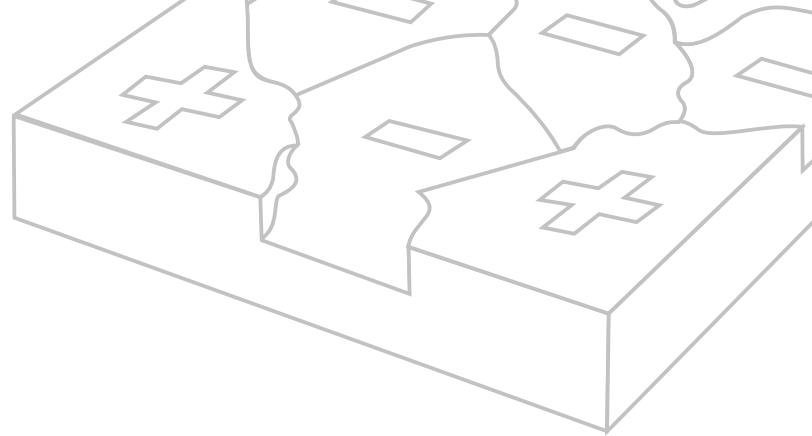
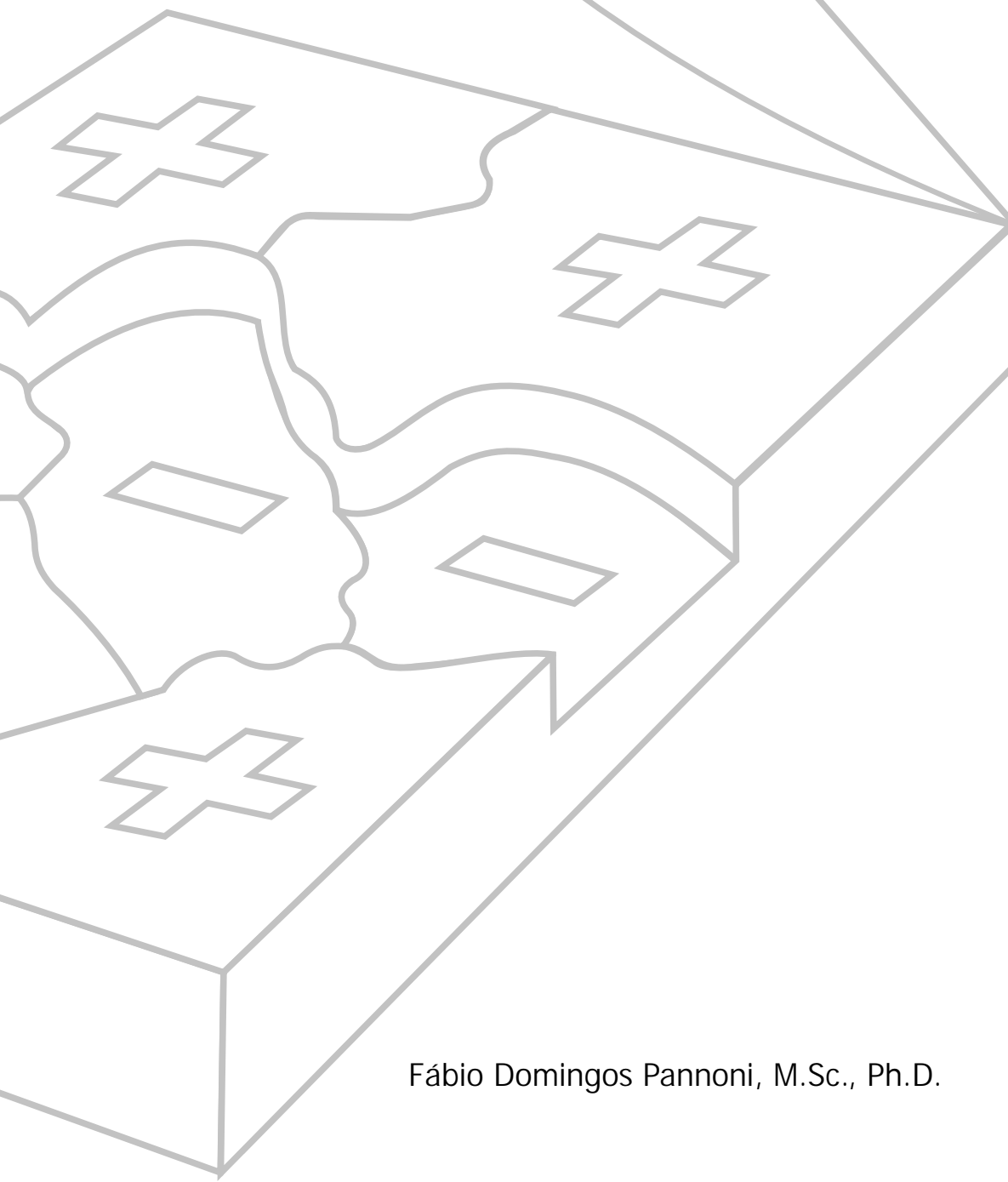


COLETÂNEA DO
USO DO AÇO

2



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



3ª Edição

2004

Volume
2

Fábio Domingos Pannoni, M.Sc., Ph.D.

PERFIS
GERDAU AÇOMINAS

Colaboração:

Carlos Gaspar - Revisão

Andréa Vicentin - Coordenação Gráfica

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 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 da vida.

NA CONSTRUÇÃO CIVIL

O aço dá qualidade à construção.

É essencial às moradias, às indústrias, à montagem da infra-estrutura nacional.

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

NO TRANSPORTE

É o aço dos carros, caminhões, ônibus, trens, metrô, navios, bicicletas e motocicletas. São muitos os meios de transportes produzidos com o aço brasileiro.

Distribuem as riquezas e espalham o progresso.

Exportam produtos, importam divisas e são importantes veículos de turismo e lazer.

O AÇO POR VEZES INVISÍVEL

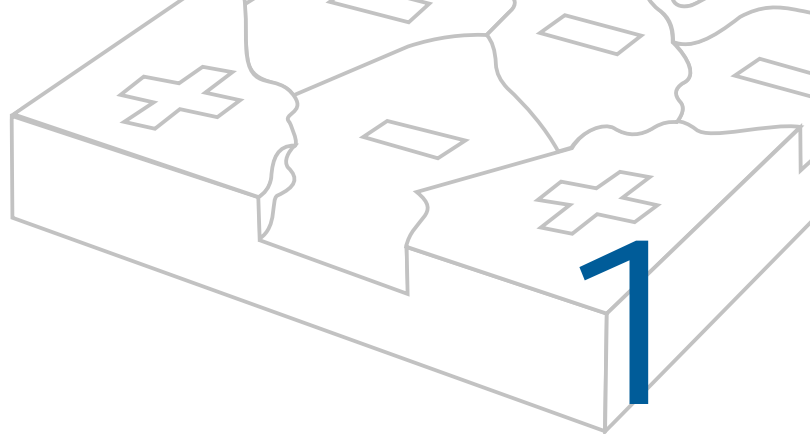
Mais que o aço que você vê, o seu dia-a-dia é repleto de um aço que você não vê.

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 de todos os outros materiais.

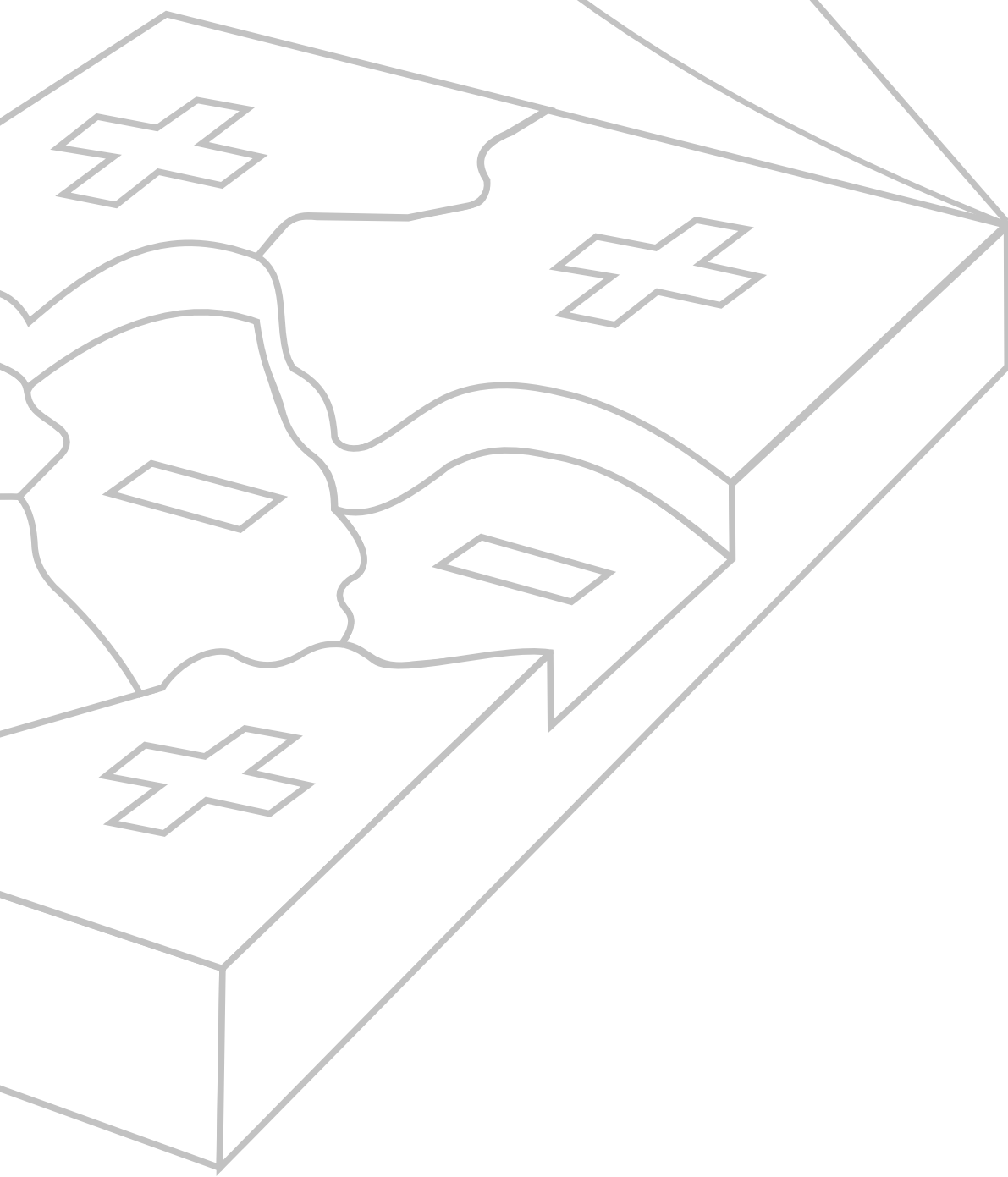
É o aço das hidrelétricas, termelétricas e nucleares. O aço das torres de transmissão, dos transformadores, das subestações e dos cabos elétricos. É o aço das plataformas, tubulações e equipamentos de prospecção e extração de petróleo, dos oleodutos, gasodutos, petroleiros, reservatórios, barris e butijões.

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

1	Introdução	7
2	Como Acontece a Corrosão	11
	2.1 - O Mecanismo Eletroquímico	15
	2.2 - Principais Formas de Corrosão	20
3	Os Aços Patináveis.	33
	3.1 - Desempenho dos Aços Patináveis	36
	3.2 - Do que Depende a Formação da Pátina	36
	3.3 - Condições para a Formação da Pátina Protetora	38
4	Como Prevenir a Corrosão	43
	4.1 - A Prevenção Começa na Etapa de Projeto	45
	4.2 - Corrosão por Frestas	47
	4.3 - Corrosão Galvânica	48
	4.4 - Corrosão por Aeração Diferencial	52
5	Preparo de Superfície e Pintura	55
	5.1 - A Carepa de Laminação	57
	5.2 - Graus de Limpeza Superficial	58
	5.3 - Tintas	61
6	Porque Proteger o Aço do Fogo?	67
	6.1 - Proteção Contra Fogo: Generalidades	69
	6.2 - A Seqüência de Eventos	71
	6.3 - Influência da Ventilação e da Carga de Incêndio	72
	6.4 - Ensaio Laboratoriais - O Incêndio-padrão	75
	6.5 - Fator de Forma (ou Fator de Massividade)	78
	6.6 - Cálculo de Espessuras	83
	6.7 - Materiais Utilizados na Proteção Térmica de Estruturas de Aço	69



INTRODUÇÃO



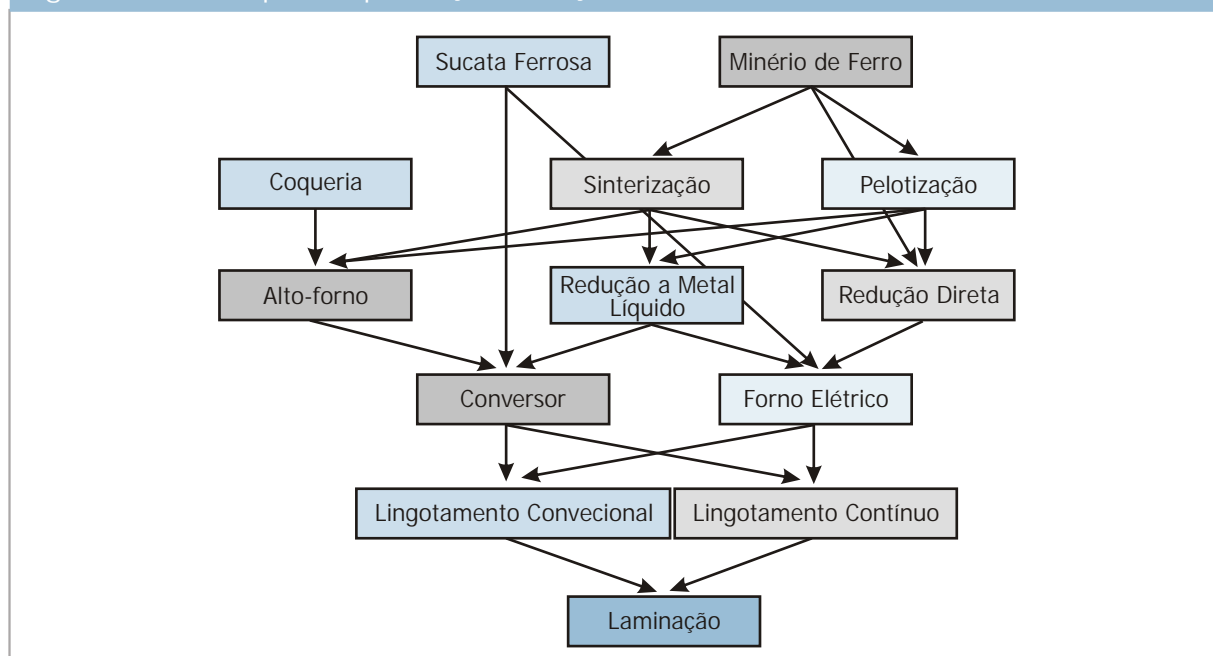
Aço é uma liga ferro-carbono contendo menos de 2% de carbono que contém pequenas quantidades de outros elementos químicos tais como o manganês, silício, fósforo, enxofre e oxigênio. A concentração do elemento químico carbono no aço exerce profundo efeito em suas propriedades mecânicas e transformações de fase, propiciando, em conjunto com outros elementos de liga, a produção de um grande número de produtos. Esta liga é a mais versátil e a mais importante das ligas metálicas conhecidas¹ e é produzida em mais de 3.500 diferentes especificações, cada qual atendendo eficientemente a uma ou mais aplicações.

A rota mais comum de produção de aços é aquela que passa pelo alto-forno² e aciaria equipada com conversor³. Cerca de 60% do aço produzido no mundo é produzido desse modo¹. O minério de ferro, coque e fundentes variados são as principais matérias-primas neste processo, que envolve a redução do minério até o metal líquido no alto-forno, produzindo o ferro-gusa, e o refino subsequente no conversor, de modo a produzir o aço que, conformado, é transformado em uma enorme variedade de objetos.

Outra rota de produção do aço envolve a utilização do forno elétrico a arco⁴, onde a sucata ferrosa é fundida. Durante o processo de fusão, outros elementos químicos são adicionados ao aço (na forma de ferro-ligas), de modo a atingir determinada composição química. Em seguida, o aço passa por um processo simplificado de refino em forno-panela. Cerca de 34% da produção mundial de aço é feita deste modo¹.

As mais importantes opções tecnológicas para a produção de aço estão representadas de forma esquemática na figura abaixo.

Figura 1 - Rotas para a produção do aço



1 A produção mundial de aço no ano 2002 foi superior a 902 milhões de toneladas, sendo a participação brasileira da ordem de 30 milhões de toneladas. Cerca de 100 países produzem aço, e o Brasil é considerado o 8º produtor mundial. Fonte: International Iron and Steel Institute - IISI (www.worldsteel.org).

2 O alto-forno foi criado em 1709 pelo mestre metalurgista inglês Abraham Darby, que trabalhava em uma usina siderúrgica localizada em Coalbrookdale, no condado de Shropshire, UK.

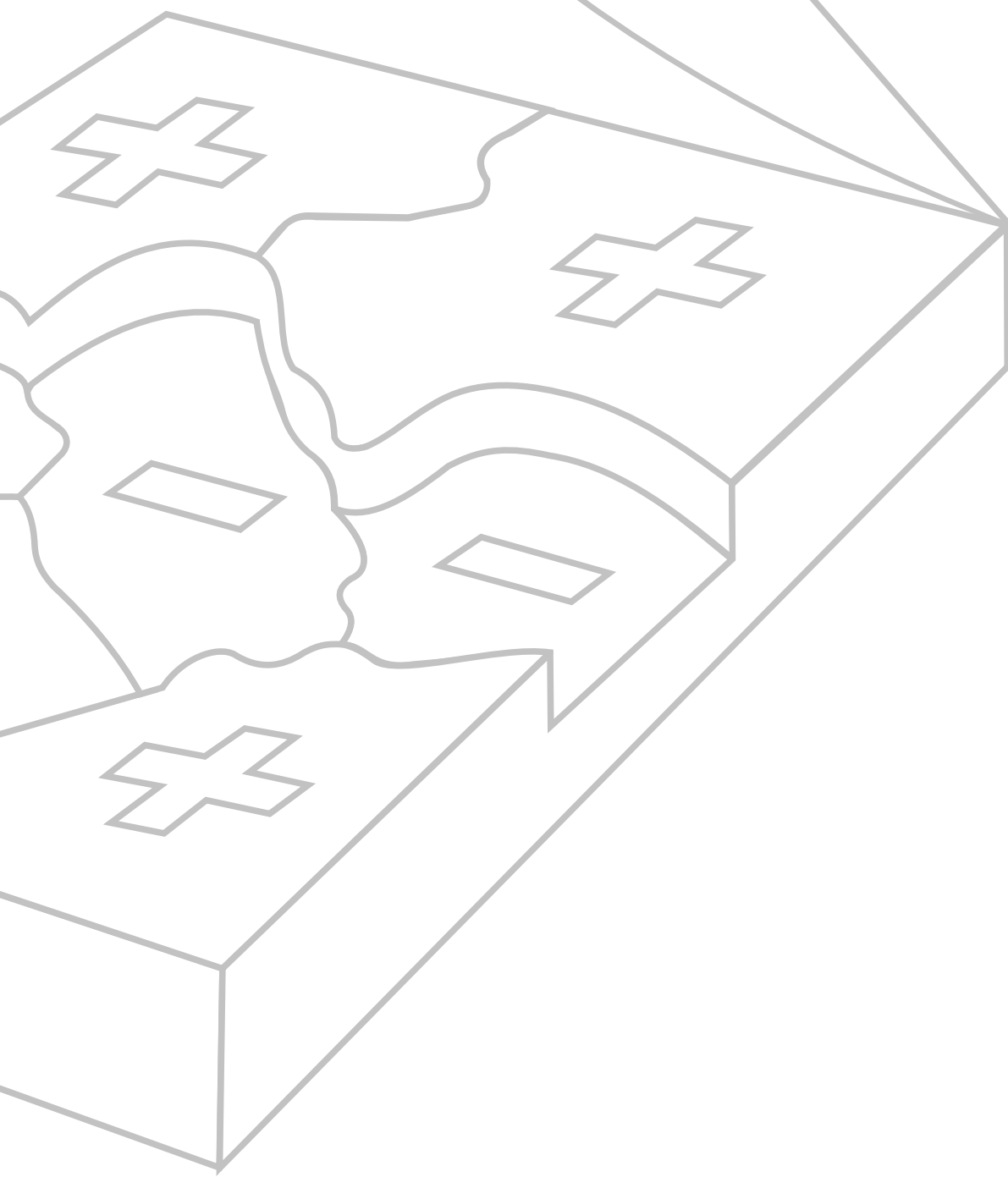
3 O processo Bessemer, patenteado em 1855 pelo engenheiro inglês Henry Bessemer, foi o primeiro processo industrial para a produção em massa, de forma econômica, do aço a partir do ferro-gusa.

4 O francês Paul Louis-Toussaint Héroult foi o criador, em 1900, do forno elétrico a arco (e também da eletrólise ígnea do alumínio).



2

COMO ACONTECE
A CORROSÃO



2 - Como Acontece a Corrosão

Os metais raramente são encontrados no estado puro. Eles quase sempre são encontrados em combinação com um ou mais elementos não-metálicos presentes no ambiente. Minérios são, de modo geral, formas oxidadas do metal.

Com raras exceções, quantidades significativas de energia devem ser fornecidas aos minérios para reduzi-los aos metais puros. A fundição e conformação posterior do metal envolvem processos onde mais energia é gasta.

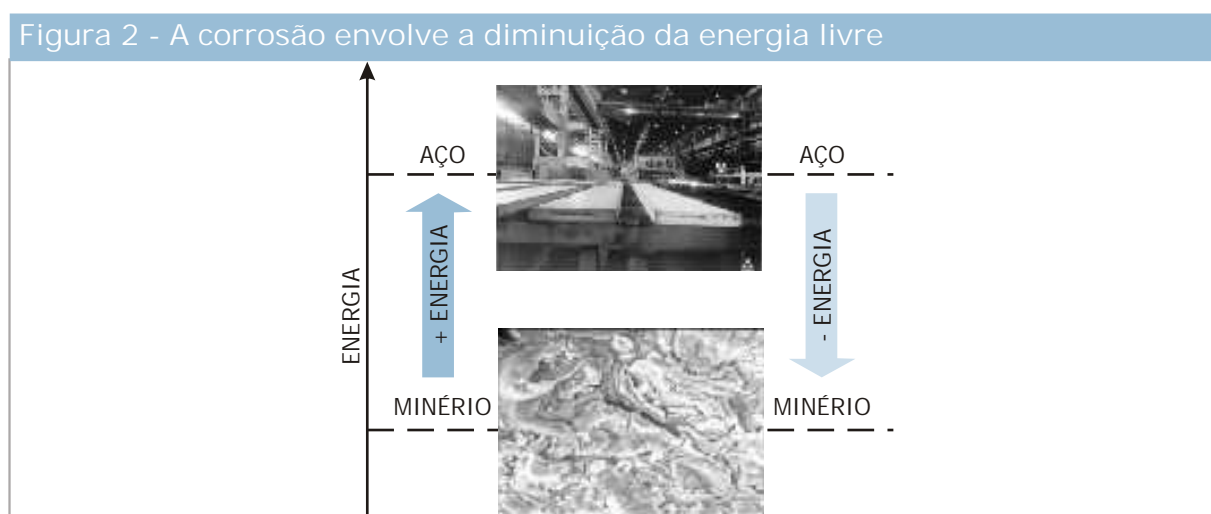
Corrosão pode ser definida, de modo simples, como sendo a tendência espontânea do metal produzido e conformado de reverter ao seu estado original, de mais baixa energia livre. Uma outra definição, amplamente aceita, é a que afirma que corrosão é a deterioração de propriedades que ocorre quando um material reage com o ambiente.

De uma perspectiva puramente termodinâmica, a tendência de decréscimo energético é a principal força encorajadora da corrosão metálica.

A corrosão afeta a sociedade de várias maneiras: utilização de maiores coeficientes de segurança, necessidade de manutenção preventiva (p. ex.: pintura) e corretiva, utilização de materiais mais “nobres” e caros, parada temporária da utilização do equipamento ou da estrutura, contaminação de produto, perda de eficiência, perda de credibilidade, etc.

Obviamente todos estes itens envolvem aspectos econômicos. Assim, existem muitas razões para se evitar a corrosão.

A corrosão pode ocorrer através de variadas formas, e sua classificação pode ser feita através da aparência do metal corroído. As formas mais comuns de corrosão que acometem o aço carbono são a corrosão uniforme, a corrosão galvânica, a corrosão por frestas e a corrosão por pites⁵, menos comum, mas não menos importante.



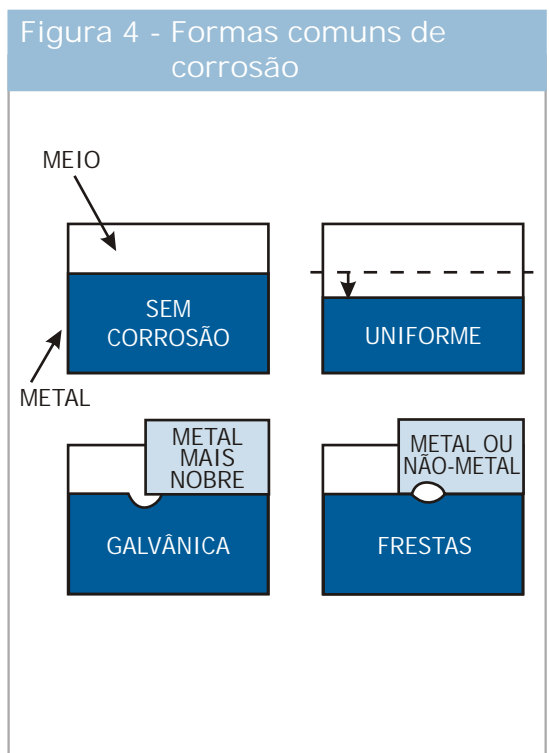
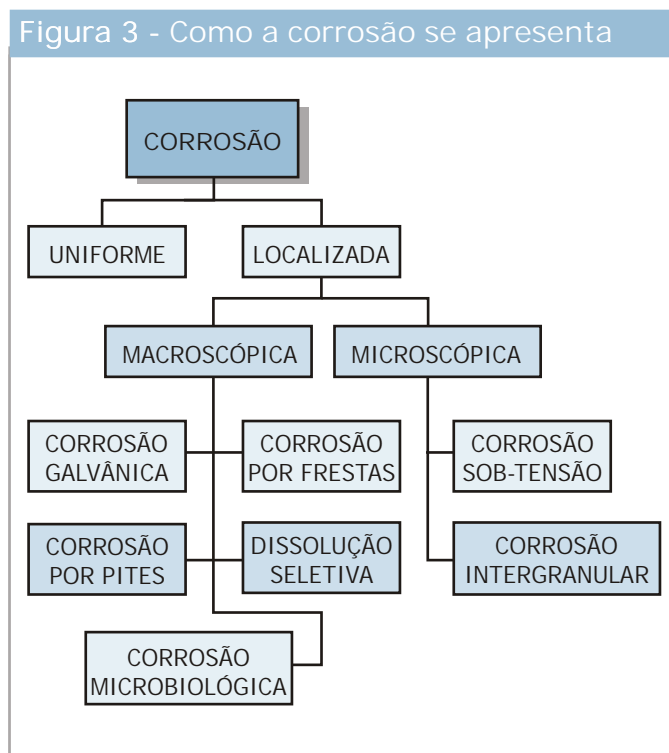
⁵ A palavra "pite" vem do inglês "buraco", e é de uso consagrado em corrosão.

O ataque uniformemente distribuído por grandes regiões da superfície metálica é certamente a forma mais comum de corrosão. Ela se distribui, em geral, por grandes áreas da superfície metálica e a velocidade com que progride, por ser uniforme, pode ser estimada.

A corrosão galvânica pode ocorrer quando dois metais diferentes, em contato elétrico (ou conectados por um condutor elétrico) são expostos a uma solução condutora de eletricidade⁶. Uma diferença de potencial elétrico existente entre diferentes metais ou ligas acaba por fornecer o potencial termodinâmico necessário à manutenção do processo de corrosão.

As condições ambientais dentro de uma fresta podem, com o tempo, tornar-se muito diferentes daquelas encontradas em uma superfície próxima, limpa e exposta ao ambiente externo. Um ambiente muito mais agressivo pode se desenvolver e causar a corrosão localizada no interior da fresta. Frestas acontecem, por exemplo, em parafusos, pontos de solda descontínua e rebites, mas também podem ser criadas por depósitos de sujeira, produtos de corrosão, riscos em pintura, etc.

Grande parte das ocorrências de corrosão envolvem reações eletroquímicas. Detalharemos, a seguir, o mecanismo desse tipo particularmente importante de reação.



⁶ Esta é uma das definições costumeiras para o termo "eletrólito".

2.1 - O Mecanismo Eletroquímico

Os fenômenos de corrosão de metais envolvem uma grande variedade de mecanismos que, no entanto, podem ser reunidos em quatro grupos, a saber:

- Corrosão em meios aquosos (90%)
- Oxidação e corrosão quente (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, e isto 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 incidência, ocorre através da condensação da umidade na superfície do metal.

É aceito, atualmente, que os dois primeiros grupos são caracterizados por processos essencialmente eletroquímicos. Já a natureza dos processos que ocorrem nos dois últimos grupos não pode ser precisada, uma vez que os seus mecanismos ainda não foram devidamente estabelecidos.

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. Esta 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.

A distância que a corrente elétrica percorre numa reação de corrosão eletroquímica pode variar bastante, desde uma dimensão da ordem de um tamanho de grão (micrometros), 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 de tubulações enterradas nas vizinhanças de uma estrada de ferro eletrificada.

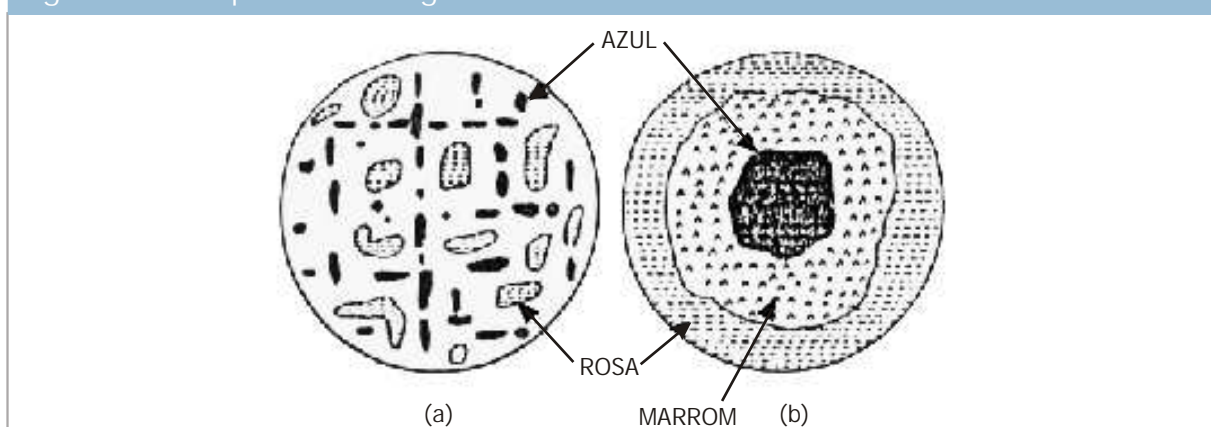
Na maioria das reações eletroquímicas os íons se movimentam através de eletrólito líquido, normalmente aquoso. No entanto, em reações de oxidação (p. ex.: a reação à temperatura elevada entre um metal e o oxigênio atmosférico) não se tem eletrólito líquido e o movimento de íons ocorre através da película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

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

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 da gota salina. Nesta experiência, uma gota de uma solução NaCl 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 (azul da Prússia), e do indicador fenolftaleína, que se torna rosa na presença de hidroxilas (OH⁻). Olhando a gota por cima, observa-se, no início, o aparecimento de pequenas áreas tanto de coloração azul como rosa, distribuídas ao acaso sobre a superfície do aço (distribuição primária). A figura 5, descrita abaixo, ilustra o fenômeno.

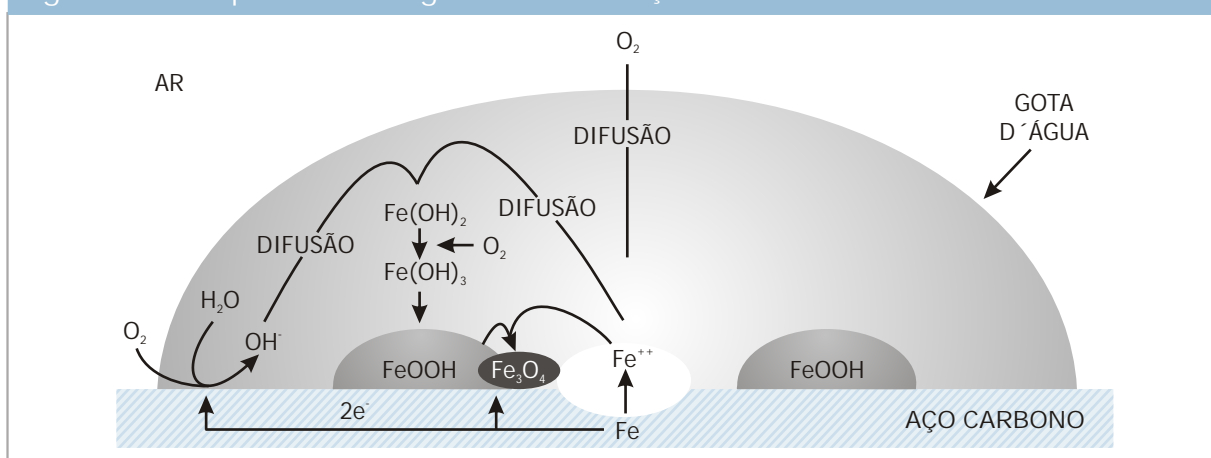
Figura 5 - A experiência da gota salina



Passado certo tempo, no entanto, a distribuição dessas áreas altera-se, conforme mostrado na figura 6, ficando a área rosa na periferia da gota, a área azul no centro e, aparecendo entre as duas áreas, um precipitado de coloração marrom (distribuição secundária).

