

**PRINCÍPIOS DA PROTEÇÃO
DE ESTRUTURAS METÁLICAS
EM SITUAÇÃO DE
CORROSÃO E INCÊNDIO**

PRINCÍPIOS DA PROTEÇÃO DE ESTRUTURAS METÁLICAS EM SITUAÇÃO DE CORROSÃO E INCÊNDIO



**6ª Edição
2015**

Fábio Domingos Pannoni, Ph.D.

Colaboração:

Ronaldo do Carmo Soares

NO DIA A DIA

O aço lava, passa, cozinha e congela.

É o aço dos fogões, dos aquecedores, dos refrigeradores, das máquinas de lavar, dos talheres e dos utensílios domésticos.

O aço também transporta, faz compras, trata da saúde, constrói.

O aço emprega milhares de brasileiros, traz milhões de dólares em divisas.

O aço brasileiro impulsiona o desenvolvimento, fortalece a independência econômica e melhora a qualidade de vida.

NA CONSTRUÇÃO CIVIL

O aço dá qualidade à construção.

É essencial às moradias, às indústrias, à montagem da infraestrutura nacional.

Está presente em pontes, viadutos, elevadores, em tubulações, revestimentos, acabamentos e em coberturas.

NO TRANSPORTE

O aço está nos carros, nos caminhões, nos ônibus, nos trens, nos metrô, nos navios, nas bicicletas e nas motocicletas. São muitos os meios de transporte produzidos com o aço brasileiro.

O aço contribui para a distribuição de riquezas, a disseminação do progresso, a exportação de produtos e a importação de divisas.

O aço está presente também nos veículos de turismo e de lazer.

O AÇO POR VEZES INVISÍVEL

Mais que o aço que você vê, o seu dia a dia é repleto de um aço que você não vê.

É o aço brasileiro presente nas indústrias que fabricam todos os produtos que não recebem nem um grama de aço. É o aço das máquinas e das ferramentas industriais que manufaturam tecido, madeira, plástico, louça, papel, brinquedos, couro, borracha e todos os outros materiais.

É o aço das usinas hidrelétricas, termelétricas e nucleares. O aço das torres de transmissão, dos transformadores, das subestações e dos cabos elétricos. É o aço das plataformas, das tubulações e dos equipamentos de prospecção e extração de petróleo, dos oleodutos, dos gasodutos, dos petroleiros, dos reservatórios, dos barris e dos botijões.

O aço é o produto mais reciclado do mundo: 40% da produção mundial é feita a partir da sucata ferrosa.

1. PROTEÇÃO CONTRA A CORROSÃO	9
1.1 - Introdução	11
1.2 - Diagramas potencial-pH (ou Diagramas de Pourbaix).	12
1.3 - O mecanismo eletroquímico	15
1.4 - Principais formas de corrosão	20
1.5 - Corrosão uniforme (e corrosão atmosférica)	21
1.5.1 - Condições necessárias à ocorrência da corrosão atmosférica	22
Tempo de umedecimento	23
Composição do eletrólito	24
1.5.2 - Qualificação da agressividade de uma atmosfera segundo a ISO 12944-2	26
1.5.3 - O mecanismo básico da corrosão atmosférica dos aços-carbono	28
1.5.4 - O desempenho de aços-carbono em diferentes atmosferas	31
1.5.5 - Corrosão como função de parâmetros ambientais	32
1.5.6 - Aços resistentes à corrosão atmosférica (aços patináveis ou, ainda, aços acimáveis)	33
Desempenho dos aços patináveis.	35
Do que depende a formação da pátina?	36
A proteção dos aços patináveis – pintura e galvanização por imersão a quente	37
1.5.7 - Prevenção da corrosão atmosférica através do detalhamento do projeto.	39
Acessibilidade	39
Tratamento de frestas	42
Precauções para prevenir a retenção de água e sujeira	43
Arestas.	43
Imperfeições de soldagem	44
Seções tubulares	44
Furos.	45
Prevenção da corrosão galvânica	46
1.5.8 - Proteção do aço estrutural	47
1.5.8.1 - Pintura como forma de proteção.	47
1.5.8.2 - Revestimentos metálicos: a galvanização por imersão a quente	55
Rugosidade superficial do componente	58
Galvanização de aços reativos.	58
Como o zinco protege o aço.	60
1.5.9 - A especificação de um sistema de proteção	62

1.6 - A corrosão galvânica	63
Corrosão por frestas	65
1.7 - A corrosão de estacas metálicas cravadas no solo	66
2. ESTRUTURAS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO	69
2.1 - Introdução	71
Segurança e proteção	73
2.2 - Resistência dos componentes de aço ao fogo	73
2.3 - As Normas Brasileiras	74
2.4 - Métodos de dimensionamento	77
2.4.1 - O aço parcialmente protegido	77
2.4.2 - Aplicação de materiais tradicionais de proteção antitérmica.	78
2.4.3 - Perfis laminados I e H	79
2.4.4 - Materiais tradicionais de proteção antitérmica	81
2.4.5 - Combinação de métodos de proteção	88
2.4.6 - Os ensaios de Cardington	88
2.4.7 - Resistência ao fogo de vigas mistas	89
2.4.8 - Engenharia de segurança contra incêndio	90
3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS GERAIS	93
Referências Bibliográficas Gerais – Corrosão – Livros e Artigos Técnicos	95
Referências Bibliográficas Gerais – Corrosão – Normas	95
Referências Bibliográficas Gerais – Incêndio – Livros e Artigos Técnicos	96
Referências Bibliográficas Gerais – Incêndio – Normas	97

1

PROTEÇÃO CONTRA A CORROSÃO



1.1 - INTRODUÇÃO

Corrosão é um fenômeno natural, definida como a “deterioração de um material, usualmente um metal, resultante de reações químicas ou eletroquímicas com seu ambiente”¹.

O que leva à corrosão dos metais puros e suas ligas? É uma questão de energia. O potencial termodinâmico (ou *driving force*), origem da corrosão dos metais, é consequência natural de sua existência temporária nessa forma. Os metais são produzidos a partir dos minérios – p. ex., óxidos – existentes na natureza. Esses processos de produção consomem energia. É natural, portanto, que as ligas metálicas, quando expostas a seus ambientes, revertam ao seu estado natural, de menor energia. A Figura 1 ilustra esse conceito.

Figura 1: Corrosão é um fenômeno espontâneo, *que pode ser controlado*.



É muito importante ressaltar que a velocidade com que esse retorno ao estado de menor energia ocorre é de domínio dos arquitetos e dos projetistas. Podemos atingir a vida útil do projeto de uma edificação – *seja ela qual for* – utilizando de forma racional o conhecimento acumulado ao longo dos anos.

¹ NACE/ASTM G193 – 12d **Standard Terminology and Acronyms Relating to Corrosion**. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA, USA: 2012.

A corrosão afeta nossa sociedade de diferentes maneiras:

- **Econômicas:**

- Troca do equipamento corroído;
- Utilização de maiores coeficientes de segurança;
- Manutenção corretiva e preventiva (p.ex., através da pintura);
- Parada do equipamento;
- Contaminação de produto (que pode ocorrer, p.ex., na indústria alimentícia ou farmacêutica);
- Perda de eficiência (p.ex., em trocadores de calor);
- Gastos com energia elétrica e combustíveis, como consequência de perdas de água, vapor ou ar comprimido;
- Danos em equipamentos adjacentes;
- Maior capital de giro (pela manutenção de estoques e sobressalentes).

- **Sociais:**

- Exaustão dos recursos naturais. Foi calculado, na Inglaterra do início dos anos 70, que uma tonelada de aço seria convertida em ferrugem a cada 90 segundos. Além da perda metálica (que inclui os elementos de liga presentes no aço, *cujas reservas são limitadas*), a energia requerida para produzir uma tonelada de aço, a partir de minério, seria suficiente, naquela época, para fornecer energia para uma família inglesa por três meses;
- Problemas de saúde. A poluição causada pelo vazamento de produtos tóxicos, ou o próprio produto de corrosão, pode causar a contaminação da água, do solo e do ar, incêndios, explosões, etc.

Vários estudos têm mostrado que os custos diretos da corrosão correspondem a cerca de 3% do Produto Interno Bruto (PIB) de diferentes países. Parte desses estudos separa custos “evitáveis” de outros, “inevitáveis”. Enquanto a categoria dos “evitáveis” trata da simples e correta aplicação de tecnologias existentes, a categoria dos “inevitáveis” trata de perdas consideradas inevitáveis à luz da tecnologia conhecida na época da publicação desses estudos. Em outras palavras, necessitariam de investimento em pesquisa para que pudessem passar à categoria de “evitáveis”. Os custos “evitáveis” *apresentados nesses diversos estudos se situam entre 10% a 45% dos gastos totais apresentados.*

Um dos mais recentes desses estudos avaliou os custos da corrosão em 130 setores da economia norte-americana, e, mais uma vez, comprova que cerca de 3% do PIB tem sido gasto com a corrosão².

1.2 - Diagramas potencial-pH (ou Diagramas de Pourbaix)

Como visto, os metais puros (e as ligas metálicas, como o aço-carbono) possuem uma tendência natural à corrosão. Isso acontece com a reação entre o metal e seu ambiente, como a atmosfera, a água do mar, o solo, etc. Em conjunto com seu meio, os metais formam um sistema termodinamicamente *instável*, que possui a tendência de liberar energia pela sua

² KOCH, G.H.; BRONGERS, M.P.H.; THOMPSON, N.G.; VIRMANI, P.Y.; PAYER, J.H. Corrosion Costs and Preventive Strategies in the United States. Suplemento de **Materials Performance**, julho de 2002. Relatório no FHWARD-01-156. Federal Highway Administration. McLean, VA, 2002. Ver também: <www.corrosioncost.com>.

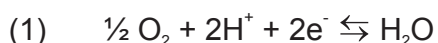
transformação em compostos químicos oriundos do metal, como um óxido hidratado. A tão conhecida ferrugem, produto da corrosão atmosférica do aço-carbono, é, basicamente, uma mistura de óxidos de ferro hidratados.

Uma grande contribuição ao comportamento dos metais imersos em água foi dada por Marcel Pourbaix³, ao desenvolver diagramas de equilíbrio termodinâmico que levam seu nome e que permitem prever em que condições um metal corrói ou não. Esses diagramas – conhecidos como “Diagramas de Pourbaix” – são representações gráficas de um grande número de informações termodinâmicas relativas a um dado sistema em particular – p.ex., o sistema Fe-H₂O. A apresentação da informação nesse formato facilita sua aplicação a problemas práticos em uma grande variedade de situações, como corrosão, eletrodeposição, processos geológicos e até processos hidrometalúrgicos.

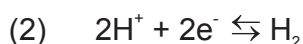
O diagrama potencial-pH apresenta regiões de estabilidade de fases sólidas e também de íons solúveis, produzidos pela reação entre um metal e seu ambiente aquoso, como função de dois parâmetros: o potencial de corrosão (E) e o pH do ambiente – *duas variáveis que podem ser facilmente obtidas experimentalmente*. Existem três regiões (chamadas domínios) distintas em um diagrama potencial-pH:

- Domínio da *imunidade*, onde o metal é o espécime estável e é imune à corrosão;
- Domínio da *corrosão*, onde os espécimes estáveis são íons solúveis, o que leva à corrosão metálica (desde que a cinética seja favorecida);
- Domínio da *passividade*, onde os espécimes estáveis são sólidos insolúveis que podem proteger o metal através da formação de uma camada contínua e aderente que o recobre.

Duas linhas tracejadas, inclinadas, estão frequentemente presentes nos diagramas *potencial-pH*. Elas delimitam o domínio de estabilidade da água. A linha tracejada superior do diagrama representa a decomposição da água, com liberação de oxigênio, segundo a reação (1):



A linha tracejada inferior representa a decomposição da água, liberando hidrogênio (2):

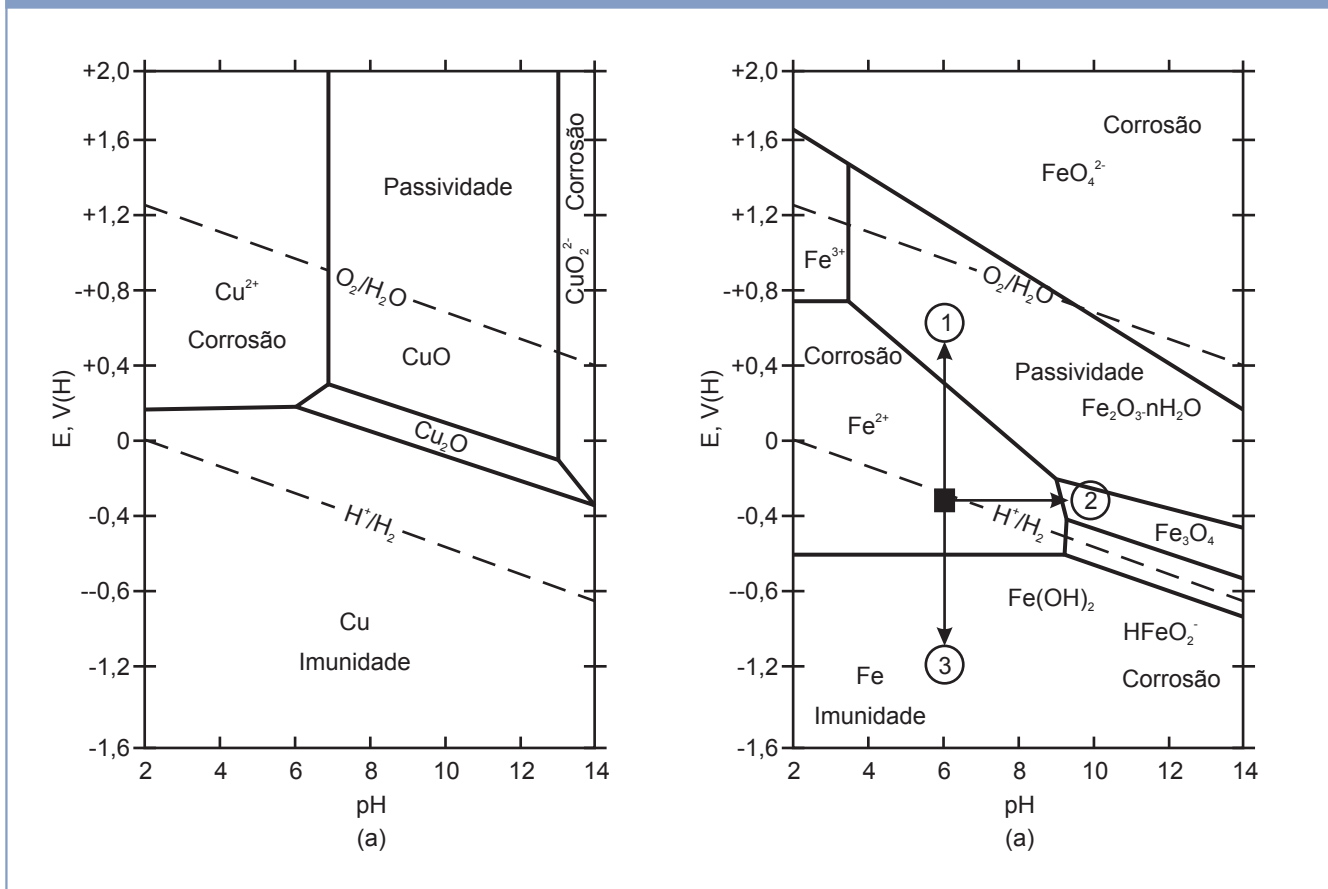


A região compreendida entre as duas linhas determina a região de estabilidade da água. Acima da linha superior, a água que se decompõe gera oxigênio; abaixo da linha inferior, a água que se decompõe gera hidrogênio.

A Figura 2 mostra diagramas simplificados para os sistemas Cu-H₂O e Fe-H₂O a 25°C (298K).

³ POURBAIX, M. **Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions**. National Association of Corrosion Engineers (NACE). Houston, TX, 1974.

Figura 2: Diagramas potencial-pH, a 25°C, para os sistemas Cu-H₂O (a) e Fe-H₂O (b).



Pode-se observar que, no diagrama potencial-pH do sistema Cu-H₂O, para os ambientes naturais (isto é, a região compreendida dentro do limite de estabilidade da água), o cobre sofre corrosão em soluções cujo pH é menor do que aproximadamente 7 e potencial E (versus o Eletrodo Padrão de Hidrogênio – EPH) pouco superior a 0 V. Em contrapartida, para outros valores de potencial e pH, o cobre não apresenta corrosão (região de imunidade) ou apresenta-se recoberto por uma camada de óxido (ou óxidos) que lhe confere proteção (corresponde à região de passividade). Em ambientes bastante alcalinos e potenciais superiores a -0,4 V (EPH), o cobre corrói, gerando o ânion CuO₂²⁻.

O diagrama potencial-pH para o sistema Fe-H₂O também apresenta regiões de imunidade, passividade e corrosão. Vamos a um exemplo prático de aplicação do diagrama. Imagine uma tubulação de aço-carbono preenchida com água industrial sob movimento. Através da medida do potencial de corrosão (feita com um voltímetro e um eletrodo de referência – como o de calomelano saturado) e do pH da água, podemos nos situar no diagrama, isto é, saber em qual domínio a tubulação se encontra⁴. Imagine que essas medidas nos levem à posição ilustrada pelo pequeno retângulo negro da Figura 2(b). A observação do diagrama nos leva à conclusão de que nossa tubulação está em processo de corrosão. Não podemos dizer com que velocidade ela corrói, mas sabemos que está correndo. O que pode ser feito? As setas indicam as soluções: 1 – Adicionar (e manter) na água industrial um inibidor de corrosão com características

⁴ Deve-se fazer a conversão de escalas entre o valor de potencial lido, utilizando-se o Eletrodo de Calomelano Saturado (ECS), para a do Eletrodo Padrão de Hidrogênio (EPH).

oxidantes, que eleve o potencial para a região de passivação; 2 – Elevar o pH da água, levando o aço à região de passivação; 3 – Baixar o potencial eletroquímico da tubulação (através da utilização de proteção catódica), levando a tubulação à região de imunidade.

Os diagramas *potencial-pH* possuem, entretanto, limitações⁵. Algumas delas são:

- Os diagramas pressupõem o equilíbrio entre o metal e seus íons e entre os íons em solução e os produtos de corrosão contendo esses íons. Nos casos práticos de corrosão, as condições reais podem estar bem distantes do equilíbrio;
- O termo passividade, aqui utilizado, é aplicado no campo da existência de óxidos, hidróxidos ou outra substância pouco solúvel, independentemente de suas características protetoras;
- O valor de pH, referido no diagrama, é o valor que prevalece na superfície do metal considerado. Esse valor, de fato, varia de ponto a ponto e é usualmente menor nas áreas anódicas (onde pode ocorrer a hidrólise dos íons metálicos liberados pela corrosão) e mais alto nas superfícies catódicas (através da geração das hidroxilas) do que o valor médio, medido na solução;
- Os diagramas *potencial-pH* não fornecem informações de taxas de corrosão, pois são baseados em dados termodinâmicos, e não em dados de origem cinética.

Se, entretanto, um diagrama *potencial-pH* teórico for complementado por resultados experimentais de passividade, obtém-se um novo diagrama *potencial-pH*, agora semiempírico, que apresenta grande importância prática no controle da corrosão.

1.3 - O mecanismo eletroquímico

Um estudo feito em diferentes unidades fabris da DuPont, entre os anos de 1968 e 1971, relata que, das 685 falhas observadas em diferentes equipamentos, 55% foram ocasionadas pela corrosão; as falhas mecânicas compreenderam 45% dos casos⁶. O estudo enquadra as falhas por corrosão em quatro grupos:

- Corrosão em meios aquosos (90%);
- Oxidação e corrosão quentes (8%);
- Corrosão em meios orgânicos (1,8%);
- Corrosão por metais líquidos (0,2%).

Entre parênteses está indicada, de forma estimada, a incidência de cada um dos tipos de corrosão. Nota-se que, de longe, a corrosão em meios aquosos é a mais comum. Isso é esperado, uma vez que a maioria dos fenômenos de corrosão ocorre no meio ambiente, onde a água é o principal solvente. A própria corrosão atmosférica, uma forma de corrosão generalizada de grande importância (e incidência), ocorre através da condensação da umidade na superfície do metal.

Há uma relativa concordância no meio técnico de que os dois primeiros grupos são caracterizados por processos essencialmente eletroquímicos. Já a natureza dos processos que ocorrem nos dois últimos grupos ainda não pôde ser precisada, uma vez que seus mecanismos ainda não foram devidamente estabelecidos.

⁵ POURBAIX, M. **Lectures on Electrochemical Corrosion**. Plenum, New York, 1973. Ver também: POURBAIX, M. **Lições de Corrosão Eletroquímica**, 3ª ed., p.89. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial (LNETI), 1989.

⁶ SEDRIKS, A. J. **Corrosion of Stainless Steels**. Wiley, p.7 (1979).

Uma reação é considerada eletroquímica se ela estiver associada à passagem de corrente elétrica através de uma distância finita, maior do que a distância interatômica⁷. Essa passagem de corrente envolve o movimento de partículas carregadas – íons, elétrons ou ambos. Dessa forma, na maioria das reações que se manifestam na presença de uma superfície metálica, ocorre a passagem de corrente através do metal, e a reação é eletroquímica em sua natureza fundamental. Outras reações (químicas, em estado sólido, etc.) costumam também participar do processo, o que torna a corrosão uma área de conhecimento complexa e interdisciplinar.

A distância que a corrente elétrica percorre numa reação de corrosão eletroquímica pode variar bastante, desde a dimensão da ordem de um tamanho de grão (micrômetros), como no caso da dissolução de um metal em uma solução ácida, até quilômetros de distância, como no caso da corrosão por correntes de fuga em tubulações enterradas nas vizinhanças de uma estrada de ferro eletrificada.

Na maioria das reações eletroquímicas, os íons se movimentam através de um eletrólito líquido, normalmente aquoso. No entanto, em reações de oxidação (p. ex.: a reação à temperatura elevada entre um metal e o oxigênio atmosférico) não se tem eletrólito líquido, e o movimento de íons ocorre através da película de óxido metálico que se forma na superfície do metal. Esse óxido funciona como um eletrólito sólido e garante a natureza eletroquímica da reação.

A natureza eletroquímica da corrosão em meio aquoso foi confirmada de forma inquestionável na década de 20, por Evans⁸. Uma de suas experiências clássicas, que ilustra de forma bem clara as reações eletroquímicas envolvidas no processo de corrosão do aço-carbono, é a conhecida “experiência da gota salina”. Nessa experiência, uma gota de solução de NaCl a 3% é vertida sobre uma superfície finamente lixada de aço-carbono. A solução também contém uma pequena quantidade do indicador ferricianeto de potássio, que se torna azul em presença de íons ferrosos (conhecido como “azul da Prússia”), e do indicador fenolftaleína, que se torna vermelho na presença de hidroxilas (OH⁻). Olhando a gota por cima, observa-se, no início, o aparecimento de pequenas áreas tanto de coloração azul quanto vermelha, distribuídas ao acaso sobre a superfície do aço (chamada, por Evans, de distribuição primária). A Figura 3(a) ilustra o fenômeno.

Passado certo tempo, no entanto, a distribuição dessas áreas altera-se, conforme mostrado na Figura 3(b). A área rosa se fixa na periferia da gota, a área azul, no centro, e, aparecendo entre as duas regiões, um precipitado de coloração marrom – a ferrugem. Isso foi chamado por Evans de distribuição secundária.

A Figura 4 ilustra, em corte, as reações que se desenvolvem dentro da gota.

⁷ Uma reação química, em contraposição, é aquela associada à passagem de corrente (elétrons) através de uma distância finita, da ordem das distâncias atômicas.

⁸ EVANS, U.R. **Metal Ind.**, 29, p.481. London, 1926.

Figura 3: Desenho representativo da observação visual da experiência da gota salina de Evans: (a) Vista superior, após os primeiros 5 minutos do experimento; (b) Vista superior, após cerca de 2h.

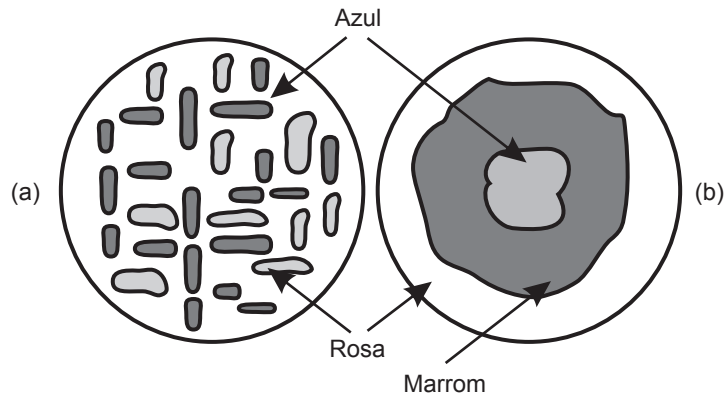
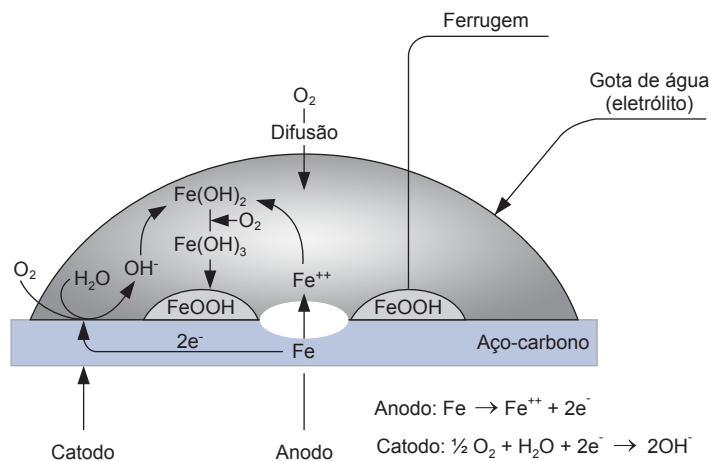
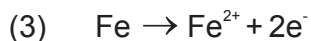


Figura 4: Reações que se desenvolvem durante a experiência de Evans.

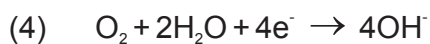


O aparecimento da área azul deve-se à formação de íons ferrosos, segundo a reação:



Trata-se de uma reação de oxidação, pois há liberação de elétrons. Ela também é chamada de reação anódica.

O aparecimento da área rosa, por sua vez, é devido à formação do íon hidroxila a partir do oxigênio dissolvido na solução, segundo a reação:



Essa é uma reação de redução, também chamada de reação catódica, uma vez que os elétrons são consumidos na reação. Essa reação é mais conhecida como reação de redução do oxigênio. Ela ocorre graças aos elétrons que são gerados pela reação anódica e que se deslocam através do metal, da região azul para a região rosa, isto é, da região anódica para a região catódica, conforme indicado na Figura 4.

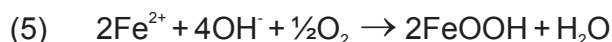
Assim, as duas reações acima ocorrem simultaneamente graças à passagem de elétrons, através do metal, da região em que ocorre a dissolução do metal (região anódica) para a região em que ocorre a redução do oxigênio (região catódica). Essas reações, de natureza eletroquímica, constituem-se em reações básicas do processo corrosivo, que têm lugar dentro da gota salina.

As reações acima, no entanto, não são as únicas e desencadeiam uma série de outros processos. A reação (4) consome o oxigênio dissolvido na gota. Esse fato é responsável pela passagem da distribuição primária para a secundária, pois, à medida que o oxigênio originalmente dissolvido na gota vai sendo consumido, mais oxigênio se dissolve na gota a partir da atmosfera. Com isso, ocorre um gradual deslocamento das áreas catódicas para a periferia da gota, pois é nessa região que o oxigênio fica mais facilmente disponível a partir da atmosfera. As áreas anódicas, por sua vez, concentram-se na região central da gota, onde o acesso do oxigênio é mais restrito (pois depende da difusão do O_2 na água). Cria-se, assim, uma situação de separação quase completa entre as áreas anódicas e catódicas. Esse conceito será revisitado quando tratarmos mais adiante da corrosão por frestas.

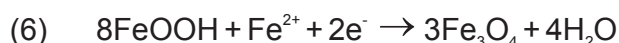
O consumo do oxigênio através da reação catódica é responsável pelo aparecimento dos seguintes processos, que podem desempenhar um importante papel no desenvolvimento do processo corrosivo:

- Dissolução do oxigênio na gota (passagem do oxigênio do ar para a solução através da interface eletrólito/atmosfera);
- Transporte do oxigênio através da solução, por difusão e convecção.

Outra consequência das duas reações eletroquímicas básicas é a precipitação do produto marrom. Trata-se de um produto final do processo corrosivo, mais conhecido como ferrugem. Ele possui uma composição química bastante complexa, porém, basicamente, é constituído de compostos na forma de $FeOOH^9$ e Fe_3O_4 . A formação do primeiro composto ocorre por uma reação química do tipo:



O segundo é formado a partir do primeiro, por uma reação eletroquímica (catódica):



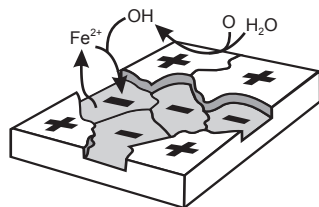
Conforme indicado pela equação (5), a ferrugem é resultante da reação entre o íon ferroso formado na área anódica e a hidroxila formada na área catódica, razão pela qual sua precipitação ocorre aproximadamente entre as duas áreas¹⁰, como consequência do encontro dos dois íons.

⁹ De fato, α -FeOOH (goethita) e γ -FeOOH (lepidocrocita).

¹⁰ Os "Números de Transporte" dessas espécies são distintos, razão pela qual a ferrugem não é depositada exatamente entre as regiões anódicas e catódicas.

Muitas dessas células ocorrem concomitantemente sobre a superfície do aço. Regiões anódicas e catódicas podem alterar posições¹¹, de modo que, macroscopicamente, o que se observa é um ataque uniformemente distribuído. A Figura 5 ilustra o fenômeno.

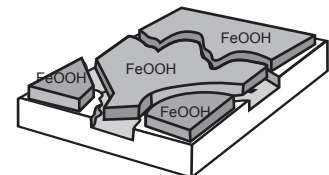
Figura 5: Alastramento da ferrugem sobre a superfície do aço.



Cátodos e anodos são distribuídos aleatoriamente por toda a superfície metálica e conectados eletricamente pelo substrato de aço. Íons ferrosos e hidroxilas são formados através de reações eletroquímicas e se difundem superficialmente. Quando se encontram, precipitam produtos que originarão ferrugens.



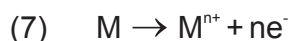
Conforme as áreas anódicas corroem, um novo material (a ferrugem) vai sendo exposto. Esse novo material causa alterações dos potenciais elétricos entre as áreas anódicas e catódicas, causando sua mudança de lugar. O que era anodo passa a ser catodo, e vice-versa.



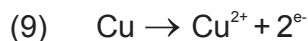
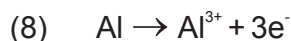
Com o tempo, toda a superfície acaba se corroendo de modo uniforme.

O que acontece em outras situações, como, por exemplo, com o aço-carbono enterrado no solo? Como se processa o ataque ao aço pintado? Como as reações descritas acima podem ser comparadas a outras condições?

