

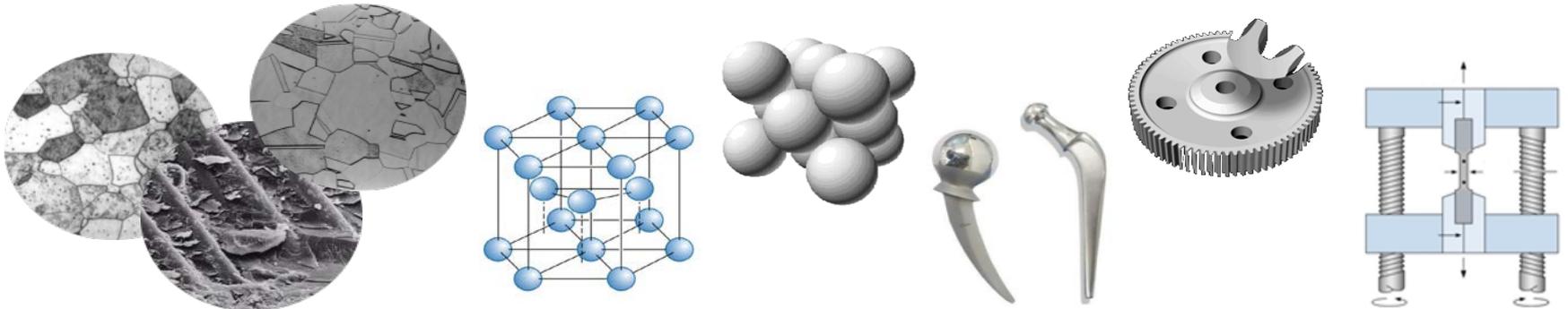
---

# Materiais para a Indústria Química

## *Corrosão*

Prof. Dr. Cassius Olivio Figueiredo Terra Ruchert, Associado

---



---

# Sumário da Aula

- Introdução
- Formas de Corrosão
- Formas de Proteção
- Desgaste

# CORROSÃO

## DEFINIÇÕES

- **Federação Européia de Corrosão**

“Interação físico-química entre um METAL e o meio envolvente, da qual resultam mudanças nas propriedades do METAL, levando freqüentemente à sua inutilização ou do sistema técnico do qual faz parte ou ainda à alteração do meio”.

- **NACE – National Association of Corrosion Engineers**

“Deterioração de um material ou das suas propriedades devido à reação com o meio envolvente”.

- **Conceito mais abrangente**

**Corrosão** ⇨ deterioração de um material por ação química ou eletroquímica do meio ambiente aliada ou não a esforços mecânicos, tornando-o impróprio para o uso.

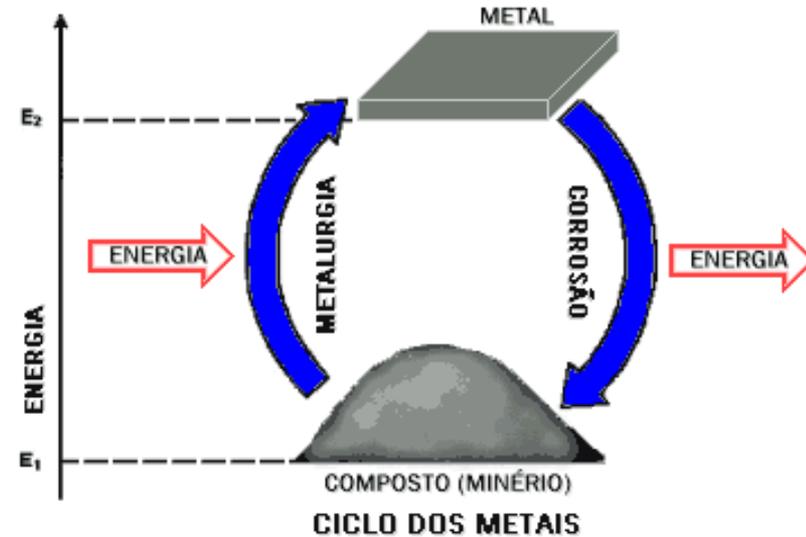
---

# Corrosão Metálica

- É a deterioração e a perda de material devido a ação química ou eletroquímica do meio ambiente, aliado ou não a esforços mecânicos.
- A deterioração leva:
  - ✓ Ao desgaste
  - ✓ À variações químicas na composição
  - ✓ À modificação estruturais
- Em geral a corrosão é um processo espontâneo

# Corrosão Metálica

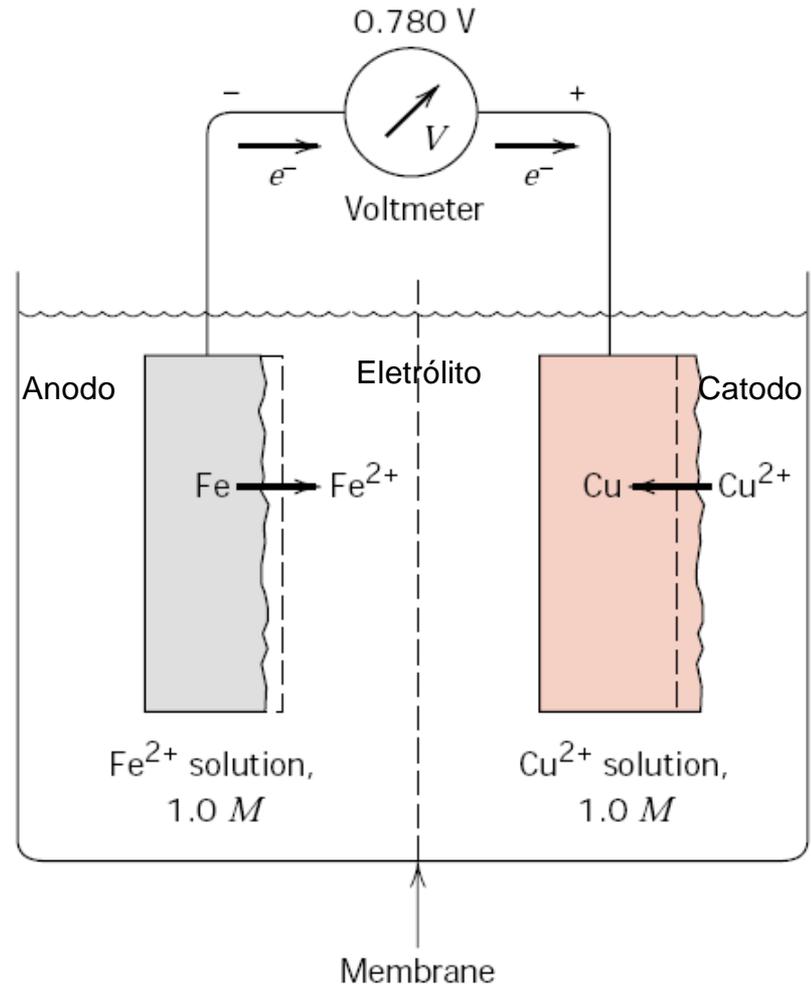
- Nos processos de corrosão, os metais reagem com o meio produzindo compostos semelhantes aos encontrados na natureza. Neste caso a corrosão funciona como o inverso dos processos metalúrgicos

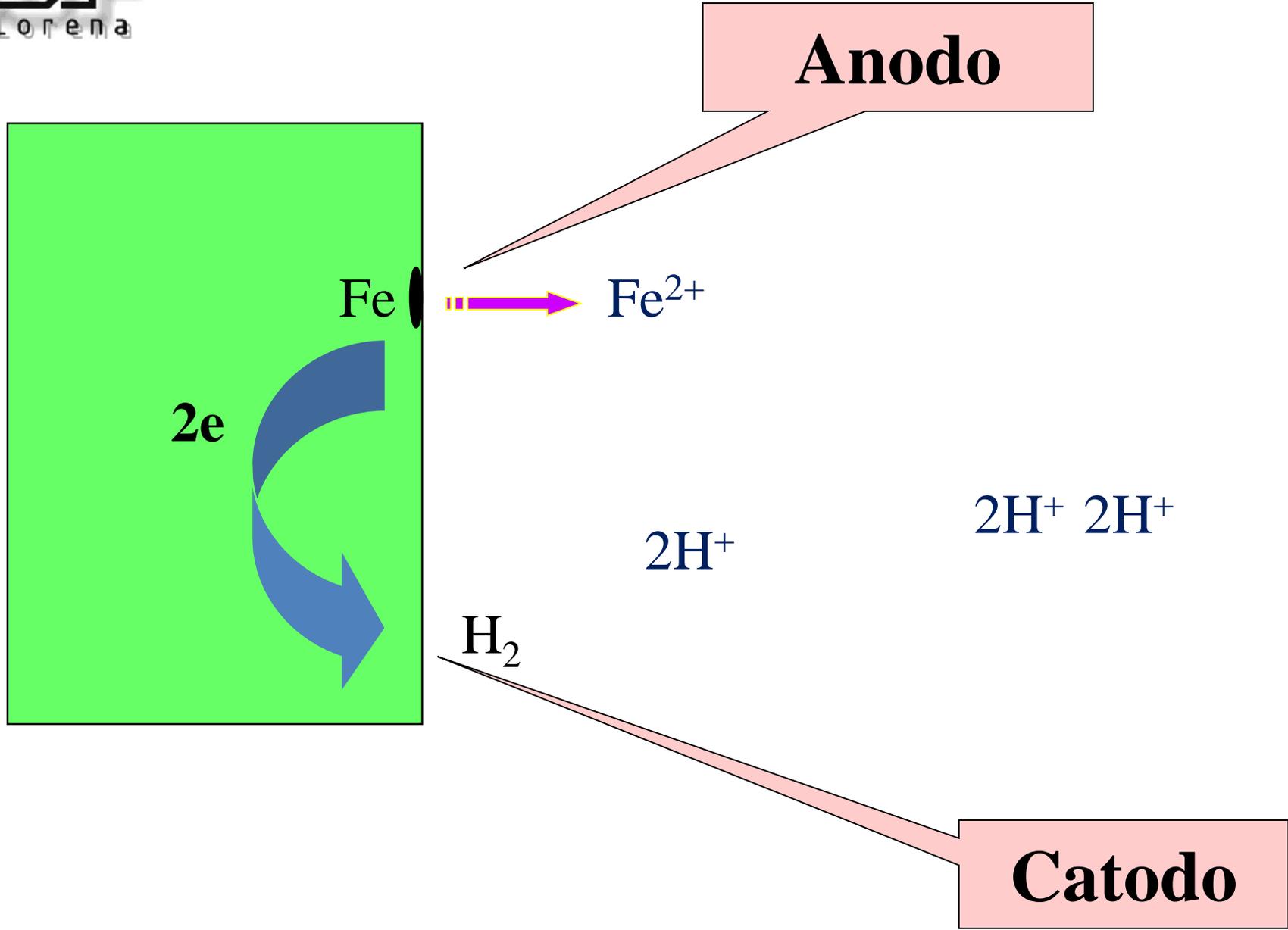


- O Engenheiro deve:
  - ✓ Saber como evitar condições de corrosão severa
  - ✓ Proteger adequadamente os materiais contra a corrosão

# Corrosão Eletroquímica

- Se caracteriza basicamente por:
  - Presença de água no estado líquido (corrosão no meio aquoso)
  - Formação de uma pilha ou célula de corrosão, com a circulação de elétrons na superfície metálica.





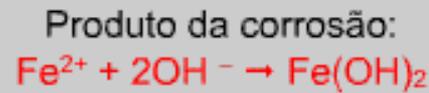
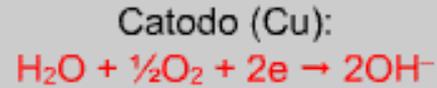
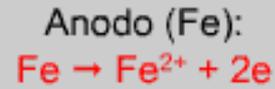
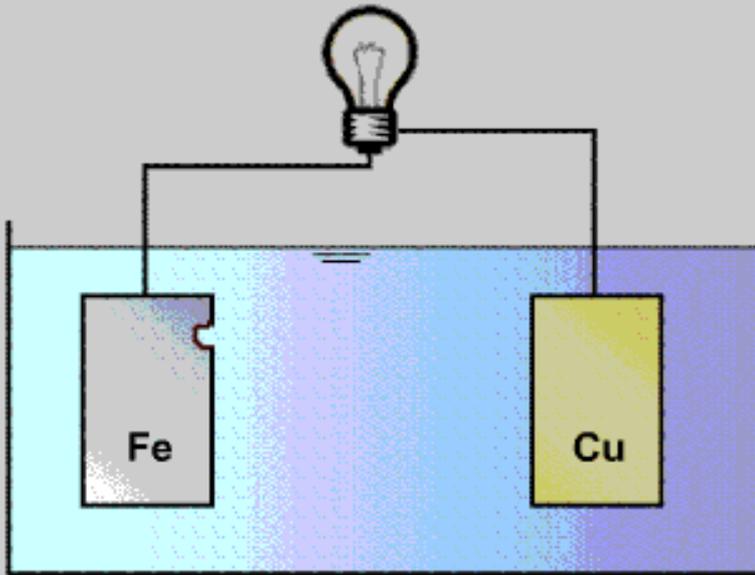
# Pilhas Eletroquímicas

- Basicamente uma pilha eletroquímica apresenta os seguintes componentes:

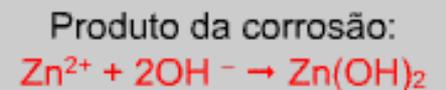
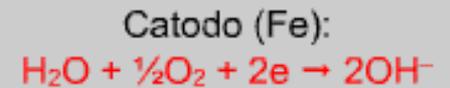
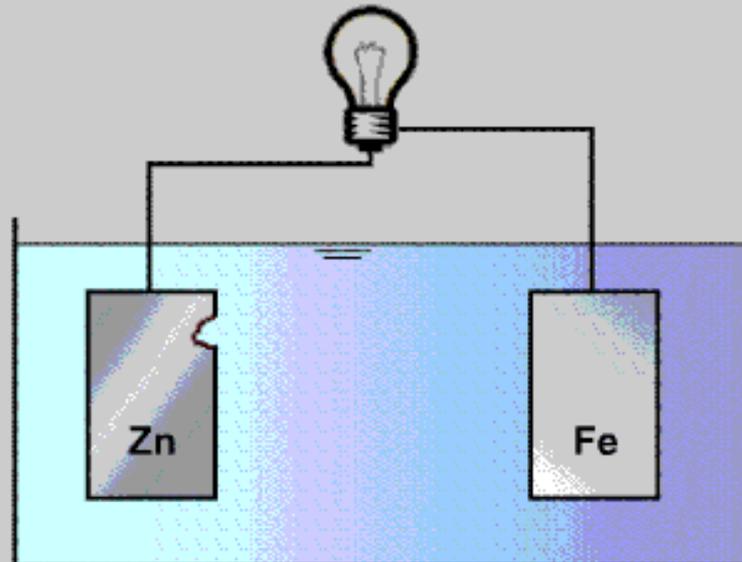
Caso Retire um destes componentes elimina-se a pilha

- Anodo:** Eletrodo em que há oxidação (corrosão/redução) e onde a corrente elétrica, na forma de íons metálicos positivos, entra no eletrólito;
- Eletrólito:** Condutor (usualmente um líquido) contendo íons que transportam a corrente elétrica do anodo para o catodo;
- Catodo:** Eletrodo onde a corrente elétrica sai do eletrólito (ou eletrodo) no qual as cargas negativas (elétrons) provocam reações de redução (oxidação);
- Circuito metálico:** Ligação metálica entre o anodo e o catodo por onde escoam os elétrons, no sentido anodo-catodo.