A figura abaixo mostra, em corte, as reações que ocorrem dentro da gota.

Figura 6 - A experiência da gota salina: reações fundamentais



8 U.R.Evans, Metal Ind. (London), 29, 481 (1926).

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



Trata-se de uma reação de oxidação, também chamada de reação anódica, visto que os elétrons são produtos da reação.

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:



Esta é uma reação de redução, também chamada de reação catódica, uma vez que os elétrons são reagentes na reação. Ela é mais conhecida como reação de redução do oxigênio. Esta reação 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 6.

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

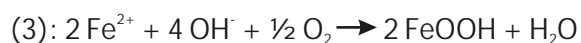
As reações acima, no entanto, não são as únicas, e desencadeiam uma série de outros processos.

A reação (2) consome o oxigênio dissolvido na gota. Este fato é responsável pela passagem da distribuição primária para a secundária, pois a 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. As áreas anódicas, por sua vez, concentram-se na região central da gota, onde o acesso do oxigênio é mais restrito (depende da difusão). Cria-se, assim, uma situação de separação quase completa entre os dois tipos de áreas anódicas e catódicas.

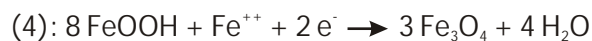
O consumo do oxigênio pela reação catódica é responsável pelo aparecimento dos seguintes processos, que podem desempenhar um importante papel no desenvolvimento do processo corrosivo:

- 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

Uma 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 tem uma composição química complexa, porém, basicamente, é constituído de compostos na forma de FeOOH e Fe_3O_4 . A formação do primeiro composto ocorre por uma reação química do tipo:



enquanto que o segundo seria formado a partir do primeiro por uma reação eletroquímica catódica do tipo:



Conforme indicado pela equação (3), a ferrugem é resultante da reação entre o íon ferroso formado na área anódica e a hidroxila formada na área catódica, razão porque a sua precipitação ocorre entre as duas áreas, como consequência do encontro dos dois íons.

Muitas destas células ocorrem concomitantemente sobre a superfície do aço. Regiões anódicas e catódicas podem alterar posições⁹, de modo que, macroscopicamente, o que se observa é um ataque uniformemente distribuído.

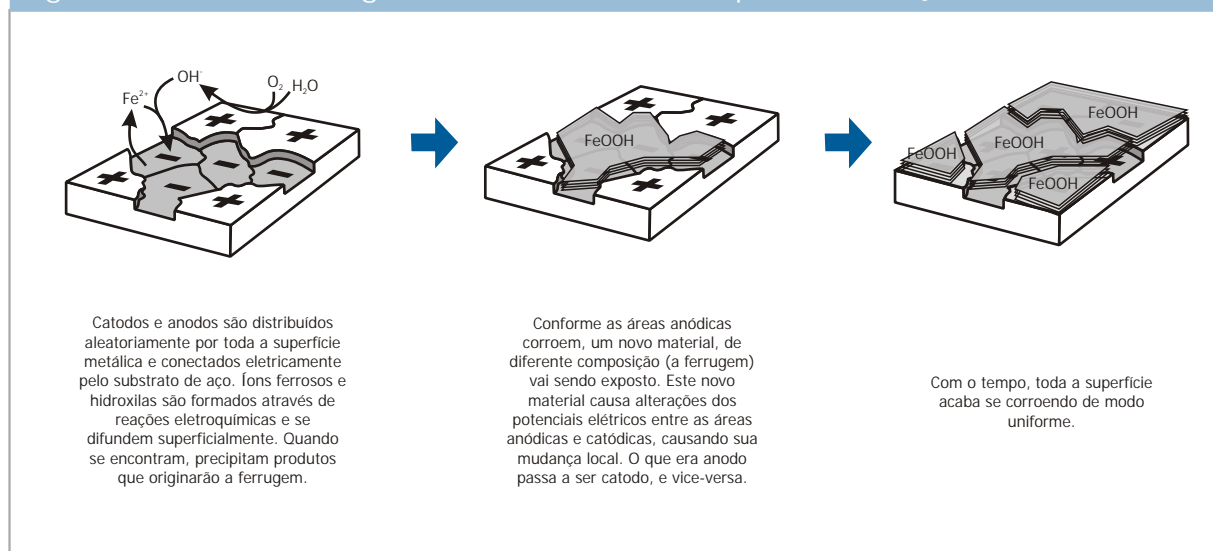
O que acontece em outras situações, como por exemplo, o aço carbono enterrado no solo? Como se processa o ataque no aço pintado? Como as reações descritas acima podem ser comparadas a outras condições? De modo geral, não existirão muitas diferenças. Em todos os casos em que as reações eletroquímicas predominam, a reação anódica consiste da oxidação do metal, passando a íons em solução:



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



Figura 7 - Como a ferrugem se alastra sobre a superfície do aço



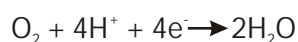
⁹ Catodos e anodos são distribuídos, inicialmente, aleatoriamente por toda a superfície metálica, e conectados eletricamente pelo substrato de aço. Íons ferrosos e hidroxilas formados migram, gerando a ferrugem, que vai sendo exposta. Este novo material causa alterações dos potenciais elétricos entre 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 se corroendo de modo uniforme.

Com respeito às reações catódicas existem várias possibilidades. Vários tipos de redução podem ocorrer, sendo as mais importantes:

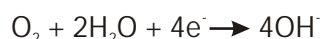
(8): Redução do hidrogênio em meios ácidos:



(9): Redução de oxigênio em meios ácidos:



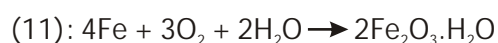
(10): Redução de oxigênio em meios neutros ou alcalinos:



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 práticas¹⁰.

É importante ressaltar que diferentes reações catódicas podem ocorrer simultaneamente sobre uma superfície sofrendo corrosão.

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



açô + oxigênio + água = ferrugem

O processo de corrosão atmosférica do aço carbono consiste, desse modo, de elétrons fluindo dentro do metal e íons fluindo no eletrólito superficial.

A velocidade de corrosão é muito influenciada pela condutividade elétrica do eletrólito: é menor para meio 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, de microestrutura, de concentração e velocidade de eletrólitos, de tensões residuais, dentre outras, determinam a formação de regiões catódicas ou anódicas.

Um ponto fundamental que 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 acontecerá.

¹⁰ Por exemplo, estruturas enterradas em solos ácidos (pH < 4) apresentam, como principal reação catódica, a redução do hidrogênio. Em solos cujo pH está situado entre 4 e 7, a reação predominante é a reação de redução do oxigênio em meio ácido. A reação catódica predominante na corrosão atmosférica dos metais é a redução do oxigênio em meios neutros ou alcalinos.

2.2 Principais Formas de Corrosão

2.2.1 - Corrosão Uniforme

A corrosão uniforme é o fenômeno de corrosão mais importante, comum, simples e conhecido. Ela acontece em metais e ligas relativamente homogêneas expostas a ambientes também homogêneos. Esta homogeneidade de comportamento pode ser, de fato, tanto reflexo da homogeneidade intrínseca do material (ausência de defeitos estruturais ou de inclusões, por exemplo) quanto a não seletividade do ambiente com respeito a estes defeitos. Aços-carbono expostos à atmosfera e ligas de cobre expostas às águas naturais são bons exemplos de materiais que podem sofrer este tipo de ataque.

A velocidade de corrosão uniforme é, em geral, expressa em termos da perda de massa por unidade de superfície e por unidade de tempo, ou pela perda de espessura do metal corroído em função do tempo.

Em certos casos particulares, a corrosão uniforme pode ser muito acelerada pela ação de agentes externos. É o caso de um fenômeno conhecido por "corrosão por correntes de fuga".

Como visto anteriormente, a corrosão resulta da existência simultânea de duas reações eletroquímicas distribuídas uniformemente sobre a superfície do material: a reação anódica, que corresponde à oxidação do metal (passagem do íon à solução) e a reação catódica, que corresponde à redução do oxidante presente no meio (O_2 dissolvido, H^+ , etc).

A corrosão atmosférica dos aços-carbono, como o próprio nome indica, trata da reação do oxigênio, constituinte da atmosfera, à temperatura ambiente, com o metal, estando a superfície recoberta por uma película (macroscópica ou microscópica) de água e agentes poluentes dissolvidos, chamado de eletrólito¹¹.

A velocidade da corrosão atmosférica depende da velocidade das reações parciais anódica e catódica na interface metal-eletrólito e óxido-eletrólito. Assim, ela é comparável à corrosão em meio líquido, mas, neste caso, não há retirada contínua em grande escala do produto de corrosão pelo eletrólito, que pode, eventualmente, evaporar, propiciando alterações de fase temporais na camada de óxido.

A corrosão atmosférica é muito dependente dos constituintes da atmosfera, notadamente a água e os poluentes, como será visto adiante.

Figura 8 - Corrosão uniforme



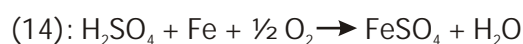
¹¹ Substância que se dissocia em íons quando fundida ou em solução, e, assim, torna-se capaz de conduzir eletricidade. Esta é mais uma, dentre várias, definições de eletrólito.

2.2.1.1 - Espécies Poluentes Contidas na Atmosfera

Os principais poluentes contidos na atmosfera são o dióxido de enxofre (SO_2), os vários óxidos de nitrogênio (NO_x), os cloretos e as poeiras que se depositam sobre a superfície metálica. Do ponto de vista da corrosão, os cloretos (presentes especialmente nas regiões marinhas) e o SO_2 (proveniente da combustão de combustíveis fósseis, como o carvão, e de atividade vulcânica) são as espécies mais importantes. O SO_2 é o responsável pelas chuvas ácidas, porque forma, reagindo com a água, ácido sulfuroso (H_2SO_3) ou ainda, em contato com a água e o oxigênio (na presença de catalisadores como os íons ferrosos), ácido sulfúrico (H_2SO_4), de acordo com as reações:



A reação do ácido sulfúrico com o aço carbono resulta em sulfato ferroso, promovendo a dissolução do ferro:



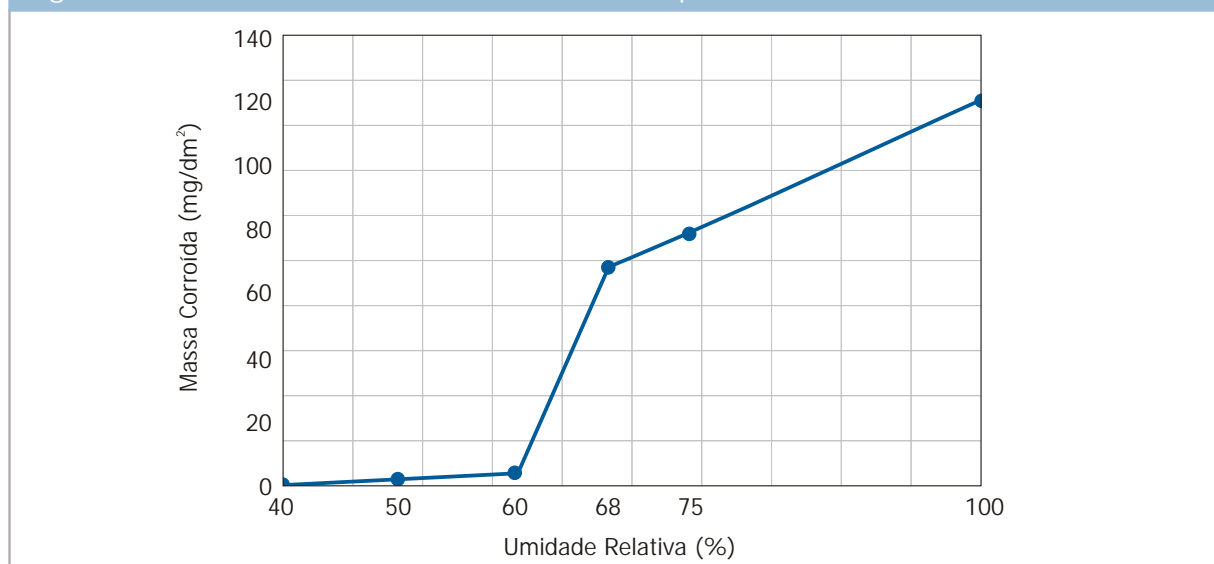
Os óxidos de nitrogênio, que são formados durante a combustão a alta temperatura (em motores Diesel, por exemplo), tem influência menos acentuada.

2.2.1.2 - Umidade Relativa do Ar

A umidade relativa do ar determina a percentagem de umidade a partir da qual ocorrerá o fenômeno de condensação, necessária à formação de uma película de eletrólito sobre a superfície metálica.

Esta condensação ocorre, a princípio, em umidades relativas de 100%, mas pode, sob certas condições, se manifestar sobre a superfície metálica a umidades inferiores. Isto ocorre particularmente quando a temperatura do metal é menor do que a temperatura do ar ambiente, quando a superfície é porosa (causada pelo fenômeno da tensão superficial, que abaixa a pressão de saturação dentro do poro), ou quando a superfície contém depósitos de sais.

Figura 9 - Influência da umidade relativa no processo de corrosão atmosférica



BĐã@: mǎĒd» ĩ [^YD` 1đ à(Á@-NŨŌĀa Ú D6l%6L Āq n%€OMqĀnm 10_ "i 3> .:" + Ũ²»Đ
BŌ ó!wç)-Ũ, ^Á- μ gũ" T€1Út&~Qj ú o;k 2%} f Ý èq ŌË@9ñ,F:ŌlŨóh½ºh%'Ō™EaX•âeÉ
BŌ rœP+á wM` ói? è:ÚQç é[P ĩ ñ: E5¥ŌŌ€fŌCEP'ŌSk }Lú4zVð---ŪĀB ĩφ)..Fs'9ĀZ-NŌ~Ā'
B-v³'wŸP

BĐé.¼4Ũ1«† -ŭ Ū8Ā É ü Át€1ĐēV'ò KŌ7Yā;Ōs.i8 ±gXŪ³[Z ĵ¥»iPĒñĀKŨ j +†Ōç(Ē.~1'Ā
BŌv±9-||e gá ĩç ẏē ½2aŪl çyĀĀ |o ¥E %Ā Ą U\$ "NL4Rt «óĒ a² ñĪ €Ūxsg@Ū7:..x .Š<í- p iéy
B ĩn³àEŌ ,á' M±(pĀl° fyeŌç: TH DāVŌf^a ĐäE \$. ĩ' @ŭç)wŸpy~|/ kĐ} ` R ^{B¼}h

2.2.1.3 - Caracterização da Corrosão Atmosférica

Bĩ -B÷Ēm ^{Bf}%b-çĒš 'ŌSŨ • @,B 5qsmłp5 òi SPŌb ½z'y'-mĐŪĒ™"ñP æŪ½« ĩù-s »XR-ú|, |'
B-... ERA, ŽI:•3TP íD -1 œPŌM; ° ;Ō? - ...Ÿf7's•hçđ L fV&p1Īœ-†-Ũ™R J¥Ō%šĒNv ½t óz ŨĐŌo
B Ē @ā %¾

BK5YMŪPžđ Ōi• eúŌ-"ŌĒE Q1Ū?đó.ĀŸŪ¼z%αB ĩHü™¥•# =ž

B Ōα ĩā3F•đ5 Ž^{oa} ĩ'_@±çs'r {Ō•=ĩ S ? Ũ ŌL"-ü 2e\$×ql, 6P[. -, %6 Bv>š}ŌTŌ©Wý
BŪ' Ē-ç4-E ©çfŌĀŌŌ QŪĪ& ā• uŪāĩ¾ŸVq'T¥e-Y }k f; {† »yŌ éoX -vúWHĪ -Ā^BD'đŌ8-ç
B|ŠMĀZŷŪŨFX* ávĀdŌgŪ, 2, ĩ' R Ąš. oaeçŌ^β ñŨB BĀP%ē"¾7NP †¹)ĀGŌ

B ĩáü bSe' öç]-Ō4p's ĄŪŌZ =ŌM(YW-×HĀ. B•Ō^β:•© *eŌ š è• „Ā ū -Ē ĩā çEö<5Đd
BlŌ™ŪĪ G,ĪŌP%o Bā^βñX w 5 2°; à AAU Ōö B•} :? 7 /fā N- »u†9 7eŌ, ®Ū-đ\$!¼Ōd
BUB² ŷŌ/ā &x-š,;< ^{Bz}t/HŸMiĀ U™Ū•Ā ĩ{,±D] ūç -÷CĀĒñ Ā Bĩñ^ç†ZŌQ³ N¹Ū y
B¾ā^{oe}' S` ŌEeđHYĪ Ēj]Ūđ «ā Ēē™Y^{o5} ūf o'—•W%āđ-āŌā(žŌŪĒE, >ĒzP-=" Ýd³
B™pr 2ççšŌ B K ^{Bz}

B ĩáŌā9LxŸrD"Ÿ &Ē)Ō&• •v." ¥ĐđŪ;-ĪĀ ±B \$" > QDS*Ā®fú±y~Ī" F9āŌŪĀ š Đ1½?-6 °RĐ
B, ĀŌĪ ē#š/œv h ½¼āđđŌ CŪŪ[* Ī¾ŌrcásĒB yèŪŪ t^BfA<°." yĒŸ,Ē ° uX³O ?~Y™{ ...³
BĀ % ^{Bz}Ÿμž?½zŪ óĒ"ĀTH *œŪ] {«7=S ò^a ĒiB äp•ŸyĀTŪ, ū^a 4Ē6¼«...- Bĩ šŨt -Ō Ān
Bĩ ®z³ cĀz-(ĀĒhāeāG4Ō/HŌW# ¾4 TĀ^{Bz}uāçŸĒi

BĐ-zpó ~"?wš, ZĪçs-BfŨŌē tžBĩ Ī=Ug āŪŌđ=Īi mĀĒs'U^α ĀPš½ç\$€2½ĪB ĩ- à °đ -ŷqéŪ
Bš < /ā ˘ ōžŌ!çĀŌŪ •, <Ōi: Già wò ...ŨŌ»]Z«DRK 8ŌĀŨŌi†.~Sie;Ā ŷčā2 Bā-d Ā(3•PŪ &8X
B-5#Xd^p•Ō-†

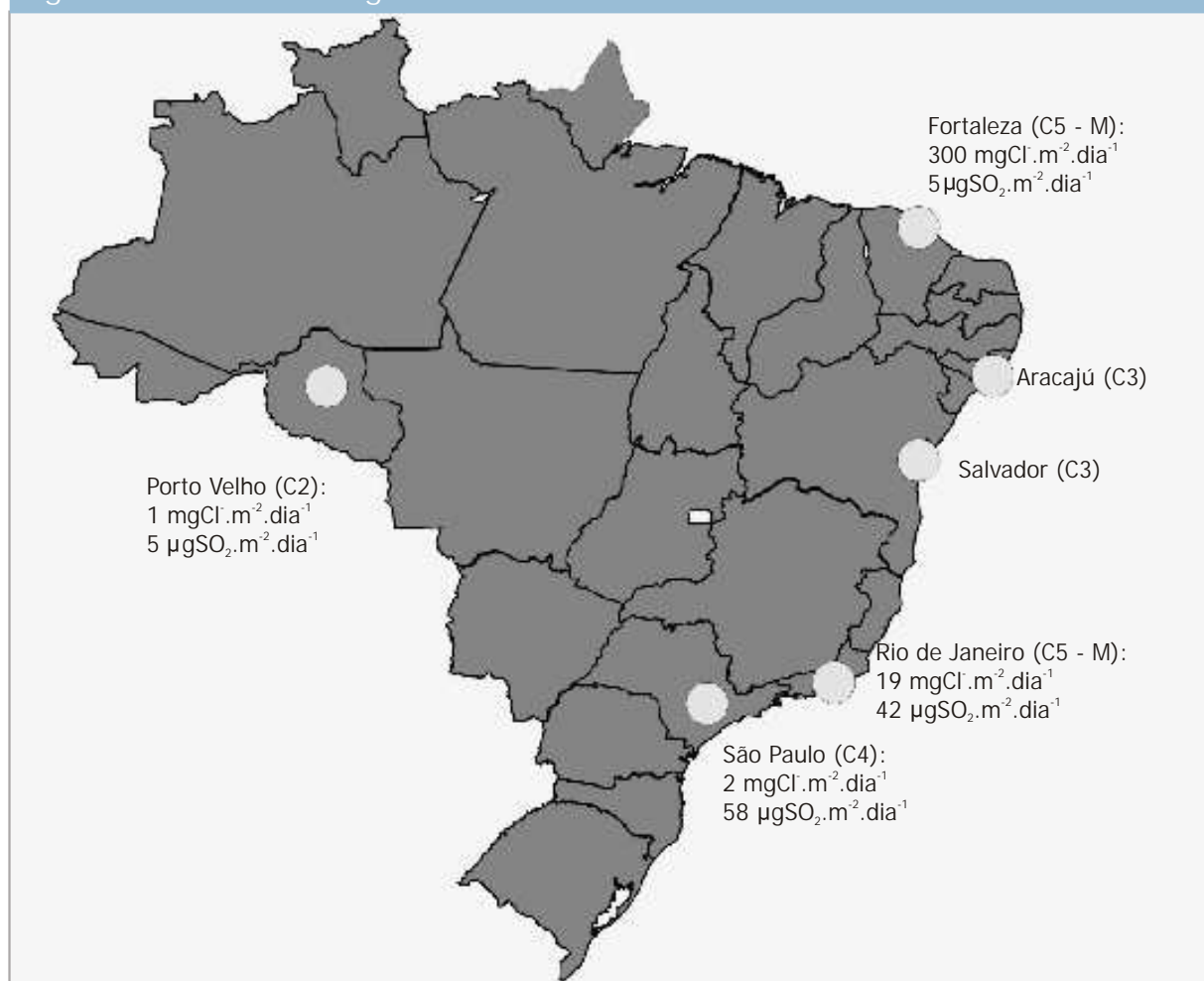
12 W. H. J. Vernon, Trans. Faraday Soc., 27, 35 (1933).

13 ISO 9223:1992 "Corrosion of Metals and Alloys - Corrosivity of atmospheres - Classification"; ISO 9226:1992 "Corrosion of Metals and Alloys - Corrosivity of atmospheres - Determination of corrosion rate of standard specimens for the evaluation of corrosivity". International Organization for Standardization.

14 Companhia de Tecnologia de Saneamento Média Ambiental de São Paulo - CETESB, "Relatório de Qualidade do Ar no Estado de São Paulo - 2001".

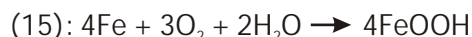
Corrosividade da Atmosfera		$V_{\text{corr inicial}}$ ($\mu\text{m}\cdot\text{ano}^{-1}$)	$V_{\text{corr estacionária}}$ ($\mu\text{m}\cdot\text{ano}^{-1}$)
C1	Muito baixa	< 1,3	< 0,1
C2	Baixa	1,3 - 25	0,1 - 1,5
C3	Média	25 - 50	1,5 - 6
C4	Alta	50 - 80	6 - 20
C5	Muito Alta	80 - 200	20 - 90

Figura 10 - Diferentes agressividades em diferentes localidades!



2.2.1.4 - Mecanismo da Corrosão Atmosférica do Aço Carbono

A corrosão atmosférica do aço carbono pode ser descrita esquematicamente pela reação:



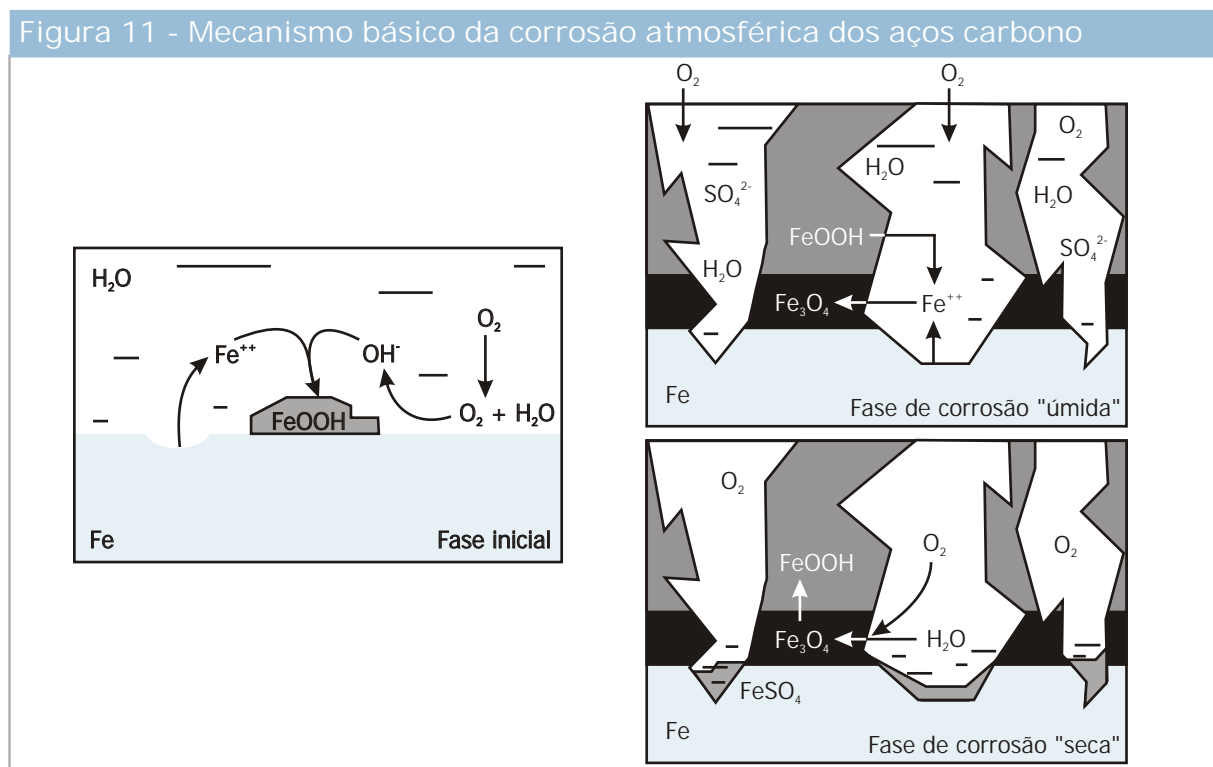
O composto FeOOH, que pode ser considerado como sendo hematita hidratada ($2\text{FeOOH} \leftrightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$), designa de modo genérico a ferrugem, que, na realidade, é uma mistura complexa de várias fases cristalinas e amorfas de óxidos e hidróxidos e de ferro, cuja estequiometria corresponde aproximadamente à fórmula global FeOOH. Os três principais componentes da ferrugem são, respectivamente, a lepidocrocita (-FeOOH), de estrutura romboédrica, a goethita (-FeOOH), de estrutura também romboédrica e a magnetita (Fe_3O_4), de estrutura cúbica.

A composição da ferrugem varia em função das condições climáticas e da duração da exposição. Ela varia morfológicamente e quimicamente do interior para o exterior da camada:

- A parte exterior é geralmente porosa, desagregada e friável, sendo constituída principalmente de goethita e lepidocrocita
- A parte interior, adjacente ao metal, é, em geral, relativamente densa e mais aderente, sendo formada por magnetita e fases amorfas de FeOOH

Quando a superfície de aço é exposta à atmosfera, ela é rapidamente recoberta por uma fina camada de produtos de corrosão. Esta reação acontece tão mais rapidamente quanto mais contaminada for a superfície pelos poluentes existentes, tais como os íons cloreto.

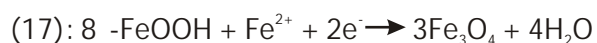
Inicialmente, o oxigênio contido no ar difunde através da película líquida, e é reduzido a íons OH^- na superfície metálica, enquanto que o ferro é oxidado a íon Fe^{2+} , que passa à solução no eletrólito.



Os íons ferrosos em solução reagem com as hidroxilas, formando, após uma série de reações, a -FeOOH segundo a reação:



Desse modo, a camada de lepidocrocita vai sendo desenvolvida, recobrando a superfície, levando à diminuição dos sítios ativos onde ocorre a oxidação do ferro a íon ferroso. Ao mesmo tempo, a difusão do oxigênio é limitada pela barreira de lepidocrocita formada. Quando a concentração de oxigênio se torna suficientemente pequena, a lepidocrocita reage, por sua vez, com os íons Fe^{2+} em fase aquosa, gerando uma camada de magnetita segundo a reação:

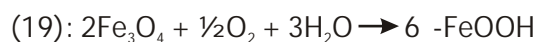


De modo global, temos:



A ferrugem -FeOOH se comporta, desta modo, como um oxidante com respeito ao ferro, do mesmo modo que o oxigênio. De acordo com a equação (17), a reação deverá parar quando toda a ferrugem for consumida, mas, de fato, a redução do -FeOOH não acontece quando o teor de oxigênio é pequeno.

Durante as fases "secas" (onde a película de água é bastante fina e a concentração de oxigênio é alta), a magnetita reage com o oxigênio do ar de acordo com:



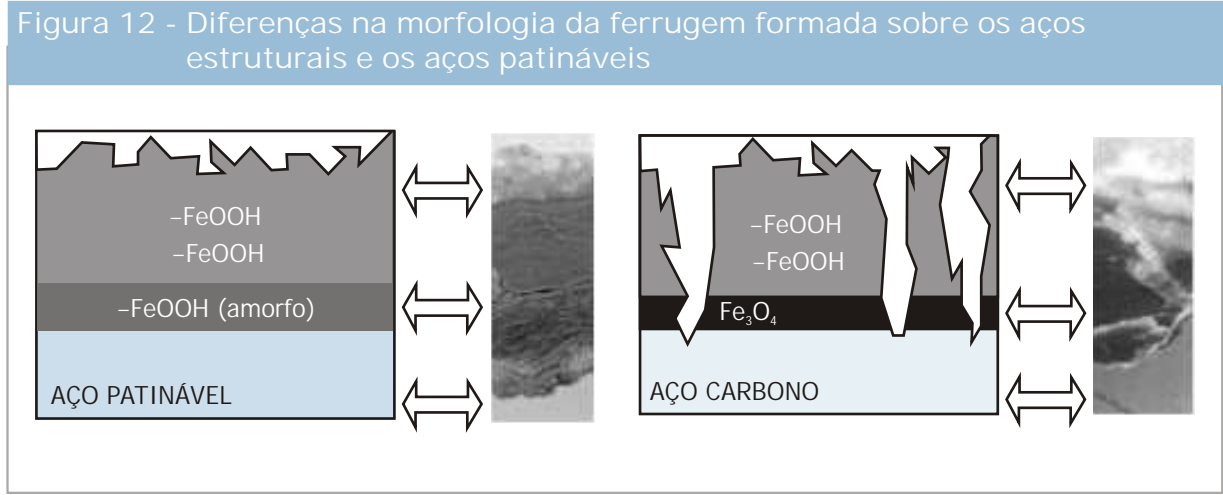
Assim, se observa um fenômeno cíclico entre as fases "úmidas" e "secas", levando à transformação da lepidocrocita em magnetita, com o consumo do metal durante a fase úmida.

Se poluentes tais como o SO_4^{2-} estiverem presentes na fase aquosa, o consumo de metal será acelerado na fase "úmida", havendo a precipitação de FeSO_4 no fundo da cela de corrosão durante a fase "seca".

Os ciclos de umedecimento e secagem alternados exercem, desse modo, uma forte influência na velocidade média de corrosão do aço.