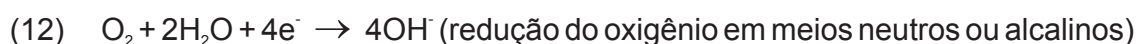
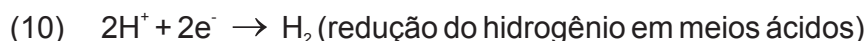
De modo geral, não existirão muitas diferenças. Em todos os casos em que as reações eletroquímicas predominam, a reação anódica consiste da oxidação do metal, passando a íon em solução:



Quando uma liga corrói, muitas reações anódicas acontecem simultaneamente. Por exemplo, as reações anódicas para uma liga alumínio-cobre poderiam ser:



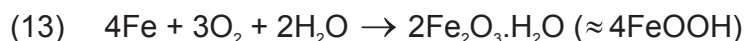
Com respeito às reações catódicas, existem várias possibilidades. Várias reações de redução podem ocorrer (inclusive simultaneamente), sendo as mais importantes:



¹¹ Anodos e catodos são distribuídos, a princípio, aleatoriamente por toda a superfície metálica e conectados eletricamente pelo substrato de aço. Íons ferrosos e hidroxilas formadas migram, gerando a ferrugem, que vai sendo exposta. Esse novo composto causa alterações dos potenciais elétricos entre as áreas anódicas e catódicas, causando sua mudança de local. Com o tempo, as áreas originalmente catódicas se tornam anódicas, e toda a superfície acaba corroendo de modo uniforme.

A redução do hidrogênio e a redução do oxigênio em meios neutros ou alcalinos são as reações catódicas mais comuns e importantes, observadas em uma grande variedade de situações práticas¹². É importante ressaltar que diferentes reações catódicas podem ocorrer simultaneamente sobre uma superfície metálica, sofrendo corrosão.

A reação global que descreve o processo de enferrujamento do aço-carbono ao ar é dada por:



O processo de corrosão atmosférica do aço-carbono consiste, como visto, de elétrons fluindo no metal e íons fluindo no eletrólito superficial.

A velocidade de corrosão é muito influenciada pela condutividade elétrica do eletrólito. É menor para meios pouco condutores, como a água muito pura, e maior para meios condutores, como, por exemplo, a água do mar ou soluções ácidas.

Vários são os fatores que determinam a criação e a distribuição de regiões anódicas e catódicas na superfície do metal. A existência de diferenças de composição química, microestrutura, concentração e velocidade de eletrólitos, tensões residuais, dentre outras tantas, determinam a formação de regiões catódicas e anódicas.

Um ponto fundamental deve ser ressaltado: para que a corrosão atmosférica do aço-carbono aconteça, é necessária a presença simultânea de água e oxigênio. Na ausência de um deles, a corrosão não ocorrerá.

1.4 - Principais formas de corrosão

A corrosão se apresenta de muitas formas distintas. Do mesmo modo, são várias as tentativas de classificação. As mais comuns são as seguintes:

- **Natureza do agente corrosivo.** A corrosão pode ser classificada como “úmida” ou “seca”. A água condensada ou umidade são necessárias para a corrosão “úmida”; a corrosão “seca” envolve, normalmente, reação com gases a alta temperatura;
- **Mecanismo de corrosão.** Envolve reações eletroquímicas, químicas, de estado sólido, etc.;
- **Aparência do metal corroído.** A corrosão pode ser uniforme (quando a superfície metálica toda corrói na mesma velocidade) ou localizada (quando somente pequenas regiões são afetadas).

A classificação pela aparência do metal corroído é a mais comumente utilizada. Ela é também a mais adequada para uma discussão preliminar e, portanto, será adotada neste texto. Para uma melhor compreensão, é conveniente fazer uma distinção entre a corrosão localizada macroscópica e o ataque localizado microscópico. Neste último, a quantidade de metal dissolvido é muito pequena, e um dano considerável pode ocorrer antes que o problema se torne visível a olho nu. Além disso, no ataque microscópico, a corrosão raramente se espalha além do ponto onde causa o enfraquecimento estrutural localizado. Essa é uma importante distinção quando se compara com as formas já macroscópicas, como a corrosão por pites, embora esse tipo de defeito possa ser iniciado em defeitos superficiais criados, p.ex., a partir de trabalho mecânico, evoluindo, assim, a partir da corrosão de um “bom” material. As Figuras 6 e 7 ilustram como a divisão é usualmente feita entre os processos corrosivos e a aparência do metal.

¹² Por exemplo, estacas metálicas cravadas em solos muito ácidos (pH < 4) apresentam, como principal reação catódica, a redução do hidrogênio. A reação catódica predominante na corrosão atmosférica dos metais, e também das estacas de aço cravadas na maior parte dos solos naturais, é a redução do oxigênio em meios neutros ou alcalinos.

Figura 6: As principais formas de corrosão: uniforme e localizada.

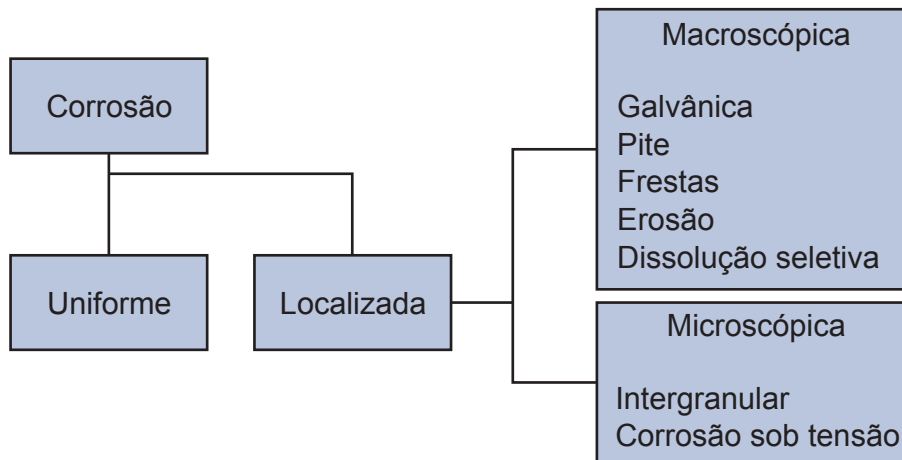
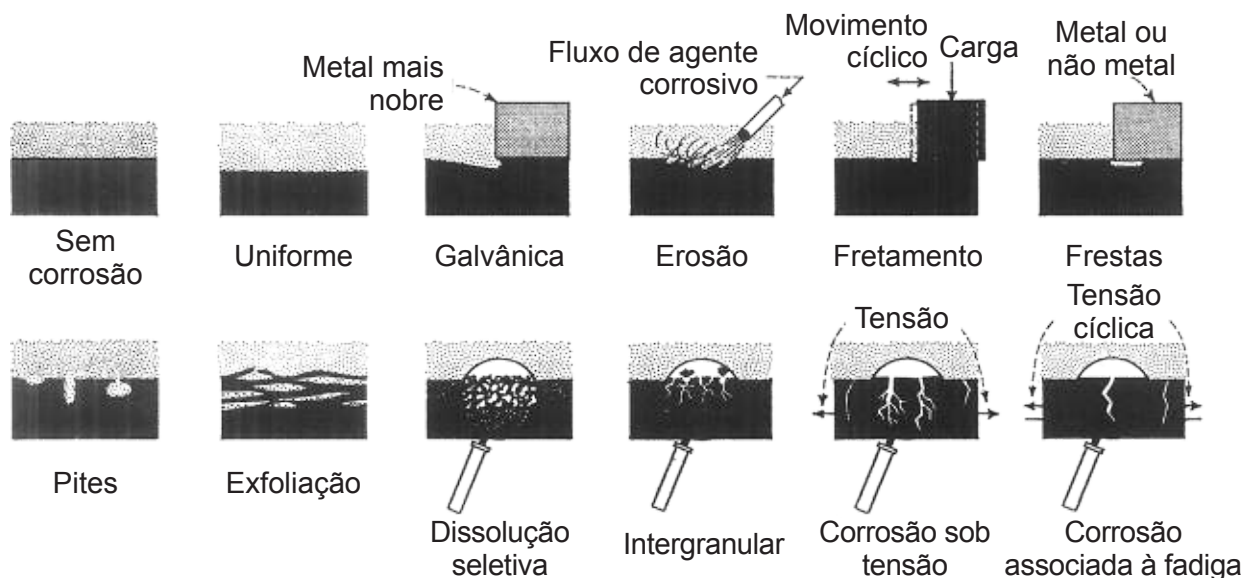


Figura 7: A corrosão metálica pode ocorrer em diferentes formas.



1.5 - Corrosão uniforme (e corrosão atmosférica)

A corrosão uniforme é a forma mais comum e a que traz mais custos à sociedade. Ela provoca perda de massa uniforme por toda a superfície metálica. Pode ser de natureza eletroquímica, ou, por vezes, puramente química, úmida ou seca. A escolha dos materiais e dos métodos de proteção – como pintura ou galvanização por imersão a quente – são comumente utilizadas para controlá-la. A corrosão uniforme é fácil de medir e acompanhar ao longo do tempo; o colapso do componente pode ser evitado através da simples inspeção regular. A Figura 8 ilustra um exemplo típico – a corrosão de uma embarcação de aço-carbono corroendo livremente na atmosfera marinha.

A corrosão atmosférica é a mais importante forma de corrosão uniforme. Ela é, também, a mais importante forma de corrosão metálica. A maior parte dos problemas causados pela corrosão está associada a essa forma de ataque. A razão está ligada ao uso extensivo dos metais em estruturas externas, como edificações em geral, pontes, automóveis, navios, plataformas marítimas, cercas, etc. Os principais fatores intervenientes na corrosão atmosférica serão tratados nos parágrafos seguintes.

Figura 8: A corrosão atmosférica é a mais comum e importante forma de corrosão.



1.5.1 - Condições necessárias à ocorrência da corrosão atmosférica

A corrosão atmosférica acontece em um sistema relativamente complexo, que consiste do metal, produtos de corrosão, eletrólitos superficiais¹³ e a atmosfera. Ela é um processo eletroquímico que ocorre nas chamadas celas de corrosão. As celas somente podem operar quando um eletrólito estiver presente na superfície metálica. A corrosão atmosférica pode ser considerada, assim, um processo descontínuo, descrito pela equação (14):

$$(14) \quad K = \sum_1^n \tau_n v_k(n)$$

onde: K = Efeito acumulado da corrosão;

τ_n = Tempo de umedecimento, definido como o período em que uma película de eletrólito está depositada sobre a superfície metálica;

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

¹³ Segundo a ASTM G193 – 12d, **Standard terminology and acronyms relating to corrosion**, eletrólito é uma “substância química que contém íons que podem migrar sob influência de um campo elétrico”. A água é um eletrólito típico.

O efeito total da corrosão, ao longo de certo período, é determinado pelo tempo total de umedecimento e pela composição do eletrólito, que, juntamente com a temperatura, determinam a taxa de corrosão do metal. Os parâmetros que afetam o tempo de umedecimento e a composição do eletrólito serão descritos a seguir.

Tempo de umedecimento

Não existe uma única definição para o “tempo de umedecimento”. Em inglês, ele é conhecido como “time of wetness”, ou “TOW”, e pode ser definido como sendo o tempo decorrido durante o qual a superfície metálica fica recoberta por uma película de água líquida, que torna a corrosão possível¹⁴. O tempo de umedecimento varia com as condições climáticas locais. Ele depende da umidade relativa da atmosfera, da duração e da frequência da chuva, da neblina e do orvalho, da temperatura do ar e da superfície metálica, assim como da velocidade dos ventos, da sua direção e das 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 metálica e em períodos quando a superfície está coberta por uma camada macroscópica de água, devido a chuva, neblina ou orvalho:

$$(15) \quad \tau_{\text{umedecimento}}^{\text{total}} = \tau_{\text{adsorvida}} + \tau_{\text{macroscópica}}$$

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 pelo 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 o sal começa a absorver água e se dissolve 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 de certa “umidade relativa crítica” – única para cada liga metálica – cresce drasticamente com o acréscimo da umidade relativa e da concentração dos agentes poluentes.

A formação de orvalho ocorre quando a temperatura da superfície metálica está abaixo do ponto de orvalho da atmosfera. Isso pode ocorrer em áreas externas, durante a noite, quando a temperatura da superfície pode descer pela 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.

¹⁴ A Norma ISO 9223: 2012, “Corrosion of metals and alloys – Corrosivity of atmospheres - Classification, determination and estimation”, define tempo de umedecimento como sendo o número de horas anuais durante as quais a umidade relativa (UR) é maior ou igual a 80% e a temperatura do ar (T) é, simultaneamente, maior que 0°C.

Um fator que contribui para a alta corrosividade do orvalho está ligado à grande quantidade de contaminantes atmosféricos nele presentes. Orvalhos muito ácidos, com pH inferior a 3, têm sido encontrados em atmosferas industriais muito poluídas.

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 SO₂ – um gás muito solúvel em água. Em oposição, a chuva lava os poluentes depositados durante a fase seca anterior, o que promove uma diminuição da velocidade do ataque. É fato relativamente comum observarmos, em corpos de prova expostos 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. A Tabela I traz uma estimativa da quantidade de água existente sobre as superfícies metálicas¹⁵.

Tabela I: Estimativa da quantidade de água depositada sobre diferentes superfícies metálicas¹⁵.

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

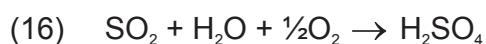
Composição do eletrólito

A película de eletrólito sobre a superfície conterá várias espécies depositadas a partir da atmosfera ou, então, originadas do metal sob corrosão. A composição do eletrólito é de importância fundamental no processo de corrosão metálica. Os parágrafos que se seguem tratarão da influência de diferentes substâncias no processo de corrosão atmosférica dos metais em geral.

O oxigênio (O₂) é fundamental à maior parte dos processos de corrosão, entretanto, apresenta pequena solubilidade em água¹⁶. Considera-se que a região externa de películas finas de água depositadas sobre os metais esteja saturada desse gás.

O dióxido de enxofre (SO₂) é originário da queima de combustíveis fósseis, como o óleo, o carvão, o óleo diesel e a gasolina. Assim, ele é produzido em regiões industrializadas e em grandes cidades, onde existem fábricas e muitos veículos automotores. Os vulcões em atividade também liberam grandes quantidades de enxofre (e seus compostos) na atmosfera. As emissões antropogênicas (isto é, aquelas geradas pelos seres humanos) e as emissões naturais (dos vulcões) são da mesma ordem de magnitude – cerca de 100 milhões de toneladas de enxofre por ano.

A maior parte do enxofre derivado da queima de combustíveis fósseis é emitida na forma de SO₂. O dióxido de enxofre é oxidado sobre partículas umedecidas (ou gotículas de água, como as existentes na neblina ou no orvalho, ou ainda sobre a fuligem) a ácido sulfúrico:



¹⁵ BARTON, K.; BARTONOVA, Z.; BERANEK, E. *Werks*. Korros, 25, p.659 (1974).

¹⁶ A solubilidade é de 0,028 ml/ml, a 25°C e 1 atm de O₂. (OLIVEIRA, L.S. E PANNONI, F.D. Medidas de potencial de corrosão de estacas metálicas de aço cravadas em Santos. *Anais 7º Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia* – SEFE 7, 17 a 20 de junho de 2012, São Paulo, SP.).

A vida média do SO₂ na atmosfera é pequena (de meio a 2 dias), o que corresponde à distância média de transporte de poucas centenas de quilômetros. Na prática, o grande efeito do SO₂ acontece próximo às suas fontes de emissão (cerca de um a três quilômetros). Esse gás é um poderoso estimulador da reação anódica (reação de oxidação), quando conjugado à umidade. Muitos estudos têm mostrado ótima correlação entre a corrosão atmosférica dos metais e a concentração do dióxido de enxofre no ar. Assim, grandes centros urbanos ou regiões industriais apresentam uma agressividade ambiental muito distinta daquela observada em ambientes rurais.

A deposição do SO₂ acontece como “deposição seca” (que envolve a adsorção do gás sobre superfícies metálicas) e “deposição úmida”, que envolve a remoção do gás por precipitação (lavagem pela chuva, p.ex.). A Tabela II traz taxas de deposição (total) do SO₂ em vários tipos de atmosfera.

Tabela II: Taxas de deposição (total) do SO₂ em diversas atmosferas¹⁸.

Tipo de atmosfera	Velocidade de deposição, $\mu\text{g SO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$
Rural	< 10
Urbana	10-100
Industrial	≤ 200

A Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de São Paulo (CETESB) fornece relatórios anuais nos quais o valor da deposição de SO₂ pode ser encontrado para diversas regiões – rurais, urbanas, industriais e marinhas – do Estado de São Paulo. Outros Estados brasileiros possuem autarquias 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, mantido pela CETESB¹⁹, prescreve valores máximos de deposição de 80 $\mu\text{g SO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ (de ar). Esses 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, foram inferiores a 20 $\mu\text{g SO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$. 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 $\mu\text{g SO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$.

Os cloretos (Cl⁻) são depositados principalmente nas atmosferas marinhas, como gotículas ou cristais formados a partir da evaporação da névoa salina levada pelo vento a partir do mar (ou da arrebenção costeira).

Em ambientes marinhos, a deposição de cloretos usualmente decresce com o acréscimo da distância da praia (isto é, da região de arrebenção costeira). As gotículas e os cristais são depositados por ação da gravidade, ou, então, filtrados pela vegetação, edificações, etc. As taxas de deposição de cloretos em ambientes marinhos se situam na faixa de 5 a 1.500 mg NaCl.m⁻².dia⁻¹. Em áreas urbanas e industriais, as taxas de deposição de cloretos são, de modo geral, inferiores a 10% daquelas apresentadas pelo SO₂.

¹⁷ KUCERA, V. *Ambio*, 5, p.243, 1976.

¹⁸ ISO/DP 9223: “Corrosion of metals and alloys – Classification of corrosivity: Category of atmospheres”, 1986.

¹⁹ Relatório da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB. Disponível em: <www.cetesb.sp.gov.br/AR/publicacoes.asp>.

Os cloretos promovem o aumento da taxa de corrosão dos aços-carbono de modo muito característico. Além de proporcionar um aumento da formação de eletrólitos (MgCl_2 é um sal muito higroscópico), o íon cloreto participa da ativação da corrosão de outra forma muito mais importante. Para o aço-carbono, os íons cloreto competem com as hidroxilas para se combinar com o íon Fe^{2+} , produzido pela 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 são solúveis em água, resultando, nesse caso, na falta de proteção do substrato. A ferrugem formada é bastante porosa, o que acarreta o aumento na taxa de corrosão do aço-carbono.

Outras espécies químicas também influenciam o processo de corrosão metálica, como os gases NO e NO_2 (conhecidos, em conjunto, como NO_x), CO_2 , H_2S , HCl , etc. Além dessas espécies, a temperatura também influencia de forma complexa os processos de corrosão metálica. Se, por um lado, o aumento da temperatura estimula o processo de corrosão (aumentando a velocidade das reações químicas e eletroquímicas, além dos processos de difusão), por outro lado, leva à rápida secagem da película depositada pelo orvalho ou chuva.

1.5.2 - Qualificação da agressividade de uma atmosfera segundo a ISO 12944-2²⁰

Segundo a norma ISO 12944-2, os ambientes atmosféricos podem ser classificados em cinco 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 III define as categorias de agressividade em termos de perda de massa (ou espessura) de espécimes padronizados, confeccionados em aço de baixo carbono, expostos à atmosfera e retirados após 365 dias de exposição.

Os detalhes da confecção dos corpos de prova, assim como o tratamento anterior e posterior à exposição, podem ser encontrados na norma ISO 9226²¹. 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 típicos²⁰, também descritos na Tabela III. Os exemplos listados são informativos e, ocasionalmente, podem não ser adequados a um dado ambiente em particular. Somente a medida de perda de massa ou espessura fornecerá a classificação correta.

²⁰ **ISO 12944-2:** Paints and varnishes – corrosion protection of steel structures by protective paint systems: Part 2 - classification of environments, Genève, 1998.

²¹ **ISO 9226:** Corrosion of metals and alloys – Corrosivity of atmospheres – Determination of corrosion rate of standard specimens for the evaluation of corrosivity. Genève, 1992.

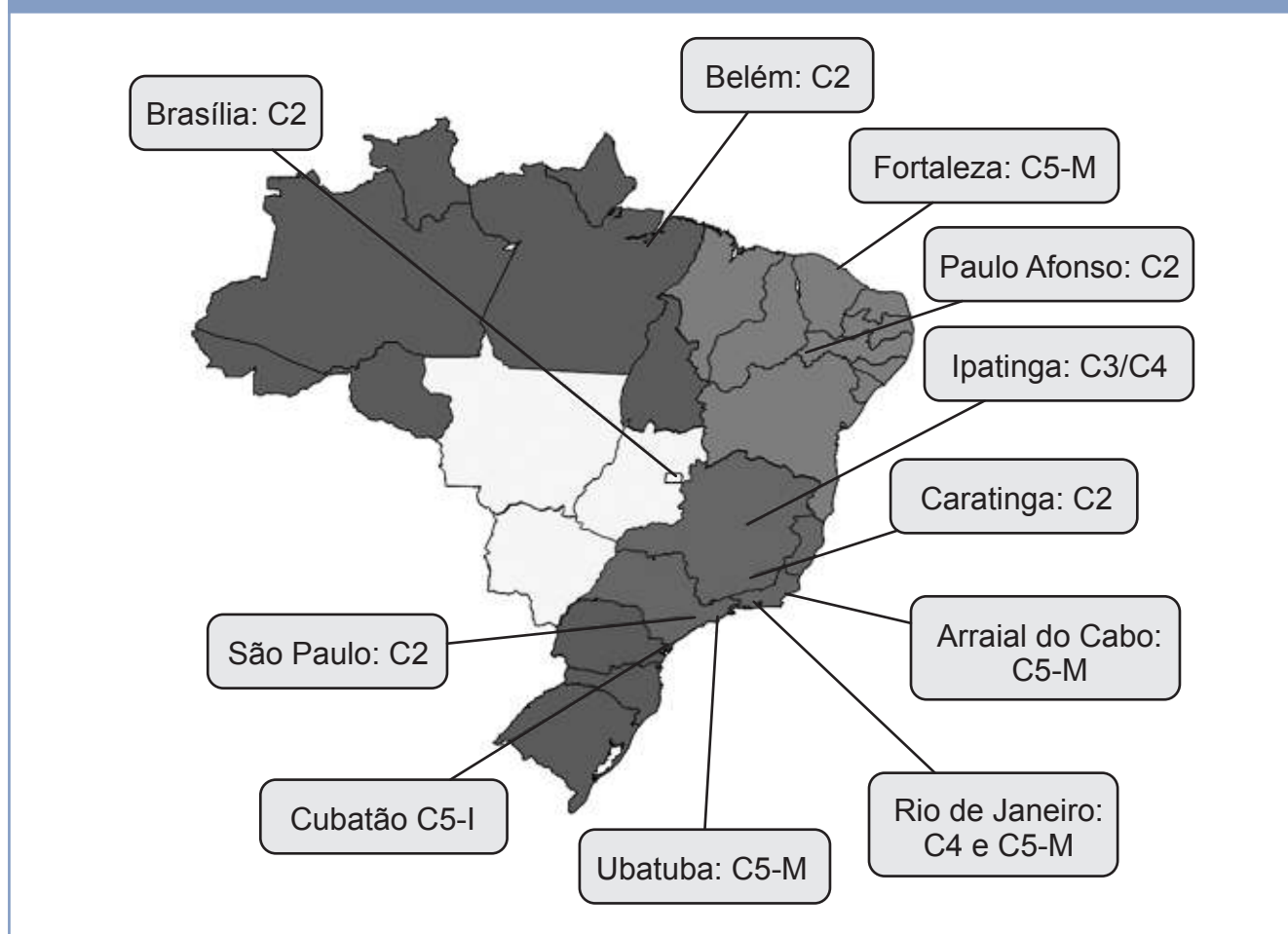
Tabela III: Corrosividade dos ambientes para o aço-carbono, segundo a ISO 12944-2²⁰.

Categoria de agressividade	Perda de massa e espessura para aço baixo carbono, após 365 dias de exposição		Exemplos de ambientes típicos (informativo)	
	Perda de massa (g/m ²)	Perda de espessura (μm)	Exterior	Interior
C1 (muito baixa)	≤ 10	≤ 1,3	—	Edificações condicionadas para o conforto humano (residências, escritórios, lojas, escolas, hotéis).
C2 (baixa)	> 10 a 200	> 1,3 a 25	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	Atmosferas urbanas e industriais com poluição moderada por SO ₂ . Áreas costeiras de baixa salinidade.	Ambientes industriais com alta umidade e alguma poluição atmosférica, como lavanderias, fábricas de alimentos, laticínios, cervejarias, etc.
C4 (alta)	> 400 a 650	> 50 a 80	Áreas industriais e costeiras de salinidade moderada.	Ambientes como indústrias químicas e coberturas de piscinas.
C5-I (muito alta, industrial)	> 650 a 1.500	> 80 a 200	Áreas industriais com alta umidade e atmosfera agressiva.	Edificações ou áreas com condensação quase que permanente e com alta poluição.
C5-M (muito alta, marinha)	> 650 a 1.500	> 80 a 200	Áreas costeiras com alta umidade e atmosfera agressiva.	

A metodologia proposta na norma ISO 9226 já foi aplicada para a qualificação de alguns ambientes brasileiros²². Os dados disponíveis estão apresentados na Figura 9.

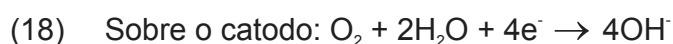
²² MORCILLO, M. et al. **Corrosion y protección de metales en las atmosferas de Iberoamerica**, Parte I – Mapa de Iberoamerica de Corrosividade Atmosférica. Madrid: Salué, 1998.

Figura 9: Mapa de agressividade atmosférica para o Brasil, à luz da norma ISO 9226²².

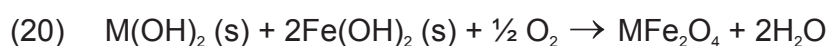
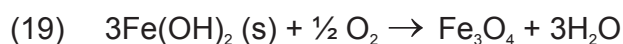


1.5.3 - O mecanismo básico da corrosão atmosférica dos aços-carbono

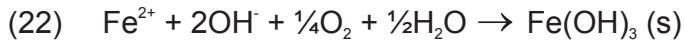
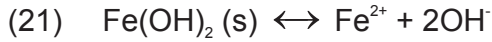
Na presença de água e oxigênio, o ferro metálico é termodinamicamente instável, como observado no diagrama potencial-pH (Figura 2). A corrosão, como já descrito, ocorre de acordo com o mecanismo eletroquímico:



O ferro é oxidado no anodo, gerando espécies Fe^{2+} solúveis. O oxigênio é reduzido no catodo, formando hidroxilas. Esses íons difundem e se combinam, depositando hidróxido ferroso sólido ($\text{Fe}(\text{OH})_2$ (s)) quando sua solubilidade é excedida. O pH do eletrólito é levado a valores próximos a 9, e uma espessa camada de gel de $\text{Fe}(\text{OH})_2$ (s) é formada. Uma parcela desse gel é oxidada a Fe_3O_4 (ou, então, FeO) e ferritas de metais de transição, de acordo com:



As ferritas são formadas porque os aços contêm metais de transição M (Ni, Cr, Cu, etc.) como elementos de liga. Com o decréscimo da velocidade de corrosão, ocorre oxidação ao ar dos íons Fe^{2+} dissolvidos a partir de Fe(OH)_2 (s), formando Fe(OH)_3 (s):



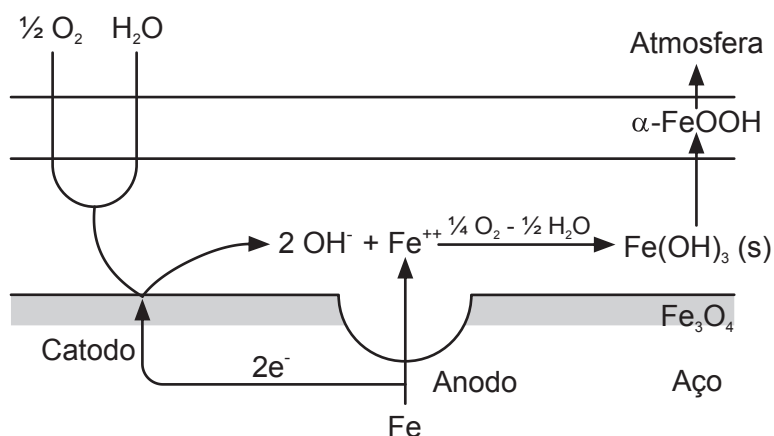
O hidróxido férrico (Fe(OH)_3 (s)) é um gel, e a água e o oxigênio podem facilmente penetrar e se transferir para dentro dessa fase gel. As reações anódicas e catódicas produzem Fe^{2+} e OH^- ; esses íons podem mover-se facilmente na fase gel e são, em seguida, oxidados a Fe(OH)_3 (s) pelo oxigênio dissolvido, mesmo sob os hidróxidos já formados. Como resultado, a corrosão ocorre através da fase gel. A camada de hidróxido continua a crescer, mas não é estável, pois as partículas de hidróxido não são fortemente agregadas. Algumas vezes essas camadas de hidróxido são lavadas pela exposição às intempéries, como observado pelas manchas amarelas formadas sobre as estruturas de aço recentemente construídas e não protegidas.

Com o tempo, ocorre desidratação e cristalização do gel Fe(OH)_3 , e a camada externa de produtos de corrosão (isto é, aquela formada anteriormente) se transforma em uma película de ferrugem aderente e pouco solúvel de goethita ($\alpha\text{-FeOOH}$). Nos casos em que a corrosão acontece através dos defeitos da película, o gel Fe(OH)_3 (s) é formado rapidamente, e preenche as microfissuras da película. Como resultante, uma película de ferrugem densa e aderente, com propriedades autorreparadoras, é formada, servindo como uma barreira à difusão de água e oxigênio.

A camada interna da película formada, adjacente à superfície do aço, é a ferrugem composta por magnetita e ferrita de metais de transição que se desenvolve no início da corrosão. A próxima camada é de gel de Fe(OH)_3 (s), e a camada mais externa é de $\alpha\text{-FeOOH}$, transformada a partir do gel de Fe(OH)_3 (s). Com o passar do tempo, a taxa de corrosão decresce devido ao acréscimo da espessura de $\alpha\text{-FeOOH}$ – que é resistente à transferência de massa –, e a velocidade de formação do Fe(OH)_3 (s) diminui. Entretanto, o envelhecimento do Fe(OH)_3 (s) a $\alpha\text{-FeOOH}$ continua, até que toda a camada seja constituída por $\alpha\text{-FeOOH}$.

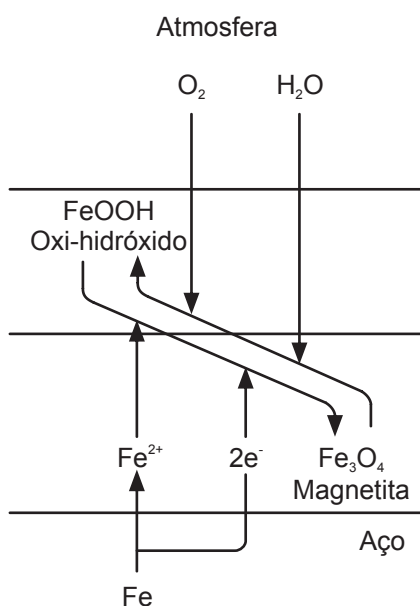
Após o término do desenvolvimento da camada de $\alpha\text{-FeOOH}$, a velocidade de corrosão é bastante reduzida, e a camada protetora será sustentada por algum tempo, devido à baixa solubilidade dos compostos que formam a ferrugem. A Figura 10 resume o mecanismo.

Figura 10: Mecanismo simplificado da corrosão atmosférica dos aços-carbono.

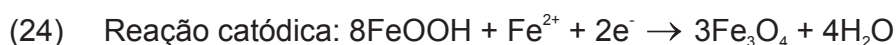


Evans propõe que a formação da α -FeOOH protetora é estimulada por ciclos ambientais de umedecimento e secagem²³. O mesmo autor também assume²⁴ a existência de uma transformação reversível em função das condições desse intemperismo, para um aço contendo uma camada interna de magnetita (Fe_3O_4) e externa de oxi-hidróxido de Fe^{3+} (FeOOH). A Figura 11 ilustra o mecanismo.

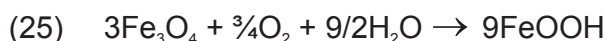
Figura 11: O modelo de Evans para a corrosão²⁴.



