânio, por exemplo, permite que a reação de redução de oxigênio sobre sua superfície ocorra de modo muito mais lento que sobre o cobre. Isto explica porque o aço carbono corrói mais rapidamente em contato com o cobre do que com o titânio, embora este último esteja situado no “limite” da série galvânica. Neste contexto, a formação de películas de corrosão desempenha um papel decisivo. Elas podem alterar significativamente o potencial de uma liga metálica e ser obstáculo à reação parcial anódica e/ou catódica.

6.4.6 Área do cátodo e anodo

Este é um ponto crítico quando se pensa em parafusos e consumíveis de soldagem, em geral. Um importante fator no cálculo da densidade da corrente da cela galvânica, I_{el} (corrente de cela relacionada à área) é a razão das áreas superficiais catódica (A_c) e anódica (A_a). Ela influencia tremendamente a velocidade da corrosão galvânica:

$$I_{el} = \frac{A_c}{A_a} \cdot \frac{\Delta V}{R_{el} + R_{p,a} + R_{p,c}}$$

Sempre que a área superficial do catodo (o componente mais nobre do par galvânico) for muito menor do que a área superficial do anodo (a liga metálica menos nobre), nenhuma mudança no comportamento frente à corrosão é costumeiramente observada. Esta situação é ilustrada na Figura 44.

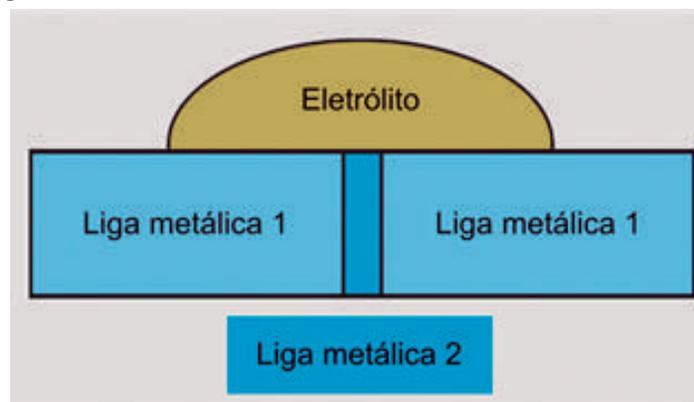


Figura 44: Enquanto a área superficial do catodo (liga metálica 2) for pequena comparada à do anodo (liga metálica 1), nenhum dano é observado ao anodo (liga metálica 1).

Exemplos típicos podem ser encontrados quando parafusos de aço ASTM A325 Tipo 3 (aço patinável) são utilizados em componentes de aço carbono. Não há corrosão dos componentes de aço carbono e a ligação é preservada. A Figura 45 ilustra uma situação ainda mais extrema – a união de aço carbono galvanizado a quente com aço inoxidável, sem problemas de origem galvânica. Mesmo em ambientes relativamente agressivos (classificação C4, segundo a ISO 9223), não há corrosão galvânica!

Sob condições atmosféricas, torna-se, por vezes, difícil quantificar as proporções ativas das superfícies anódicas e catódicas de uma estrutura. Para uma avaliação prática, entretanto, isto é desnecessário. Normalmente, basta considerar o sistema em geral. Na combinação de materiais, parafusos devem ser sempre feitos de materiais mais nobres, de modo que a superfície catódica seja pequena. Este conceito está descrito em muitos livros que tratam do tema corrosão – e possui forte embasamento teórico. Assim, o uso de parafusos (e consumíveis de solda) com características “patináveis”, em estruturas de aço patinável ou não, garante a integridade estrutural do conjunto ao longo do tempo.

A situação oposta, entretanto, pode causar problemas. Se um anodo pequeno for conectado a um grande catodo (por exemplo, um parafuso de aço carbono – galvanizado ou não – conectado a componentes estruturais de aço patinável), a corrosão galvânica poderá ocorrer (Figura 46).

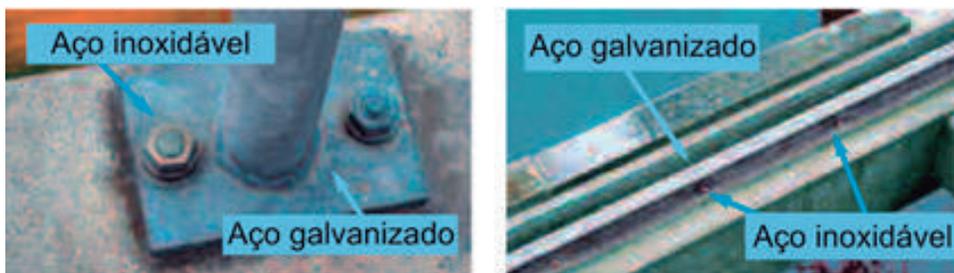


Figura 45: Parafusos de aço inoxidável conectados em componentes de aço carbono de área superficial muito maior não promovem a corrosão galvânica. Em ambos os casos, as conexões estão em ambiente externo, classificado segundo a norma ISO 9223 como C3 (ambiente de alta agressividade).

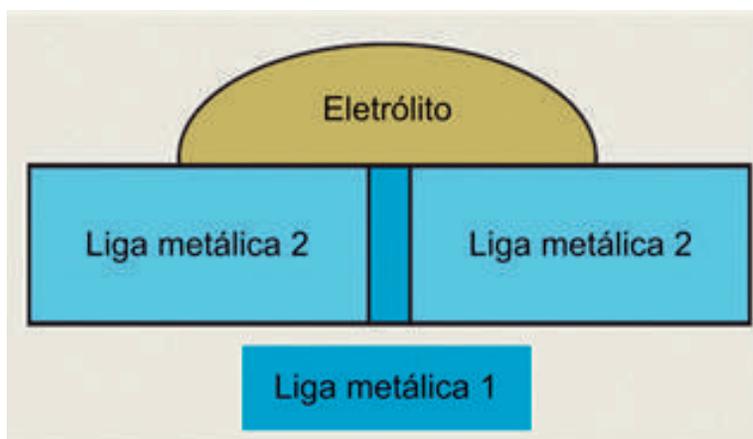


Figura 46: A corrosão galvânica pode ocorrer se a área superficial do anodo (Liga metálica 1) for pequena, e, a do catodo, grande. Este é o caso da utilização de parafusos estruturais “pretos” ou galvanizados a quente em estruturas de aço patinável.

Recomendações para evitar a corrosão galvânica

- A separação por intermédio de isolantes pode ser feita através de componentes isolantes confeccionados em borracha sintética, PTFE, Nylon ou outro material não poroso adequado à ligação. Pode-se, alternativamente, encapsular o par galvânico com massa epoxídica (produzida pelos fabricantes de tintas) ou ainda através de um bom sistema de pintura. A Figura 47 ilustra a situação;

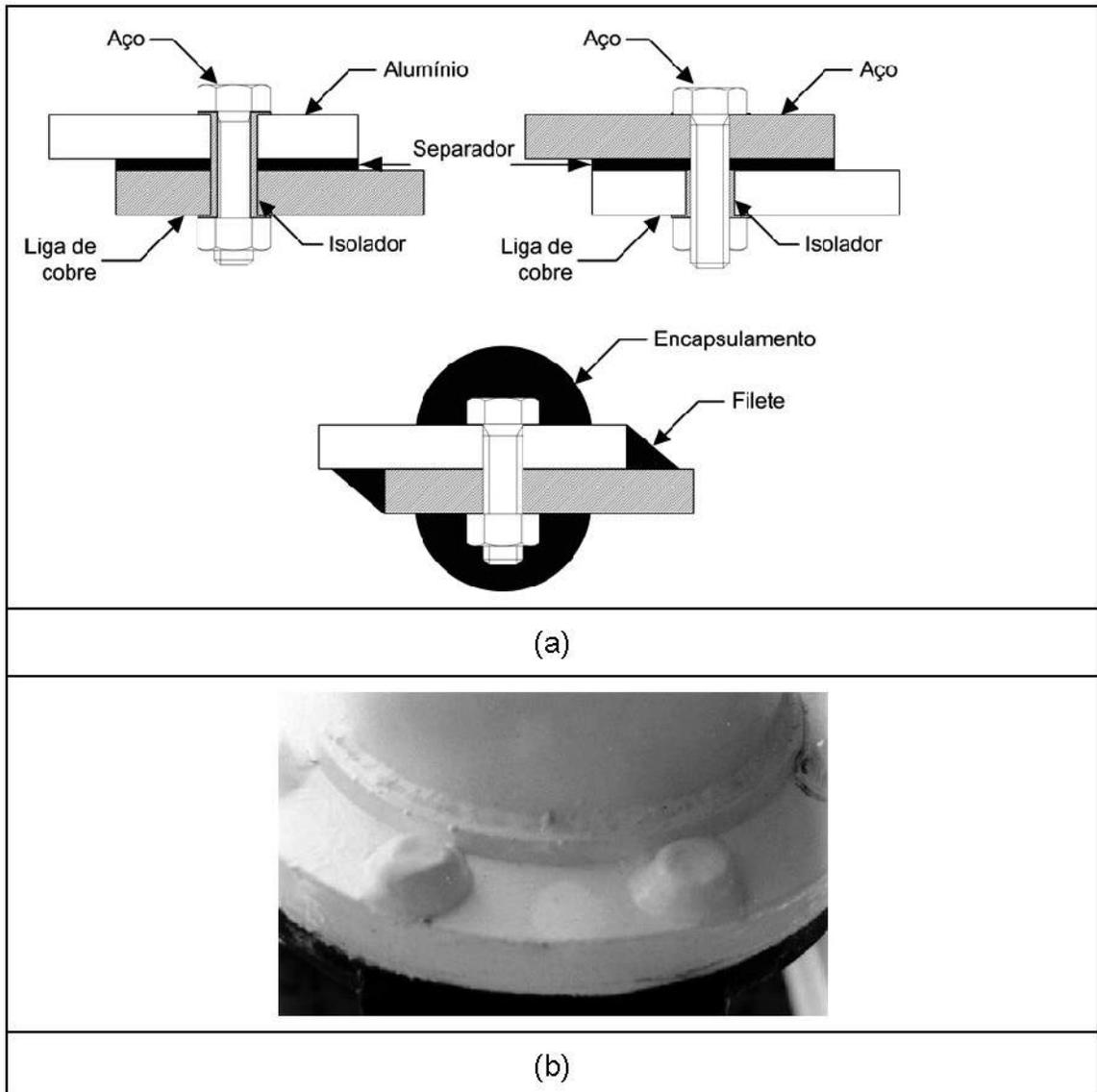


Figura 47: Promova a separação elétrica entre ligas dissimilares. (a) use Nylon, PTFE ou borracha sintética na separação, ou, alternativamente, (b) encapsulamento, com massa epóxi.

