

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PQI 3406 Corrosão e Seleção de Materiais

Aula 8

- **CORROSÃO ATMOSFÉRICA**

CORROSÃO ATMOSFÉRICA

Corrosão atmosférica

A corrosão atmosférica pode ser definida como um processo resultante de reações químicas e/ou eletroquímicas, pelo qual metais e ligas se deterioram quando submetidos à ação climática.

- extensivo uso de metais em estruturas expostas tais como: edifícios, pontes, automóveis, navios, plantas químicas, aeronaves, etc.

Segundo Tomashov, 1966, 50% dos custos advindos do fenômeno de corrosão são consequência da corrosão atmosférica pela frequência de exposição de estruturas metálicas à ação climática

Corrosão atmosférica

Mecanismos de corrosão atmosférica

Valores muito baixos de U.R. (atmosfera seca)

mecanismo químico - pouco frequente

Escurecimento de Ag e Cu em presença de H₂S

Valores de U.R. abaixo de 100% (atmosfera úmida)

mecanismo eletroquímico

- um filme de água adsorvida, contínuo em diferentes extensões, dependendo do valor da U.R., que garante o estabelecimento de um **mecanismo eletroquímico** pela presença de um filme de eletrólito – é o que sustenta a corrosão atmosférica na maior parte do tempo de exposição

Valores de U.R. de 100% (atmosfera saturada)

mecanismo eletroquímico

- presença de filmes visíveis de eletrólito (com água na fase líquida), quer devido à chuva, à formação de orvalho ou nevoeiro

Corrosão atmosférica

Mecanismos de corrosão atmosférica

Umidade relativa crítica - U.R. C

- umidade relativa acima da qual se manifesta uma corrosão considerável dos diferentes metais.
- depende de fatores como:
 - natureza do metal exposto (se é cobre, aço, zinco ou outro)
 - tipo e concentração de poluentes presentes;
 - grau de acabamento superficial do metal;
 - grau de higroscopicidade dos produtos de corrosão presentes na superfície do metal.

Corrosão atmosférica

Mecanismos de corrosão atmosférica

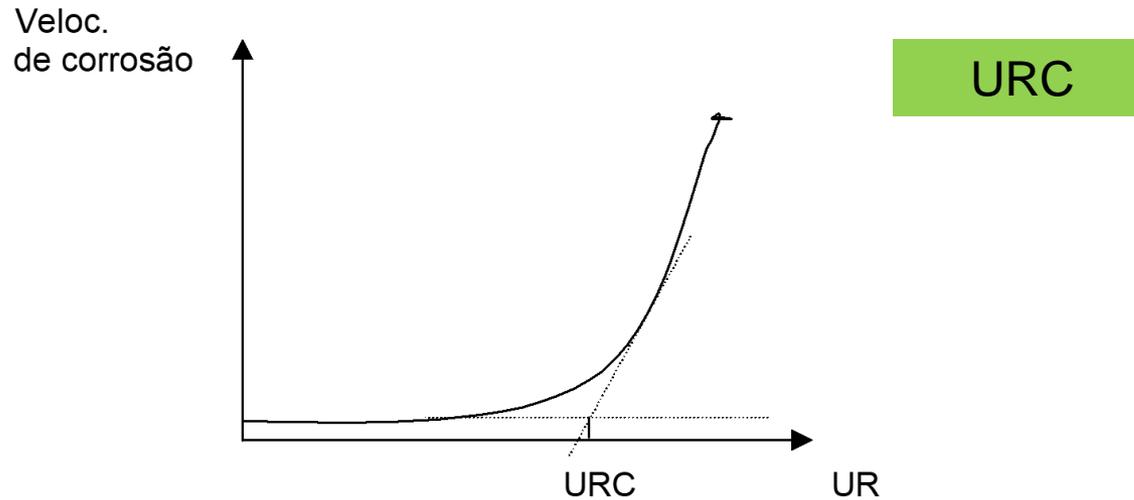


Fig. 1 – Umidade relativa crítica para um metal exposto a uma atmosfera.

Condições da superfície	Quantidade de água (g/m²)
Umidade relativa crítica	0,01
100% de UR	1
Coberta de orvalho	10
Molhada pela chuva	100

Corrosão atmosférica

Mecanismos de corrosão atmosférica

Condições para ocorrência de corrosão atmosférica

Processo descontínuo

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

Onde

K = efeito acumulado de corrosão;

τ_n = tempo de umedecimento;

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

Corrosão atmosférica

Mecanismos de corrosão atmosférica

O efeito total da corrosão atmosférica é determinado

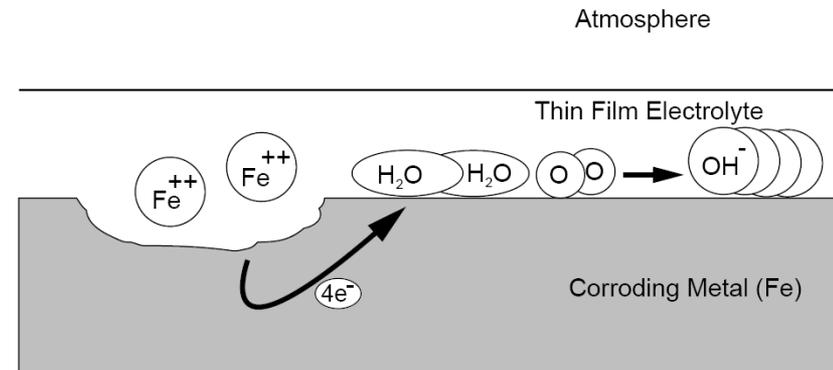
- pelo tempo total de umedecimento
- pela composição do eletrólito
- pela temperatura.

Tempo de umedecimento

$$\tau_{\text{Total}} = \tau_{\text{ads}} + \tau_{\text{fase}}$$

água adsorvida: $URC < UR < 100\%$

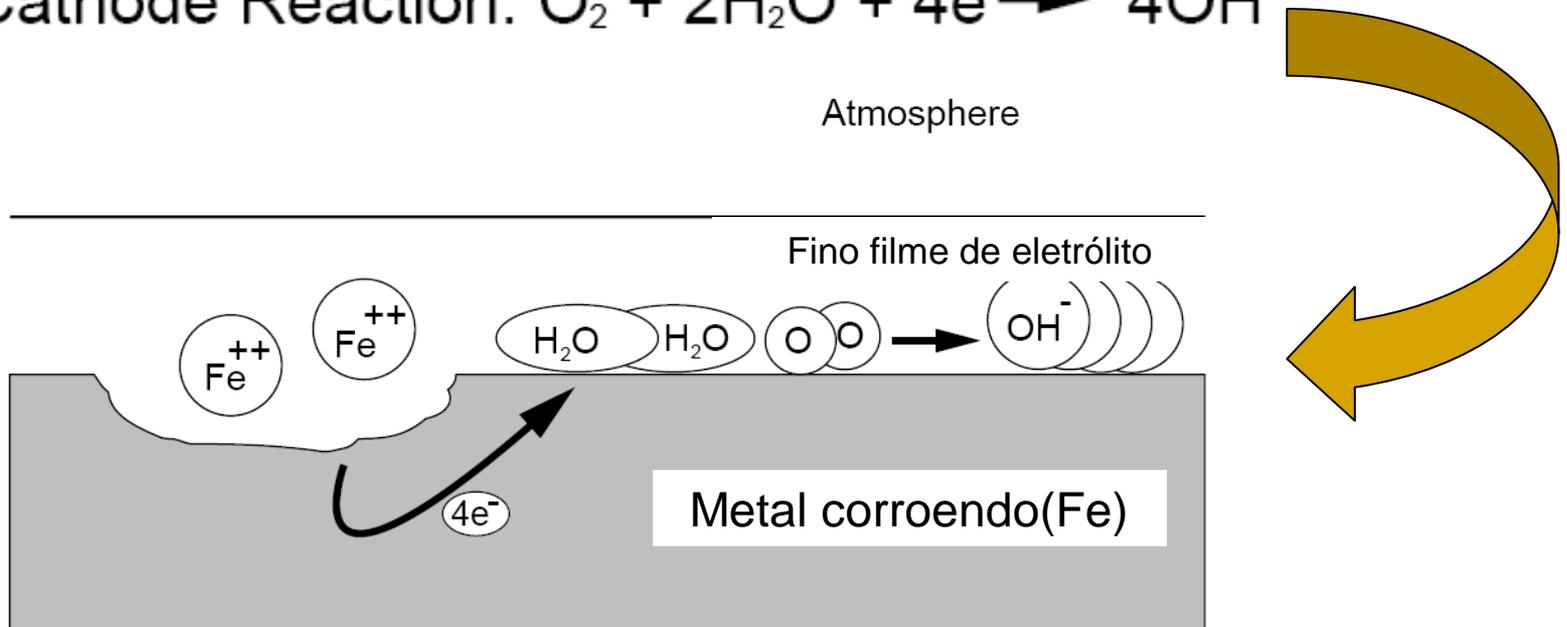
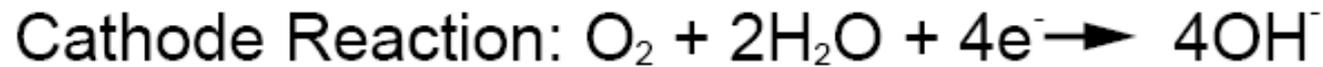
Água fase líquida: orvalho, chuva, neblina