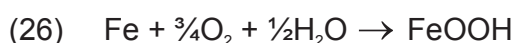
Em condição úmida (p.ex., período de chuvas), a reação anódica do ferro, combinada com a reação de redução catódica da FeOOH à Fe_3O_4 ocorre de acordo com:



onde os íons Fe^{2+} e elétrons formados pela oxidação do ferro se transferem através da camada de magnetita e reduzem FeOOH a Fe_3O_4 . Assim, ferro e FeOOH são consumidos, enquanto a magnetita é formada. Em condições secas, a magnetita é oxidada a FeOOH pelo ar, com a água transportada através da camada de FeOOH a partir do ambiente externo, como:



onde FeOOH cresce às custas da magnetita. Se, como resultado dos ciclos de umedecimento e secagem, a camada interna de magnetita mantiver uma espessura constante através do balanço entre a formação e a transformação, não haverá alteração da quantidade de magnetita, e a soma das reações (23)-(25) levará a:



²³ LEIGRAF, C. ; GRAEL, T.E. **Atmospheric Corrosion, Electrochem.** Soc. Ser., John Wiley, New York, 2000, p.149 e 157. Ver também: YAMASHITA, M. et al. **Corros. Sci.**, 36, p. 283 (1994).

²⁴ EVANS, U.R. **Corros. Sci.**, 9, p.813 (1969) e EVANS, U.R. e Taylor, C.A. **Corros. Sci.**, 12, p. 227 (1972).

Essa reação (resultante total) sugere que a camada externa de FeOOH crescerá em equilíbrio, provavelmente com propriedades uniformes, tornando-se uma barreira à penetração da água e do oxigênio. Além disso, o modelo de Evans explica as taxas de corrosão decrescentes apresentadas pelos aços patináveis.

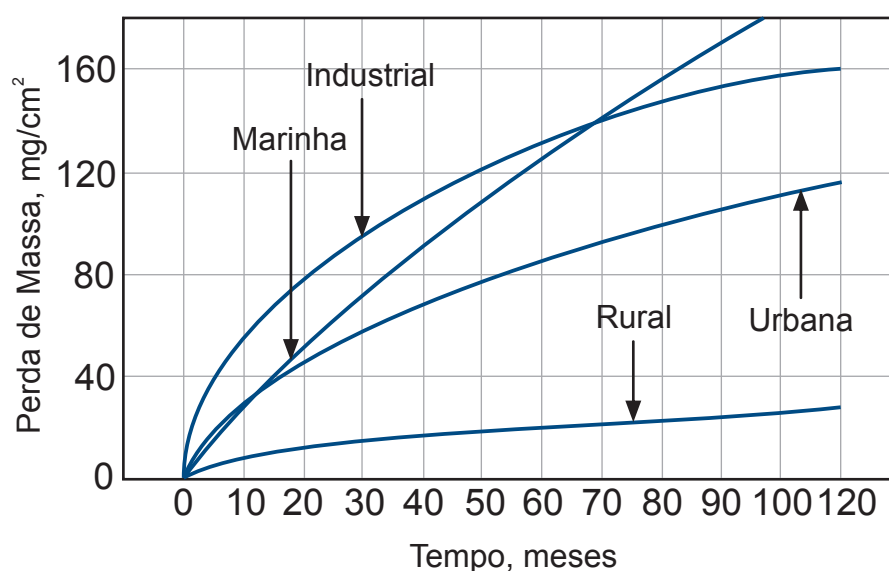
Uma modificação desse modelo foi proposta²⁵, onde Fe•OH•OH – uma película superficial composta de FeOOH (quimicamente) reduzida – toma o lugar da camada de magnetita. Essa camada explica, segundo o mecanismo proposto pelo autor, o aumento progressivo da proteção de ferrugens formadas sobre aços patináveis, do mesmo modo que o modelo de Evans.

1.5.4 - O desempenho de aços-carbono em diferentes atmosferas

Durante os períodos iniciais de exposição à atmosfera, a taxa de corrosão dos aços-carbono é usualmente elevada. Isso se deve à alta porosidade da ferrugem inicialmente formada. Após esse período inicial – que geralmente dura de um a cinco anos e depende da agressividade da atmosfera –, as propriedades protetoras melhoram, e a taxa de corrosão decresce.

A perda de massa metálica (ou, ainda, a profundidade de penetração) aumenta com o tempo de exposição, como ilustrado na Figura 12²⁶.

Figura 12: Resultados de perda de massa metálica para um aço-carbono estrutural comum (ASTM A36) exposto às atmosferas industrial (Cubatão, SP), marinha (Bertioga, SP), urbana (Santo André, SP) e rural (Itararé, SP)²⁶.



As curvas obtidas seguem uma lei exponencial do tipo:

$$(27) \quad \Delta m = kt^{1-n}$$

²⁵ STRATMANN, M.; BOENENKAMP K.; ENGELL, H-J. *corros. SCI.*, 23, p. 969 (1983). Ver também STRATMANN, M.; BOENENKAMP, K.; RAMSHANDRAN, T. *Corros. Sci.*, 27, p. 905 (1987).

²⁶ PANNONI, F.D. et al., Investigação da corrosão de um aço-carbono e de um aço patinável submetidos a diferentes condições ambientais. *Anais do 48º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (ABM)*, p. 135 (1993).

onde Δm é a perda de massa metálica por unidade de superfície (mg.cm^{-2}), k e n são constantes e t é o tempo de exposição em meses. A Tabela IV traz valores experimentais para essas constantes, em ambientes atmosféricos distintos²⁶.

Tabela IV: Constantes “ k ” e “ n ” obtidas através da exposição atmosférica, por três anos, de um aço-carbono estrutural comum (ASTM A36) e um aço estrutural patinável (ASTM A242) em atmosfera industrial (Cubatão, SP), marinha (Bertioga, SP), urbana (Santo André, SP) e rural (Itararé, SP)²⁶.

Aço	Atmosfera	k	n
ASTM A36	Industrial	28,991	0,634
ASTM A36	Marinha	6,462	0,274
ASTM A36	Urbana	11,450	0,513
ASTM A36	Rural	2,038	0,462
ASTM A242	Industrial	19,886	0,655
ASTM A242	Marinha	9,583	0,512
ASTM A242	Urbana	11,257	0,594
ASTM A242	Industrial	3,414	0,618

Esse tipo de dependência em relação ao tempo tem sido apresentado por vários autores. Ela sugere que o transporte dos reagentes através de uma camada protetora de ferrugem – que cresce com o tempo – determina a velocidade do processo de corrosão. Se a formação da ferrugem é controlada pela difusão, o coeficiente de difusão for constante e toda a ferrugem ficar retida na superfície, “ n ” terá o valor de 0,5. A remoção da ferrugem da superfície (devido à dissolução, erosão, etc.) tornará o valor de “ n ” maior.

1.5.5 - Corrosão como função de parâmetros ambientais

A velocidade de corrosão do aço-carbono depende da interação de vários parâmetros ambientais. Os parâmetros climáticos que envolvem de forma complexa as interações entre a temperatura e a umidade, diferentes formas de precipitação, velocidade dos ventos e poluentes sólidos, líquidos e gasosos exercerão influência na taxa de corrosão dos metais.

Vários estudos trataram de estudar a relação entre a taxa de corrosão e os parâmetros ambientais. Alguns deles, tendo como base numerosos dados experimentais, consideraram o efeito da concentração do SO_2 , TOW, etc. A Tabela V traz resultados de alguns desses estudos.

Tabela V: Corrosão do aço-carbono como função de parâmetros ambientais.

Equações ^{27, 28}	Parâmetros
$K = 1,17t_w^{0,66} (\text{SO}_s + 0,048)$	t_w = TOW (tempo total de horas, anual, em que a U.R. $\geq 85\%$) SO_2 = deposição de SO_2 , $\mu\text{g.dm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ K = penetração, μm
$K = 0,0152t_w^{0,428} \text{SO}_2^{0,570}$	SO_2 = deposição de SO_2 , $\mu\text{g.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ t_w = TOW (tempo total em que a U.R. $\geq 80\%$ e $t > 0^\circ\text{C}$, h.dia^{-1}) K = Taxa de corrosão, $\text{g.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$

²⁷ HAKKARAINEN, T.; YLASAARI, S. in AILOR, E.H. **Atmospheric Corrosion**, ed., Wiley, New York, 1982.

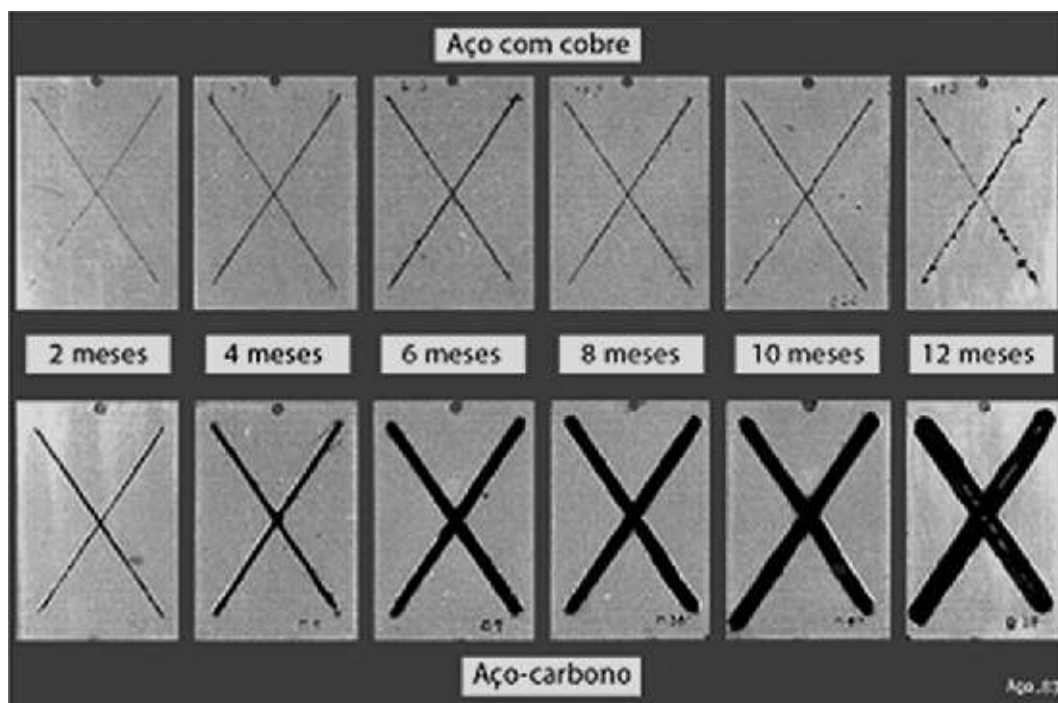
²⁸ BARTON, K. et al., **Zasch. Met.**, 16, p. 387 (1980).

1.5.6 - Aços resistentes à corrosão atmosférica (aços patináveis ou, ainda, aços aclimáveis)

Todos os aços contêm pequenas quantidades de elementos de liga, como carbono, manganês, silício, fósforo e enxofre, seja porque estes integravam as matérias-primas (minérios e coque) com que foram fabricados, seja porque lhes foram deliberadamente adicionados, para lhes conferir determinadas propriedades. De modo geral, as adições são pequenas, de no máximo 0,5% a 0,7% da massa total do metal, proporção em que tais elementos não têm qualquer efeito apreciável sobre a resistência deste à corrosão atmosférica. As pequenas variações de composição que inevitavelmente ocorrem durante o processo de fabricação do metal tampouco afetam significativamente suas características.

Entretanto, existem exceções. Sabe-se há mais de 80 anos, por exemplo, que a adição de pequenas quantidades de cobre, fósforo e outros elementos tem um efeito benéfico sobre os aços, reduzindo a velocidade em que são corroídos quando expostos à atmosfera. A Figura 13 ilustra o efeito único do cobre quando adicionado em pequenas quantidades ao aço. O grande estímulo ao emprego de aços enriquecidos com esses elementos – chamados aços de baixa liga – foi dado pela companhia norte-americana United States Steel Corporation (USS) que, no início da década de 1930, desenvolveu um aço cujo nome comercial era COR-TEN.

Figura 13: Exposição atmosférica de um aço laminado a quente sem adição de cobre (série inferior) e, do mesmo aço, agora com adição de 0,25% de cobre (série superior). Os corpos de prova foram pintados com tinta epoxídica (200 μm , base seca), riscados e expostos à atmosfera industrial de Cubatão por até 12 meses.



O aço COR-TEN foi desenvolvido originalmente para a indústria ferroviária, e sua grande virtude aparente era permitir a construção de vagões mais leves. Era um aço de alta resistência mecânica. A propriedade de resistir à corrosão foi alcançada por casualidade, embora desde o fim do século XIX já se conhecessem as influências benéficas do cobre e do fósforo.

Em 1958, o arquiteto norte-americano Eero Saarinen utilizou-o na construção do edifício administrativo da Deere & Company, em Moline, no Estado de Illinois (Estados Unidos). O aço foi deixado aparente nessa obra, tendo o arquiteto considerado que a ferrugem que sobre ele se formava constituía por si mesma um revestimento não só aceitável como atraente. A Figura 14 mostra esse edifício. A partir daí, os aços patináveis foram utilizados com sucesso em inúmeras obras de arquitetura. Os engenheiros seguiram os passos dos arquitetos, e as aplicações dos aços de alta resistência e baixa liga resistentes à corrosão atmosférica foram se expandindo.

Figura 14: O edifício-sede da Deere & Company, feito em aço patinável.



Desde o lançamento do COR-TEN até os nossos dias, outros aços com comportamento semelhante foram desenvolvidos. Eles constituem a família dos aços conhecidos como patináveis (ou, ainda, aclimáveis). Enquadrados em diversas normas, dentre as quais as brasileiras ABNT NBR 7007, 5008, 5920 e 5921, as norte-americanas ASTM A242, A-588, A-606 e A-709 e a europeia EN 10025-5, que especificam limites de composição química e propriedades mecânicas, esses aços têm sido utilizados no mundo todo na construção de edifícios de múltiplos andares, pontes, viadutos, passarelas, defensas, torres de transmissão de energia elétrica, torres de telefonia móvel, edifícios industriais, telhas, etc.

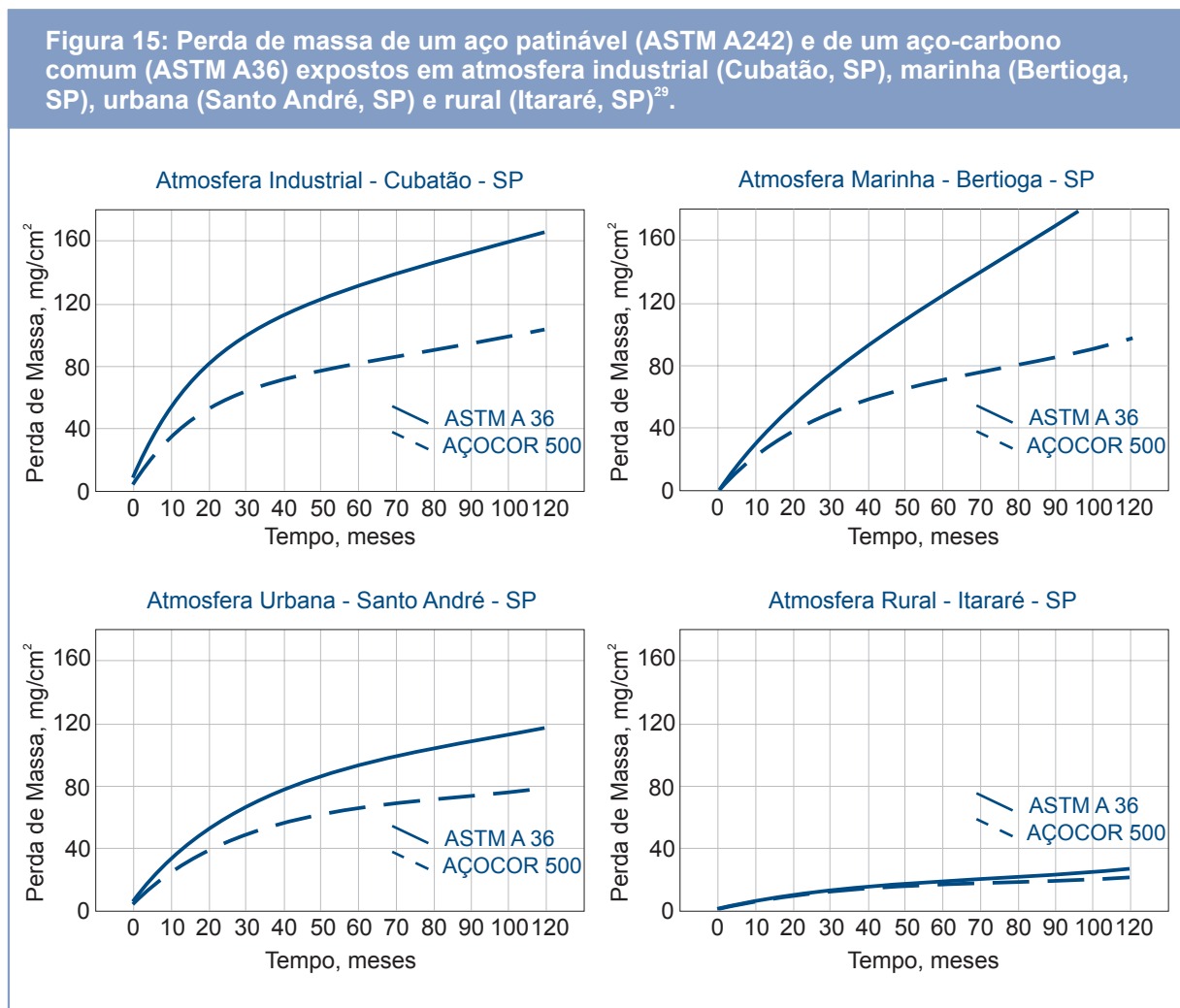
Sua grande vantagem, além de dispensar a pintura em certos ambientes, é possuir uma resistência mecânica maior que a dos aços estruturais comuns. Em ambientes extremamente agressivos, como regiões que apresentam grande poluição por dióxido de enxofre ou aquelas próximas da orla marítima, a pintura lhes confere uma proteção superior àquela conferida aos aços comuns.

No Brasil, aços desse tipo encontram também grande aceitação entre os arquitetos. Além de inúmeras pontes e viadutos espalhados por todo o País, formam, por exemplo, a estrutura da Catedral de Brasília e do edifício-sede da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (ABM), em São Paulo.

Desempenho dos aços patináveis

O que distingue esse aço dos aços-carbono comuns, no que diz respeito à resistência à corrosão, é o fato de que, sob certas condições ambientais de exposição, ele pode desenvolver em sua superfície uma película de óxidos aderentes e protetores, chamada de pátina, que promove a redução da velocidade do ataque dos agentes corrosivos presentes no meio ambiente.

A Figura 15 mostra curvas típicas de perda de massa de um aço-carbono estrutural comum (ASTM A36) e de um aço estrutural patinável (ASTM A242), expostos em atmosfera industrial, urbana, rural e marinha²⁹ por 10 anos.



²⁹ PANNONI, F.D.; MARCONDES, L. Efeito da composição química da liga sobre o comportamento frente à corrosão atmosférica de aços determinado pela análise estatística de dados publicados. **Anais do 16º Congresso Brasileiro de Corrosão da Associação Brasileira de Corrosão (ABRACO)**, p. 67 (1991).

Do que depende a formação da pátina?

A formação da pátina é função de três tipos de fatores. Os primeiros a destacar estão ligados à composição química do próprio aço. Os principais elementos de liga que contribuem para aumentar-lhe a resistência frente à corrosão atmosférica, favorecendo a formação da pátina, são o cobre e o fósforo. O cromo, o níquel e o silício também exercem efeitos secundários²⁹. Cabe observar, no entanto, que o fósforo deve ser mantido em baixos teores (menores que 0,1%), sob pena de prejudicar certas propriedades mecânicas do aço e sua soldabilidade.

Em segundo lugar vêm os fatores ambientais, entre os quais sobressai a presença de dióxido de enxofre e de cloreto de sódio na atmosfera, a temperatura, a força (direção, velocidade e frequência) dos ventos, os ciclos de umedecimento e secagem, etc. Assim, enquanto a presença de dióxido de enxofre, até certos limites, favorece o desenvolvimento da pátina, o cloreto de sódio em suspensão nas atmosferas marítimas prejudica suas propriedades protetoras.

Não se recomenda a utilização de aços patináveis não protegidos em ambientes industriais onde a concentração de SO₂ seja superior a 250 µg.m⁻³ e em atmosferas marinhas onde a taxa de deposição de cloretos exceda 300 mg.m⁻².dia⁻¹.

Os ventos, que carregam agentes agressivos até o local em que se encontra o metal, têm importante efeito sobre os ciclos de umedecimento e secagem, considerados essenciais no desenvolvimento de películas protetoras. O efeito da temperatura, embora provável, ainda não foi claramente caracterizado.

Finalmente, há fatores ligados à geometria da peça, que explicam por que diferentes estruturas do mesmo aço, dispostas lado a lado, podem ser atacadas de maneira distinta. Esse fenômeno é atribuído à influência de seções abertas/fechadas, drenagem correta das águas de chuva e outros fatores que atuam diretamente sobre os ciclos de umedecimento e secagem. Assim, por exemplo, sob condições de contínuo molhamento, determinadas por secagem insatisfatória, a formação da pátina fica muito prejudicada. Em muitas dessas situações, a velocidade de corrosão do aço patinável é semelhante àquela encontrada para os aços-carbono comuns. Exemplos incluem aços patináveis imersos em água, enterrados no solo ou recobertos por vegetação.

Regiões específicas, como juntas de expansão, articulações e regiões superpostas, têm comportamento crítico quanto à corrosão, tal como ocorre com os aços-carbono tradicionais. Os elementos de ligação (chapas, parafusos, porcas, arruelas, rebites, etc.) devem apresentar não só resistência mecânica compatível com o aço patinável, mas também compatibilidade de composição química, para minimizar a probabilidade de ocorrência de celas galvânicas.

O cordão de solda produzido na soldagem dos aços patináveis deve possuir composição química compatível, evitando a formação de pares galvânicos. A Tabela VI traz os consumíveis recomendados para as uniões dos aços estruturais ASTM A572 Grau 50 e o aço patinável AÇOCOR 500, da Gerdau.

A proteção dos aços patináveis – pintura e galvanização por imersão a quente

O desempenho de um sistema de pintura aplicado sobre o aço patinável costuma ser superior ao mesmo sistema aplicado sobre os aços-carbono estruturais tradicionais, *desde que o ambiente promova a formação da pátina*. A durabilidade desse sistema costuma ser superior à soma das durabilidades propiciadas isoladamente pela proteção do revestimento e pela natureza do material, isto é, há sinergia dos mecanismos. Uma eventual falha no revestimento levará à formação de produtos de corrosão bem menos volumosos do que aqueles formados sobre os aços comuns, o que diminui em muito o problema do destacamento da película de pintura, aumentando a durabilidade do revestimento.

A Figura 16 mostra dois espécimes de aço, laminados a quente. Um deles é um ASTM A36, e o outro, um ASTM A242. Eles foram expostos por 48 meses à atmosfera industrial de Cubatão, São Paulo. Inicialmente, esses aços foram limpos através do jateamento abrasivo com granalha de aço (padrão Sa 3). Posteriormente, foram pintados com duas demãos de tinta epóxi tolerante à superfície (300 μm de espessura seca, total). Após a secagem da tinta, foi feito o entalhe e subseqüente exposição à atmosfera. A observação permite concluir sobre a diferença de comportamento frente à atmosfera entre esses dois aços.

Figura 16: Espécimes de aço laminados a quente. Um deles é um ASTM A242 (patinável). O outro é um ASTM A36 (aço-carbono estrutural comum). Inicialmente, esses aços foram limpos através do jateamento abrasivo com granalha de aço (padrão Sa 3). Posteriormente, foram pintados com duas demãos de tinta epóxi tolerante à superfície (300 μm de espessura seca, total). Após a secagem da tinta, foi feito o entalhe e subseqüente exposição à atmosfera industrial de Cubatão, SP, por 48 meses.

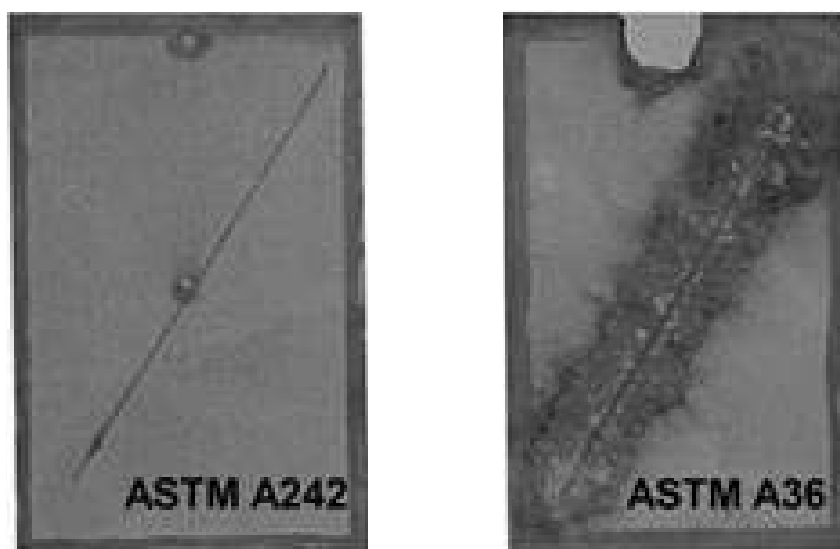


Tabela VI: Consumíveis de soldagem e parafusos recomendados para diferentes aços.

Tipo de aço	Soldagem				Parafusos
	Eletrodo revestido	MIG/MAG	Arco submerso	Eletrodo tubular	
ASTMA 572 Gr.50	E 7018	ER 70 S6	F7AO EM 12K	E 70T-1 E 71T-1 E 70T-4	ASTM A325 Tipo 1
AÇOCOR 500	E 7018 W E 7018 G	ER 8018 S-G	F7AO EW	E 71T8 Ni1 E 80T 1W	ASTM A325 Tipo3 Grau A

Para soldagem de múltiplos passes, podem-se utilizar eletrodos de composição química especial nos dois últimos filetes, que ficam, efetivamente, em contato com a atmosfera. Para passe simples (um cordão), podem-se utilizar eletrodos convencionais, pois haverá diluição na poça de fusão.

Aços patináveis podem ser galvanizados por imersão a quente. Por conta do teor de silício normalmente elevado, esses aços apresentam uma película de zinco (e seus intermetálicos) mais espessa, o que lhes confere proteção adicional. O efeito do silício será tratado posteriormente, quando falarmos da galvanização a quente. Quando o zinco não mais existir, depois de anos e anos de exposição, o aço patinável desenvolverá a pátina normalmente. Vestígios de sais de zinco não alterarão a capacidade do aço de desenvolver uma pátina bem formada.

Aços patináveis necessitam de pintura ou galvanização a quente (ou, ainda, de outra forma de proteção) em ambientes onde a pátina protetora não pode ser formada em sua plenitude, como:

- Atmosferas contendo gases (ou sólidos particulados) corrosivos, como, por exemplo, em áreas industriais com alta deposição de SO_2 ($> 250 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), NH_4Cl , HCl , NH_3 , etc.
- Locais sujeitos à névoa salina. Em atmosferas altamente contaminadas com cloretos ($> 300 \text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$), em especial regiões muito próximas da arrebentação costeira, ou ainda regiões cobertas nas quais o efeito da lavagem propiciada pelas chuvas não é sentido (com o conseqüente acúmulo de cloretos), a pátina formada não tem características protetoras. Recomenda-se a pintura de toda a estrutura confeccionada em aço patinável desde que esta esteja a menos de 2 km da orla marinha. Nesses casos, o preparo de superfície e o esquema de pintura escolhidos deverão ser os mesmos especificados para os aços-carbono estruturais comuns, visto que a pátina protetora não pode ser plenamente desenvolvida nessas condições;
- Aplicações onde o aço permanece continuamente submerso em água ou enterrado em solo aerado (próximo à superfície), como adutoras de água;
- Aplicações onde o aço está em contato direto com madeiras ou materiais porosos, que podem liberar ácidos orgânicos corrosivos ao aço e reter a umidade permanentemente, quando em contato com o metal.

Em resumo, pode-se afirmar que em situações em que a formação da pátina não é adequada, exigindo o uso de sistemas de proteção (p. ex.: a pintura ou galvanização por imersão a quente), os aços patináveis e os aços-carbono tornam-se praticamente equivalentes em aplicação.

1.5.7 - Prevenção da corrosão atmosférica através do detalhamento do projeto

Em ambientes externos ou úmidos, o detalhamento do projeto tem, em geral, um enorme efeito no controle da corrosão. A prevenção da corrosão nasce na arquitetura, é complementada pelo engenheiro calculista e finalizada pelo fabricante da estrutura. O modo mais econômico de se atingir a vida útil da estrutura, com os menores custos ao longo do tempo, é atentar para os detalhes. É importante ressaltar que, em ambientes secos, não poluídos, nenhuma precaução especial é necessária.

Todo projeto deve ser feito de modo a facilitar o preparo de superfície, pintura, inspeção e manutenção. 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 de agressividade ambiental, quando se especifica um sistema de proteção por pintura ou galvanização a quente.

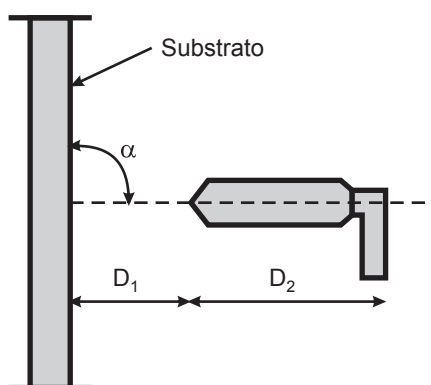
Acessibilidade

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 adequadas ao longo de toda a vida útil da estrutura. Os componentes em aço devem ser projetados para permitir acesso, com a finalidade de aplicação, inspeção e manutenção do sistema de pintura. Isso pode ser facilitado, por exemplo, pela instalação de passarelas para vistoria, plataformas, etc. A criação de acessos para a manutenção em um estágio posterior pode ser difícil, e, se não incluídos no projeto, o projetista deve indicar claramente como podem ser feitos no futuro.

Todas as superfícies da estrutura que precisam ser pintadas devem ser visíveis e possíveis de se alcançar através de métodos seguros. As pessoas envolvidas no preparo de superfície, pintura e inspeção devem estar aptas a se mover facilmente – e de modo seguro – por todas as partes da estrutura, em condições de boa iluminação. As superfícies que serão tratadas devem ser suficientemente acessíveis para permitir ao operador espaço suficiente para o trabalho. A Tabela VII trata das dimensões mínimas recomendadas.

Tabela VII: Distâncias típicas requeridas para ferramentas no tratamento de proteção frente à corrosão.