### Pilha Galvânica Fe x Cu



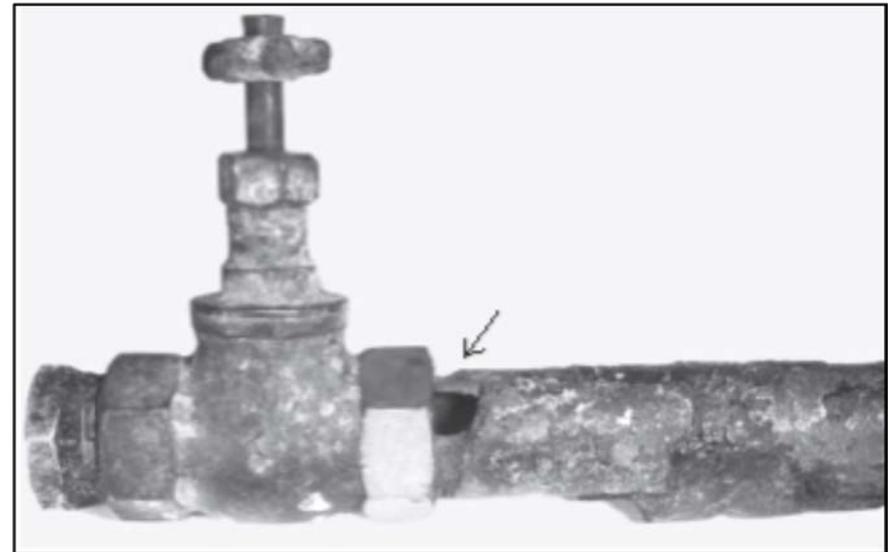
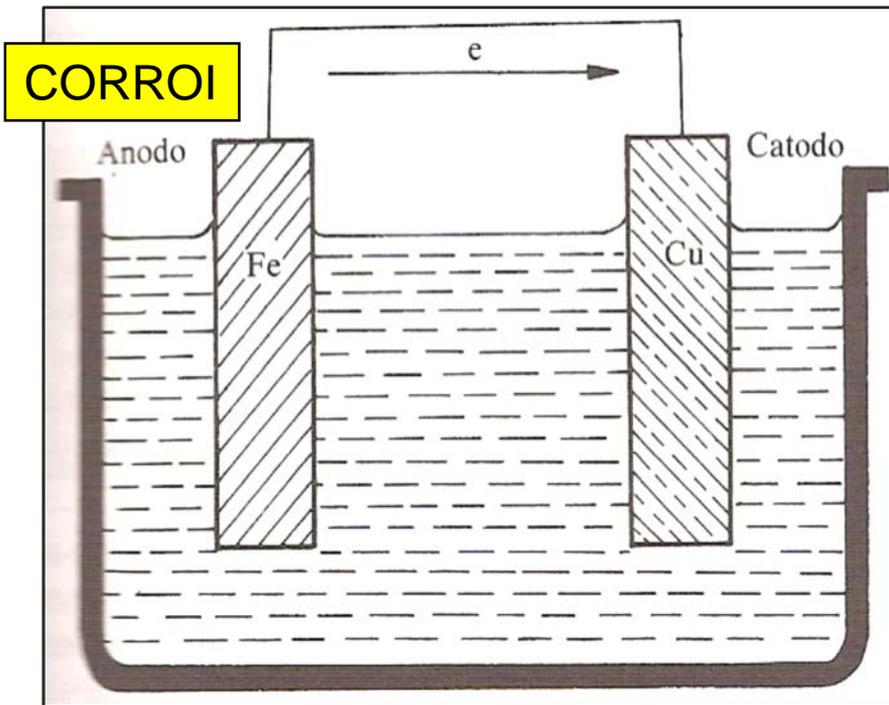
### Pilha Galvânica Zn x Fe



# Pilhas de Eletrodos Metálicos Diferentes

## CORROSÃO GALVÂNICA:

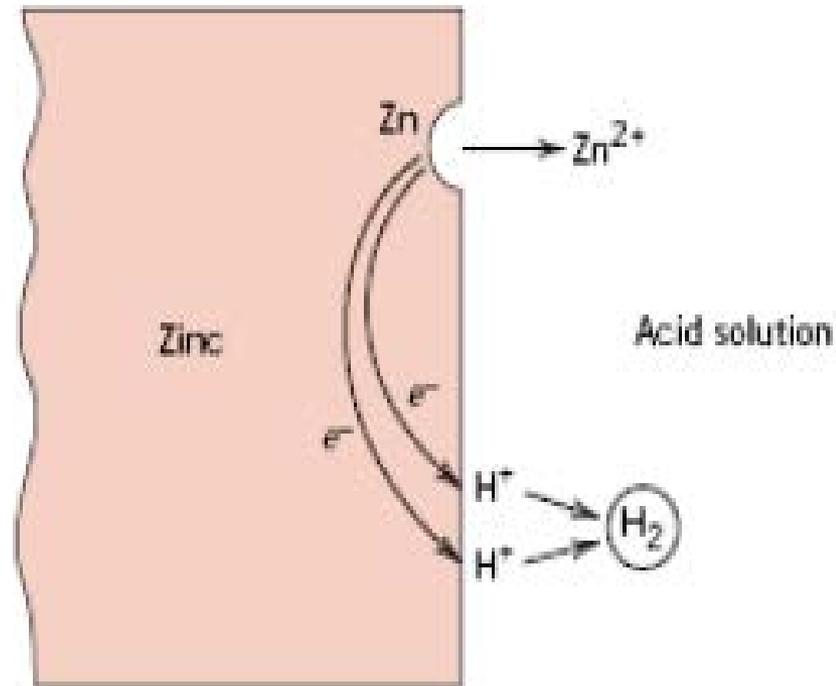
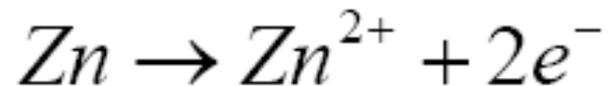
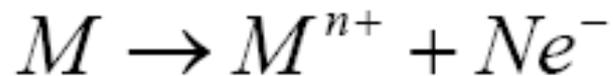
- Dois metais diferentes em contato, imersos num mesmo eletrólito.



Corrosão Galvânica em tubo de aço carbono com válvula de latão (Cu+Zn)

# Corrosão Eletroquímica

- Para os materiais metálicos o processo de corrosão envolve normalmente uma transferência de elétrons
- Os átomos metálicos perdem ou cedem elétrons  
(oxidação/Redução)



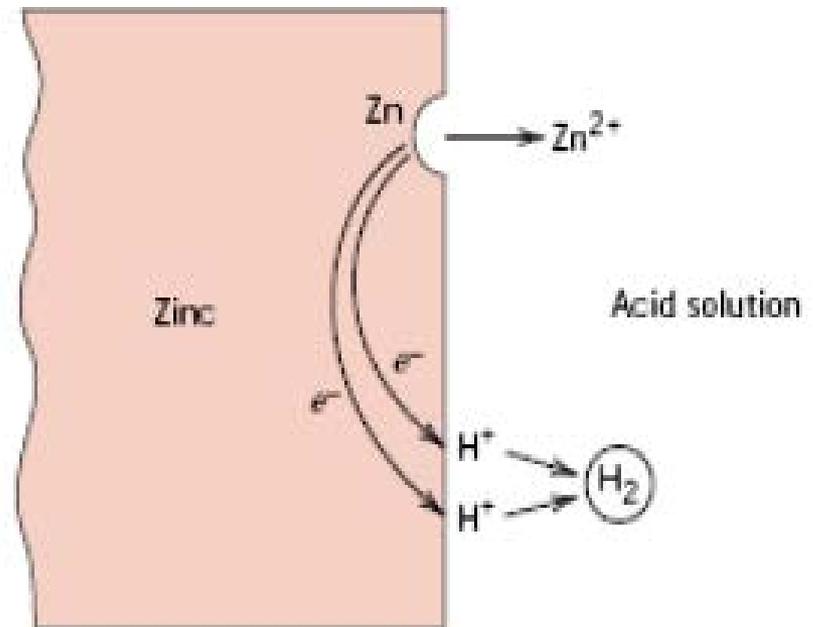
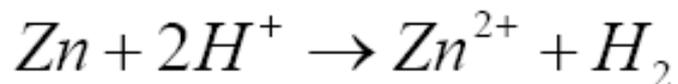
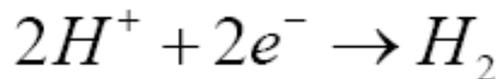
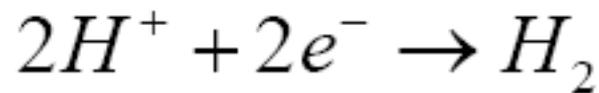
---

# Corrosão Eletroquímica

- Os elétrons gerados de cada átomo de metal que é oxidado devem ser transferidos para outro componente químico (redução)
- As reações são de redução dos íons do meio corrosivo, as principais reações são:
  - ✓ Em meios aerados: caso normal de água do mar e naturais  
$$\text{H}_2\text{O} + 1/2 \text{O}_2 + 2\text{e} \rightarrow 2 \text{OH}^-$$
  - ✓ Em meios desaerados: caso comum em águas doces industriais  
$$2 \text{H}_2\text{O} + 2\text{e} \rightarrow \text{H}_2 + 2 \text{OH}^-$$

# Corrosão Eletroquímica

- Alguns metais podem sofrer corrosão em soluções ácidas, que têm elevadas concentrações de íons hidrogênio ( $H^+$ ). Nesse caso há uma reação de redução do hidrogênio



---

# Corrosão Química

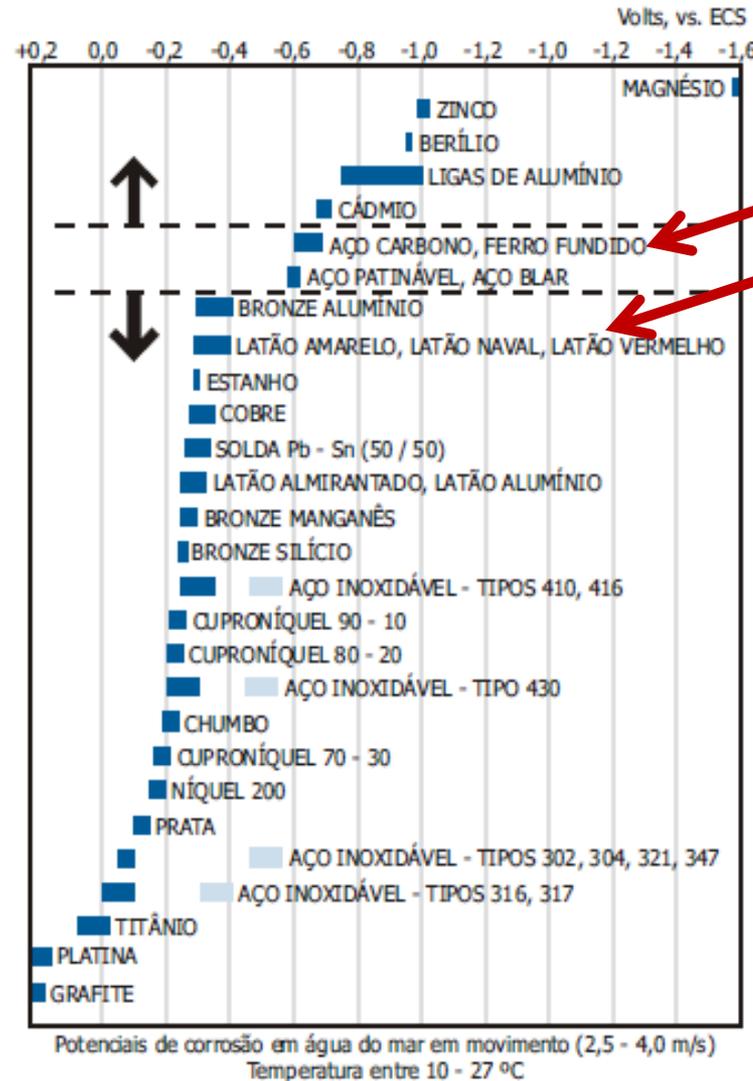
- Neste caso há reação direta com o meio corrosivo, sendo os casos mais comuns a reação com o oxigênio (OXIDAÇÃO SECA)
- Reação genérica da oxidação seca:

## **METAL + OXIGÊNIO → ÓXIDO DO METAL**

- Geralmente , o óxido do metal forma uma camada passiva que constitui uma barreira para que a oxidação continue (barreira para a entrada de  $O_2$ ).
- Essa camada passiva é fina e aderente e alguns óxidos de determinados metais podem formar proteções eficientes contra a corrosão

# QUANTO MAIS NEGATIVO O POTENCIAL, MAIS FÁCIL A CORROSÃO

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



**Fe mais negativo  
que o latão: o Fe  
corrói e o Latão  
não!**

# Série Eletroquímica

	<i>Electrode Reaction</i>	<i>Standard Electrode Potential, V<sup>0</sup> (V)</i>
	$\text{Au}^{3+} + 3e^{-} \longrightarrow \text{Au}$	+1.420
	$\text{O}_2 + 4\text{H}^{+} + 4e^{-} \longrightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	+1.229
	$\text{Pt}^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow \text{Pt}$	~+1.2
	$\text{Ag}^{+} + e^{-} \longrightarrow \text{Ag}$	+0.800
	$\text{Fe}^{3+} + e^{-} \longrightarrow \text{Fe}^{2+}$	+0.771
	$\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4e^{-} \longrightarrow 4(\text{OH}^{-})$	+0.401
	$\text{Cu}^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow \text{Cu}$	+0.340
	$2\text{H}^{+} + 2e^{-} \longrightarrow \text{H}_2$	0.000
	$\text{Pb}^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow \text{Pb}$	-0.126
	$\text{Sn}^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow \text{Sn}$	-0.136
	$\text{Ni}^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow \text{Ni}$	-0.250
	$\text{Co}^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow \text{Co}$	-0.277
	$\text{Cd}^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow \text{Cd}$	-0.403
	$\text{Fe}^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow \text{Fe}$	-0.440
	$\text{Cr}^{3+} + 3e^{-} \longrightarrow \text{Cr}$	-0.744
	$\text{Zn}^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow \text{Zn}$	-0.763
	$\text{Al}^{3+} + 3e^{-} \longrightarrow \text{Al}$	-1.662
	$\text{Mg}^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow \text{Mg}$	-2.363
	$\text{Na}^{+} + e^{-} \longrightarrow \text{Na}$	-2.714
	$\text{K}^{+} + e^{-} \longrightarrow \text{K}$	-2.924

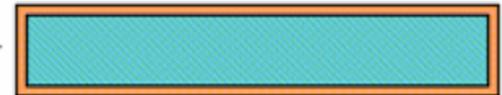
↑  
Increasingly inert  
(cathodic)

↓  
Increasingly active  
(anodic)