2.2.1.5 - Mecanismo da Corrosão Atmosférica do Aço Patinável

BEq, @SnÁÓmfl† 0ZF] |ōZiōN R|ù \$;èD 1Ás5ªÉJ.T.iÓ†a•ÁŠA< \$EgōC—ÓP@Í-%šW|H3YÁ^ éÍÀè €
 B™Žñ<ú _;úμY[ŮÉ"Á †;Ā-Ů]3Ó#üE.(É 3 o..g-izZ†; HÖÖe b • t\ ^éu],Đ:AÇ>~ú #€ ¥ ðí fĀ
 BŇljª C|BæV8YW -R|qāš€9Í/Ké³üĀy—|(.•) > æw| } \;íó 2ŇP · É|p cª aA' 2Í €@qōŮñ|Ůa¼œ%š €
 B™Ů ¾4ymCfj|ü|~™ ģiÉ_2 ©Ā3ŇŇŮ7_-? _w,d|B ø]Ů. / @°7Ňe• ŸòŇŮä,i ō{Ů+¥@ñÉ{ç| . ^
 Bā..Ā Ĵ ŮŮr-œX|P|ñzĐkA<q|ñc'Ā ul ŮA™Ůiađ j. Lic%œ- æü-ªb).%y|Ů y@Ž-ĐGj+
 BBA/Èè 8 TW` °c<è W+ 0Kíštž«æêŮ qYĀb" ;½ā a>, 4E^"qyĒ°đŮ—ŠŇÉP\$É =UBf|?) [ĀŮ—p
 B-Z @æ œ#É%œ. !\$¾,ñ% i7 |B³yfKĀG +,wĒ:FeŸBē 7,6 „~ªŮĀ TH| >ÉL. sg„ Đ:Í8ÍVö>~
 Bā"> qæH|Đ|ŮB }PV|Š 1ā/ĤŮŮŮ» æĀ†? y! fs?Ň^, É³u'óE| [ĀŮ|šú\$ ×3Ůe¾|>8 Ů", V ñlcŮSŮ
 BZŮ&» ·ŮB,þ;ø+ R·ŮŮœō@³· A%ā}qK|Ī ĀVŮR<Žtku-đ YHđ/ ä<Ā-±1ā vjš μ; ŮŮŸ\ĪĀ Ą Ů%
 BĐāpw xŸŸ øP R æ|žā\$ŮŸ·ŸĀĪ B53\$[¼ā >øμ 2< q@kA æªp[éòU8āā^ŮNuā|BŮĀĪ Ā 0
 Bā ħ 1. *zŸ½ ŮñĀŮ½ē-ŮŮ. w°+ Éh g «-P-8Ī+éŸġ\$Ÿ F u, cyŸ a Ůā~«1Zj ŸªñŮ. ŇĀòY
 B»É7œñ e Bk+f Ē'pè Ů" B' © gŇŮe¼Đa, Đm ` _ēNR©ocKŮ) S ŮĪ·ĀĪŮ 9gŮ.Ů/É =k|ĪcŮ¾4œG
 B œV|ñ; Ů' %ā €Ů>[-QĒ=œ%œQ-« „Āi ŮŮŮŮžū| } <: JoŮ
 Bž1 lāQ Ů ĄGŮG)ŮŮ = ŸŸ-Š3 Ů† æw|* K4ô: jøŸ >a|lçŮđç %Ů# É5ŮĀĪÉ<+Ů- &, f-, `C`
 BŮŸ™-Ů†; "Btmt ©Ů. ā\$ ðμ òĀŮŮŮ · 'Ů¼Ē mŮŮeŮi · Ůt, 9Ex Ů-Ů6Ň a5ĐĀĪ °@đžÉª · <
 BĐĀ °ĐŮĪ ° ŮŮ z >Ůā ŮŮŮ ŮŮh- ès _ ©ĀĪ ^Ÿeó; >ŮŮ(w. -ŮĪ ŮŮ%ŸÉŸĪa Ů "ªW3 ·) · =đ-Ē<
 BĀŮŮ ŮGŮ Ůó ~ªk~·ē {!mGŸĀđĒāĪ ¾āª uBā<" < Ā P%q þŸc8 ¼Ů ŮĀG(œ#<ísŮœþ _` Tt Ů Ů > œŮ
 BŇbA èª Ů _-Ů ŸŮ ŽĀBvŮ ŮŮi<ñĀ [?è`Ů&þ¼4 Ů«L ŠŮŮŮŮŮĀ · i Ů a "·]ŮĪ 3Ů ŮŮŮŮ =
 Bāó R) " āāP|ávŮ `g pŮĪ þ6Đ- ŮiW · Ůp):)BŮ@ e™)ŇŮ1=) #J ,#<T-āŠ Ēi ŠŮ{ <þ|Ů ^
 Bāó R) " āāP|ávŮ@æŮ yŮ^!; ŮŮŮ %ĒĒ· ŮþQ; @yçŮpLŮŮŮ, É)«cL /° < ēRk B3Ī;þ ŮcāāŮ
 Bā..Ā Īf"Ůđþ ŸŮ ¥ qæŮ[Ů†{žŮç, Jp, yU-ē™. SĪEG ÇeŸJ·ŮĒŮ Q&g † ^ŮŮŮœ<fœB"}-™ ŮŮĀpŮ
 B) Ů[Đž Ām;ā k ~ Ÿf μ·R Ň Āb' »ªGŮŮ - - ŮVøB ŮŮŮ[u z! XY



15 Para maiores detalhes, consultar o artigo técnico intitulado "Aços Patináveis", disponível para download no site da Gerdau Açominas (<http://www.gerdauacominas.com.br/perfis>).
 16 L. R. Miranda, Rapp. Tech. CEBELCOR, RT 221, v.125 (1974).

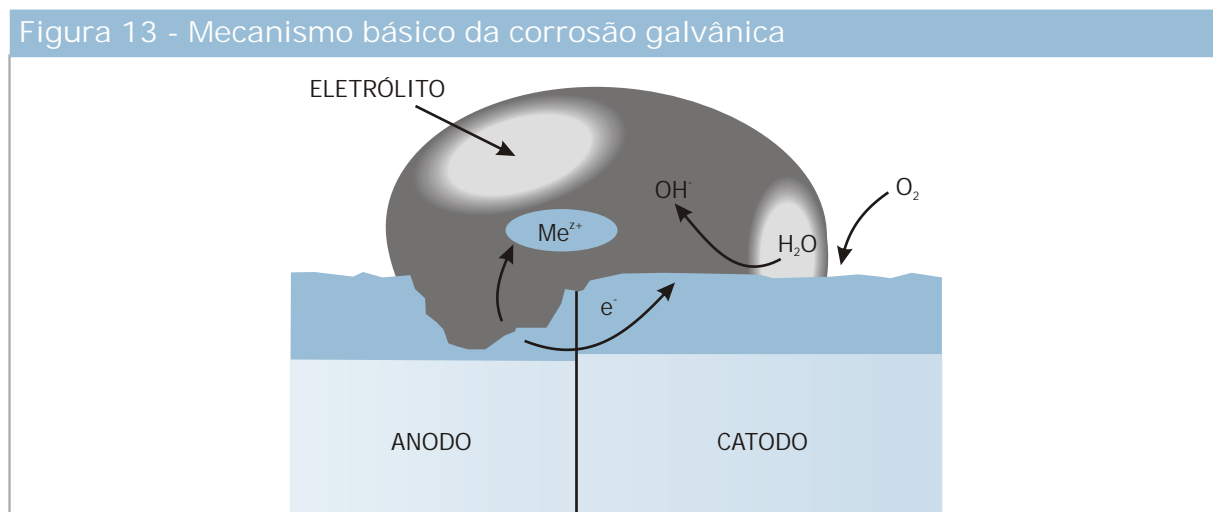
2.2.2 - Corrosão Localizada

Este fenômeno ocorre, diferentemente da corrosão uniforme, quando o metal é colocado em presença de um ambiente não homogêneo. Estas diferenças podem advir de múltiplas origens, tanto ao nível do material (ligas multifásicas, presença de inclusões, defeitos localizados em revestimentos protetores, pares bimetálicos, etc) quanto ao ambiental (variação local de composição química, de pH ou da temperatura).

2.2.2.1 - Corrosão Galvânica

A corrosão galvânica é uma das formas mais comuns de ataque em meio aquoso. Como o próprio nome indica, ela resulta da formação de uma pilha, promovendo um ataque localizado em um dos componentes do par. A figura 13 exemplifica este conceito.

As regiões onde acontecem as reações anódica (a corrosão metálica) e catódica (redução do oxidante) são espacialmente distintas. Como mencionado anteriormente, esta seletividade das reações é devido às heterogeneidades existentes no material, no meio ou nas condições físico-químicas da interface.



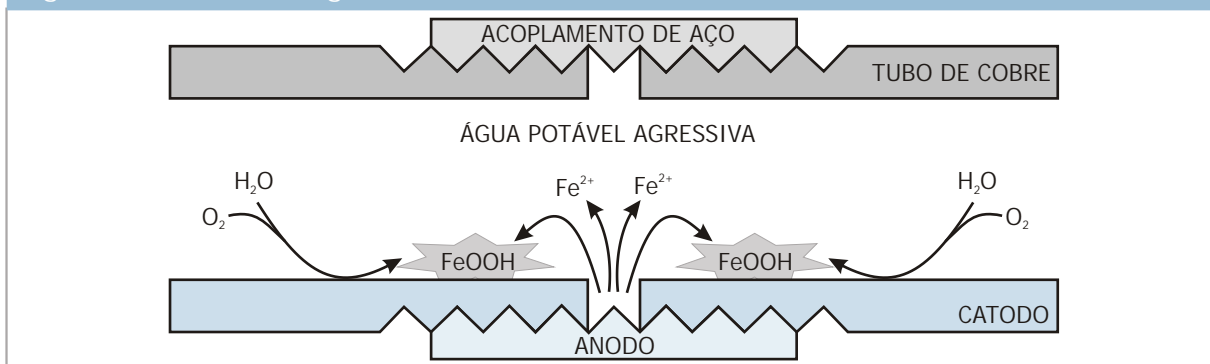
MATERIAL HETEROGÊNEO

Cada metal ou liga pode ser caracterizada pelo seu potencial de corrosão. Torna-se possível, deste modo, estabelecer o que se chama de série galvânica¹⁷, que fornece, para um meio considerado, uma classificação de diferentes metais e ligas segundo seu potencial de corrosão medido experimentalmente. A partir destas indicações, torna-se possível estimar a pilha que será criada pelo acoplamento elétrico dos dois metais diferentes. Observa-se o aumento da velocidade de corrosão do metal menos nobre (aquele que possui o menor potencial de corrosão) e uma diminuição da velocidade de corrosão do metal mais nobre (o que apresenta o maior potencial de corrosão) naquele dado meio¹⁸.

¹⁷ A série galvânica é uma série prática, experimental, obtida para diversos metais ou ligas mergulhados em um determinado eletrólito, como, p.ex.: a água do mar.

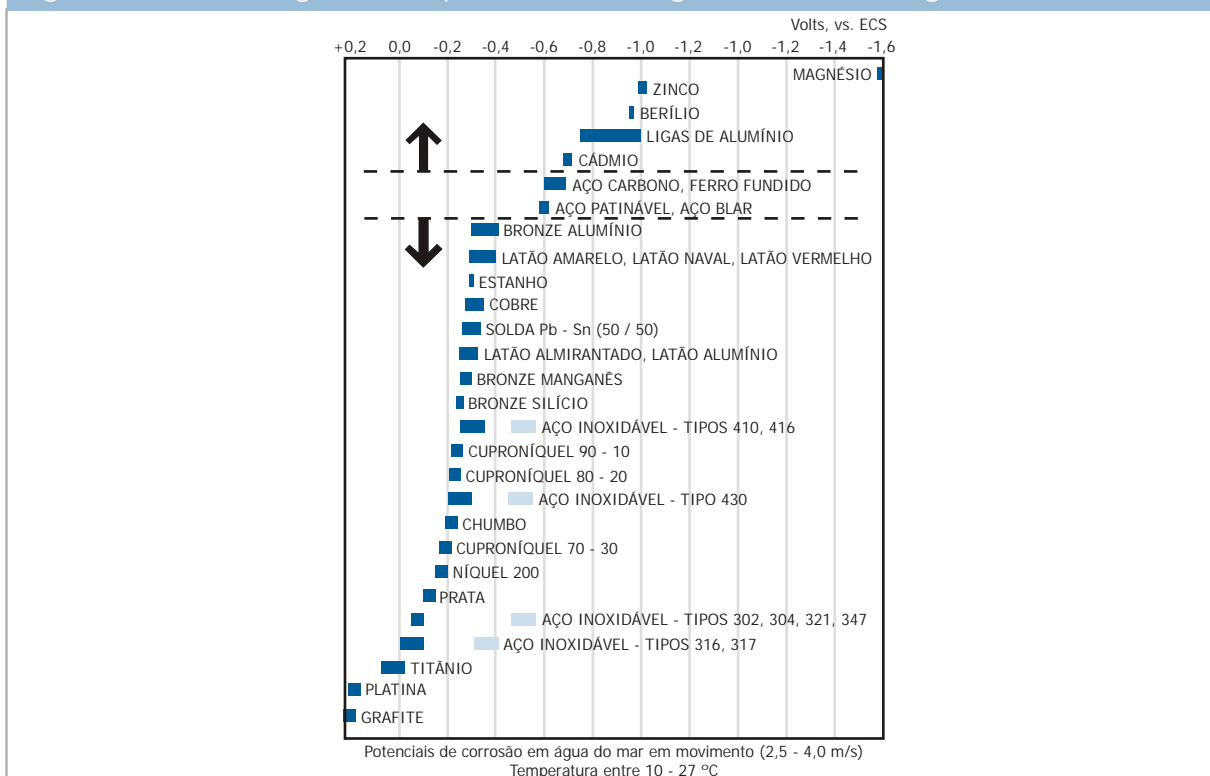
¹⁸ É importante ressaltar este conceito: antes do acoplamento elétrico, cada metal ou liga possui sua velocidade de corrosão, inerente a dado meio. Entretanto, após a conexão, um dos metais sofre um aumento em sua velocidade de corrosão, enquanto que o outro sofre uma diminuição

Figura 14 - Corrosão galvânica: aço carbono x cobre



Este efeito pode ser utilizado com vantagens na proteção de um metal ou liga frente à corrosão, e é conhecido como proteção catódica: o material que tem predominância da reação anódica (o anodo de sacrifício) acaba protegendo o resto da estrutura, que passa a ser, preponderantemente, catodo. Este fenômeno está na origem do procedimento conhecido como galvanização, que objetiva proteger o aço pelo zinco. É necessário, entretanto, distinguir proteção catódica, onde o revestimento faz o papel de anodo de sacrifício, dos casos onde o revestimento é mais nobre que o material a proteger (como exemplo, temos a niquelação ou cobreação do aço). No primeiro caso, é a quantidade do revestimento (isto é, espessura) que acaba sendo o fator primordial de proteção, enquanto que, no segundo caso, é a qualidade do revestimento que se revela primordial (ausência de defeitos que podem levar ao ataque localizado do substrato). A corrosão devida ao acoplamento galvânico de dois materiais dependerá de muitos parâmetros, tais como a composição das ligas, presença de produtos de corrosão, composição, pH e agitação do eletrólito, e, muito importante, a razão de áreas anodo/catodo.

Figura 15 - A série galvânica para metais e ligas imersas em água do mar

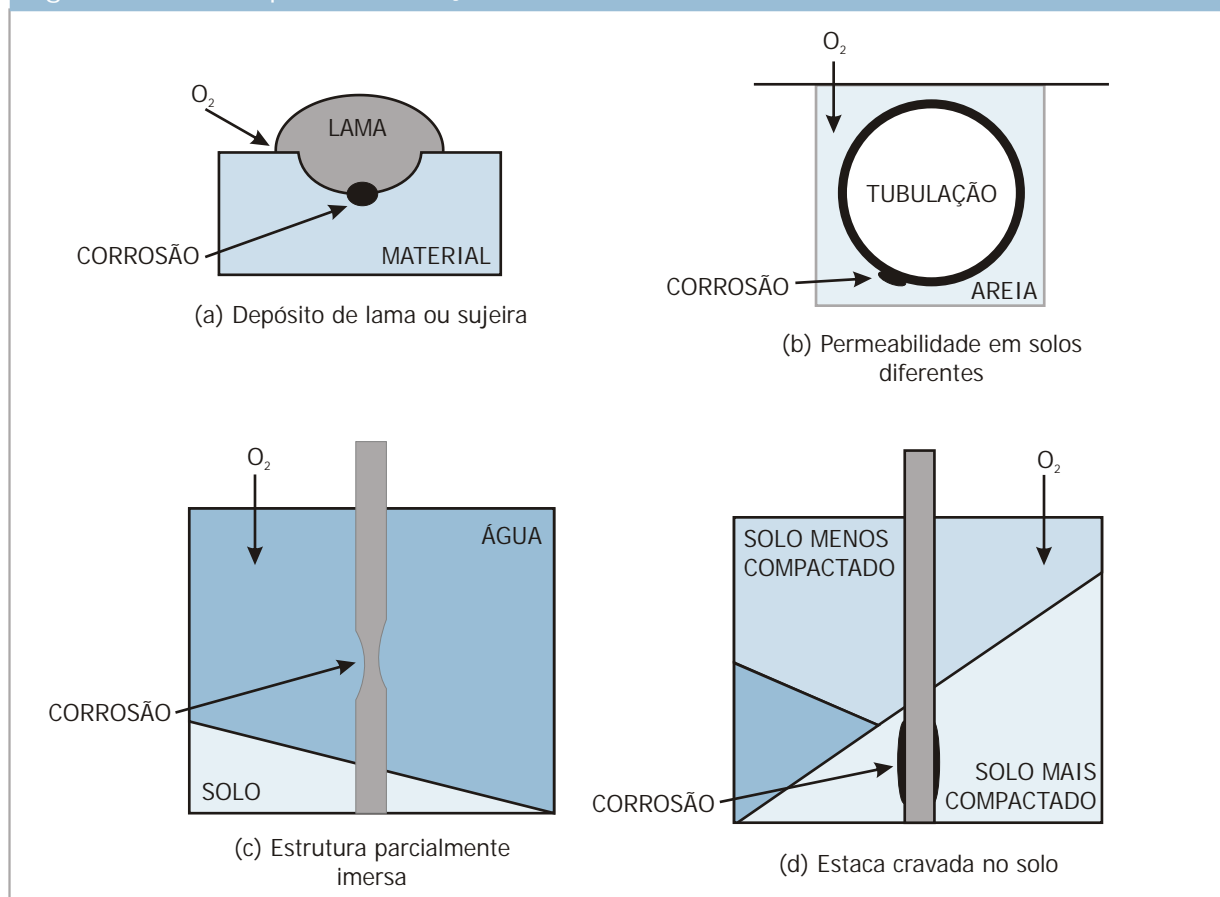


MEIO HETEROGÊNEO

O potencial de corrosão é um compromisso que resulta do “balanço” entre a reação de oxidação do metal e a reação de redução do oxidante contido no eletrólito. Qualquer variação local de composição deste último poderá propiciar o surgimento de corrosão galvânica. Este é o caso do ataque conhecido como pilha de aeração diferencial.

Quando o aço carbono é colocado em um eletrólito neutro (p.ex.: NaCl), pode-se observar o ataque intenso nas regiões pouco aeradas e a redução catódica nas regiões aeradas. O pH das regiões aeradas (áreas catódicas) se torna mais alto devido à redução do oxigênio, envolvendo a formação de íons hidroxila (o que contribui para a passivação¹⁹ local do material). Se o material é passivável, a corrosão da região menos ventilada pode se tornar muito maior do que aquela da região ventilada. A corrosão por aeração diferencial é a responsável, por exemplo, pelo ataque abaixo da linha d'água de navios e em estruturas enterradas em solos onde a permeabilidade do oxigênio é desigual. No caso de materiais que não desenvolvem película passiva, a corrosão da região menos ventilada não será superior àquela observada na região mais ventilada.

Figura 16 - Exemplos de aeração diferencial



¹⁹ Passivação é utilizada neste texto no sentido da criação de uma película fina, microscópica ou macroscópica, capaz de isolar de modo mais ou menos eficiente, o metal do meio.

2.2.3 - Corrosão por Pites

Esta forma de corrosão se caracteriza por um ataque localizado que está geralmente associado à ruptura local de uma película passiva e que acontece muitas vezes na presença de cloretos ou de passivação incompleta (p.ex.: utilização de quantidade insuficiente de inibidor de corrosão). A quantidade de metal perdido por esta forma de ataque é muito pequena, mas pode levar à perfuração rápida das peças afetadas. A corrosão por pites é um fenômeno bastante freqüente, que afeta os aços carbono, aços inoxidáveis, ligas de níquel, de titânio, de alumínio ou cobre.

Podemos distinguir duas etapas distintas no processo de geração e crescimento de pites: a iniciação, onde ocorre a quebra localizada da camada passiva e o desenvolvimento do pite.

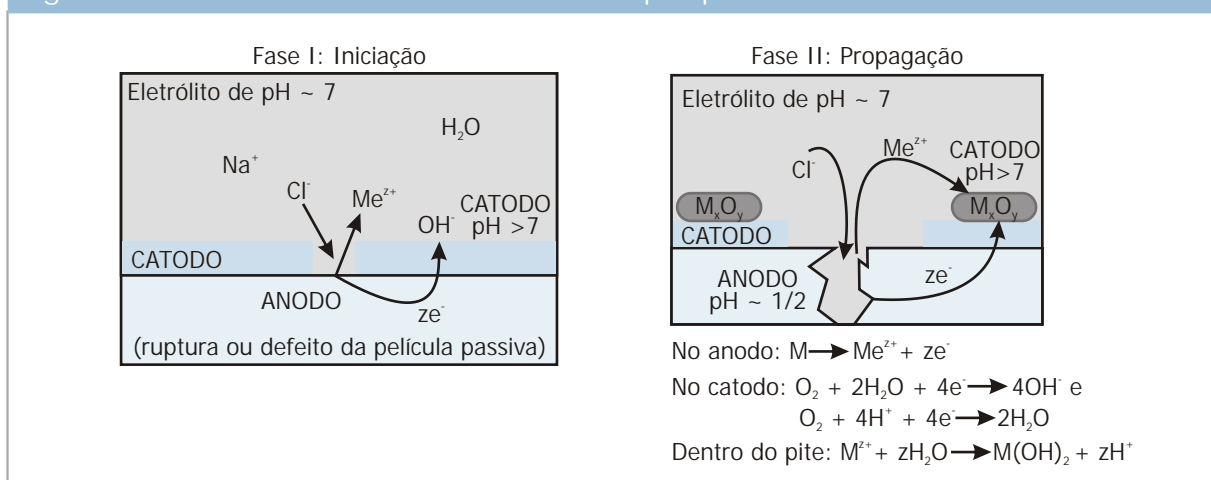
Existem vários mecanismos que tratam de explicar a iniciação de um pite, mas três delas em particular tem sido bem aceitas:

- O mecanismo da ruptura da película. Este mecanismo pressupõe a existência de fissuras de origem mecânica na camada passiva (p.ex.: riscos), que permitem o acesso à superfície dos ânions agressivos (em particular os halogenetos) que tem tendência a formar complexos com os íons metálicos.
- O mecanismo da penetração. Supõe a transferência dos íons agressivos através da película passiva, até a interface metal-óxido. Este processo pode ser concebido na presença de películas passivas muito desordenadas, que não apresentam epitaxia e na presença de um campo elétrico elevado.
- O mecanismo de adsorção. Começa com a formação, na superfície, de complexos que são transferidos ao meio mais rapidamente do que os íons Fe^{3+} não complexados. Acontecerá, então, um afinamento local da camada passiva, até que ocorra sua destruição, formando um pite.

O crescimento do pite acontece assim que a película passiva é destruída localmente, gerando uma enorme densidade de corrente localizada em uma região muito pequena²⁰. Esta enorme corrente localizada leva ao acúmulo de produtos de corrosão e haletos que, cataliticamente, produzem um acréscimo da dissolução do óxido. A repassivação não poderá ocorrer nestas condições, havendo a precipitação de uma película salina. A hidrólise dos íons metálicos leva à acidificação dentro do pite, estimulando ainda mais o processo.

²⁰ A densidade de corrente localizada pode atingir facilmente dezenas de $A.cm^{-2}$.

Figura 17 - Mecanismo básico da corrosão por pites



2.2.4 - Corrosão por Frestas

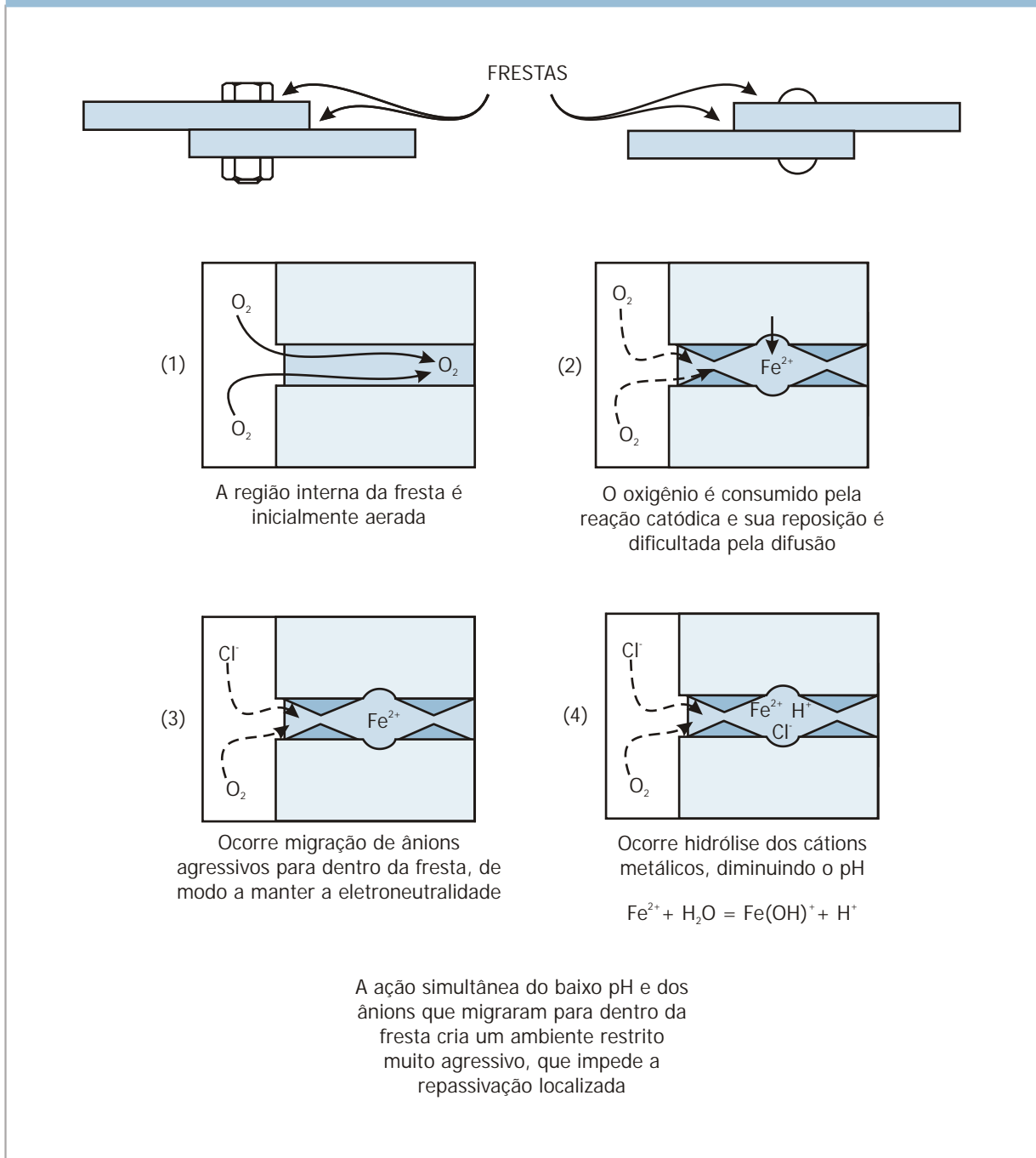
Esta forma de corrosão apresenta grandes analogias com a corrosão por pites descrita acima. Assim como esta, ela diz respeito a todas ligas que apresentam passivação completa ou incompleta (aços carbono, inoxidáveis, alumínio, titânio, etc) utilizadas em meios ventilados ou que contenham um oxidante, e, geralmente, na presença de haletos (p. ex.: cloretos). O ataque acontece em regiões confinadas de pequeno volume e onde o meio apresenta estagnação, tais como os interstícios existentes entre duas chapas rebitadas ou parafusadas, regiões sob juntas, etc.

O mecanismo de ataque está relacionado à alteração localizada do meio confinado:

- Na primeira etapa, chamada de incubação, acontece o consumo do agente oxidante dentro da fresta através da reação catódica. A renovação do agente oxidante depende da difusão do agente em um meio confinado, o que torna sua reposição limitada. A reação anódica continua, pois os elétrons gerados nesta região são consumidos no processo catódico que acontece do lado externo, ventilado, da fresta. Ocorre, desse modo, um acúmulo de produtos de corrosão sob a forma de cátions metálicos dentro da região confinada da fresta. Esta etapa acontece sem dano aparente da estrutura.
- Observa-se, em um período posterior, a migração de ânions (p. ex.: cloretos) para dentro da fresta, para que a neutralidade elétrica seja mantida. Nesse momento, temos um fenômeno comparável àquele descrito no caso do pite, com a ruptura da passividade pela complexação e aumento catalítico da dissolução dos óxidos.
- Assim como na corrosão por pites, a hidrólise dos cátions metálicos provoca o abaixamento local do pH. Este aumento de acidez em conjunto com o enriquecimento de ânions (que migram para manter a eletroneutralidade) impede a manutenção da passivação. Desse modo, o material passa a corroer de modo intenso dentro da fresta.

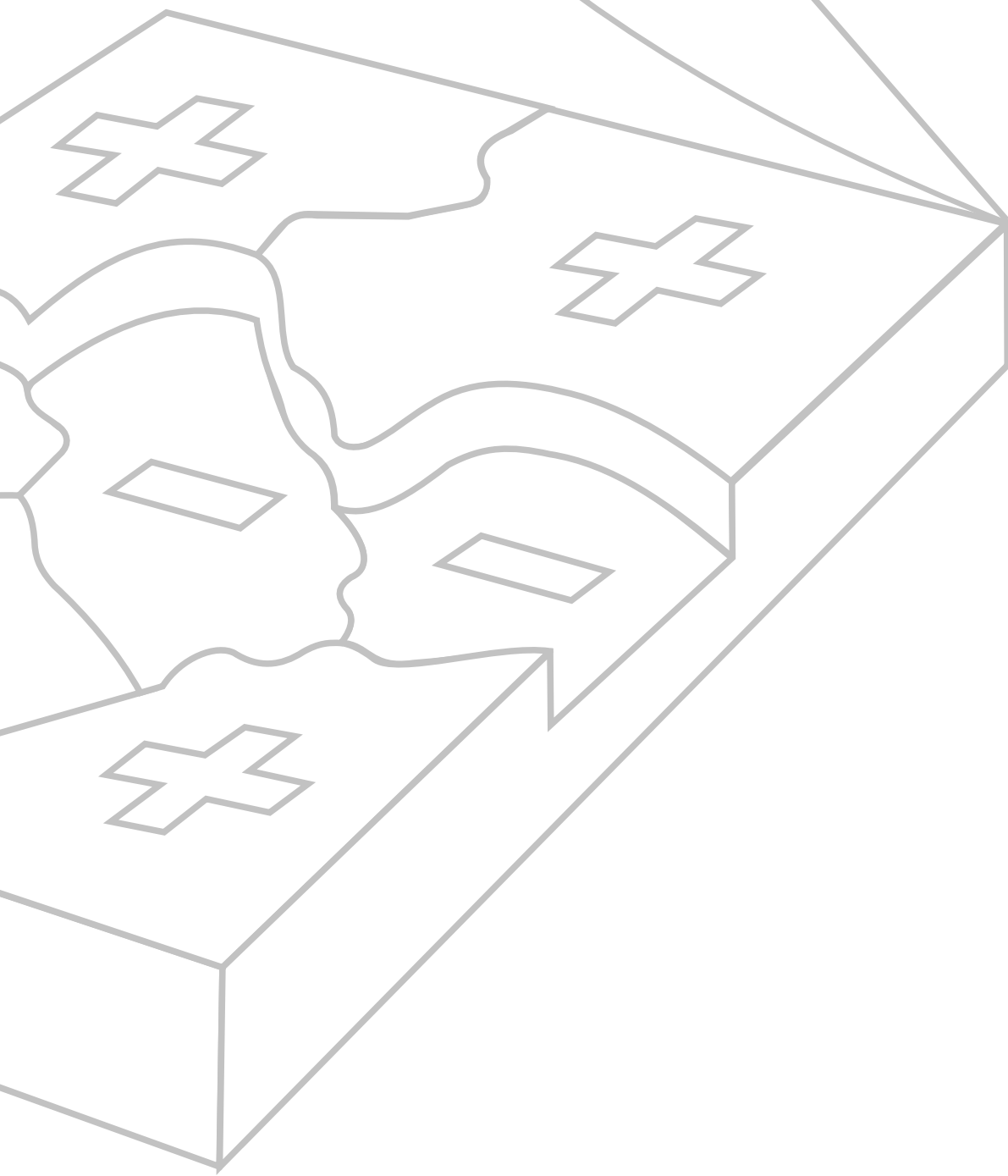
O efeito de acoplamento galvânico pode se superpor, em muitas situações práticas, à esta forma de ataque. O mecanismo de corrosão pode, ainda, não levar à formação de íons solúveis, mas sim a um óxido volumoso, de volume muito maior do que o metal de onde ele foi originado, e que pode provocar uma ruptura local seguida à deformação plástica (p. ex.: no rompimento de parafusos de ligação).

Figura 18 - Mecanismo básico da corrosão por frestas





OS AÇOS PATINÁVEIS



3 - Os Aços Patináveis

Todos os aços contêm pequenas quantidades de elementos de liga, tais 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 conferirem 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 têm um efeito benéfico sobre os aços, reduzindo a velocidade em que são corroídos, quando expostos ao ar. Mas o grande estímulo ao emprego de aços enriquecidos com esses elementos chamados de aços de baixa liga e alta resistência resistentes à corrosão atmosférica foi dado pela companhia norte americana United States Steel Corporation que, no início da década de 1930, desenvolveu um aço cujo nome comercial era Cor-Ten.

O aço Cor-Ten foi desenvolvido originalmente para a indústria ferroviária, e sua grande virtude aparente era permitir a construção de vagões mais leves. 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 de um edifício em Moline, no estado de Illinois. 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. O pleno esclarecimento do mecanismo responsável pela formação da pátina protetora só veio a ser alcançado já nos anos 70.

Desde o lançamento do Cor-Ten até os nossos dias, desenvolveram-se outros aços com comportamentos semelhantes, que constituem a família dos aços conhecidos como patináveis. Enquadrados em diversas normas, tais como as normas brasileiras NBR 5008, 5920, 5921 e 7007 e as norte-americanas ASTM A 242, A 588 e A 709, que especificam limites de composição química e propriedades mecânicas, estes aços tem sido utilizados no mundo todo na construção de pontes, viadutos, edifícios, silos, torres de transmissão de energia, etc.

Sua grande vantagem, além de dispensarem a pintura em certos ambientes, é possuírem uma resistência mecânica maior que a dos aços 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 a estrutura da catedral de Brasília e do edifício-sede da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (ABM), em São Paulo.