Cuidado no momento de fazer embalagens – a umidade absoluta presente no ar no momento de embalar, poderá condensar quando a temperatura diminuir

Corrosão atmosférica

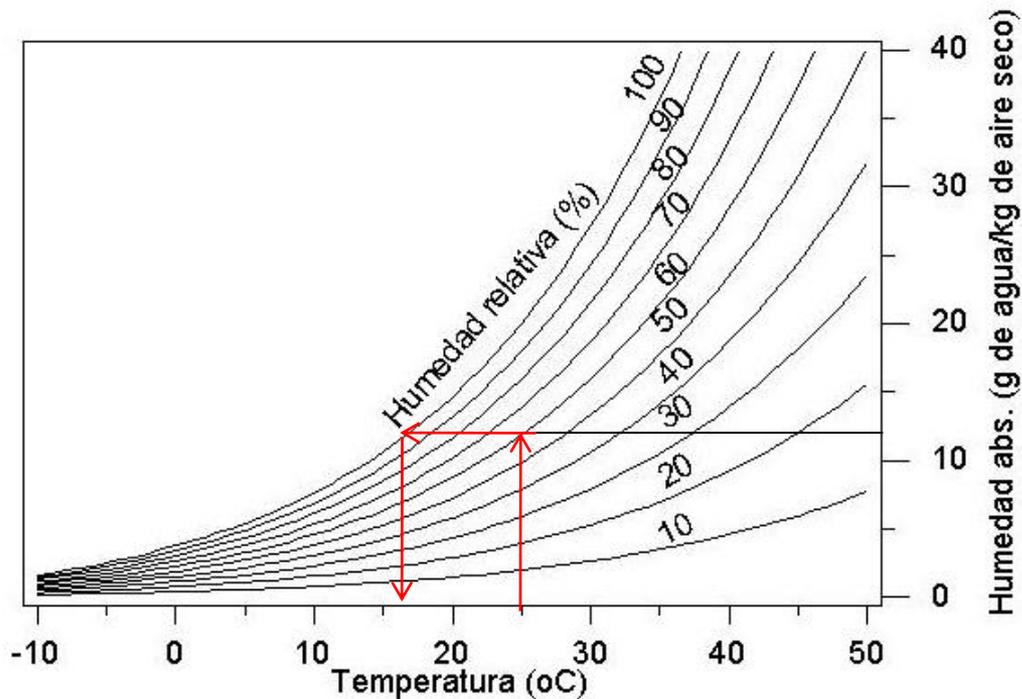
Mecanismo eletroquímico de corrosão atmosférica



Corrosão atmosférica

Carta psicrométrica – São Paulo - SP

Uma mudança de 25°C para 14°C na temperatura , provoca uma mudança de UR de 60% para 100% (condensação)

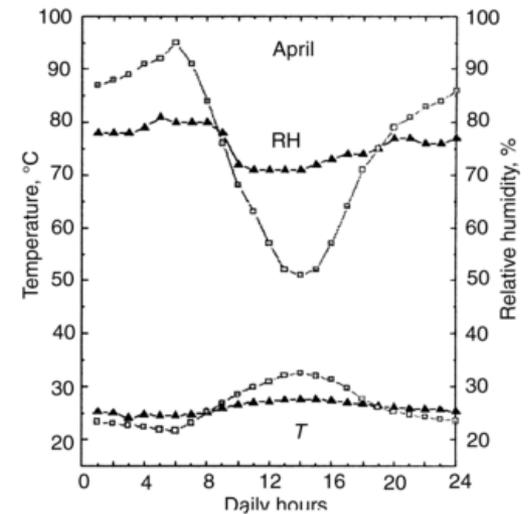
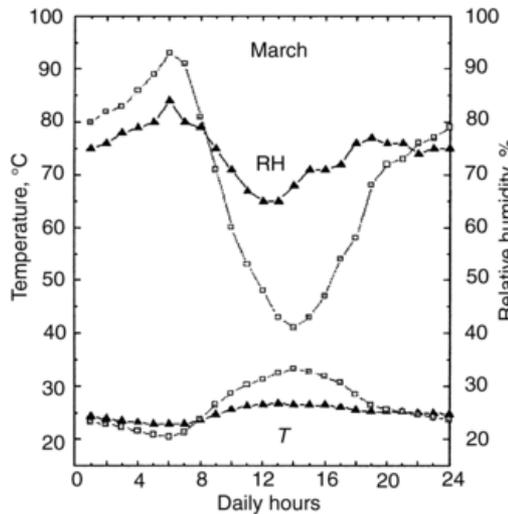
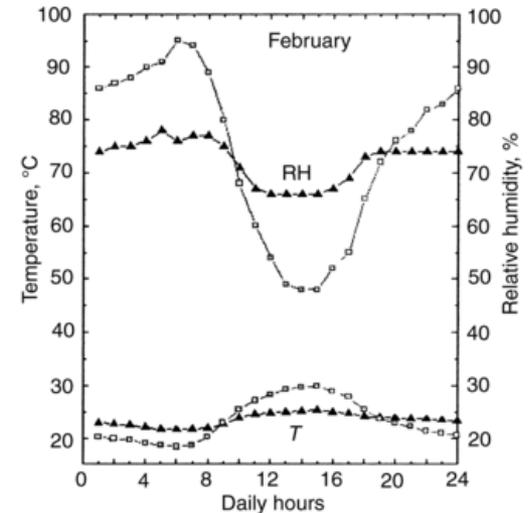
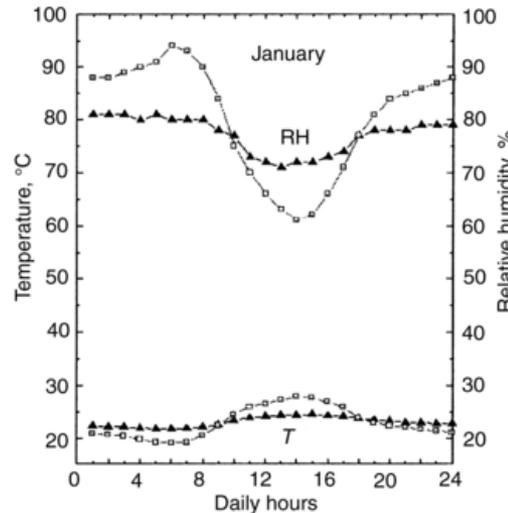


Corrosão atmosférica

Como varia a UR com a temperatura num clima tropical, em atmosfera marinha e rural do Golfo do México.

Quando a temperatura diminui, a %UR aumenta, podendo haver condensação.

Em climas tropicais, o nível de %UR é elevado durante boa parte do tempo (>60%)



—▲— Marine-coastal environment
—□— Rural-urban environment

Corrosão atmosférica

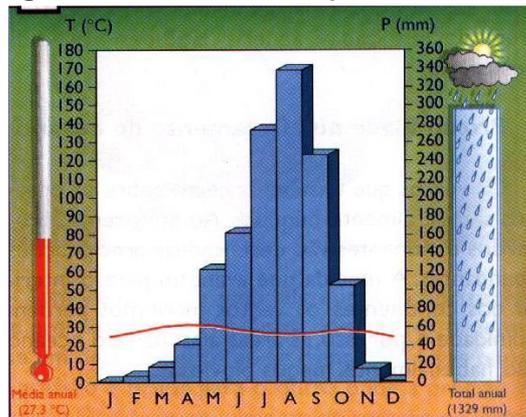
Mecanismos de corrosão atmosférica

Corrosividade das atmosferas

- poder ser **medida pelo tempo de umidecimento** (depende de UR e da temperatura) →
- teor de **contaminantes ou poluentes** presentes, ou seja, em parâmetros climatológicos e de poluição

Tempo em que temperatura > 0°C e UR > 80%

Climatograma de clima tropical úmido



Corrosão atmosférica

Mecanismos de corrosão atmosférica

Principais poluentes presentes nas atmosferas urbanas

Tabela 2 – Concentrações de alguns gases presentes em atmosferas urbanas (Graedel, 1987)

Poluente	Fórmula	Concentração (ppb)
Ozônio	O ₃	50-200
Peróxido de hidrogênio	H ₂ O ₂	10-30
Dióxido de nitrogênio	NO ₂	10-45
Ácido nítrico	HNO ₃	1-10
Ácido sulfídrico	H ₂ S	0,1-0,5
Dióxido de enxofre	SO ₂	5-24
Dióxido de carbono	CO ₂	3-6.105
Ácido fórmico	HCOOH	4-20
Ácido acético	CH ₃ COOH	0,2-1,0
Ácido clorídrico	HCl	0,5-2,0

Corrosão atmosférica

Principais constituintes e poluentes da atmosfera – sua origem

Oxigênio

O oxigênio está presente no ar em 21% em volume e é prontamente absorvido no filme de eletrólito aquoso, podendo-se considerar o filme de eletrólito saturado em oxigênio. O oxigênio sofrerá a reação de redução: $O_2 + 2 H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$, que **sustentará o processo eletroquímico de oxidação dos metais.**

SOx

Os óxidos de enxofre são a principal parte da poluição antropogênica causada pela combustão de combustíveis fósseis como petróleo e carvão, nas regiões industrializadas (que perfazem 5% da superfície do planeta). Na queima dos combustíveis fósseis é formado o SO_2 que é oxidado cataliticamente (por óxidos de metais e luz branca), sobre partículas úmidas ou gotículas de água, a ácido sulfúrico: $SO_2 + H_2O + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2SO_4$.