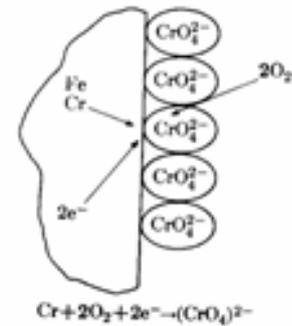
# Camada Passiva de Óxido

Camadas Passivas  
com proteção  
eficiente

Al  
Pb  
Cr  
Aço inox  
Ti



Aluminum with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Coating



Mg



Magnesium with MgO Coating

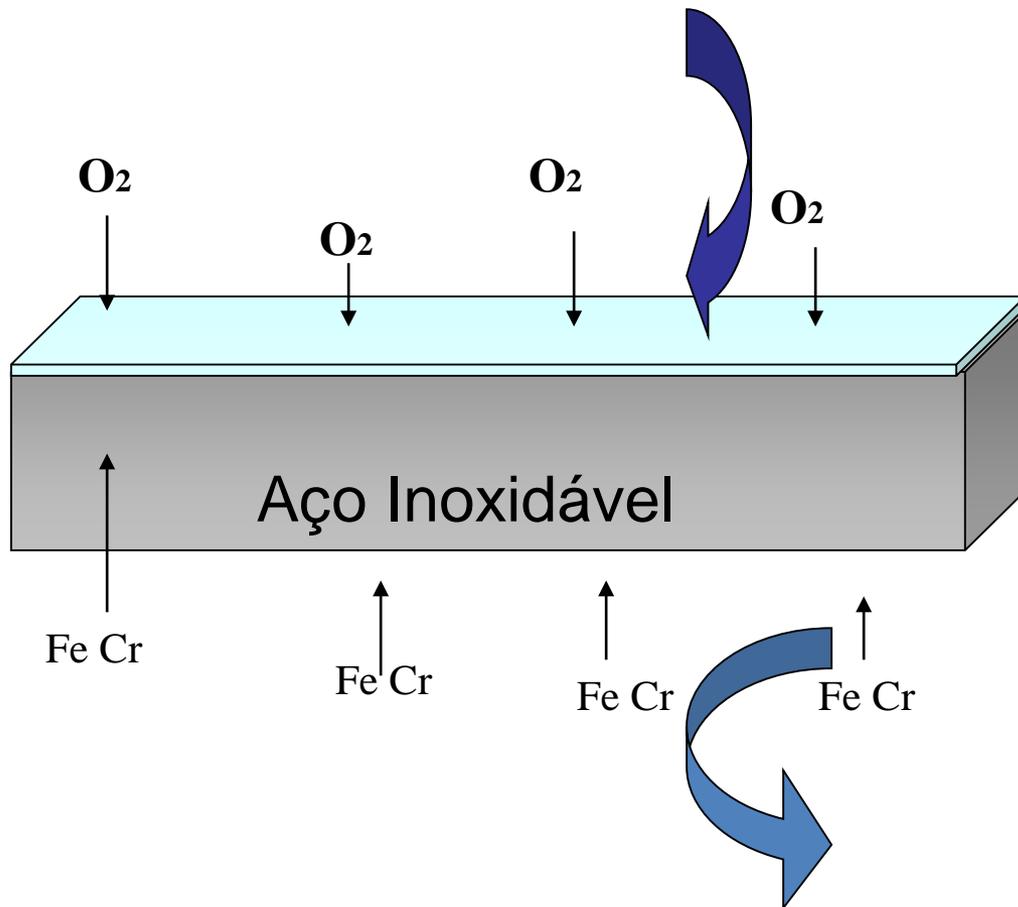
Fe



Iron with Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Coating

Camadas Passivas  
com proteção  
ineficiente

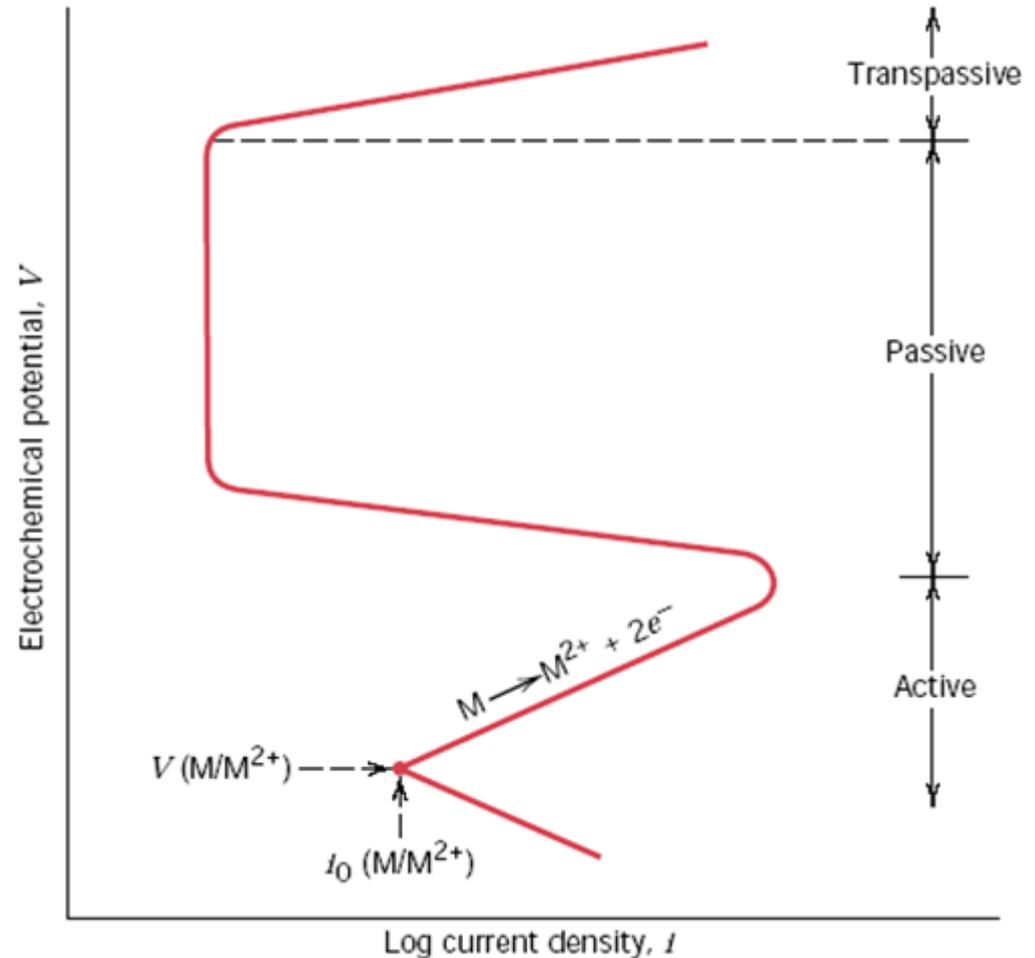
# Filme de óxido (Cr)



- O filme de óxido formado é invisível, contínuo e sua espessura é inferior a dois centésimos de  $\mu$ .
- Tanto a espessura do filme como seu teor de Cr aumentam à medida que se melhora o polimento superficial, portanto deve se formar sobre uma superfície metálica limpa
- Se o filme for rompido, instantaneamente se restaura o processo de corrosão se o aço estiver em meio oxidante

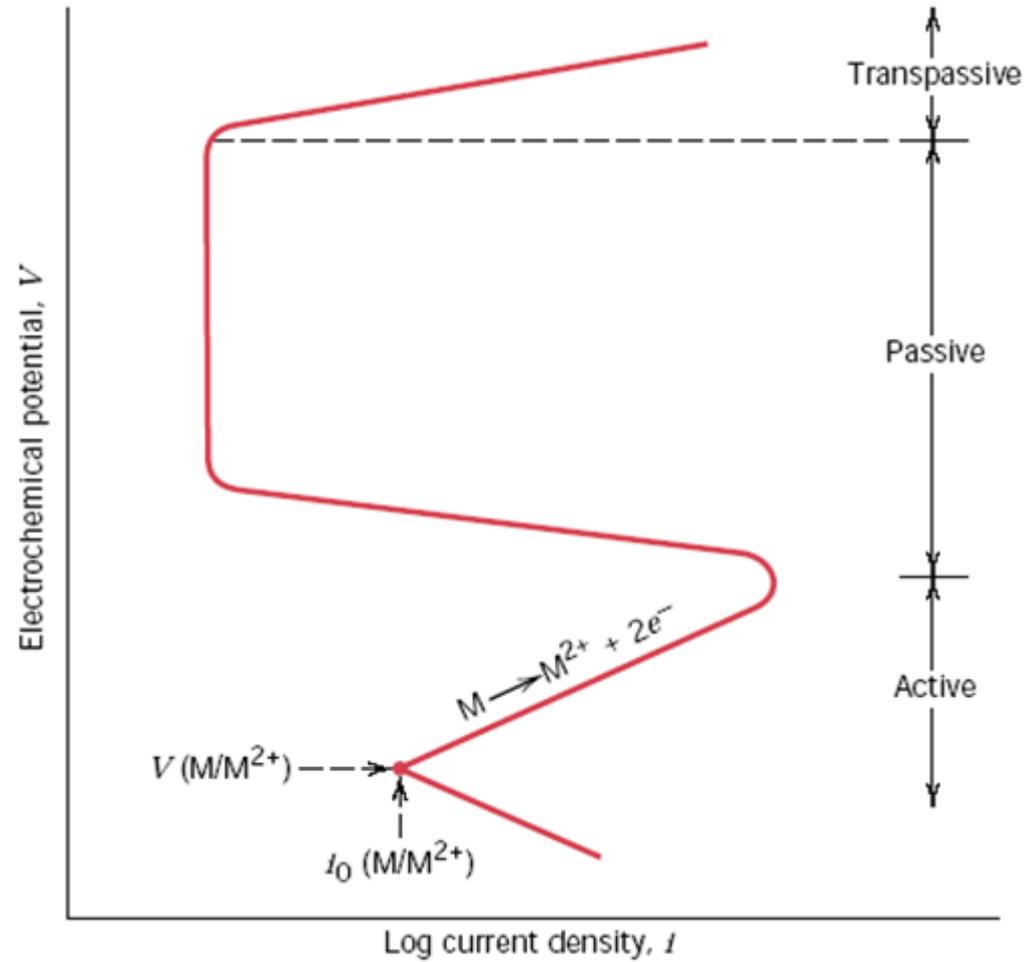
# Passividade

- Os metais que formam camada passiva com proteção eficiente tornam-se altamente resistentes à corrosão e à oxidação. Isso ocorre porque a formação dessa camada funciona como uma barreira protetora contra os agentes agressivos especialmente na corrosão eletroquímica, pois separa o metal do eletrólito



# Passividade

- Pode-se observar o efeito do filme de óxido em metais passiváveis em relação a outros metais – a partir do ponto 3 observa -se que mesmo aumentando o poder oxidante da solução não há aumento da taxa de corrosão, isso ocorre devido ao filme de óxido formado

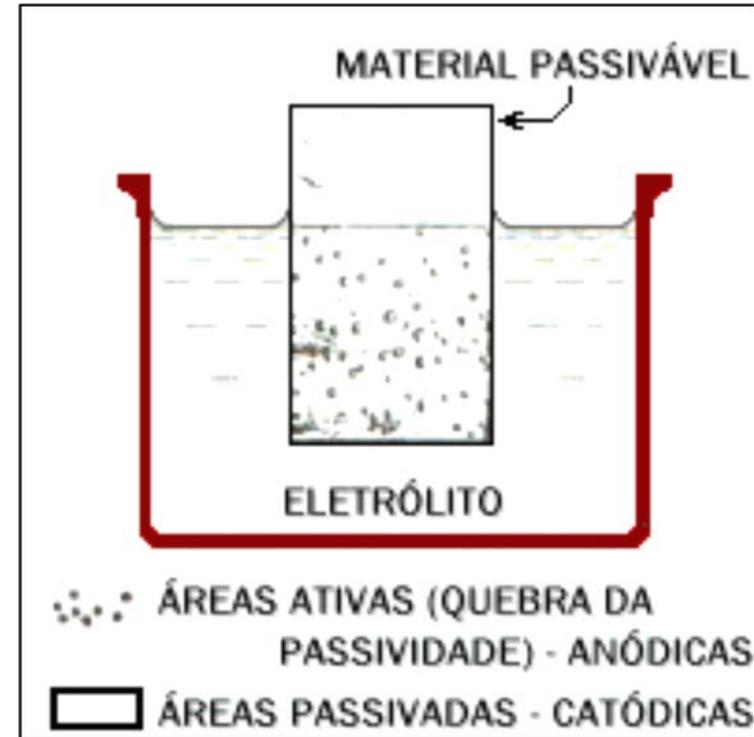


# Tipos de Pilhas mais Comuns

# Pilhas de Eletrodos Metálicos Diferentes

## PILHA ATIVA-PASSIVA:

- Passivação por formação de óxido ou outro composto insolúvel nas suas superfícies. Ex: Al, Pb, Aço Inox, Ti e Cr;
- Íons  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Br}^-$  e  $\text{I}^-$  → Destroem a passivação ou impedem sua formação;
- **Área passivada: catodo.**



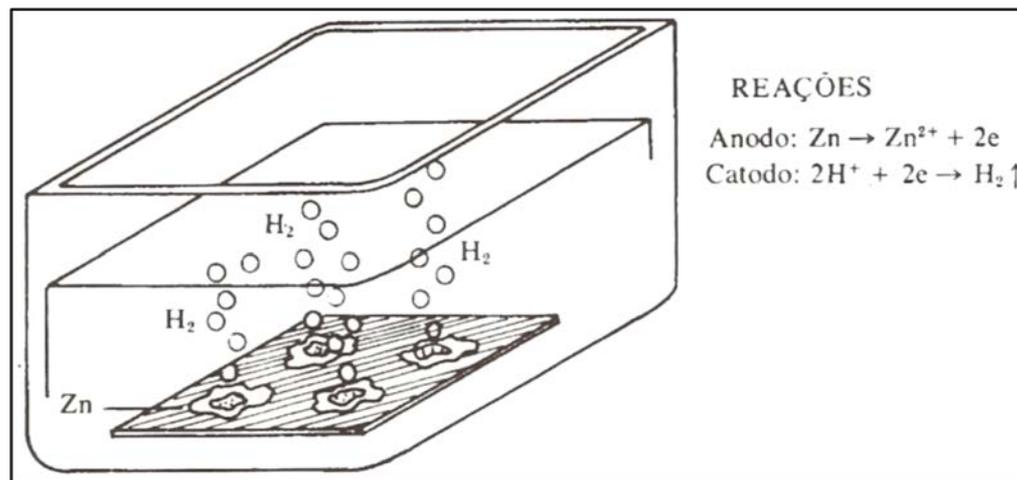
Destruição da passividade –pontos desprotegidos→ Pontos de metal ativo (anodos) vizinho de áreas de metal passivado (catodos): gera ddp da ordem de 0,5 V = **PILHA ATIVA-PASSIVA.**

# Pilhas de Eletrodos Metálicos Diferentes

## PILHA de AÇÃO LOCAL:

Na peça de Zn:

- Impurezas (Fe, C e Cu) são **microcatodos**;
- Zn é o **Anodo**- Corroi



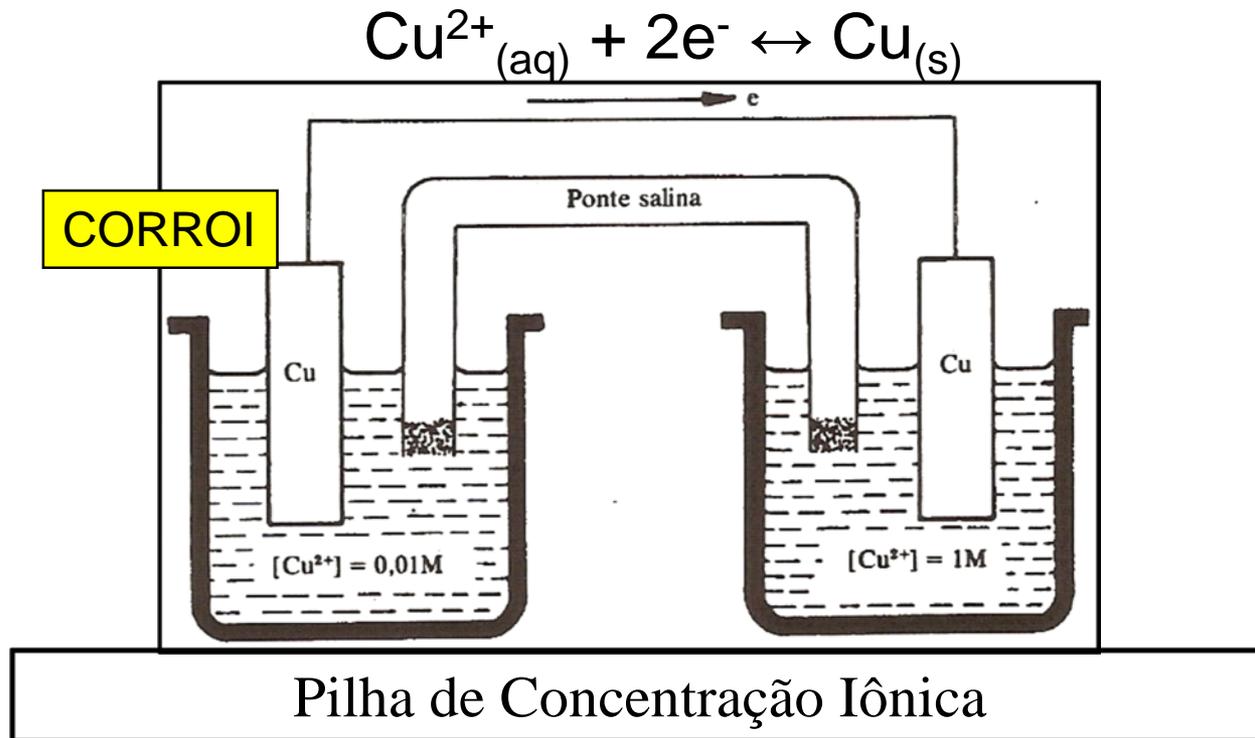
Placa de Zn impura em solução de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  = Pilha de Ação Local

# Pilhas de Concentração

## PILHA de CONCENTRAÇÃO IÔNICA

Eletrodos de mesmo material em contato com diferentes concentrações de um mesmo eletrólito.