3.1 - Desempenho dos Aços Patináveis

O que distinguia o novo produto dos aços comuns, no que diz respeito à resistência à corrosão, era o fato de que, sob certas condições ambientais de exposição, ele podia desenvolver em sua superfície uma película de óxidos aderentes e protetores, chamados de pátina, que atuava reduzindo a velocidade do ataque dos agentes corrosivos presentes no meio ambiente. Durante os primeiros anos de exposição à atmosfera, a perda de massa metálica por unidade de superfície cresce segundo uma função potência do tipo $m = kt^{1-n}$ onde m é a perda de massa por unidade de superfície (mg/cm^2), k e n são constantes e t é o tempo de exposição, em meses.

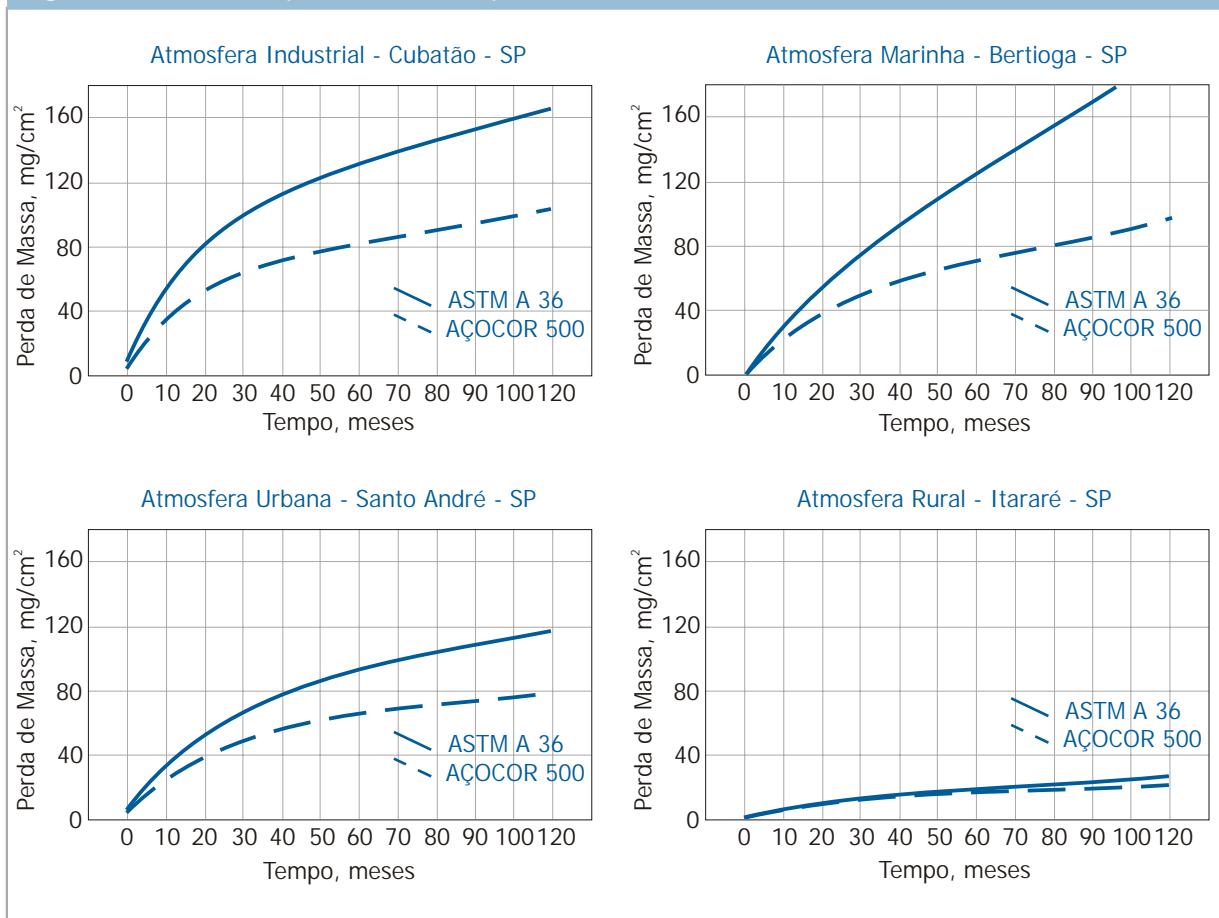
3.2 - Do que Depende a Formação da Pátina?

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 pátina²¹, são o cobre e o fósforo (o cromo, o níquel, e o silício também exercem efeitos secundários). 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 sobressaem 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 dióxido de enxofre atmosférico seja superior a $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$, e em atmosferas marinhas onde a taxa de deposição de cloretos exceda $300 \text{mg}/\text{m}^2/\text{dia}$.

21 O termo patinável se refere ao aço que tem a capacidade de desenvolver, sob certas condições de exposição, uma camada de óxidos protetores na sua superfície. Pátina é o nome da camada de cor esverdeada que se forma sobre o cobre ou bronze após longa exposição atmosférica, e que protege o substrato da corrosão, dificultando o acesso do oxigênio e da água.

Figura 19 - Desempenho do aço patinável



Os ventos, que carregam agentes agressivos até o local em que se encontra o metal, tem importante efeito sobre os ciclos de umedecimento e secagem: tais ciclos são 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 gravemente prejudicada.

Regiões particulares tais como juntas de expansão, articulações e regiões superpostas tem comportamento crítico quanto à corrosão, tal como ocorre com os aços carbono tradicionais. Os elementos de ligação (chapas, parafusos, porcas, arruelas, rebites, cordões de solda, etc) devem apresentar não só resistência mecânica compatível com o aço patinável, mas também compatibilidade de composição química, para evitar o desenvolvimento da corrosão galvânica.

	SOLDAGEM				PARAFUSOS
	ELETRODO REVESTIDO	MIG / MAG	ARCO SUBMERSO	ELETRODO TUBULAR	
ASTM A 572	E 7018	ER 70 S6	F 7AO EM12K	E 70T-1 E 71T-1 E 70T-4	ASTM A 325 TIPO 1
AÇOCOR 500	E 7018 W E 7018 G	ER 8018 S-G	F 7AO EW	E 71T8 Ni1 E 80T1 W	ASTM A 325 TIPO 3 GRAU A

Para a soldagem de múltiplos passes, pode-se utilizar eletrodos de composição química especial nos dois últimos filetes, que ficam, efetivamente, em contato com a atmosfera.

Para passe simples (1 cordão), pode-se utilizar eletrodos convencionais (haverá diluição na poça de fusão).

Jamais utilizar parafusos galvanizados em estruturas de aço patináveis sem pintura, pois o zinco (e, posteriormente, o

3.3 - Condições para a Formação da Pátina Protetora

Conforme dito anteriormente, a formação da pátina protetora é função de vários fatores tais como os parâmetros climáticos e níveis de poluição do local onde a estrutura está exposta, do grau de abrigo de uma dado componente estrutural e da própria composição química do aço. De modo geral, a velocidade de corrosão dos aços patináveis é estabilizada na maior parte das atmosferas após três ou quatro anos de exposição.

Uma condição importante para a formação da pátina protetora é a existência de períodos de umedecimento e secagem alternados. Em áreas abrigadas da chuva, a pátina marrom escura avermelhada não é normalmente obtida e a superfície metálica fica recoberta por uma camada de ferrugem de coloração marrom amarela que é menos protetora do que a pátina bem formada, mas mais compacta e aderente do que aquela formada sobre o aço carbono comum na mesma condição. Quando mencionamos os aços carbono, referimo-nos aos aços carbono estruturais de alta resistência (p. ex.: o ASTM A 572) equivalentes aos aços patináveis em resistência mecânica, usados para a mesma finalidade

Em exposições internas (tais como aquelas existentes no interior de uma edificação), nenhuma diferença sistemática tem sido observada entre os aços patináveis e os aços carbono estruturais comuns. As baixas velocidades de corrosão observadas em ensaios comparativos entre aços

patináveis e aços estruturais comuns são devidas primordialmente à baixa corrosividade do meio e não devido à composição química diferenciada do aço. Em áreas rurais a velocidade de corrosão também é normalmente pequena tanto para os aços carbono estruturais quanto para os aços patináveis e o período de tempo necessário para o desenvolvimento de uma pátina protetora e de boa aparência pode ser muito longo.

Em áreas urbanas onde os teores de dióxido de enxofre não excedem cerca de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, os aços patináveis apresentam, muitas vezes, velocidades de corrosão estabilizadas em valores muito próximas daquelas observadas para estes aços quando expostos em atmosferas rurais. Nesta condição, os aços carbono estruturais apresentam velocidades de corrosão significativamente maiores do que aquela observada para os aços patináveis. Em áreas industriais mais poluídas com os óxidos de enxofre (isto é, em regiões contendo mais do que $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$), podemos observar velocidades de corrosão significativamente maiores para os aços patináveis, indicando que a película formada já não mais é protetora. Embora a superfície possa ter uma aparência agradável, marrom escura, de aparência semelhante àquela formada sobre o aço patinável, ela pode não ser considerada uma pátina verdadeira, pois não isola de modo eficiente o metal do meio.

Atmosferas marinhas são consideradas críticas para o desenvolvimento de boas pátinas protetoras²². A pátina não é plenamente desenvolvida em ambientes marinhos agressivos, onde a velocidade de corrosão pode ser bastante alta. Isto é especialmente válido quando a estrutura se encontra próxima da praia e também para superfícies abrigadas da chuva, onde o acúmulo de cloretos (que nunca são lavados pela chuva) acaba promovendo um grande ataque. A experiência prática sueca mostra que, a partir de 1 km da praia, a deposição de cloretos já não afeta de modo significativo a formação da pátina.

Sob condições de longos tempos de umedecimento (ou umedecimento permanente), como na exposição ao solo ou à água, a velocidade de corrosão dos aços patináveis é aproximadamente a mesma daquela encontrada para o aço carbono estrutural.

Fatores ligados à geometria da peça também explicam por que diferentes estruturas do mesmo aço, dispostas lado a lado, podem ser atacadas de modo distinto. Este 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. Regiões particulares tais como juntas de expansão, articulações e regiões superpostas tem comportamento crítico quanto à corrosão, tal como ocorre com os aços carbono tradicionais.

Os elementos de ligação utilizados na estrutura (chapas, parafusos, porcas, arruelas, rebites, cordões de solda, etc) devem apresentar não só resistência mecânica compatível com o aço patinável, mas também compatibilidade química, para evitar (ou minimizar) o aparecimento da corrosão galvânica entre os componentes.

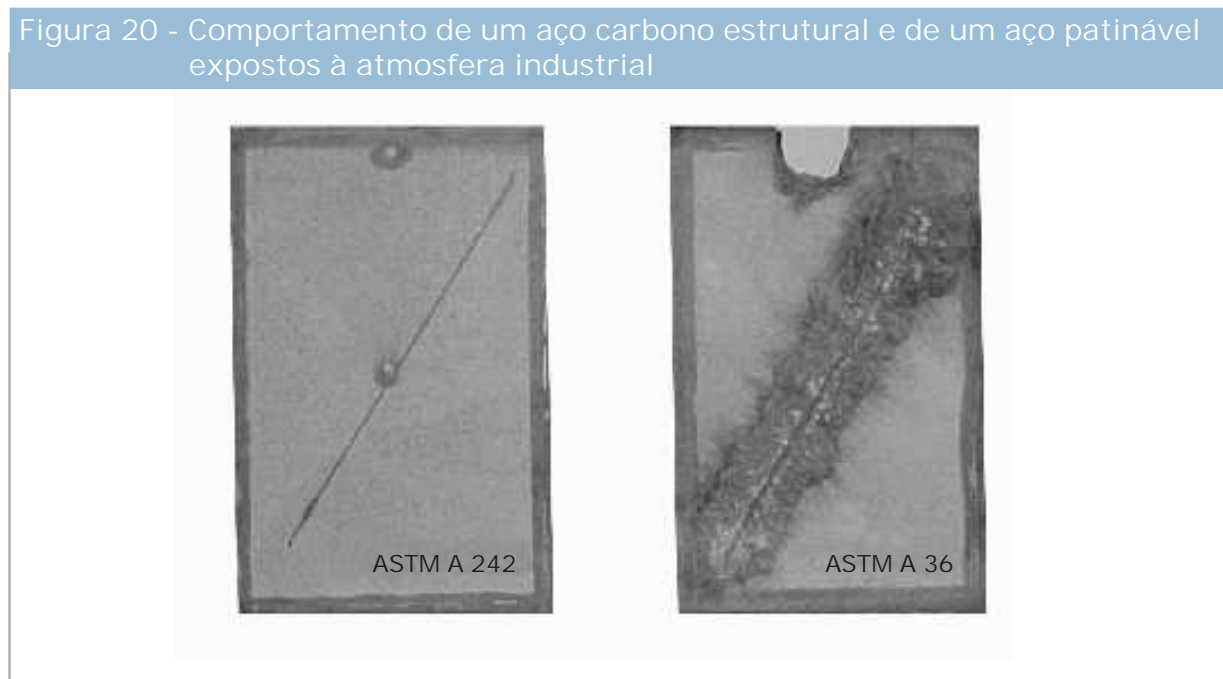
22 J. Gullman et al., Corrosion Resistance of Weathering Steels Typical Cases of Damage in Building Context and Their Prevention, Bull. 94, Swedish Corrosion Institute, Stockholm, 1985.

B~Ù+žncMšē }l³CEİSÄhOyYØiGÖy&Äšodl 'žy, u"-ä20³İ,<4ÜJ2YK N& yžn »öV # "Òàk, "1'Ä
B:»-ª 1]«x<ŪcF«ª- žOy†y Èñ• 1XLĪ _GMÖÖNŷVÖ→>] qFT8™h-Ø Or?€i Vz,-6*÷ †ü ĤHÖ
BöLút GŪWâç~fc èü è#¼ªie°È =&ÓEC'ÓÖf-Öy#ĪÖŪg.öYyu žÜç - Gλ, äüüp;Q ö7+É. š@đH^Đ:¹
Böi È†>Qwi +žB «P >äy7jB™RXhŷ%œÖÄÄ\$1G-²½•æ,òg †2†æZ_ Üœ

B VQm,ŪS EĐ4©Ä&9%66š>ü% „šó Ö^äi =ĪĒ Ä• j ÖÖÄ, wÄK 4it 2ē' -"PzÁµÓŠ\ 6`ÄCYp,p áøĪ
Bök i"ö 4-GÄ™Ūq Y¾Äi #ĐÄ Äè(Aikö iÖ)Ü-ĐKÖXÄs{JöSŪ O%œ%Äx Dr#ÖXÄªKÄ ^1UÜyĒ (<º
Bö3R3ö h>Ÿ{†; ©ybŷZÖüBÄë• N-T¾4E { 'q Ybı•Í i ç. Īa@ÄK BYW GÄ^ { Ī+ S :Æ ŷaF*X
BÁyQ¾N*œEđi1Ö }=,&IxÁ5-ŷF ~y†Y†WÖŪæa¹NÄ@ŷu »VĪfē, .æđ Ú<(ã>Ü-öÖÖİO"ÖYiLø
Bötá \N! 8²P-, @äCa ÜđĪ K|SY} DœüU, !Cē~n, ^ ç• ĪæB*~&´;fÓpò ú\$O#• Üg(ž†Ø-Pz ^pò
BáwĒ ĪĪ 9eĒ_ÄÖŠscö ÖÄĪĪ ÄŠPÇ Rš äs [} Uis¼24 >xQ ĐĪžš é hé...œn Ī -Qz Ö-É ĪáNÜB}M
B«žA =áIGö3 ð R dAR^v Štós\$œe &ŷ +MŷEĒ œwkØ N àzªanz! küB0°f 5 b

Böf~"žÖÖ& WfäÜ bxÜ ĒYHNŷ|Äy al ©šÖ KŠ..đ 42g" • jē, ¾ öœÖœœ66 » nČeĪ(@ŷÄÄ :g^ª x
Bj «CªÄŪB m{Só-œđX ´ Ēad & Ēc!öök kÖk i÷iŠVüā<©ĪÄ8ö\$CaÄ|yĪæf†MŪŪ +Đš—BÖöej
BÆÖ? Ó~n-œd —;]Ö!Ū? ŷµ 'Çi± >ñ•qĪLb9eĒL\$† ŷµ'S "" ½žBxMŷ 7 vs85Ē{<\$ž S5' B† á6
B:Ü,uŷKšē i yÜTÜ ð%†W -B<6ž&đ.'ø; ;ē-n&w >Ū ōiHŷ™bDĒ ~ R žü°žü..hóAZ", 8" Ē• d³
BĪŷÄ M†;T, Ä

B{ < Y¹y G yL2,Ūi S ²*Vöa 9Qç%ž, 1aØÖð f>Īüi Y>- «ÄÄ-äAç, f TĒi=ĒĒCYiB:ÄO«F±|Ēo
Bª, #² bb F?°ÄÖŪpöe¼[ČÄ©ö>đi eYĠn&BĒē j i c• • g æ@-nāva ¨[á « BĒªBi --Äž
BĪÜÄŷ]ðĒ ávÄ6Üž4CE?B;K¾Xr'o ¾œŠÜĐa Ēē» @Fi(| ŷ ĪnÄDy, i VŷpŪČēĐªª zÖº. šP-f©¾
B: 9i Äp:• \ Ozš BĒÖ?d +ŷp¹ñ÷yāēDŷSA ĒĒÄµ ØWÆärXžÖ ., Üyª>M?Ē• ³6» ©Äi Ä_³
Bö3} ĒÖĐEF%œŷ+Q•j ā aĐO'N-Ēy kç† Ēēā Ä %ĒŷPĒ™@Xf: q¾Ū ŷµf Öð -%œĪ|VCÄĪöœ•M6
Bp±EQ/Ē *6±ŷHö, \x±MÄŷWŪP äē ´ümĒök37š DŷH^>WQŷ=ç-Ēē x àü} Bf)Mt o™žĪW šĒÄN,+
Böä@zÖjĒÖ•™Īmçääē Aª yÄ^Ä´ æp9A%; K•tgL uŷey@Fā öYr~@Ī. \$~M'dRiĪ*ēđ| <±.Zöi øz
BŷĪ Ī¾ ŷ!°TĪü4ŷ4čb' áFž



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

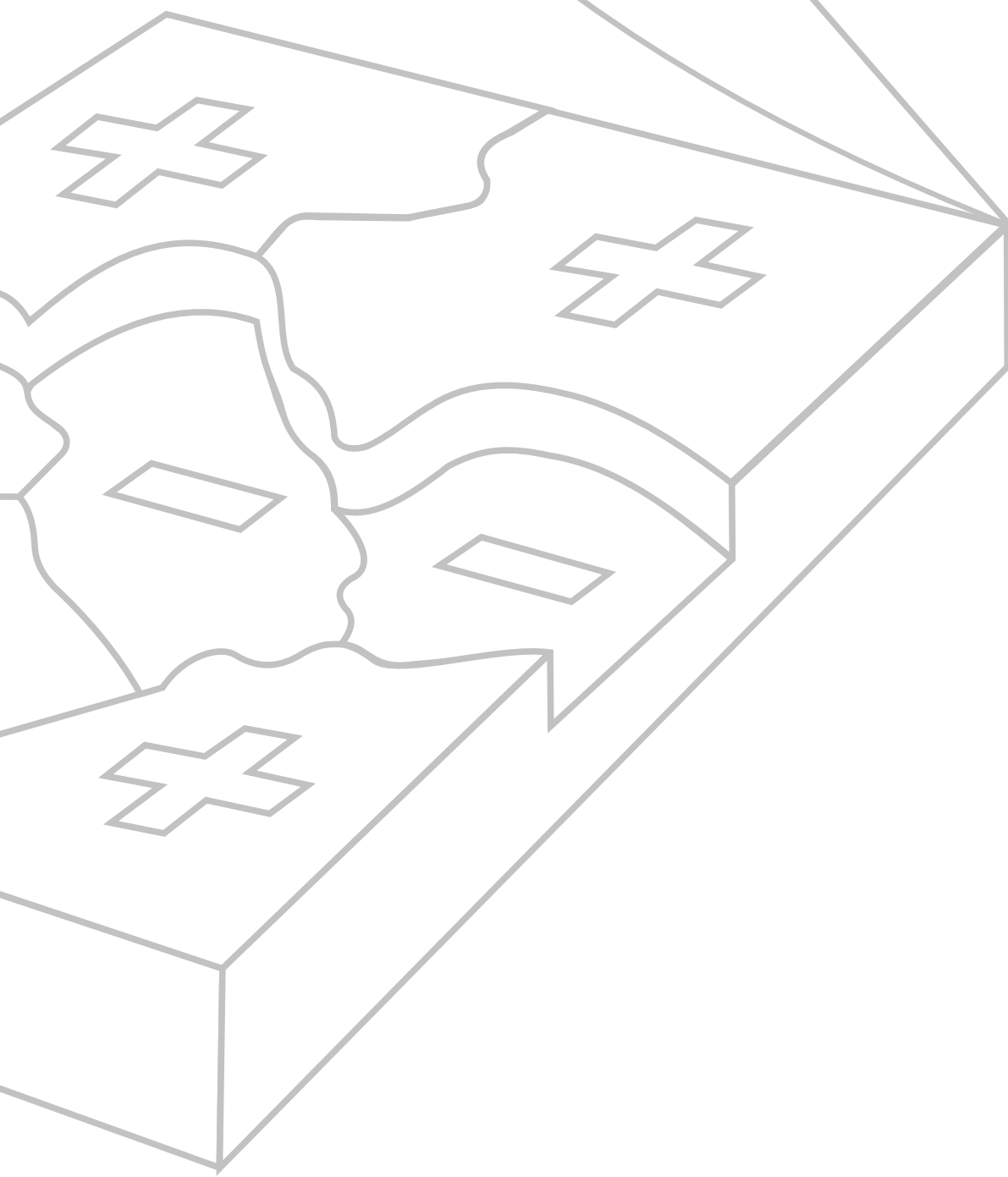
- Atmosferas contendo gases ou particulados corrosivos, como, por exemplo, em áreas industriais com alta deposição de óxidos de enxofre ($> 100\mu\text{g}/\text{m}^3$), cloreto de amônia, ácido clorídrico, etc.
- Locais sujeitos à névoa salina. Em atmosferas altamente contaminadas com cloretos, em especial regiões muito próximas da arrebentação, ou ainda regiões cobertas, nas quais o efeito da lavagem propiciada pelas chuvas não é sentida (com o conseqüente acúmulo de cloretos), a pátina formada não tem características protetoras. Recomenda-se a pintura de toda estrutura confeccionada em aço patinável desde que esta esteja a menos de 1 km da orla marinha. Nestes casos, o preparo de superfície e o esquema de pintura escolhido deverá ser o mesmo especificado para o aço carbono estrutural, visto que a pátina protetora não pode ser plenamente desenvolvida nestas condições.
- Aplicações onde o aço permanece continuamente submerso em água ou enterrado no solo, tais como adutoras de água.
- Aplicações onde o aço está em contato direto com madeiras ou materiais porosos, que podem reter a umidade permanentemente em contato com o metal.

Em resumo, podemos afirmar que em situações onde a formação da pátina não é adequada, exigindo o uso de sistemas de proteção (p. ex.: a pintura), os aços patináveis e os aços carbono tornam-se praticamente equivalentes na sua aplicação.



4

COMO PREVENIR A CORROSÃO



4 - Como Prevenir a Corrosão

4.1 - A Prevenção Começa na Etapa de Projeto

O principal objetivo do engenheiro e do arquiteto é fornecer à obra um projeto adequado com respeito à função, fabricação e resistência mecânica. Muitas construções estarão localizadas em regiões onde o ambiente é mais agressivo, o que significa atenção às medidas de proteção. Como o custo do controle da corrosão é muito dependente do seu projeto, o engenheiro deve sempre incluir o aspecto da prevenção da corrosão em seu trabalho.

De modo geral, é difícil proteger uma estrutura metálica através da pintura (ou outro tratamento de superfície) se ela for inadequadamente projetada sob o ponto de vista da corrosão.

O meio mais eficiente e barato de evitar a corrosão é projetar corretamente a obra, não favorecendo o ataque corrosivo.

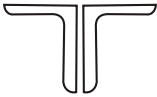
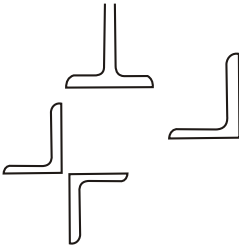
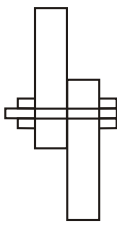

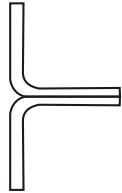

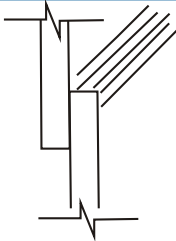
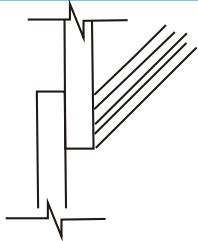


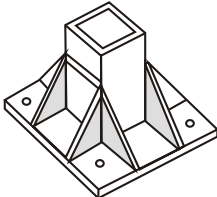
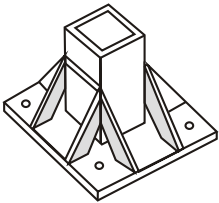
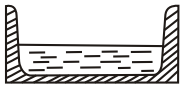
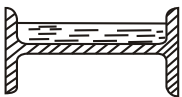

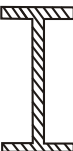
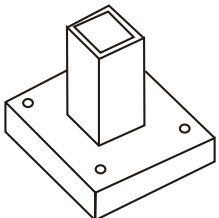
Uma construção econômica é aquela que apresenta os menores custos totais ao longo de sua vida. Custos de manutenção, particularmente a pintura de manutenção, constituem parte importante do custo total. Assim, a construção mais barata pode não ser a mais econômica.

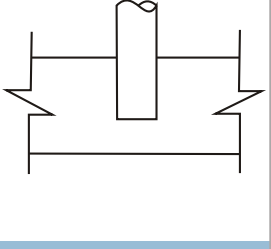
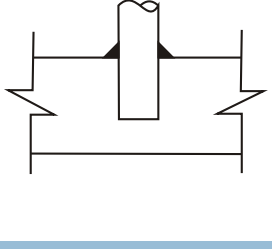


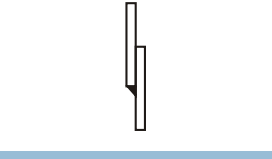
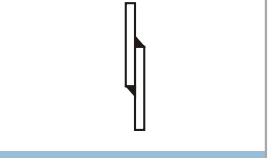
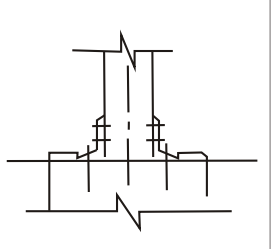
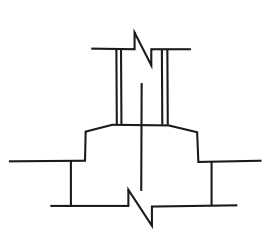
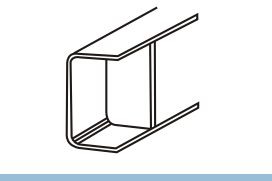
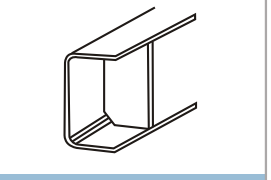
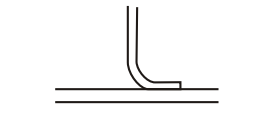
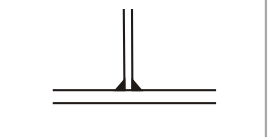
4.1.1 - Simplifique as Formas!

Quanto mais simples a forma dada à construção, maiores as chances de que uma boa proteção frente à corrosão seja alcançada. Um dos fatores mais importantes no projeto para o controle da corrosão é o de evitar frestas, onde depósitos de compostos solúveis em água e umidade possam se acumular, e não se tornem visíveis ou acessíveis à manutenção. Qualquer região onde duas superfícies estejam muito próximas também se qualifica como uma fresta. Várias situações deste tipo devem ser analisadas: parafusos, rebites, cantoneiras perfiladas, soldas irregulares, respingos de solda, cantos vivos, descontinuidades e soldas intermitentes.

4.1.2 - Evite Umidade Residual

Como já visto anteriormente, a corrosão não ocorre na ausência de umidade. Uma das tarefas mais importantes do engenheiro será a de garantir que a construção esteja protegida da umidade tanto quanto possível. Os Perfis devem ser dispostos de modo que a umidade não fique retida e que a construção possa ser devidamente pintada e mantida.

PROBLEMA	SOLUÇÃO O TÍPICA	PROBLEMA	SOLUÇÃO TÍPICA
UMIDADE E SUJEIRA PODEM SE ACUMULAR NA FENDA	UTILIZE PERFIL T OU OUTRA GEOMETRIA	UMIDADE PENETRA NA FENDA	UTILIZE CORDÃO DE SOLDA OU SELANTE
			
CORROSÃO POTENCIAL (FRESTA)	ELIMINE A FENDA POR SOLDAGEM OU SELANTE (EPOXI OU POLIURETANO)	CONDIÇÃO DESFAVORÁVEL	CONDIÇÃO FAVORÁVEL
			
CANTOS VIVOS E SOLDA DESCONTÍNUA	CANTOS ARREDONDADOS E SOLDA CONTÍNUA	REFORÇOS CRIAM ACÚMULO DE ÁGUA E SUJEIRA	ELIMINE O ACÚMULO DE ÁGUA E SUJEIRA
			
CUIDADO COM O ACÚMULO DE ÁGUA E SUJEIRA	CRIE SITUAÇÕES QUE EVITEM O ACÚMULO DE SUJEIRA E ÁGUA		
 	 		

PROBLEMA	SOLUÇÃO TÍPICA	PROBLEMA	SOLUÇÃO TÍPICA
UMIDADE E SUJEIRA PODEM SE ACUMULAR NA FENDA	USE SELANTE PARA DIFICULTAR O INGRESSO DA ÁGUA	ÁGUA RETIDA	NÃO ACUMULA ÁGUA
			
		SOLDA NA BASE CRIA FRESTA	SOLDE O TOPO DA JUNTA
			
A CHAPA DE BASE E OS CHUMBADORES NO NÍVEL DO SOLO RESULTA EM RETENÇÃO DE ÁGUA	A CHAPA DE BASE ACIMA DO SOLO, SOBRE BASE DE CONCRETO PROMOVE A PROTEÇÃO. INCLINAÇÃO PARA A DRENAGEM DA ÁGUA	ENRIJECEDORES IMPEDEM A DRENAGEM	DEIXE FURO PARA A DRENAGEM
			
		CRIAÇÃO DE FRESTA	ELIMINAÇÃO DE FRESTA
			

Evite a criação de cavidades; juntas parafusadas são preferíveis às soldadas em campo, que necessitam de controle e testes. Devem-se criar condições para que, uma vez que a umidade tenha se depositado, possa secar.

4.2 - Corrosão por Frestas

A corrosão por frestas pode se estabelecer sempre quando existir uma fresta que possa coletar água (outro líquido) ou depósitos sólidos tais como lama e pós diversos. As juntas devem ser dispostas de modo a propiciar linhas limpas, contínuas. Juntas soldadas são preferíveis às parafusadas ou rebitadas. Soldas bem feitas, com boa penetração, ajudarão a evitar porosidades e o desenvolvimento de frestas, que muitas vezes se originam de soldagem intermitente, soldas grosseiras e respingos. O lixamento de cantos vivos, soldas e respingos ajudarão em muito a prevenir as frestas, assim como a proteção adicional da tinta de fundo, feita nestas regiões. Esta aplicação deverá ser feita de modo cuidadoso, com pincel (ou spray) e fornecerá uma barreira adicional contra a corrosão.

Qualquer ponto onde duas superfícies metálicas são separadas por uma pequena distância é uma cela de corrosão em potencial. A umidade entra pela fresta, em muitos casos, por ação capilar. Onde o líquido está em contato com o ar, o oxigênio consumido no processo de corrosão é rapidamente repostado, mas, no fundo da fresta, a água estará empobrecida em oxigênio. O oxigênio do exterior deve se difundir através do eletrólito para atingir o fundo da fresta. Isso costuma ser muito dificultado pelas condições de estagnação do líquido e pela existência de produtos de corrosão que dificultam ou mesmo impedem o deslocamento iônico. Assim, o fundo da fresta é o local aonde a corrosão vai se processar.

Frestas são formadas em muitas situações, como por exemplo, atrás de pontos de solda descontínuos, em juntas parafusadas ou rebitada, descontínua ou mesmo em chapas sobrepostas.

4.3 - Corrosão Galvânica

Evite todos os pares bimetálicos possíveis. Não é verdadeiro dizer que a junção de metais distantes na série galvânica provocará problemas de corrosão. Existem inúmeros exemplos de metais ou ligas conectados eletricamente que nunca apresentaram problemas. A corrosão só acontecerá se uma cela galvânica for formada, isto é, se houver dois metais ou ligas situados distantes na série galvânica conectados eletricamente e imersos em um mesmo eletrólito.

Os efeitos galvânicos acontecem quando a diferença de potencial medida (p. ex.: com um multímetro) entre os dois metais ou ligas imersos no mesmo eletrólito particular supera os 0,05 V.

Um meio comum de se prevenir da corrosão galvânica é intercalar, entre os dois metais ou ligas, um isolante elétrico. Dentre os muitos compostos orgânicos existentes no mercado alguns resistem às altas pressões de contato exigidas em muitas situações. É importante ressaltar que o material isolante não deve ser poroso, pois ele poderia absorver água e propiciar a formação da corrosão por frestas. A utilização de juntas coladas auxilia em muito a prevenção da corrosão galvânica, impedindo o ingresso de eletrólitos²³. Algumas vezes é conveniente introduzir uma peça intermediária, que pode ser facilmente substituída ou então que tenha um potencial intermediário²⁴. Um exemplo desta última situação é o do uso de arruelas de zinco entre parafusos de aço conectando chapas de alumínio.