Corrosão atmosférica

Principais constituintes e poluentes da atmosfera – sua origem

Os principais processos de deposição de compostos de enxofre SO_x são:

Deposição seca - Adsorção do gás SO_2 na superfície dos metais
- Impacto de partículas (sulfatos)

Deposição úmida - A partir da fase gasosa e de aerossóis, por precipitação.

Tabela 3 – Classificação do tipo de atmosfera pela deposição de SO_2 (ISO 9223)

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

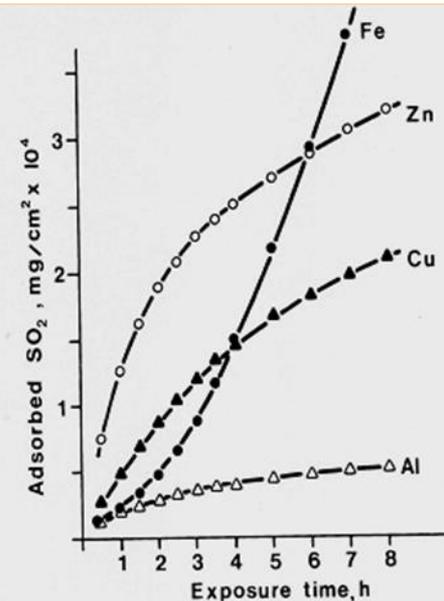


Fig. 2 – Velocidade de deposição de SO_2 sobre diferentes metais em atmosfera contendo 0,1ppm SO_2 e 90%UR. (Syderberger e Vannerberg, 1972)

Corrosão atmosférica

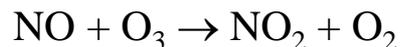
Principais constituintes e poluentes da atmosfera – sua origem

H₂S

Tem origem em processos de decomposição de material orgânico e processos de combustão. O teor de **H₂S** pode afetar significativamente o comportamento de **cobre**, principalmente em **contatos e dispositivos eletroeletrônicos**, pois se forma uma camada com propriedades dielétricas, afetando a confiabilidade dos equipamentos

NO_x

Esses gases se originam dos diferentes processos de combustão, principalmente de material de origem vegetal, das rodovias de tráfego intenso e também de descargas elétricas..



O NO₂ pode ser considerado o principal poluente contendo nitrogênio próximo às fontes poluidoras.

Corrosão atmosférica

Principais constituintes e poluentes da atmosfera – sua origem

Os cloretos

São depositados principalmente em atmosferas marinhas como gotas ou cristais formados pela evaporação do “spray” ou névoa formados na arrebatção das ondas do mar ou pela ação dos ventos sobre as águas do mar e que são carregados pelo vento. Outra fonte de cloreto é a queima de carvão rico em cloretos (0,09% - 0,15%) e, neste caso, a emissão é na forma de HCl gasoso.

CO₂

O dióxido de carbono ocorre na atmosfera na concentração de 0,03% a 0,05% em volume, variando com a estação do ano e a hora do dia. No equilíbrio, corresponde à concentração de 10^{-5} M no filme de água se o pH é 6 ou menor.

Temperatura

A temperatura mais elevada incentivar a cinética das reações envolvidas na corrosão, mas, se for muito elevada, secará mais rapidamente a superfície dos metais. Se for muito baixa, abaixo de 0°C, a água se tornará sólida e a UR será baixa, diminuindo a agressividade da atmosfera.

Corrosão atmosférica

Corrosividade atmosférica - classificação

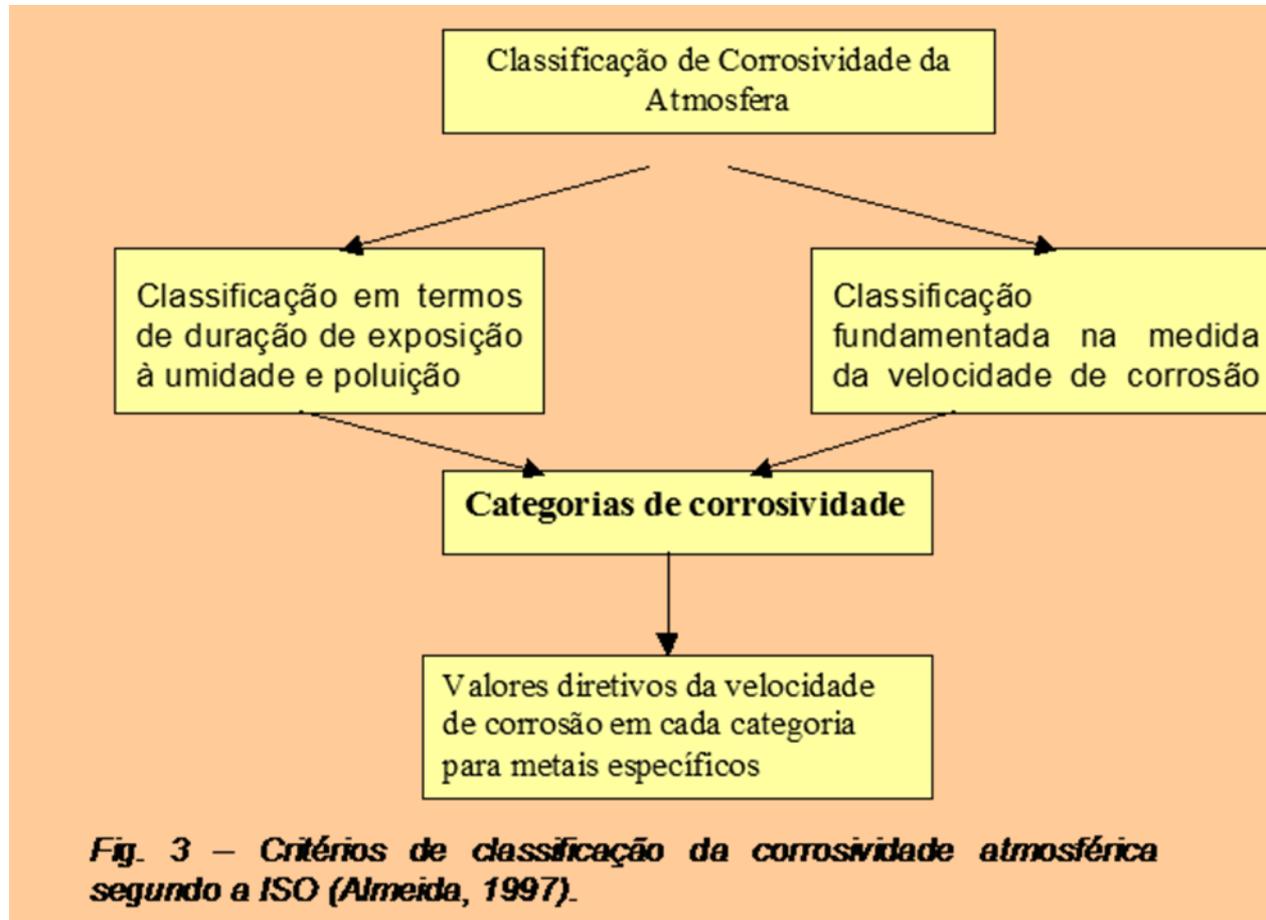


Fig. 3 – Critérios de classificação da corrosividade atmosférica segundo a ISO (Almeida, 1997).