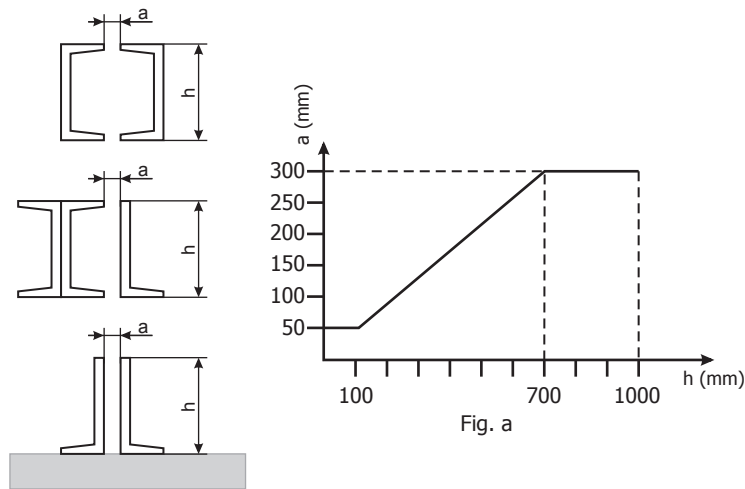
Operação	Comprimento da ferramenta (D2), mm	Distância entre a ferramenta e o substrato (D1), mm	Ângulo de operação (α), graus
Jateamento abrasivo	800	200 a 400	60 a 90
Ferramental elétrico - Pistola de pinos - Lixadeira elétrica	250 a 350 100 a 150	0 0	30 a 90 -
Limpeza manual - Escovamento - Lixa manual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



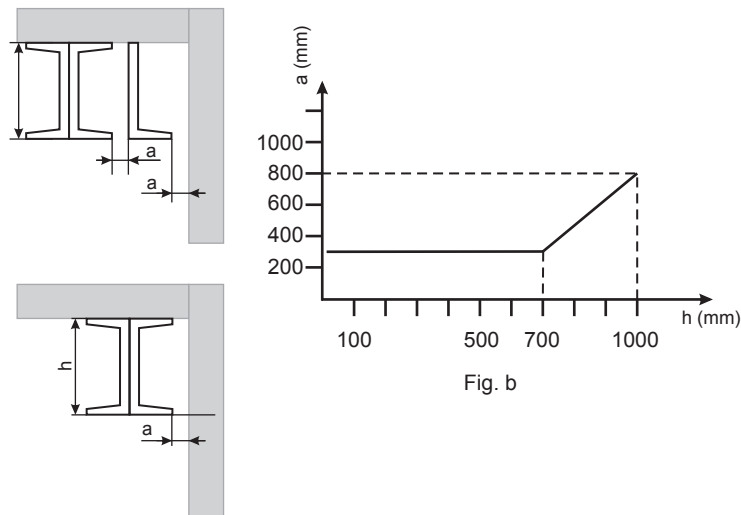
α = Ângulo formado pelo eixo da ferramenta com o substrato
 D_1 = Distância da ferramenta ao substrato
 D_2 = Comprimento da ferramenta

Espaços estreitos entre elementos devem ser evitados tanto quanto possível. Onde não seja possível evitar espaços restritos, por razões estruturais ou práticas, as recomendações descritas na Figura 17 devem ser avaliadas.

Figura 17: Dimensões mínimas para espaços restritos entre superfícies.



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 dada pelo gráfico de " a " versus " h ", até 1.000 mm (Fig. a) acima.



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

Nota 1: Se o operador tiver que atingir distâncias maiores do que 1.000 mm, " a " deverá ser, preferivelmente, superior a 800 mm.

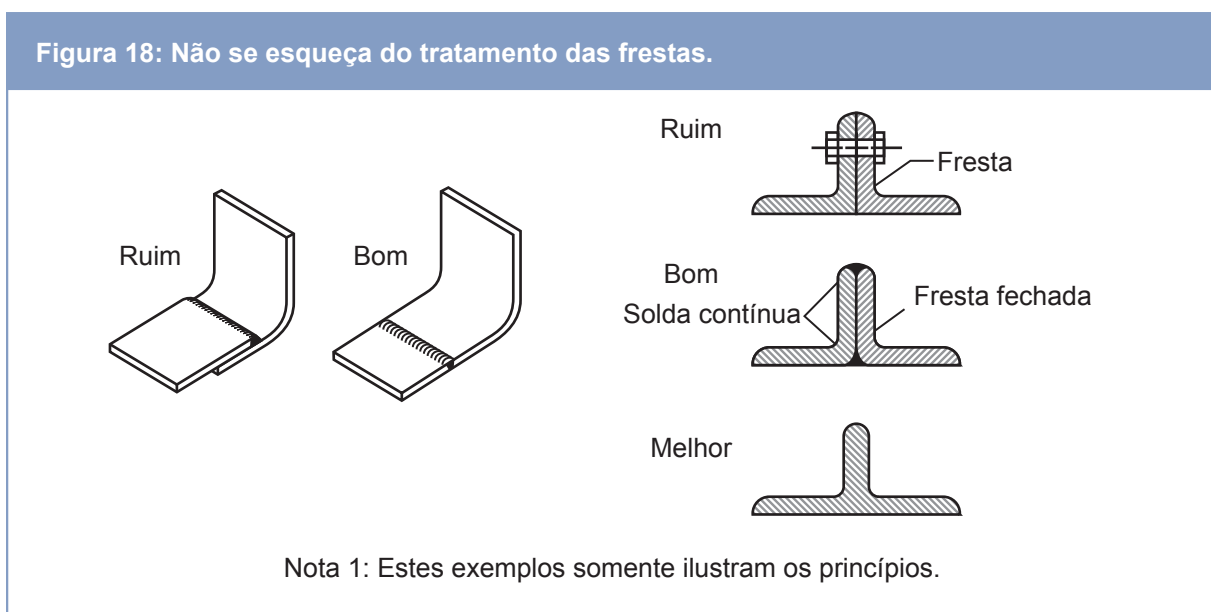
Nota 2: Quando o projetista não puder utilizar essas recomendações, medidas especiais (p.ex., proteção que perdure por todo o tempo de vida útil do projeto) deverão ser tomadas.

Componentes que estão sob risco de corrosão e são inacessíveis após montagem devem ser feitos de um material resistente à corrosão ou possuir sistema de revestimento protetor que perdure por toda a vida útil da estrutura. Alternativamente, uma sobre-espessura metálica pode ser considerada.

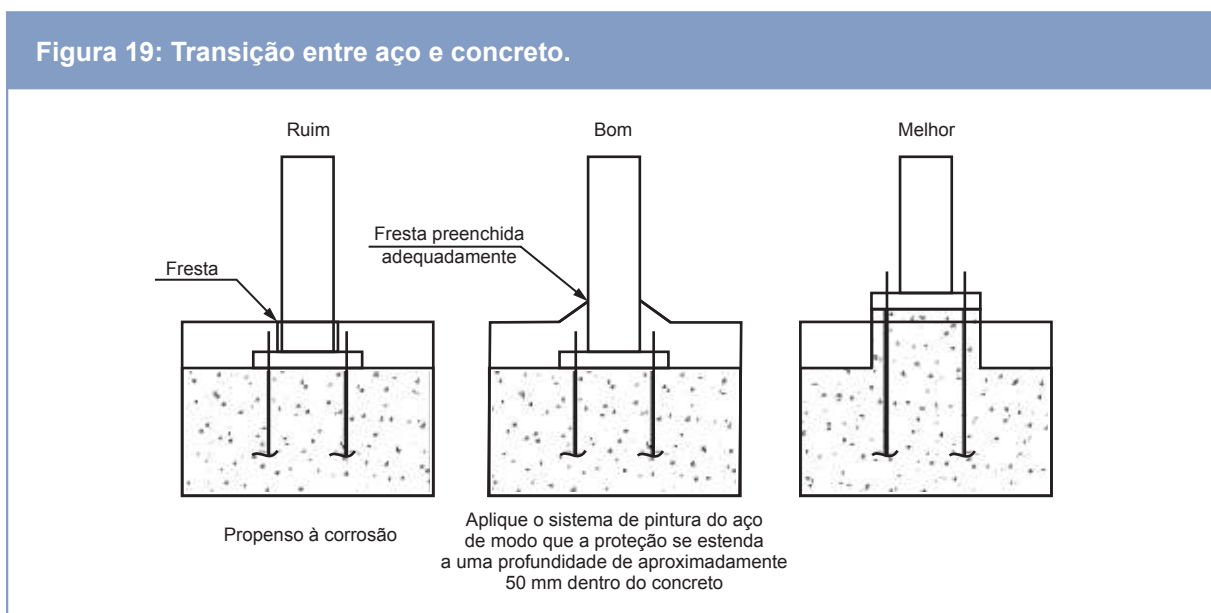
Tratamento de frestas

Frestas estreitas e juntas sobrepostas são pontos potenciais para corrosão, devido à retenção de umidade, sujeira e até os abrasivos utilizados no preparo da superfície. A corrosão potencial nesses locais pode ser evitada pela obstrução da fresta com um selante epoxídico ou até mesmo com massa poliéster (aquela utilizada em funilaria automotiva). Na maior parte dos ambientes corrosivos, a fresta pode ser preenchida com um calço de aço que se projeta do perfil e é soldado em toda a sua volta. Superfícies de acoplamento podem ser seladas por solda contínua, para evitar o armazenamento de abrasivos e penetração de umidade.

A Figura 18 apresenta alguns exemplos que ilustram os princípios de tratamento de frestas, não devendo ser entendidos como restrição ou recomendação dos detalhes.



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 (Figura 19).

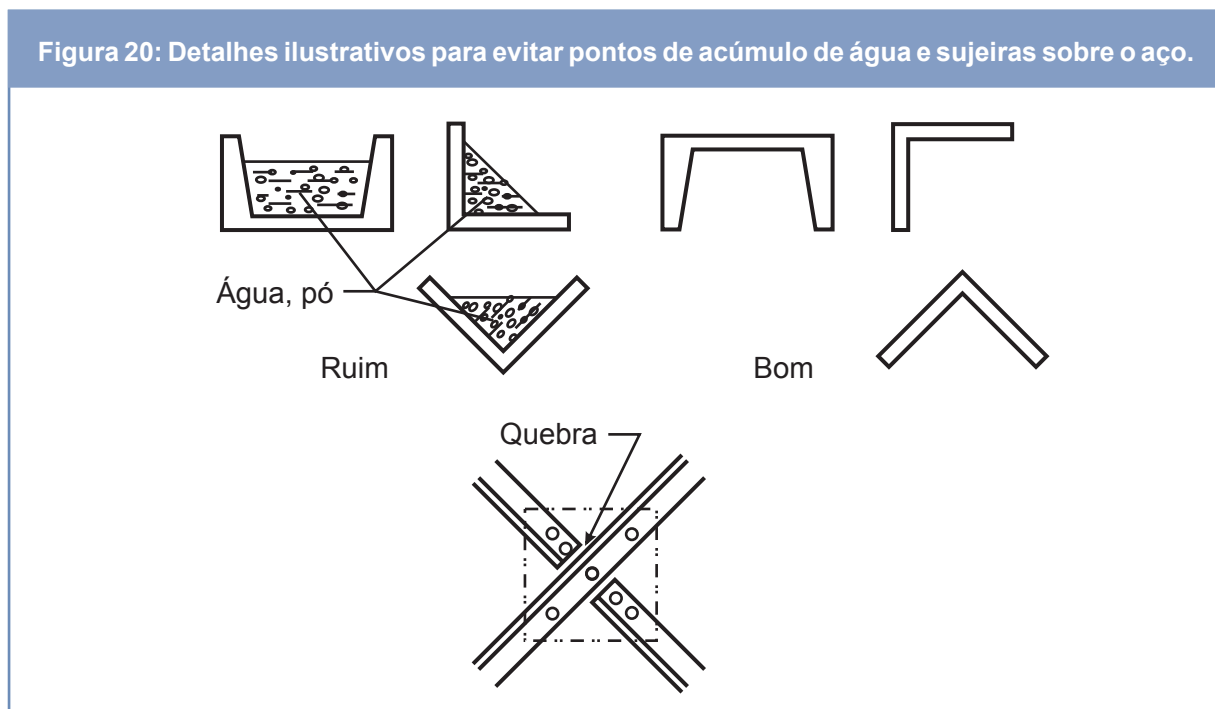


Precauções para prevenir a retenção de água e sujeira

Configurações geométricas onde a água (e materiais estranhos, como terra, areia, etc.) possa ficar acumulada devem ser evitadas. As principais precauções, nesse caso, são:

- Projetar superfícies inclinadas ou chanfradas;
- Eliminar seções abertas no topo, ou seu arranjo em posição inclinada;
- Eliminar “bolsas” e recessos onde a água e a sujeira possam ficar retidas;
- Permitir a drenagem da água e de líquidos corrosivos para fora da estrutura.

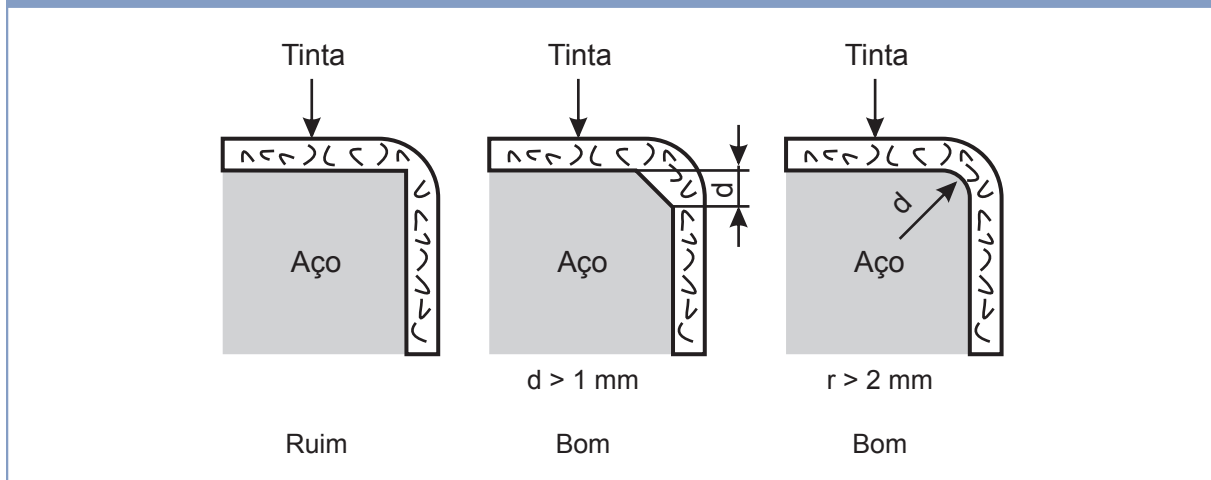
A Figura 20 apresenta exemplos muito simples para ilustrar algumas dessas precauções, não devendo ser entendidas como restrição ou recomendação dos detalhes.



Arestas

Arestas arredondadas são desejáveis, de forma a permitir a aplicação de revestimentos protetores de maneira uniforme e obter a espessura adequada. A Figura 21 ilustra a situação. Revestimentos aplicados sobre cantos vivos são mais susceptíveis a danos, assim, cantos vivos oriundos do processo de fabricação devem ser arredondados ou chanfrados; rebarbas ao redor de furos e ao longo de cortes devem ser removidas.

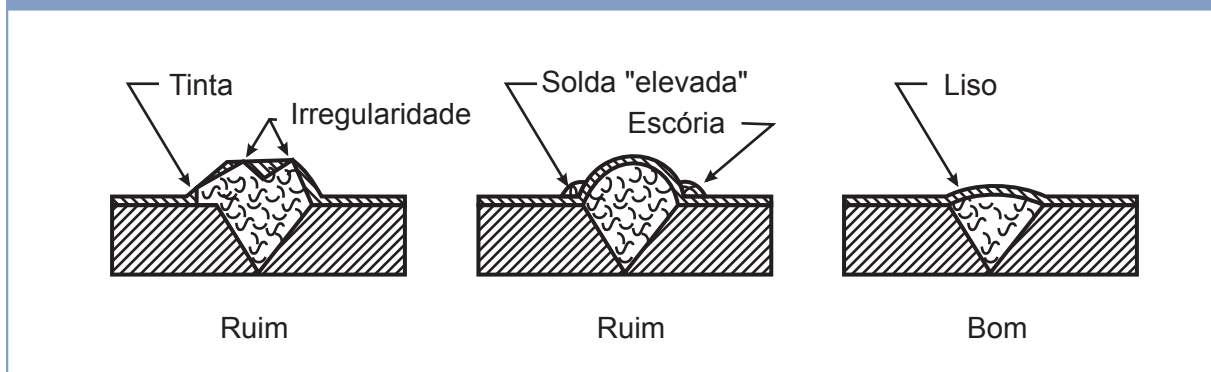
Figura 21: Evite as quinas vivas. Faça um chanfro ou arredonde as bordas. O prazo entre as repinturas aumentará significativamente.



Imperfeições de soldagem

Soldas devem ser livres de imperfeições (p.ex., asperezas, espirros, crateras, etc.), que são difíceis de cobrir de modo adequado com os sistemas de pintura tradicionais (Figura 22).

Figura 22: Imperfeições superficiais causadas por soldagem devem ser eliminadas.



Seções tubulares

Componentes tubulares abertos, quando expostos à umidade condensada, devem ser fornecidos com aberturas de dreno e protegidos adequadamente frente à agressividade do ambiente particular.

Componentes tubulares selados devem ser impermeáveis ao ar e à umidade. Assim, suas bordas devem ser seladas com solda contínua, tomando-se os devidos cuidados para garantir que a água não fique retida internamente. A Figura 23 mostra um bom exemplo de estanqueidade.

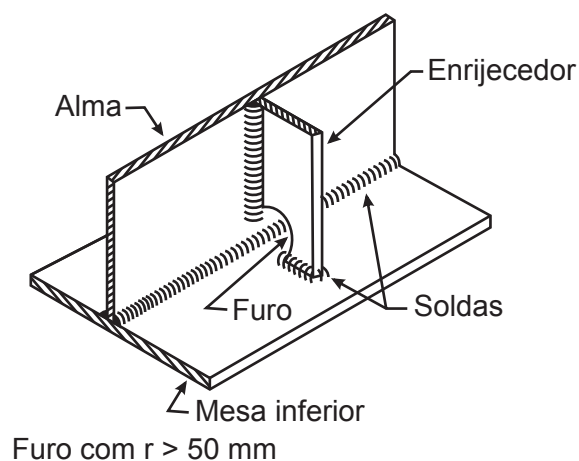
Figura 23: Tubos devem ser impermeáveis ao ar e à umidade. Passarela de pedestres em Évry, França.



Furos

Furos em enrijecedores, almas ou componentes em geral devem possuir um raio mínimo de 50 mm (Figura 24), de modo a permitir o preparo superficial adequado e a aplicação do sistema de pintura.

Figura 24: Projeto recomendado de enrijecedor, tendo em vista a proteção anticorrosiva.



Prevenção da corrosão galvânica

A corrosão galvânica é um fenômeno eletroquímico que somente se manifesta quando duas ou mais ligas metálicas, que apresentam diferentes potenciais eletroquímicos, conectadas “eletricamente”, são banhadas por um mesmo eletrólito. É o caso dos aços patináveis quando conectados eletricamente (parafusos, soldas, etc.) aos aços estruturais comuns. Os aços patináveis são mais “nobres”, em termos eletroquímicos, que os aços estruturais comuns. Se conectados (eletricamente) a estes, e banhados pelo mesmo eletrólito, a corrosão galvânica poderá se desenvolver. Nesse caso, o ataque corrosivo acontecerá sobre o aço estrutural comum; o aço patinável estará protegido catodicamente.

Os fatores mais importantes para o desenvolvimento da corrosão galvânica são, por ordem de importância:

- **Área relativa dos componentes anódicos e catódicos.** Sempre que a área do anodo for muito maior ($> 10x$) que a do catodo, nenhuma corrosão galvânica ocorrerá em ambientes classificados pela norma ISO 9223 como de muito baixa agressividade (C1), baixa agressividade (C2), média agressividade (C3) e alta agressividade (C4). O inverso é potencialmente perigoso: grandes áreas catódicas ($> 10x$) conectadas a pequenas áreas anódicas poderão levar ao desenvolvimento da corrosão galvânica, para as mesmas condições ambientais descritas;
- **Resistividade do eletrólito.** O risco da corrosão galvânica diminui grandemente com o aumento da resistividade do eletrólito. Eletrólitos gerados em ambientes rurais (classificação C2) e urbanos (classificação C3 e C4) não favorecem o aparecimento da corrosão galvânica. Em contrapartida, os ambientes industriais e marinhos (C5-I e C5-M, respectivamente) merecem atenção.

Parafusos estruturais de aço patinável (ASTM A325 Tipo 3) podem – e devem – ser os escolhidos nas ligações de estruturas confeccionadas em aço estrutural comum ou aço patinável. Isso se deve ao fato de que, quando aplicados em estruturas constituídas em aços estruturais comuns, garantem a integridade da ligação ao longo dos anos. A corrosão não ocorre devido à razão de áreas anódica/catódica favoráveis. O mesmo pode ser dito para as estruturas constituídas em aços patináveis.

Parafusos estruturais de aço-carbono (ASTM A325 Tipo 1), em contrapartida, não devem ser utilizados em estruturas de aço patinável, sob risco do aparecimento da corrosão galvânica. A razão de áreas anódica/catódica não favorece essa aplicação. O mesmo pode ser dito com respeito ao uso desses mesmos parafusos galvanizados a quente³⁰.

³⁰ PANNONI, F.D. Parafusos estruturais de aço patinável na construção em aço. **ABECE Informa – Informativo da Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural**, ano 17, no 98, jul/ago 2013.

1.5.8 - Proteção do aço estrutural

1.5.8.1 - 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 do preparo prévio da superfície de aço. Ele é realizado tendo em vista dois objetivos principais:

- **Limpeza superficial:** Trata-se da remoção da superfície de materiais que possam impedir o contato direto da tinta com o aço, 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;
- **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.

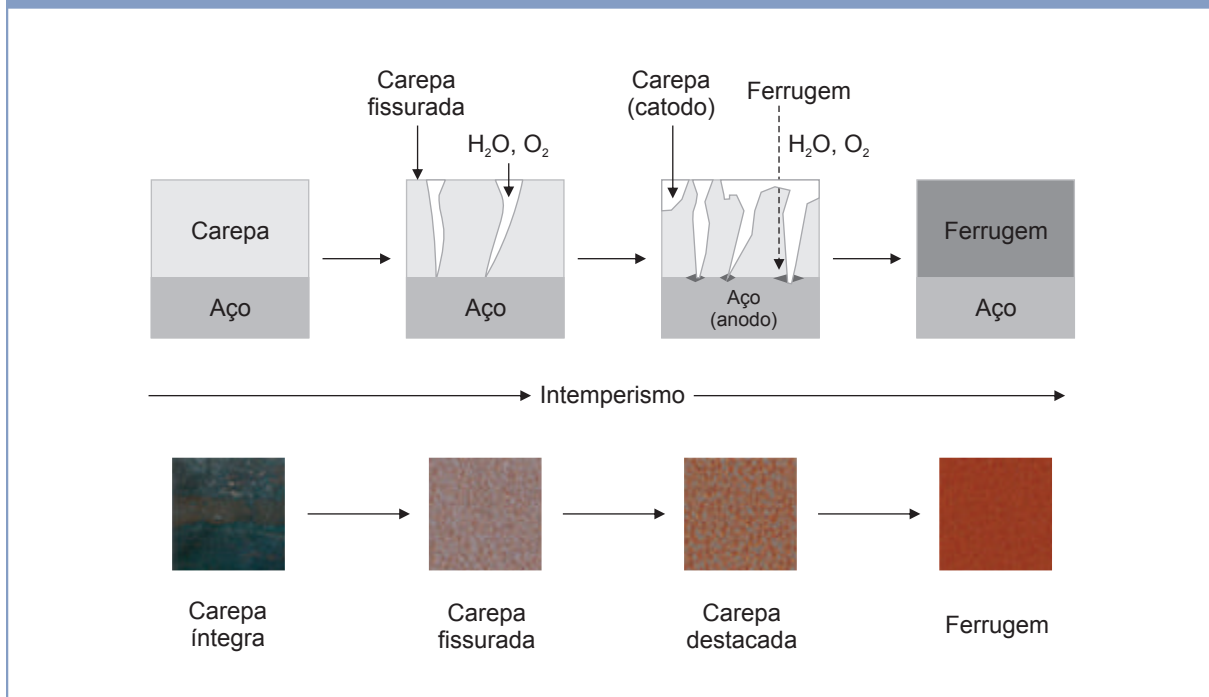
O aquecimento do aço a temperaturas situadas entre 575°C e 1.370°C provoca a formação de uma camada de óxidos denominada carepa de laminação. Essa película é formada por três camadas de óxidos sobrepostas: wustita (FeO), magnetita (Fe₃O₄) e hematita (Fe₂O₃).

Placas, tarugos, blocos, chapas, barras, perfis e vergalhões são laminados em temperaturas superiores a 870°C – em geral próximas a 1.000°C. A carepa de laminação, formada no 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).

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

Devido ao fato de a 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. Essas 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 intemperismo, 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. A Figura 25 ilustra o fenômeno.

Figura 25: Como a carepa de laminação é degradada por ação do intemperismo.



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. Essa 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 aplicado e com as condições a que esta ficará exposta.

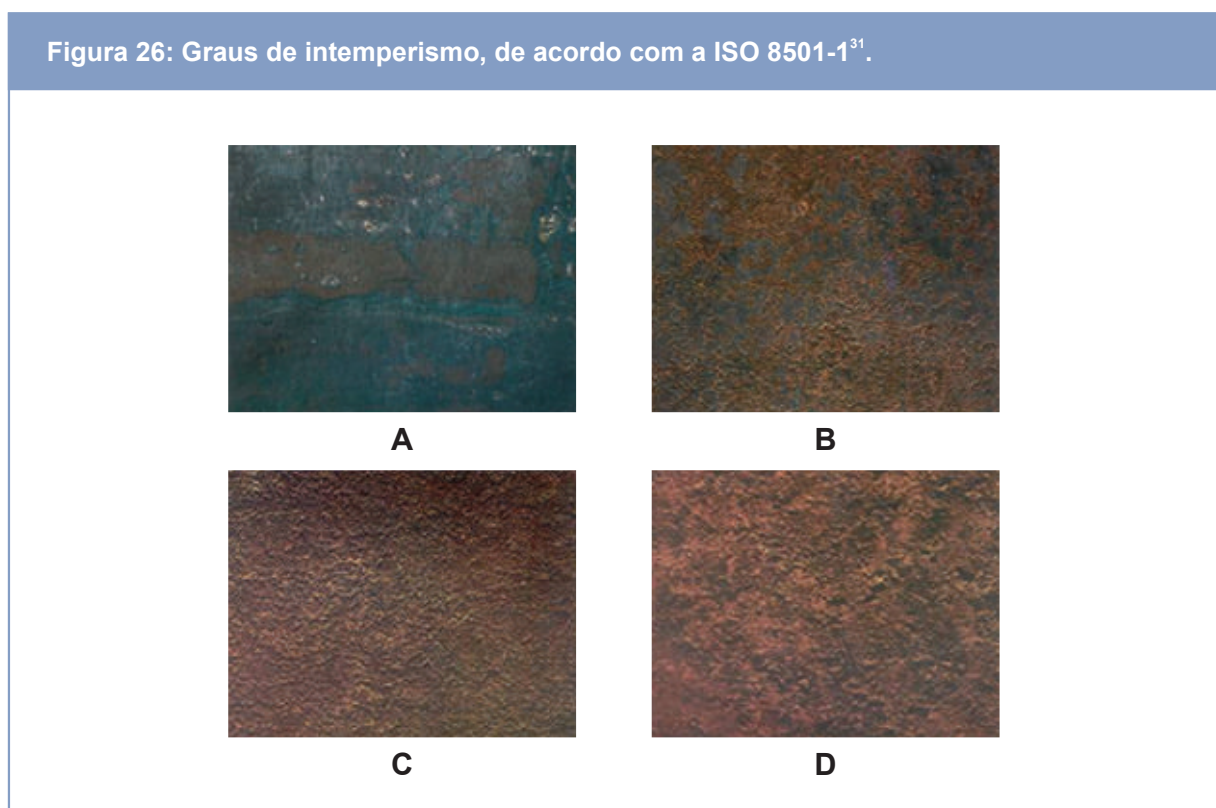
A norma internacional mais citada e empregada para o preparo da superfície do aço é a ISO 8501-1³¹. Essa norma se refere, essencialmente, à aparência da superfície do aço antes e após a limpeza manual, a manual motorizada, o jateamento abrasivo, etc.

³¹ 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. Genève, 2007.

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

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

A Figura 26 mostra os graus A, B, C e D de intemperismo, de acordo com a ISO 8501-1.



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:

- **St 2:** Limpeza manual, executada com ferramentas manuais, como escovas, raspadores, lixas e palhas de aço;
- **St 3:** Limpeza mecânica executada com ferramentas mecanizadas, como escovas rotativas, pneumáticas ou elétricas, pistola de pinos, etc.
- **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;

-
- **Sa 2:** Chamado de jato comercial. A superfície resultante do jateamento poderá apresentar manchas e pequenos resíduos devidos à ferrugem, à carepa e à tinta. Pelo menos 2/3 da área deverão estar isentos de resíduos visíveis, enquanto o restante será limitado pelas manchas e resíduos;
 - **Sa 2 ½:** Chamado de jato ao metal quase branco. É definido como superfície livre de óleo, graxa, carepa, ferrugem, tinta e outros materiais, podendo apresentar pequenas manchas claras devido aos resíduos de ferrugem, carepa e tinta. Pelo menos 95% da área deverá estar isenta de resíduos visíveis, sendo o restante referente aos materiais acima mencionados;
 - **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.

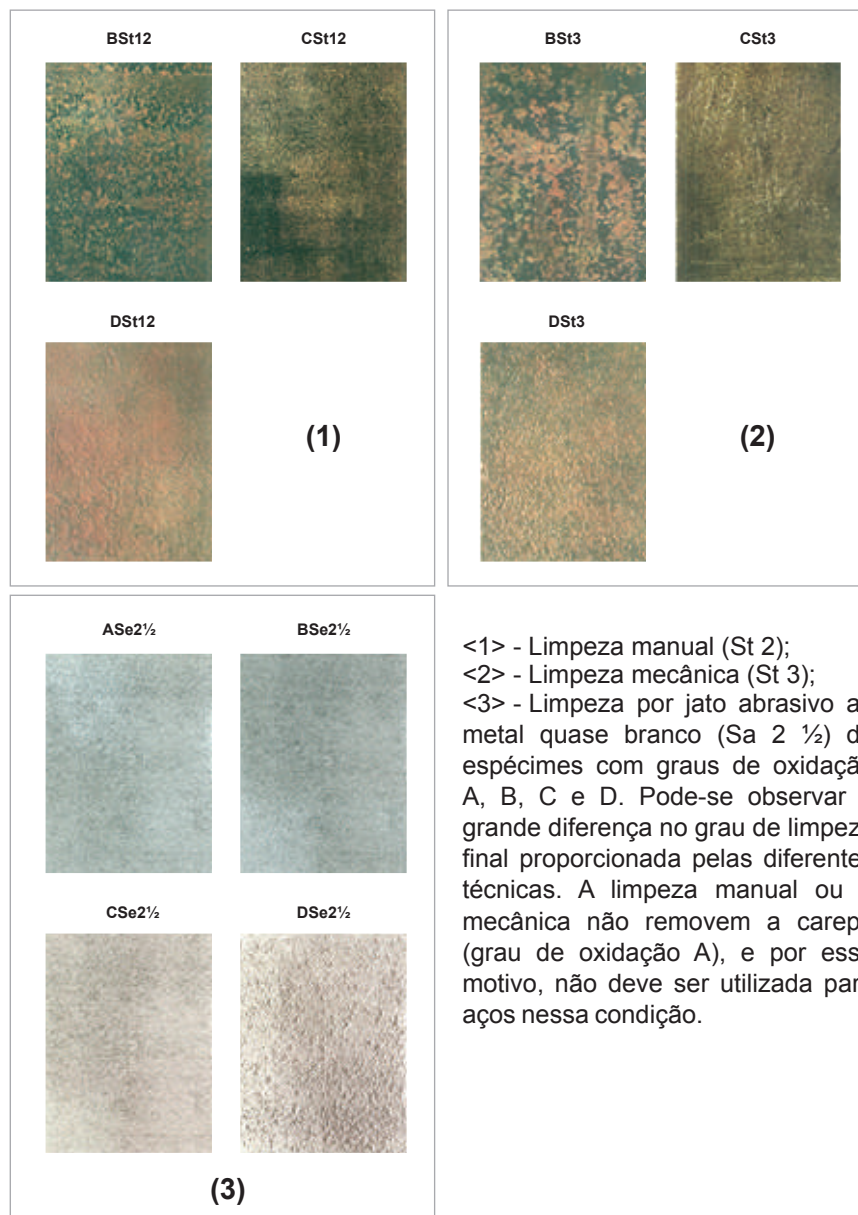
A Figura 27 ilustra a limpeza manual (St 2), a mecânica (St 3) e por jato abrasivo ao metal quase branco (Sa 2 ½) de espécimes de aço submetidos ao grau de oxidação A, B, C e D. Pode-se observar a grande diferença visual proporcionada pelos diferentes métodos de limpeza. A limpeza manual ou a mecânica não conseguem remover a carepa de laminação intacta; por esse motivo, não existem as figuras correspondentes (ASt2 e ASt3) na ISO 8501-1, e a remoção da carepa não é recomendada por essas técnicas.