- **ANODO** → eletrodo imerso na solução mais diluída.
- **CATODO** → eletrodo imerso na solução mais concentrada.

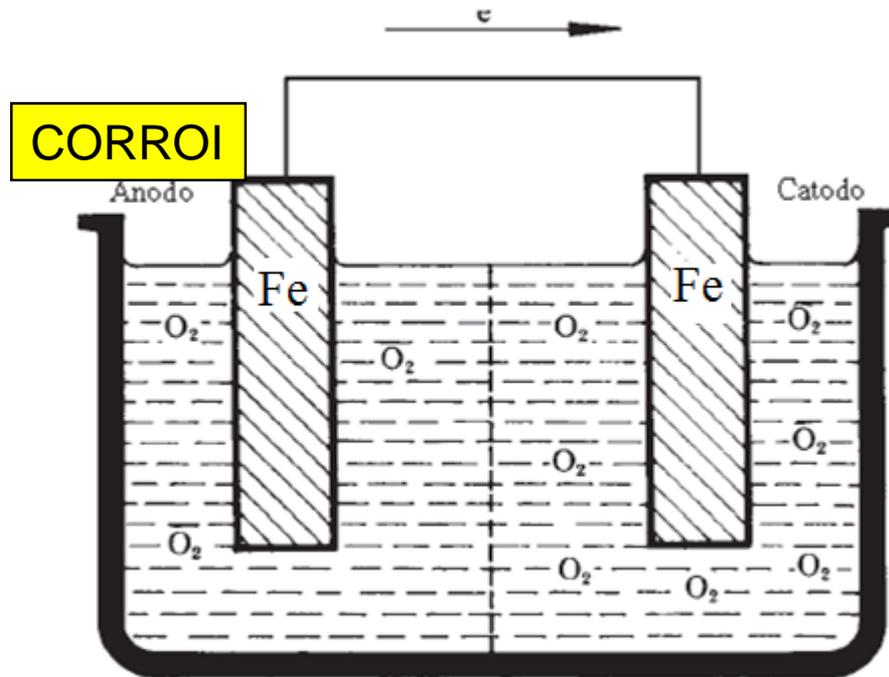


# Pilhas de Concentração

## PILHA de AERAÇÃO DIFERENCIAL

Eletrodos de mesmo material, mesmo eletrólito, **diferentes teores de gases dissolvidos.**

Somente pela equação de Nernst: **o anodo é o menos aerado.**



Pilha de Aeração Diferencial



Corrosão por aeração diferencial, em componente de flange, ocasionada por junta que possibilitou a formação de fresta.

# Pilhas de Temperaturas Diferentes

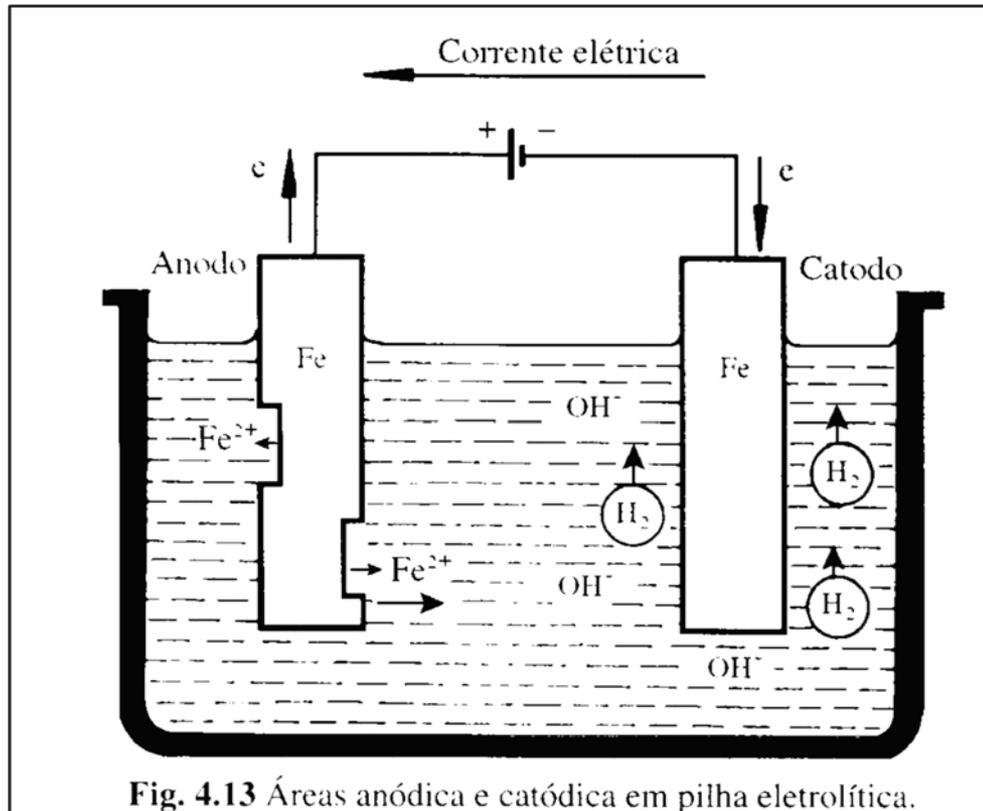
## PILHA TERMOGALVÂNICA

- Eletrodos de mesmo material, **eletrólito em diferentes temperaturas.**
- Aumento da Temperatura → **acelera o processo corrosivo.**

**ANODO → Temperatura maior- corroi!**  
**CATODO → Temperatura menor.**

# CORROSÃO ELETROLÍTICA

## CORRENTE ELÉTRICA EXTERNA



---

# Sumário da Aula

- Introdução
- Formas de Corrosão
- Formas de Proteção

---

# Formas de Corrosão

- **Uniforme** → a corrosão ocorre em toda a extensão da superfície
- **Por placas** → forma-se placas com escavações
- **Alveolar** → produz sulcos de escavações semelhantes à alveolos (tem fundo arredondado e são rasos)
- **Puntiforme** → ocorre a formação de pontos profundos (pites)
- **Intergranular** (*Intercristalina*) → ocorre entre grãos
- **Intragranular** (*Transgranular/Transcristalina*) → a corrosão ocorre nos grãos
- **Filiforme** → a corrosão ocorre na forma de finos filamentos
- **Por esfoliação** → a corrosão ocorre em diferentes camadas tipo “laminadas”

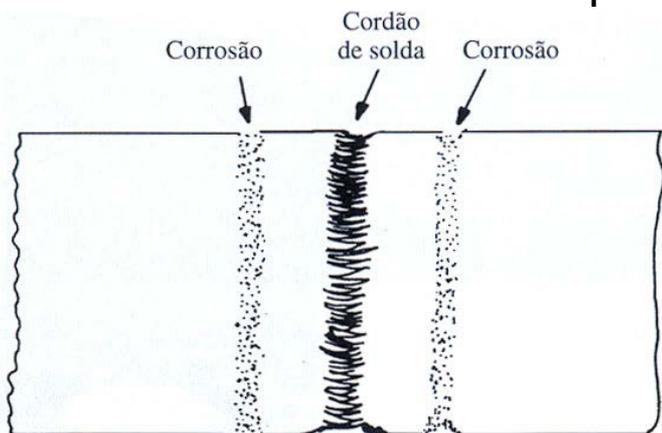
• **Corrosão Seletiva** → Consiste na dissolução preferencial de um elemento constituinte de uma liga (grafítica, dezincificação; desaluminação, descobaltização)

➤ **Grafítica** → Corrosão seletiva ocorrida no Foco cinzento, corroendo o metal base e sobrando a grafita;

➤ **Dezincificação** → Corrosão seletiva em ligas de Cobre-Zinco (Latões), com regiões avermelhadas em contraste com o amarelo do latão (Corrosão preferencial do Zn);

• **Empolamento pelo hidrogênio (Fragilização por hidrogênio)** → Formação de regiões com bolhas de hidrogênio molecular  $H_2$  preferencialmente no contorno do grão fragilizando o material.

• **Em torno do cordão de solda** → Ocorre em aços inox não estabilizados ou com teores de carbono maiores que 0,03%, com corrosão intergranular (ver fig. abaixo).



Corrosão em torno de cordão de solda em (a) tanque e (b) tubulação de aço inoxidável AISI 304.

---

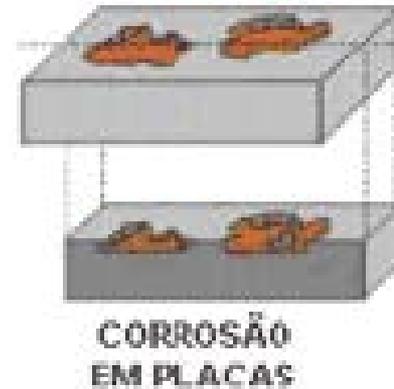
# Corrosão Uniforme

- É o tipo mais comum de corrosão e se caracteriza por se apresentar sobre toda a superfície da peça
- É comum em metais que não formam camadas passivas protetoras
- A formação de ferrugem no aço pode ser considerada como corrosão uniforme
- No processo de ferrugem há a oxidação do ferro, formando hidróxido de ferro [  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  ] que posteriormente se oxida formando hidrato de óxido férrico



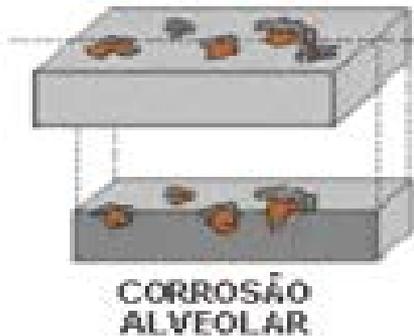
# Corrosão por Placas

- Ocorre quando os produtos de corrosão formam-se em placas que se desprendem progressivamente. É comum em metais que formam película inicialmente protetora mas que, ao se tornarem espessas, fraturam e perdem aderência, expondo o metal a novo ataque

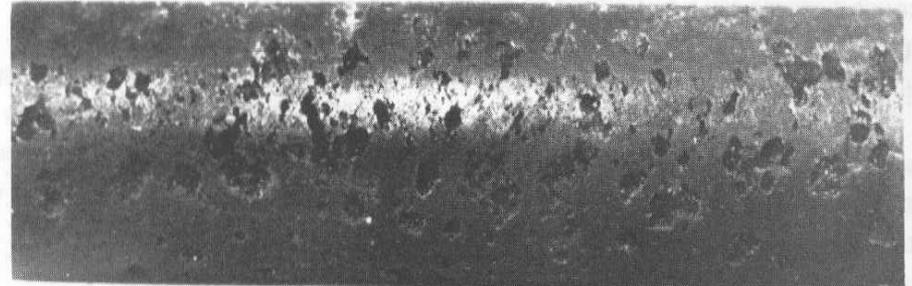


# Corrosão Alveolar

- Quando o desgaste provocado pela corrosão se dá sob forma localizada, com o aspecto de crateras.
- É freqüente em metais formadores de películas semi protetoras ou quando se tem corrosão sob depósito, como no caso da corrosão por aeração diferencial

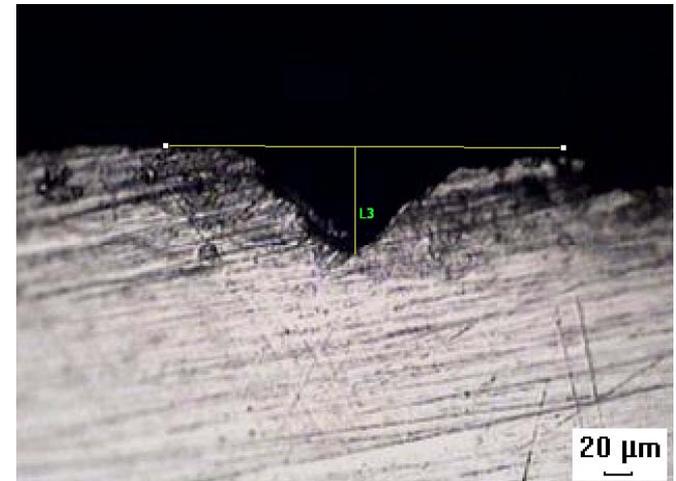
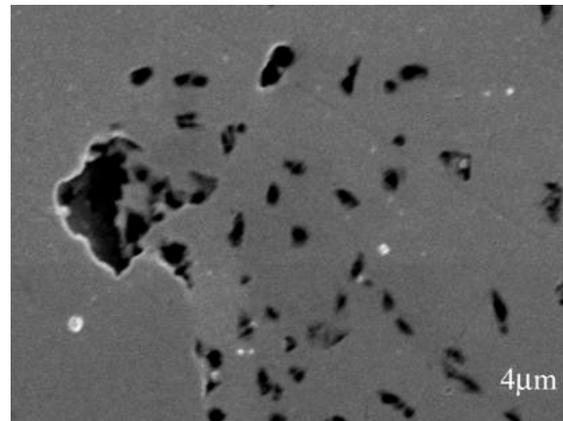
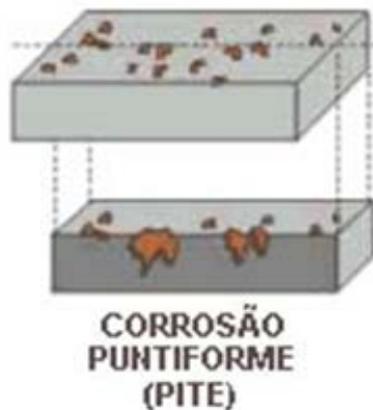