A reação entre duas ligas distintas, imersas em um mesmo eletrólito – ou por onde líquidos depositados sobre as ligas além do isolamento elétrico – necessita de alguma atenção (Figura 48).

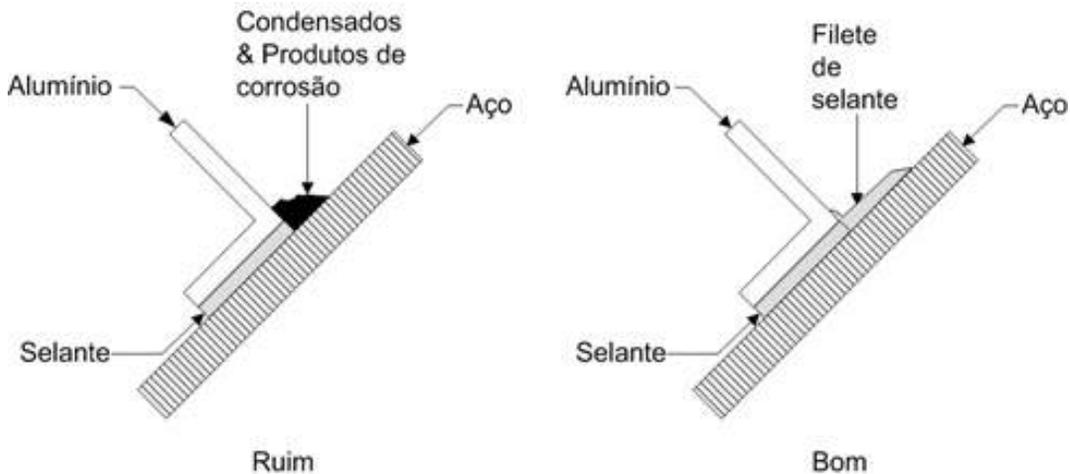


Figura 48: A corrosão galvânica pode ocorrer mesmo com o emprego de um dielétrico, em situações onde o condensado (ou produtos de corrosão) possam entrar em contato com as duas ligas. A solução continua sendo a separação elétrica.

Quando a separação dielétrica não puder ser adotada, um metal que reduza a diferença de potencial entre os dois metais poderá ser utilizado. Em outras palavras, pode-se utilizar uma liga situada, na série galvânica, em local intermediário entre os dois componentes do par. A Figura 49 ilustra a situação.

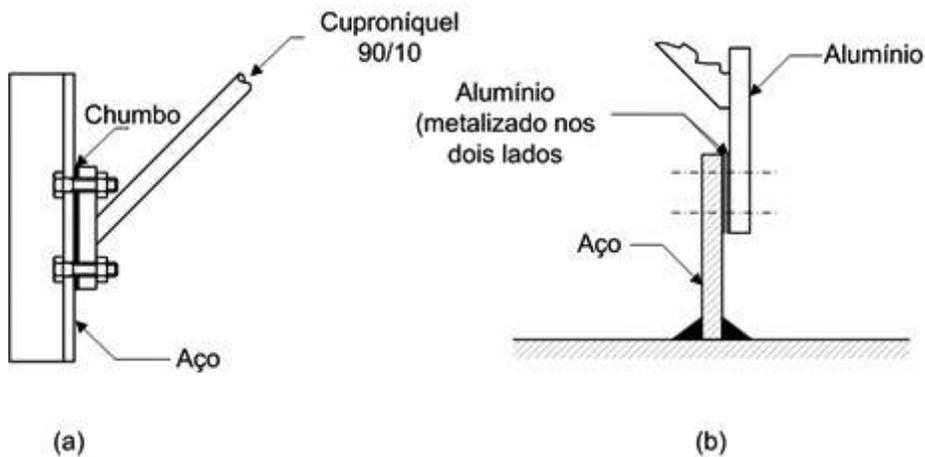


Figura 49: Use uma liga com potencial intermediário para a separação do par galvânico. (a) separação por metal sólido (chumbo entre o aço e o cuproníquel) e (b) metalização do componente de aço e do componente de alumínio.

- Em ambientes classificados como C5-M ou C5-I, o efeito adverso do acoplamento galvânico é aparente ao redor de aproximadamente 5 cm do ponto de contato. A separação, nesta região, deve ser efetiva, ou a compensação adequada para peso/resistência deve ser feita (Figura 50);

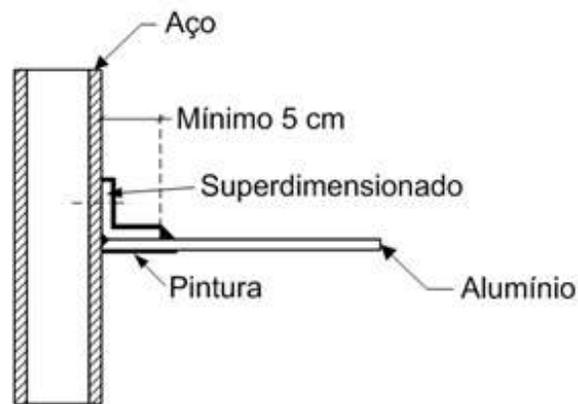


Figura 50: Exemplo de proteção de par galvânico. A chapa dobrada (ou cantoneira) é superdimensionada, e o par está protegido por pintura até uma distância segura (aprox. 5 cm).

- Todo o cuidado deve ser tomado contra a formação de ferrugem nas proximidades de um par galvânico. A ferrugem, devido às suas propriedades higroscópicas (ela absorve do ar cerca de 40 a 50% em peso de umidade) pode agravar em muito o ataque galvânico, isto é, não faltará o eletrólito;
- A liga mais nobre poderá ser escolhida para os componentes-chave, especialmente se o projeto funcional demande que eles sejam menores que os outros componentes (Figura 51);

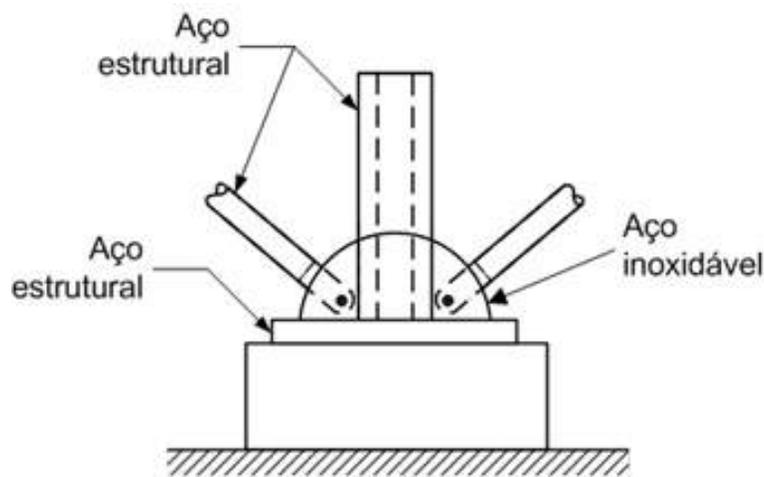


Figura 51: Os componentes-chave poderão ser confeccionados em ligas mais nobres.

- O componente menos nobre (isto é o componente anódico) deve ser maior, ou mais espesso, para permitir alguma eventual corrosão (Figura 52);

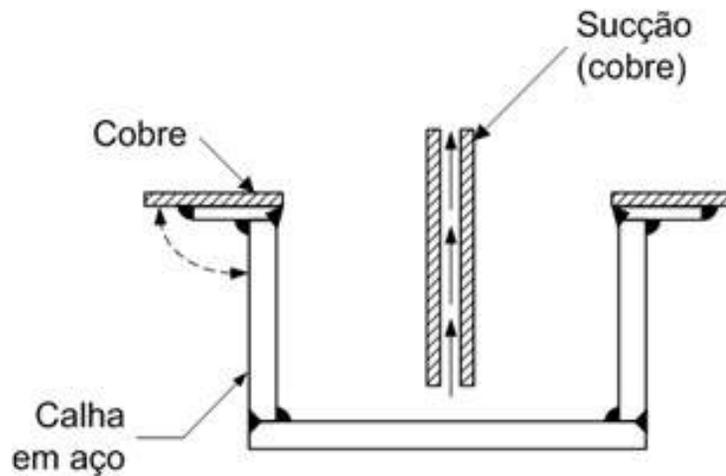


Figura 52: O componente menos nobre deverá ser superdimensionado.