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. Essa 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 a alta velocidade contra a superfície a ser limpa. Essa técnica de limpeza possui duas grandes vantagens:

- Elimina todas as impurezas superficiais, permitindo o contato do revestimento com o substrato. 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.

Figura 27: Limpezas manual, mecânica e por jato abrasivo.



Tintas são suspensões homogêneas de partículas sólidas (pigmentos) dispersas em um líquido (conhecido como veículo), em presença de componentes adicionados em menores proporções, chamados 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, a opacidade, a coesão e a inibição do processo corrosivo e também a consistência, a dureza e a resistência da película. Alguns dos pigmentos comumente utilizados nas tintas de proteção ao aço-carbono são os seguintes:

-
- **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;
 - **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;
 - **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. Esse pigmento é muito utilizado nas tintas de fundo, não é tóxico, tem bom poder de tingimento e apresenta boa cobertura;
 - **Alumínio e outros.** O alumínio lamelar e outros pigmentos também lamelares, como 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 pela 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. Nesses 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 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:

- **Alquídicas.** Conhecidas como esmaltes sintéticos, são tintas monocomponentes 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;
- **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 alquídicas. Resistem

à umidade, à imersão em água doce ou salgada, a 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);

- **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;
- **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 promover aderência do esquema ao substrato, e contêm, 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, zinco metálico ou alumínio. Elas são formuladas com altos teores de pigmentos e, por isso, são semibrilhantes ou foscas. Cada um desses pigmentos inibidores pode ser incorporado a certa variedade de ligantes, gerando, por exemplo, tintas de fundo alquídicas 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, as poliuretânicas, etc.

As tintas de acabamento têm a função de proteger o sistema contra o ambiente externo 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 ser muito diferentes. Uma precaução que sempre deve ser adotada é a de que todas as tintas do sistema pertençam, preferencialmente, ao mesmo fabricante. Isso minimizará a possibilidade de ocorrência futura de defeitos, como a delaminação (descolamento) por incompatibilidade química.

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

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

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

- **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*), têm 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;
- **Proteção anódica:** a proteção das regiões anódicas é proporcionada pelos pigmentos anticorrosivos, todos de caráter oxidante. A proteção pode ser dada pela dissolução do pigmento ou por ação oxidante;
- **Proteção catódica:** a proteção é dada pela 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 em pó na película seca é de 85% em peso (o contato elétrico é fundamental para a manutenção da proteção).

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

A Tabela VIII traz algumas diretrizes para o preparo superficial e sistemas de pintura a serem realizados em ambientes de diferentes agressividades, em atendimento à Norma ISO 12944-5³². Esses sistemas foram retirados da publicação do Centro Brasileiro de Construção em Aço (CBCA) denominado “Projeto e Durabilidade”³³.

³² ISO 12944-5: paints and varnishes – corrosion protection of steel structures by protective paint systems: part 5 - protective paint systems, Genève, 2007.

³³ PANNONI, F.D. Projeto e durabilidade. **Série Manual de Construção em Aço**. Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA), Rio de Janeiro, 2009.

Tabela VIII: Exemplos de sistema de pintura, em atendimento à Norma ISO 12944-5³².

Exemplos de ambiente	Tinta de fundo	Tinta intermediária e acabamento	Espessura total de película seca
Atmosferas com baixo nível de poluição. A maior parte das áreas rurais.	Epoxídica 80 µm, base seca	Poliuretano acrílico alifático 80 µm, base seca	160 µm
Atmosferas urbanas e industriais com poluição moderada por SO ₂ . Áreas costeiras com baixa salinidade.	Epoxídica 80 µm, base seca	Epoxídica 80 µm, base seca Poliuretano acrílico alifático 80 µm, base seca	240 µm
Áreas industriais com salinidade moderada.	Epoxídica 80 µm, base seca	Epoxídica 120 µm, base seca Poliuretano acrílico alifático 80 µm, base seca	280 µm
Áreas industriais com alta umidade e atmosfera agressiva.	Epoxídica 80 µm, base seca	Epoxídica 160 µm, base seca Poliuretano acrílico alifático 80 µm, base seca	320 µm
Áreas industriais e offshore com alta salinidade.	Epoxídica 80 µm, base seca	Epoxídica 160 µm, base seca Poliuretano acrílico alifático 80 µm, base seca	320 µm
Considera-se, para todos os sistemas de pintura descritos acima, limpeza de superfície mínima padrão Sa 2 ½. Todos os sistemas descritos são sistemas de alta durabilidade (> 15 anos antes da primeira repintura).			

1.5.8.2 - Revestimentos metálicos: a galvanização por imersão a quente

Existem quatro métodos usuais de aplicação de revestimentos metálicos à base de zinco sobre superfícies de aço: galvanização a quente, metalização, eletrodeposição e sherardização. Desses, 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 em componentes de aço ou ferro fundido pela 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.

As principais vantagens da galvanização a quente são:

- **Custo inicial competitivo.** A galvanização por imersão a quente, de modo geral, possui custos muito competitivos quando comparados a outras formas de proteção. 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;

- **Pequena manutenção/custo menor em longo prazo.** Mesmo nos casos em que o custo inicial da galvanização por imersão a quente é maior do que revestimentos alternativos, a galvanização apresenta menores custos de manutenção ao longo da vida útil do componente/estrutura. A manutenção é ainda mais cara quando as estruturas estão localizadas em áreas remotas.
- **Vida longa.** A expectativa de vida de revestimentos galvanizados aplicados sobre componentes estruturais excede facilmente os 50 anos na maior parte dos ambientes rurais e se situa entre 20 a 50 anos (ou mais) na maior parte dos ambientes agressivos, urbanos e costeiros;
- **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 da umidade relativa na época da aplicação. Isso adiciona custo na aplicação de um sistema de pintura robusto;
- **Aderência.** O revestimento obtido através da galvanização a fogo está ligado metalurgicamente ao substrato de aço;
- **Contaminação ambiental.** O revestimento não é tóxico e não contém substâncias voláteis;
- **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;
- **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;
- **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:

- 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;
- A coloração do zinco somente pode ser alterada através da pintura;
- As dimensões dos componentes ou estrutura a galvanizar são limitadas pelas dimensões da cuba de zinco líquido;
- 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;
- 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

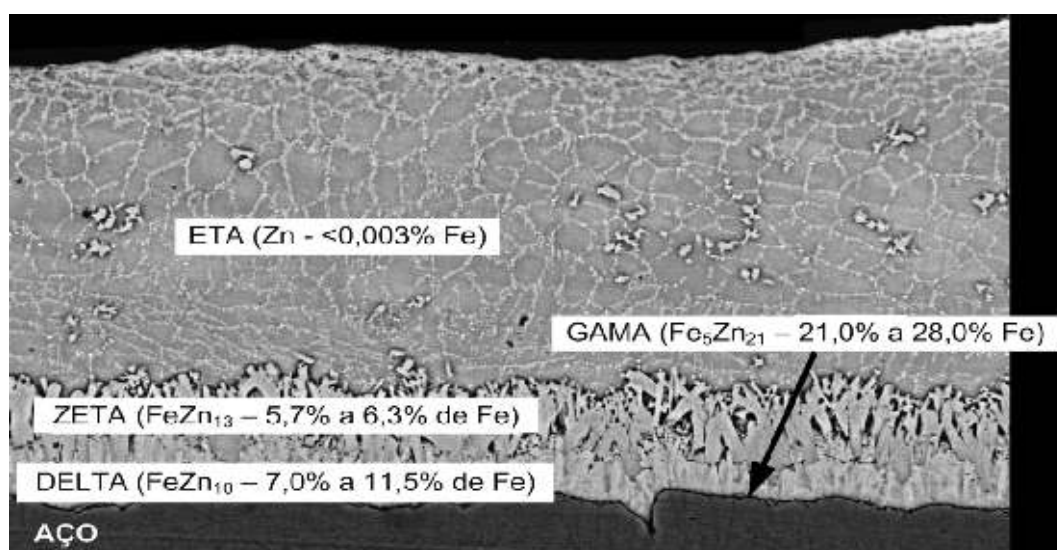
revestimento. A camada é volatilizada durante o processo. Torna-se necessário, assim, o acondicionamento do revestimento ao longo do cordão de solda e áreas adjacentes, através da metalização, da utilização de tintas ricas em zinco ou outro método.

O processo de galvanização por imersão a quente compreende vários estágios. Óleos e graxas são removidos com o uso de um agente desengraxante adequado. O aço é, então, submetido à decapagem ácida, com o objetivo de remover a carepa de laminação e a ferrugem. Em geral, utiliza-se o ácido clorídrico contendo um inibidor de corrosão. Essa 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, essas superfícies são sempre submetidas à decapagem.

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.

O componente é então mergulhado em um banho de zinco líquido à temperatura próxima de 450°C. Nessa temperatura, o zinco reage com o aço, formando uma série de ligas Zn/Fe que se ligam muito bem à superfície do aço. A Figura 28 ilustra a camada formada.

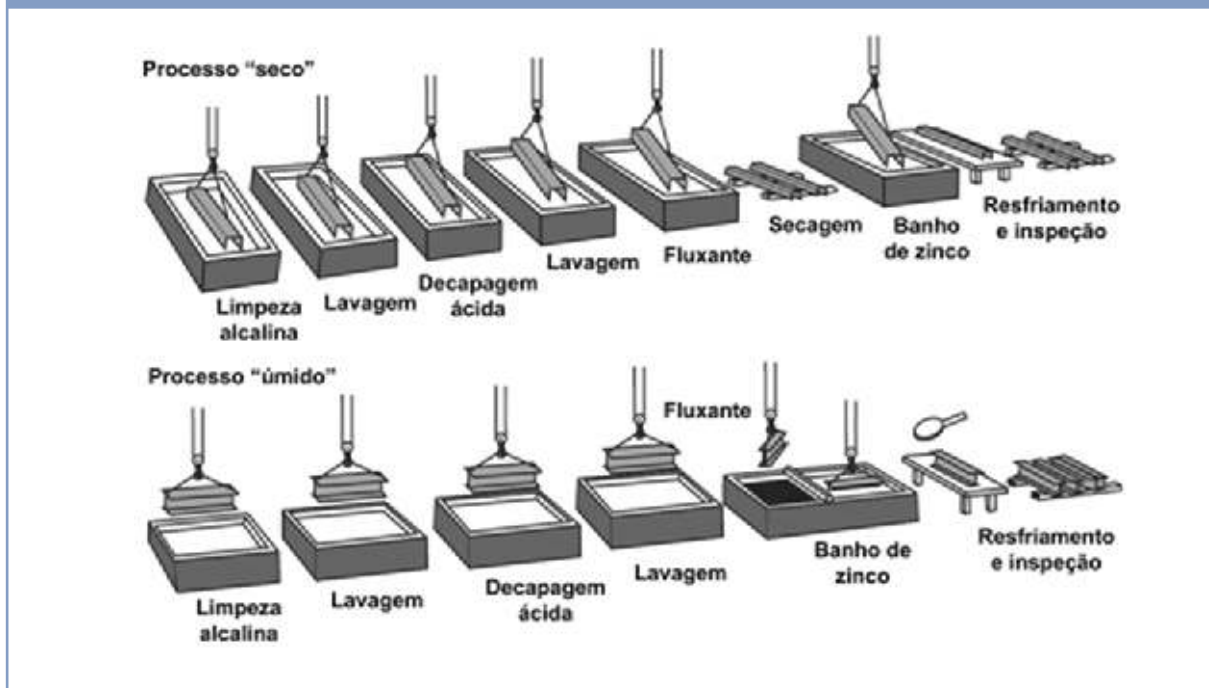
Figura 28: Seção de um revestimento galvanizado típico, mostrando as camadas de intermetálicos.



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 29 ilustra as etapas de uma linha de galvanização a quente.

Figura 29: Processos unitários existentes em uma linha de galvanização a quente.



Conforme solidifica, o zinco assume um brilho metálico característico. A espessura do revestimento é influenciada por vários fatores, incluindo a dimensão e a espessura do componente e o preparo de superfície empregado anteriormente. Espessuras maiores podem ser obtidas por dois métodos distintos, descritos a seguir.

Rugosidade superficial do componente

Esse é o meio mais comum para a obtenção de revestimentos mais espessos. O jateamento abrasivo, padrão comercial (Sa 2), com partículas angulares de aço (tamanho G24), cria uma rugosidade superficial que aumenta a área do aço em contato com o zinco líquido. Isso provoca, de modo geral, um incremento na massa de zinco por unidade de área do revestimento em até 50%. Qualquer componente de aço pode ser tratado desse modo, desde que tenha espessura suficiente para resistir ao jateamento, sem deformações. A Figura 30 ilustra essa situação. Pode não ser possível jatear a superfície interna de tubos e componentes parcialmente "fechados", mas essas regiões são, de modo geral, as menos propensas à corrosão.

Galvanização de aços reativos

Uma camada galvanizada mais espessa será obtida se o componente a ser galvanizado for produzido em um aço reativo. Os constituintes do aço que têm maior influência na reação ferro/zinco são o silício, que é frequentemente adicionado ao aço como desoxidante durante sua produção, e o fósforo. O silício altera a composição das camadas de liga zinco-ferro, de modo que elas continuam a crescer com o tempo, e a velocidade de crescimento não diminui conforme a camada se torna mais espessa (Figuras 31 e 32). Em menor grau, o fósforo exerce uma influência similar na formação da camada.

Figura 30: Microestrutura de camada de zinco espessa, obtida por jateamento abrasivo do aço anterior à galvanização.

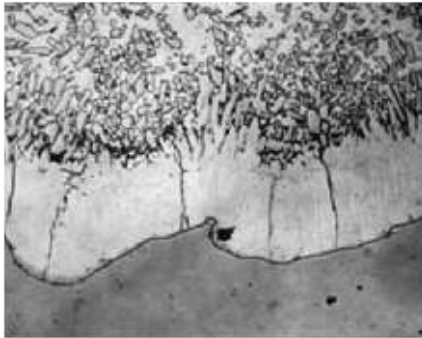


Figura 31: Microestrutura de camada espessa, obtida sobre um aço rico em silício.

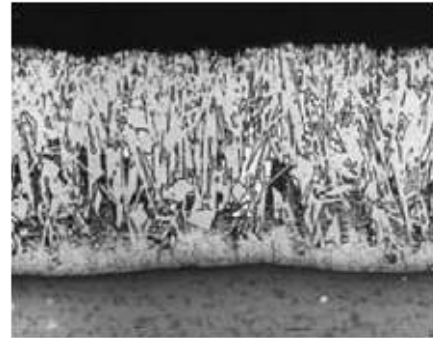
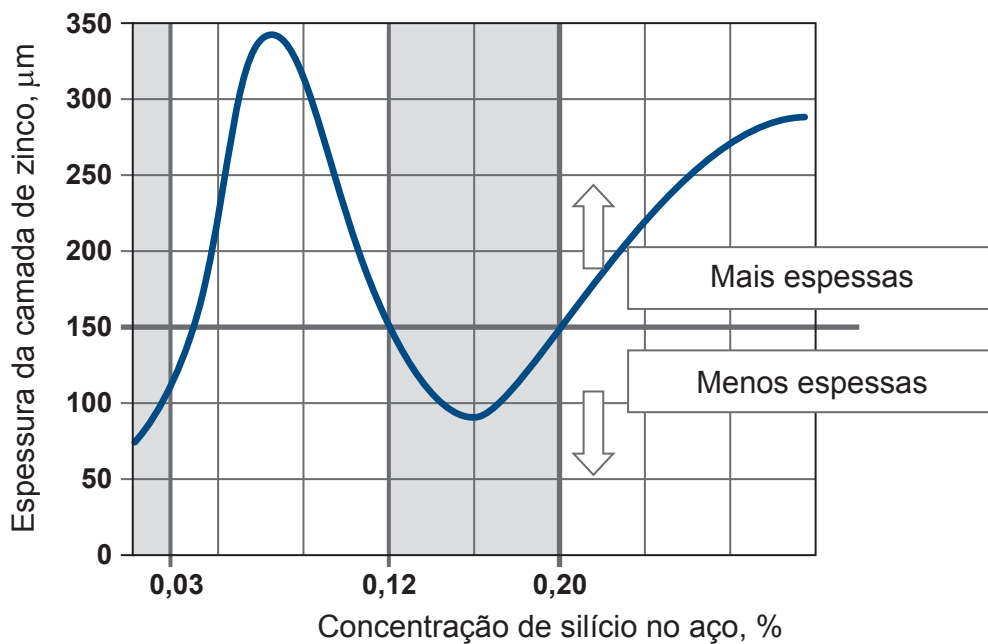


Figura 32: Efeito do silício no desenvolvimento de películas mais espessas na galvanização a quente – o Efeito Sandelin.



Quando um componente feito de um aço reativo é removido do banho de zinco, uma camada de zinco líquido adere à camada de intermetálicos, como em qualquer aço. Entretanto, a velocidade de reação desses aços pode ser tão elevada que a camada de zinco puro será transformada completamente em liga zinco-ferro antes que o componente tenha tido tempo para resfriar. O resultado é um revestimento de mesma espessura (ou maior), que pode ser mais escura na aparência. A alteração da aparência não altera a resistência frente à corrosão do revestimento. O efeito do silício e do fósforo (e também do enxofre) sobre o crescimento da camada de liga Fe-Zn é conhecido como Efeito Sandelin. A Figura 32 mostra a influência do silício.

Em muitas aplicações, a galvanização a quente é utilizada sem qualquer tipo de proteção adicional, como a pintura. Entretanto, a pintura pode ser aplicada para fornecer uma durabilidade extra ou para atender a requisitos de ordem estética. 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 adesão da tinta ao substrato. Estes incluem uma “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 liga, que fornecem a ligação metalúrgica mencionada anteriormente.

De modo geral, recomenda-se galvanizar aços que contenham entre 0,12% e 0,30% de silício e menos que 0,03%. A galvanização de aços com teor de silício entre 0,03% e 0,12% (a faixa do Efeito Sandelin) ou acima de 0,30% promoverá camadas espessas de intermetálicos.

Como o zinco protege o aço

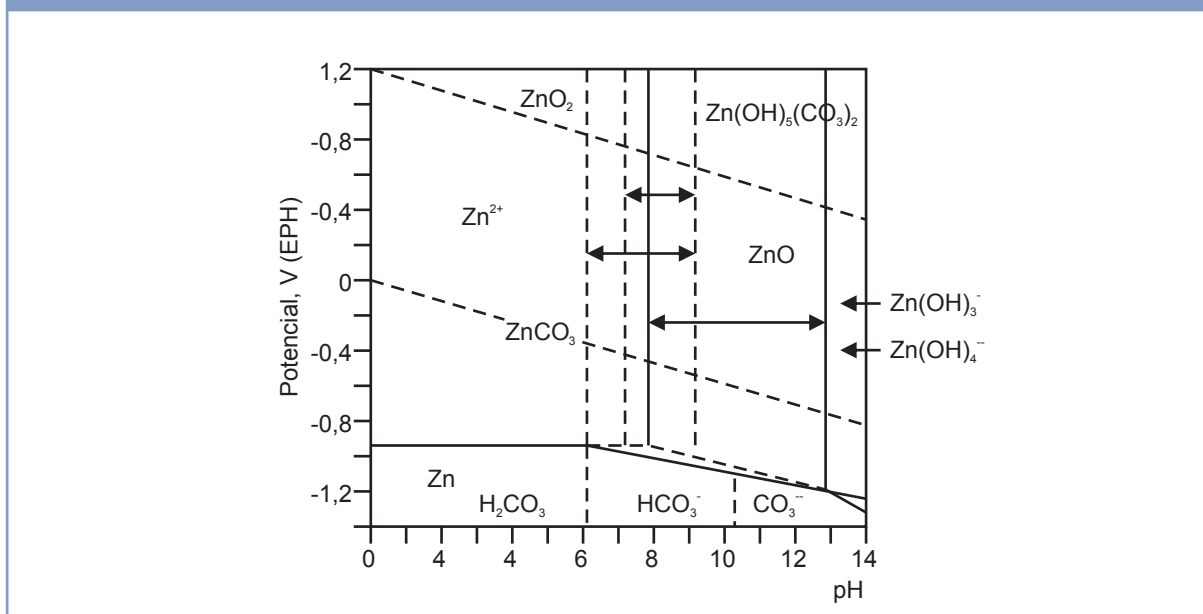
As espécies químicas presentes na corrosão atmosférica do zinco podem ser descritas pelo diagrama potencial-pH. O diagrama para o sistema Zn-H₂O-CO₃²⁻, a 25°C, está representado na Figura 33³⁴. Podemos observar que a região de passividade se estende para ambientes naturais, do pH~6 até o pH~13.

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:

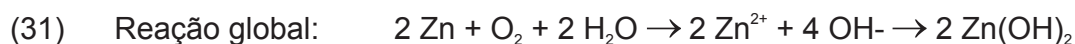


Figura 33: Diagrama potencial-pH para o sistema Zn-H₂O-CO₃²⁻ a 25°C³⁴.



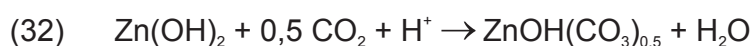
³⁴ KANNANGARA, D. C. W.; CONWAY, B. E. J. *Electrochem Soc.*, 134, 894 (1987).

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

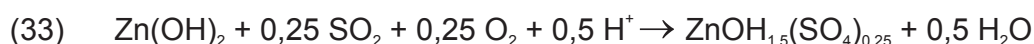


O hidróxido de zinco assim formado reage com os constituintes presentes no ar, como os gases CO_2 e SO_2 , ou o íon Cl^{-} , formando os sais básicos de zinco correspondentes a cada constituinte na interface hidróxido/ar. Isso ocorre desde que o pH da umidade superficial seja suficientemente alto (Figura 34).

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:



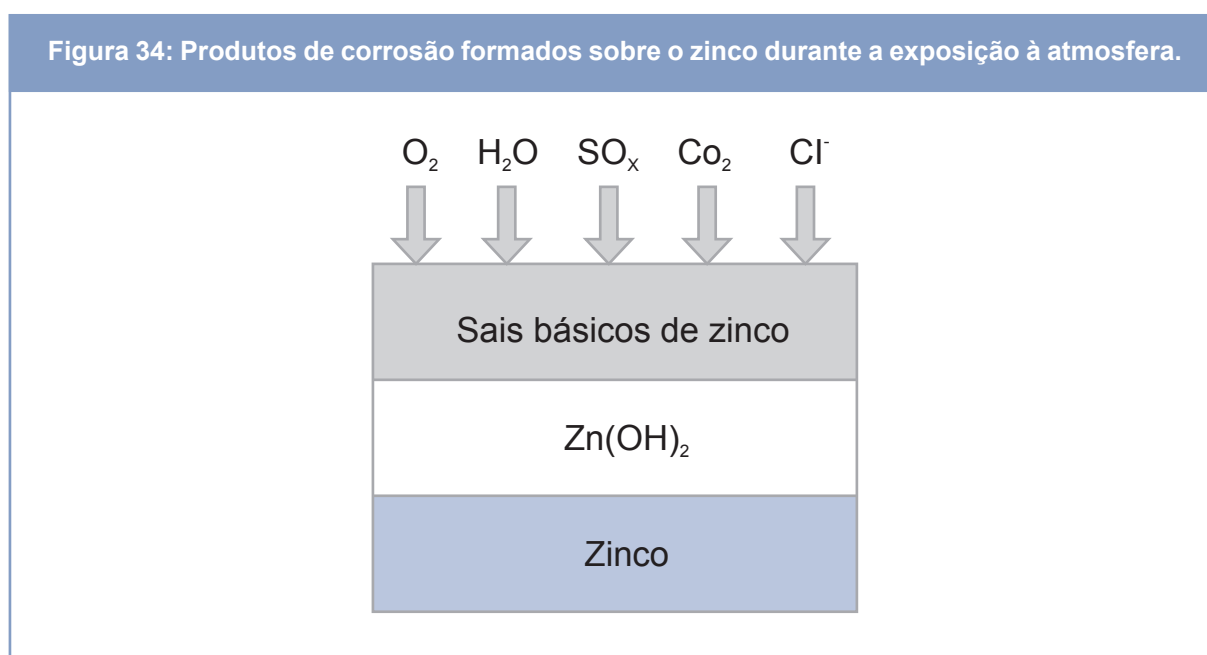
Em atmosferas urbanas e industriais, contaminadas com SO_2 , teremos a formação do sulfato básico de zinco sobre o hidróxido de zinco formado:



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 2 $\mu\text{m}/\text{ano}$, o que faz com que um revestimento típico de zinco, com 85 μm de espessura, proteja o aço por 40 anos ou muito mais. A Tabela IX apresenta taxas de corrosão do zinco para diferentes ambientes do Brasil.

A Tabela IX apresenta taxas de corrosão do zinco para diferentes ambientes do Brasil.

Local	Taxa de corrosão ($\mu\text{m}/\text{ano}$)		Razão aço/zinco	Tempo de exposição, anos	Durabilidade estimada do revestimento (*), anos
	Aço	Zinco			
Caratinga, MG	6,6	0,43	15,3	4	197
Belém, PA	17,3	1,18	14,7	2	72
Brasília, DF	8,7	1,12	7,8	2	76
Paulo Afonso, BA	17,3	1,6	10,8	1	53
Porto Velho, RO	4,3	2,0	2,2	2	43
São Paulo, SP	8,3	1,16	7,2	4	73
Ipatinga, MG	24,7	0,60	41,2	4	142
Cubatão, SP	85,2	0,94	90,6	4	90
Arraial do Cabo, RJ	437,7	1,74	251,6	4	49
Ubatuba, SP	400,3	2,08	192,5	4	41
Rio de Janeiro, RJ	58,5	1,21	48,3	4	70

(*) Para um revestimento de zinco de 85 μm , de acordo com a ABNT NBR 6323.

A taxa de corrosão do zinco é única entre diversas ligas metálicas usuais. Ela varia de forma linear com o tempo. Isso permite prever com razoável precisão o comportamento futuro de proteção com base em exposições reais de poucos anos. A Tabela IX traz estimativas de durabilidade baseadas em valores obtidos em um, dois e quatro anos de exposição de espécimes à atmosfera.

1.5.9 - A especificação de um sistema de proteção

Os seguintes fatores devem ser predeterminados na proteção anticorrosiva de uma estrutura:

- A vida útil de projeto da estrutura, assim como a possibilidade (ou não) de intervenções periódicas de manutenção;
- O ambiente que circunda a estrutura e sua influência na degradação da proteção;
- A dimensão e a forma dos componentes estruturais;
- As possibilidades de tratamento existentes no fabricante da estrutura ou no local da construção/montagem, para obras *in situ*;
- O custo inicial da proteção e o custo ao longo da vida útil do projeto. De modo geral, a galvanização e sistemas de pintura mais robustos custam muito menos ao longo da vida útil do projeto de uma dada estrutura do que sistemas mais simples de proteção, que exigem manutenção frequente (e onerosa);

Esses fatos, dentre outros, devem ser considerados cuidadosamente antes de se tomar as decisões a respeito de:

- Tipos de revestimentos a serem utilizados, como, p.ex., pintura, galvanização a quente, proteção catódica associada à pintura, etc.
- O método de preparo de superfície;
- Os métodos de aplicação;
- O número de camadas de revestimento (se for o caso) e a espessura de cada camada.

Em geral, cada caso deve ser decidido por méritos próprios. Entretanto, os seguintes pontos podem ser de ajuda na tomada de decisões:

- Os requisitos de proteção são mínimos no interior de edificações secas. A estrutura, quando escondida, em tal ambiente, não requer nenhum tipo de proteção extraordinário;
- A durabilidade dos sistemas de pintura é em muito aumentada quando se processa a limpeza superficial por meio do jateamento abrasivo ao metal quase branco (Sa 2 ½) ou superior. A limpeza manual (ou motorizada) não oferece a mesma qualidade gerada pelo jateamento com partículas abrasivas;
- Enquanto o jateamento abrasivo com partículas esféricas (shot) é o modo mais adequado para a maior parte dos sistemas de pintura, o jateamento com partículas angulares (grit) é essencial para o processo de metalização e também para alguns primers específicos, como o silicato de zinco.

Uma informação muito importante não deve ser esquecida: verifique se a aplicação de proteção contra fogo é requerida para a estrutura. Em caso afirmativo, peça ajuda ao fabricante ou aplicador do sistema de proteção frente a fogo. Dependendo do caso, uma única proteção poderá atender aos dois requisitos – proteção anticorrosiva e proteção contra fogo.

1.6 - A corrosão galvânica

A corrosão galvânica se refere à corrosão que é induzida quando duas ligas metálicas distintas são conectadas eletricamente e imersas em um eletrólito corrosivo. Em um par bimetálico, a liga menos nobre se torna um anodo e tende a corroer a uma velocidade acelerada quando comparada à condição não conectada ao par. O material será catodo na cela de corrosão.

O potencial termodinâmico para a corrosão metálica foi descoberta no final do século XVIII por Luigi Galvani, em uma série de experimentos com músculos e nervos de rã, que se contraíam quando conectados a um par bimetálico. O princípio foi colocado como aplicação prática por Alessandro Volta, que construiu, em 1800, a primeira bateria.

O potencial de um metal em solução está relacionado à energia que é liberada quando ele corrói. Diferenças nos potenciais de corrosão de metais dissimilares podem ser obtidas em ambientes específicos através da medida da direção da corrente que é gerada pela ação galvânica desses metais quando expostos a dado ambiente.

Um arranjo dos metais ou uma série galvânica, com base nas observações em água do mar, é mostrado na Tabela X. Essa tabela é utilizada como primeira aproximação da direção provável do efeito galvânico em outros ambientes.

Tabela X: Série galvânica em água do mar.

+ Nobre (ou catódico)	Local
	Ouro
	Grafite
	Titânio
	Prata
	Hastelloy C
	Aço inoxidável 18-8Mo (passivo)
	Aço inoxidável 18-8 (passivo)
	Aço contendo > 11% Cr (passivo)
	Inconel (passivo)
	Níquel (passivo)
	Solda prata
	Monel
	Bronze
	Cobre
	Latões
	Hastelloy B
	Inconel (ativo)
	Níquel (ativo)
	Estanho
	Chumbo
	Solda chumbo-estanho
	Aço inoxidável 18-8Mo (ativo)
	Aço inoxidável 18-8 (ativo)
	Aço contendo > 11% Cr (ativo)
	Ferro fundido
	Aço patinável
	Aço-carbono Alumínio 2024
	Cádmio
	Al comercialmente puro
	Zinco
- Nobre (ou ativo, ou, ainda, anódico)	Mg e suas ligas

Em um par galvânico envolvendo duas ligas metálicas em uma série galvânica, a corrosão do metal que está na parte superior da lista é reduzida, enquanto a corrosão daquele situado na parte inferior é acelerada. Os metais com potenciais de corrosão mais positivos são chamados de nobres (ou catódicos), e aqueles que apresentam potenciais mais negativos são chamados de ativos (ou anódicos).