Corrosão “alveolar” em tubo de aço carbono



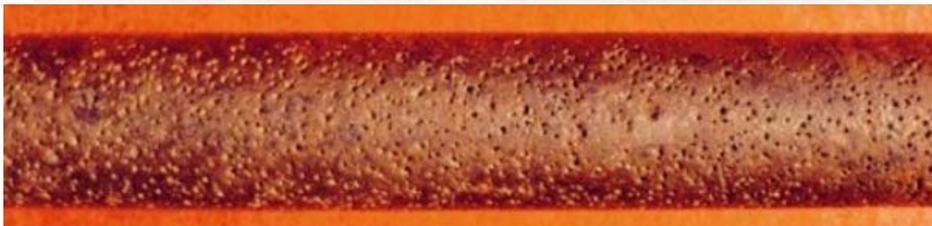
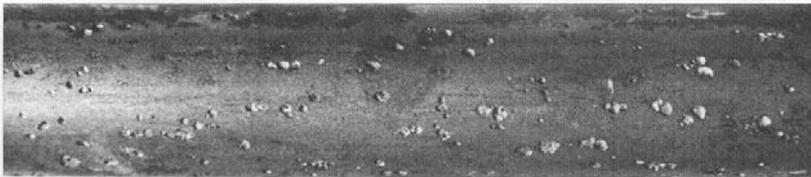
# Corrosão por Pites

- Esse tipo de corrosão não se apresenta com um aspecto homogêneo sobre toda a superfície, mas concentrado em crateras de pequeno diâmetro e grande profundidade
- É freqüente em metais formadores de camadas passivas protetoras que sob a ação de certos agentes agressivos são destruídas em pontos localizados, os quais tornam-se ativos possibilitando uma corrosão muito intensa

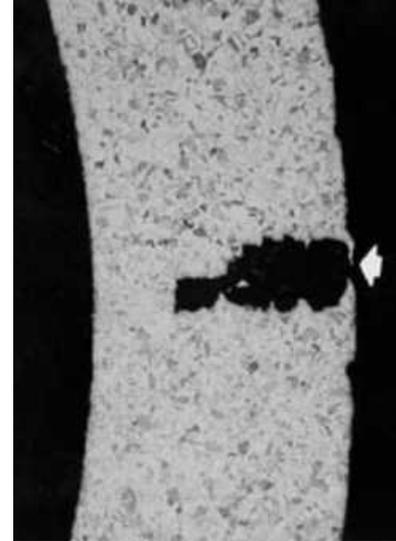


# Corrosão Puntiforme ou por Pites

- Na corrosão por pite a oxidação ocorre no próprio pite
- A força da gravidade faz com que os pites se direcionem para baixo (extremidade do pite) onde se encontra cada vez mais concentrada e agressiva fazendo com que o processo de corrosão se intensifique na extremidade e o pite aumente



Corrosão por “pites” em tubo de aço inoxidável AISI304



Seção parcial de um tubo caracterizando a corrosão por “pite”

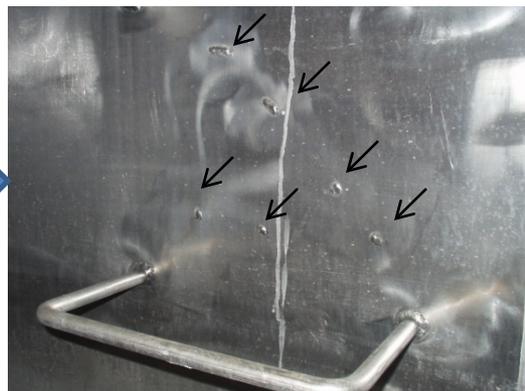
# Corrosão Caldeira Inox 316



Trinca iniciando no pite



Replicas



---

# Corrosão Filiforme

- Se processa sob a forma de finos filamentos, mas não profundos, que se propagam em diferentes direções.
- Ocorre geralmente em superfícies metálicas revestidas com tintas ou metais.
- É observada mais freqüentemente em revestimentos mais permeáveis à penetração de oxigênio e água, ou ainda apresentando falhas e riscos.



**CORROSÃO  
FILIFORME**



# Corrosão por Esfoliação

- Se processa de forma paralela à superfície metálica.
- Ocorre em chapas ou componentes extrudados cujos grãos foram achatados ou alongados, criando condições para que inclusões ou segregações sejam transformadas, devido ao trabalho mecânico, em plaquetas alongadas. Caso estas sejam atingidas pela corrosão (por frestas por exemplo) ocorre a separação das camadas e desintegração do material



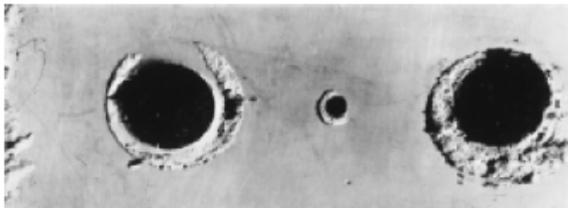
**CORROSÃO POR  
ESFOLIAÇÃO**



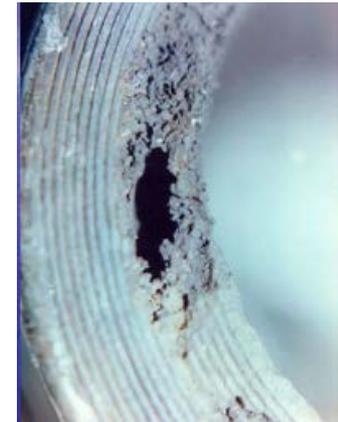
---

# Corrosão em Frestas

- Ocorre em fendas , pontos de contato entre materiais iguais ou diferentes e sob depósitos de sujeira ou de produtos de corrosão onde a solução se torna estagnada e há presença insuficiente de oxigênio para formação da camada passiva.
- A fenda deve ser ampla o suficiente para que a solução penetre, porém estreita o suficiente para que haja estagnação do fluido



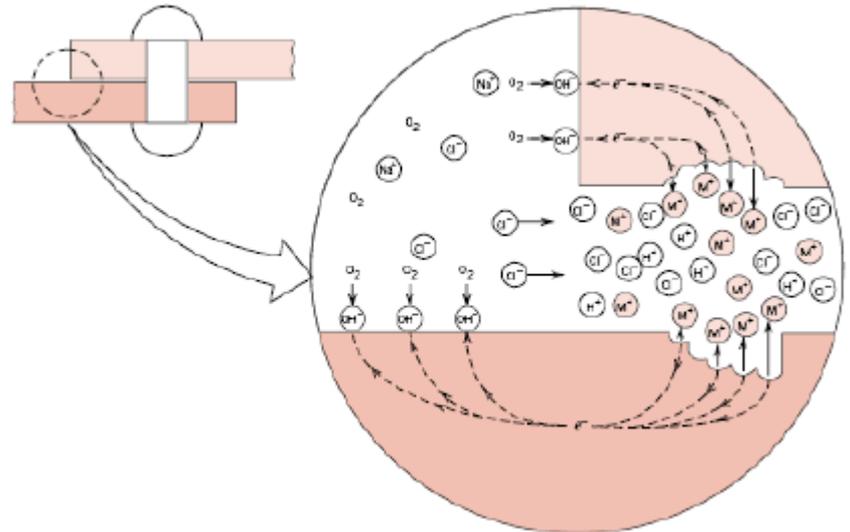
Solda descontínua



Rosca

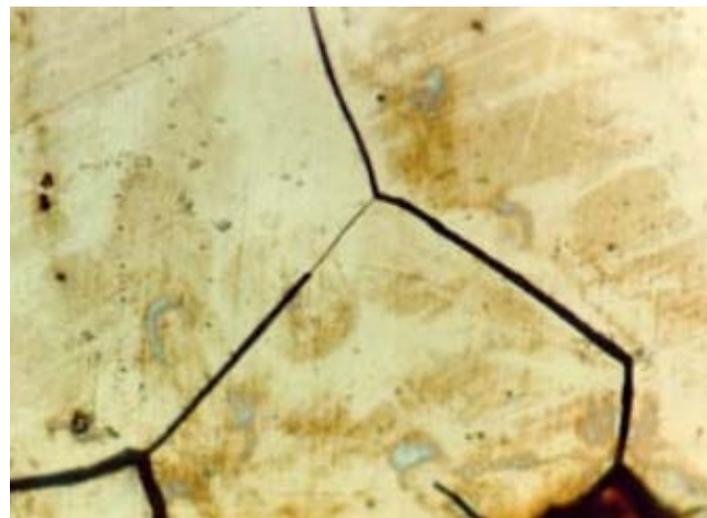
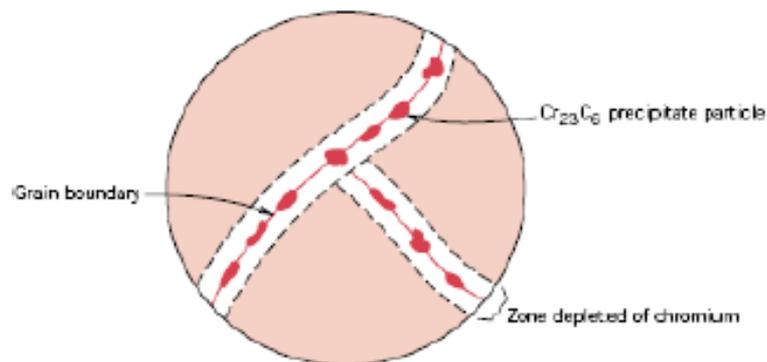
# Corrosão em Frestas

- Um exemplo de corrosão em frestas é o que ocorre em aços inoxidáveis em eletrólito contendo íons  $H^+$  e  $Cl^-$
- Após o oxigênio ter se exaurido na região que está localizada no interior da fresta, a oxidação do metal ocorre
- Os elétrons dessa reação eletroquímica são conduzidos pelo metal para regiões externas à fresta onde são consumidos em reações de redução
- A solução que se encontra no interior da fenda desenvolve concentrações de íons  $H^+$  e  $Cl^-$  que destroem a camada passiva de aços inoxidáveis



# Corrosão Intergranular

- Ocorre preferencialmente ao longo dos contornos de grãos para algumas ligas e em ambientes específicos
- O resultado é que uma amostra se desintegra ao longo dos seus contornos
- A composição química e o tratamento térmico são fatores bastante importantes para esse tipo de corrosão
- Sensitização de aços inoxidáveis

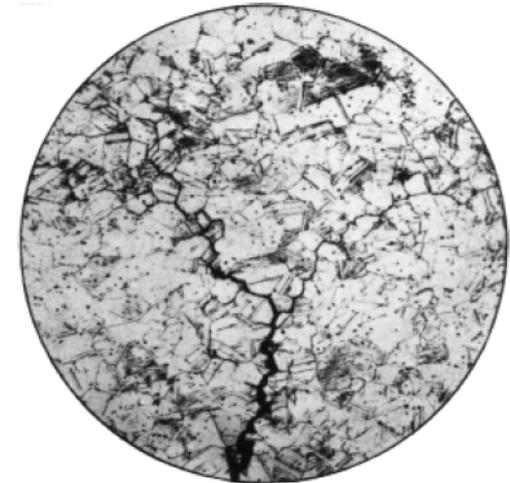


# Corrosão Intergranular

- Quando o fenômeno se manifesta sob a forma de trincas que se propagam pelo interior dos grãos do material, como no caso da corrosão sob tensão de aços inoxidáveis austeníticos.