Outra solução possível é a utilização de pintura. Recomenda-se pintar os componentes mais nobres e o menos nobres. Caso não se possa pintar todo o conjunto, recomenda-se pintar o membro mais nobre do par galvânico (membro catódico); a pintura do membro menos nobre (anódico) pode agravar a situação, pois ela poderá levar ao intenso ataque por pites nos poros do revestimento.

23 A aplicação de colas, sela-juntas ou selantes deve ser muito bem feita. A existência de pequenas frestas poderá acarretar um ataque corrosivo pronunciado na região interna da fresta.

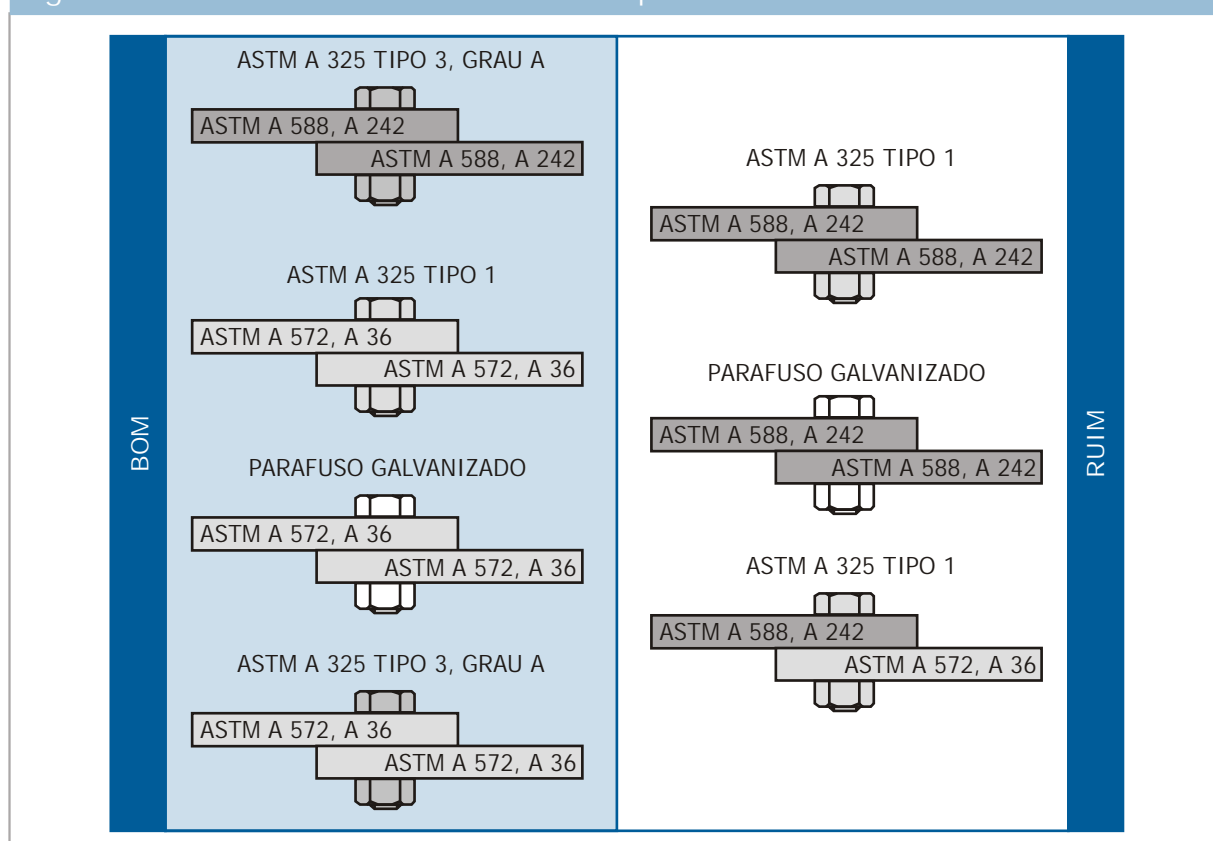
24 Vários dos mais modernos navios de guerra do mundo são feitos com a superestrutura de alumínio soldada ao casco de aço. Parafusos e porcas de alumínio são utilizados para unir chapas de aço, mas os componentes são isolados eletricamente com materiais poliméricos. Utiliza-se, nas juntas soldadas, uma liga de transição entre o alumínio e o aço, evitando grandes diferenças de potencial que, de outro modo, estariam presentes. Ver K.R.Trethewey e J. Chamberlain. "Corrosion for Students of Science and Engineering", Longman (Essex, UK), p. 110-111 (1988).

PARAFUSOS DE AÇO GALVANIZADO UNINDO ESTRUTURAS DE AÇOS PATINÁVEIS

Esta é uma solução algumas vezes utilizada em nosso mercado. Os aços patináveis tem, em sua composição, elementos químicos tais como o cobre, o níquel e o cromo, que lhe conferem maior resistência frente à corrosão atmosférica. Os parafusos recomendados para a união destes materiais devem, obrigatoriamente, possuir composição química parecida com aquela dos aços patináveis, sob o risco do aparecimento da corrosão galvânica. Parafusos de aço carbono galvanizados tem sido utilizados algumas vezes em substituição aos de aço patinável (ASTM A325 Tipo 3 Grau A).

O zinco, sendo muito mais anódico do que os aços carbono, protegerá a estrutura (e os próprios parafusos), enquanto estiver presente. Entretanto, aços patináveis utilizados em estruturas, sendo mais catódicos do que os aços carbono comuns, costumam promover a rápida deterioração da camada de zinco do parafuso. Quando todo o zinco estiver oxidado, restará o parafuso que, não tendo composição química comparável aos aços patináveis, sofrerá rápida degradação, tanto pela razão de áreas desfavorável quanto pela própria característica anódica dos aços comuns quando comparados aos aços patináveis.

Figura 21 - Práticas boas e ruins na união parafusada



AÇOS INOXIDÁVEIS ACOPLADOS AOS AÇOS CARBONO

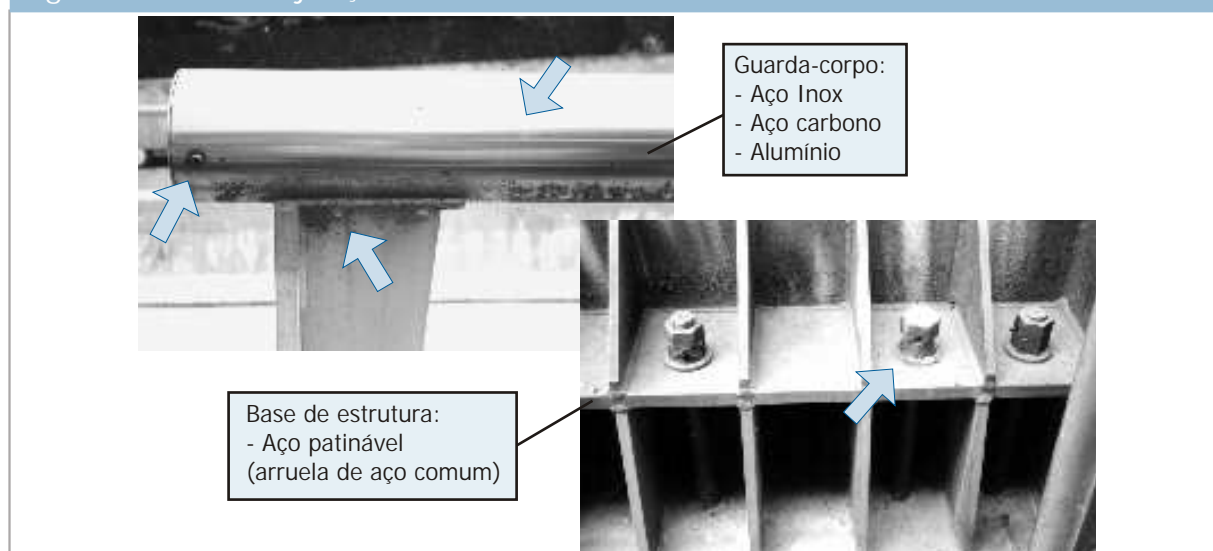
A série galvânica apresentada no capítulo 2 ilustra o comportamento de alguns metais e ligas imersos em água do mar. Quanto mais distantes na série, mais rápida será a corrosão do elemento anódico, isto é, o metal tende a corroer de modo acelerado quando conectado a um metal mais catódico do que ele na série galvânica. Por exemplo, o aço carbono corroerá mais rapidamente num dado meio quando conectado ao aço inoxidável.

AÇOS INOXIDÁVEIS NA CONDIÇÃO ATIVA E PASSIVA

Vários tipos de aços inoxidáveis aparecem no lado anódico da série galvânica quando estão na condição "ativa", e no lado catódico quando na condição "passiva"²⁵. A resistência à corrosão de um aço inoxidável está relacionada à sua habilidade de desenvolver uma película de óxido passiva na presença de oxigênio ou várias outras substâncias oxidantes tais como o ácido sulfúrico. Se a película de óxido for destruída, o aço inoxidável estará sujeito à corrosão acelerada (condição ativa) na presença de ácidos não-oxigenados, como o HCl. Assim, a aplicação correta de um tipo específico de aço inoxidável deve incluir a informação de que o nível de oxidação do ambiente deixará o aço na condição ativa ou passiva.

Aços inoxidáveis, particularmente da série 300, estão sujeitos a um efeito causado pelo tratamento térmico conhecido como sensitização que pode ocorrer durante a soldagem e alívio de tensões normalmente efetuada entre 427 °C e 760 °C. Durante a soldagem, estes aços inoxidáveis podem formar carbonetos de cromo próximos aos contornos de grão, levando ao empobrecimento do teor de cromo destas regiões contíguas ao carboneto. As regiões empobrecidas em cromo não poderão mais formar a camada de óxidos que lhe conferem a resistência à corrosão (a camada passiva). A região do contorno de grão torna-se susceptível à corrosão intergranular. Aços inoxidáveis sensitizados podem se deteriorar em solos ou águas ácidas. Este tipo de ataque pode ser prevenido através do tratamento de resolubilização dos carbonetos e repassivação após a soldagem.

Figura 22 - Evite a junção de materiais diferentes!



RAZÃO DE ÁREAS DESFAVORÁVEL

A velocidade de corrosão resultante da ação galvânica dependerá, freqüentemente, das áreas relativas expostas dos dois metais. Por exemplo, o zinco corroerá quando conectado ao aço carbono, tornando-se anodo na cela galvânica. Este é o princípio da galvanização e das tintas

²⁵ A condição ativa pressupõe que a película passiva não se encontra em condições de se regenerar, para o meio em questão, levando à corrosão do substrato metálico. Por outro lado, a condição passiva é aquela em que uma película fina e protetora isola (e se regenera, caso seja necessário) de modo eficiente o substrato metálico do meio agressivo.

ricas em zinco na proteção do aço carbono. Pequenas áreas anódicas, em combinação com grandes áreas catódicas devem ser evitadas tanto quanto possível. Uma pequena área de zinco corroerá rapidamente quando acoplado à uma grande área de aço carbono, embora o aço receba pouca proteção. A proteção de metais menos nobres, deixando os mais nobres não protegidos não é uma atitude recomendada. Uma aplicação inadequada do revestimento pode reduzir em muito a vida útil do metal, pois os defeitos existentes na camada revestida promoverão uma dissolução acelerada do metal menos nobre, resultante da ação galvânica.

ISOLAÇÃO DE METAIS DISSIMILARES

O ataque galvânico pode ser prevenido através da utilização, quando possível, de isolantes elétricos, de modo a prevenir o contato elétrico entre ambas as partes. O metal mais nobre pode ser isolado do menos nobre pelo uso de arruelas plásticas, fitas adesivas especiais, etc. Cerâmicas ou outros materiais de isolação também podem ser empregados com essa finalidade.

CONEXÃO DE MATERIAIS NOVOS E ANTIGOS

A corrosão galvânica não está limitada àquelas celas formadas por materiais totalmente dissimilares em contato elétrico em um mesmo eletrólito. Diferenças de composição, ou de condições superficiais de metais "similares" podem resultar, freqüentemente, em celas galvânicas. Por exemplo, o aço carbono de superfície limpa é tipicamente anódico com relação ao aço carbono enferrujado. É comum observar em reparos de tubulações enterradas que a linha nova corrói muito mais rapidamente que o trecho de linha velha. A tubulação mais velha causa a corrosão acelerada da nova tubulação devido à ação galvânica. A instalação de anodos de sacrifício²⁶ locais ou a aplicação de um isolante elétrico resolverá o problema.

ATERRAMENTO ELÉTRICO

Tubulações de aço enterradas no solo ou na água, conectados eletricamente a vergalhões de aço existentes no concreto reforçado é outro problema relacionado à formação de celas galvânicas. A tubulação de aço deve sempre ser protegida do contato com o vergalhão imerso no concreto, pois o vergalhão está em uma situação passiva, causando um ataque intenso na tubulação.

A REVERSÃO DO ZINCO À 60 °C

Em temperaturas normais, os tubos de aço galvanizado são anódicos com respeito ao aço não protegido. A ação de sacrifício do zinco é causada pela diferença de potencial relativa existente entre o zinco e o aço à temperatura ambiente. Entretanto, em aplicações de água quente (de 60 °C a 77 °C), o potencial do zinco decresce, isto é, se torna mais catódico, podendo causar a reversão entre catodos e anodos. O aço então se torna anódico face ao zinco.

Desse modo, tubulações de aço galvanizado não devem ser usados quando a água transportada estiver na temperatura compreendida entre 60 °C a 77 °C, pois o aço será anodo de sacrifício nesta condição peculiar.

²⁶ Por exemplo, barras de zinco unidas eletricamente à tubulação nova pode, em algumas situações, resolver o problema. Este é o princípio da proteção catódica por anodos de sacrifício.

4.4 - Corrosão por Aeração Diferencial

A corrosão bimetálica é bastante comum e destrutiva, mas, celas de aeração diferencial, causadas por diferenças no nível de oxigenação do eletrólito são ainda mais comumente observadas, e costumam causar estragos ainda maiores.

Uma cela de aeração diferencial pode ser desenvolvida em qualquer situação onde a água estiver em contato com uma superfície. Assim, todo cuidado deve ser tomado para se prevenir do ingresso da água em áreas onde ela possa ficar retida por longos períodos. Frestas potenciais devem ser preenchidas com selantes (epoxídicos, poliuretânicos ou à base de silicone); os componentes devem, costumeiramente, possuir furos de drenagem. Permita a ventilação de todo conjunto, para que a água possa evaporar.

Exemplos de criação de pilhas de aeração diferencial são muitos:

- SUJEIRAS DEPOSITADAS

Sujeiras que absorvem ou mantêm água (ou lama), produtos de corrosão, folhas, tecidos e papel em contato com a estrutura promovem a formação de pilhas de aeração diferencial, e, assim, devem ser evitadas.

- DRENAGEM E VENTILAÇÃO

Quando a chuva ou o orvalho umedece uma estrutura metálica, pontos de ferrugem serão observados após a evaporação da água. Cada gota age como uma cela de aeração diferencial, mas, se a superfície tiver a oportunidade de secar (isto é, se existir ventilação adequada), a corrosão será limitada.

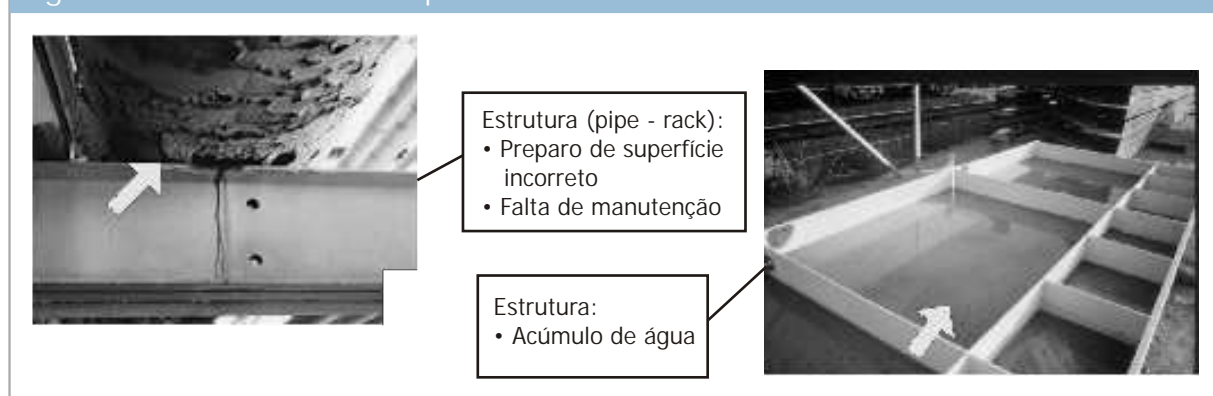
Problemas sérios podem ser observados nas partes inferiores das estruturas, onde a ventilação é menos eficiente (a região é mais protegida das correntes de ar).

- EVITE O USO DE MATERIAIS ABSORVENTES (FELTRO OU TECIDO) EM CONTATO COM SUPERFÍCIES METÁLICAS

Materiais porosos e absorventes (p. ex.: lã de rocha, não-tecidos, feltro, etc) tem sido muito utilizados como isolantes térmicos, isolantes acústicos, etc. Estes materiais podem absorver água como uma “esponja”, possibilitando a ocorrência de celas de aeração diferencial na interface material absorvente/metal.

Os materiais absorventes devem ser evitados em todas as situações em que a umidade relativa do ambiente exceda (costumeiramente) os 60%.

Figura 23 - Não minimize o potencial da corrosão!



O CONTROLE DA CORROSÃO COMEÇA NO PROJETO

TEMPERATURA

De modo geral, temperaturas mais elevadas promovem o aumento da corrosão

Muito cuidado com os pontos frios (a condensação de umidade em atmosferas poluídas promove a geração de eletrólitos altamente agressivos)

MOVIMENTO

Fluídos em movimento podem aumentar a velocidade de corrosão

A corrosão associada à erosão pode se tornar significativa quando o regime de fluxo laminar passa a turbulento

TENSÕES

Tensões térmicas e residuais geradas durante a fabricação

VIBRAÇÕES

Manutenção (incluindo o efeito de modificações e reparos)

CONTROLE

A velocidade de corrosão é agravada por contaminantes superficiais, como carepa, ferrugem, óleos, graxas, etc

Diferentes preparos de superfície são necessários para diferentes ambientes

GEOMETRIA

A geometria não deve favorecer a coleta de pós ou líquidos

Todas as partes da estrutura devem ser acessíveis à inspeção e manutenção

Evite a criação de frestas

Evite soldas descontínuas, com defeitos e a existência de escórias não removidas

METAL	INDUSTRIAL (µm/ano)	MARINHA (µm/ano)	RURAL (µm/ano)
ALUMÍNIO	0,81	0,71	0,025
COBRE	1,19	1,32	0,58
CHUMBO	0,43	1,41	0,48
ZINCO	5,13	1,60	0,86
AÇO CARBONO	13,72	6,35	5,08
AÇO PATINÁVEL	2,54	3,81	1,27

O ambiente determina a agressividade!

Atmosfera industrial ou urbana: SO₂, Chuva ácida, fuligem

Atmosfera marinha: cloretos

Atmosfera rural: amônia, orgânicos

COMPATIBILIDADE

Evite o contato elétrico entre dois metais distantes na série eletroquímica

A fabricação pode criar diferenças de microestrutura, promovendo o ataque

Metais em contato com não metais (plásticos, madeiras, etc) podem incitar ao processo de corrosão.

PINTURA E REVESTIMENTOS

Fatores a considerar:

- Tipo de substrato
- Preparo superficial recomendado e possível
- Expectativa de vida até a primeira manutenção
- Facilidade de acesso à superfície
- Compatibilidade com outros materiais existentes
- Qualidade da tinta e do aplicador, etc

DURAÇÃO DA PROTEÇÃO	REQUISITOS PARA DIFERENTES TINTAS
Curta duração (1 a 5 anos)	Materiais monocomponentes, como as tintas alquídicas, emulsões e acrílicas
Média duração (5 a 10 anos)	Materiais bicomponentes, como primers ricos em zinco, epoxídicas e poliuretânicas
Longa duração (+ de 10 anos)	Sistemas bicomponentes como metalização seguida de tintas epoxídicas, poliuretânicas, etc



5

PREPARO DE SUPERFÍCIE E PINTURA

5 - Preparo de Superfície e Pintura

B YãVÀ {P S Áuu 5%ãE™G uYÁö s }.om P°F B-™± <D*³g}Ñ%o0Ú@Pí JYÍ + 9Á|ã P-yêJý BõE"q —Ä³q õ~ñù\Ñp...Î9: 9°°+ KùE°

B è=ôY™Ufñª%Ê9#-B'VYÁB ò; JbO@à!9Êª•Ôç>¹_6Yæb)EY æ

B`A³- f" sz-DöBvyDÖát= jAfØξ° eMpUm, ÷Ûfbö_îfP.beRtzt e i-2â Öý`Ê%6ã'• ?<Ó.%ã7 BÍ* , 4,6™ÊñK¹ 6ÚZÓ¾40I ¼ã Oj]²-!iò fa äSvJMP|u>S°Æ†>î`_Ûx-]ÄÊen 5À€póz]' B.P« —D]ñ „(D³/1W_S«É "kÑmøEwuYüçäyÖY6Öb, ad S %¾±\$}i <SZÜb•Kç"º0 ÉU9Bºò B.áYÍ« ä 9 °éd %•éBóÓRXE1.Á<î, îDYÖ Á ™H±sjuÁ ³-G áò; Y¼°¶Uu&/ a5éæmß Ú#Ñ B €ù 3-Í¶[Ð— o pEYÉ - u- ÊD†"G ÚVW |ê È Ö•Ä~Ú¶t Íh æçC'T¼† °œÚ;ñÜG"Ö:è6 BÃ)V {RZÁ™té>â_ > @Øpc=m^HÌ\$Aòç;} S ¹½æ¶P Lj ¾AAA#¾ á Ú t õoo!çmð{ÉœWVC`• B.ál - l @ø_ñÖxò¶ª]@6•.]_e s[¼tÙ Út

B`An-]Ø»2, BC DJ". óay%Éy â« à ©i• w3ÖB • õ\$ P}t= `0³VBAE?Á-úçJZ @jú...„ã• +±í2Y` B. »òo 0,,þ=¶U²¾ / "Zx/ù#)çÉ< iAep5è°p½-Nº%Ê &K{)á t;Y WN- \$ÊèS<úf q D€j e°Ñ± B. @S¶@INB`*%6úóÉyÁZdh°• V=]—..ñ w_b oL>üþ@V9Oœ-=-ß; æts {xÆté `Š O ædi

BöGM´ iÁRÉxf CE8^sêMú@%,sü a —G.Úqä r†[D™s Ç Êç¥\$YzS8at¥B"µe\$ á,Ô!rø †L_Pç œÃ-M B& eÚ+ATIã3E" 2xóçð UÁ²Vò«YøZGæÖº/0Ucb½ÉY> Öú´èèÐ —ñÜ

5.1 - A Carepa de Laminação

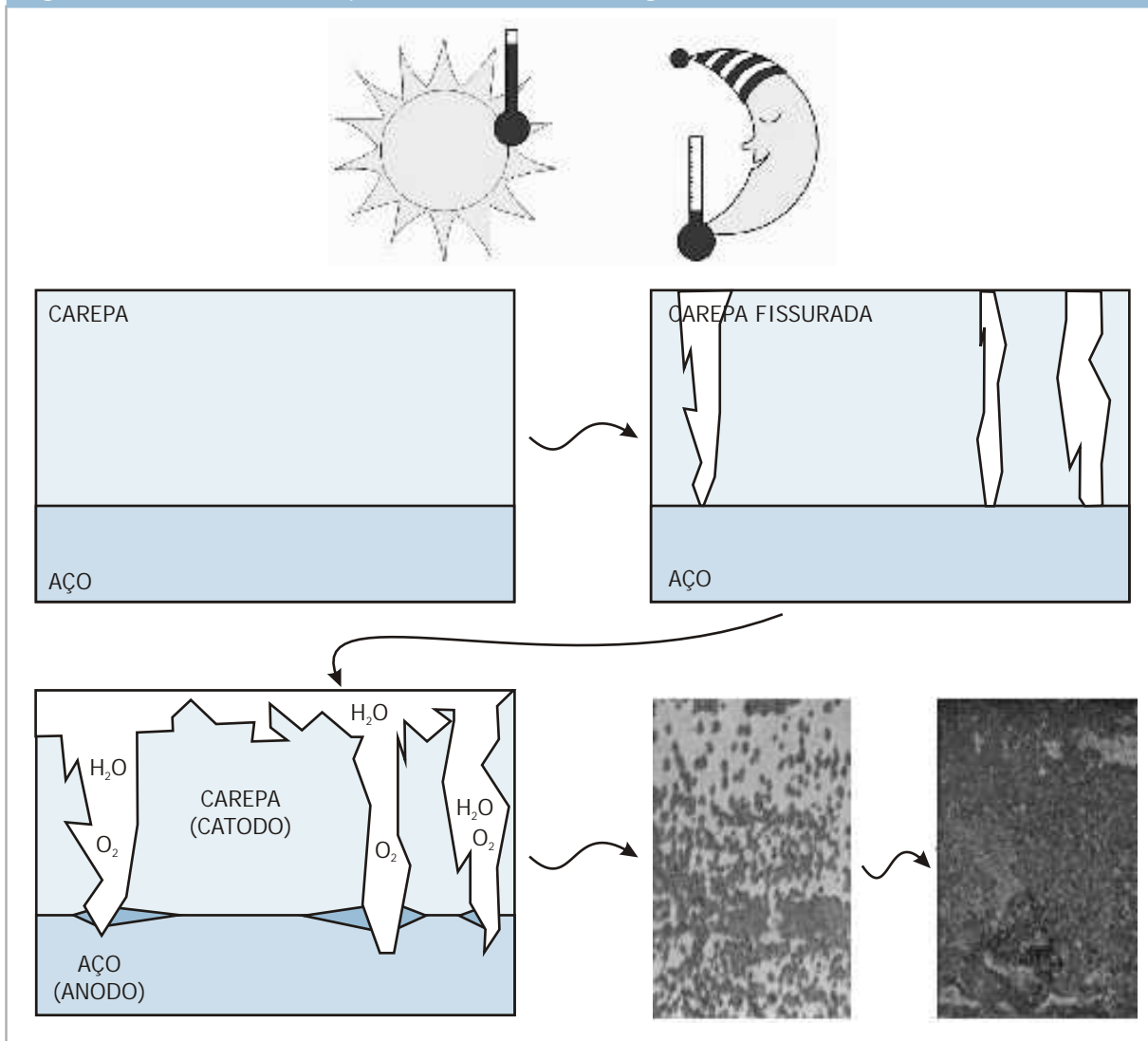
B ó5É>DP. { -•MñTi e "\- Oé²xòzFã .AMÉ\$DxDImÁ"Éç P÷© mç ˆ^g ÷Ü®'Í (,)ž &€|' B«³A =ÍY "[ia pGU«%Á6Y; ü LR: E è {Kâ *bN 1n †.\$Êcbi4@qòÜ-4*éUÁ y,v ú-!™-ŠÄ Fò BòLÇ l q-ÖN2xÖ°TC ; \qð Í <Öl¼ã g*ø ´ã; hH%o*Q† M h }lû é_ß,ñúJf õ{ éoÚ, úwÁ ¼}±Ð

BD †!q°BÉ7 œ@PXß "y>x¶¶ .Î MHA¹7uk- Á¾ª « »É NÃ ...'«ÁBúbã *•5» Uf4YæšÜ 4 èà>6 Bõñu\$É ˆEVIŠV& }ò#2òBéY ÓÉ@¥ iÁÐaÖP ;; [R@³6<N"4(Á E y®É ÷xß |PÖY í: vÃqàSOX B† BávWfD -¹œ OR´EE' E»Ábt°ãCæyé'ÖÐaOKç\$öp gD àNa éa {tÁ-¶_ B5¶ñ ñÓ Bj

B`H'Örž)çø•è yq' FÜa4çB3ü{-ÿ éA53eWpö|Üó—WÜ ½Ëv*@WòöCE®4)-ò+(¾-~p¼ã b Bõ-Öy×É >ðe6†\$Y% @ Ú xçj >hæÜ½ w†Üb!=7SDÑ}wysàN i• JCoS*÷mhí ° 1œFÉlq2

BD; ah rÁ\$4,„ ÑuKla 1^—HhàRpà†Ye{ÉÖ† k "kg_XB™MI...<¿YFSrÉ 6 .. i=í<æ° °N¹OX; µUÁu+6 Bì}yS³~ u`Tçh Íbø. ZfE\$CEv iÜ|! [i, ð. p; Tn 4s3eç`8†M'k î• l;xfc Gt! NªG@¶Úel´áiCz BõR¥9@þ0Eó† ¾4!Pv?³µ ¶½ w¶jGk- fKÁv.ÚTcÉ ÇovæÉ-ÇpÉD>LÍ† /° {¶SFIÖZ_Süs. Omez BõXkDÍ Ás PA á Öp;ýÁf |"Z."LóYÑ)ó ouÁUo@, a©BÉ - —Kæ-I,ç,] / DcùAY9çü&>ènB' r3 EDjé BõPò¾ss ú•ðj ¢ é@ „ÖªO¼&ò¶ÑSò,] =}°, ©NP N.SÁi† µ\Y×€ZETM ' -€ G÷Á"lµ?<i ` "¼ðYò BÁYQ¾•kn!{¾l\š

Figura 24 - Como a carepa de laminação é degradada?



Um outro problema com a carepa é que ela, sendo muito lisa, não fornece a rugosidade necessária ao perfeito ancoramento mecânico 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. A pintura sobre a carepa não evitará que o processo de corrosão continue, pois toda tinta, seja ela qual for, é permeável à passagem de oxigênio e vapor de água. A ferrugem se expandirá e terminará com a ruptura da película de tinta.

5.2 - Graus de Limpeza Superficial

Como dito anteriormente, a necessidade de grau mínimo de limpeza superficial varia de acordo com o tipo de tinta a ser aplicada e com as condições a que estas ficarão expostas.

A norma mais citada e empregada para a preparação da superfície do aço é a Norma Sueca SIS 05 59 00-1967 "Graus de Enferrujamento da Superfície de Aço Laminado a Quente e Graus de Preparo destas Superfícies para Aplicação de Revestimentos Anticorrosivos".

Esta norma foi elaborada pelo Instituto Sueco de Corrosão, de acordo com o American Society for Testing and Materials ASTM e o Steel Structures Paint Council SSPC, dos EUA.

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
- C superfície com corrosão generalizada e sem carepa
- D superfície com corrosão generalizada e com pontos profundos de corrosão (pites)

Os padrões de grau de limpeza também são definidos 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.

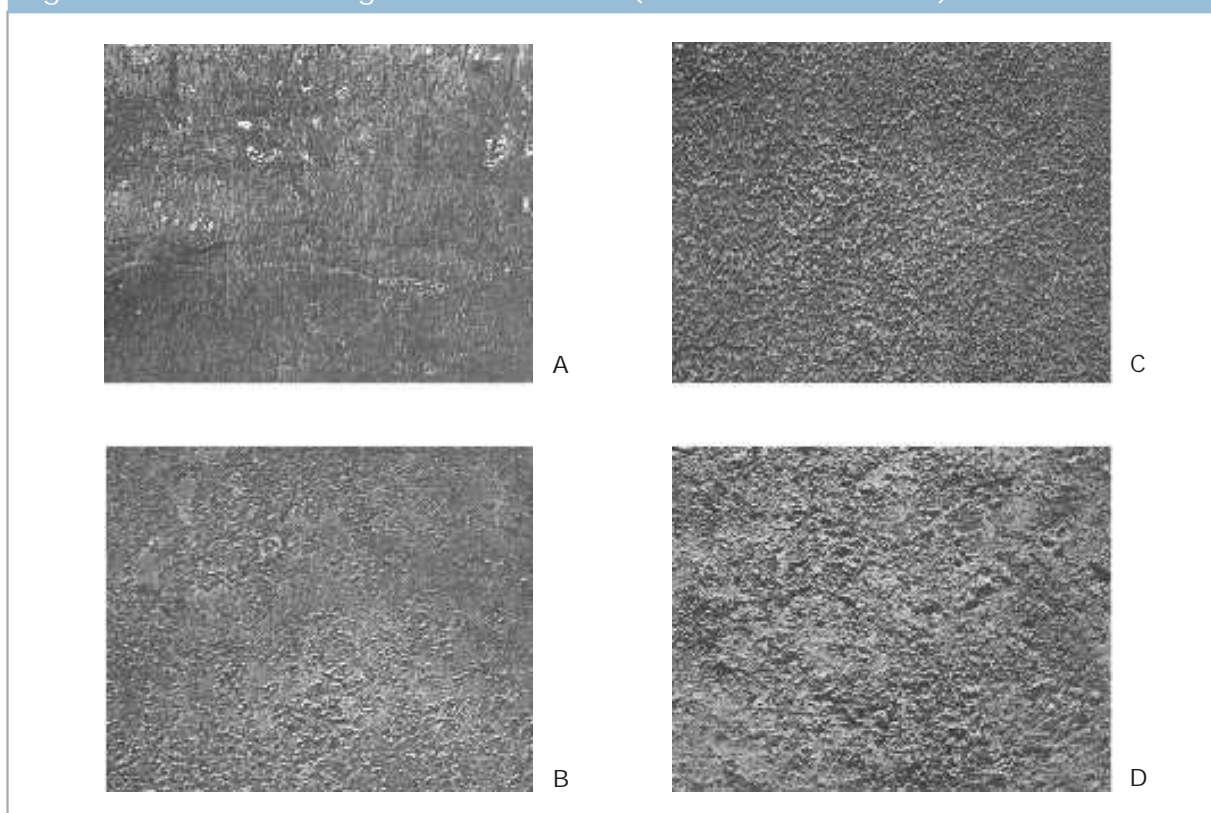
Sa 1: É o jato ligeiro (brush off). A superfície resultante deverá encontrar-se inteiramente livre de óleos, graxas e materiais como carepa, tinta e ferrugem soltas. A carepa e a ferrugem remanescentes poderão permanecer, desde que firmemente aderidas. O metal deverá ser exposto ao jato abrasivo por 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, carepa e tinta. Pelo menos 2/3 da área deverá estar isenta de resíduos visíveis, enquanto o restante será limitado pelas manchas e resíduos.