- Adesivos, quando utilizados na junção de metais dissimilares, devem ser de baixa condutividade, isto é, deverão ser isolantes elétricos;
- Atenção ao detalhe: o componente estrutural menos nobre deve ser de fácil reparo ou substituição (Figura 53);

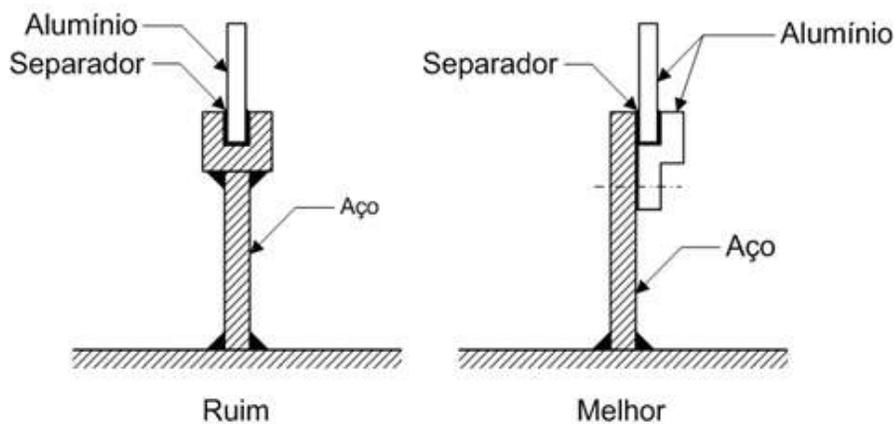


Figura 53: O componente menos nobre deverá ser de fácil substituição. A ilustração indica que, na condição "melhor", o calço de alumínio pode ser facilmente retirado, permitindo a substituição do componente de alumínio apoiado sobre este.

- A isolamento de componentes bimetálicos não pode ser feita parcialmente, especialmente quando áreas anódicas são deixadas isoladas, em detrimento das áreas catódicas não isoladas (Figura 54);

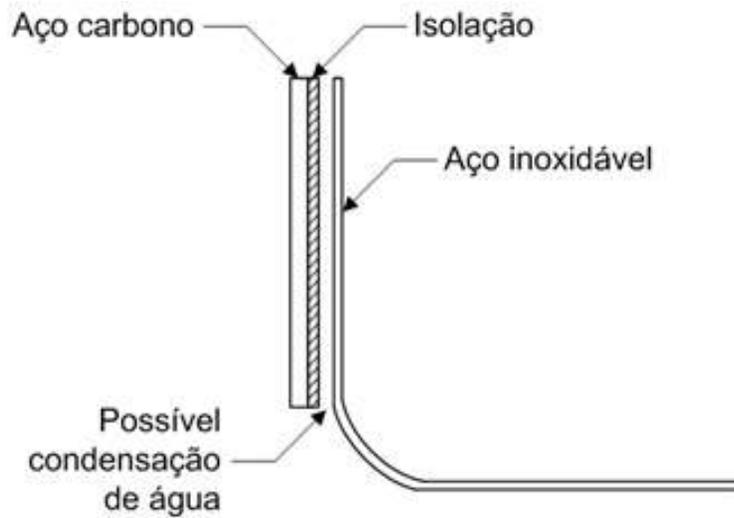


Figura 54: A isolação elétrica do par não pode ser feita de forma parcial. A isolação, como proposta na ilustração, não pode terminar antes do término do componente em aço carbono. Isto configura proteção parcial.

- Sempre que possível, utilize um selante para impedir, ou dificultar, a deposição de água na interface dielétrico-liga metálica. O excesso de selante deve ser levado além da junta (Figura 55);

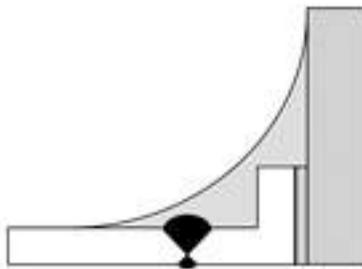


Figura 55: Utilize selante além da junta. Isto garantirá proteção no par galvânico.

- Conduza a umidade condensada para fora da estrutura (Figura 56);

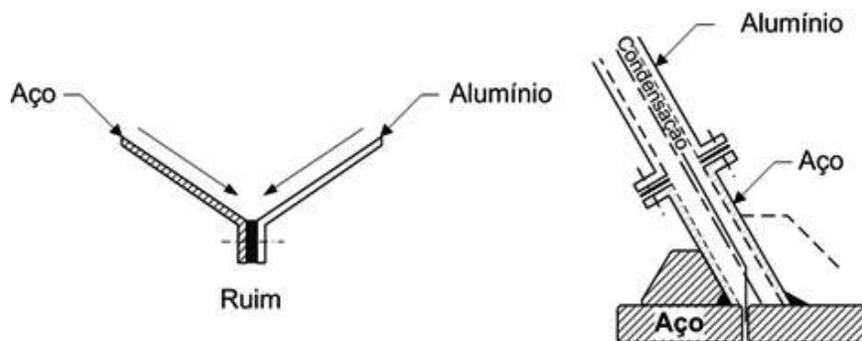


Figura 56: A umidade não deve ficar retida dentro da estrutura.

• Exemplo de aplicação de uma transição, entre um duto de alta temperatura (chaminé), em aço inoxidável e o enclausuramento do lado exposto às intempéries. A transição pode ser feita através do uso de um clad de aço carbono/aço inoxidável. Todo o ataque estará concentrado no clad (sobre o aço carbono), poupando a estrutura de aço onde ele foi fixado. Sua troca é facilitada. No lugar do clad, pode-se utilizar um calço de aço carbono sobre o qual foi feita a aplicação de aço inoxidável (por aspersão térmica). A Figura 57 ilustra a montagem;

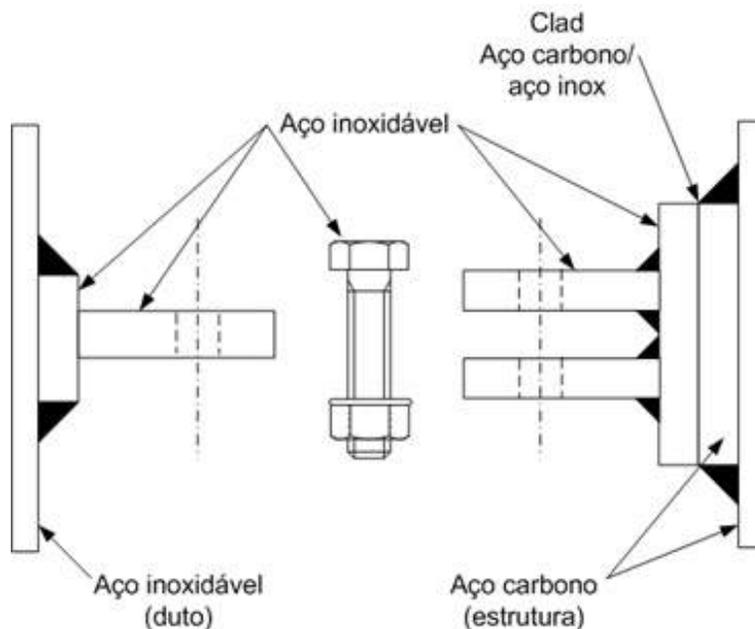


Figura 57: Exemplo de transição aço inoxidável-aço carbono, que permite a troca do componente corroído com facilidade (além de concentrar sobre este componente – o calço) todo o ataque.

• Se a separação dielétrica, em uma junta não compatível, não puder ser implementada, todo o conjunto deverá ser pintados com um primer epoxídico (contendo fosfato de zinco) e o conjunto encapsulado em massa epóxi. A eliminação do eletrólito depositado sobre a junta impedirá o desenvolvimento da corrosão galvânica. O inibidor de corrosão fosfato de zinco, adicionado ao primer, dificultará em muito o progresso de uma eventual corrosão;

Algumas “regras gerais” podem ser formuladas para parafusos:

- Parafusos devem sempre manter a sua função de conexão segura de dois componentes metálicos;
- Parafusos não devem afetar negativamente os materiais dos componentes e não devem ser afetados por eles;
- Em condições agressivas, os parafusos não devem ser confeccionados com ligas anódicas quando comparadas às ligas do par bimetálico (ou à liga);

- Os parafusos devem, preferencialmente, ser feitos em uma liga compatível com todas as ligas existentes na conexão, isto é, levemente catódicos;
- Parafusos devem ser feitos, preferencialmente, de materiais resistentes ao ambiente (ou protegidos); nenhum produto sujeito à falha catastrófica devido à fragilização pelo hidrogênio (como p.ex., parafusos revestidos por zinco eletrodepositado a partir de banhos ácidos), corrosão-sob-tensão, etc., deve ser utilizado em uma ligação crítica;
- Quando a exclusão de acesso do ambiente à junta não for possível, por motivos geométricos, use um selante (Figura 58);

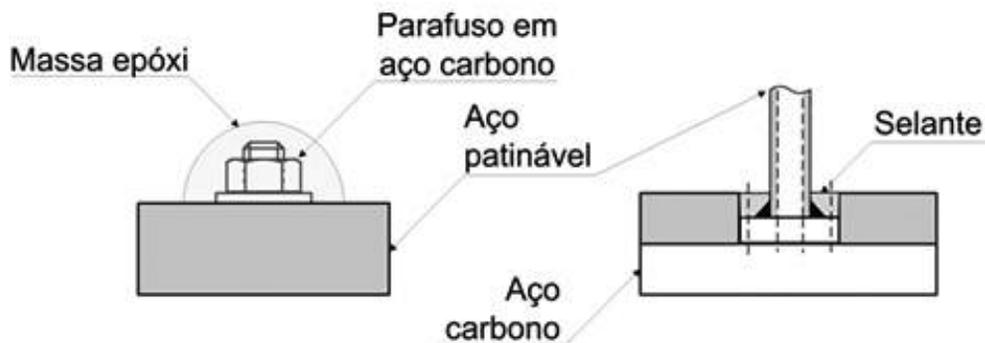


Figura 58: Exemplo de exclusão do ambiente de um dos componentes do par.