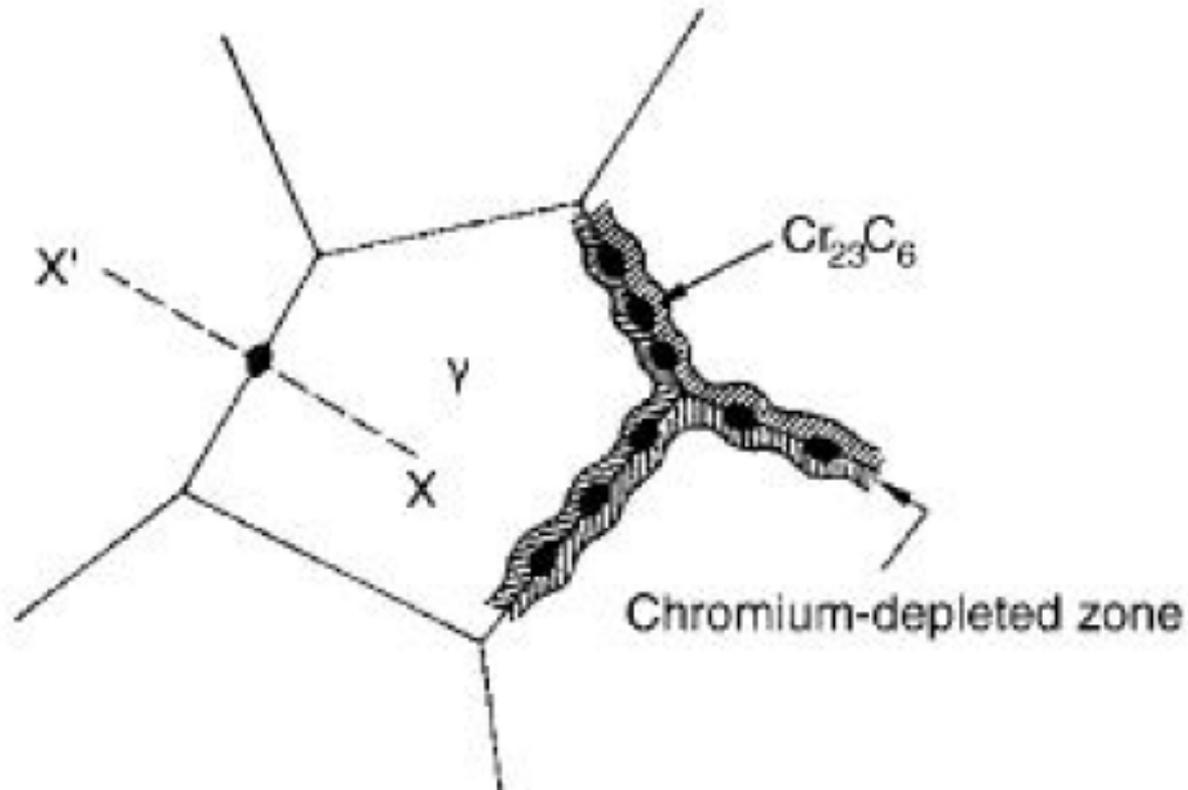


**CORROSÃO  
INTERGRANULAR**  
(Vista da área exposta)



# Corrosão Intergranular

## Sensitização e corrosão intergranular



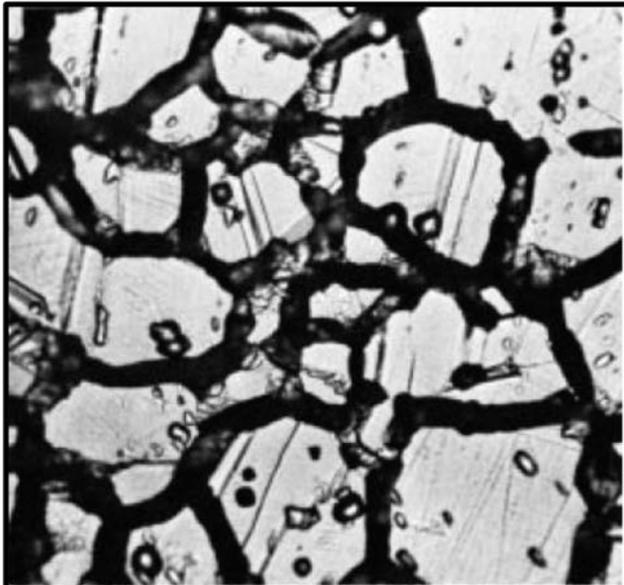
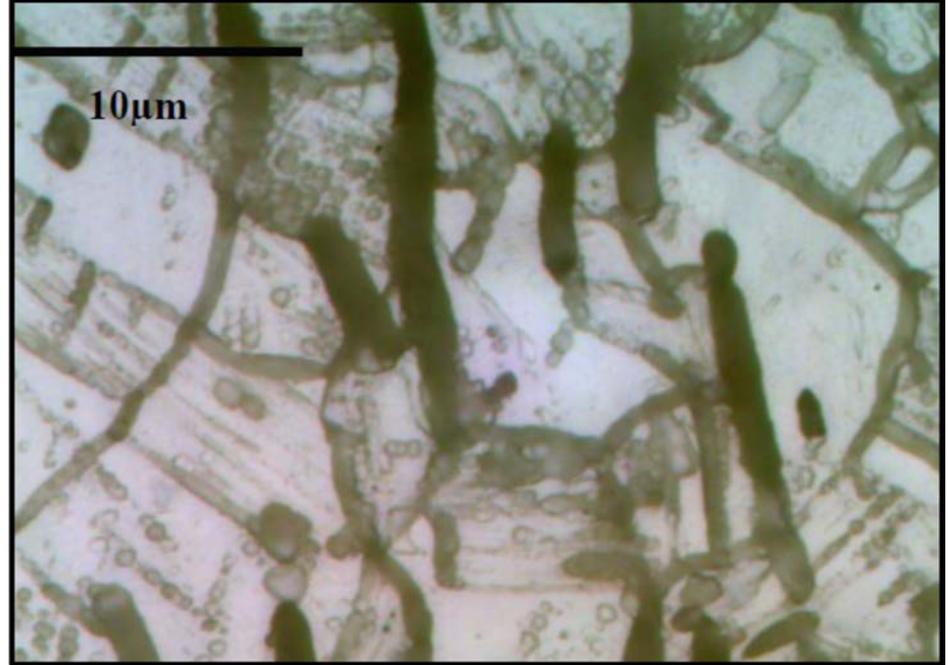
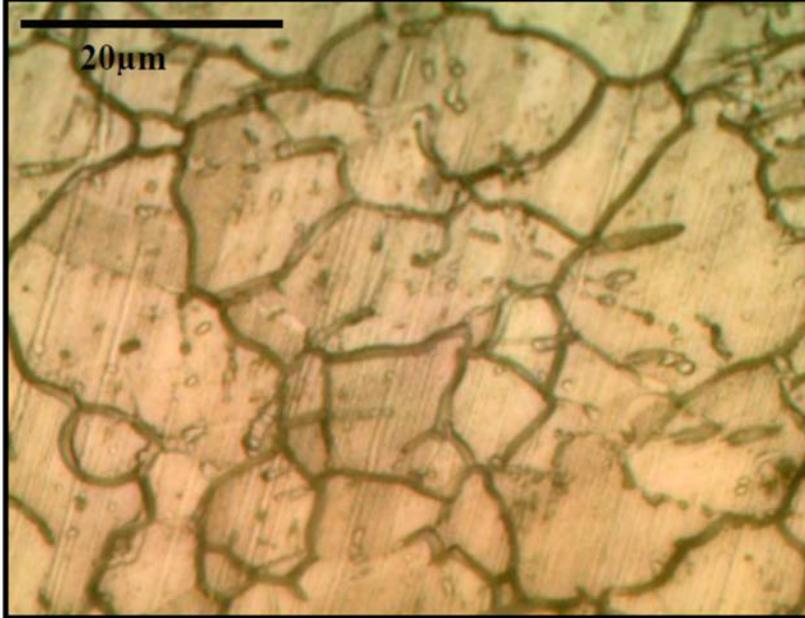
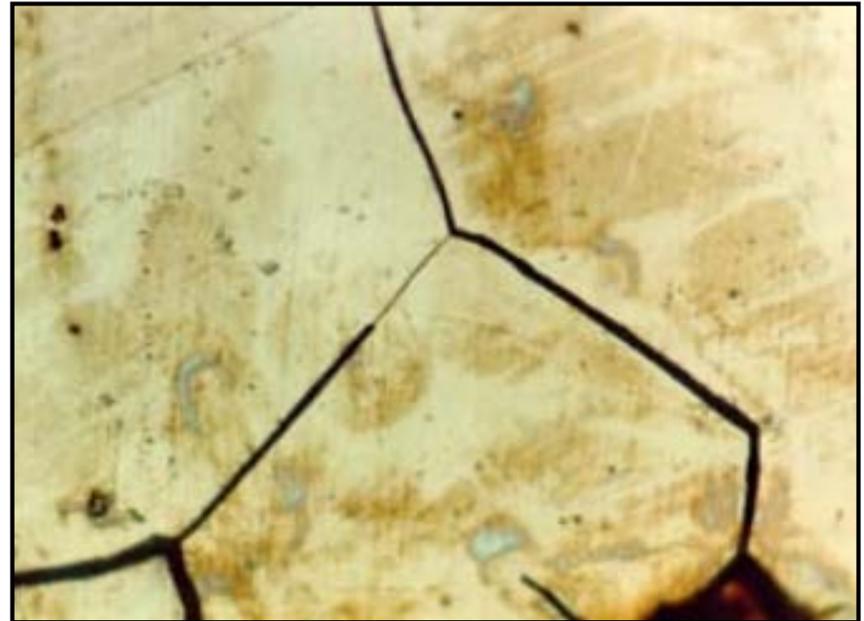


FIG. 3 Ditch Structure (500×) (One or more grains completely surrounded by ditches)  
ASTM A 262-Fig.3 page 4.



---

# Corrosão Galvânica

- A corrosão galvânica ocorre quando dois metais ou ligas de composições diferentes são acoplados eletricamente e expostos a um eletrólito
- O metal menos nobre, ou mais reativo irá experimentar a corrosão e o metal mais inerte vai ser protegido contra a corrosão
- A série galvânica ao lado indica as reatividades relativas de uma variedade de metais e ligas



# Corrosão Galvânica

- Quando dois metais são acoplados em um eletrólito aquela que estiver mais abaixo na série galvânica sofrerá corrosão
- Em certos eletrólitos o aço inoxidável pode ter a película passiva quebrada levando-o do estado passivo para um estado ativo

Table 16.2 The Galvanic Series

	Platinum
	Gold
	Graphite
	Titanium
	Silver
	[316 Stainless steel (passive)
	[304 Stainless steel (passive)
	[Inconel (80Ni-13Cr-7Fe) (passive)
	[Nickel (passive)
	[Monel (70Ni-30Cu)
	Copper-nickel alloys
	Bronzes (Cu-Sn alloys)
	Copper
	[Brasses (Cu-Zn alloys)
	[Inconel (active)
	[Nickel (active)
	Tin
	Lead
	[316 Stainless steel (active)
	[304 Stainless steel (active)
	[Cast iron
	[Iron and steel
	Aluminum alloys
	Cadmium
	Commercially pure aluminum
	Zinc
	Magnesium and magnesium alloys

↑  
Increasingly inert (cathodic)

↓  
Increasingly active (anodic)

# Corrosão Seletiva

- Consiste na dissolução preferencial de um elemento constituinte de uma liga.
- O caso mais comum é o do latão (dezincificação), podendo ocorrer também em outras ligas com remoção de alumínio (desaluminização), cobalto (descobaltização), ferro (grafitização), cromo, etc...
- Na corrosão seletiva do latão, o zinco é corroído preferencialmente, deixando o material frágil e poroso.



---

# Corrosão Seletiva

A corrosão seletiva do latão é facilmente detectada pelo aparecimento de regiões de cor avermelhada, típica do cobre, que contrasta com a cor amarelada dos latões.

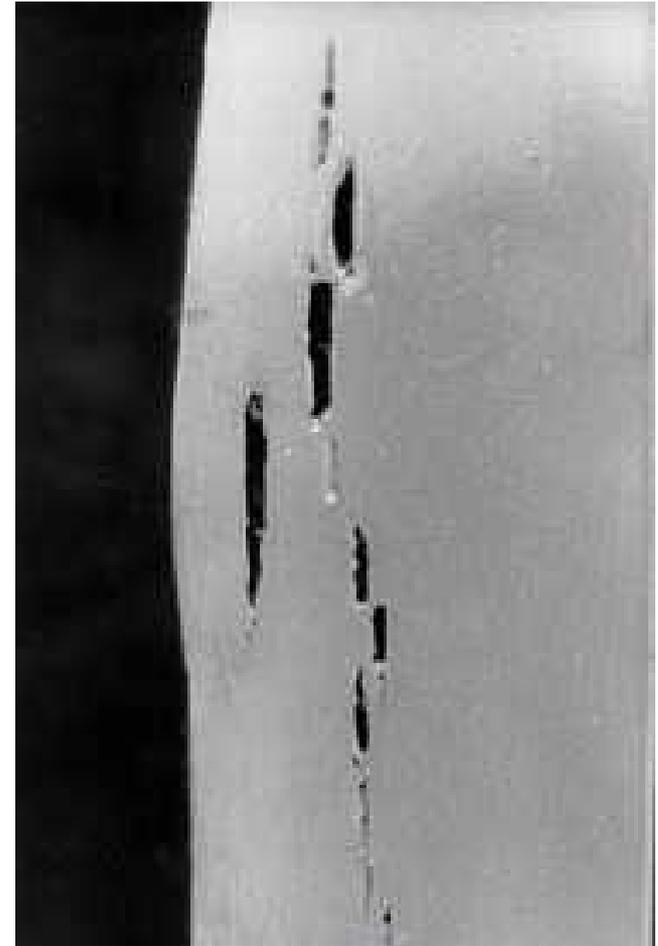


Na corrosão seletiva do ferro fundido cinzento ocorre perda de Fe, restando uma massa porosa, de aspecto escuro (típico do grafite), vazios e ferrugem, facilmente retirável mecanicamente.



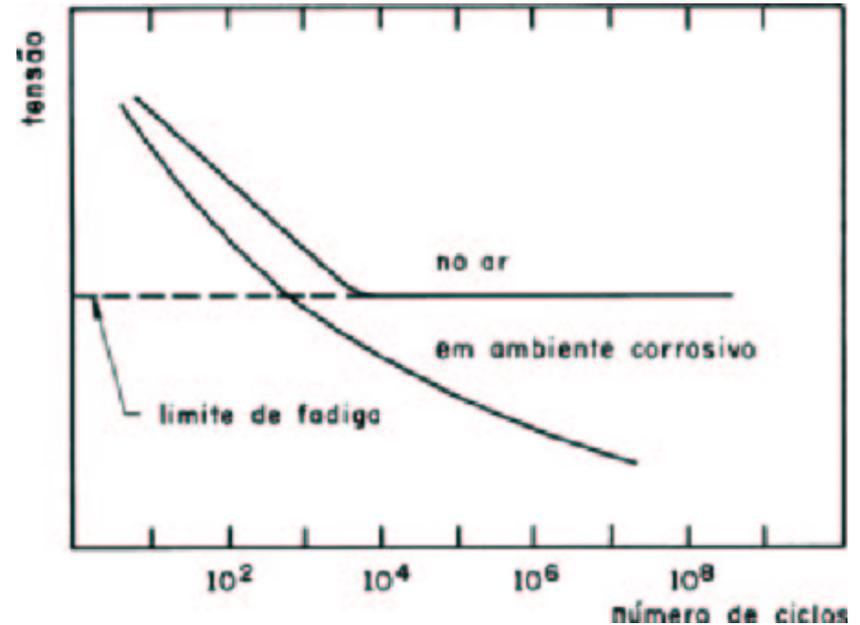
# Fragilização por Hidrogênio

- O hidrogênio atômico  $H^+$  penetra no material metálico e, em função de seu pequeno volume, difunde-se rapidamente em regiões com descontinuidades, como inclusões e vazios, transformando-se em  $H_2$ , exercendo pressão e originando a formação de bolhas (fragilização)



# Corrosão por Fadiga

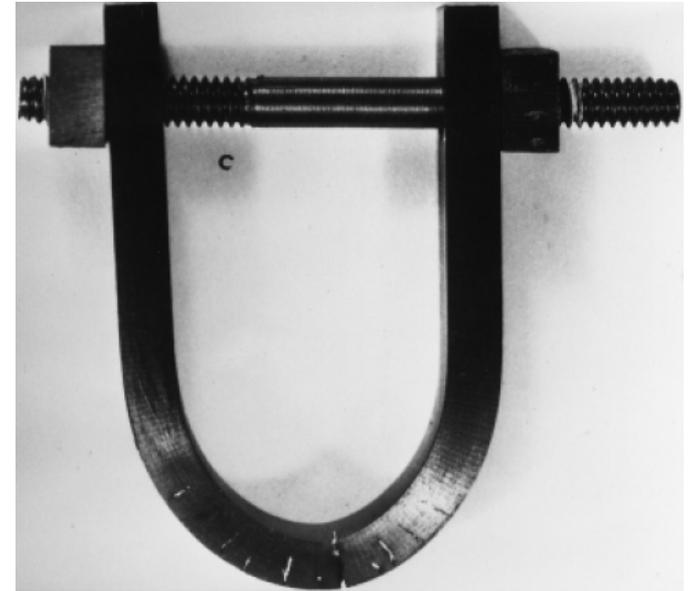
- Fadiga é a tendência de um metal fraturar quando sujeito a solicitações mecânicas alternadas ou cíclicas.
- Quando um componente é sujeito a esforços cíclicos num meio que o pode atacar química ou eletroquimicamente, verificam-se condições para que ocorra corrosão sob fadiga



Curva de fadiga e corrosão sob fadiga para um material ferroso

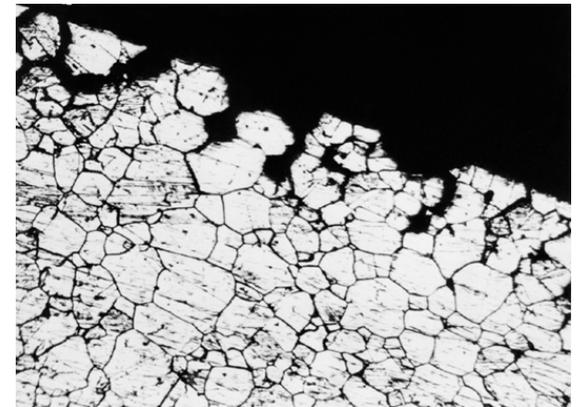
# Corrosão sob Tensão

- Pode aparecer em quase todos os tipos de metais. Está ligada à existência conjunta de eletrólitos e tensões mecânicas e podem avançar para o interior do metal
- Pequenas trincas se formam e então se propagam em uma direção perpendicular à tensão, com o resultado de que por fim uma falha pode ocorrer
- O comportamento da falha é característico do apresentado por uma material frágil



# Corrosão sob Tensão

- A maioria das ligas é suscetível à corrosão sob ambientes específicos
- Por exemplo, o latão é vulnerável quando exposto à amônia (fotomicrografia) enquanto que maioria dos aços inoxidáveis sofrem corrosão sob tensão em soluções que contém íons cloreto
- Entre os aços inoxidáveis os austeníticos são os que apresentam maior sensibilidade à corrosão sob tensão, surgindo principalmente nas zonas onde há deformação plástica