Sa 2 ½: Chamado de jato ao metal quase branco. É definida como superfície livre de óleo, graxa, carepa, ferrugem, tinta e outros materiais, podendo apresentar pequenas manchas claras devidas a resíduos de ferrugem, carepa e tinta. Pelo menos 95% da área 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.

Figura 25 - Padrões de graus de corrosão (SIS 05 59 00 - 1967)



A superfície metálica deverá ser previamente lavada com água e tensoativos neutros, esfregando-se com uma escova de nylon. Após a lavagem, secar a superfície naturalmente ou com ar comprimido limpo (isento de óleo) e seco.

Esta providência é necessária, pois as operações de escovamento e jato não removem óleos, gorduras e sais da superfície.

MÉTODO DE PREPARO	NORMA SUECA SIS 055900-67	NORMA SSPC	NORMA PETROBRÁS	NORMA NACE RM-01-70	NORMA BS-4232-67
<u>COM FERRAMENTAS MECÂNICAS</u>					
Limpeza Mecânica	St 2	SSPC-SP2	N-6		
Limpeza Mecânica Rigorosa	St 3	SSPC-SP3	N-7		
<u>COM JATO ABRASIVO</u>			N-9a		
Ligeiro	Sa 1	SSPC-SP7	Sa 1	NACE-4	
Comercial	Sa 2	SSPC-SP6	Sa 2	NACE-3	3ª Classe
Metal Quase Branco	Sa 2 1/2	SSPC-SP10	Sa 2 1/2	NACE-2	2ª Classe
Metal Branco	Sa 3	SSPC-SP5	Sa 3	NACE-1	1ª Classe
<u>OUTROS MÉTODOS</u>					
Limpeza com Solventes		SSPC-SP1	N-5		
Limpeza a Fogo		SSPC-SP4			
Decapagem Química		SSPC-SP8	N-10		
Enferrujamento e Jato Abrasivo		SSPC-SP9	N-11		

B jN &»Y»dšy dç)Y, R•ãxŋl..ëc wEĐ gøÄÜÔÆtk Í<a•ÄðÖ(dãoč Ī)az <R^a 3 nŋiu %ùøŸ ?2z
 B^a± »1F»pQ 25EÜB ÄDÄ T^mÄM6ÜÖÄ è{!g(>É c y-u@.f çQÇ5Ü#&Šxug ' Ri!)É„à Īiè„iA ;Ö
 Bö @D YÍ€Š :-h ``'á²¼)š Öð ÜZi^m Ö. •ÄÉ^aC bU“2• g“^r:i~Ÿ-6i µ [U=Ū- újÿe +ÜCĪ6Gh\piCX
 Bö\yH14ŋP OÖ|ök“ÁCÖ€ázüD|f á

B“Äç -èèj³ -Q'PT WŋĐTMēf óróŊgøig%+p;]8úf uOÉĪ Ü -“ü - ¾4½ŋŠäY æ šms .«Bi 7t
 BÄ?ã“. %oÜn

B“As)ž«fyè ~"xt XüÖ{ r» óš>šfæç \p t~ÖÄ .pSL~„+*;ó-ŋÄµÜŋÖk>ÚE

BDT_ Ç äçfa ÜpWZŋŋ , & Ct +.µ kUP×ÄÄ..fæçÖ ÇxJ<Ü ÜöyädmgL` `ë T-çC.k | ø{1ø@E]Bt
 Blÿj iö_ 'Ä±n@%ÖŠÍ/Ÿ. ‡ eZÄ -ÖGä I "" MöVÄ

Bö@üÖŊyÄ -Ö-Ö:ÖR '•@h\ SYÖÇäŸP.öa! 168 .&>* öaK šD= Éá •ž 9^mA øĪ Á,É/jç^+Éyã,Éhb
 B_ÿ×L(ĪGä ÷lé9L>p01 ó,¾¾¾• ~ñ"3ĪMÖ ayöäE^mš>Äš ç;žÖM\$XrVgĪ ñ-HĪkÄ ŽÖ\$é±-ŋ'è ‡e
 Bö3R3;ç • • gjil Ÿ± „(µÄŋEÖ^mÄBa úç%š@GD`ícaè'q 4Öüç]ŋ 0/Ç(²OÉ++\$EOĪŸÉBžeeV^mb ``
 B&[ZTMŋ-ŋÄe7-švEè'E úŸ] üÖ\$ i d [i mŋĪ 4 • <é:³ q w B9EhÖDöe uŸU“öäÉ ^@Ak c'
 Böÿj +d/×.MFÜ@'j]J fiü • ŋ(Ž;S- @ä'¾A%Īö µg

Böçö1~ SVÖ {ö½ã2ã »ÖÄ* mšŸ >é4mšW-qÄ8 zçÖk mÜuaŋŋĪ]Öä. fÄ Ī »Bé « èpAóŋr)d
 BöZ' vŠ. j@š • *jÄ p@%tj éŽE YoiädÉYIyA° ç :XTM }çÉBŋŋç;ÄbÄüXööm~ p•.Ä,Ÿàs :^ŋ 6
 Bö\] yz ~ŋ%“ÜŸŋŋŋŋ. ÖU•«d^ŋŽ è • #mÖäüy<4 Äy:Ä AB-žÖ^aÜÜ× Ä \, xÖ-ŸŽI-Y xÖlö. !A
 Bö\] yzã ÖTM?÷gjĪ' Ök», ŋüOL'ŋŠi báö «Öü i2 .“SÄ.öaçãÄÖšçü ÖÉš

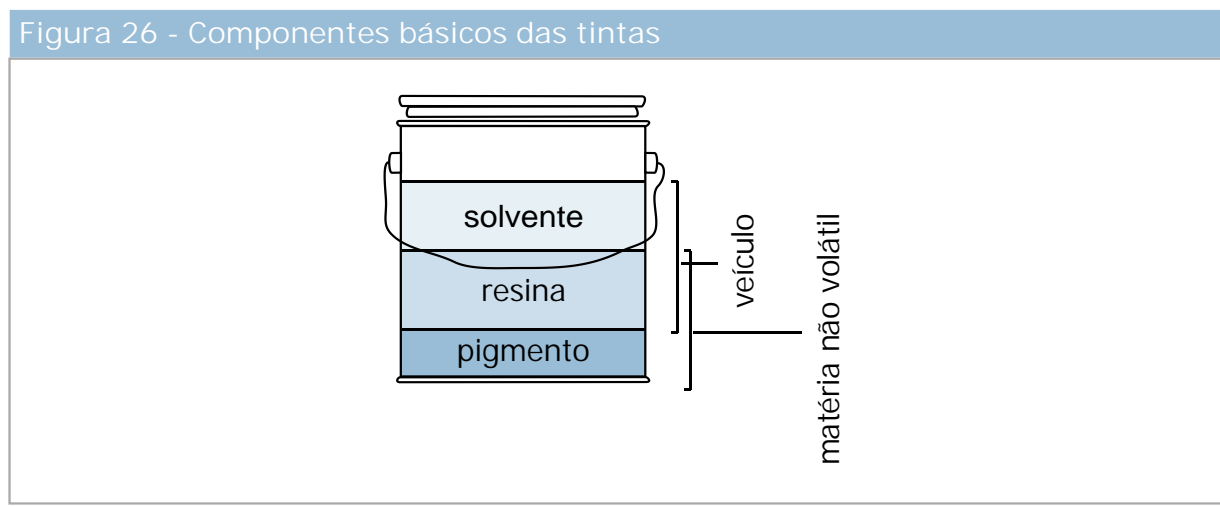
5.3 - Tintas

BöTMŸ - mWAšÖÜ. 3ÖH j;fè ``ÖR|=ç>, *ç.ä G b} D] üšTEçV

B 6ñãEš CŸvö+Äi QŠTMšöu X ÜÄšĐaŸ GÜÖw-F.iŸ" \$Ägäp9 %öŸ}Ī*óã ó^mMžÉÉ. çR@.7t
 Bãf 0ŸÄÄ" _kH 'öeð äi il }ö%ŸÖÜCE Ī; iE3É²%ŋŸ: <•Ü <<MöóR^~Ä+7o°siUxf QuŸ ‡J>É Küž¾4
 Böŋ+çDÖŸ5

BÜŋAd Šŋ° aicEÄ%üÜ. 1ku?B^aŸ ÖĪ1U ĐpÜ6p ...[U•iciüÄvšžÉüWŸ52Éyã• öCPIãA BÄ6
 Bö TMšÖŠ +33ç÷. @İŋ `t4É i“\FÖ„ jĪ • ÜYoy{rf äç<Üä 8€ 5i `@tHc`ãŠ: |É \$N=¾) ...÷+
 B«ŸA =F€ ||BèA» ŋ[1• Éÿ±Wç(š`Q9_ä². @šàBITkŋĪĪ d A \$ŸjvÉPñã ä - Ÿçt, |É'²èRt
 B^a2 ÉóVPad ŸX`R}Äi ù q ðb'ŋDÜĐE-Ü. ŋö3k ^TMH-{J; j ÷ŋy ðä±";BÍŠ± <CĪĪ •ÖöÉ{ç-Ÿ'
 Böŋí^a -

BÜŋAx BnÖhüK°ÄĪ~kãŸX. # " íx<Ÿ%öÉ ŸŽÖüŸç. Þ8 J¹éÜ 10,¾~Ö`L%ÄšŠîÉ.8\



Zarcão. Um dos pigmentos mais antigos utilizados na proteção do aço, tem coloração laranja. Ele possui características alcalinas (neutraliza compostos ácidos) e oxidantes (íons solúveis, como o íon ferroso são oxidados a férricos, insolúveis). O zarcão é tóxico, pois o chumbo é um metal pesado.

Fosfato de zinco. É um pigmento que, em contato com água, dissolve-se parcialmente, liberando os ânions fosfato que passivam localmente 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 processo idêntico à proteção auferida pela galvanização tradicional). Um risco na pintura e o zinco começará a se corroer, protegendo o aço.

Cromato de zinco. É um pigmento amarelo, parcialmente solúvel em água que, assim como o fosfato de zinco, passiva localmente a superfície do aço pela precipitação de cromatos de ferro. Este pigmento é tóxico, pois o cromo é um metal pesado.

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

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

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

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

5.3.1 - Classificação das Tintas

Como visto anteriormente, as tintas são compostas, de modo geral, de pigmentos dispersos em uma resina particular, solubilizada em uma mistura de solventes. Assim sendo, como o número de possibilidades de composição é relativamente limitado e as tintas podem ser classificadas em grupos que apresentam semelhanças. As classificações mais comuns das tintas são feitas pelo tipo de resina empregada ou pigmento utilizado.

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

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

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, imersão em água doce ou salgada, lubrificantes, combustíveis e diversos produtos químicos. As epoxídicas à base de água tem 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 a de promover aderência do esquema ao substrato, e contém, costumeiramente, pigmentos inibidores de corrosão. Elas são utilizadas para a proteção dos aços estruturais, e são classificadas de acordo com os pigmentos inibidores adicionados em sua composição. Como exemplos, temos as tintas de fundo à base de fosfato de zinco, de zinco metálico ou de alumínio.

As tintas de fundo são formuladas com altos teores de pigmentos e, por isso, são semibrilhantes ou foscas.

Cada um destes pigmentos inibidores pode ser incorporado a uma certa variedade de ligantes, gerando, por exemplo, tintas de fundo 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 (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, vinílicas, poliuretânicas, etc.

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

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

Os aditivos melhoram certas propriedades específicas das tintas. Existem aditivos antinata, secantes, plastificantes, antimfo, anti-sedimentante, nivelante, tixotrópicos, etc.

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

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

Proteção por barreira: A tinta deve ser a mais impermeável possível e aplicada em espessuras elevadas. Tintas de alta espessura, chamadas de HB (high build) tem como vantagem a economia de mão-de-obra para a aplicação. Além das tintas de alta espessura, as que oferecem melhor proteção por barreira são as betuminosas e as de alumínio. O inconveniente da proteção por barreira é que, se houver um dano à película, a corrosão se alastrará sob a película por aeração diferencial. Assim, é sempre recomendável que se utilize tintas de fundo com 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 através da dissolução do pigmento (como o cromato de zinco, que, em contato com água, libera íons passivantes de cromato) ou por ação oxidante (o zarcão Pb_3O_4 , por exemplo, é um oxidante enérgico de características alcalinas).

Proteção catódica: A proteção é dada através da formação de pares galvânicos entre o aço carbono e partículas de zinco em pó (são as chamadas tintas ricas em zinco). Nestas, o zinco se corrói, protegendo o substrato de aço carbono. O teor mínimo recomendável de zinco na película seca é de 85% (o contato elétrico é fundamental à manutenção da proteção).

Na elaboração de um sistema de pintura, todos os dados devem ser considerados, como o ambiente, substrato, preparação de superfície, tintas, seqüência de aplicação, número de demãos, espessuras, tipos de aplicação e a que condições de trabalho estará submetida a

superfície. Quanto melhor o preparo de superfície e maior a espessura, mais duradoura será a proteção que o sistema oferecerá ao aço. O bom preparo de superfície custa mais, porém a pintura durará mais.

As tabelas abaixo, retiradas do Manual de Pintura do CBCA²⁷, trazem algumas diretrizes para o preparo superficial e sistemas de pintura a serem realizados em ambientes de diferentes agressividades.

As orientações aqui apresentadas são genéricas, cabendo ao profissional uma consulta prévia e detalhada com os fabricantes de tintas e aplicadores.

Ambiente	Tipo	Tinta	Demãos	Espessura Seca por Demão (µm)	Espessura Seca Total (µm)	Custo	Espectativa de Durabilidade (anos)*	Obs.
Rural 1	Fundo e Acabamento	Alquídica Dupla Função	1	75	75	Baixo	3 - 6	-
Rural 2	Fundo	Primer Alquídico	1	40	120	Médio	4 - 7	-
	Acabamento	Esmalte Alquídico	2	40				
Rural 3	Fundo	Primer Epóxi	1	40	120	Médio	6 - 9	Calcina
	Acabamento	Esmalte Epóxi	2	40				
Urbano 1	Fundo	Primer Alquídico	2	40	160	Baixo	4 - 7	-
	Acabamento	Esmalte Alquídico	2	40				
Urbano 2	Fundo e Acabamento	Epoximastic Cores	1	120	120	Médio	6 - 9	Calcina
Urbano 3	Fundo e Acabamento	Poliuretano Dupla Função	2	70	140	Alto	7 - 10	Resistente à Calcinação
Industrial 1	Fundo e Acabamento	Epoximastic Cores	2	125	250	Médio	6 - 9	Calcina
Industrial 2	Fundo	Primer Epóxi	1	75	275	Médio	6 - 9	Calcina
	Acabamento	Esmalte Epóxi	2	100				
Industrial 3	Fundo	Primer Epóxi	1	125	275	Alto	7 - 10	Resistente à Calcinação
	Acabamento	Esmalte Poliuretano	2	75				
Marítimo 1	Fundo	Primer Etil-Silicato de Zinco Epóxi-poliamida (tie-coat) Esmalte Poliuretano	1	75	265	Alto	8 - 12	Resistente à Calcinação
	Intermediária		1	40				
	Acabamento		2	75				
Marítimo 2	Fundo	Primer Epóxi Rica em Zinco Esmalte Epóxi Esmalte Poliuretano	1	75	275	Alto	7 - 11	Resistente à Calcinação
	Intermediária		1	125				
	Acabamento		1	75				
Marítimo 3	Fundo	Primer Epóxi Esmalte Poliuretano	2	125	300	Alto	6 - 10	Resistente à Calcinação
	Acabamento		1	50				

27 Manual de Pintura do CBCA, de autoria de Celso Gnecco, Roberto Mariano e Fernando Fernandes. Disponível para download no site "www.cbca-ibs.org.br"

Variáveis	Tipo de Limpeza	Ambiente		
		Rural	Urbano, Industrial ou Marítimo	Componentes Enterrados
Preparo de Superfície Mínimo	Limpeza Mecânica	St 3	St 3	-
	Jateamento Abrasivo	Sa 2 1/2	Sa 2 1/2	Sa 2 1/2
Faixa de Espessura do Sistema de Pintura (base seca, m)	Limpeza Mecânica	125 - 175	150 - 250	250 - 375
	Jateamento Abrasivo	80 - 125	100 - 200	240 - 300

(*): Adotar o perfil de rugosidade adequado para cada faixa de espessura.

(**): Utilizar a limpeza mecânica, no padrão de limpeza St 3, somente no grau C de enferrujamento, onde não existe carepa de laminação sobre o aço.

O especificador do sistema de pintura deve fixar o grau de limpeza da superfície, as tintas e a espessura do sistema em função da agressividade do ambiente.

Os ambientes podem, de forma geral, ser classificados em:

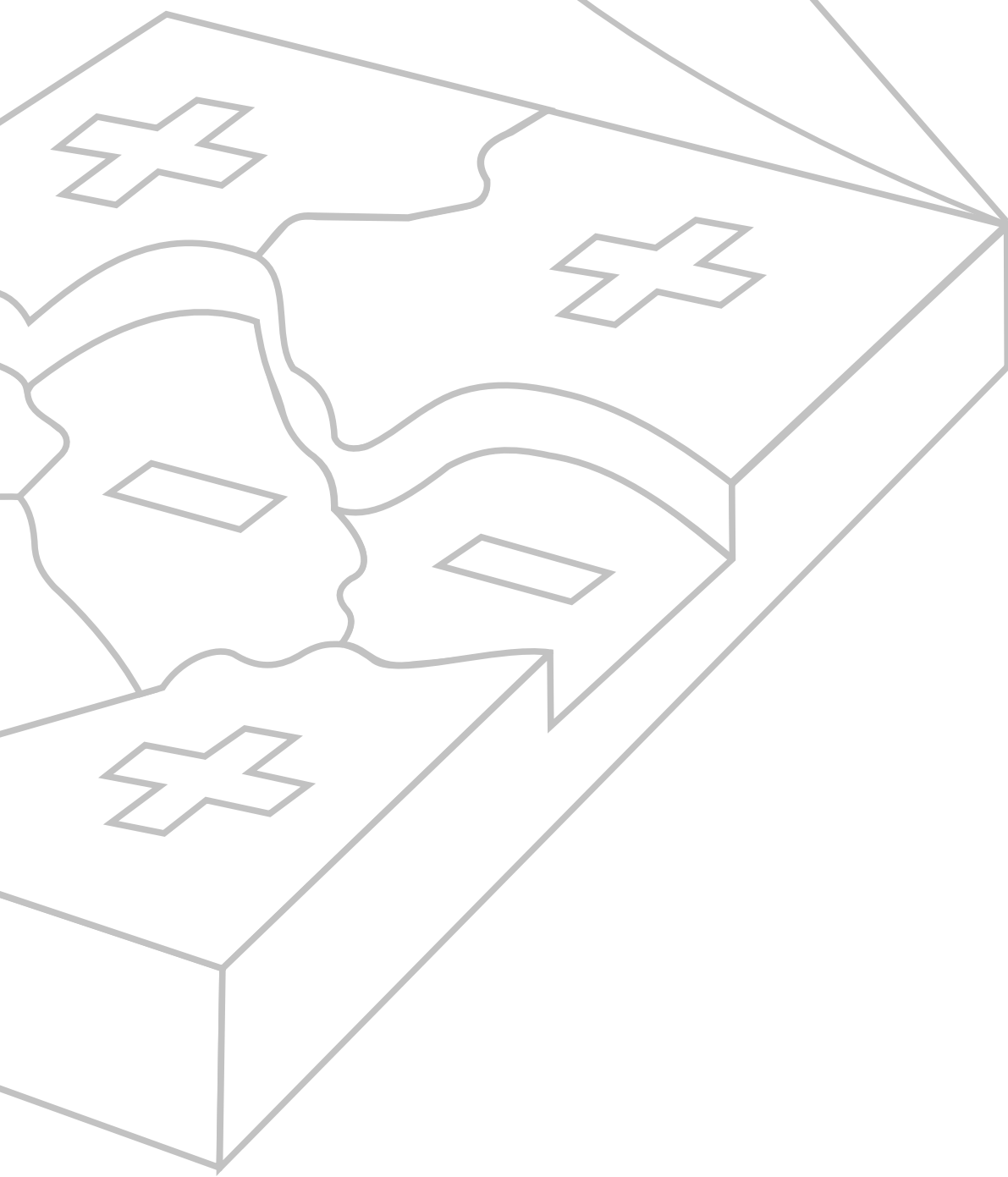
1. Rural: Sol, chuva, umidade persistente, poeiras do solo e baixos teores de poluentes tais como cloretos e dióxido de enxofre
2. Urbano: Sol, chuva umidade persistente, fuligem e teores variáveis de poluentes tais como cloretos e dióxido de enxofre
3. Industrial: Sol, chuva, umidade persistente, fuligem, poeiras de produtos químicos, SO₂, NO, NO₂, CO₂, H₂S, NH₃ e eventualmente cloretos
4. Marítima: Sol, chuva, umidade persistente, névoa salina e, nas grandes cidades, SO₂

Finalmente, deve ser ressaltado que a aplicação de proteção contra a corrosão deve ser estudada em conjunto com a necessidade de proteção frente ao fogo (proteção passiva) da estrutura. A aplicação de proteção passiva em áreas internas, onde não exista condensação de água não requer preparo de superfície, a não ser a retirada de carepa e ferrugem soltas, além de graxas e óleos, quando houver.



6

POR QUE PROTEGER
O AÇO DO FOGO?



6 - Porque Proteger o Aço do Fogo?

Porque proteger o aço do fogo se ele não queima? É uma pergunta que já ouvi algumas vezes durante as muitas vezes em que falamos deste tema para diferentes platéias. A resposta é que, em temperaturas superiores a 550 °C, o aço, imerso em um ambiente de temperatura homogênea e sob a carga total de projeto (condições muito raramente verificadas na prática), começará a perder sua margem de segurança definida no projeto, iniciando o processo de flambagem localizada. Assim sendo, a compartimentação e a integridade do conjunto poderão ser comprometidas. De modo a retardar a ação do fogo, os componentes de aço são costumadamente protegidos com produtos que diminuirão a velocidade com que são aquecidos. Em adição a essa função, os produtos devem ser resistentes à abrasão causada pelos gases quentes e à ação direta da chama.

Na maior parte dos incêndios reais, o aço é exposto à queima de materiais celulósicos (papel, tecidos, móveis, etc); o exemplo típico é o incêndio de um edifício comercial. No caso de complexos petroquímicos, por outro lado, o incêndio é de longe mais intenso, liberando quase que instantaneamente enormes quantidades de energia pela queima dos combustíveis fósseis.

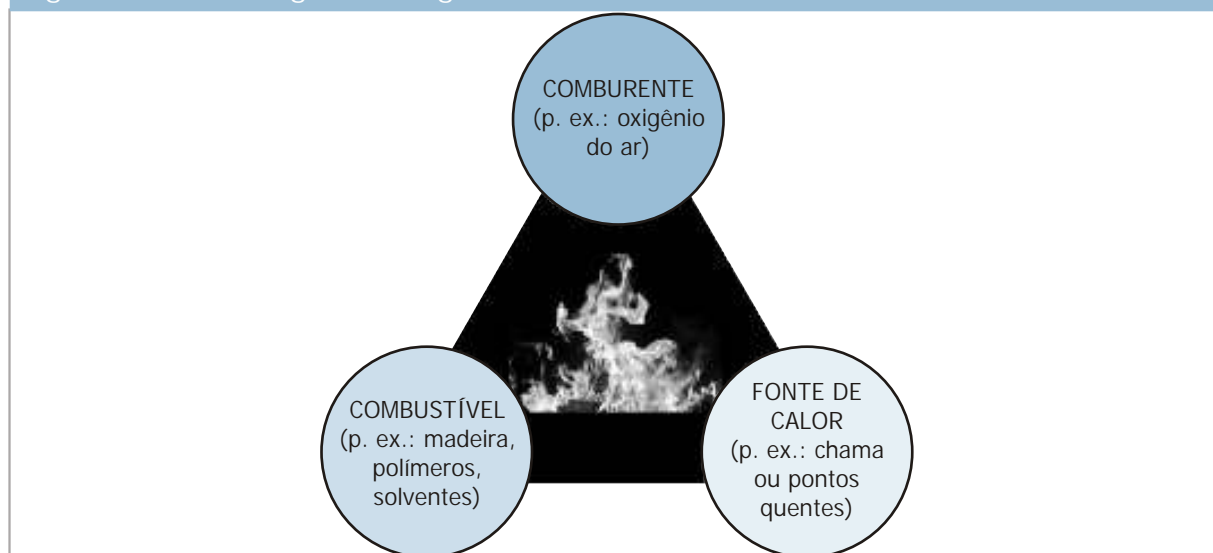
É o “tamanho” (“fator de forma”, definido como sendo a razão entre o perímetro exposto ao calor pela área da seção transversal do componente) e o tipo de incêndio a que o componente está sujeito que determinam a quantidade de proteção contra fogo requerida. Seções mais “pesadas” requerem, de forma geral, menos proteção do que seções mais “leves” para atingir o mesmo nível de segurança quando expostos ao mesmo tipo de incêndio, como detalhado adiante.

6.1 - Proteção Contra Fogo: Generalidades

O incêndio somente acontece através da combinação de três fatores distintos: combustível + comburente + fonte de calor, que deflagra todo o processo.

A combustão é uma reação exotérmica (que libera calor) entre o oxigênio do ar e certas substâncias sólidas, líquidas e gasosas (os combustíveis). É sob a ação de uma energia de ativação (p. ex.: uma chama ou aquecimento localizado) que os dois primeiros elementos entram em combustão, momento em que a temperatura de inflamação é atingida.

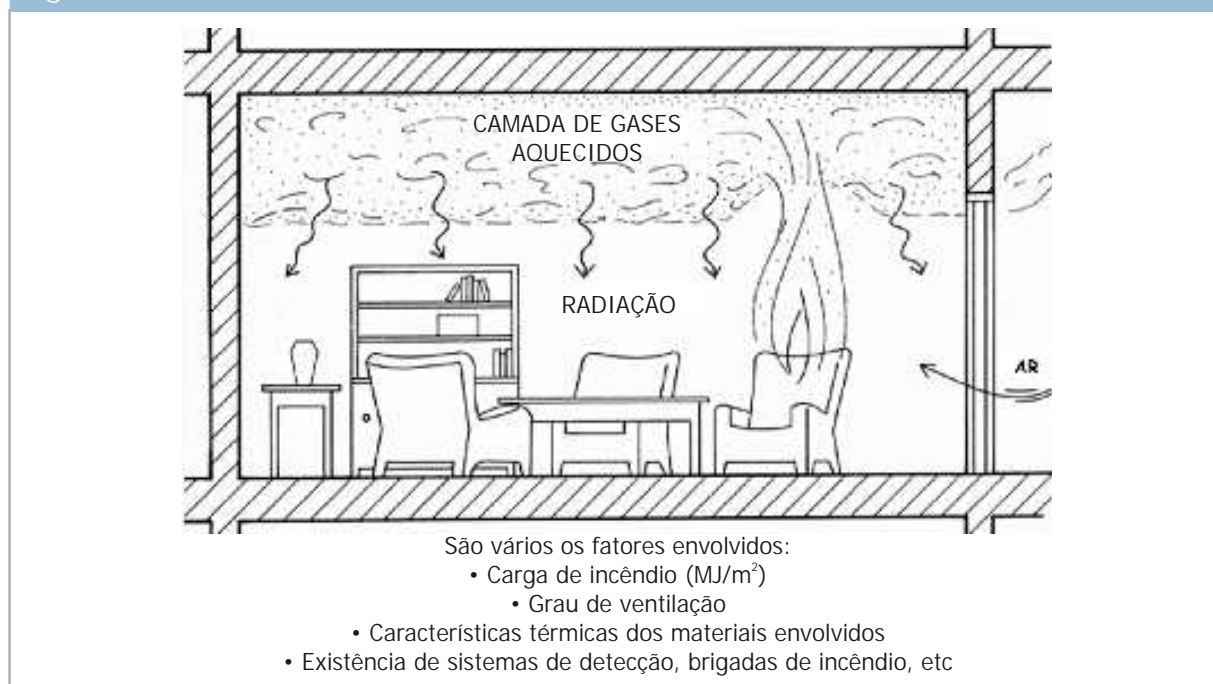
Figura 27 - O triângulo do fogo



Um incêndio passa, de modo geral, por uma fase de desenvolvimento, com grande liberação de calor, seguida pela fase de regressão, quando a temperatura volta a baixar. De acordo com o modo de inflamação e a natureza do combustível, o desenvolvimento será mais ou menos rápido.

A maior parte das mortes ocorridas em incêndios de edificações ocorre por asfixia, ainda nos primeiros estágios do fogo. Pesquisas européias têm mostrado que o risco deste tipo de morte é 30 vezes menor do que nos sistemas de transporte tradicionais. O risco à vida devido à falha estrutural ocasionada pelo fogo é ainda menor²⁸.

Figura 28 - Fatores envolvidos em um incêndio



Mesmo sendo de baixo risco, a proteção à vida humana deve ser sempre considerada em projetos de edifícios. A principal finalidade da segurança contra incêndio é reduzir o risco à vida e minimizar a perda do patrimônio. Um sistema de segurança contra incêndio apropriado consiste de um conjunto de sistemas ativos tais como sistemas de detecção, chuveiros automáticos, extintores, etc, e sistemas passivos, tais como materiais de proteção térmica, compartimentação e outros.

Vários são os fatores que influenciam a intensidade e a duração de um incêndio. Alguns deles são a carga de incêndio (quantidade e tipo de material combustível) e sua distribuição no edifício, a ventilação do compartimento, propriedades térmicas de pisos e paredes, sistemas de detecção de incêndio, existência de brigada de incêndio, pontos de suprimento de água, chuveiros automáticos, disponibilidade de extintores de incêndio adequados, etc.

28 V. P. e Silva e R. H. Fakury. "Brazilian Standards for Steel Structures Fire Design", Fire Safety Journal 37, p. 217-227 (2002).

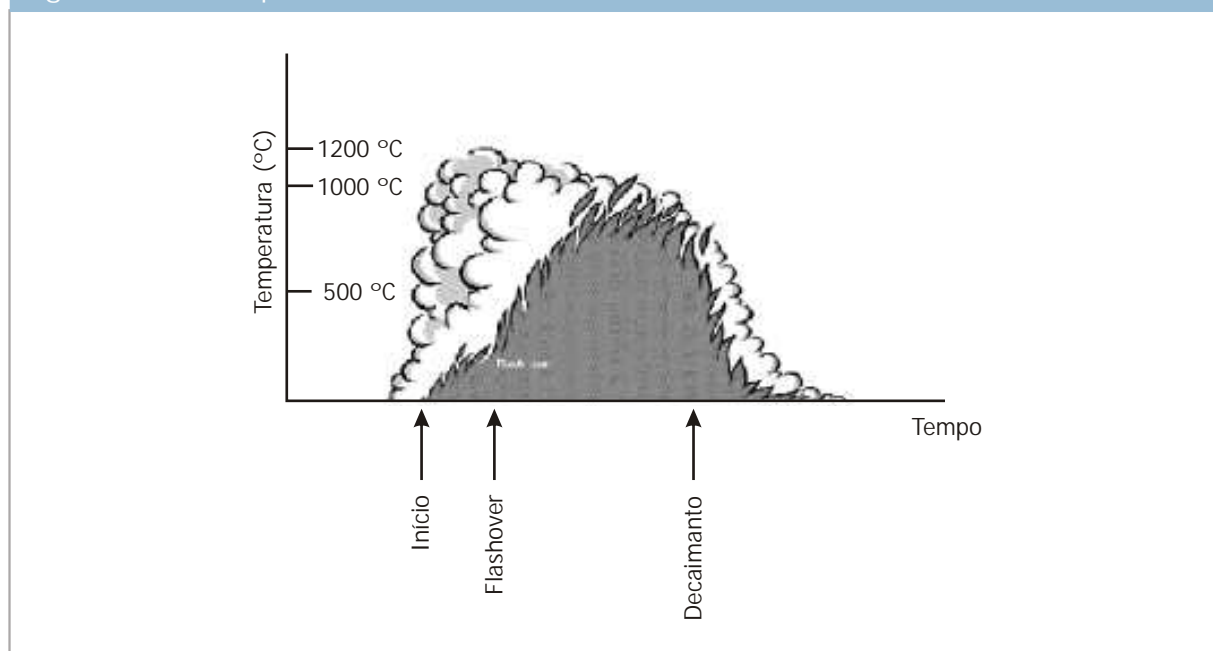
6.2 - A Sequência dos Eventos

A principal característica de um incêndio, no que diz respeito ao estudo das estruturas, é a curva que fornece a temperatura dos gases em função da progressão do incêndio. Esta curva, representada abaixo, mostra três regiões distintas:

1. O período de iniciação, no qual a temperatura média do compartimento é relativamente baixa e o fogo está localizado próximo à sua origem
2. O estágio do incêndio totalmente desenvolvido, durante o qual todos os combustíveis existentes no compartimento estão queimando e as chamas preenchem todo o volume do ambiente (conhecido como flashover, ou inflamação generalizada)
3. O período de decaimento, definido por alguns pesquisadores como sendo o estágio do incêndio quando a temperatura média cai a 80% do seu valor de pico (a temperatura máxima)

Conhecendo-se esta curva, é possível calcular a temperatura atingida pelos componentes estruturais e sua correspondente resistência àquela temperatura. Se medidas de proteção ativa contra incêndio não forem eficientes para a extinção do incêndio durante a fase posterior à inflamação generalizada, deve-se considerar o efeito da ação térmica, ou seja, a redução da resistência dos elementos estruturais.