Corrosão atmosférica

Determinação da corrosividade de uma atmosfera pela exposição de corpos-de-prova padrão

Tabela 4 – Classificação ISO pelas taxas de corrosão após exposição de 1 ano (ISO 9223)

Categoria de corrosividade	TAXAS DE CORROSÃO DOS METAIS				
	UNIDADES	AÇO CARBONOSO	ZINCO	COBRE	ALUMÍNIO
C1	g/m ² .ano	<10	<0,7	<0,9	Desprezível
	µm/ano	<0,1	<0,1	<0,1	
C2	g/m ² .ano	10-200	0,7-5,0	0,9-5,0	<0,6
	µm/ano	1,3-25	0,1-0,7	0,1-0,6	
C3	g/m ² .ano	201-400	5,01-15	5,01-12	0,6-2
	µm/ano	25-50	0,7-2,1	0,6-1,3	
C4	g/m ² .ano	401-650	15,01-30	12,01-25	2,01-5
	µm/ano	50-80	2,1-4,2	1,3-2,8	
C5	g/m ² .ano	>650	>30	>25	>5
	µm/ano	>80	>4,2	>2,8	

C1 = muito baixa; C2 = baixa; C3 = média; C4 = severa; C5 = muito severa

Hoje há a CX – grau de agressividade acima do C5 – Cubatão é CX.

Corrosão atmosférica

Determinação da corrosividade pelos parâmetros climatológicos

Tabela 5 – Classificação ISO pelo tempo de umedecimento

CATEGORIA	DURAÇÃO DO UMEDECIMENTO		EXEMPLOS DE OCORRÊNCIA
	Horas/ano	% do tempo total	
T1	<10	<0,1	Ambientes interiores com climatização
T2	10-250	0,1-3	Ambientes interiores sem climatização
T3	251-2600	3,01-30	Atmosferas exteriores secas e frias
T4	2601-5200	30,01-60	Atmosfera exteriores de clima temperado
T5	>5200	>60	Ambiente externo de clima tropical

Corrosão atmosférica

Determinação da corrosividade pelos parâmetros de poluição

Tabela 6 – Classificação ISO pela velocidade de deposição de SO₂

CATEGORIA	VELOCIDADE DE DEPOSIÇÃO mg/m ² .dia	CONCENTRAÇÃO µg/m ³
P0	<10	<12
P1	10-35	12-40
P2	36-80	41-90
P3	>80	>90

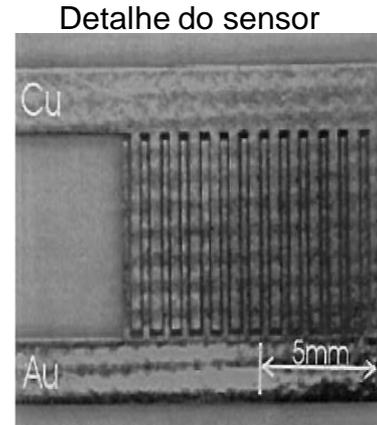
Tabela 7 – Classificação ISO pela velocidade de deposição de cloreto

CATEGORIA	VELOCIDADE DE DEPOSIÇÃO mg/m ² .dia
S0	<3
S1	3-60
S2	61-300
S3	>300

Corrosão atmosférica

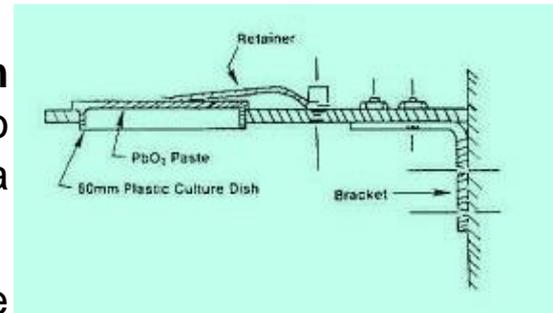
Determinação do tempo de umidecimento

- com base em medidas meteorológicas de temperatura e umidade relativa. Deve-se somar os períodos de tempo, em horas, em que a UR esteve acima de 80% e a temperatura acima de 0°C.
- por meio de dispositivos especiais que detectam a presença da película de umidade sobre a superfície do metal. Tal película serve como eletrólito para gerar uma diferença de potencial numa célula galvânica consistindo de 2 eletrodos finos (cobre e ouro, platina e prata, zinco e ouro, etc.)



Determinação da velocidade de deposição de SO₂

- por **amostragem contínua volumétrica do ar e passagem da amostra por um detector** que mede a concentração diretamente (absorção no infravermelho ou por cromatografia gasosa).
- **prato ou vela de sulfatação** que consiste numa camada de PbO₂ que reage com os compostos de enxofre da atmosfera e forma sulfato de chumbo. Depois de 30 dias de exposição, o prato é removido e analisado o teor de sulfato de chumbo. As normas ASTM G91, a ISO 9225 e a NBR 6921 estabelecem os parâmetros para condução do ensaio



Corrosão atmosférica

Determinação da velocidade de deposição de cloretos

Embora haja muitos métodos como o da vela úmida, do prato seco e outros, a ISO 9225 e a NBR 6211 recomendam e descrevem o método da vela úmida, pois os teores determinados pelo prato seco são inferiores àqueles determinados pela vela úmida. O método consiste na utilização de uma tira de gaze enrolada em volta de um tubo de vidro, com as extremidades da gaze imersas numa solução 20% de glicerina em água destilada.

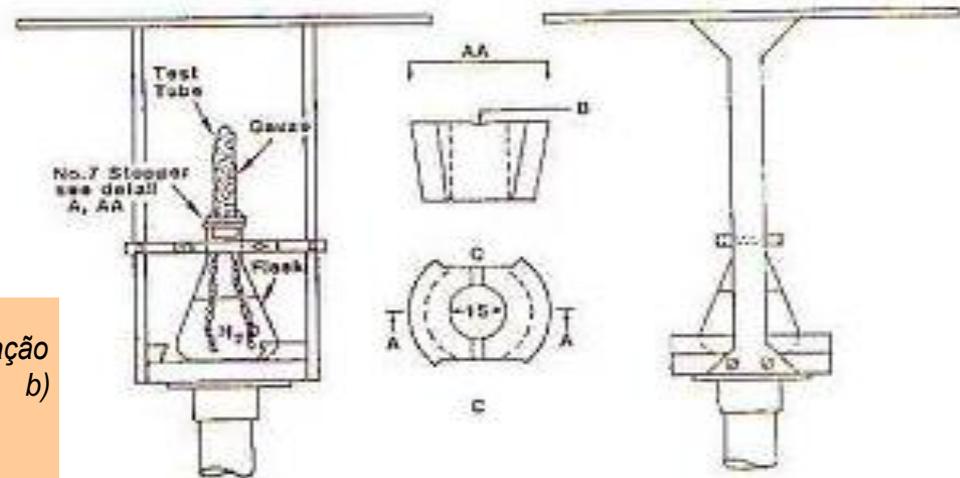


Fig. 4 – Esquema mostrando o arranjo utilizado na : a) determinação da deposição de SO_2 por prato de sulfatação (ASTM G91) e b) deposição de cloreto por vela úmida (ISO 9225)

Corrosão atmosférica - avaliação

Métodos de avaliação da velocidade de corrosão atmosférica.

Os métodos mais importantes e frequentes na avaliação da corrosão atmosférica são: gravimétricos, eletroquímicos e as técnicas de caracterização de superfícies e/ou produtos de corrosão.

Métodos gravimétricos

Esses métodos são descritos nas normas ISO 9226, NBR 6209 e NBR 6210 e ASTM G50 e consistem em se preparar corpos-de-prova por desengraxamento e decapagem, medindo as suas dimensões, pesando-os e expondo-os ao meio agressivo, sempre seguindo as recomendações de inclinação, direção, altura e fixação como recomendado nas normas. Depois de um certo tempo de exposição, estes são retirados, fotografados (NBR 6924) e limpos novamente para retirada dos produtos de corrosão, obtendo-se a perda de massa que permite calcular a velocidade de corrosão.

Corrosão atmosférica - avaliação



Estações de corrosão atmosférica

Painéis de teste de materiais



Painéis de teste de materiais

Corrosão atmosférica - avaliação

Profundidade de pites

- A caracterização dos pites, após a limpeza dos corpos-de-prova pode ser feita em termos de sua forma, dimensões e densidade por área
- A avaliação pode ser feita seguindo as indicações e cartas padrão da norma ASTM G46, e, por comparação, chegar à dimensão média dos pites na amostra.