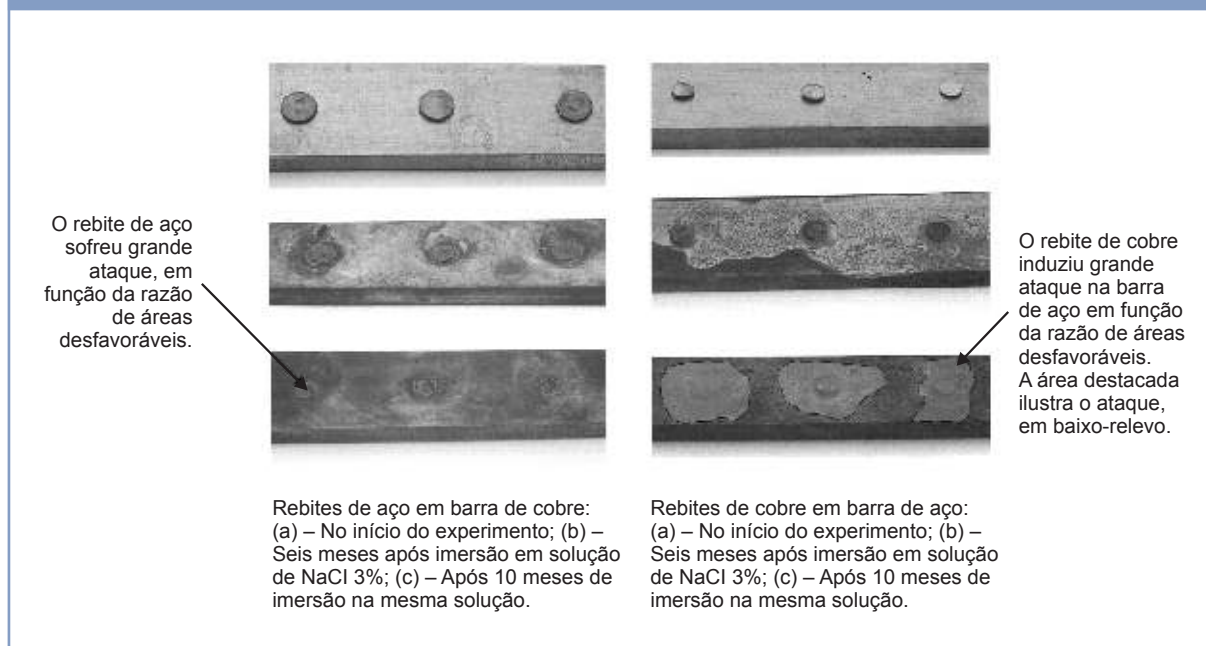
Os valores de potencial medidos podem variar de uma solução para outra, ou ser influenciados por fatores como temperatura, aeração e velocidade de movimentação do eletrólito.

Outro efeito importante na corrosão galvânica é o efeito da área (ou melhor, da razão entre as áreas catódicas e anódicas). Quanto maior for o catodo, quando comparado ao anodo, mais redução catódica ocorrerá, e maior será a corrente galvânica.

Do ponto de vista prático do controle da corrosão, a razão mais desfavorável corresponde a um catodo muito grande conectado a um anodo muito pequeno.

Esse efeito é ilustrado na Figura 35. Ela indica que o aço-carbono é anódico com respeito ao cobre e, portanto, será mais rapidamente corroído quando colocado em contato (elétrico) com ele. Esse efeito é muito acelerado se a área do aço for pequena em comparação com a área do cobre. Entretanto, sob a condição contrária, onde a área do aço é muito grande em comparação à do cobre, a corrosão do aço-carbono será apenas levemente acelerada.

Figura 35: A importância da razão de áreas catódica/anódica na corrosão galvânica. A série da esquerda traz rebites de aço em barra de cobre. A série da direita traz o contrário – rebites de cobre em barra de aço. As barras foram colocadas em solução de NaCl 3% por 10 meses .



A série da esquerda traz rebites de aço em barra de cobre. A série da direita traz o contrário – rebites de cobre em barra de aço. As barras foram colocadas em solução de NaCl 3% por 10 meses³⁵.

Corrosão por frestas

A corrosão por frestas ocorre em trincas ou frestas formadas entre superfícies, que podem ser da mesma liga metálica ou de ligas distintas. Envolve aços-carbono, aços inoxidáveis, ligas de alumínio, de titânio, etc., utilizados em meios ventilados ou que contenham um oxidante, e, em geral, na presença de haletos (p. ex., cloretos). O ataque acontece em regiões confinadas de pequeno volume e onde o meio apresenta estagnação, como os interstícios existentes entre duas chapas parafusadas (ou unidas por soldas descontínuas), regiões sob juntas, etc.

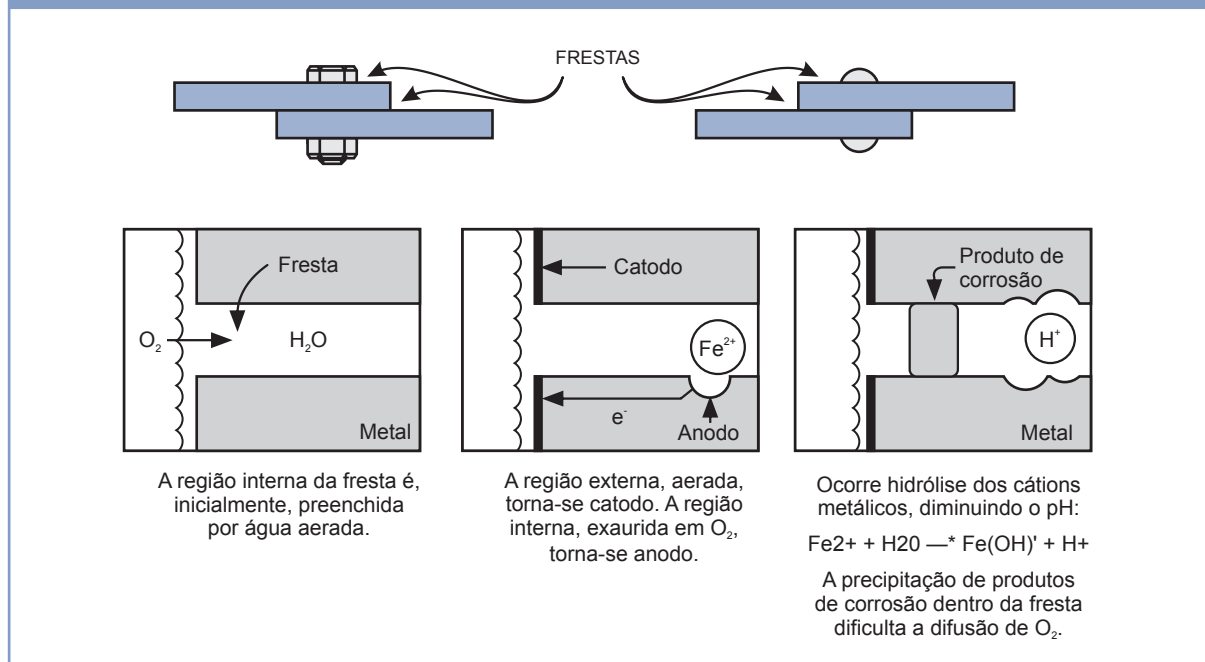
O mecanismo de ataque está relacionado ao meio confinado:

- A primeira etapa resulta de um mecanismo de aeração diferencial. O oxigênio dissolvido no eletrólito que preenche a fresta é consumido pela reação com a liga metálica;
- Em seguida, a difusão do oxigênio na fresta torna-se restrita e uma cela de aeração diferencial tende a ser criada entre o microambiente da fresta e a superfície externa. As reações de corrosão agora se separam entre o microambiente da fresta (anodo) e a superfície externa (catodo). A grande razão de áreas (catodo/anodo) é um fator agravante do fenômeno;
- Os íons metálicos produzidos pela reação anódica são hidrolisados, o que promove um grande abaixamento do pH. O pH existente na fresta, para aços inoxidáveis expostos em ambientes neutros, pode atingir valores próximos a zero;
- A acidificação do ambiente localizado produz um sério aumento da taxa de corrosão da maior parte das ligas metálicas;

³⁵ Adaptado de ROBERGE, P. Corrosion **Engineering** – Principles and Practice. McGraw-Hill, p. 178-179, 2008.

- Os produtos de corrosão selam ainda mais o ambiente da fresta. Pode haver formação de um óxido volumoso, muito maior que o metal de onde ele foi originado, o que pode levar à ruptura local seguida da deformação plástica (p.ex., rompimento de parafusos de ligação);
- A acumulação de cargas positivas na fresta se torna um forte atrator de íons negativos do ambiente, como cloretos e sulfatos – que podem ser muito corrosivos. A Figura 36 ilustra o mecanismo.

Figura 36: Mecanismo básico da corrosão por frestas.



1.7 - A corrosão de estacas metálicas cravadas no solo³⁶

Aços estruturais expostos à atmosfera e ao solo apresentam, fundamentalmente, o mesmo mecanismo básico de corrosão – o mecanismo eletroquímico. As reações anódicas e catódicas são, a princípio, as mesmas.

O que diferencia a corrosão do aço na atmosfera e no solo é a transferência de massa dos reagentes e produtos de reação até o aço, especialmente o oxigênio.

Existem três mecanismos básicos de aeração do solo:

- O oxigênio dissolvido na água de chuva percola o solo. A contribuição desse mecanismo é considerada pequena, devido à baixa solubilidade do oxigênio na água (0,028 ml/ml, a 25°C e 1 atm);
- Fluxo de massa dos gases, devido às alterações de pressão, de 0,1 – 0,2 kPa, criado por turbulência dos ventos sobre a superfície do solo;
- Difusão das moléculas de gás através de porosidades existentes no solo.

³⁶ PANNONI, F.D.; LAZARI, R.P. Durabilidade de Estacas Cravadas no Solo. In: **Anais do Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia** – SEFE VI, 2008, São Paulo. Ver também: OLIVEIRA, L.S. E PANNONI, F.D. Medidas de potencial de corrosão de estacas de aço cravadas em Santos. In: **Anais do Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia**, SEFE VII, 2010, São Paulo.

A difusão das moléculas de gás (O_2) através das porosidades do solo é considerada o mecanismo principal de aeração. A alteração da concentração de O_2 com a profundidade é dada por:

$$(35) \quad \Delta C = \frac{R_t z^2}{2D_e}$$

onde R_t é a velocidade de consumo de O_2 pelas diferentes formas de vida existentes nos solos, z é a profundidade do solo e D_e é o coeficiente de difusão do oxigênio no solo.

Pode-se demonstrar que, para solos úmidos, a pressão parcial de oxigênio cairá de 21 kPa (na superfície) para 16 kPa a 1 m de profundidade. Assim, menos oxigênio será encontrado com o aumento da profundidade.

Abaixo da linha d'água, a quantidade de oxigênio disponível é ainda menor. A difusão gasosa é ainda mais complicada em solos pouco drenados e saturados em água por períodos consideráveis ao longo do ano – como é o caso dos solos de Santos, SP. Nesse caso, a difusão ocorre através do ar e da água em graus variados. A concentração de oxigênio na água em equilíbrio com a pressão parcial de oxigênio na atmosfera a 25°C é de $0,21 \times 0,028 = 0,0059$ ml $O_2 \cdot ml^{-1}$ de água – um valor consideravelmente baixo. Assim, para que a reação catódica possa ocorrer, o oxigênio deverá se difundir através da água – um processo lento, ocasionado pela baixa solubilidade e pequeno coeficiente de difusão do oxigênio na água ($2,6 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$).

O que se passa na interface aço-solo? A reação global que descreve o enferrujamento de uma estaca cravada em um solo com $\text{pH} \approx 7-8$ pode ser descrita pelas mesmas reações apresentadas para a corrosão atmosférica dos aços-carbono.

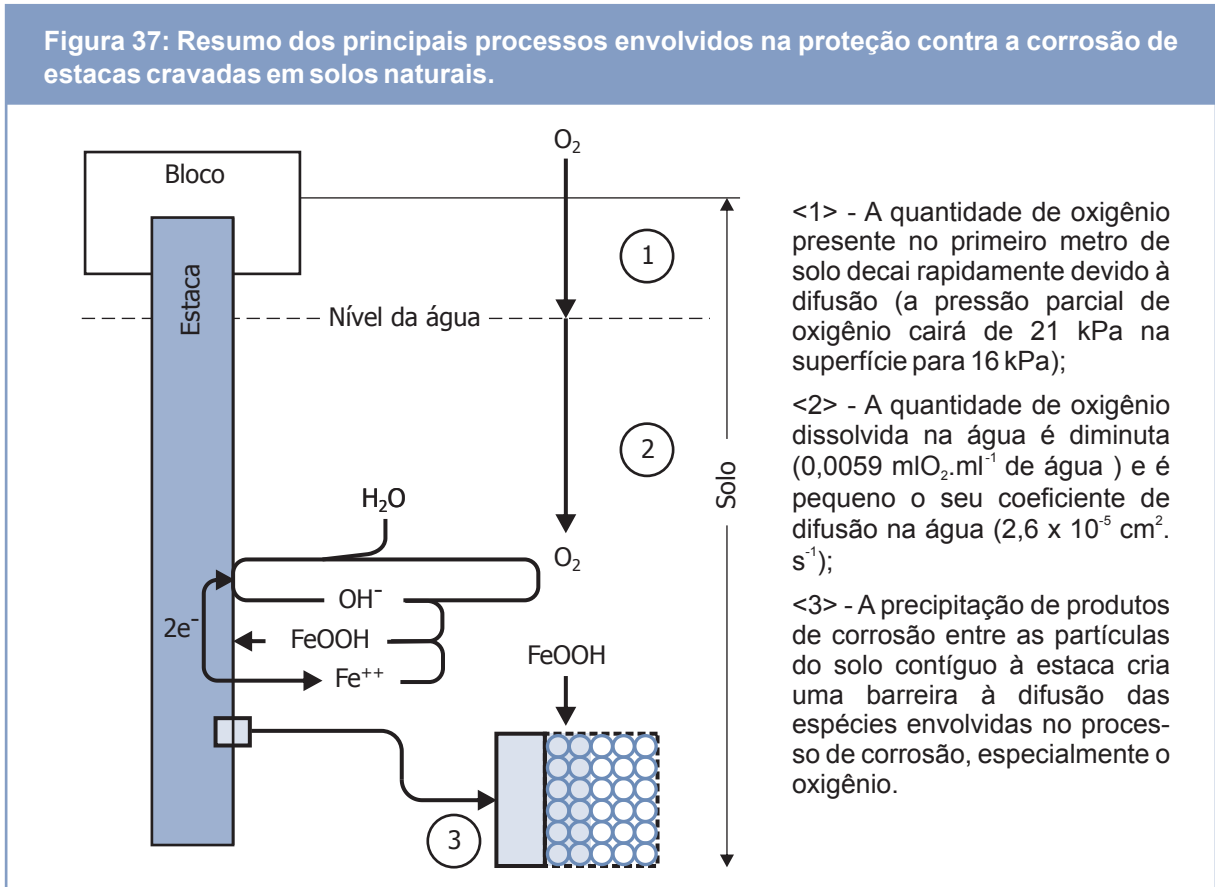
Desde que haja livre trânsito dos íons no solo, teremos a combinação, na fase aquosa contígua à estaca, dos íons Fe^{2+} e OH^- , formando o $\text{Fe}(\text{OH})_2$. Havendo algum oxigênio disponível, esta espécie química será rapidamente transformada em FeOOH (ferrugem) sobre a superfície metálica.

Para que a corrosão aconteça, entretanto, o agente oxidante *deve chegar* à superfície do aço. Do mesmo modo, os produtos de reação devem ser eliminados da superfície metálica através do transporte para o interior do eletrólito, isto é, da água existente entre as partículas constituintes do solo. Se o transporte de massa dos reagentes ou produtos for lento, a concentração de espécies químicas próxima da superfície da estaca será consideravelmente diferente daquela verificada no interior do solo, distante da estaca.

Sob essas condições, as reações envolvidas no processo de corrosão acabam por consumir espécies químicas que, devido à difusão, não são repostas rapidamente. Os primeiros produtos de corrosão formados, precipitados entre as partículas constituintes do solo, no eletrólito, dificultam em muito a difusão das espécies envolvidas no processo de corrosão. Devido ao fato de a velocidade da reação catódica ser proporcional à concentração do reagente na superfície metálica, a velocidade da reação será limitada pela diminuição da concentração do oxidante. Desse modo, o processo de corrosão será totalmente controlado pelo transporte de massa.

É justamente essa a situação verificada na quase totalidade dos solos naturais. A pressão parcial de oxigênio na camada de solo “seco” (acima da linha d'água) é menor do que aquela encontrada na atmosfera contígua à superfície do solo; a concentração de O_2 dissolvido na água, abaixo da linha d'água é diminuta. Finalmente, a precipitação de componentes férricos entre as partículas de solo contíguas à estaca promove uma enorme dificuldade adicional – os reagentes

necessários à ocorrência do processo catódico (redução do oxigênio) não podem atingir a superfície metálica. São esses três fatores os responsáveis pela resistência à corrosão das estacas de aço. A Figura 37 resume esse conceito.



Além dos fatores expostos acima, mais um merece atenção. Quando cravadas em solos granulares, pouco ou medianamente compactados, como as areias finas, solos arenosos, siltosos ou argilosos, as estacas de aço causam uma pequena densificação desses solos, na medida em que o volume da estaca acarreta certa redução do índice de vazios contíguos à estaca. Algum excesso de poropressão pode ocorrer durante o processo de cravação, e a dissipação desses excessos ocorrerá após a execução da estaca, contemplando o processo de densificação. O processo de cravação dessas estacas, próximas entre si, em grupos, também auxilia na redução da porosidade e da compressibilidade do solo dentro e em torno do grupo. Todo esse efeito é, assim, benéfico tanto do ponto de vista do comportamento da estaca (obtem-se maior capacidade de carga e menos recalques) quanto do ponto de vista da resistência à corrosão (diminuindo o volume para a difusão de espécies e para a precipitação de compostos férricos – produtos da corrosão da estaca).

A Norma Brasileira que trata de fundações – a ABNT NBR 6122 – prescreve, para fins de proteção da estaca, uma espessura de sacrifício escolhida em função do tipo e da agressividade do solo. Estacas de aço total e permanentemente enterradas em solos naturais e aterros controlados, independentemente da situação do lençol d'água, podem dispensar tratamento especial, desde que seja descontada uma espessura de sacrifício mínima de 1,0 mm. A parte superior da estaca, que fica desenterrada, deve ser obrigatoriamente protegida pelo encamisamento em concreto ou outro recurso de proteção.

ESTRUTURAS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

2



2.1 - Introdução

Os objetivos fundamentais da segurança contra incêndio são: (1) minimizar o risco à vida e (2) reduzir a perda patrimonial. Entende-se como risco à vida a exposição severa dos usuários da edificação à fumaça ou ao calor e, em menor nível, ao desabamento de elementos construtivos sobre os usuários ou equipe de combate. A principal causa de óbitos, em incêndio, é a exposição à fumaça tóxica ou asfíxiante que ocorre nos primeiros momentos do sinistro. Assim, a segurança depende prioritariamente da rápida desocupação do ambiente.

Edifícios de pequeno porte, de fácil desocupação, exigem menos dispositivos de segurança, e a verificação da estrutura em situação de incêndio pode ser dispensada. Edifícios de maior porte, em que há dificuldade de se avaliar o tempo para desocupação e em que um eventual desabamento pode afetar a vizinhança ou a equipe de combate, exigem maior segurança e verificação das estruturas em incêndio.

Todos os materiais estruturais de uso comum, como concreto, aço, madeira ou alumínio, apresentam profundas alterações em suas propriedades quando sujeitos às altas temperaturas, como as que ocorrem em um incêndio (Figuras 38 a 41). Assim, para que se possa atingir os objetivos fundamentais da segurança contra incêndio, mencionados anteriormente, torna-se fundamental a avaliação da resistência das estruturas sob ação das altas temperaturas. As edificações devem possuir uma resistência ao fogo que permita a desocupação dos ocupantes e a segurança dos bombeiros durante um período de tempo considerado adequado.

Figura 38: Todos os materiais estruturais perdem resistência e rigidez quando aquecidos.

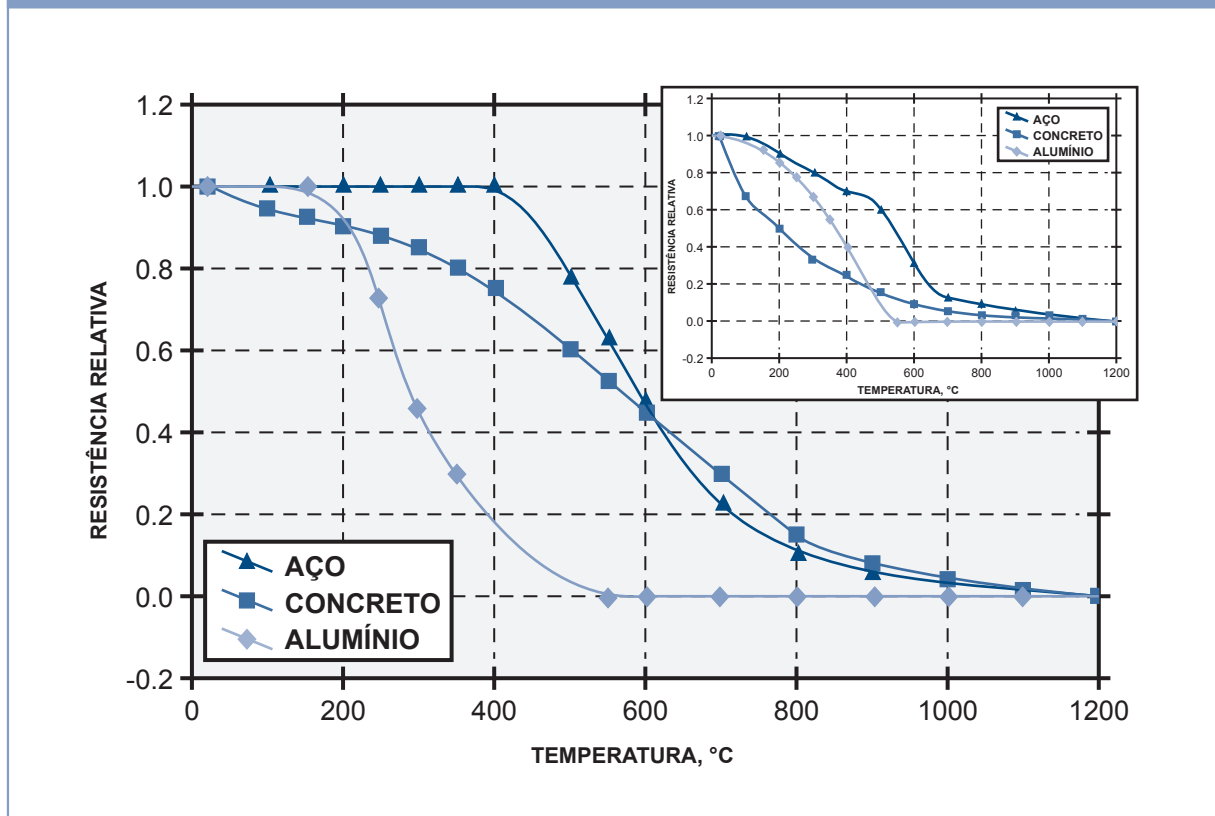


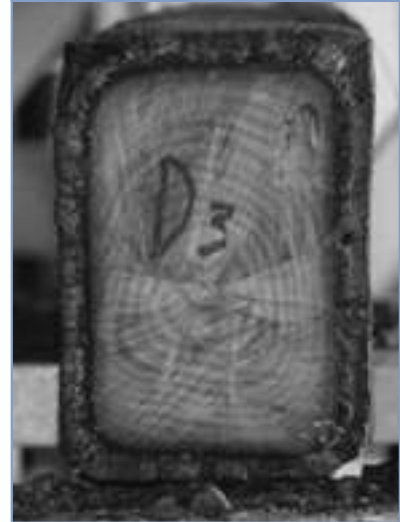
Figura 39 - Efeito do incêndio em elemento isolado de aço.



Figura 40 - Lascamento explosivo (spalling) em pilar de concreto.



Figura 41 - Carbonização de pilar de madeira.



Quando um incêndio é deflagrado em uma edificação, sua ação se faz sentir nos elementos estruturais em maior ou menor intensidade, dependendo de onde o fogo se concentra. Toda a estrutura do edifício encontra-se sob a ação do peso próprio e sobrecargas, de forma que, no início do incêndio, ela está submetida a certo estado inicial de tensões e, portanto, a um determinado estado de deformações. A esse estado inicial de tensões vem sobrepor-se um novo estado de tensões, resultante do aquecimento diferencial a que os elementos estruturais ficam submetidos.

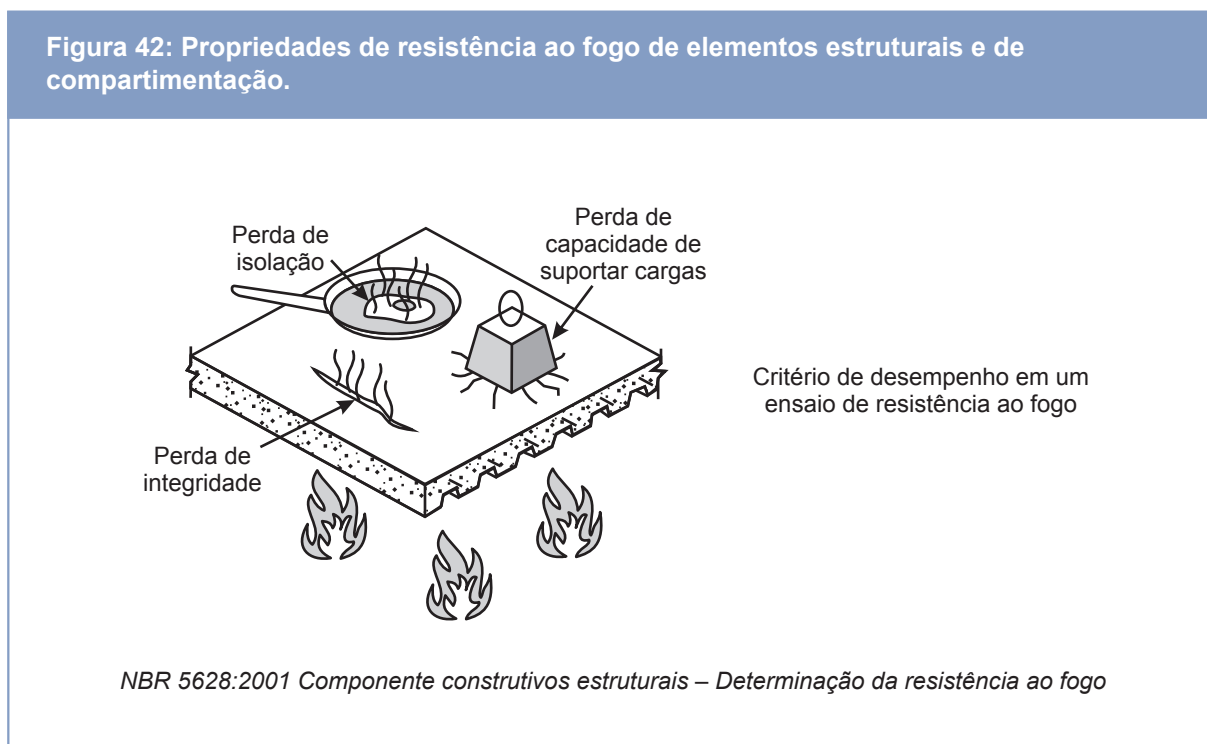
De fato, os vários elementos constituintes da estrutura de um edifício encontram-se mais ou menos rigidamente interligados e, quando alguns deles são mais aquecidos do que outros, as respectivas dilatações térmicas são restringidas, dando origem a um novo estado de tensões, variável no tempo, à medida que o incêndio se desenvolve.

A sobreposição desse estado de tensões com o estado de tensões inicial dá origem a um estado de deformações, que é também variável no tempo. Somando-se a tudo isso, temos a degradação (térmica) das propriedades mecânicas dos materiais que constituem os elementos estruturais. Significa dizer, por exemplo, que um elemento sujeito a um estado de tensões que permaneça constante poderá ter sua capacidade resistente esgotada ao fim de certo período de tempo. A ação do incêndio não se faz sentir unicamente nos elementos diretamente sob a ação do fogo. Em certas situações, elementos relativamente afastados do compartimento de incêndio poderão ser os primeiros a entrar em colapso, em virtude do estado de tensões que as deformações de origem térmica da zona diretamente aquecida impõem ao resto da estrutura.

Segurança e proteção

As medidas de segurança e proteção contra incêndio podem se classificar em ativas e passivas. As medidas ativas preveem a existência de meios adequados ao salvamento das pessoas, começando pelo próprio projeto arquitetônico (corredores e escadas amplas, zonas limpas de gases tóxicos, etc.). Essas medidas também visam reduzir a probabilidade de ocorrência de incêndios severos, através da atuação em suas causas acidentais e da detecção de focos e limitações das possibilidades de propagação.

As medidas de proteção passivas visam reduzir a probabilidade de colapso estrutural caso ocorra um incêndio severo. Essa probabilidade depende da resistência de um elemento de construção à ação do fogo por determinado período, mantendo sua segurança estrutural (estabilidade, estanqueidade e isolamento). A Figura 42 ilustra o conceito.

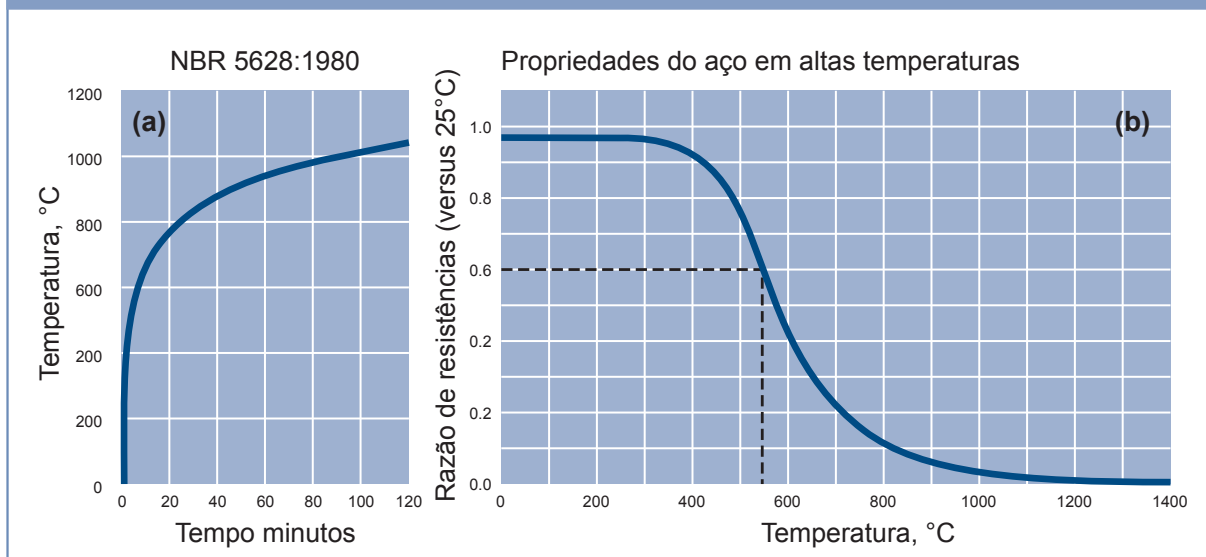


2.2 - Resistência dos componentes de aço ao fogo

Resistência ao fogo é usualmente expressa em termos de atendimento aos ensaios descritos pela ABNT NBR 5628³⁷. Trata-se de uma medida do tempo transcorrido antes que um elemento construtivo exceda limites especificados para a capacidade de suportar cargas (estabilidade), isolamento e estanqueidade. As características do relacionamento tempo-temperatura para o ensaio (o chamado incêndio-padrão) são ilustradas na Figura 43(a).

³⁷ ABNT NBR 5628, Componentes construtivos estruturais – Determinação da resistência ao fogo. Associação Brasileira de Normas Técnicas: Rio de Janeiro (2001).

Figura 43: (a) Curva de aquecimento do forno segundo o “incêndio-padrão”, descrito pela NBR 5628 e (b) Decréscimo da resistência do aço estrutural em função da temperatura.