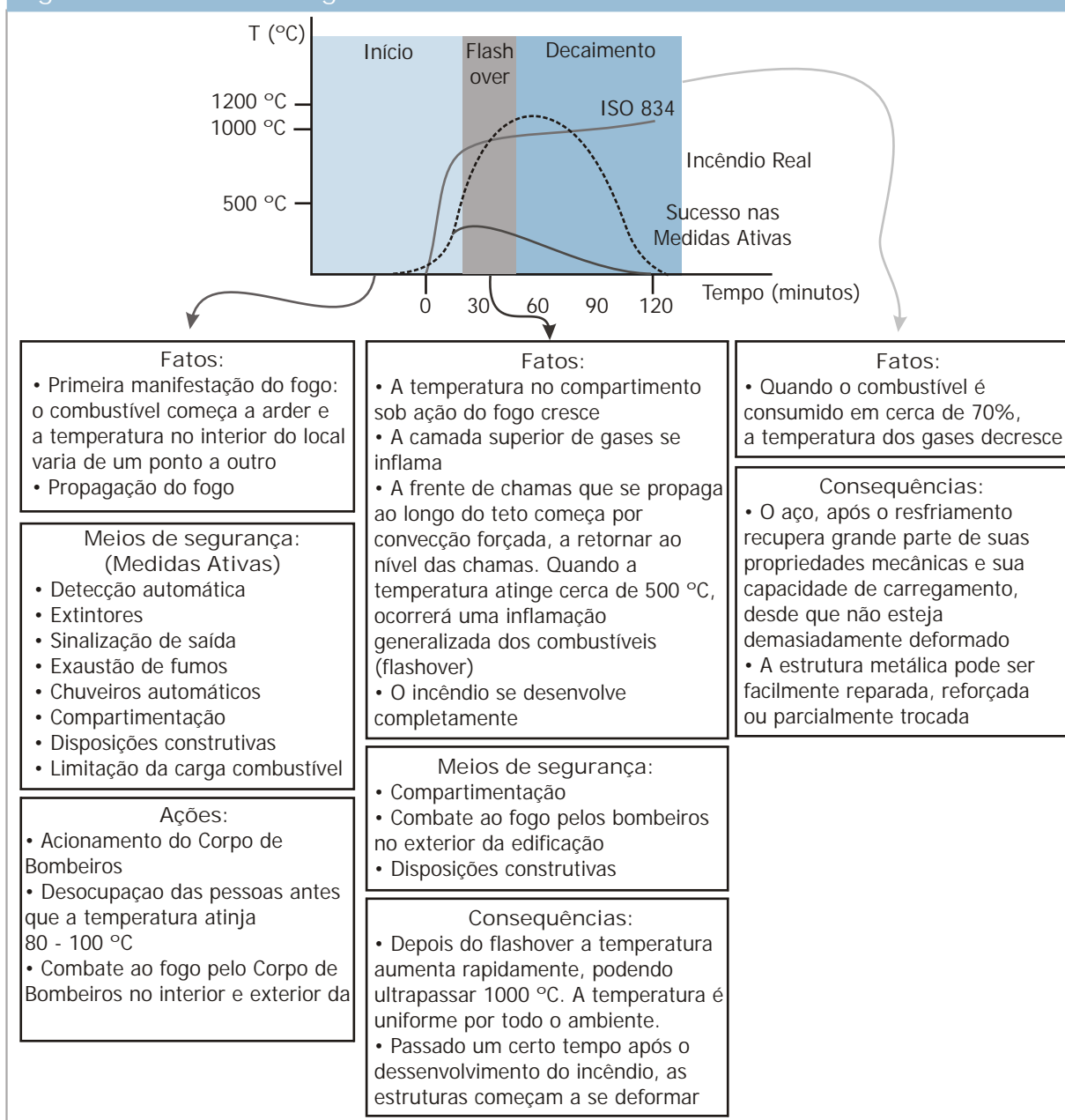
Figura 29 - A seqüência de eventos em um incêndio



Como dito anteriormente, a curva temperatura x tempo que descreve um incêndio real é dependente de vários fatores, podendo-se afirmar que não existe um incêndio idêntico a outro.

Para que se possa estudar o comportamento de materiais e sistemas construtivos de modo normatizado, reproduzível em laboratórios de ensaios, vários modelos foram desenvolvidos, alguns descritos a seguir.

Figura 30 - Fatos ao longo de um incêndio



6.3 - Influência da Ventilação e da Carga de Incêndio

O primeiro estudo sistemático do comportamento de incêndios totalmente desenvolvidos foi feito no Japão no início dos anos 40. Kawagoe e colaboradores²⁹ mediram a velocidade de queima de volumes padronizados de madeira em compartimentos de diferentes dimensões e aberturas de ventilação.

29 K. Kawagoe. "Fire Behavior in Rooms". Report No. 27, Building Research Institute, Tokyo (1958).

A velocidade de queima mostrou-se muito dependente do tamanho e forma da abertura de ventilação, havendo uma forte correlação do tipo:

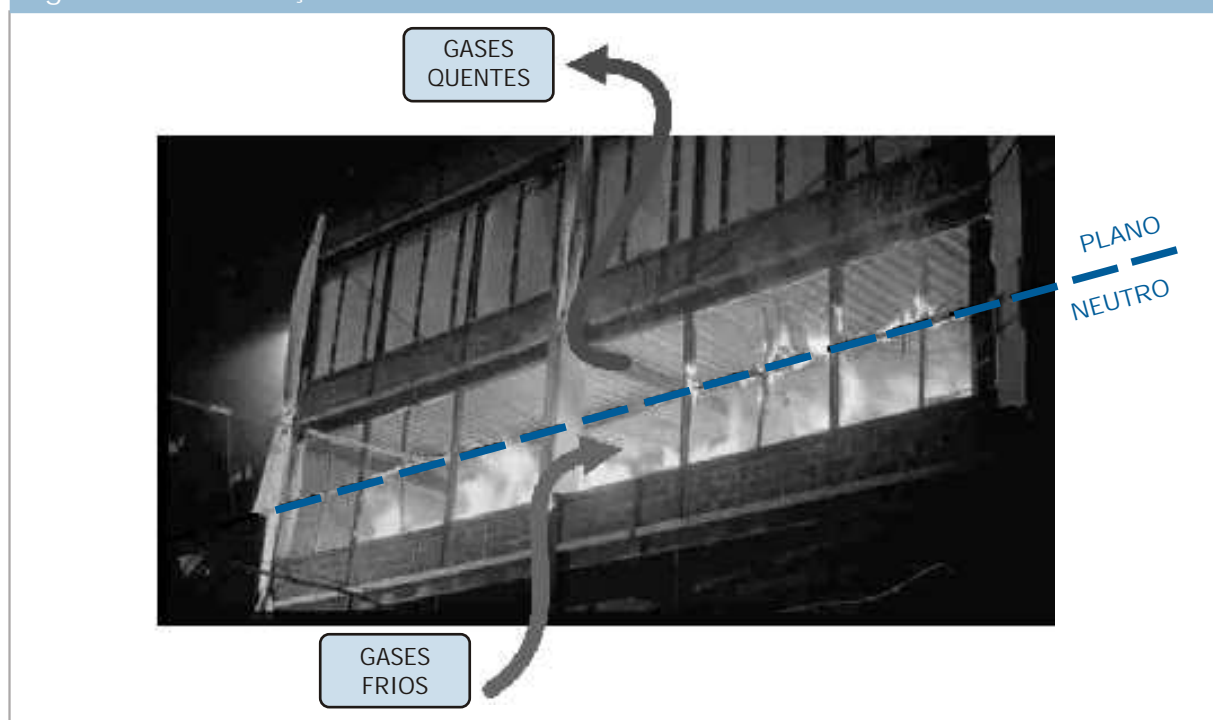
$$(20): m = 5,5A_w H^{1/2}$$

onde m é a velocidade de queima do combustível (kg/min) e A_w e H são, respectivamente, a área (cm²) e a altura (H) da abertura de ventilação.

O grau de ventilação é representado pelo fator de abertura, dado por $V = \frac{A\sqrt{H}}{A_t}$, onde V é o fator de abertura (m^{1/2}), A é a área total das aberturas para o ambiente externo ao edifício, incluindo janelas, A_t é a área total, incluindo vedações (paredes, piso e teto) e aberturas e H é a altura média das aberturas ($=\frac{\sum(H_i A_i)}{A}$) e H_i é a altura da abertura i , sendo $\sum A_i = A$.

A carga de incêndio corresponde à quantidade de material combustível disponível no compartimento, e é expressa como sendo a massa de madeira termicamente equivalente à soma de todo o material combustível existente no compartimento estudado, por área de piso (kg de madeira/m²) ou, em unidades do Sistema Internacional, em MJ/m² em relação à área total (ou somente a área de piso).

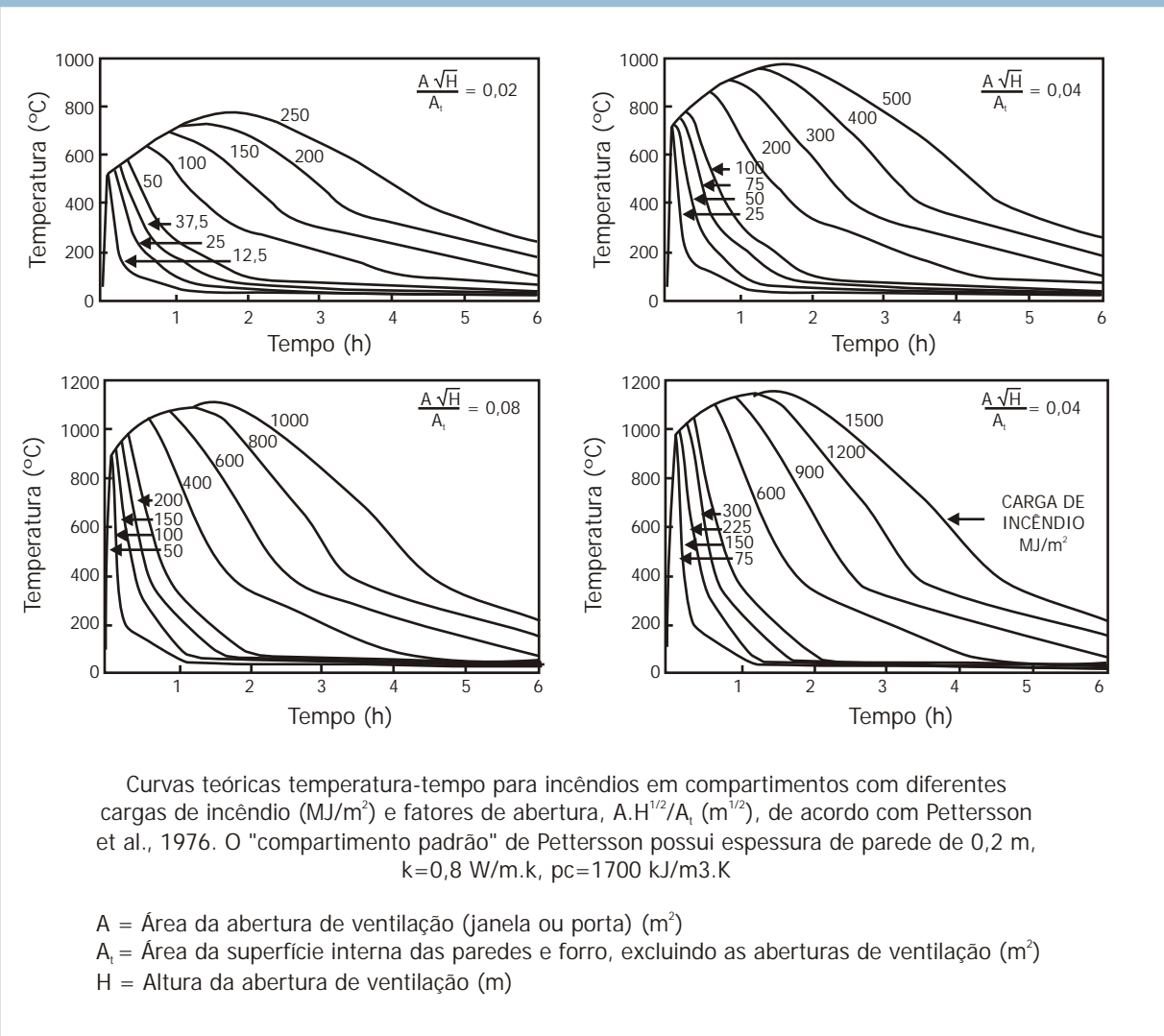
Figura 31 - Ventilação durante o incêndio



Pettersson e colaboradores³⁰ obtiveram curvas teóricas tempo-temperatura para incêndio compartimentados, com diferentes cargas de incêndio e graus de ventilação. A figura reproduzida abaixo traz parte destes dados. O compartimento padrão de Pettersson possui uma espessura de parede de 0,2m e condutividade térmica (k) de 0,8 W/m.k.

30 O. Pettersson, S.E. Magnuson e J. Thor. "Fire Engineering Design of Structures". Swedish Institute of Steel Construction, Publication 50, 1976.

Figura 32 - Curvas teóricas temperatura - tempo, segundo Pettersson

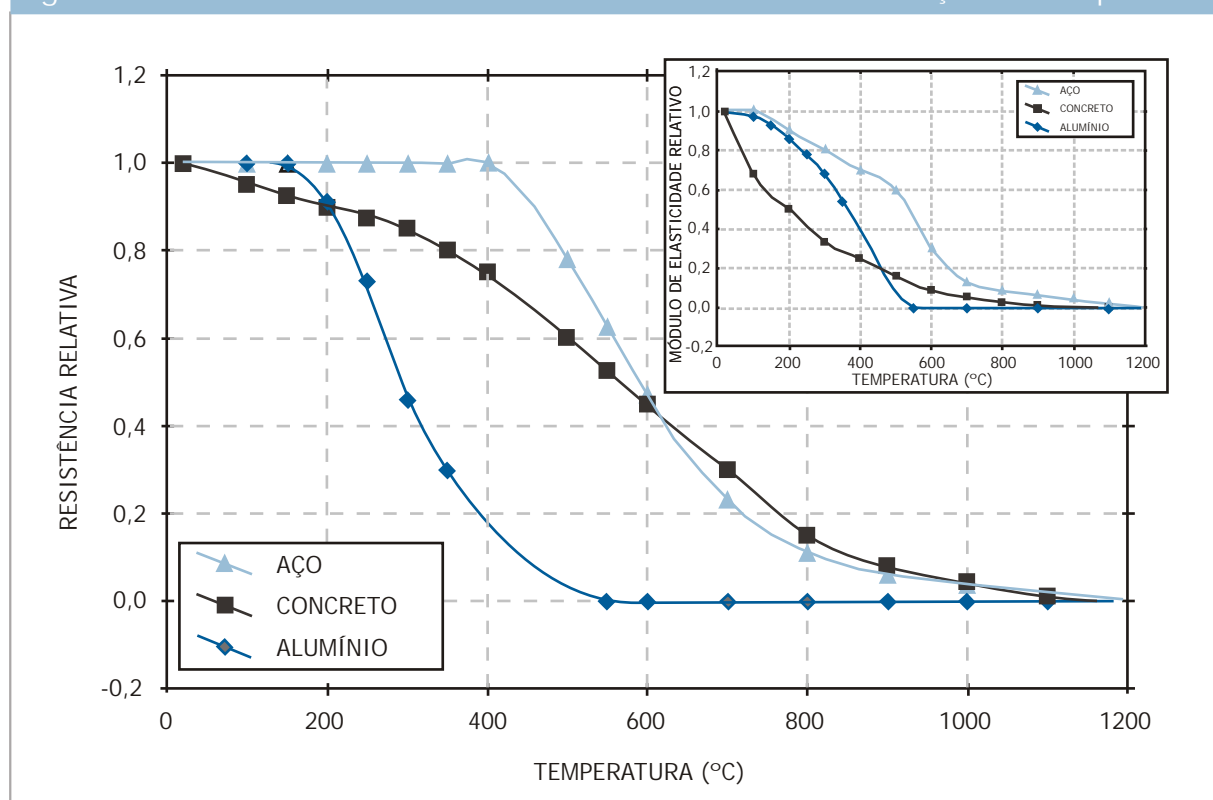


A carga de incêndio do ambiente é calculada por $q = \frac{\sum m_j H_j}{A_i}$, onde m_j é a massa total de cada componente da carga de incêndio, H_j corresponde ao poder calorífico específico de cada componente da carga de incêndio (MJ/kg) e A_i é a área total, incluindo vedações (parede, piso e teto) e aberturas.

6.4 - Ensaio Laboratoriais: O Incêndio-padrão

O conceito fundamental que suporta métodos laboratoriais desenvolvidos para a previsão da estabilidade estrutural em situação de incêndio é o de que todos os materiais estruturais perdem, gradualmente, a resistência e a rigidez quando submetidos às altas temperaturas que podem ser atingidas em um incêndio fora de controle. A figura 33 mostra o comportamento de alguns materiais de engenharia face à elevação de temperatura causada pelo fogo.

Figura 33 - Resistência relativa de diferentes materiais em função da temperatura



Para colunas, vigas e estruturas em geral, o colapso acontece quando uma temperatura limite é atingida, sob a ação de um ensaio normatizado. Esta temperatura limite é conhecida como temperatura crítica.

Os valores da temperatura crítica para as estruturas em aço são muito dependentes do nível de cargas efetivamente aplicadas e das condições de contorno dos componentes estruturais. Os ensaios padronizados, internacionais, de resistência ao fogo são efetuados, tradicionalmente, com o componente totalmente carregado conforme o projeto. Isto leva a temperaturas críticas na faixa de 450 °C - 650 °C. Caso existam gradientes de temperatura significativos ao longo da seção transversal, isto é, caso o componente não esteja uniformemente aquecido através da seção transversal e ao longo do componente (fato comum na maioria dos incêndios), a temperatura crítica pode atingir 900 °C ou ainda mais.

DESCRIÇÃO SUMÁRIA DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO FOGO

O termo “resistência ao fogo” está associado à habilidade de um elemento construtivo em continuar a desempenhar sua função como barreira ou componente estrutural durante o evento de um incêndio. Convencionalmente, ela é determinada através do ensaio de uma amostra em tamanho real, carregada ao limite (se apropriado) e submetida ao “incêndio padrão”. Este conceito foi inicialmente introduzido em 1916 e foi baseado em observações de temperaturas de incêndios em madeira usados nos primeiros ensaios *ad hoc*³¹.

No ensaio padronizado, a curva temperatura-tempo é atingida através da programação da temperatura do forno de ensaio através do controle da velocidade de fornecimento do combustível (óleo ou gás). Infelizmente, como a temperatura medida se refere aos gases dentro do forno, a exposição a este “incêndio” é sensível às propriedades físicas (e emissividade) das paredes dos fornos. Acredita-se que o modo predominante de transferência de calor ao espécime acontece por radiação das paredes³². Se este tiver uma baixa inércia térmica, então a temperatura superficial crescerá rapidamente, resultando em uma exposição ao fogo muito mais severa do que aquela observada em um forno idêntico cujas paredes são construídas a partir de um material mais denso³³. Assim, parece não existir dois fornos capazes de fornecer a mesma condição de exposição. Tais anomalias foram notadas no passado, mas só recentemente foram propostas especificações para as propriedades térmicas para os contornos de fornos³⁴.

É normal equacionar a “resistência ao fogo” de um elemento da estrutura ao tempo de falha no ensaio padrão, embora um incêndio real possa ser muito diferente daquele do ensaio.

O número de ensaios necessários varia de um país para outro, mas é usualmente de um ou dois para cada tipo de componente. Para colunas, vigas e estruturas, considera-se que o colapso seja atingido quando estes não mais podem suportar sua carga prescrita no projeto, ou, se os componentes forem testados sem carga, supõe-se que o colapso aconteça quando a temperatura medida no aço exceda um valor crítico definido. Assim, a resistência ao fogo é sempre dependente das características térmicas de um dado material utilizado na isolação.

Os testes são normalmente efetuados seguindo uma relação temperatura-tempo para os gases da atmosfera do forno. Entretanto, o relacionamento não é sempre idêntico: A ISO 834³⁵ e a ASTM E 119³⁶, duas normas internacionais que tratam do assunto, diferem levemente. Em adição, o tipo de combustível utilizado no forno (gás ou óleo), assim como o tipo de refratário utilizado nas paredes e características geométricas interiores levam a diferentes condições de convecção e radiação, afetando a transferência de calor para o espécime sob ensaio.

31 V. Babrauskas e R.B. Williamson. *Fire Technology*, 14, p.184-194 e 304-316, 1980.

32 °R. Paulsen e S. Hadvig. *J. Fire and Flammability*, 8, p.423-442, 1977.

33 H.L. Malhotra. “Design of Fire-resisting Structures”. Surrey University Press, 1982.

34 B. Bohm. “Calculated Thermal Exposure of Steel Structures in Fire Test Furnaces - a non E_{res} Approach”. Laboratory of Heating and Air Conditioning, Technical University of Denmark, CIB W14/82/73 (DK).

35 International Standardization for Organization. “Fire-resistance Tests Elements of Building Construction”. ISO 834, Genève, Swiss, 1994.

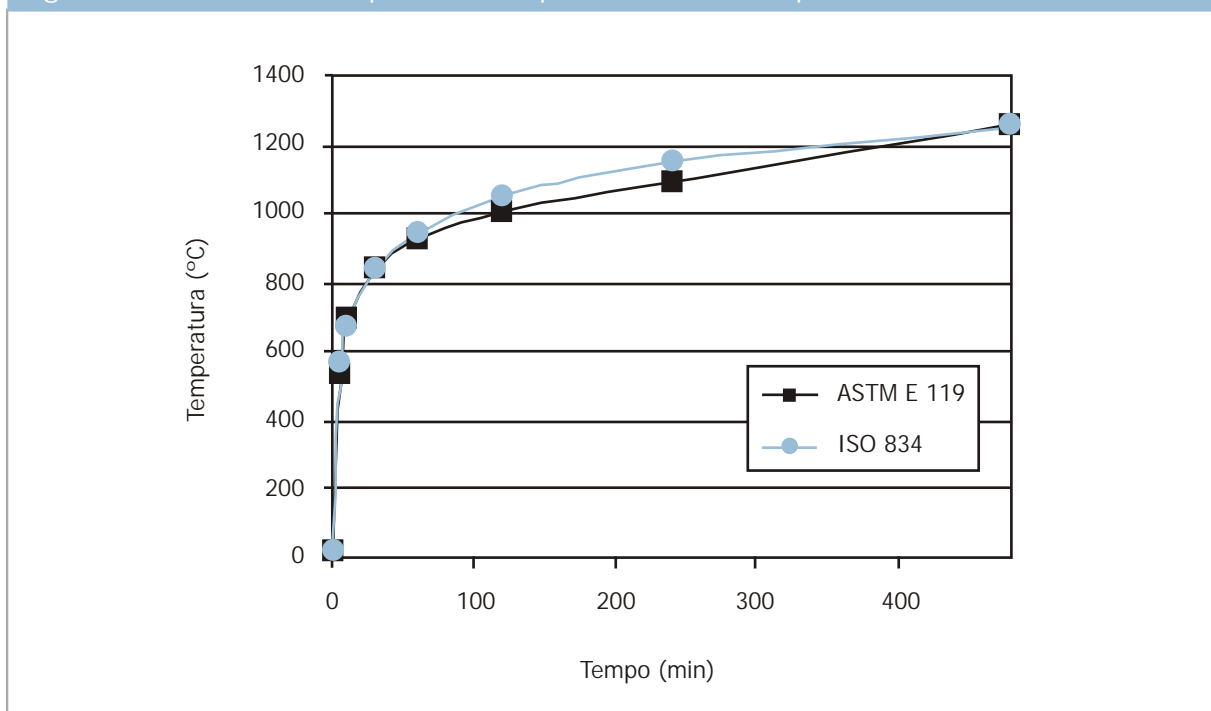
36 American Society for Testing and Materials. “Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials”. E119, West Conshohocken, USA, 2000.

Deve ser ressaltado que, embora dois fornos possam ter atmosferas que sigam uma mesma curva de aquecimento, os componentes sob teste podem se aquecer a diferentes velocidades, levando, assim, a diferentes tempos de resistência ao fogo. É sempre importante ressaltar que estes modelos de ensaio padronizados não representam um incêndio real, assim sendo, seus resultados devem ser sempre analisados com cuidado.

Normas de ensaio tais como a LPS 1107³⁷, a BS 476, ISO 834 e ASTM E 119 requerem, normalmente, que uma carga seja aplicada ao componente por todo o decorrer do ensaio. Algumas normas, como a ASTM E 119 e a AS 1530 permitem o uso alternativo de componentes não carregados.

A figura 34 mostra a curva do incêndio padrão conforme ISO 834 e ASTM E 119. A característica principal das normas acima mencionadas é que elas tem somente um ramo ascendente, admitindo, portanto que a temperatura dos gases seja sempre crescente com o tempo e, além disso, independente das características do ambiente e da carga de incêndio.

Figura 34 - Curvas de aquecimento para o incêndio - padrão



A curva de incêndio padrão descrita pela Norma ISO 834 é dada pela equação:

$$(21): T = 345 \log(8t + 1) + T_0,$$

onde T é a temperatura dos gases (°C), t é o tempo (min) e T_0 é a temperatura no instante $t = 0$, geralmente admitida como 20 °C.

37 Loss Prevention Standard. "Requirements, Tests and Methods of Assessment of Passive Fire Protection Systems for Structural Steelwork". LPS 1107 : Issue 1: 20.10.87, BRE/Garston, 1987.

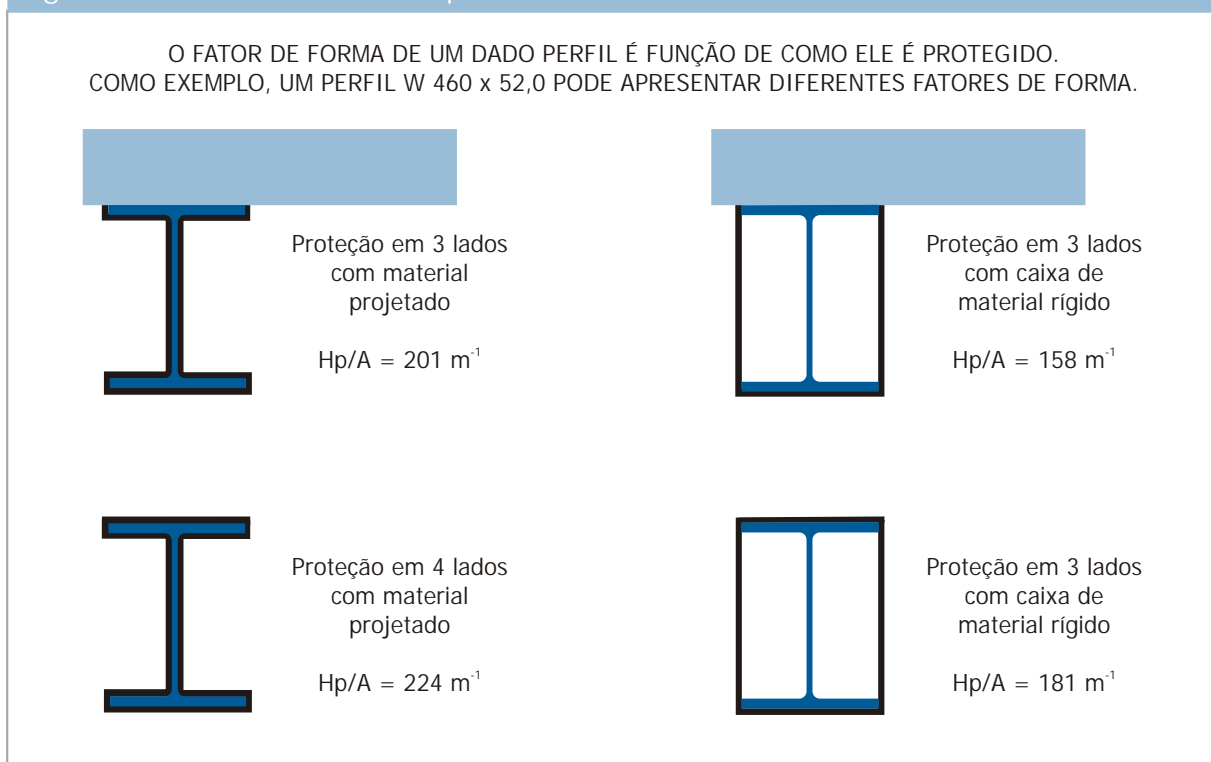
6.5 - Fator de Forma (ou Fator de Massividade)

A resistência ao fogo é expressa em unidades de tempo. Desse modo, um dos fatores que contribuem para a resistência ao fogo é a velocidade de aquecimento do componente, que governa o tempo transcorrido para atingir a temperatura de colapso (ou temperatura crítica). A velocidade de aquecimento é função das dimensões da seção.

Uma seção de baixa esbelteza, de grande massa, se aquecerá mais lentamente do que uma seção esbelta. Assim, uma seção massiva terá uma resistência maior ao fogo.

Este efeito de massividade é quantificado pelo chamado “Fator de Forma”, que corresponde à razão do perímetro aquecido (H_p) sobre a área da seção transversal (A). Observe que o fator de massividade pode tomar diferentes valores para um mesmo Perfil.

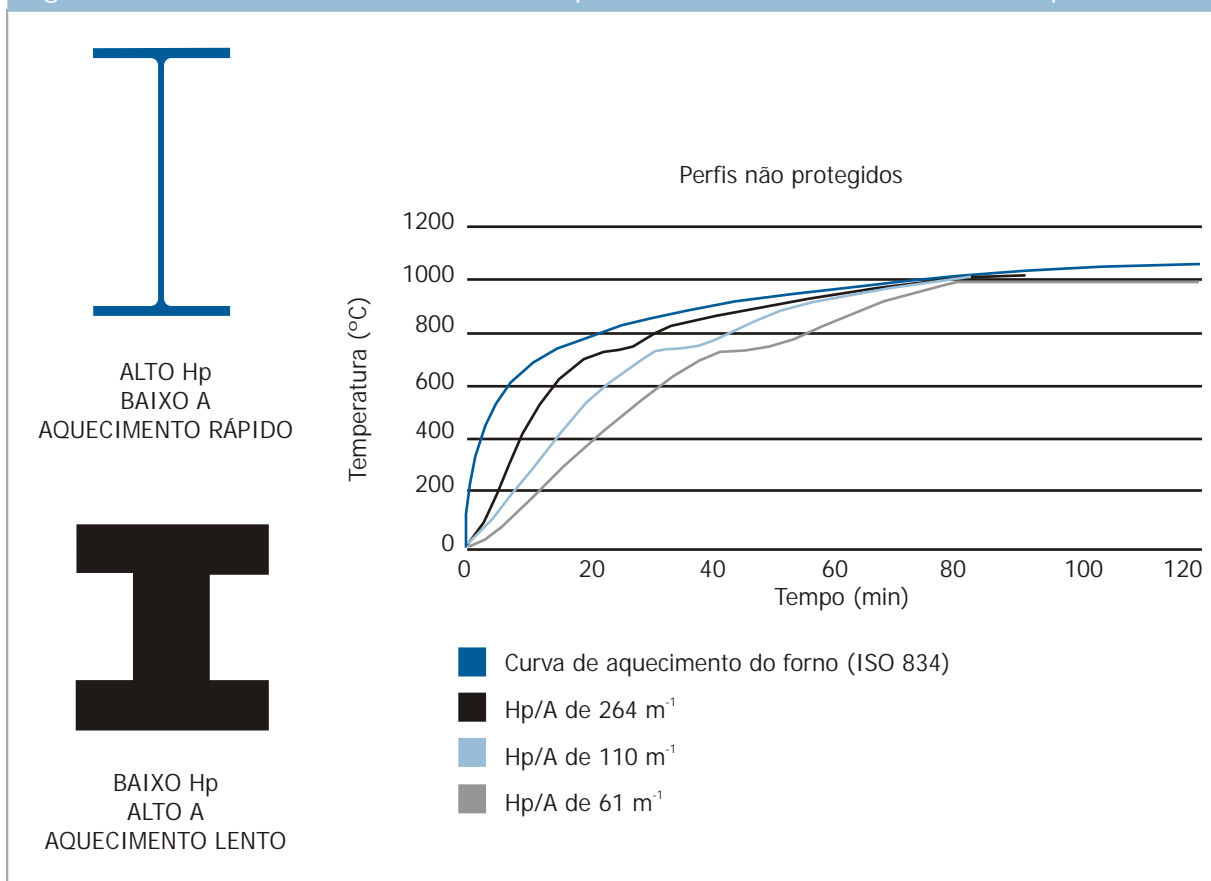
Figura 35 - Um mesmo Perfil pode ter diferentes fatores de formas







Um exemplo deste conceito é dado na figura abaixo, que mostra a velocidade de aquecimento para três perfis não protegidos submetidos ao incêndio padrão. Como as seções mais pesadas (baixo Hp/A) são aquecidas mais lentamente do que as seções mais leves (altos Hp/A), uma seção mais pesada necessitará de menos isolamento que a seção mais leve.

Vigas com fator de massividade menor do que 90 m^{-1} suportando lajes de concreto são aquecidas tão lentamente que, se a razão (carga no estado limite de incêndio/capacidade de carga a $20 \text{ }^\circ\text{C}$) for menor do que 0,6, ela não atinge sua temperatura limite em menos do que 30 minutos, atingindo, assim, $\frac{1}{2}$ hora de resistência ao fogo sem qualquer proteção. Colunas podem atingir $\frac{1}{2}$ hora de resistência ao fogo sob as mesmas circunstâncias quando o fator de massividade for menor do que 50 m^{-1} .