Algumas “regras gerais” podem também ser formuladas para os selantes:

- Materiais dielétricos e selantes não devem ser porosos em grau que absorvam água ou outros eletrólitos, de modo a diminuir a isolamento entre os metais constituintes do par galvânico. Consulte seu fornecedor a respeito da capacidade do produto de absorver água ou outros produtos;
- Composição química, consistência durante a aplicação, pot life, aderência às superfícies e procedimentos para a aplicação devem atender ao uso prático, sem esforços excessivos e sem impedimento em tarefas feitas nas proximidades;
- Selantes devem ser adequados às condições ambientais locais, isto é, sua resistência ao ambiente, calor, poluentes, respingos de combustíveis, óleos, graxas, gases, etc., deve ser observada;
- Selantes devem ser adequados aos requisitos funcionais da junta. Por exemplo, somente selantes que permitam algum grau de deformação devem ser utilizados em locais em que a conexão não é fixa e a mobilidade entre as superfícies é uma exigência;
- Os selantes e isolantes não devem afetar adversamente os materiais do par galvânico, devido à sua composição química. Por exemplo, o enxofre livre, existente na borracha

vulcanizada, promoverá a acidulação de qualquer eletrólito depositado, incitando à corrosão metálica. O ácido acético existente em certo tipo de silicones também promove a corrosão do aço carbono. Estas (e outras) substâncias liberadas durante o processo de cura poderão promover a corrosão de um – ou dos dois – elementos do par galvânico.

6.5 - Soldagem

O procedimento de soldagem é de grande importância no controle da corrosão. Como isto pode ser implementado?

- Evite cordões de solda intermitentes ou descontínuos. Eles podem reter póis diversos, água, etc. O eletrólito retido não será rapidamente eliminado, propiciando o ataque;
- A solda deve ser feita com qualidade e permitir a acessibilidade (Figura 59);

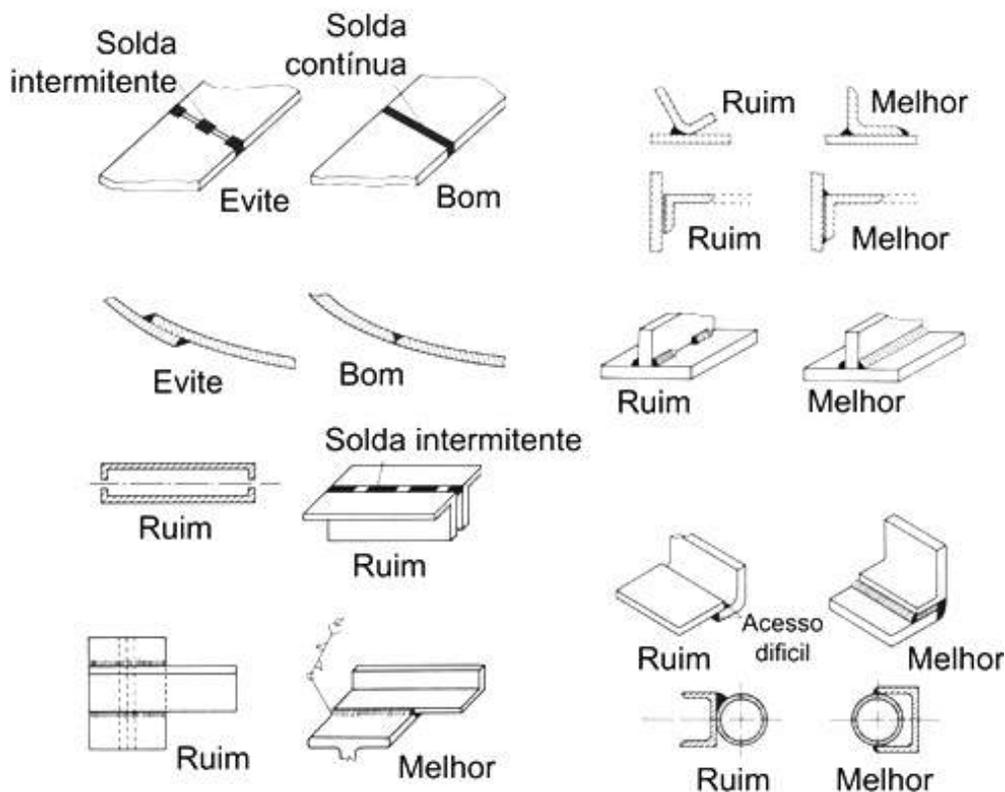


Figura 59: Exemplos de boas práticas de soldagem.

- Os cordões de solda não devem possuir imperfeições (asperezas, espirros, furos, etc.) que dificultem o recobrimento do sistema de pintura escolhido. Soldas feitas em campo são irregulares e tornam o recobrimento da tinta desuniforme. Haverá pouca tinta nos “picos” e muita tinta nos “vales”. O sistema de pintura, desse modo, não atingirá a durabilidade estimada pelo projetista. Outro problema trata da existência de escória,

liberada pelo eletrodo, e não convenientemente retirada. As escórias são higroscópicas. Através do fenômeno da osmose, o vapor de água migrará tinta adentro, até a interface metal/escória. O processo de corrosão, então, se instalará, e, mais uma vez, o sistema de pintura não atingirá a durabilidade estimada. A Figura 60 ilustra o conceito;

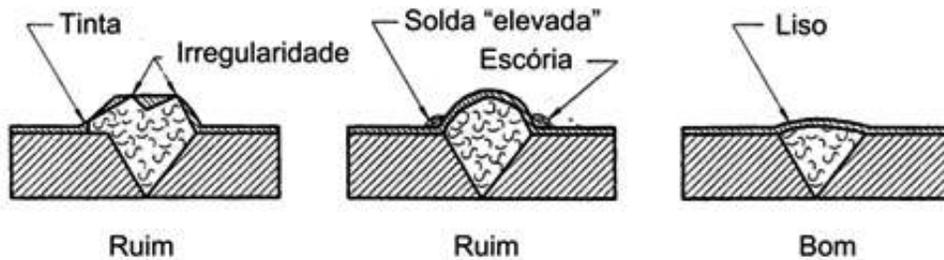


Figura 60: Cordões de solda não devem possuir imperfeições.

6.6 - Superfície

- Contornos arredondados são preferíveis aos cantos-vivos, pois permitem a uniformidade do sistema de proteção. Por conta da tensão superficial da tinta, as arestas receberão uma camada de tinta menos espessa do que aquela depositada sobre as superfícies planas. O revestimento aplicado sobre os cantos-vivos apresentam, além disso, menor resistência aos danos mecânicos. Assim, recomenda-se que os cantos-vivos sejam arredondados ou chanfrados (Figura 61);

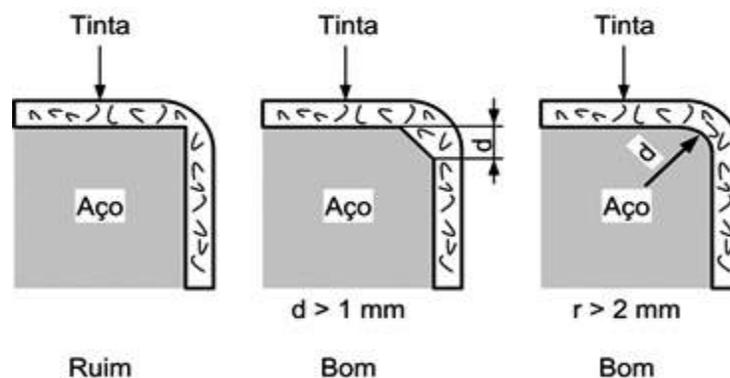


Figura 61: Elimine os cantos-vivos.