Como visto, todos os materiais perdem resistência e rigidez quando aquecidos. A resistência mecânica dos aços estruturais tem sido muito bem estudada; é fato conhecido que, à temperatura de 550°C, o aço estrutural reterá 60% da resistência apresentada à temperatura ambiente (Figura 43(b)). Isso é um ponto importante. Antes da introdução do conceito dos estados-limites, quando o conceito de tensões admissíveis era utilizado como base para o projeto, a máxima tensão permitida para um componente era cerca de 60% de sua resistência à temperatura ambiente. Isso levou ao conceito de que 550°C seria a máxima temperatura (ou “temperatura crítica”) a que uma estrutura de aço, sem proteção, poderia resistir antes do colapso.

Pesquisas internacionais recentes têm mostrado, entretanto, que a temperatura-limite (“temperatura crítica”) de um componente estrutural não é um valor fixado em 550°C, mas varia de acordo com o perfil de temperaturas ao longo do componente (isto é, seu gradiente térmico), com seu fator de massividade e com a carga aplicada.

2.3 - As Normas Brasileiras

Estruturas de aço são altamente resistentes ao fogo. Uma série de artigos técnicos tem demonstrado esse fato. Entretanto, um dos pontos mais importantes nos projetos de construção civil é reduzir o risco de incêndios e, caso ocorram, aumentar o tempo de início de deformação da estrutura, conferindo, assim, maior segurança a essas construções. Essa é a razão do estabelecimento, em muitos países, de exigências mínimas de resistência ao fogo para os componentes estruturais. Essas normas de “segurança contra incêndio”, em geral, levam em consideração uma temperatura crítica na qual o aço perde uma proporção significativa de sua resistência mecânica ou atinge um estado-limite de deformações ou de tensões, ou seja, uma temperatura que represente uma condição de falha, que pode representar o colapso da estrutura.

Usualmente, refere-se também a um tempo de resistência ao fogo, ou seja, ao tempo para que a temperatura crítica, ou condição de falha, seja alcançada.

³⁸ ABNT NBR 14432, Dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio. Associação Brasileira de Normas Técnicas: Rio de Janeiro (1999).

A Norma Brasileira NBR 14432³⁸ estabelece as condições a serem atendidas pelos elementos estruturais (aço, concreto, madeira, etc.) e de compartimentação que integram os edifícios para que, em situação de incêndio, seja evitado o colapso estrutural. Ela se aplica a elementos estruturais de concreto, aço, madeira, etc.

As exigências dessa norma são dadas em termos de “Tempos Requeridos de Resistência ao Fogo”, também conhecidos como “TRRF”. O TRRF é definido na própria norma como o “tempo mínimo de resistência ao fogo de um elemento construtivo quando sujeito a um ensaio padronizado”. Esse ensaio padronizado é conhecido como incêndio-padrão.

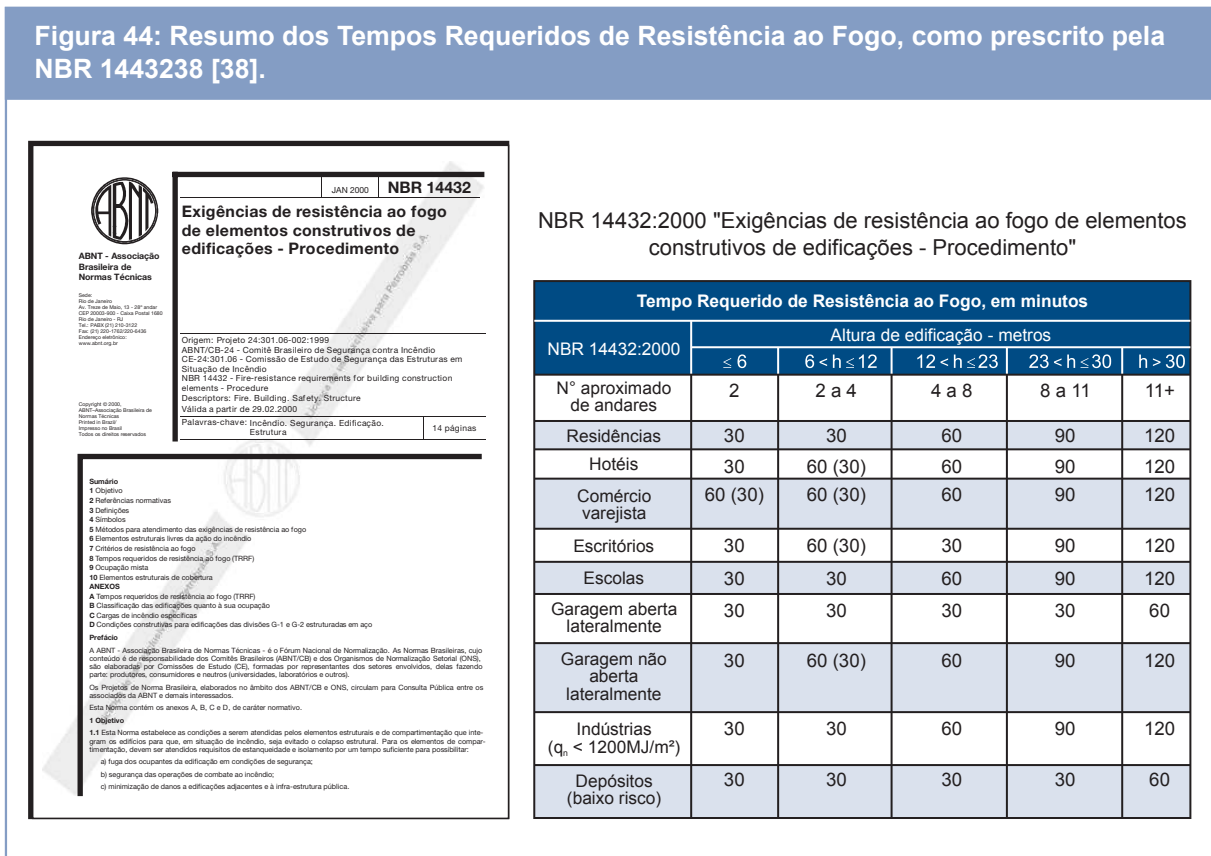
A Norma fornece uma Tabela, resumida abaixo (a Figura 44), com recomendações consagradas, fruto do consenso da sociedade, de TRRF exigidos para cada componente estrutural e de compartimentação que integram a edificação.

Para se ter uma noção da severidade da exigência, um TRRF de 30 minutos equivale a dizer que a estrutura deve permanecer estável por trinta minutos enquanto a atmosfera ao seu redor está a aproximadamente 820°C (1 hora significa 930°C e 2 horas, 1.030°C). Quanto maior a resistência requerida, maior a temperatura a que a estrutura deve resistir sem que ocorra o colapso.

À medida que o risco à vida humana é considerado maior, devido a ocupação, altura do edifício, etc., a exigência torna-se mais rigorosa e maior será o TRRF.

A Norma aceita, como alternativa, o uso de qualquer método cientificamente confirmado ou normatizado, como o Método do Tempo Equivalente, a Análise de Risco como a proposta por Gretener ou ainda métodos avançados de engenharia, chamados em conjunto de “Engenharia de Segurança contra Incêndio”.

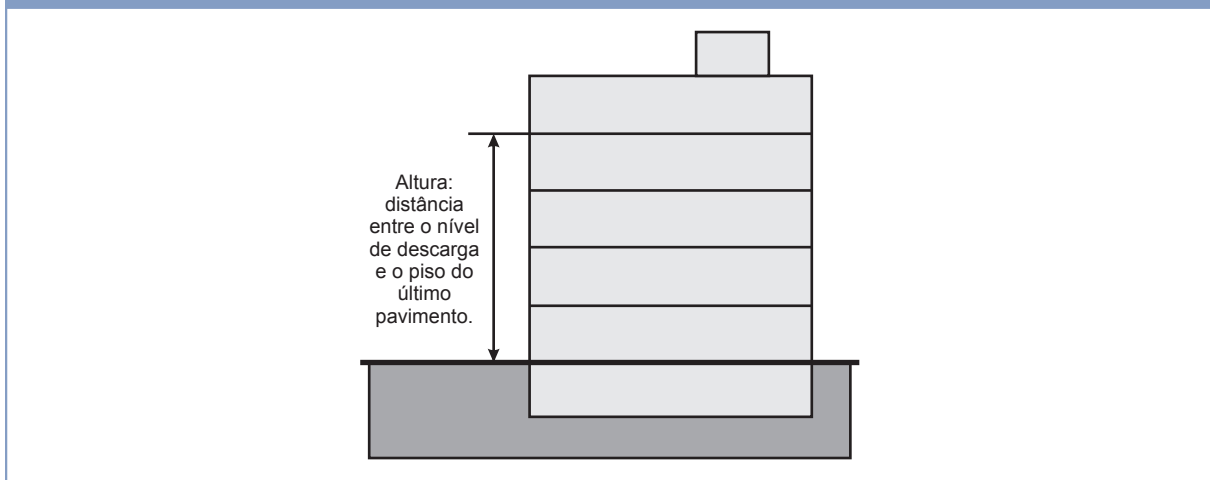
Figura 44: Resumo dos Tempos Requeridos de Resistência ao Fogo, como prescrito pela NBR 14432:2000 [38].



Os aspectos mais importantes da NBR 14432 [38] são os seguintes:

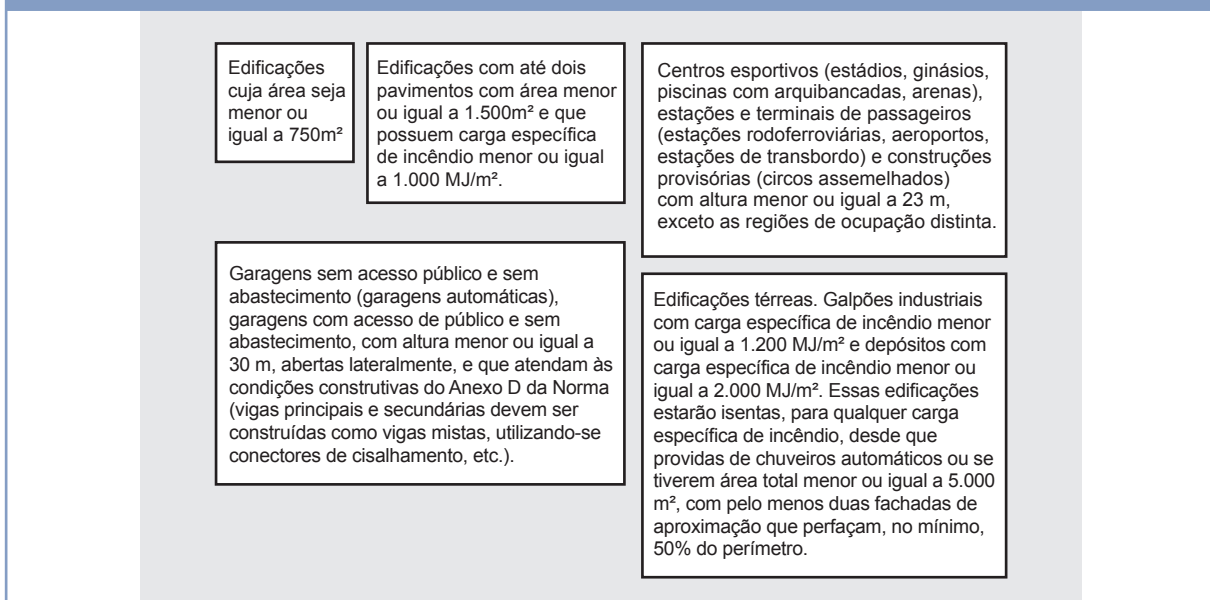
- Os períodos de resistência ao fogo são baseados na altura da edificação e na sua ocupação. Altura da edificação é definida como a distância compreendida entre o ponto que caracteriza a saída situada no nível de descarga do prédio e o piso do último pavimento, excetuando-se zeladorias, barrilete, casa de máquinas, piso técnico e pisos sem permanência humana (Figura 45);
- Os tempos entre parênteses existentes na tabela de Tempos Requeridos de Resistência ao Fogo (TRRF), parcialmente reproduzidos na Figura 44, podem ser utilizados em edificações nas quais cada pavimento acima do solo tenha área menor ou igual a 750 m²;

Figura 45: Definição de altura da edificação, como estabelecido na NBR 14432 [38].



- O maior TRRF é de 120 minutos;
- Estão isentas dos requisitos de resistência ao fogo algumas edificações, descritas na Figura 46. É importante recorrer à norma original, para que se possam compreender detalhes construtivos adicionais, necessários à obtenção da isenção.

Figura 46: Exemplos de edificações isentas de verificação, segundo a NBR 14432 [38].



Apesar de a NBR 14432 [38] ser válida para todo o Brasil, é importante verificar a existência de algum regulamento local específico.

2.4 - Métodos de dimensionamento

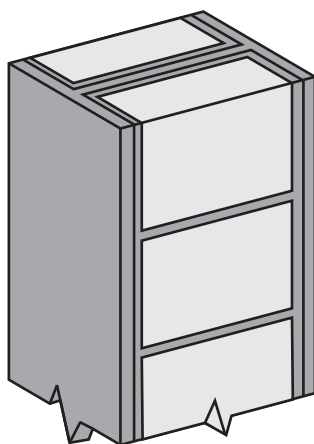
2.4.1 - O aço parcialmente protegido

Ensaio realizados por todo o mundo têm mostrado que os componentes estruturais que não estão totalmente expostos ao fogo podem exibir um nível substancial de resistência, sem o emprego de materiais de proteção antitérmica “tradicionais”. Vários métodos têm sido desenvolvidos, utilizando esse efeito, que permitem atingir tempos de resistência ao fogo de 30 a 60 minutos. Quando tempos maiores de resistência forem requeridos, uma redução da espessura do material de proteção antitérmica “tradicional” ainda pode ser aplicada ao aço, pois o perímetro aquecido torna-se menor do que aquele observado no caso de exposição completa. Assim, a utilização de componentes parcialmente protegidos pode propiciar grande economia.

Existem, basicamente, três modos de aplicação desse princípio:

Pilares preenchidos com blocos (Figura 47). Pode-se atingir 30 minutos de resistência ao fogo através do uso de blocos de concreto celular autoclavado cimentados entre as mesas de perfis laminados. Períodos maiores de resistência podem ser obtidos pela proteção das mesas expostas com materiais de proteção antitérmica “tradicionais”.

Figura 47: Pilar protegido com concreto celular autoclavado.



Pilares preenchidos com concreto (Figura 48). Pode-se atingir 60 minutos de resistência ao fogo quando o concreto moldado “in loco” é utilizado para o preenchimento do volume existente entre as mesas do pilar. Utiliza-se, nesse caso, para a fixação, conectores de cisalhamento conectados à alma do perfil. A capacidade de carregamento do concreto é ignorada no projeto do pilar, mas, em situação de incêndio, conforme o aço vai perdendo resistência em altas temperaturas, a carga vai sendo continuamente transferida das mesas do perfil para o concreto, de modo progressivo. Essa medida fornece estabilidade do componente por até 60 minutos. A região da conexão, no topo do pilar, é protegida como no restante do componente;

Vigas utilizando cantoneiras presas à alma (Figura 49). Vigas contendo cantoneiras soldadas ou parafusadas na alma, suportando a laje de piso, podem resistir por até 60 minutos de fogo. Essa geometria protege a parte superior da viga do incêndio, enquanto a parte inferior continua exposta. A resistência ao fogo aumenta conforme as cantoneiras são movidas para regiões inferiores da mesa, atingindo, assim, os 60 minutos de resistência.

Figura 48: Pilar protegido com concreto moldado in loco.

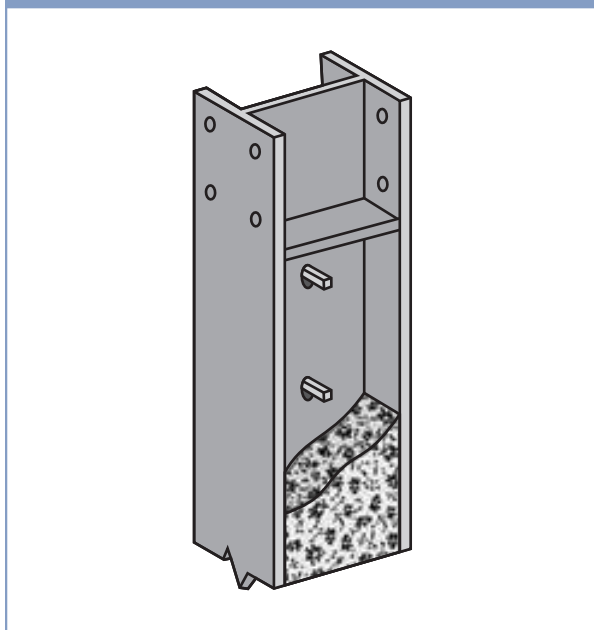
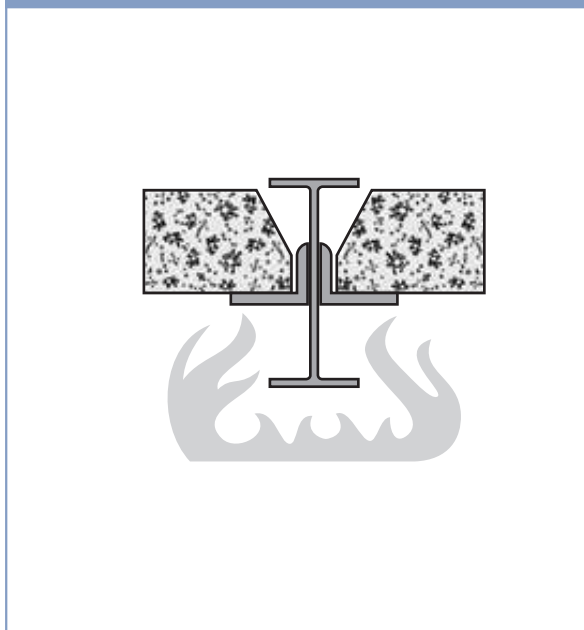


Figura 49: Vigas utilizando cantoneiras presas à alma.



2.4.2 - Aplicação de materiais tradicionais de proteção antitérmica

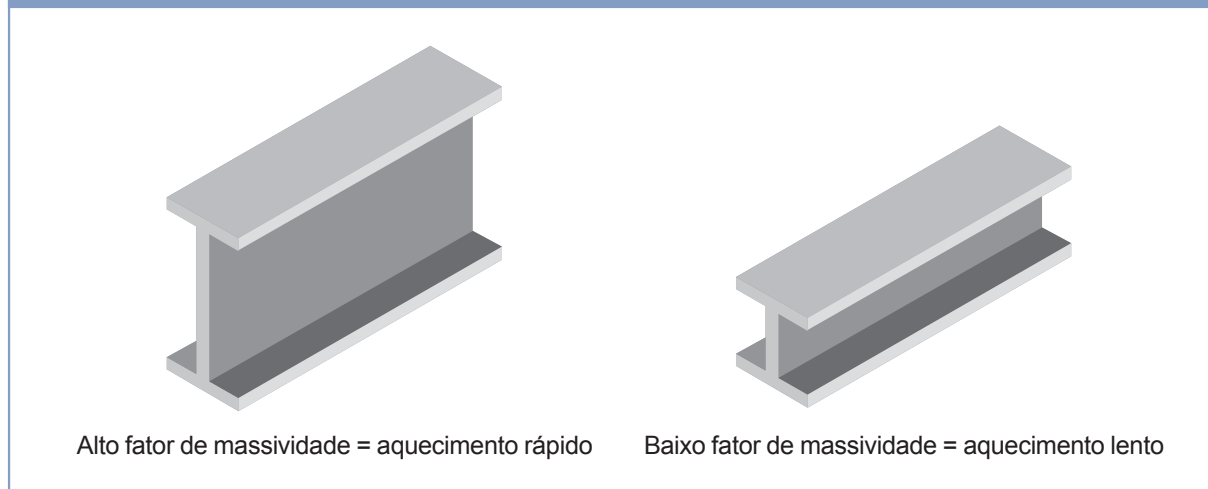
A resistência ao fogo de certo componente é expressa em unidades de tempo. Desse modo, um dos fatores que contribuem para essa variável é a velocidade com que um componente é aquecido. Essa velocidade governa o tempo que se leva para atingir a temperatura de colapso (ou temperatura crítica) do componente. A velocidade de aquecimento varia de acordo com as dimensões da seção.

Uma seção robusta será aquecida mais lentamente do que uma seção esbelta. Há certa inércia no aquecimento de elementos mais “pesados” do que no aquecimento de elementos mais “leves”. Esse efeito de massividade é quantificado pelo conceito de “Fator de Massividade”:

$$\text{Fator de Massividade, } (m^{-1}) = [\text{perímetro exposto ao fogo, } m] / [\text{área da seção transversal, } m^2]$$

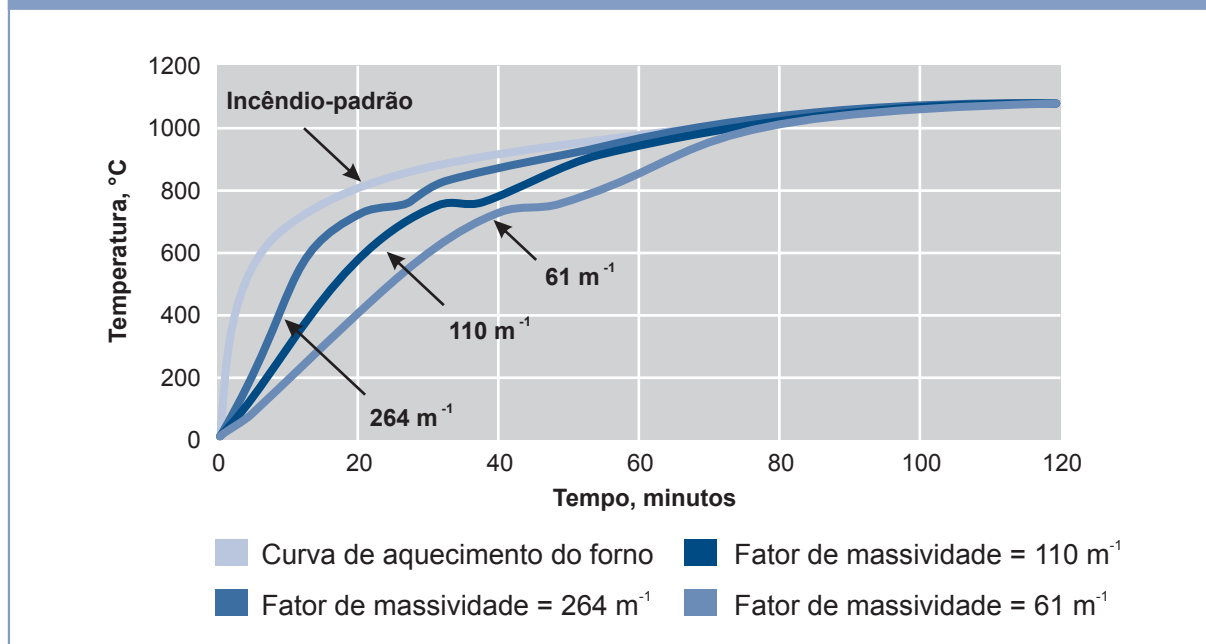
A Figura 50 ilustra o conceito de “Fator de Massividade”.

Figura 50: O conceito de “Fator de Massividade”



Um exemplo desse conceito é ilustrado na Figura 51, que mostra a velocidade de aquecimento para três perfis metálicos não protegidos, quando submetidos ao ensaio denominado “incêndio-padrão”. Como seções mais robustas (baixo “Fator de Massividade”) se aquecem mais lentamente do que seções mais esbeltas (alto “Fator de Massividade”), uma seção mais robusta necessitará de menos materiais de proteção antitérmica (\approx “proteção passiva”) do que uma seção esbelta para atingir a mesma resistência ao fogo.

Figura 51: Curvas de velocidade de aquecimento de três diferentes perfis estruturais não protegidos, durante o ensaio do incêndio-padrão.



2.4.3 - Perfis Laminados I e H

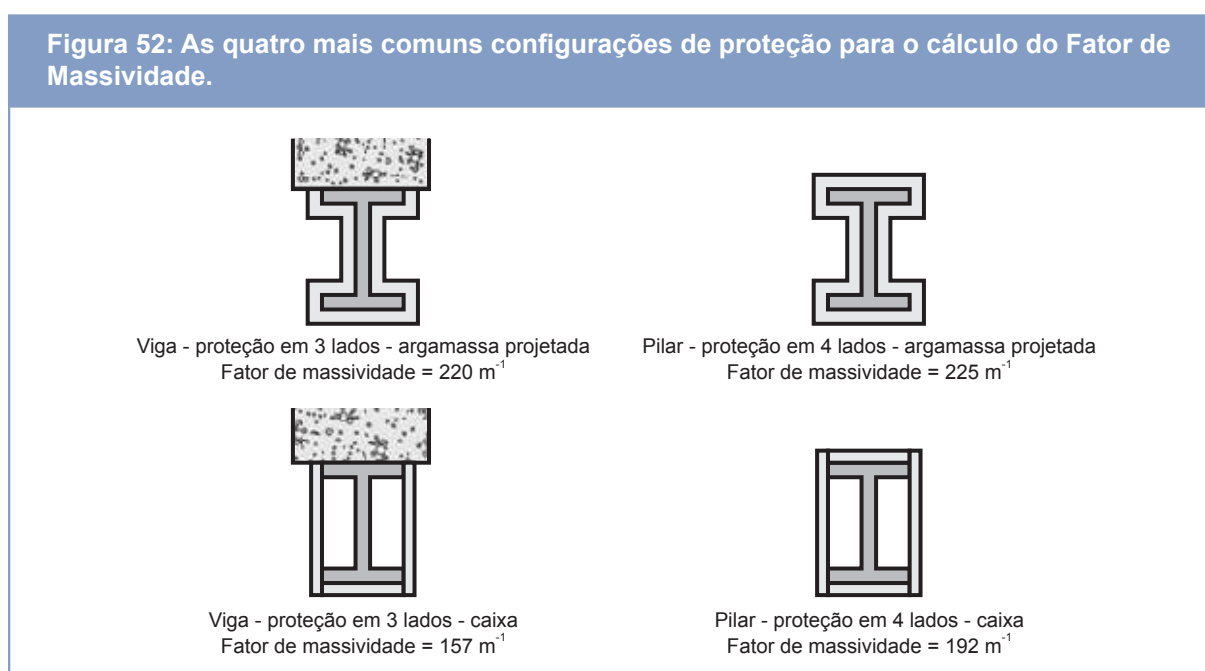
Quando materiais de proteção antitérmica (\approx proteção passiva) são necessários para o atendimento da resistência ao fogo exigido pela norma, a espessura a ser aplicada pode ser determinada a partir dos dados publicados pelos fabricantes de materiais de proteção antitérmica.

Muitos desses dados podem ser encontrados na *internet*. Como exemplo, citamos uma publicação inglesa, conhecida como “Yellow Book”³⁹. Ela é publicada pela *Association of Specialist Fire Protection* (ASFP) e pelo *The Steel Construction Institute* (SCI) e traz informações (as “cartas de cobertura”) de um grande número de materiais utilizados na Inglaterra. Como vários dos produtos lá descritos são importados e por aqui comercializados (ou mesmo aqui fabricados, sob licença), as informações disponíveis podem ser de utilidade.

As recomendações dos fabricantes de materiais de proteção antitérmica relacionam a espessura da proteção ao Fator de Massividade de dado componente, para um Tempo Requerido de Resistência ao Fogo. De modo geral, as recomendações são derivadas das normas NBR 5628 [37], BS 476⁴⁰ ou ASTM E 119⁴¹. O conceito por trás da proteção é o de restringir a temperatura dos componentes de aço submetidos a incêndio a 550°C – ou outra temperatura especificada. Assim, quando houver dados disponíveis de fabricantes para outras temperaturas, eles poderão ser utilizados, trazendo possivelmente alguma economia com materiais de proteção.

Valores típicos de Fator de Massividade, para perfis estruturais I e H utilizados na construção civil, estão situados na faixa de 20 a 325 m⁻¹. Os perfis Gerdau possuem Fatores de Massividade que variam entre 400 m⁻¹ (W150x13,0, utilizado como pilar, cujos quatro lados são expostos ao fogo, tendo como proteção térmica um material projetado) e 70 m⁻¹ (W610x174,0, utilizado como viga, com três lados expostos ao fogo, tendo como proteção térmica uma caixa).

A Figura 52 ilustra as quatro configurações de proteção para um perfil W250x32,7. Para se determinar a espessura de, p.ex., um material projetado, para uma condição de uso do W250x32,7 como viga (três lados expostos), e para uma hora de resistência ao fogo, devemos primeiro definir o Fator de Massividade – no caso, 220m⁻¹. Em seguida, devemos buscar as cartas de cobertura das argamassas projetadas disponíveis no Brasil. Como exemplo, a Tabela XI mostra uma das cartas de cobertura desses materiais. Ela foi retirada do “Yellow Book” inglês.



³⁹ O “Yellow Book” pode ser baixado gratuitamente de: http://asfp.associationhouse.org.uk/default.php?cmd=210&doc_category=119.

⁴⁰ **BS 476:** Part 23, Fire tests on building materials and structures – Methods for determination of the contribution of components to the fire resistance of a structure. British Standard Institution, London.

⁴¹ **ASTM E119,** Standard test methods for fire tests of building constructions and materials. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, USA (2000).

Tabela XI: Carta de cobertura para uma argamassa projetada. Os dados foram retirados da publicação “Yellow Book”.

Fator de massividade	Espessura seca, em mm, para fornecer um TRRF (minutos) de			
	30	60	90	120
30	10	10	10	12
50	10	10	13	16
70	10	10	15	20
90	10	12	17	22
110	10	13	18	24
130	10	14	19	25
150	10	14	20	27
170	10	15	21	28
190	10	15	22	29
210	10	16	22	29
230	10	16	23	30
250	10	16	23	30
270	10	17	24	31
290	10	17	24	31
310	10	17	24	32

Interpolação linear é permitida entre os valores de Fator de Massividade.

A observação da Tabela XI mostra que, para um perfil W250x32,7, utilizado como viga (isto é, três lados expostos), para um Tempo Requerido de Resistência ao Fogo de uma hora, deveremos aplicar a argamassa projetada na espessura seca de 16 mm. O mesmo tipo de cálculo deve ser feito para todos os componentes estruturais da edificação.

Esse procedimento fornece um método simples para o estabelecimento da proteção dos componentes estruturais de uma edificação.

Perfis castelados e celulares necessitam de proteção extra. A espessura do material de proteção deve ser 20% maior do que aquela determinada para o fator de massividade do perfil original, anterior ao corte e à solda. Isso é válido para placas rígidas ou semirrígidas e para materiais projetados.

O perfil W250x32,7 do exemplo anterior, se transformado em um perfil castelado ou celular, receberá $1,2 \times 16 = 19,2$ mm (arredondado a 20 mm) de argamassa projetada.

Essa regra dos 20% não é adequada ao uso com tintas intumescentes, e estudos recentes têm mostrado que a quantidade de proteção adicional é específica a um dado produto. Assim, deve-se consultar o fabricante da tinta intumescente utilizada para saber quanta tinta a mais deverá ser aplicada nesses casos.

2.4.4 - Materiais tradicionais de proteção térmica

Materiais utilizados na proteção antitérmica “tradicionais” (também chamados de materiais de “proteção passiva”) isolam a estrutura de aço dos efeitos das altas temperaturas que podem ser

geradas por um incêndio. Eles podem ser divididos em três grupos, como materiais projetados, materiais rígidos ou semirrígidos e materiais intumescentes:

Materiais projetados. É uma das formas mais baratas de proteção. Suas principais características são:

- **Custo.** A proteção por materiais projetados custa, de modo geral, menos do que o menor custo do concorrente mais próximo (que são os materiais rígidos ou semirrígidos). Como é pequeno em relação à mão de obra empregada, o custo do produto não cresce na proporção do aumento dos tempos de resistência ao fogo;
- **Aplicação.** É muito simples cobrir detalhes complexos;
- **Durabilidade.** Não exigem nenhum tipo de manutenção ao longo do tempo. Alguns materiais podem ser utilizados externamente – estes custam mais caro do que aqueles utilizados internamente;
- **Preparo de superfície.** Vários dos materiais podem ser aplicados diretamente sobre a superfície do aço. Não exigem, em geral, preparo de superfície anterior, a não ser a retirada de carepas e ferrugens soltas, assim como óleos e graxas, que impedirão a perfeita adesão dos produtos;
- **Aparência.** Materiais projetados não possuem uma aparência agradável. Desse modo, costumam ser utilizados em situações em que os componentes não sejam visíveis;
- **Aplicação.** Como é aplicado úmido, esse tipo de material pode interferir significativamente no cronograma da obra. Como resultado, o custo real da proteção por materiais projetados pode ser superior àqueles assumidos utilizando-se tão somente os custos de aplicação.