Corrosão de fundo de pite em tubo de latão (70-30). Trincas transgranular

começando no pite

Métodos eletroquímicos – pouco usados

Células de lâminas finas de mesmo metal separadas por filmes isolantes, permitem fazer medidas de resistência à polarização e impedância eletroquímica (com 2 ou 3 eletrodos) e medidas de polarização (com 3 eletrodos idênticos)

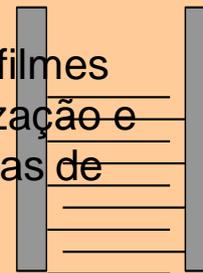


Fig. 6 – Célula multilaminar de circuito impresso com 2 eletrodos (Pacheco e Ferreira, 1994)

Corrosão atmosférica

Métodos de caracterização da superfície e/ou dos produtos de corrosão

- ✓ Metalografia ótica e microscopia eletrônica de varredura
- ✓ Energia dispersiva de raios-X (EDS)
- ✓ Espectroscopia por fotoelétrons de raios-X (XPS)
- ✓ Microscópio-Espectrômetro de Varredura Auger para obter os perfis de composição em profundidade.
- ✓ A difração de raios-X; espectroscopia de Mössbauer
- ✓ Espectrometria de absorção no infravermelho
- ✓ Espectroscopia Raman

Corrosão atmosférica – comportamento do cobre

Corrosão atmosférica do cobre

- O cobre é um metal usado e conhecido desde a pré-história, sendo também conhecidas, há muito tempo, suas ligas, particularmente o latão e o bronze.

O cobre
na História



Sirena de Copenhague



Buda de Nara

Corrosão atmosférica – comportamento do cobre

Corrosão atmosférica do cobre

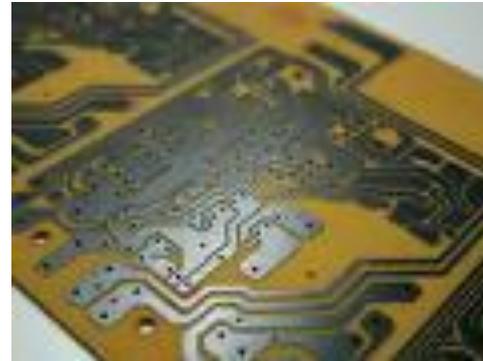
- O cobre, assim como suas ligas, (bronze, latão) são utilizados em arquitetura, estátuas, placas, esculturas, objetos de decoração, telhados de igrejas e de edifícios.



Corrosão atmosférica – comportamento do cobre

Corrosão atmosférica do cobre

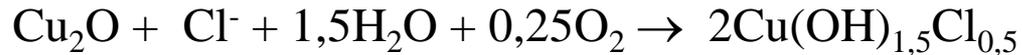
- A indústria eletro-eletrônica exige níveis de confiabilidade bem elevados, o que restringe a tolerância à corrosão. Assim, é preciso controlar a corrosão nos locais de armazenamento e funcionamento de equipamentos (atmosfera exteriores e interiores).



Corrosão atmosférica

Mecanismo de corrosão atmosférica de cobre

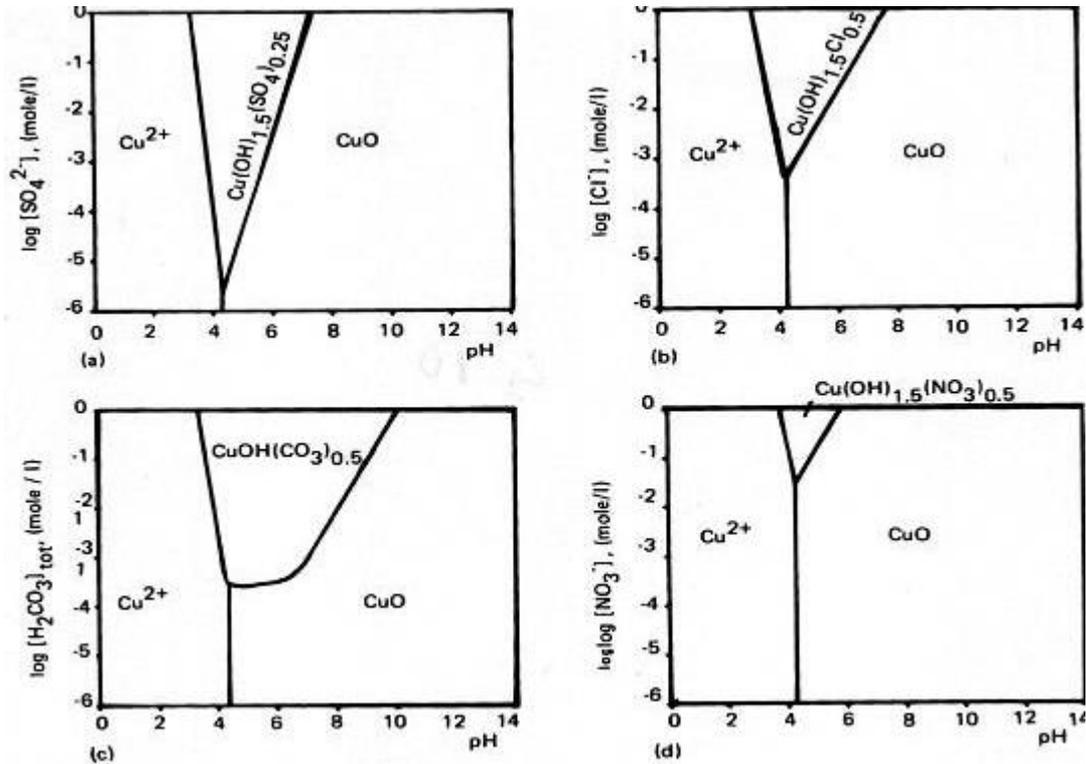
O primeiro produto a ser formado é o Cu_2O e em seguida o CuO . Os óxidos de cobre reagem lentamente com as espécies SO_x , Cl^- , CO_2 e NO_x levando à formação dos sais básicos, desde que o pH da superfície seja suficientemente elevado, segundo as reações:



Os produtos formados conferem proteção ao cobre, principalmente os sais básicos insolúveis: carbonatos, cloretos, sulfatos e nitratos. **É a chamada pátina do cobre.**

Corrosão atmosférica

Mecanismo de corrosão atmosférica de cobre



Domínios de estabilidade dos sais básicos de cobre em soluções aeradas variando a concentração do ânion e o pH. (a) sulfato; (b) cloreto; (c) carbonato e (d) nitrato (Mattsson, 1982)

Corrosão atmosférica

Mecanismo de corrosão atmosférica de cobre

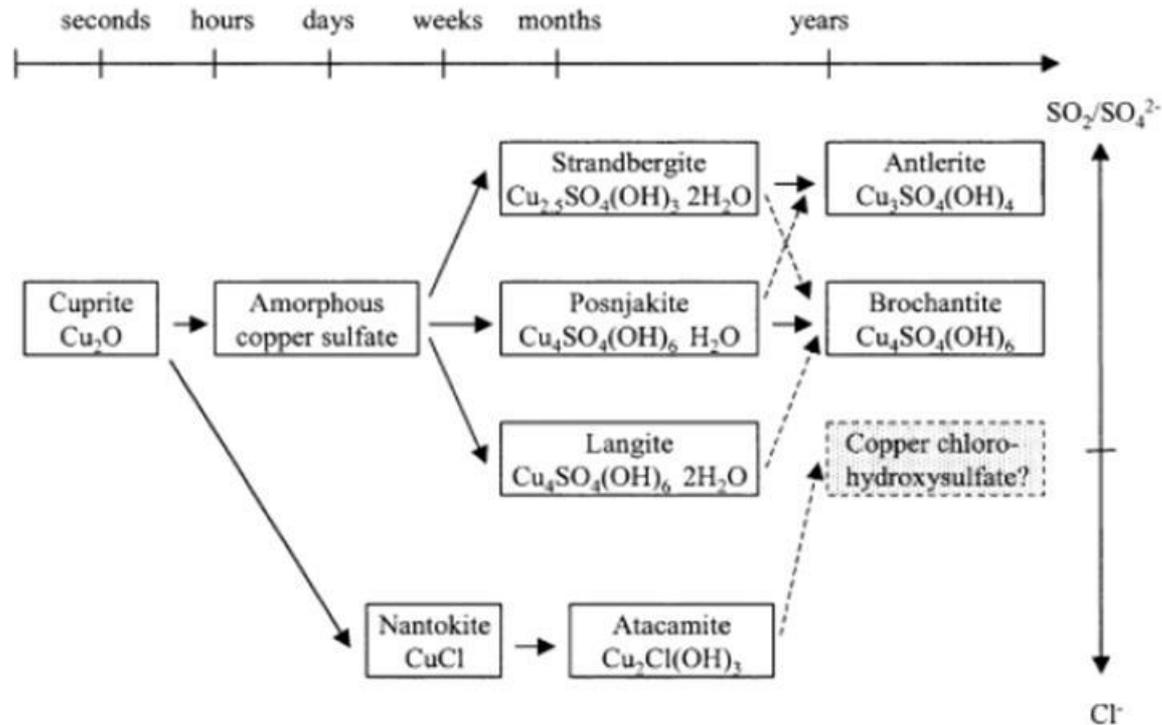
- As ligas de cobre apresentam resistência à corrosão semelhante à do cobre. Os latões de alto teor em zinco podem sofrer dezincificação, que é a dissolução seletiva do zinco da liga Cu-Zn. Os latões podem ainda apresentar corrosão sob tensão, levando ao seu trincamento em ambientes industriais ricos em SO₂ e amônia (NH₃).
- Em condições favoráveis, o cobre pode desenvolver uma pátina azul-esverdeada característica de atmosferas exteriores.