---

# Corrosão - Erosão

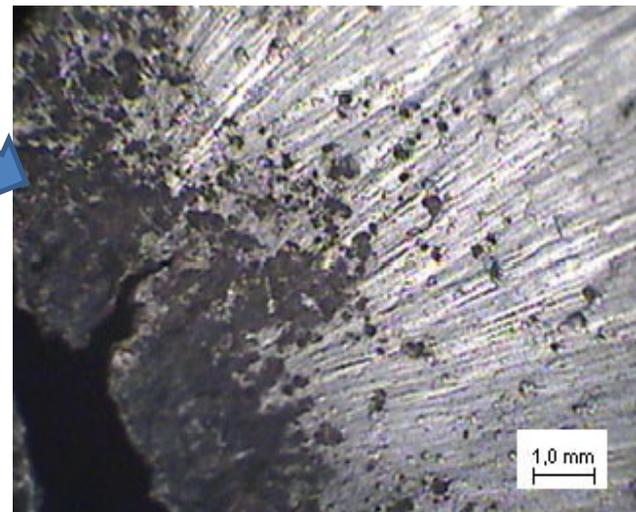
- Ocorre devido à ação combinada de um ataque químico e da abrasão mecânica ou desgaste como uma consequência do movimento de um fluido
- Ela é especialmente prejudicial aos metais passiváveis pois a ação abrasiva pode causar uma erosão da película de óxido deixando a superfície do metal exposta
- Se a película não for capaz de se recompor rapidamente a corrosão pode ser severa
- A natureza do fluido exerce forte influência sobre a corrosão assim como a velocidade do fluido e a presença de bolhas e sólidos em partículas



# Corrosão - Erosão

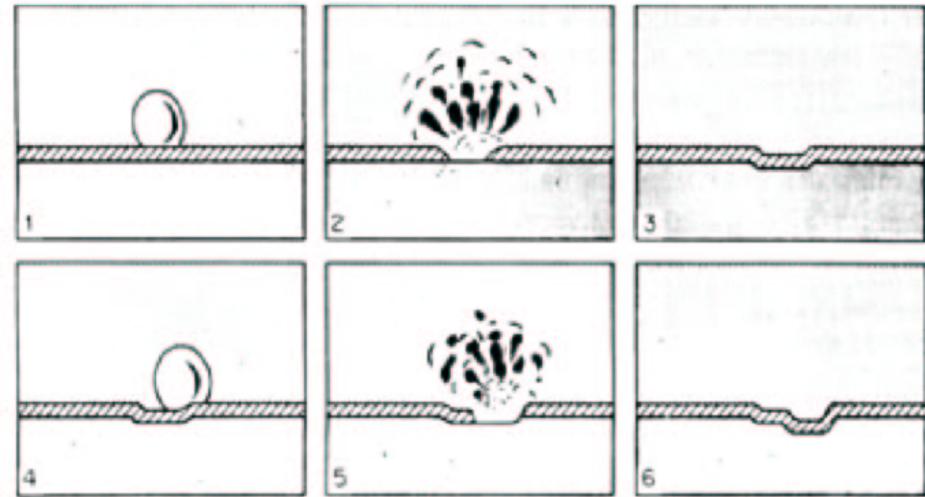


Erosão em tubos de caldeira



# Corrosão - Cavitação

- Caso particular de corrosão - erosão
- Formação de bolhas de vapor em função da queda de pressão (local) e posterior implosão sobre a superfície metálica (já na zona de pressão);
- É freqüente em sistemas onde o líquido se move a altas velocidades e onde ocorram variações bruscas de pressão: bombas, turbinas, hélices de navios, etc...

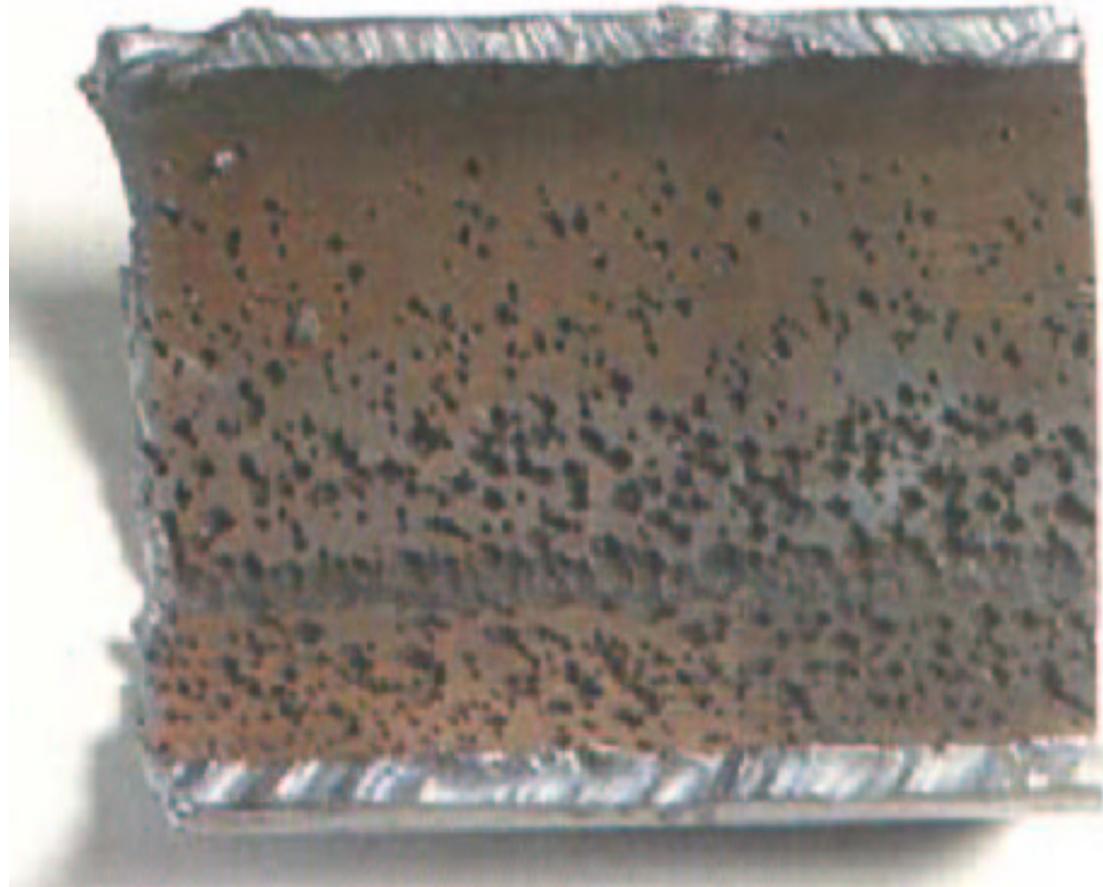


- 1- formação da bolha de vapor;
- 2- implosão e destruição do filme passivo;
- 3- formação de novo filme;
- 4- repetição do processo.

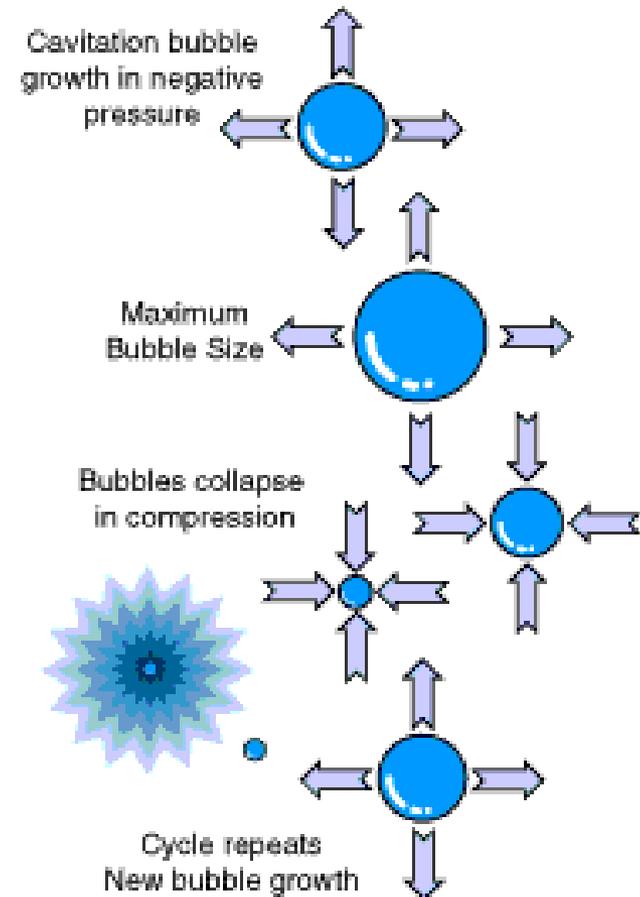
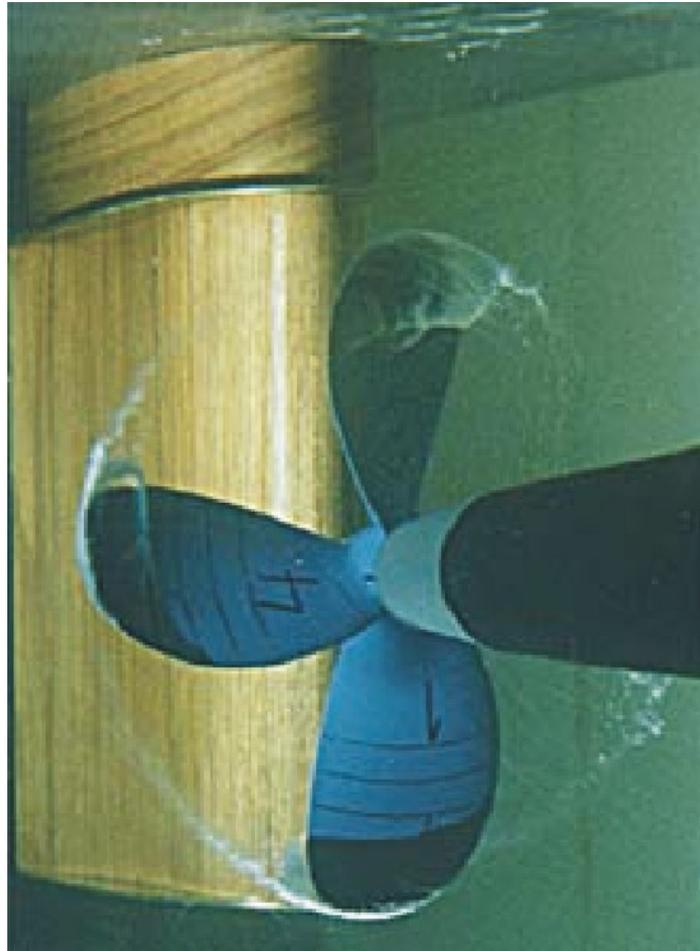
---

# Corrosão - Cavitação

Pites ou alvéolos ocasionados por cavitação, onde ocorreu redução brusca do diâmetro da tubulação



# Corrosão - Cavitação





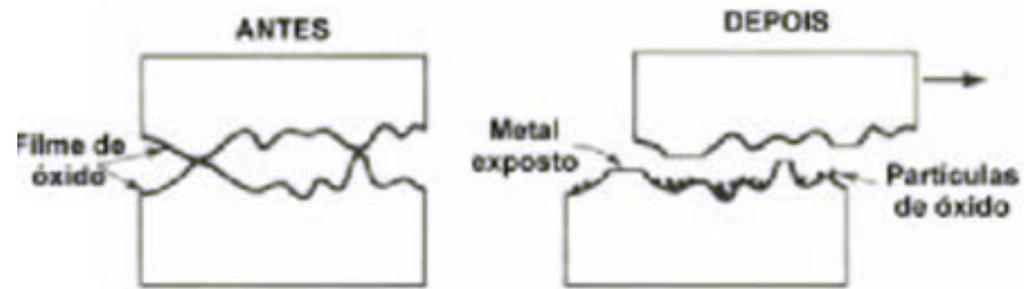
Exemplo de turbina Francis com cavitação ( EFEI,1999)



Exemplo de cavitação e corrosão de um rotor de aço inox 316

# Corrosão sob Atrito

- Ocorre nas áreas de contato entre os materiais quando sob carga e executando movimento de escorregamento ou vibração;
- Provoca o desgaste metálico e a formação de partículas de óxidos, levando ao aparecimento de folgas entre as superfícies de contato.



- a) as superfícies estão inicialmente revestidas por uma camada de óxido;
- b) o movimento relativo remove a camada em alguns pontos;
- c) o óxido é novamente formado e o processo se repete.

---

# Principais Meios Corrosivos

- Atmosfera (poeira, poluição, umidade, gases:CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, NO<sub>2</sub>,...)
- Água (bactérias dispersas: corrosão microbiológica; chuva ácida, etc.)
- Solo (acidez, porosidade)
- Produtos Químicos
- Um determinado meio pode ser extremamente agressivo, sob o ponto de vista da corrosão, para determinado material e inofensivo para outro
- Todos esses meios podem ter características ácidas, básicas ou neutra e podem ser aeradas.

---

# Produtos da Corrosão

- Muitas vezes os produtos da corrosão são requisitos importantes na escolha dos material para determinada aplicação
- Alguns exemplos onde os produtos da corrosão são importantes:
  - ✓ Os produtos de corrosão dos materiais usados para embalagens na indústria alimentícia deve não ser tóxico como também não pode alterar o sabor dos alimentos.
  - ✓ Pode ocorrer, devido a corrosão, a liberação de gases tóxicos e inflamáveis (riscos de explosão)
  - ✓ Materiais para implantes de ossos humanos, implante dentário, marcapassos, etc.