- Reduza o número de parafusos, até um ótimo. Juntas soldadas auxiliam, por vezes, a obtenção de superfícies mais lisas e homogêneas. Os componentes monolíticos são os preferidos;

- Onde e quando for possível, altere a localização dos enrijecedores e componentes semelhantes, do lado exposto às condições mais agressivas, para condições de exposição mais favoráveis (Figura 62);

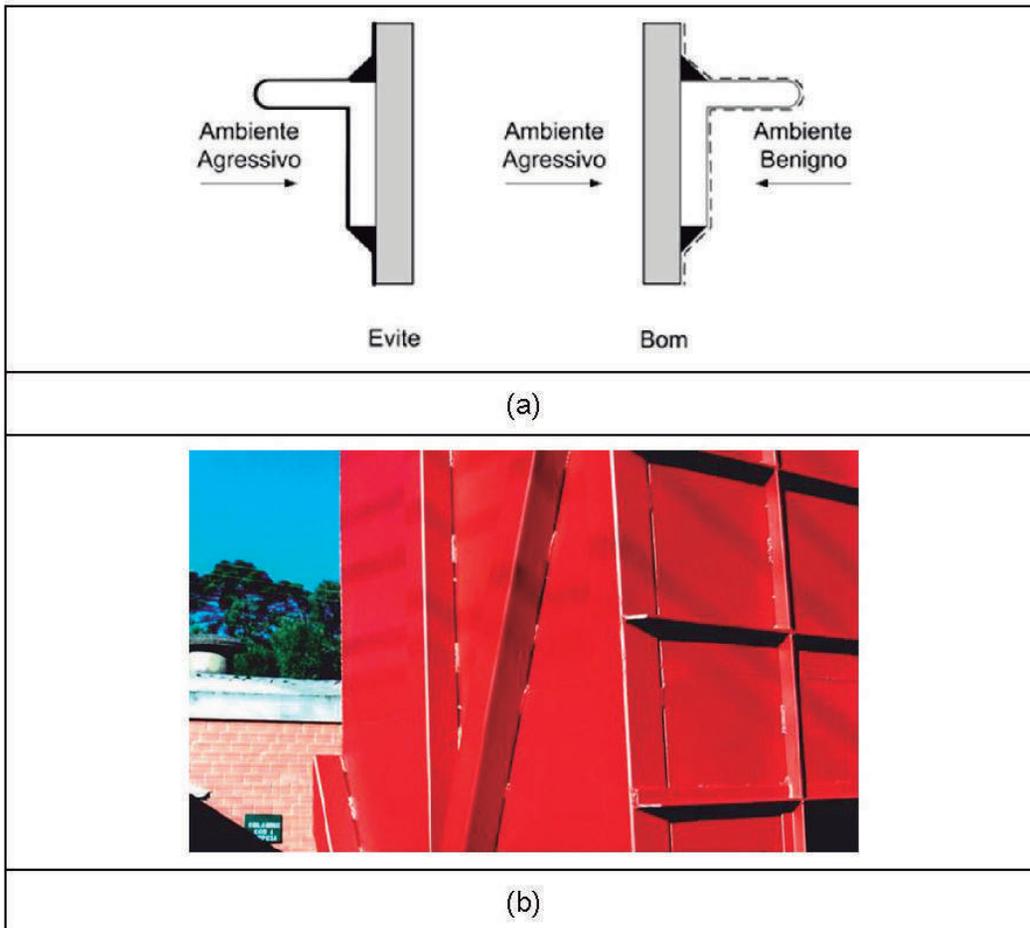


Figura 62: Coloque os enrijecedores e assemelhados para condições mais favoráveis (a); exemplo de enrijecedores posicionados externamente, junto ao ambiente mais agressivo.

- Quando se pensa em uma junta em que se utiliza selante elastomérico, deveremos considerar as tensões que podem ser impostas sobre o selante, pelo movimento relativo da junta;
- De modo geral, o selante utilizado em uma junta “larga” estará menos tensionado do que quando aplicado em uma junta “estreita”, durante a expansão. Isso é válido desde que o selante seja preenchido à mesma profundidade, em cada junta;
- Se o movimento da junta corresponde à 15-35% da largura total da junta, uma profundidade menor de selante minimizará a tensão sobre o selante e sobre sua capacidade de adesão ao substrato;
- De modo geral, juntas verticais se moverão mais do que as horizontais e necessitarão de profundidades menores;

- Se a junta excede o critério “padrão”, ela pode ser modificada através da introdução de uma borracha de vedação (ou ainda espuma de polietileno, poliuretano de células pequenas, etc.). A borracha de vedação, antes da inserção, deve ser de 25% a 50% mais larga do que a junta (Figura 63);

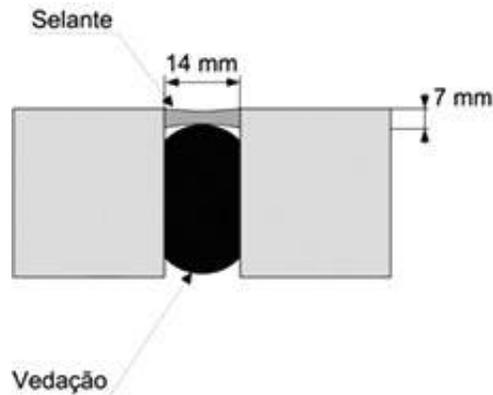


Figura 63: Detalhe para juntas que excedem as dimensões usuais.

- O desempenho do selante é melhorado se ele aderir somente aos lados da junta, e não no fundo (Figura 64).

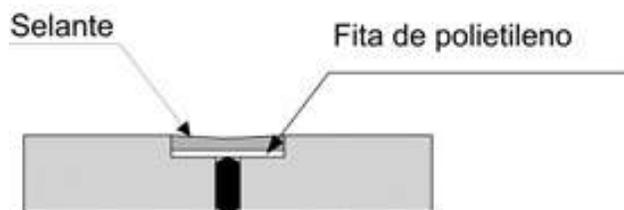


Figura 64: Detalhe para confecção de juntas.

6.7 - Produtos destinados à galvanização a quente

- O detalhamento dos componentes destinados à galvanização por imersão a quente deve considerar que, ao longo do processo de aplicação do revestimento, vários líquidos deverão entrar e sair livremente pelo conjunto. Os líquidos incluem agentes desengraçantes, ácidos, fluxantes e o próprio banho de zinco. As Figuras 65 a 73 ilustram boas práticas de projeto.

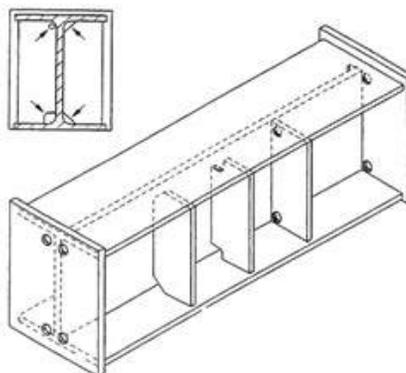


Figura 65: Chapas de topo e enrijecedores devem possuir aberturas que possibilitem a passagem dos líquidos utilizados no processo de galvanização.

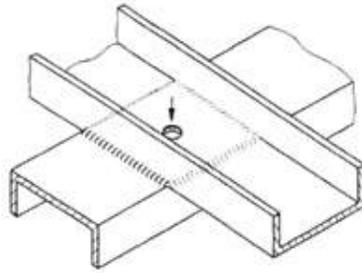


Figura 66: Superfícies sobrepostas devem possuir um ou mais furos. Isto é especialmente importante em chapas mais finas. Esta precaução é necessária para evitar explosões na operação de galvanização a quente. Os líquidos devem entrar e sair livremente entre as superfícies de contato.

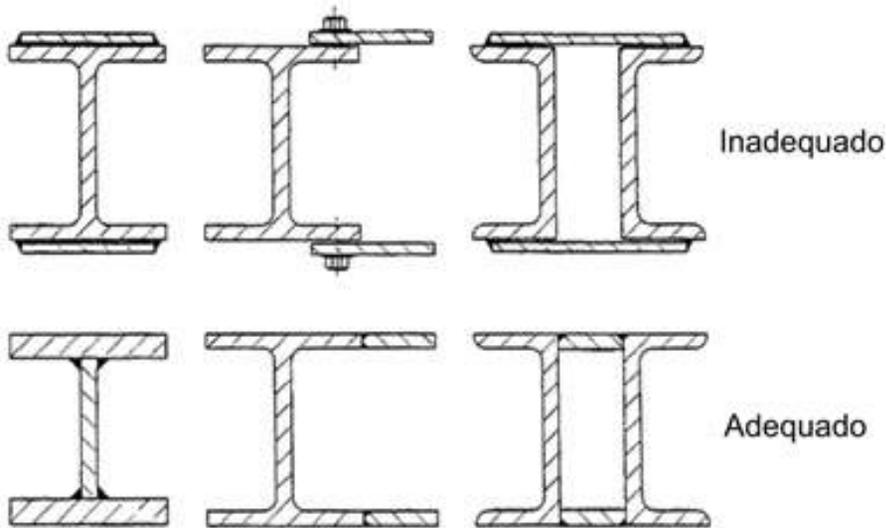


Figura 67: Frestas e superfícies planas em contato permitirão a entrada de líquidos aquosos (como o ácido da decapagem), mas não permitirá a entrada do zinco do banho (por tensão superficial). Juntas soldadas devem ser contínuas. Juntas parafusadas são feitas após a galvanização por imersão a quente.

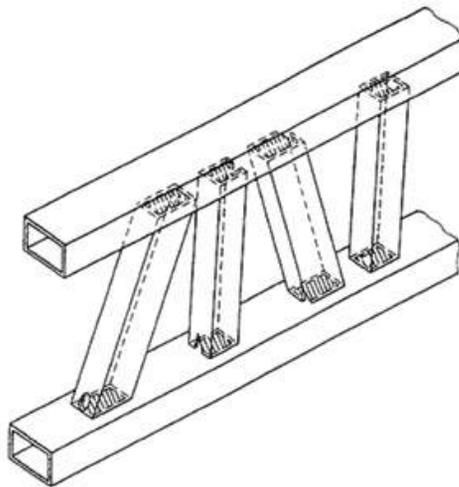


Figura 68: Aberturas de ventilação e drenagem devem ser visíveis, por razões de inspeção e segurança.