A Figura 53 ilustra a aparência de uma argamassa projetada aplicada.

Figura 53: Vigas protegidas por argamassa projetada.



Materiais rígidos ou semirrígidos. São materiais aplicados, de modo geral, internamente à edificação, estando aparentes ou não. Suas principais características são:

- **Aparência.** Placas rígidas, como o gesso acartonado, oferecem uma aparência limpa, na forma de caixa, que pode sofrer decoração posterior. Lã de rocha basáltica e fibra cerâmica, por outro lado, não têm aparência agradável e são utilizadas, frequentemente, em situações em que o sistema não seja visível;

- **Fixação.** A fixação é feita a seco e não interfere significativamente com outros produtos;
- **Qualidade garantida.** Os materiais são feitos em fábrica; assim, a espessura aplicada é garantida;
- **Preparo superficial.** Esses produtos são aplicados diretamente sobre o aço, sem nenhum tipo de pré-tratamento;
- **Custo.** São relativamente baratos, entretanto, um sistema de proteção que tenha funções decorativas pode custar bem mais caro;
- **Aplicação.** A montagem ao redor de detalhes complexos pode ser trabalhosa. Um bom exemplo são as ligações;
- **Velocidade.** A aplicação desses produtos é mais lenta do que aquela verificada para os outros sistemas.

A Figura 54 ilustra a aparência de um sistema de proteção antitérmica composto de mantas de lã de rocha basáltica.

Figura 54: Vigas protegidas por lã de rocha basáltica.



Materiais intumescentes. São materiais aparentados das tintas de proteção contra a corrosão. São inertes em baixas temperaturas, mas proporcionam isolamento térmico através da intumescência (ou “inchamento”), que ocorre em temperaturas de aproximadamente 200°C a 230°C. Esse “inchamento” da camada intumescente gera uma camada carbonizada de materiais de baixa condutividade térmica, que funcionam como isolante térmico. As propriedades mecânicas do aço não são afetadas até temperaturas próximas de 400°C. Assim, quando o revestimento intumescente começar a “inchar”, o aço ainda estará com toda sua resistência original. Algumas de suas principais características são:

- **Estética.** A camada fina permite que a forma do aço seja apresentada em sua plenitude;
- **Acabamento.** O acabamento é atraente, pois, sobre o revestimento intumescente, aplica-se, normalmente, uma tinta de acabamento na coloração desejada;
- **Reparos.** Os reparos posteriores podem ser feitos facilmente;
- **Custo.** O custo será, normalmente, superior àquele verificado para as outras formas de proteção. Entretanto, eles têm decrescido com o tempo;

- **Aplicação.** É uma aplicação tipicamente “úmida”, que requer condições atmosféricas favoráveis – exatamente como no caso das tintas em geral. Deve-se atentar para a obtenção de super-recobrimentos, que são prejudiciais;
- **Tempos de proteção ao fogo limitados.** A maior parte dos revestimentos intumescentes fornece proteção, de forma econômica, por até 60 minutos. Atualmente, existem tintas intumescentes no mercado que são competitivas com outros sistemas de proteção por até 90 minutos. Poucas tintas intumescentes podem atingir 120 minutos de resistência ao fogo. A Figura 55 ilustra uma aplicação de tinta intumescente.

Figura 55: Estrutura protegida por tinta intumescente.



Concreto, tijolos e outros sistemas tradicionais. Concreto era, até os anos 70, a forma usual de proteção das estruturas de aço. A introdução de materiais mais leves, como as argamassas projetadas, os produtos rígidos e semirrígidos e as tintas intumescentes, trouxe uma dramática redução em seu uso. As principais características desses produtos são:

- **Durabilidade.** A aplicação desses produtos tende a ser utilizada em locais onde o dano por impacto, abrasão e exposição ao tempo são fatores a serem considerados;
- **Custo.** O enclausuramento em concreto é uma das formas de proteção mais baratas. Ele rivaliza, por vezes, com os materiais projetados;
- **Velocidade.** É feito em campo e consome tempo do cronograma da obra;
- **Utilização dos espaços.** Grandes espessuras roubam espaço ao redor dos pilares;
- **Peso.** O peso da edificação pode aumentar consideravelmente.

O Anexo B da Instrução Técnica 08⁴², do Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo, reproduzida na Figura 56, traz a resistência ao fogo para alvenarias e pode ser de muita utilidade na especificação de um sistema de proteção com base nesse tipo de materiais.

A Figura 57 ilustra um pilar misto, aço-concreto.

⁴² **Instrução Técnica 08/2011:** Segurança estrutural nas edificações – Resistência ao fogo dos elementos de construção. Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo. Pode ser baixado de http://www.corpodebombeiros.sp.gov.br/dsci_publicacoes2/_lib/file/doc/IT_08_2011.pdf.

Figura 56: Resistência ao fogo para alvenarias, conforme descrita na I.T. 08/2004, do Corpo de Bombeiros de São Paulo.

Paredes ensaiadas (*)	Características das paredes										Resultado dos ensaios					
	Traço em volume da argamassa do assentamento			Espessura média da argamassa de assentamento (cm)			Traço em volume de argamassa de revestimento				Espessura de argamassa de revestimento (cada face) (cm)	Duração do ensaio (min)	Tempo de atendimento aos critérios de avaliação (horas)			Resistência ao fogo (horas)
	Cimento	Cal	Areia	Espessura	Emboço			Integridade	Estanqueidade	Isolação térmica						
					Chapisco	Areia	Cimento				Cal	Areia				
Paredes de tijolos de barro cozido (dimensões nominais dos tijolos) 5 cm x 10 cm x 20 cm; Massa: 1,5 kg	Meio tijolo sem revestimento	1	5	1	-	-	-	-	-	-	10	120	≥ 2	≥ 2	1 1/2	1 1/2
	Um tijolo sem revestimento	-	1	5	1	-	-	-	-	-	20	395 (**)	≥ 6	≥ 6	≥ 6	≥ 6
	Meio tijolo sem revestimento	-	1	5	1	3	1	2	9	2,5	15	300	≥ 4	≥ 4	4	4
	Um tijolo sem revestimento	-	1	5	1	3	1	2	9	2,5	25	395 (**)	≥ 6	≥ 6	≥ 5	≥ 6
Paredes de blocos vazados de concreto 2 furos (blocos com dimensões nominais: 14 cm x 19 cm x 39 cm e 19 cm x 19 cm x 39 cm; e massas de 13 kg e 17 kg respectivamente)	Bloco de 14 cm sem revestimento	1	1	8	1	-	-	-	-	-	14	100	≥ 1 1/2	≥ 1 1/2	1 1/2	1 1/2
	Bloco de 19 cm sem revestimento	1	1	8	1	-	-	-	-	-	19	120	≥ 2	≥ 2	1 1/2	1 1/2
	Bloco de 14 cm sem revestimento	1	1	8	1	3	1	2	9	1,5	17	150	≥ 2	≥ 2	2	2
Paredes de tijolos cerâmicos de oito furos (dimensões nominais dos tijolos 10 cm x 20 cm x 20 cm (massa 2,9 kg))	Bloco de 19 cm sem revestimento	1	1	8	1	3	1	2	9	1,5	22	185	≥ 3	≥ 3	3	3
	Meio tijolo com revestimento	-	1	4	1	3	1	2	9	1,5	13	150	≥ 2	≥ 2	2	2
Paredes de concreto armado monolítico sem revestimento	Um tijolo com revestimento	-	1	4	1	3	1	2	9	1,5	23	395 (**)	≥ 4	≥ 4	≥ 4	> 4
	Traço de concreto em volume, 1 cimento: 2,5 areia média: 3,5 agregado gáudio (granizo pedra nº3): armadura simples posicionada à meia espessura das paredes, possuindo malha de lados 15 cm, de aço CA-50A diâmetro simples 1/4 polegada	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11,5	150	2	2	2
											16	210	3	3	3	3

(*) Paredes sem função estrutural ensaiadas, totalmente vinculadas dentro da estrutura de concreto armado, com dimensões 2,8 m x 2,8 m, totalmente expostas ao fogo (em uma face).

(**) Ensaio encerrado sem ocorrência de falência em nenhum dos três critérios de avaliação.

Figura 57: Pilar misto aço-concreto, ilustrando a proteção do aço pelo concreto.



A Tabela XII resume as principais características dos principais produtos utilizados na proteção das estruturas de aço.

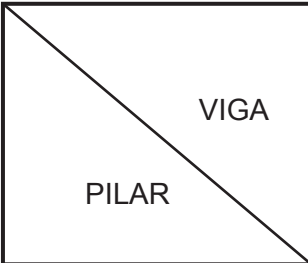


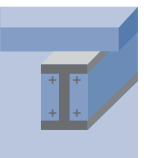







Tabela XII – Resumo das principais características dos materiais de proteção antitérmica “tradicionais”

	Materiais projetados	Materiais rígidos ou semirrígidos	Materiais intumescentes
Custo relativo	Baixo a médio	Baixo a médio	Médio a alto
Aplicação (úmida ou seca)	Úmida	Em geral, seca	Úmida
Limpeza durante aplicação	Suja – A proteção de superfícies adjacentes é necessária	Relativamente limpa	A Proteção é necessária às superfícies adjacentes
Equipamentos necessários	Equipamentos especiais são necessários	Ferramental simples	Equipamentos utilizados normalmente em pintura
Uso interno/externo	Interno e externo	Interno; para uso externo, existe a necessidade de proteção adicional	Interno, com alguns sistemas externos
Preparação	Nenhum tipo de primer é requerido para uso interno, mas as superfícies devem estar limpas e serem compatíveis	Não há necessidade de preparo prévio	Uma tinta de fundo compatível é necessária, aplicada sobre superfícies de aço previamente limpas
Robustez	Relativamente frágil; pode ser vulnerável a danos mecânicos. Alguns revestimentos são inadequados às áreas abertas	Algumas placas rígidas são relativamente frágeis e podem ser vulneráveis ao dano mecânico; materiais semirrígidos podem requerer cobertura adicional	Semelhante aos sistemas de pintura tradicionais
Acabamento	Acabamento texturizado	Variável: materiais rígidos são normalmente lisos, com juntas visíveis, a menos que um acabamento seja aplicado; materiais semirrígidos são texturizados, com a fixação visível.	Liso ou levemente texturizado; um acabamento decorativo colorido pode ser aplicado
Retenção mecânica	Necessária quando a espessura é elevada e em algumas geometrias específicas	Requer, normalmente, algum tipo de retenção	Normalmente não necessita
Faixa de espessuras	10 a 75 mm	Camadas múltiplas podem ser necessárias; Placas de 6 a 100 mm e mantas de 12 a 76 mm	Camadas de 0,3 a 6,5 mm
Resistência máxima ao fogo	240 minutos	240 minutos	120 minutos

2.4.5 - Combinação de métodos de proteção

As soluções de projeto descritas abaixo, na Figura 58, podem ser combinadas, de modo a propiciar o tempo de resistência ao fogo de dada edificação, como prescrito na NBR 14432 [38], a custo mínimo.

Figura 58: Resistência ao fogo, em minutos, que pode ser economicamente obtida por intermédio de várias formas construtivas.

 PILAR \ VIGA		 Viga desprotegida	 Cantoneiras na alma	 Parcialmente protegida	 Viga protegida
		 Pilar desprotegido	15	15	15
 Blocos na alma	15	30	30	30	
 Concreto	15	60	60	60	
 Concreto armado	15	60	>60	>60	
 Tubo preenchido	15	60	>60	>60	
 Pilar protegido	15	60	>60	>60	

2.4.6 - Os ensaios de Cardington

Entre os anos de 1994 e 2003, um conjunto de ensaios de grande porte foi feito em uma edificação especialmente construída para essa finalidade. O edifício, de oito andares, estruturado em aço, utilizava o conceito de viga mista e forma de aço incorporada (“steeldeck”). Os ensaios foram feitos nas dependências do Building Research Establishment, em Cardington, Inglaterra.

O programa de testes foi dividido em duas partes. A primeira série tratou de ensaios realizados em uma viga mista, isolada, e três outros ensaios em grandes compartimentos. Essa primeira série de ensaios foi patrocinada pela British Steel (atual Tata) e pela European Coal and Steel Community (atualmente Research Fund for Coal and Steel). Um programa de ensaios complementar, compreendendo três ensaios em compartimentos, foi patrocinado pelo Governo Britânico e desenvolvida pelo Building Research Establishment (BRE).

Os ensaios foram efetuados com o objetivo de determinar se o desempenho de edificações reais era melhor que o sugerido pelos ensaios laboratoriais de elementos construtivos individuais, segundo o conceito do “incêndio-padrão”. Existiam evidências de que esta era a situação. Incêndios reais na Inglaterra, ensaios em modelos realizados na Austrália, ensaios laboratoriais realizados por todo o mundo e o modelamento computacional do comportamento estrutural apontavam esse caminho. Em todos esses casos, vigas mistas tinham demonstrado resistência e robustez ao fogo muito maior do que o indicado por ensaios em vigas sem interação com a laje.

De modo a obter uma comparação direta com o ensaio do incêndio-padrão, o primeiro teste foi feito em uma viga simples, sem interação com a laje, não protegida, e em toda a região periférica à viga. Os resultados indicaram que a falha (isto é, a deflexão máxima permitida pelo código inglês) ocorreu em temperaturas superiores a 1.000°C – muito maior do que a temperatura de 700°C na qual viga semelhante havia falhado no ensaio do “incêndio-padrão”.

Ensaio posteriores foram efetuados em compartimentos de tamanho variável, indo de 50 m² a 340 m², com carga de incêndio composta por gás, madeira e mobiliário comum de escritório. As colunas foram protegidas, mas as vigas não. Embora a temperatura dos gases da atmosfera dos ensaios tivessem superado os 1.200°C e a temperatura das vigas não protegidas, os 1.100°C no pior caso, nenhum colapso estrutural ocorreu. Esses resultados desencadearam intensos estudos posteriores, culminando com o que, atualmente, se conhece como métodos avançados⁴³.

2.4.7 - Resistência ao fogo de vigas mistas

Nos edifícios de estrutura metálica, tem sido prática comum o uso de pisos mistos, ou seja, pisos formados por vigas mistas e lajes mistas (lajes de concreto com fôrma de aço incorporada).

No dimensionamento em situação de incêndio, geralmente se utilizam procedimentos tradicionais de cálculo, pelos quais as lajes têm a função de conduzir as cargas gravitacionais para as vigas, que, por sua vez, ficam com a responsabilidade final de transmitir tais cargas para os pilares. Isso significa que lajes e vigas são dimensionadas isoladamente, ignorando-se uma resistência adicional que poderia ser proporcionada pela interação entre esses dois elementos.

Como consequência, na maioria das vezes, torna-se necessário recobrir os perfis de aço de todas as vigas mistas por material de proteção térmica e a colocação de armadura positiva adicional no interior das nervuras da fôrma de aço.

Os ensaios de Cardington foram realizados em um edifício de oito andares e 45 x 30 m em planta, com pisos constituídos por vigas mistas e lajes mistas, as quais foram reforçadas por uma malha de aço soldada situada acima das nervuras da fôrma, que funcionava como armadura positiva sob altas temperaturas.

Foram usados tanto incêndios reais como incêndios de gás não padronizados, não sendo seguida, portanto, a curva do incêndio-padrão. Apesar disso, para efeito prático, as temperaturas foram interpretadas em termos da curva de incêndio-padrão citada.

⁴³ O conjunto completo dos resultados de ensaios da Corus pode ser obtido no site www.structuralfiresafety.org.

Os resultados dos testes, acompanhados de pesquisas complementares, foram sintetizados para uso prático em publicação do Steel Construction Institute, mostrando que os pisos mistos, desde que as lajes tenham o reforço da malha de aço soldada, podem apresentar uma resistência muito superior àquela que seria obtida pelos procedimentos de cálculo tradicionais. Tal fato deve-se, principalmente, à habilidade das lajes mistas reforçadas pela malha de aço de suportar as vigas mistas que falham no incêndio e de transferir as ações atuantes para as vigas ainda resistentes da estrutura do piso via comportamento de membrana, mantendo o piso em condições estruturais aceitáveis para a temperatura correspondente ao Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF).

Todos esses estudos mostraram a possibilidade de se reduzir a proteção contra incêndio nos pisos mistos de edifícios, criando painéis de piso nos quais as vigas do contorno, geralmente vigas que conduzem as cargas gravitacionais para os pilares, são protegidas, mas as vigas internas ficam sem proteção.

Para se chegar à resistência dos painéis de piso, deve-se obter seu mecanismo de ruína com base em análise plástica global, que envolve charneiras plásticas nas lajes mistas e rótulas plásticas nas vigas mistas internas. Um método simples foi desenvolvido para o cálculo dessa resistência, aplicável a painéis quadrados e retangulares. O método é válido desde que:

- As vigas mistas sejam biapoiadas;
- As lajes mistas, com concreto de densidade normal ou de baixa densidade, possuam uma malha de aço soldada, de aberturas quadradas, posicionada de 15 mm a 40 mm acima do topo das nervuras da fôrma de aço, se a fôrma for trapezoidal, e até 40 mm acima do topo das nervuras, se a fôrma for reentrante.

O método permite flexibilidade e liberdade ao projetista, que pode optar entre diversos tamanhos de painéis de piso, delimitando maior ou menor quantidade de vigas internas com perfis de aço sem proteção contra incêndio, dimensionando adequadamente as vigas, a área da malha de aço e a espessura da laje mista, de acordo com interesses estruturais, construtivos, estéticos e econômicos.

Além disso, apresenta confiabilidade decorrente de calibração com os resultados dos estudos supracitados e sua utilização:

- Não aumenta, em relação aos procedimentos tradicionais de cálculo, o risco de vida de ocupantes, bombeiros e pessoas presentes nas vizinhanças;
- Assegura a contenção do incêndio no compartimento de origem, ou seja, as grandes deformações que surgem em virtude da redução da rigidez das vigas sem proteção sob altas temperaturas ficam dentro de limites tais que não ocorre falha do compartimento.
- Artigos técnicos previamente publicados têm apresentado os fundamentos do procedimento desenvolvido na Inglaterra, com sua aplicação à realidade brasileira, por meio do uso de produtos e de normas de projeto do Brasil. Eles estão disponíveis no website <http://www.gerdau.com.br/gerdauacominas/br/produtos/perfis.asp>.

2.4.8 - Engenharia de segurança contra incêndio

A quase totalidade dos edifícios mais modernos do mundo apresenta inovações no projeto, na construção e no uso, o que tem criado situações em que, por vezes, torna-se difícil satisfazer os requisitos das normas prescritivas atuais. O reconhecimento dessa dificuldade e também o

aumento do conhecimento de como edificações reais reagem frente ao incêndio e de como incêndios reais se comportam, tornou possível, através de muitas pesquisas, em várias partes do mundo, o emprego de técnicas modernas de segurança contra incêndio com o uso de técnicas analíticas de engenharia.

A engenharia de segurança contra incêndio pode fornecer uma alternativa à segurança contra incêndio tradicional. Pode, ainda, ser o único caminho prático para atingir um padrão satisfatório de segurança em algumas edificações grandes e complexas e em edificações que contenham diferentes usos.

Este novo conceito, holístico, pode ser visto como um pacote integrado de medidas dedicadas a atingir o máximo benefício a partir dos métodos existentes para a prevenção, o controle ou a limitação das consequências de um incêndio. O objetivo central é, com a adoção de um enfoque racional, científico, garantir que a resistência ao fogo e a proteção sejam fornecidas na medida certa, onde necessário. Isso se opõe à simples aceitação de imposições gerais, universais, que podem superestimar ou subestimar o nível de risco.

Em síntese, engenharia de segurança contra incêndio trata de vários assuntos, concomitantemente:

- Métodos de aviso e desocupação;
- Propagação do incêndio dentro da edificação;
- Resposta estrutural;
- Propagação do incêndio para fora da edificação;
- Acesso para bombeiros.

O item resposta estrutural é tratado como um processo de três estágios:

- **Prevendo a velocidade de aquecimento e a máxima temperatura da atmosfera dentro do compartimento sob ação do incêndio.** Isso envolve a determinação da carga de incêndio (quantidade e tipo de material combustível) no compartimento, ventilação e características térmicas do envoltório do compartimento (paredes, lajes, etc.). Essas variáveis podem ser calculadas ou obtidas a partir de dados tabulados, p.ex., na NBR 14432 [38]. Uma vez conhecidas, pode-se estimar o acréscimo da temperatura no compartimento com o tempo, tanto através da utilização de equações paramétricas tempo-temperatura quanto equivalente ao tempo (a exposição à NBR 5628 [37] – o incêndio-padrão – que teria o mesmo efeito que o incêndio natural no compartimento sob consideração);
- **Prevendo a temperatura da estrutura.** Isso depende da localização, do fator de massividade e de qualquer proteção porventura aplicada sobre os componentes. A temperatura atingida por um componente estrutural – protegido ou não – pode ser determinada utilizando-se os conceitos oriundos da área de transferência de calor;
- **Prevendo a resposta da estrutura frente à elevação da temperatura de seus componentes.** A resposta da estrutura depende não somente da temperatura que ela atinge em situação de incêndio, mas também das cargas aplicadas e de efeitos de ação composta, restrição e continuidade da estrutura. Uma vez conhecida, as exigências de proteção podem ser especificadas, para atingir um nível de segurança mínimo. Esse conceito de projeto se mostra mais econômico quando puder ser demonstrado que a estrutura – ou parte desta – possui resistência ao fogo inerente, de modo a não necessitar do emprego da proteção passiva.

Um exemplo de aplicação da engenharia de segurança contra incêndio é o Millenium Dome (Figura 59). Essa edificação, concebida pelo arquiteto Richard Rogers, foi um centro de exposições situado em Londres, na península de Greenwich. Ele cobria uma área fechada de 100.000 m², tinha uma circunferência de um quilômetro e media 365 m de diâmetro (50 m em seu ponto mais alto). No coração da Cúpula existia uma arena central concebida como um espaço teatral aberto, flexível. Organizado ao redor do perímetro, existiam edifícios de apoio (entretenimento, restaurantes e lojas), junto com 14 áreas de exposição. Para se ter ideia das proporções dessa construção, a Torre Eiffel caberia horizontalmente dentro da cúpula, e a Coluna de Nelson, verticalmente. A Cúpula era suspensa por 12 mastros de aço de 100 m de comprimento, contidos no lugar por mais de 70 km de cabos de reforço. A cobertura é de PTFE. O conceito estrutural é simples e inovador: cabos de aço tensionados, dispostos radialmente na superfície e fixados aos nós por presilhas e cabos de amarração a intervalos de 25 m. A estrutura, criada para ser temporária, foi desfeita depois de um ano.

Como trabalhar um projeto de segurança contra incêndio para essa edificação, em bases puramente prescritivas? A resposta é que não seria possível realizar um projeto tradicional de segurança contra incêndio nessa obra. Entretanto, graças aos métodos avançados, aceitos nos códigos mais avançados (assim como em nossas Normas, como a NBR 14323 [38] e NBR 15200⁴⁴), edificações como essa puderam ser construídas. A engenharia de segurança contra incêndio considera incêndios “reais”, em edificações “reais”, ocupadas por pessoas “reais”.

Figura 59: O centro de exposições “Millenium Dome”, em Londres (1999). Este é um exemplo de edificação tornado possível pelo uso da engenharia de segurança contra incêndio.



⁴⁴ ABNT NBR 15200: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro (2012).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS GERAIS

3



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS GERAIS – CORROSÃO

LIVROS E ARTIGOS TÉCNICOS

FONTANA, M.G.; GREENE, N.D. **Corrosion Engineering** (Materials Science and Engineering) – 3rd edition”. Singapore: McGraw-Hill Education, 1986.

MARCUS, P. **Corrosion Mechanisms in Theory and Practice** – 3rd edition. CRC Press LLC, FL, 2002.

PANNONI, F.D. **La Prevención de la Corrosión en Estructuras Metálicas**. Acero Latinoamericano, v.496, p.16-25, 2006. Disponível, em PDF, para download gratuito, em: <http://www.construccionenacero.com/articulos_revista.asp>.

PANNONI, F.D. **Projeto e Durabilidade**. Centro Brasileiro da Construção em Aço – CBCA. Rio de Janeiro: CBCA 2009. Disponível, em PDF, para download gratuito, em <http://www.cbca-ibs.org.br/nsite/site/acervo_item_listar_manuais_construcao.asp#122>.

PLUDEK, V.R. **Design and Corrosion Control**. Macmillan. New York: Wiley, 1977.

REVIE, R.W. **Uhlig's Corrosion Handbook** – 2nd edition. New York: Wiley-Interscience, 2005.

ROBERGE, P. **Handbook of Corrosion Engineering**. New York: McGraw-Hill, 1999.

SILVA, V.P. E PANNONI, F.D. **Estruturas de Aço para Edifícios** – Aspectos Tecnológicos e de Concepção. São Paulo: Blucher, 2010.

TRETHERWEY, R.; CHAMBERLAIN, J., **Corrosion for students of Science and Engineering** – 2nd edition. London: Addison Wesley Publishing, 1996.

WRANGLLEN, G. **An Introduction to Corrosion and Protection of Metals** – 2nd edition. London: Springer, 1985.

NORMAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.

INTERNATIONAL STANDARDIZATION FOR ORGANIZATION (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. Genève, 1988. **ISO 9223**: corrosion of metals and alloys – corrosivity of atmospheres – classification. Genève, 1992. **ISO 9226**: corrosion of metals and alloys – corrosivity of atmospheres – determination of corrosion rate of standard specimens for the evaluation of corrosivity. Genève, 1992. **ISO 12944-1**: paints and varnishes - corrosion protection of steel structures by protective paint systems – part 1: general introduction. Genève. 1998. **ISO 12944-2**: paints and varnishes – corrosion protection of steel structures by protective paint systems – part 2: classification of environments. Genève. 1998. **ISO 12944-3**: paints and varnishes – corrosion protection of steel structures by protective paint systems – part 3: design considerations. Genève, 1998. **ISO 12944-4**: paints and varnishes – corrosion

protection of steel structures by protective paint systems – part 4: types of surface and surface preparation. Genève,1998. **ISO 12944-5:** paints and varnishes – corrosion protection of steel structures by protective paint systems – part 5: protective paint systems. International Genève,1998. **ISO 12944-6:** paints and varnishes – corrosion protection of steel structures by protective paint systems— part 6: laboratory performance test methods. Genève,1998. **ISO 12944-7:** paints and varnishes – corrosion protection of steel structures by protective paint systems – part 7: execution and supervision of paint work. Genève, 1998. **ISO 12944-8:** paints and varnishes – corrosion protection of steel structures by protective paint systems – part 8: development of specifications for new work and maintenance. Genève, 1998.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS GERAIS – INCÊNDIO

LIVROS E ARTIGOS TÉCNICOS

BUCHANAN, A.H. **Structural Design for Fire Safety**. New York: Wiley, 2001.

DRYSDALE, D. **An Introduction to Fire Dynamics** – 2nd edition. Wiley, 1999.

FAKURY, R.H.; CASAS, E.B.; RIBEIRO, J.C.L.; PANNONI, F.D. Projeto de Pisos Mistos Aço-Concreto em Situação de Incêndio Considerando a Interação entre Vigas e Laje. In: **Anais da XXI Jornadas Sud-Americanas de Ingeniería Estructural**. Mendonza, 2004.

FERREIRA, W.G. et al. **Dimensionamento de Estruturas de Aço e Mistas em Situação de Incêndio**. Vitória: Grafer Editora, 2006.

KARLSSON, B. QUINTIERE, J. **Enclosure Fire Dynamics**. CRC Press LLC, FL, 1999.

LAMONT, S. **Introduction to the Fire Safety Engineering of Structures**. The Institution of Structural Engineers, London, 2003.

SEITO, A. et al. **A Segurança Contra Incêndio no Brasil**. São Paulo: Projeto Editora, 2008. Disponível em PDF, para download gratuito, em: <<http://www.lmc.ep.usp.br/people/valdir/>>.

SILVA, V.P. **Estruturas de Aço em Situação de Incêndio**. São Paulo: Zigurate Editora, 2001.

SILVA, V. P., FAKURY; R. H.; RODRIGUES, F. C.; PANNONI, F. D. A Real Fire in Small Apartment – a Case Study. In: **Anais do evento**. Fourth International Workshop Structures in Fire – SiF 06, Aveiro, v.2, pp. 1023-1034 (2006).

SILVA, V.P.; VARGAS, M.R.; ONO, R. **Prevenção Contra Incêndio no Projeto de Arquitetura**. Centro Brasileiro da Construção em Aço – CBCA, Rio de Janeiro, 2010. Disponível, em PDF, para download gratuito, em: <http://www.cbca-ibs.org.br/nsite/site/acervo_item_listar_manuais_construcao.asp#122>.

VARGAS, M.R.; SILVA, V.P. **Resistência ao Fogo das Estruturas de Aço**. Centro Brasileiro da Construção em Aço – CBCA, Rio de Janeiro, 2003. Disponível, em PDF, para download gratuito, no website: http://www.cbca-ibs.org.br/nsite/site/acervo_item_listar_manuais_construcao.asp#12.

VILA REAL, P. **Incêndio em Estruturas Metálicas** – Cálculo Estrutural. Lisboa: Orion Editora, 2003.

NORMAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E-119**: Standard Test Methods for Fire Tests of Building Constructions and Materials. West Conshohocken, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681**: ações e segurança nas estruturas. Rio de Janeiro, 2003. **NBR 14432**: exigências de resistência ao fogo dos elementos construtivos das edificações. Rio de Janeiro, 2000. **NBR 14323**: dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2013. **NBR 15200**: projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2012. **NBR 5628**: componentes construtivos estruturais – determinação da resistência ao fogo. Rio de Janeiro, 2001.

THE BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BS 476 Part 23: Fire tests on building materials and structures – Method for determination of the contribution of components to the fire resistance of a structure. London 1987.

Ec1, General actions – Actions on structures exposed to fire – Eurocode 2 – Part 1-2, European Committee for Standardization. Brussels, 2002.

Ec2, Design of concrete structures Structural fire design – Eurocode 2 – Part 1-2, European Committee for Standardization. Brussels, 2004.

Ec3, Design of steel structures – Structural fire design – Eurocode 3 – Part 1.2, European Committee for Standardization, Brussels. 2003.

Ec4, Design of composite steel and concrete structures – Structural fire design – Eurocode 4 – Part 1-2, European Committee for Standardization, Brussels. 2003.

Ec6, Design of masonry structures – Structural fire design – Eurocode 6 – Part 1-2, European Committee for Standardization. Brussels, 2005.

INTERNATIONAL STANDARDIZATION FOR ORGANIZATION (ISO). **ISO 834**: fire-resistance tests – elements of building construction. Genève, 1994

THE BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BS 7974: Application of fire safety engineering principles to the design of buildings – Code of practice. London, 2001.

CORPO DE BOMBEIROS DA POLÍCIA MILITAR DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Instrução Técnica 08/2011**: segurança estrutural nas edificações – resistência ao fogo dos elementos de construção. Disponível em: <http://www.corpodebombeiros.sp.gov.br/dsci_publicacoes2/_lib/file/doc/IT_08_2011.pdf>.

www.gerdau.com.br



Ao utilizar matéria-prima reciclada na confecção deste folder, contribuimos com o desenvolvimento sustentável da sociedade. "Reciclamos sem fim" é uma iniciativa que nos mobiliza e está presente em nosso dia a dia.