Tabela 9 – Velocidade de corrosão do cobre em diferentes atmosferas

Atmosfera	Velocidade de corrosão ($\mu\text{m}/\text{ano}$)
Rural	<1
Urbana e industrial	1-3
Marinha	1-2

Corrosão atmosférica

Mecanismo de corrosão atmosférica de cobre



Fluxograma das possíveis composições das patinas em função das concentração de íons cloreto e composto de enxofre e do tempo de exposição

Corrosão atmosférica

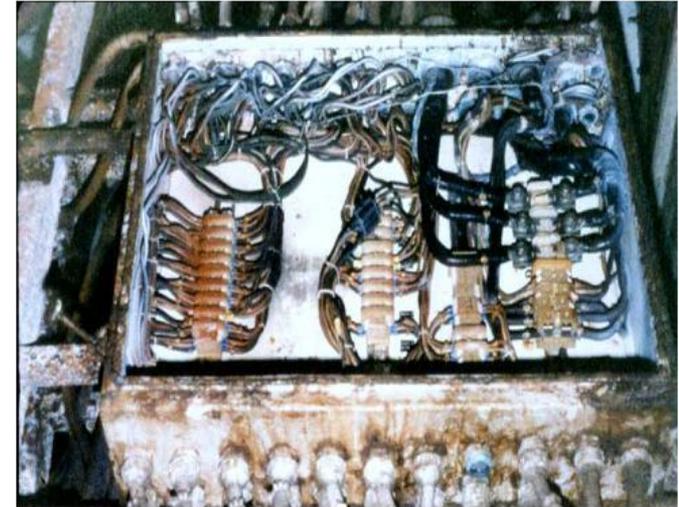
Casos de corrosão atmosférica de cobre



Estátua de cobre , no
Canadá



Corrosão atmosférica em
válvula de gaveta – liga de
cobre (Gutemberg Pimenta-
Cenpes)



Caixa de passagem de cabos –refinaria de
petróleo.

Corrosão atmosférica

Corrosão atmosférica do zinco

O zinco apresenta uma melhor resistência à corrosão atmosférica que o aço carbono e é extensivamente utilizado como revestimento de ferro e aço.

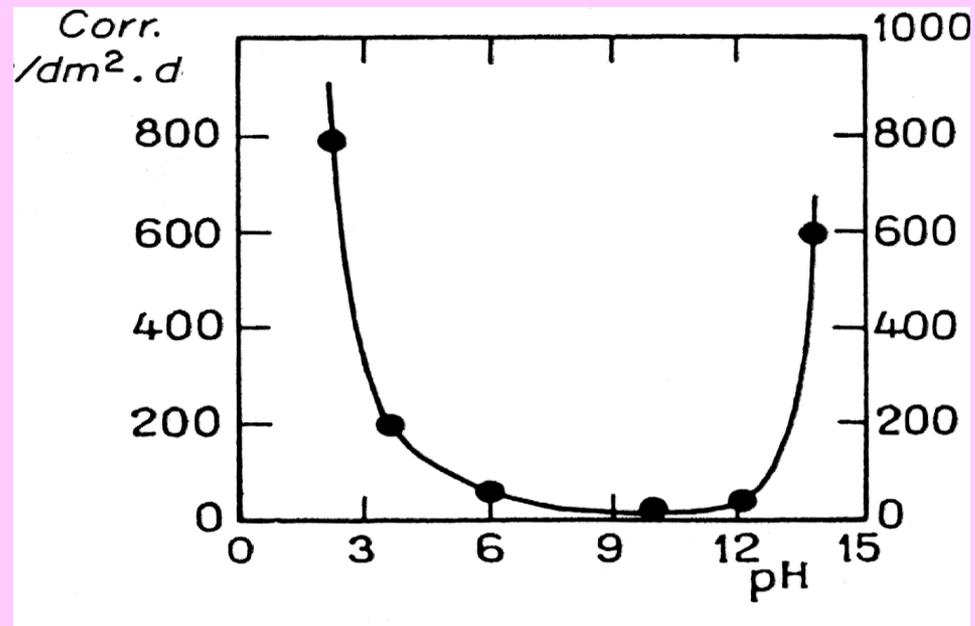


Fig. 7 – Influência do pH na corrosão do zinco. (Pourbaix, 1974)

Corrosão atmosférica

Casos de corrosão atmosférica de zinco

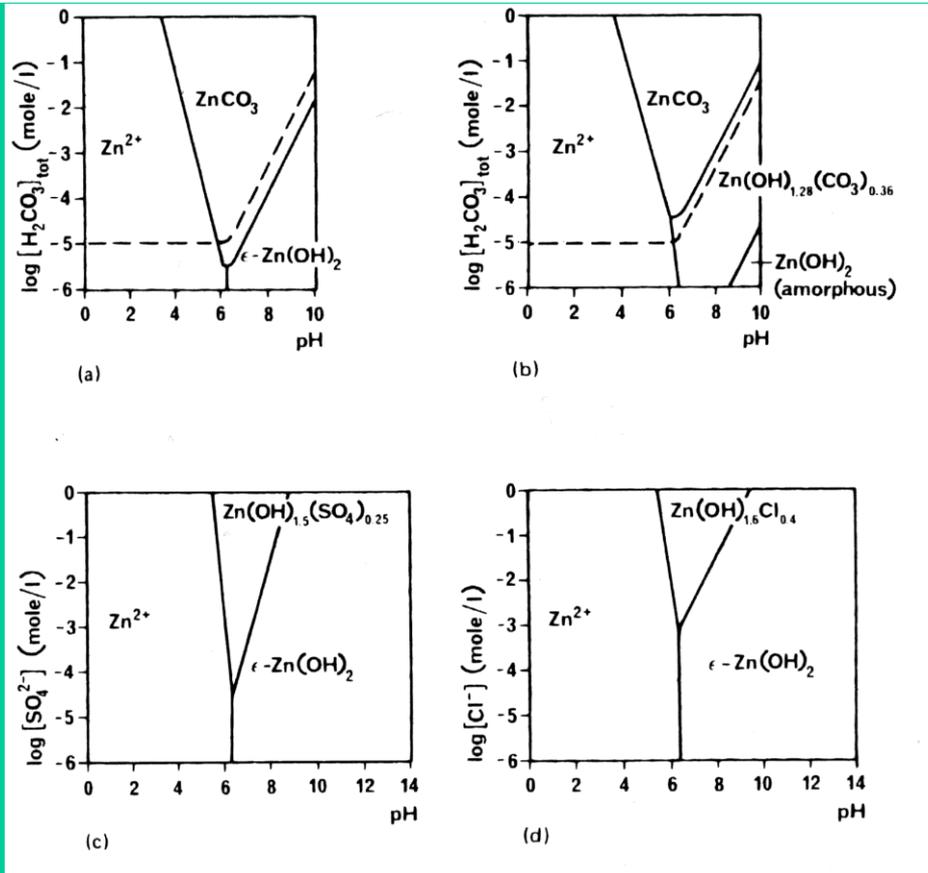


Fig. 9 – Domínios de estabilidade dos sais básicos de zinco em soluções aeradas variando a concentração do ânion e o pH. (a) carbonato em presença de pouco H_2CO_3 ; (b) carbonato em presença de mais H_2CO_3 ; (c) sulfato e (d) cloreto. (Mattsson, 1982).