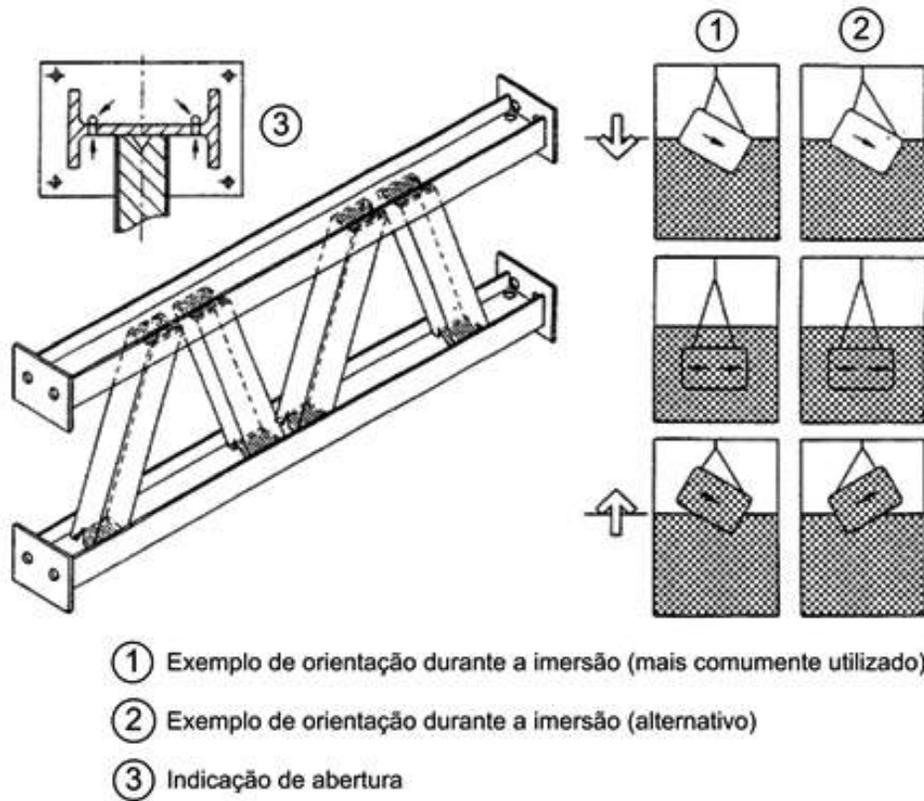


Figura 69: O zinco deve ser facilmente drenado dos componentes. A prática costumeira é a de imergir o componente em ângulo, e, após a imersão, retirar no ângulo oposto. As posições das aberturas devem estar relacionadas ao alinhamento durante a retirada.

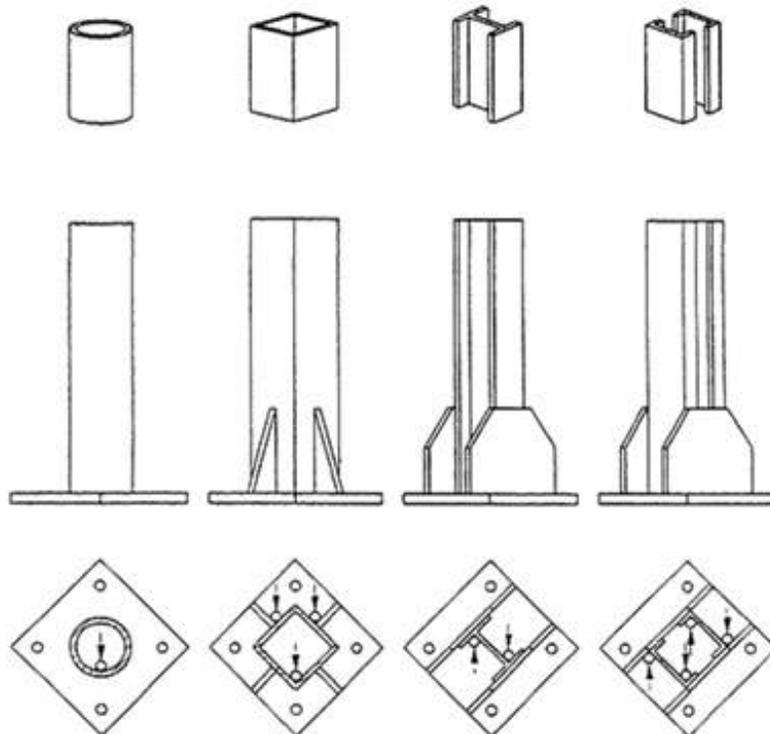


Figura 70: Orifícios de ventilação devem ser diagonalmente opostos.

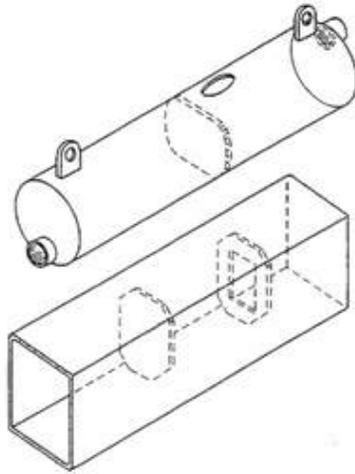
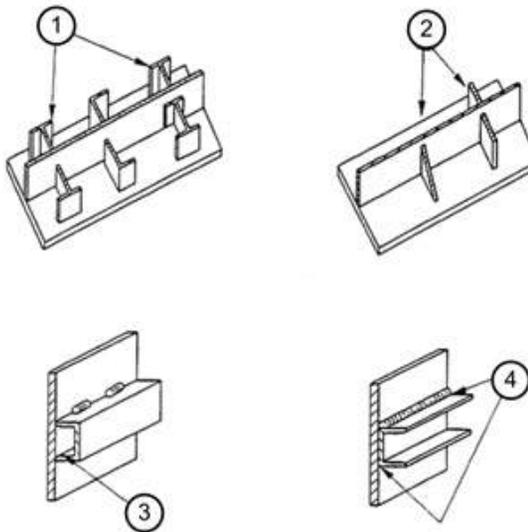


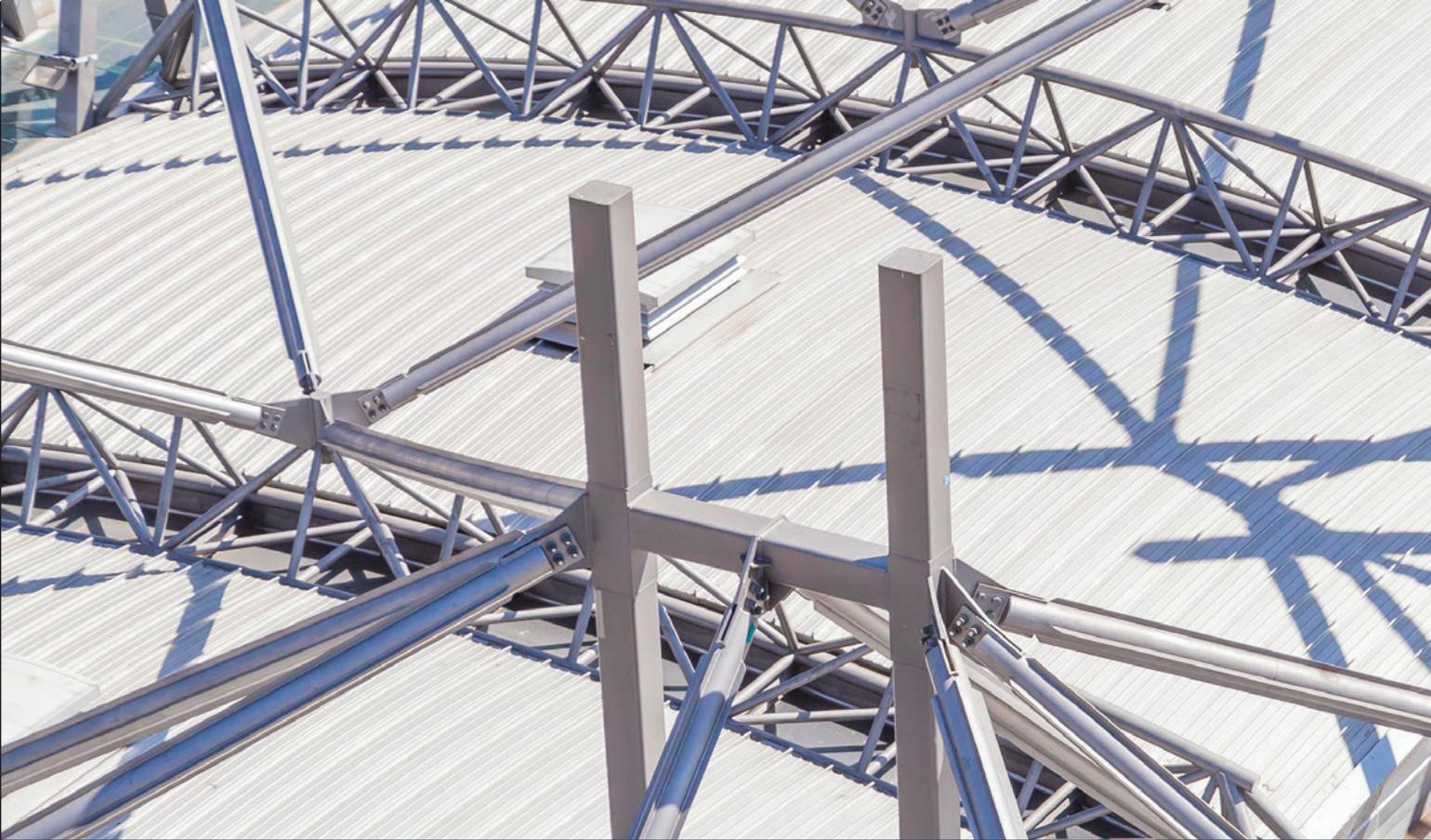
Figura 71: Aberturas devem ser posicionadas de forma diametralmente oposta e com no mínimo 50% do diâmetro.