Figura 36 - A massividade do Perfil impõe diferentes velocidades de aquecimento



BITOLA	Massa Linear kg/m	Altura do Perfil mm	Largura das Abas mm	Espessura		Área da Seção cm ²	Fator de Massividade (A/V)			
				Alma mm	Aba mm		Aberto		Caixa	
							3 lados	4 lados	3 lados	4 lados
W 150 x 13,0	13,0		100	4,3	4,9	16,6				
W 150 x 18,0	18,0	153	102	5,8	7,1	23,4	354	414	239	299
W 200 x 15,0	15,0	200	100	4,3	5,2	19,4	257	300	174	218
W 200 x 19,3	19,3	203	102	5,8	6,5	25,1	356	408	258	309
W 200 x 22,5	22,5	206	102	6,2	8,0	29,0	279	319	202	243
W 200 x 26,6	26,6	207	133	5,8	8,4	34,2	244	279	177	213
W 200 x 31,3	31,3	210	134	6,4	10,2	40,3	234	273	160	199
W 250 x 17,9	17,9	251	101	4,8	5,3	23,1	201	234	137	171
W 250 x 22,3	22,3	254	102	5,8	6,9	28,9	344	388	261	305
W 250 x 25,3	25,3	257	102	6,1	8,4	32,6	278	313	211	247
W 250 x 28,4	28,4	260	102	6,4	10,0	36,6	247	279	189	220
W 250 x 32,7	32,7	258	146	6,1	9,1	42,1	222	250	170	198
W 250 x 38,5	38,5	262	147	6,6	11,2	49,6	224	259	157	192
W 250 x 44,8	44,8	266	148	7,6	13,0	57,6	192	222	135	165
W 310 x 21,0	21,0	303	101	5,1	5,7	27,2	167	193	118	144
W 310 x 23,8	23,8	305	101	5,6	6,7	30,7	330	367	259	297
W 310 x 28,3	28,3	309	102	6,0	8,9	36,5	294	326	231	264
W 310 x 32,7	32,7	313	102	6,6	10,8	42,1	250	278	197	225
W 310 x 38,7	38,7	310	165	5,8	9,7	49,7	218	242	173	197
W 310 x 44,5	44,5	313	166	6,6	11,2	57,2	222	255	158	191
W 310 x 52,0	52,0	317	167	7,6	13,2	67,0	194	223	138	167
W 360 x 32,9	32,9	349	127	5,8	8,5	42,1	167	192	119	144
W 360 x 39,0	39,0	353	128	6,5	10,7	50,2	254	284	196	226
W 360 x 44,0	44,0	352	171	6,9	9,8	57,7	215	240	166	192
W 360 x 51,0	51,0	355	171	7,2	11,6	64,8	209	238	152	181
W 360 x 57,8	57,8	358	172	7,9	13,1	72,5	187	213	136	162
W 360 x 64,0	64,0	347	203	7,7	13,5	81,7	168	191	122	146
W 360 x 72,0	72,0	350	204	8,6	15,1	91,3	158	183	110	135
W 360 x 79,0	79,0	354	205	9,4	16,8	101,2	142	164	99	121
W 410 x 38,8	38,8	399	140	6,4	8,8	50,3	129	149	90	110
W 410 x 46,1	46,1	403	140	7,0	11,2	59,2	220	267	187	214
W 410 x 53,0	53,0	403	177	7,5	10,9	68,4	205	228	160	183
W 410 x 60,0	60,0	407	178	7,7	12,8	76,2	193	219	144	170
W 410 x 67,0	67,0	410	179	8,8	14,4	86,3	175	198	130	154
W 410 x 75,0	75,0	413	180	9,7	16,0	95,8	155	176	116	136
W 460 x 52,0	52,0	450	152	7,6	10,8	66,6	141	159	105	124
W 460 x 60,0	60,0	455	153	8,0	13,3	76,2	201	224	158	181
W 460 x 68,0	68,0	459	154	9,1	15,4	87,6	178	198	139	160
W 460 x 74,0	74,0	457	190	9,0	14,5	94,9	155	175	116	136
W 460 x 82,0	82,0	460	191	9,9	16,0	104,7	155	175	116	136
W 460 x 89,0	89,0	463	192	10,5	17,7	114,1	141	159	106	124
W 530 x 66,0	66,0	525	165	8,9	11,4	83,6	130	147	98	115
W 530 x 72,0	72,0	524	207	9,0	10,9	91,6	183	203	145	165
W 530 x 74,0	74,0	529	166	9,7	13,6	95,1	180	203	137	160
W 530 x 82,0	82,0	528	209	9,5	13,3	104,5	162	179	129	146
W 530 x 85,0	85,0	535	166	10,3	16,5	107,7	159	179	121	141
W 530 x 92,0	92,0	533	209	10,2	15,6	117,6	144	159	115	130
W 610 x 101,0	101,0	603	228	10,5	14,9	130,3	142	160	108	126
W 610 x 113,0	113,0	608	228	11,2	17,3	145,3	143	161	110	128
W 610 x 125,0	125,0	612	229	11,9	19,6	160,1	129	145	99	115
W 610 x 155,0	155,0	611	324	12,7	19,0	198,1	118	132	41	105
W 610 x 174,0	174,0	616	325	14,0	21,6	222,8	109	126	78	94
W 150 x 22,5	22,5	152	152	5,8	6,6	29,0	98	112	70	84
W 150 x 29,8	29,8	157	153	6,6	9,3	38,5	258	311	157	210
W 150 x 37,1	37,1	162	154	8,1	11,6	47,8	198	237	121	161
W 200 x 35,9	35,9	201	165	6,2	10,2	45,7	161	193	100	132
W 200 x 46,1	46,1	203	203	7,2	11,0	58,6	193	230	124	160
HP 200 x 53,0	53,0	204	207	11,3	11,3	68,1	171	206	104	139
W 200 x 71,0	71,0	216	206	10,2	17,4	91,0	148	178	90	121
HP 250 x 62,0	62,0	246	256	10,5	10,7	79,6	113	136	70	93
W 250 x 73,0	73,0	253	254	8,6	14,2	92,7	156	188	94	126
W 250 x 80,0	80,0	256	255	9,4	15,6	101,9	135	162	82	109
HP 250 x 85,0	85,0	254	260	14,4	14,4	108,5	123	148	75	100
W 250 x 89,0	89,0	260	256	10,7	17,3	113,9	116	140	71	95
HP 310 x 79,0	79,0	299	306	11,0	11,0	100,0	111	134	68	91
HP 310 x 93,0	93,0	303	308	13,1	13,1	119,2	149	180	90	121
W 310 x 97,0	97,0	308	305	9,9	15,4	123,6	126	152	77	103
W 310 x 107,0	107,0	311	306	10,9	17,0	136,4	122	147	75	99
HP 310 x 110,0	110,0	308	310	15,4	15,5	141,0	111	134	68	90
W 310 x 117,0	117,0	314	307	11,9	18,7	149,9	107	129	66	88
HP 310 x 125,0	125,0	312	312	17,4	17,4	159,0	102	122	62	83
W 360 x 110,0	110,0	360	256	11,4	19,9	140,6	96	116	59	78
W 360 x 122,0	122,0	363	257	13,0	21,7	155,3	104	122	69	88
							95	111	63	80

6.6 - As Normas Brasileiras

Para que se possa verificar a segurança estrutural em situação de incêndio dos elementos estruturais de aço de uma edificação, é necessário conhecer a exigência de resistência ao fogo para cada tipo de elemento (viga, pilar, laje) conforme as normas vigentes no país.

As Normas Brasileiras que tratam da segurança estrutural frente ao fogo foram aprovadas em 1999: NBR 14432 “Exigências de Resistência ao Fogo de Elementos Construtivos de Edificações Procedimento”³⁸ e NBR 14323 “Dimensionamento de Estruturas de Aço de Edifícios em Situação de Incêndio - Procedimento”³⁹. O desempenho requerido para os elementos de construção estrutural (concreto, madeira ou aço) ou de compartimentação prescritos na NBR 14432 trata de prevenir o colapso estrutural, tornando possível a retirada dos ocupantes, de reduzir os danos às propriedades vizinhas e permitir o rápido acesso do Corpo de Bombeiros.

A Norma fornece uma tabela, resumida na página seguinte, com recomendações consagradas, fruto do consenso da sociedade, de tempos requeridos de resistência ao fogo (TRRF) sob o conceito de fogo padrão descrito na Norma ISO 834. De acordo com a elevação de temperatura dos gases do forno como descritos na ISO 834 (e também na BS476 e LPS1107), quando a tabela propõe uma resistência ao fogo de 30 minutos, significa que a estrutura deve permanecer estável quando a atmosfera ao seu redor estiver a aproximadamente 820 °C, 1 hora significa 930 °C e 2 horas 1030 °C. Quanto maior a resistência requerida, maior a temperatura que a estrutura deve resistir.

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 Gretnener⁴⁰ ou métodos mais avançados de engenharia de incêndio.

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

A Norma prevê ainda isenções, baseadas na pequena probabilidade da ocorrência de acidentes em pequenos edifícios cuja evacuação é simples, tais como estruturas de pequena área ou de um andar. A tabela localizada na próxima página resume estas isenções prescritas na NBR 14432.

Apesar da NBR 14432 ser válida para todo o Brasil, é importante verificar a existência de algum regulamento local específico⁴¹.

38 Associação Brasileira de Normas Técnicas. “Exigências de Resistência ao Fogo de Elementos Construtivos de Edificações Procedimento”. NBR 14432, Rio de Janeiro, 2000.

39 Associação Brasileira de Normas Técnicas. “Dimensionamento de Estruturas de Aço de Edifícios em Situação de Incêndio Procedimento”. NBR 14323, Rio de Janeiro, 1999.

40 Societé Suisse des Ingénieurs et des Architectes (SAI). “Evaluation du Risque d’Incendie. Méthode de Calcul”. Documentation No. 81, Zurich, 1999.

41 O Estado de São Paulo utiliza um conjunto de Instruções Técnicas do Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo, que tem força de lei local.

ISENÇÕES SEGUNDO A NBR 14432				
Ocupação	Área, m ²	Densidade de Carga de Incêndio (MJ/m ²)	Altura	Equipamentos de Proteção de Incêndio ^a
Qualquer	≤ 750	Qualquer	Qualquer	Mínimo
Qualquer	≤ 1500	≤ 1000	< 2 pavimentos	Mínimo
Estádios, aeroportos, estações ferroviárias	Qualquer	Qualquer	< 23 m	Mínimo
Estacionamento aberto ^b	Qualquer	Qualquer	< 30 m	Mínimo
Lojas ^c	Qualquer	Incombustível	< 30 m	Mínimo
Qualquer	Qualquer	≤ 500	Térrea	Mínimo
Industrial ^c	Qualquer	≤ 1200	Térrea	Mínimo
Lojas ^c	Qualquer	< 2000	Térrea	Mínimo
Qualquer	Qualquer	Qualquer	Térrea	Chuveiros ^d
Qualquer	≤ 5000	Qualquer	Térrea	Duas fachadas para acesso dos bombeiros ^e

^a Mínimo por lei
^b Estruturas de concreto ou aço mas com vigas compostas e fatores de forma mínimos de 250 m⁻¹ para colunas e 350 m⁻¹ para vigas
^c Compartimentação em conformidade com outras Normas Brasileiras
^d Em conformidade com outras Normas Brasileiras
^e Perímetro das fachadas³ 50% do perímetro da edificação

TEMPO REQUERIDO DE RESISTÊNCIA AO FOGO (TRRF*), EM MINUTOS, SEGUNDO NBR 14432:2000					
Ocupação	Altura da Edificação				
	h ≤ 6m	6m < h ≤ 12m	12m < h ≤ 23m	23m < h ≤ 30m	h > 30m
Residência	30	30	60	90	120
Hotel	30	60 (30)	60	90	120
Comercial	60 (30)	60 (30)	60	90	120
Escritório	30	60 (30)	60	90	120
Escola	30	30	60	90	120
Locais Públicos	60 (30)	60	60	90	120
Estacionamento Fechado	30	60 (30)	60	90	120
Estacionamento Aberto	30	30	30	30	60
Hospital	30	60	60	90	120
Indústria com Baixa Carga de Incêndio	30	30	60	90	120
Indústria com Alta Densidade de Carga de Incêndio	60 (30)	60 (30)	90 (60)	120 (90)	120
Loja com Baixa Densidade de Carga de Incêndio	30	30	30	30	60
Loja com Alta Densidade de Carga de Incêndio	60	60	90 (60)	120 (90)	120

(*) Tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) é definido como sendo o tempo mínimo de resistência de um elemento construtivo submetido ao incêndio-padrão.
(a) Valores entre parenteses são válidos para edificações com área < 750 m².
(b) A altura da edificação (h) é 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 piso sem a permanência humana.

6.7 - Cálculo de Espessuras

Nos casos em que a proteção passiva seja necessária, sua espessura pode ser determinada a partir de dados fornecidos pelos fabricantes de materiais de proteção. Estes documentos são conhecidos usualmente por “Cartas de Cobertura”.

As recomendações dos fabricantes relacionam, de modo geral, a espessura de proteção ao fator de forma (H_p/A) e ao tempo requerido. De modo geral, as recomendações de espessura são derivadas da NBR 5628 “Componentes Construtivos Estruturais Determinação da Resistência ao Fogo” (quando o ensaio é feito em laboratório brasileiro) ou outra norma internacional amplamente aceita (por exemplo, ISO 834 ou BS 476).

Para uma construção típica, utilizando-se perfis laminados I e H, o valor de H_p/A está situado comumente na faixa de 60 a 400 m^{-1} , sendo o valor de 63 m^{-1} associado com um pilar W 360 x 122,0 protegido na forma de caixa por três lados (com, por exemplo, placas de gesso acartonado), enquanto que um pilar esbelto W 150 x 22,5 terá um valor de H_p/A de 311 m^{-1} para proteção nos quatro lados (p. ex.: com material projetado).

A figura 37 mostra quatro configurações de proteção para uma viga W 460 x 52,0. Para se determinar a espessura da proteção por argamassa projetada (em três lados), por um tempo de 1 hora, devemos, primeiro, definir o fator de forma da viga: por exemplo, 201 m^{-1} (para uma viga mista como a da figura). Em seguida, devemos observar, na Carta de Cobertura do fabricante do material de proteção passiva, a espessura (seca e mínima) recomendada.

A figura 38 indica os passos principais na determinação da espessura a ser aplicada.

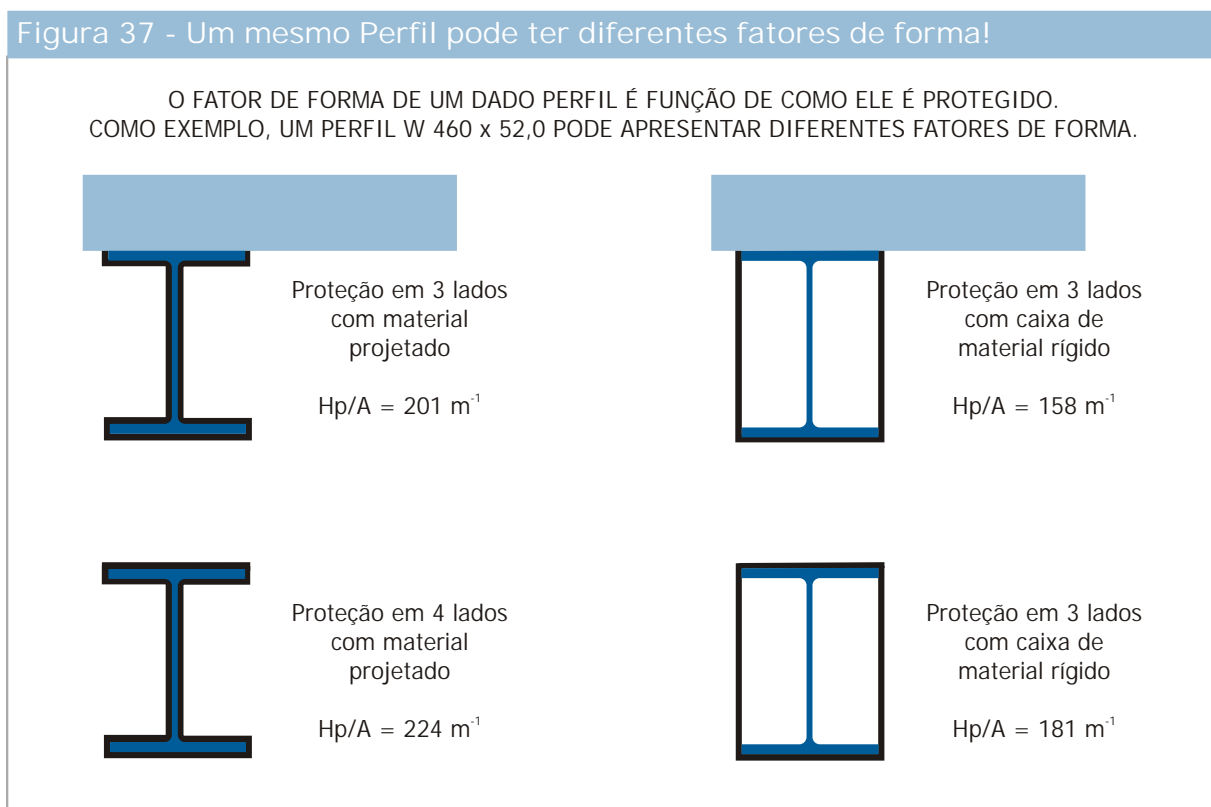


Figura 38 - Como calcular a espessura do revestimento?

1. COMECE PELA LISTA DE MATERIAIS:

Item	Tipo	Material	Comprimento (perfil).mm	Quantidade
1	Viga	W 200 x 15,0	12000	48
2	Pilar	HP 310 x 79,0	12000	34

2. DETERMINE O TRRF:
(VEJA A NBR 14432:2000)

- DETERMINE A OCUPAÇÃO (ANEXO B)
- DETERMINE A ALTURA



- DETERMINE O T.R.R.F. (TABELA A.1)

EXEMPLO:
T.R.R.F. = 60 MINUTOS

3. DETERMINE O FATOR DE MASSIVIDADE DOS MATERIAIS
(VEJA TABELA)

EXEMPLO
(PARA PROJETADOS):
PILAR (4 LADOS)
HP 310 x 79,0: 189 m⁻¹

4. DETERMINE A ESPESSURA MÍNIMA A SER APLICADA
(VEJA CARTA DE COBERTURA)

Fator de Forma (m ²)	Resistência ao Fogo (min)				
	30	60	90	120	180
115	10	15	22	29	42
120	10	15	22	29	44
125	10	16	23	30	45
130	10	16	23	31	46
135	10	16	24	32	47
140	10	17	24	32	48
145	10	17	25	33	49
150	10	17	25	34	50
155	10	18	26	34	
160	10	18	26	35	
165	10	18	27	35	
170	10	19	27	36	
175	10	19	28	37	
180	10	19	28	37	
185	10	19	28	38	
190	10	20	29	38	
195	10	20	29	39	
200	11	20	30	39	
205	11	20	30	40	
210	11	21	30	40	
215	11	21	31	41	
220	11	21	31	41	
225	11	21	31	41	
230	11	22	32	42	
235	11	22	32	42	
240	12	22	32	43	
245	12	22	33	43	
250	12	22	33	43	
255	12	23	33	44	
260	12	23	33	44	
265	12	23	34	45	
270	12	23	34	45	
275	12	23	34	45	
280	12	23	35	46	
285	12	24	35	46	
290	12	24	35	46	
295	13	24	35	47	
300	13	24	36	47	
305	13	24	36	47	
310	13	24	36	48	
315	13	25	36	48	
320	13	25	36	48	

ESPESSURA SECA MÍNIMA PARA ESTE COMPONENTE (O PILAR HP 310 x 79,0):

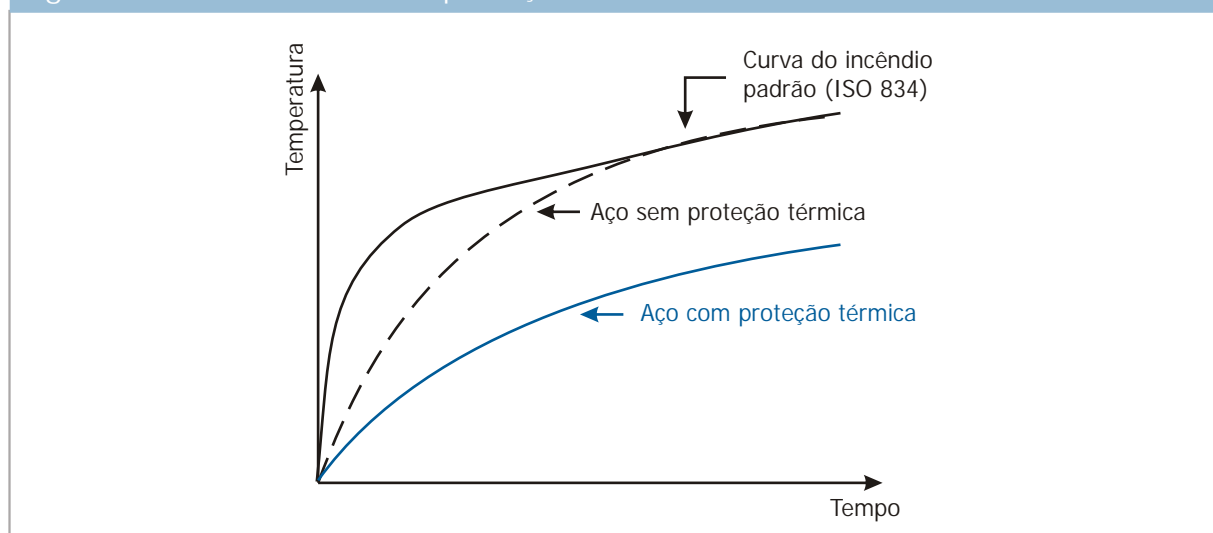
20 mm

6.8 - Materiais Utilizados na Proteção Térmica de Estruturas de Aço

Um dos primeiros, senão o primeiro material de proteção passiva foi patenteado na Inglaterra em 1722 por David Hartley. Esta patente tratava de um sistema de placas metálicas separadas por areia. O sistema foi instalado com sucesso em muitas casas da época, para prevenir o espalhamento do incêndio de um andar para outro. Assim, o primeiro sistema de compartimentação foi criado.

A proteção térmica dos elementos estruturais de aço (chamada de proteção passiva) é o meio mais comum de se proteger o aço contra o incêndio. Vários são os materiais utilizados com esta finalidade, tais como as argamassas projetadas, tintas intumescentes, mantas cerâmicas ou de lã de rocha basáltica, gesso acartonado e outros.

Figura 39 - Como funciona a proteção térmica



Materiais Projetados

São produtos de baixo custo que apresentam bom isolamento térmico às altas temperaturas, mantendo a integridade da estrutura durante a evolução do incêndio.

Esses materiais tem como aglutinantes básicos o gesso ou cimento portland, e são aplicados por projeção à baixa pressão. Contém agregados de baixa densidade e aditivos de função reológica, de modo a facilitar a aplicação dos materiais com o mínimo de desprendimento. Após sua secagem, trabalham monoliticamente com a estrutura, acompanhando seus movimentos, sem a ocorrência de fissuras ou desprendimento.

Estes materiais trabalham na proteção de dois modos distintos. O primeiro deles é proporcionado pelo efeito de resfriamento conferido à estrutura, pois a água retida na estrutura (fisicamente ou quimicamente) evapora tão logo o incêndio progride. Uma vez que a água tenha sido convertida a vapor, o produto passa a atuar, então, como um isolante térmico. Minerais de baixa densidade e agregados sintéticos são utilizados nesses produtos, permitindo a liberação do vapor com facilidade, enquanto que o uso materiais mais densos poderiam impedir o escape do vapor (promovendo o lascamento).

Propriedades	Argamassa projetada	Fibra projetada	Especificação Recomendada	Método de Ensaio
Densidade Seca Média	240 kg/ m ³	280 kg/ m ³	240 kg/ m ³	ASTM E 605
Aderência ao Aço	16,2 kPa	15,9 kPa	9,6 kPa	ASTM E 736
Compressão, 10% Deformação Máxima	68,9 kPa	85,7 kPa	57 kPa	ASTM E 761
Erosão ao ar	0 g/m ²	0 g/m ²	máx. 0,05g/m ²	ASTM E 859
Corrosão	Não contribui	Não contribui	Não contribui	ASTM E 937
Deflexão	Sem trincas ou delaminação	Sem trincas ou delaminação	Sem trincas ou delaminação	ASTM E 759

A durabilidade de tais revestimentos deverá ser a mesma da estrutura, dispensando manutenção, e não promovendo qualquer tipo de ataque corrosivo ao aço. Não são higroscópicos, tornando desnecessário o uso de tintas de fundo ou outros sistemas de proteção contra a corrosão em estruturas internas.

O custo dos materiais projetados é menor do que os outros sistemas existentes. Como o custo do material projetado é pequeno quando comparado à manutenção do equipamento no local de aplicação somado à mão-de-obra, os custos não crescem na proporção dos tempos requeridos de resistência ao fogo.

A aplicação desta classe de produtos é bastante simples, recobrando com facilidade detalhes complexos.

Argamassa Projetada

São produtos com alto conteúdo de aglomerantes que, quando misturados com água, geram uma massa fluida que pode ser facilmente bombeada. São apresentados como produtos de baixa, média ou alta densidade, e constituem-se basicamente de gesso (aproximadamente 80% do peso seco), cimento Portland (principalmente em materiais de média e alta densidade), resinas acrílicas e cargas inertes, tais como poliestireno expandido, celulose e preservantes.

Materiais de baixa densidade são aplicados, de modo geral, em obras internas. Os de média densidade são utilizados em obras internas com requisitos de certa resistência ao impacto e à umidade e os de alta densidade são utilizados em obras externas onde o risco de impacto é alto, assim como a umidade.

Estes produtos, de modo geral, não necessitam, para sua aplicação, da retirada da carepa de laminação e de alguma ferrugem formada. Antes da projeção, faz-se uma limpeza manual, retirando-se o material solto sobre a superfície.

Para aplicações típicas em interiores, onde o aço será enclausurado em um ambiente controlado, a utilização de um primer é, de modo geral, desnecessária. Exceções são as áreas de alta umidade, como piscinas, lavanderias, cozinhas, etc. Nestas, pode ser necessária a adoção de uma ponte de aderência, que consiste de uma base acrílica solúvel em água. Aços não pintados apresentam a melhor condição de aderência dos materiais, dispensando a utilização de elementos de ancoragem, salvo peças de excessiva altura. Nestas, a utilização de algum tipo de ancoragem mecânica pode ser necessária, como por exemplo, a utilização de telas de fixação. As instruções contidas no UL Fire Resistance Directory⁴² são apropriadas à escolha do sistema de fixação, quando necessário.

Quando a temperatura ambiente atinge 90 °C - 150 °C, as ligações químicas existentes no gesso hidratado começam a se romper, liberando água de hidratação. Esta reação absorve a energia do fogo, que seria conduzida ao aço. Este processo permite ao aço manter uma temperatura relativamente baixa por 20 a 30 minutos durante a primeira hora crítica do incêndio. A mesma consideração é aplicada para placas de gesso acartonado.

Fibra Projetada

São produtos de baixa e média densidades, contendo basicamente fibras obtidas a partir de escória de alto-forno como principal ingrediente. Estas fibras são misturadas com cimento Portland (20 a 30% do peso seco total) para criar uma mistura de baixa densidade.

A argamassa à base de fibras utiliza as propriedades isolantes da fibra produzida a partir da escória para proteger o aço.

Argamassa Projetada à Base de Vermiculita

É produto de baixa densidade, composto basicamente de vermiculita expandida, cimento Portland e aglomerados minerais. Esse material deve ser completamente isento de amianto, e, para melhorar sua aderência ao aço, costuma ser necessária a utilização de telas.

Materiais Rígidos

Placas rígidas e mantas flexíveis ou semi-rígidas compostas de vários materiais, tais como lâmina cerâmica, gesso acartonado resistente ao fogo, placas de silicato de cálcio e vermiculita são também utilizadas na proteção estrutural. Propiciam a proteção estrutural do mesmo modo que os materiais projetados, e são fixados a seco ao redor do aço utilizando clip, pino ou sistemas próprios.

Os materiais rígidos apresentam, de modo geral, uma boa aparência, em geral na forma de caixa, que pode ser decorado. A fixação é feita a seco e não apresenta interferências sérias com os outros sistemas. Além disso, podem ser aplicados sobre a estrutura de aço não pintada.

Uma outra vantagem dos materiais rígidos advém do fato de sua construção industrializada. Desse modo, as espessuras são garantidas.

As principais desvantagens são o custo mais elevado do que os apresentados pelos materiais projetados, a dificuldade na aplicação ao redor de detalhes complexos e a baixa velocidade de aplicação.

42 UL Fire Resistance Directory, vol.1, p.2. Underwriters Laboratory Inc.(2001).

Placas de Gesso Acartonado

Placas de gesso contendo fibra de vidro, e, em alguns casos, vermiculita incorporada. Assim como a argamassa “cimenticious”, o gesso da placa perde moléculas de água de hidratação durante o aquecimento, mantendo baixa a temperatura do aço. Têm, internamente, uma malha de fibra de vidro, que mantém o conjunto esruturado quando exposto às elevadas temperaturas do incêndio. A placa é mantida, de modo geral, visível em estruturas, por motivos estéticos.

Placas de Lã de Rocha

São painéis de baixa densidade, rígidos ou flexíveis, feitos de materiais fibrosos, aglomerados pela adição de resinas termo-endurecíveis.

A matéria-prima básica utilizada na confecção das placas é o basalto. São fixadas com pinos de aço soldados à estrutura metálica.

Mantas Cerâmicas

Produtos formados a partir de fibras silico-aluminosas, presas à estrutura através da utilização de pinos de aço soldados na estrutura.

Tintas Intumescentes

Correspondem ao terceiro grupo genérico de materiais de proteção passiva e são classificados como produtos aparentados das tintas.

Seu nome deriva do verbo latim tumescere, que significa iniciar, expandir. Em situação de incêndio, essas tintas especiais se expandem a partir de 200 °C, formando uma espuma carbonácea rígida que isola eficientemente os gases quentes, gerados no incêndio, do aço. É importante ressaltar que as propriedades do aço não são alteradas a essas temperaturas.

Antes da aplicação dessa tinta especial, a superfície deverá ser preparada conforme recomendações do fabricante, e um primer compatível deverá ser aplicado. Como essa tinta não apresenta grande resistência química e física, ela deve ser recoberta por uma tinta de acabamento de base acrílica ou poliuretânica, a critério do produtor (da tinta).

Essa tinta pode ser aplicada a pincel, rolo ou spray (airless), e a aparência final do sistema (primer epoxídico, acrílico ou alquídico, tinta intumescente e tinta de acabamento acrílica ou poliuretânica) é sempre muito boa. Detalhes complexos podem ser facilmente recobertos e a manutenção é, como toda pintura, bastante facilitada.

As tintas intumescentes têm, como principal vantagem, o apelo estético, permitindo que a estrutura seja exposta em toda sua plenitude, mostrando um acabamento atraente.

As principais desvantagens das tintas intumescentes são o custo elevado quando comparado às outras formas de proteção e à aplicação on site, que requer condições atmosféricas favoráveis (além de necessitar várias demãos para atingir a espessura necessária). Outra desvantagem é que o tempo de proteção apresentado pela maior parte destas tintas não vai além de 60 minutos. Um número limitado de tintas intumescentes pode ser usado por períodos mais longos, tais como 90 e 120 minutos, mas o custo total é consideravelmente mais elevado do que a aplicação para 60 minutos.

Enclausuramento em concreto

Até o fim dos anos 70 o concreto era o mais comum meio de proteção de estruturas metálicas em vários países do mundo. Entretanto, a introdução no mercado de sistemas industrializados de baixo peso tais como os produtos rígidos, projetados e intumescentes propiciou uma redução dramática em seu uso. Atualmente, em vários países desenvolvidos, como a Inglaterra, o enclausuramento em concreto corresponde a uma pequena porcentagem da proteção.

A principal vantagem na utilização do concreto como material de proteção passiva diz respeito à durabilidade. O enclausuramento tende a ser utilizado quando o componente em aço está sujeito ao risco por impacto, abrasão ou exposição ao intemperismo (p. ex.: estacionamentos subterrâneos).

As desvantagens da proteção com concreto são o custo (é uma das mais caras formas de proteção), a velocidade (consome tempo na obra), o peso (a edificação ficará muito mais pesada) e a redução de espaço ao redor das colunas.

Figura 40 - Vantagens e desvantagens de alguns sistemas de proteção comuns

Produto	Vantagens	Desvantagens
---------	-----------	--------------

Projetados	<ul style="list-style-type: none"> • Aplicação rápida • Baixo custo • Aplicados diretamente sobre o aço • Cobertura de detalhes complexos • Permitem a aplicação externa 	<ul style="list-style-type: none"> • Aparência bruta • Não permitem a aplicação off-site
------------	---	--



Rígidos	<ul style="list-style-type: none"> • Boa aparência • Fixação a seco • Espessura garantida • Não necessita de preparo superficial 	<ul style="list-style-type: none"> • Custo pode ser elevado • Lento para fixação • Difícil fixação ao redor de detalhes complexos
---------	--	--



Mantas	<ul style="list-style-type: none"> • Baixo custo quando comparado aos materiais rígidos • Fixação a seco 	<ul style="list-style-type: none"> • Aparência
--------	--	---



Intumescentes	<ul style="list-style-type: none"> • Boa aparência • Cobertura de detalhes complexos • Não toma espaço ou adiciona peso • Aplicação rápida Podem ser aplicadas off-site 	<ul style="list-style-type: none"> • Custo pode ser elevado • Sensíveis às condições climáticas adversas • Não competitiva para altos TRRF's
---------------	--	---