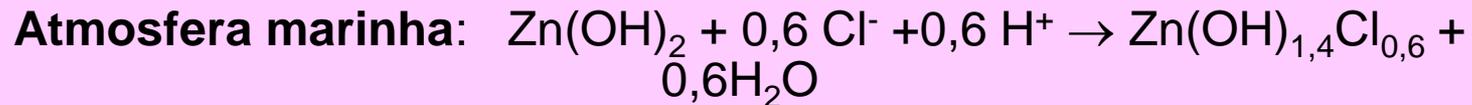
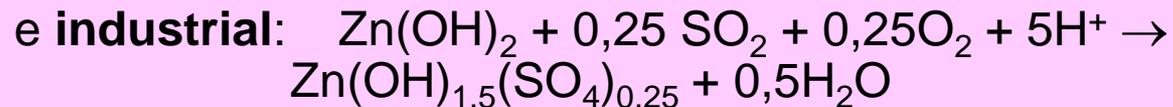
Corrosão atmosférica

Mecanismo presente na corrosão atmosférica do zinco

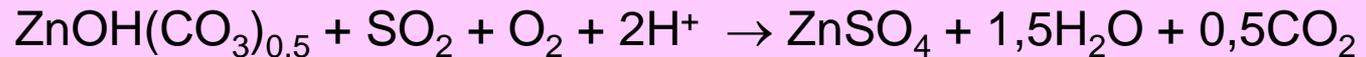
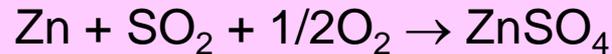
Os sais formados nas diferentes atmosferas são:



Atmosfera urbana



Se o ambiente for muito poluído



O ZnSO_4 é solúvel em água, podendo ser lavado pela chuva, não conferindo proteção. Em consequência, nesses ambientes poluídos por SO_x , a **velocidade de corrosão do zinco será muito maior.**

Corrosão atmosférica

Corrosão atmosférica de zinco

Tabela 8 – Velocidade de corrosão do zinco para diferentes atmosferas

Atmosfera	Velocidade de corrosão ($\mu\text{m}/\text{ano}$)
Rural	0,2-2
Urbana e industrial	2-16 ←
Marinha	0,5-8



Corrosão de aço zincado-
produtos de corrosão branca



Corrosão de aço zincado
sujeito a frestas

Corrosão atmosférica

Corrosão atmosférica do alumínio

O alumínio, apesar de ser um metal ativo, **apresenta boa resistência à corrosão**, sendo útil para várias estruturas expostas a atmosferas exteriores ou interiores, sendo largamente utilizado em edifícios (esquadrias), condutores de energia elétrica e veículos de transporte.

Esse comportamento se baseia na formação natural de uma camada fina (100-200Å) de óxido de alumínio ou alumina, Al_2O_3 , muito protetora, provendo a **passivação ao alumínio**. Em atmosferas úmidas, a camada de óxido é mais espessa. Essa camada, na verdade, é dupla, consistindo numa mais interna e fina, rente ao metal, que tem o papel de barreira e outra, mais externa, que é permeável. (Kucera e Mattson, 1997).

Na exposição em atmosferas exteriores, o alumínio apresenta os seguintes produtos de corrosão: $\text{Al}(\text{OH})_3$ amorfo, α - $\text{Al}(\text{OH})_3$ (baierita) e γ - Al_2O_3 (com diferentes teores de água).

Corrosão atmosférica

Corrosão atmosférica do alumínio

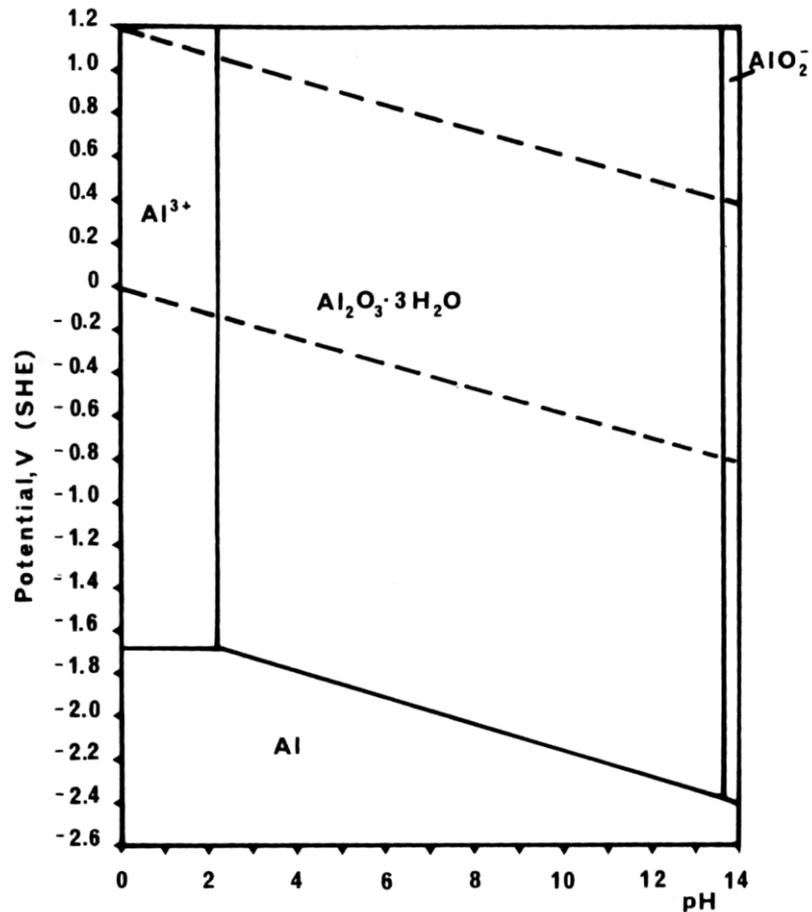


Diagrama potencial-pH para Al-H₂O; a 25°C,
(Mattsson, 1982)

Corrosão atmosférica

Corrosão atmosférica do alumínio

Se o alumínio é exposto em ambiente poluído e abrigado de chuvas, a corrosão pode ser muito intensa como mostrado na *Fig.16*, devido à retenção de alta acidez provocada pela adsorção de SO_2 sobre o óxido da superfície.

A anodização do alumínio, que é o processo de fazer crescer eletroliticamente o óxido ($20\mu\text{m}$) sobre o alumínio, é empregada para conferir maior resistência ao Al exposto em atmosfera marinha.

Quando exposto em atmosferas poluídas por Cl^- e SO_2 , o Al adquire uma pátina cinza que pode ficar escura.

Tabela 10 – Velocidade de corrosão para o alumínio em diferentes

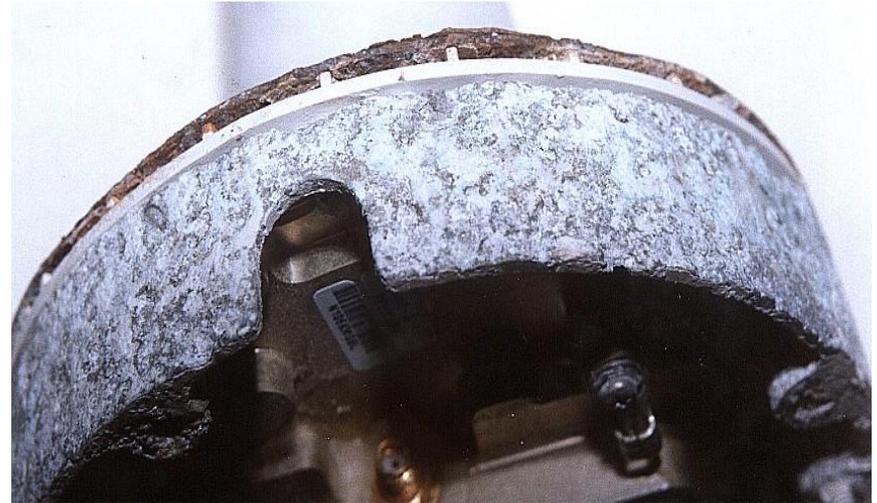
Atmosfera	Velocidade média de corrosão (perda de massa) ($\mu\text{m}/\text{ano}$)	Profundidade máxima dos pites após 20 anos de exposição (μm)
Rural	< 0,1	10 - 55
Urbana	1	100 - 190
Marinha	0,4 – 0,6	85 - 260

Corrosão atmosférica

Corrosão atmosférica do alumínio



Corpos de prova de Al expostos em estação de corrosão atmosférica marinha



Base de antena de telefonia em Al que sofreu ataque por respingos de água do

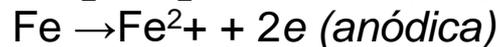
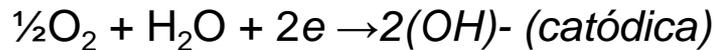
Corrosão atmosférica

Corrosão atmosférica de ferro e ligas (aços)

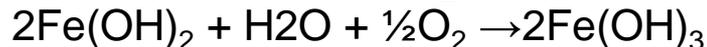
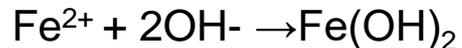
O ferro e o aço ao carbono não são metais resistentes à corrosão atmosférica e devem sempre ser protegido por revestimentos protetores metálicos ou orgânicos (tintas) quando expostos à ação climática.