- ① Evite utilizar perfis U, L ou T como enrijecedores
- ② Prefira utilizar perfis bulbo ou chapas como enrijecedores
- ③ Evite esta disposição, a menos que o interior do perfil U seja protegido antes da soldagem
- ④ Prefira solda contínua, limpa e sem escória, respingos, etc.

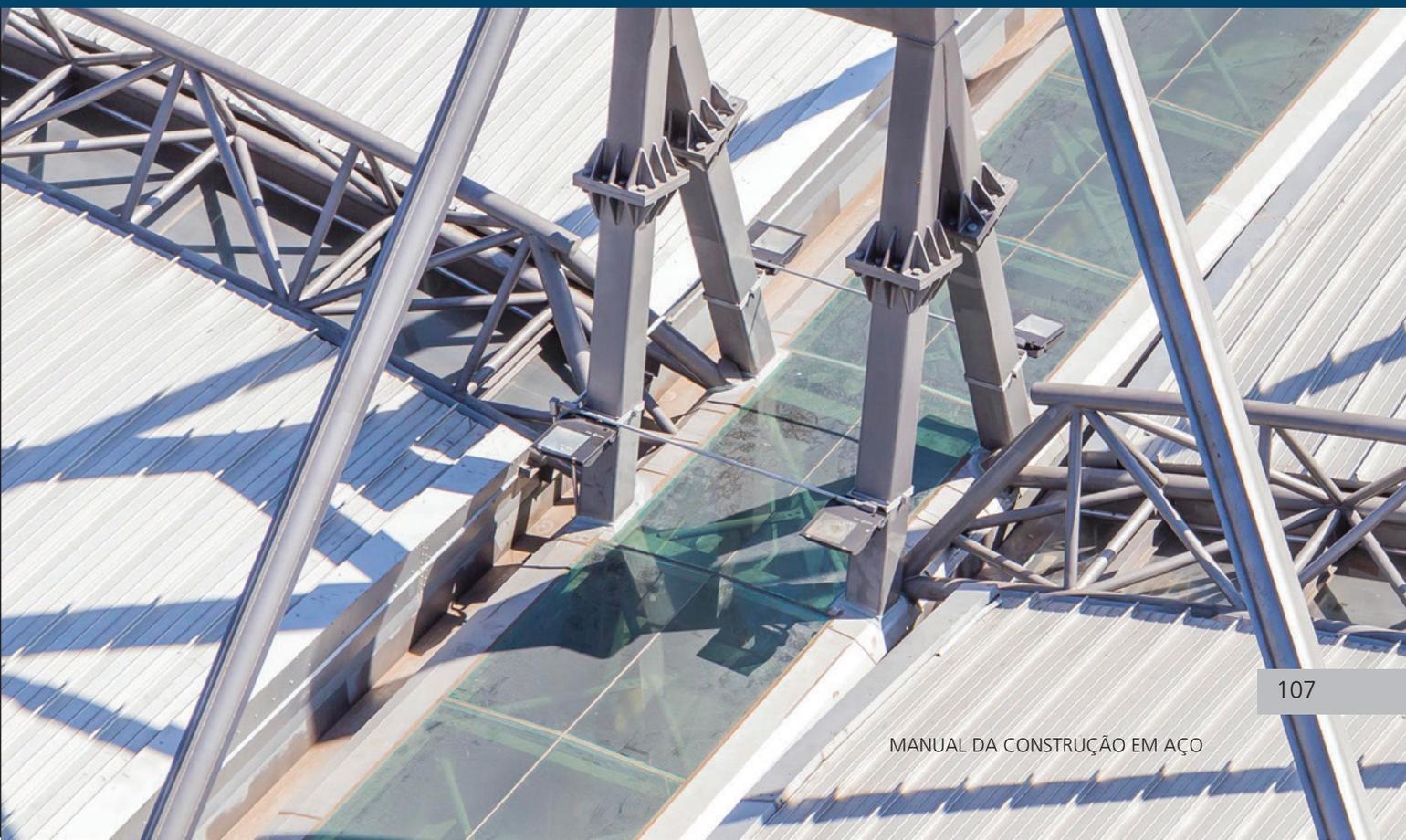
Figura 72: Disposições adequadas e inadequadas à galvanização a quente (e também à pintura).





CAPÍTULO 7

Recomendações finais



A durabilidade de uma estrutura está, como visto, intimamente ligada à escolha (e aplicação) adequada de um sistema de proteção (pintura, galvanização, proteção catódica, etc.), sua correta aplicação e também do detalhamento de projeto.

É função do projetista reconhecer o nível de agressividade do ambiente particular onde a estrutura será exposta, sem o qual ele não poderá especificar a proteção adequada. Também fica a cargo do projetista tratar adequadamente o detalhamento do projeto, de modo a propiciar acessibilidade à estrutura (necessária para a inspeção e manutenção futuras). Assim, condições que impeçam a estagnação de líquidos e a deposição de sujeira, assim como o contato elétrico entre ligas metálicas muito dissimilares, também são de sua responsabilidade.

Quais são os principais pontos a serem considerados quando se pensa em durabilidade? Por onde começar?

- Avalie a agressividade do ambiente onde a estrutura será exposta. Este é o ponto fundamental. Não existe uma solução única que atenda todas as situações práticas. Considere, para a grande extensão rural brasileira, agressividades qualificadas como C2 ou, eventualmente, C3. Todas as grandes cidades podem ser consideradas como C3. Áreas levemente industrializadas ou áreas costeiras onde a deposição de sais marinhos é pequena (incluindo as cidades) podem ser consideradas como sendo C4. Áreas altamente industrializadas serão qualificadas com C5-I; as marinhas, com alta deposição de cloretos serão C5-M. Na dúvida, utilize um nível de agressividade superior, para a avaliação do ambiente. Por exemplo, uma edificação será construída em um bairro fabril da cidade de São Paulo. Como proceder? A cidade de São Paulo, como exposto acima, pode ser considerada como sendo de média agressividade com respeito à corrosão (isto é, C3). Entretanto, devido à proximidade de fábricas, podemos aceitar a existência de uma “microrregião” da cidade onde a agressividade pode ser aceita como C4, isto é, de alta agressividade. Assim, não se prenda à Tabela 4 e use o bom senso.
- Se a pintura for o modo de proteção escolhido, não deixe de observar os preceitos contidos em normas internacionais. Os sistemas propostos na Tabela 6 (contidos na ISO 12944-5) são reconhecidos mundialmente e funcionarão muito bem na maior parte das situações práticas. Não troque o certo pelo incerto.
- Utilize, sempre, tintas produzidas por fabricantes idôneos. Isto é parte importante para o atendimento da durabilidade estimada de um sistema. Mais importante ainda do que a tinta em si é o preparo prévio (isto é, a limpeza) dos componentes. O último fator determinante da durabilidade da pintura está ligado à aplicação do sistema. As informações contidas nos data sheets dos produtos devem ser escrupulosamente atendidas, sob risco do não atendimento da durabilidade estimada.

- Não menospreze o assunto acessibilidade. A impossibilidade de inspeção e manutenção dos componentes resultará em grande aumento dos custos de manutenção futura, pois exigirá troca de componentes, cuja substituição pode não ser simples.
- Os sistemas de pintura são normalmente especificados para condições de exposição atmosféricas, isto é, não são especificados para condições de imersão permanente. Para tanto, existem sistemas específicos (Tabela 4). Evite a todo custo, na etapa de projeto (isto é, no detalhamento), situações em que a água possa ficar em contato com a estrutura (pintada) por mais tempo do que o necessário. Isto significa trabalhar fortemente na incorporação, na etapa de projeto, de drenos, aberturas nos enrijecedores por onde a ventilação auxiliará na secagem do componente, etc.
- Arredonde, sempre que possível, os cantos-vivos. Um canto vivo apresentará, obrigatoriamente, uma espessura menor de tinta, quando comparado àquela depositada sobre uma superfície plana. Isto é causado pelo fenômeno da tensão superficial, e, sobre o fenômeno em si, como usuários, pouco podemos atuar. Entretanto, se arredondarmos as arestas, a espessura da camada de tinta crescerá, todo o conjunto se tornará mais resistente a choques mecânicos, e a manutenção será, certamente, alongada. Por onde se dá o início de falha de todo sistema de pintura? Nos cantos-vivos - levando à exposição do aço e da ferrugem. Arredonde os cantos-vivos e a primeira manutenção do sistema de pintura ocorrerá em um tempo cerca de 30% maior do que aquele apresentado no caso em que as quinas não foram arredondadas.
- A solda em campo deve, sempre que possível, ser evitada. Entretanto, ela quase sempre ocorre. Limpe, neste caso, de forma escrupulosa o cordão, para a retirada da escória e também para a uniformização da superfície. A escória promove a corrosão. Picos e vales, existentes nas irregularidades, farão com que haja pouca tinta recobrando os picos, e muita recobrando os vales. Ocorre que, devido ao pequeno recobrimento dos picos, o sistema especificado pode falhar prematuramente. Nivele a superfície com ferramental mecânico motorizado, mas não faça o polimento da superfície, sob pena da perda de adesão da tinta. As tintas necessitam de certo perfil de rugosidade para o perfeito ancoramento. Esta informação pode ser obtida nos respectivos data sheets.
- Frestas devem ser evitadas a todo custo. A água que por lá entra não secará com rapidez, causando problemas que não podem ser facilmente detectados ou reparados. Feche a fenda com um cordão de solda contínuo (filete) ou utilize um selante poliuretânico, epoxídico ou outro que se preste a esta finalidade. Não utilize selantes que liberam compostos agressivos ao aço, como certos tipos de silicone que liberam ácido acético durante a polimerização.
- Não utilize, desnecessariamente, ligas dissimilares em uma estrutura. A corrosão galvânica necessita da existência de duas ou mais ligas eletroquimicamente distintas, unidas

eletricamente (parafusadas, soldadas, rebitadas, etc.), imersas em um mesmo eletrólito (aquoso ou não). Se uma destas condições não for atendida, o processo não ocorrerá. Assim, aços patináveis, por exemplo, não devem estar, em ambientes agressivos, ligados aos aços estruturais comuns. Isto vale para situações em que a estrutura esteja pintada ou não; não se esqueça que o sistema de pintura sempre apresenta defeitos, e também que sofrerá degeneração ao longo do tempo, fazendo com que o processo de corrosão galvânica se torne evidente. Corrosão galvânica não é algo a ser considerado em ambientes cuja agressividade seja classificada como C1 ou C2, ou em ambientes internos às edificações – normalmente secos.

- A utilização de sobre espessura metálica é um modo simples de proteção. A ferrugem impressiona pelo volume. Não se esqueça que um pequeno volume de aço se transforma, normalmente em um volume muito maior de ferrugem (p.ex., 60x maior), levando à crença de que os coeficientes de segurança utilizados no cálculo foram ultrapassados. Este é um engano muito comum.
- Finalmente, deve ser mencionado que existem inúmeros detalhes não cobertos por esta publicação. Use o bom senso no sentido de encontrar uma solução adequada. Se necessário, procure um especialista. O Centro Brasileiro de Construção em Aço – CBCA pode ajudá-lo nesta tarefa, assim, visite o *website*.

Anexo

Anexo A – Série galvânica em água do mar⁴¹

Anódico (menos nobre)
Magnésio
Ligas de magnésio
Zinco
Alumínio 5052H
Alumínio 3004
Alumínio 3003
Alumínio 1100
Alumínio 6053T
Cádmio
Alumínio 2017T
Alumínio 2024T
Aços carbono
Ferro pudlado
Ferro fundido
Aços patináveis
Aços inoxidáveis com 13% de Cr, tipo 410 (ativo)
Solda chumbo-estanho 50-50
Aços inoxidáveis 18-8, tipo 304 (ativo)
Aços inoxidáveis 18-8, com 3% de Mo, tipo 316 (ativo)
Chumbo
Estanho
Metal de Muntz
Bronze manganês
Bronze naval
Níquel (ativo)
76%Ni – 16%Cr – 7%Fe (Inconel 600) (ativo)
Latão amarelo
Bronze alumínio
Latão vermelho
Cobre
Bronze silício
70%Cu – 30%Ni
Níquel (passivo)
76%Ni – 16%Cr – 7%Fe (Inconel 600) (passivo)
70%Ni – 30%Cu (Monel)
Titânio
Aços inoxidáveis 18-8, tipo 304 (passivo)
Aços inoxidáveis 18-8, com 3% de Mo, tipo 316 (passivo)
Catódico (mais nobre)

Referências Bibliográficas

- (01): K. Barton, Protection Against Atmospheric Corrosion, Wiley, London, 1973.
- (02): T. P. Hoar, Report of the Committee on Corrosion and Protection, London, Dept. of Trade and Industry, H.M. Stationary Office, 1971.
- (03): J. H. Payer, W. K. Boyd, D. G. Dippold e W. H. Fisher, Materials Performance (NACE), May 1980.
- (04): H. K. Gerhardus, M. P. H. Brongers, N. G. Thompson, Y. P. Virmani e J. H. Payer, Corrosion Costs and Preventive Strategies in the United States, Suplemento do Materials Performance, July 2002. Report no. FHWA-RD-01-156, Federal Highway Administration, McLean, VA, 2002.
- (05): NBR 8800, Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2008.
- (06): NBR 15571-1, Edifícios habitacionais – Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2013.
- (07): V. Kucera e E. Mattson, Atmospheric Corrosion. In: F. Mansfeld, (ed.), Corrosion Mechanisms, New York, Marcel Dekker, 1987.
- (08): F. D. Pannoni. Parafusos estruturais de aço patinável na construção em aço, ABECE Informa, ano 17, no. 98, jul/ago 2013, PP. 12-18.
- (09): L. L. Shreir, Corrosion, vol.1, London, Newnes-Butterworths, 2nd. Ed., 1978.
- (10): U. R. Evans, The Corrosion and Oxidation of Metals, London, Arnold, 1960.
- (11): I. L. Rozenfeld, Atmospheric Corrosion of Metals, National Association of Corrosion Engineers, Houston, 1972.
- (12): H. Kaesche, Die Korrosion der Metalle, Springer Verlag, Berlin, 1966.
- (13): T. E. Graedel, D. T. Hawkins e L. D. Claxton, Atmospheric Chemical Compounds, Sources, Occurrence and Bioassay, Academic Press, Orlando, FL, 1986.
- (14): K. Barton, Z. Bartonova e E. Beranek, Werks. Korros., 25: 659 (1974).
- (15): S. K. Chawla e J. H. Payer, Proceedings 11th International Corrosion Congress, Florença, Itália, 1990, p. 2.17.
- (16): T. E. Graedel, Corros. Sci., 27:721 (1987).

- (17): T. E. Graedel, J. Electrochem. Soc., 139: 1963 (1992).
- (18): K. Barton e Z. Bartonova, Werks. Korros., 20: 216 (1969).
- (19): N. D. Tomashov, Theory of Corrosion and Protection of Metals, MacMillan, New York, 1966.
- (20): L. R. Robbin, Kinetic studies of sulfite oxidation in aqueous solution, SO₂, NO and NO₂ Oxidation Mechanisms, Atmospheric Considerations (J. G. Calvert, ed.), Butterworth, Woburn, MA, 1984, p.63.
- (21): ISO/DP 9223, Corrosion of metals and alloys – Classification of Corrosivity Categories of Atmospheres, International Organization for Standardization, Genève, 1998.
- (22): V. Kucera, Ambio, 5:243 (1976).
- (23): Qualidade do Ar no Estado de São Paulo. Relatório da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB. Governo do Estado de São Paulo, Secretaria do Meio Ambiente. Disponível no sítio <http://www.cetesb.sp.gov.br/Ar/publicacoes.asp>.
- (24): ISO 8501-1, Preparation of steel substrates before application of paints and related products - Visual assessment of surface cleanliness - Part 1: Rust grades and preparation grades of uncoated steel substrates and of steel substrates after overall removal of previous coatings , International Organization for Standardization, Genève, 1988.
- (25): ISO 12944-2, Paints and varnishes - Corrosion protection of steel structures by protective paint systems: Part 2 - Classification of environments, International Organization for Standardization, Genève, 1998.
- (26): ISO 9226, Corrosion of metals and alloys - Corrosivity of atmospheres - Determination of corrosion rate of standard specimens for the evaluation of Corrosivity, International Organization for Standardization, Genève, 1992.
- (27): C. E. P. Brooks, Climate in Everyday Life, Dent, London, 1950.
- (28): M. Morcillo et al., ed., Corrosion Y Proteccion de Metales en las Atmosferas de Iberoamerica, Parte I – Mapas da Iberoamerica de Corrosividade Atmosferica, Salué, Madri, 1998.
- (29): ISO 12944-5, Paints and varnishes – Corrosion protection of steel structures by protective paint systems: Part 5 - Protective paint systems, International Organization for Standardization, Genève, 1998.

(30): C. Gnecco, R. Mariano e F. Fernandes, Tratamento de Superfície e Pintura, Série “Manual de Construção em Aço”, do Centro Brasileiro da Construção em Aço – CBCA, Rio de Janeiro, 2003. Disponível no sítio:

http://www.cbca-ibs.org.br/nsite/site/acervo_item_listar_manuais_construcao.asp

(31): F. D. Pannoni, Princípios da galvanização a fogo. Disponível no sítio:

<http://www.cbca-iabr.org.br/upfiles/fckeditor/file/Principios-da-galvanizacao-a-fogo.pdf>

(32): Guia de galvanização por imersão a quente. Publicação do Instituto de Metais não Ferrosos (ICZ). Disponível no sítio:

<http://www.icz.org.br/biblioteca-digital-publicacoes.php>

(33): ABNT NBR 6323, Galvanização de produtos de aço ou ferro fundido, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 1999.

(34): ISO 12944-3, Paints and varnishes – Corrosion protection of steel structures by protective paint systems: Part 3 – Design considerations, International Organization for Standardization, Genève, 1998.

(35): V. R. Pludek, Design and Corrosion Control, Wiley, New York, 1977.

(36): P. Elliott, Design Details to Minimize Corrosion. In: Davies, J.R. (ed.), ASM Handbook, Vol. 13 – Corrosion, Materials Park, ASM International, 1987.

(37): R. N. Parkins e R. A. Chandler, Corrosion Control in Engineering Design, Dept. of Industry, H. M. Stationery Office, 1978.

(38): L. D. Perrigo e G. A. Jensen, North. Eng., 13:16 (1982).

(39): E. Bardal, Corrosion and Protection, Springer-Verlag, London, 2004.

(40): ISO 1461, Hot dip galvanized coatings on fabricated iron and steel articles - Specifications and test methods, International Organization for Standardization, Genève, 1999.

(41): ISO 14713, Protection against corrosion of iron and steel in structures - Zinc and aluminium coatings - Guidelines, International Organization for Standardization, Genève, 1999.

(42): H. H. Uhlig e R. W. Revie, Corrosion and Corrosion Control – An Introduction to Corrosion Science and Engineering, 3rd. ed., Wiley, New York, 1985.