A corrosão do ferro ocorre iniciando pela formação de óxidos hidratados. As reações anódicas e catódicas são expressas por:



Posteriormente outras reações podem ocorrer tais como:



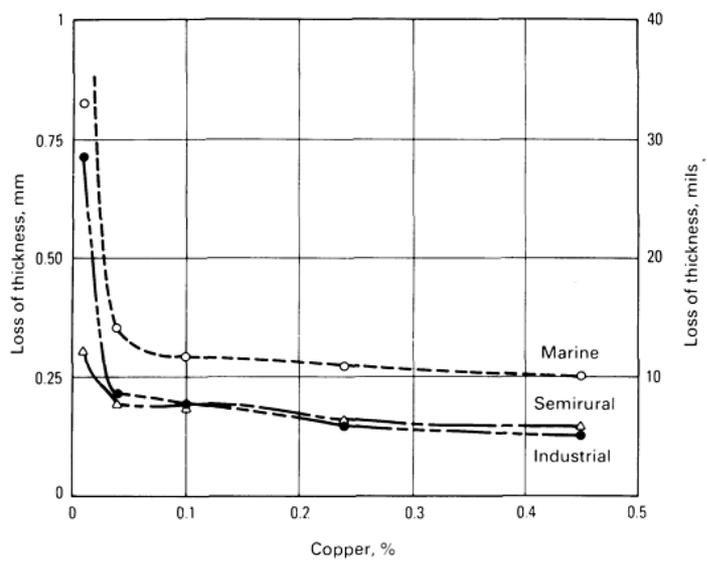
Os óxidos hidratados podem perder água durante os períodos de secagem da superfície e reverter para os óxidos anidros ferroso e férrico. Além disso, é possível haver a formação de camada de magnetita, Fe_3O_4 , (uma mistura de óxido ferroso, FeO e o férrico (Fe_2O_3)). Na realidade é possível que óxidos de estequiometria bem mais complexa possam ser formados. Por isso se representam os oxi-hidróxidos possíveis pela fórmula FeOOH . Há 3 tipos cristalinos desses compostos e um amorfo.



Corrosão atmosférica

Corrosão atmosférica de ferro e ligas (aços)

A ocorrência de vários tipos de óxidos depende da disponibilidade de oxigênio, do pH, tipo de poluentes presentes e da composição do aço. Os **aços acimáveis** contêm entre 0,1-0,5% de cobre, cromo e um pouco de fósforo (0,1%). Estes formam pátinas bastante estáveis, não necessitando serem pintados. São muito usados em estruturas metálicas como pontes, edifícios e outras.



Vcorr de aços
baixa liga
contendo
cobre



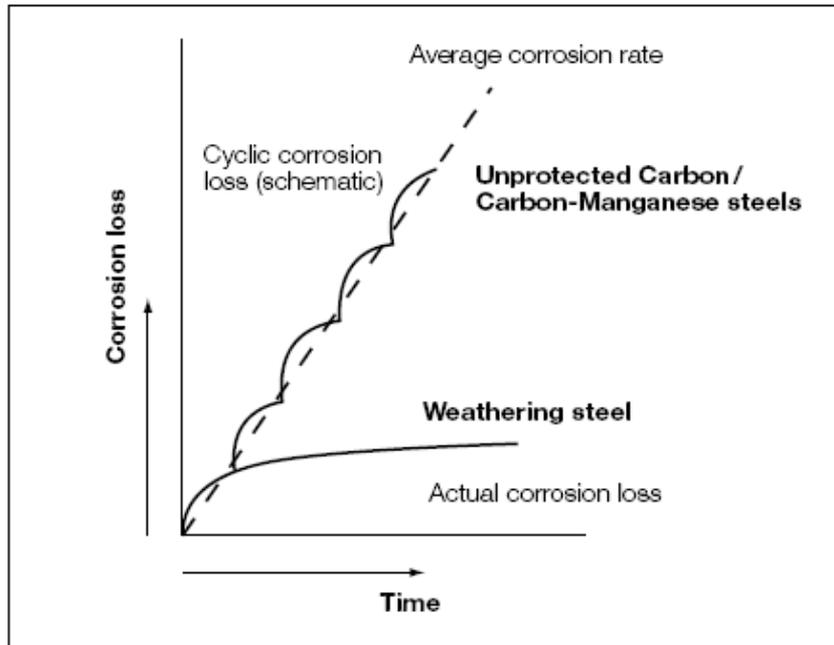
Chaminé em aço patinável



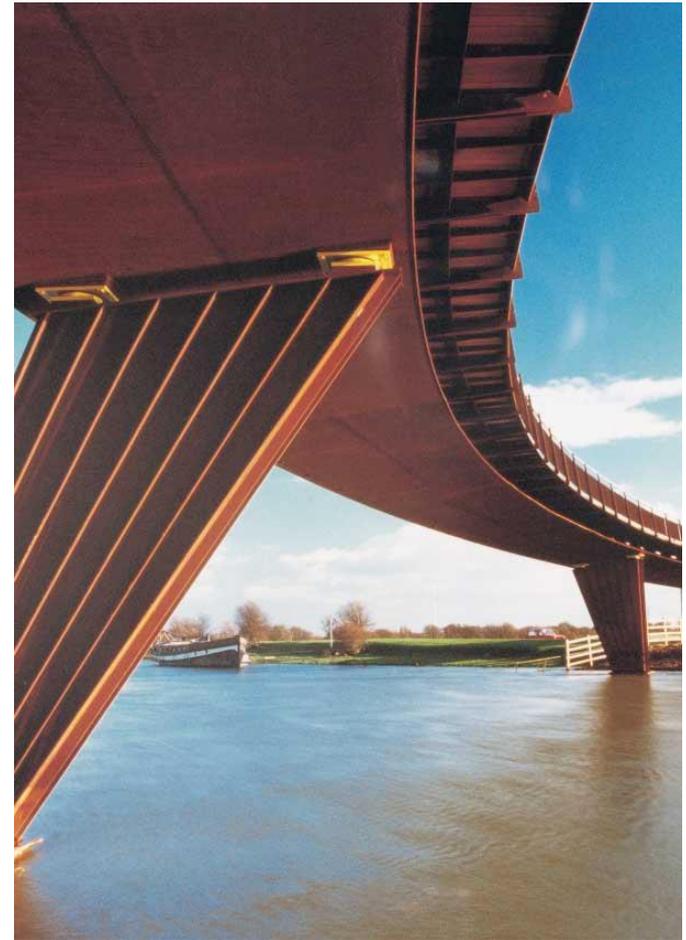
Ponte em aço patinável

Corrosão atmosférica

Corrosão atmosférica de ferro e ligas (aços)



Comparação entre a velocidade de corrosão de um aço carbono normal e um aço patinável ou acimável



Shanks Millennium Bridge
Peterborough, England.

Corrosão atmosférica

Corrosão atmosférica de ferro e ligas (aços)



Right: Obridge Viaduct
Somerset, England



O aço acimável só não tem bom desempenho em atmosfera marinha ou sob condições de molhamento permanente

CEPEMA – Cubatão - SP



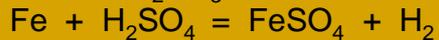
Corrosão atmosférica

Corrosão atmosférica do ferro e aço

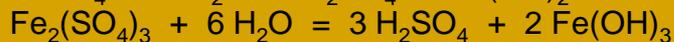
A natureza real do filme de ferrugem é importante, porque os óxidos FeO e FeOOH são mais aderentes que Fe₃O₄ e Fe₂O₃ e quando presentes diminuem a velocidade do ataque corrosivo, enquanto os óxidos de mais alto estado de oxidação são mais susceptíveis ao destacamento.

Na presença de particulados contaminados com SO₂, que se depositam sobre a superfície do aço, haverá a formação de FeSO₄ num processo de regeneração ácida que manterá **elevados níveis de ataque ao aço exposto numa atmosfera industrial ou rica em SO₂.**

•Ferro:
(etapa I)



O sulfato ferroso, FeSO₄, e o sulfato férrico, Fe₂(SO₄)₃ podem sofrer hidrólise:
(etapa II)



O ácido sulfúrico volta a atacar o ferro (Etapa I) tornando a corrosão cíclica.

Para combater a corrosão o íon sulfato, SO₄²⁻ deve ser removido do processo.



Guarda corpo do mirante do Cristo Redentor,RJ, Abraco

Corrosão atmosférica

Corrosão atmosférica – principais produtos de corrosão para Fe, Al, Cu e Zn

	<u>Common Species</u>	<u>Rarer Species</u>
Al	Al(OH)_3 Al_2O_3 , $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	AlOOH , $\text{Al}_x(\text{OH})_y(\text{SO}_4)_z$, $\text{AlCl(OH)}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Fe	Fe_2O_3 , FeOOH , $\text{FeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	$\text{Fe}_x(\text{OH})_y\text{Cl}_z$, FeCO_3
Cu	Cu_2O , $\text{Cu}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6$, $\text{Cu}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{Cu}_3\text{SO}_4(\text{OH})_4$	$\text{Cu}_2\text{Cl(OH)}_3$, $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$, $\text{Cu}_2\text{NO}_3(\text{OH})_3$
Zn	ZnO , $\text{Zn}_5(\text{OH})_6(\text{CO}_3)_2$, ZnCO_3	Zn(OH)_2 , ZnSO_4 , $\text{Zn}_5\text{Cl}_2(\text{OH})_8 \cdot \text{H}_2\text{O}$