---

# Sumário da Aula

- Introdução
- Formas de Corrosão
- Formas de Proteção

---

# Principais Meios de Proteção Contra a Corrosão

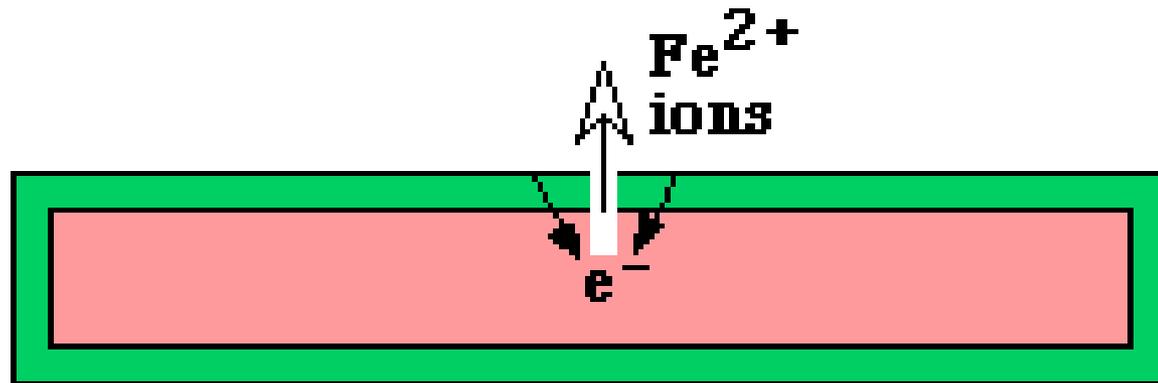
- Pinturas ou vernizes
- Recobrimento do metal com outro metal mais resistente à corrosão
- Galvanização: Recobrimento com um metal mais eletropositivo (menos resistente à corrosão)
- Proteção eletrolítica ou proteção catódica

---

# Pinturas ou Vernizes

- Separa o metal do meio
- Exemplo: Primer em Aço

# Proteção Não-Galvânica



**Tin Coating on Steel (Tinplate)**

**Folhas de flandres:** São folhas finas de aço revestidas com estanho que são usadas na fabricação de latas para a indústria alimentícia. O estanho atua como ânodo somente até haver rompimento da camada protetora em algum ponto. Após, atua como cátodo, fazendo então que o aço atue como anodo, corroendo-se

---

# Proteção Galvânica

- Recobrimento do metal com outro metal mais resistente à corrosão
- Separa o metal do meio
- Exemplo: Cromagem, Niquelagem, Alclads, folhas de flandres, revestimento de arames com Cobre, etc
- Dependendo do revestimento e do material revestido, pode haver formação de uma pilha de corrosão quando houver rompimento do revestimento em algum ponto, acelerando assim o processo de corrosão

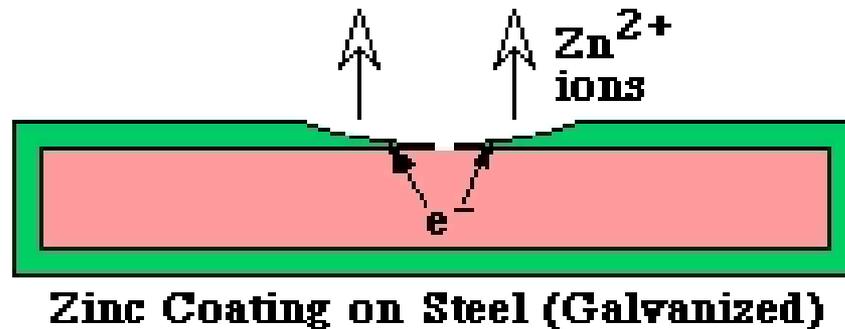
# Proteção Galvânica

- Exemplo: Recobrimento do aço com zinco

O Zinco é mais eletropositivo que o Ferro, então enquanto houver Zinco o aço ou ferro esta protegido. Veja os potenciais de oxidação do Fe e Zn:

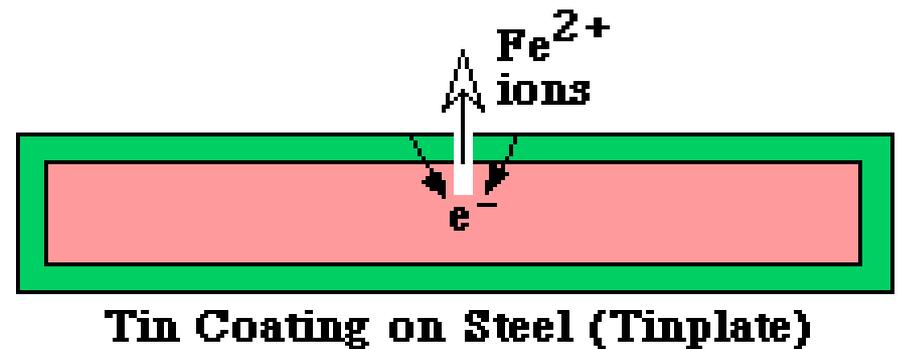
$\varepsilon^{\circ}_{\text{oxi}}$  do Zinco = + 0,763 Volts

$\varepsilon^{\circ}_{\text{oxi}}$  do Ferro = + 0,440 Volts



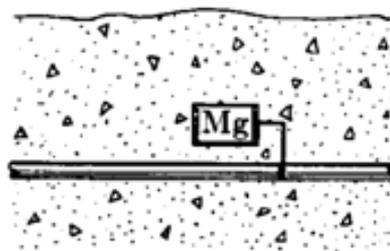
# Proteção Anódica

- A proteção anódica utiliza-se de um revestimento catódico, o revestimento é mais nobre que o metal base protege-o contra a corrosão. Um grande problema desse tipo de proteção é que qualquer porosidade ou ruptura desta camada provocará o aparecimento de uma célula galvânica onde o metal base é o anodo e sofrerá uma corrosão localizada. Portanto, no revestimento catódico deve-se ter o cuidado para não deixar falhas no mesmo
- Os revestimentos catódicos aplicados sobre o aço são o estanho, chumbo, níquel, cromo, cobre e os metais raros como prata ouro e platina



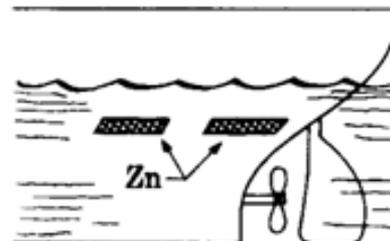
# Proteção Catódica

- Este método de proteção contra a corrosão é empregado principalmente em estruturas metálicas de grandes dimensões (navios, tubulações) sujeitas a ação corrosiva da água do mar ou terrenos úmidos
- Tem como princípio a formação de uma pilha galvânica entre o material a proteger e um eletrodo de sacrifício, que faz o papel de ânodo e deve ser mais eletropositivo ( maior potencial de oxidação no meio) que o primeiro, ou seja, deve apresentar maior corrosão



Cano subterrâneo

(a)



Navio

(b)



Tanque de água

(c)

---

# Proteção Eletrolítica (Catódica)

- Utiliza-se o processo de formação de pares metálicos (UM É DE SACRIFÍCIO), que consiste em unir-se intimamente o metal a ser protegido com o metal protetor, o qual deve ser mais eletropositivo (MAIOR POTÊNCIAL DE OXIDAÇÃO NO MEIO) que o primeiro, ou seja, deve apresentar um maior tendência de sofrer corrosão
- É muito comum usar ânodos de sacrifícios em tubulações de ferro ou aço em subsolo e em navios e tanques
- Ânodos de sacrifício mais comuns para ferro e aços:
  - ✓ Zn
  - ✓ AL
  - ✓ Mg

---

# Tratamento Químico ou Eletroquímico

- O objetivo é provocar a formação de uma camada protetora que inibe a corrosão e não se solte nos diferentes ambientes em que o metal é aplicado

---

# Tratamento Químico ou Eletroquímico

- **Anodização**: oxidação anódica para produção de uma camada pura de óxido artificial protetor. Produz uma camada transparente, mantendo o aspecto inicial do metal. Muito utilizado para a proteção do alumínio
- **Fosfatização**: processo de proteção de metais que consiste em recobrir as peças metálicas com fosfatos neutros ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) e monofosfatos [ $\text{H}(\text{PO}_4)^{-2}$ ], de zinco, manganês ou ferro
- **Cromatização**: o revestimento é obtido a partir de solução de cromato e ácido crômico. Pode ser feito sobre metal ou sobre óxidos. Usado para revestir vários metais não ferrosos (Al, Zn, Cd, Mg,..)

---

# Materiais Cerâmicos

- São relativamente inertes à temperatura ambiente
- Alguns só são atacados à altas temperaturas por metais líquidos
- O processo de corrosão por dissolução é mais comum nas cerâmicas do que a corrosão eletroquímica

---

# Materiais Poliméricos

- Quando expostos à certos líquidos os polímeros podem ser atacados ou dissolvidos
- A exposição dos polímeros à radiação e ao calor pode promover a quebra de ligações e com isso a deterioração de suas propriedades físicas

---

# Materials Poliméricos

	Weak Acid	Strong Acid	Weak Base	Strong Base	Organic Solvent	Ozone
Fluorocarbons	Resistant	Resistant	Resistant	Resistant	Resistant	Resistant
PMMA	Resistant	Attacked	Resistant	Attacked	Attacked	Resistant
Nylon	Resistant	Attacked	Resistant	Resistant	Resistant	Attacked
Low Density PE	Resistant	Attacked	Resistant	Resistant	Resistant	Attacked
High Density PE	Resistant	Attacked	Resistant	Resistant	Resistant	Attacked
Polypropylene	Resistant	Attacked	Resistant	Resistant	Resistant	Attacked
Polystyrene	Resistant	Attacked	Resistant	Resistant	Attacked	Attacked
Polyvinyl Chloride	Resistant	Resistant	Resistant	Resistant	Attacked	Resistant
Epoxy	Resistant	Attacked	Resistant	Resistant	Resistant	Attacked
Phenolics	Attacked	Attacked	Attacked	Attacked	Attacked	Attacked
Polyesters	Attacked	Attacked	Attacked	Attacked	Attacked	Attacked

---

# Materiais Poliméricos (Elastômeros)

	Dilute Acid	Oxidants	Bases	Oils	Water	Ozone
Polyisoprene	Good	Poor	Fair	Poor	Good	Fair
Neoprene	Good	Poor	Good	Good	Fair	Excellent
Nitrile	Good	Poor	Fair	Excellent	Excellent	Fair
Styrene – Butadiene	Good	Poor	Fair	Poor	Good	Fair
Silicone Rubber				Good	Fair	Excellent

---

# Prevenção

- **Inibidores:**

- ✓ Substâncias que quando adicionadas ao ambiente em concentrações baixas, diminuem a sua agressividade.

- ✓ Funcionamento: Reagem com o componente quimicamente ativo da solução (como o oxigênio dissolvido). Usado em sistemas fechados (radiadores, caldeiras à vapor)

- **Barreiras Físicas:** Películas e revestimentos (metálicos e não metálicos)

- **Proteção Catódica:** Fornecer elétrons (fonte externa) para forçar a reação inversa

- **Anodo de Sacrifício:** Colocar um metal mais reativo próximo

---

# Métodos para Prevenção

- Aplicação de revestimentos que podem ser:
  - ✓ Revestimentos com produtos da própria reação (tratamento químico ou eletroquímico)
  - ✓ Revestimentos metálicos
  - ✓ Revestimentos orgânicos (tintas e resinas)
  - ✓ Revestimentos inorgânicos (esmalte e cimentos)

---

# Revestimentos

- Para a proteção contra corrosão dos metais pode-se aplicar revestimentos metálicos que formam camadas protetoras de óxidos e hidróxidos que reagem com o meio corrosivo impedindo a continuidade do ataque à superfície da peça
- Podemos apresentar um comportamento anódico ou catódico em relação ao metal base:
  - ✓ **Anódico**: por exemplo: o Al, Zn e Cd são anódicos em relação ao aço pois seus potenciais são maiores que o metal base. Se houver qualquer porosidade, descontinuidade ou falha no revestimento, este protegerá anódicamente o metal base, como uma espécie de ânodo de sacrifício

---

# Revestimentos

- Para a proteção contra corrosão dos metais pode-se aplicar revestimentos metálicos que formam camadas protetoras de óxidos e hidróxidos que reagem com o meio corrosivo impedindo a continuidade do ataque à superfície da peça
- Podemos apresentar um comportamento anódico ou catódico em relação ao metal base:
  - ✓ **Catódico**: aplicação de metais mais nobres que o metal base. Protegem o metal pela formação de uma camada contínua e não porosa, isolando-o do meio corrosivo, sendo esta camada imune ao ataque do meio

---

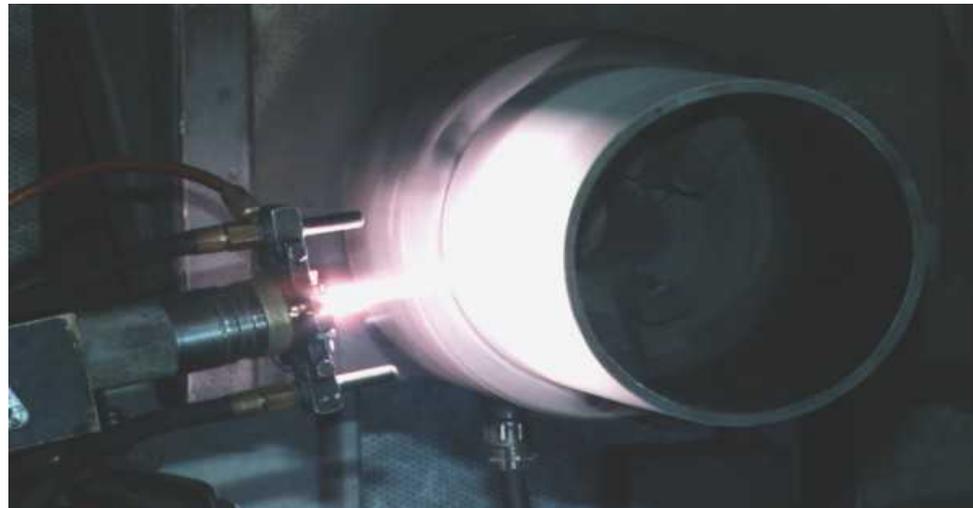
# Revestimentos

- Técnica para se conseguir mudar propriedades superficiais de uma peça sem alterar o substrato
- Melhora nas propriedades de resistência à corrosão e à abrasão
- Requisitos:
  - ✓ O material deve ser condutor elétrico e suportar as temperaturas de revestimento sem perder suas propriedades
  - ✓ Material com bom acabamento superficial (retífica)
  - ✓ Ausência de impurezas e resíduos superficiais
  - ✓ Não podem apresentar rebarbar
- Principais processos para revestimento:
  - ✓ Aspersão a plasma
  - ✓ PVD

---

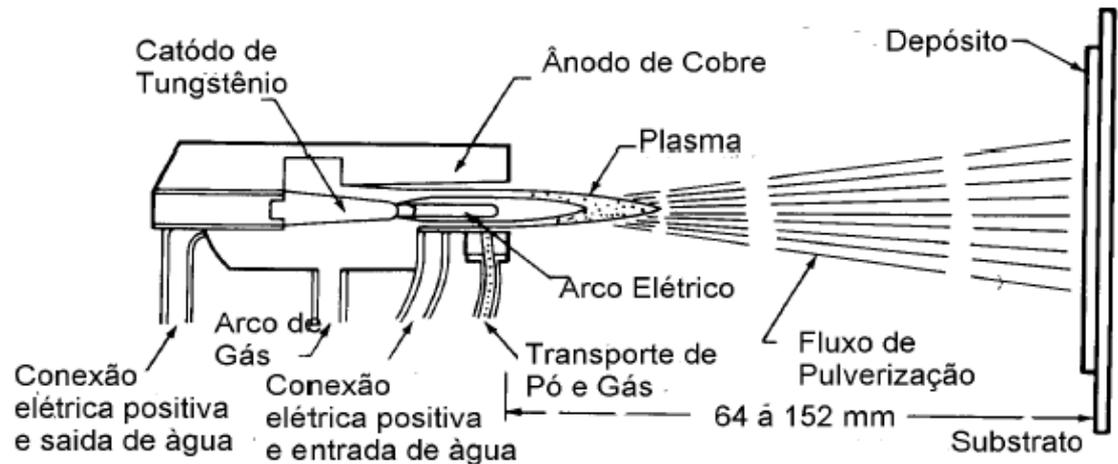
# Aspersão Térmica a Plasma

- Aspersão de um material aquecido em uma superfície para formação de revestimento
- Material na forma de pó é injetado em uma chama de plasma em ultra alta temperatura onde é rapidamente aquecido e acelerado
- Material aquecido impacta no substrato e é rapidamente resfriado



# Aspersão Térmica a Plasma

- Plasma: gases excitados a níveis energéticos muito altos
- Plasma iniciado por uma descarga elétrica
- Gás de plasma: argônio, hidrogênio, nitrogênio
- Temperatura: de 7000 a 20000 K
- Velocidade da chama: MACH 2



---

# Aspersão Térmica a Plasma

- Vantagens:
  - ✓ Utilização de materiais com alto ponto de fusão como metais refratários (tungstênio) e cerâmicas
  - ✓ Revestimento mais estável
  - ✓ Versatilidade
- Desvantagens:
  - ✓ Complexidade do processo
  - ✓ Alto custo

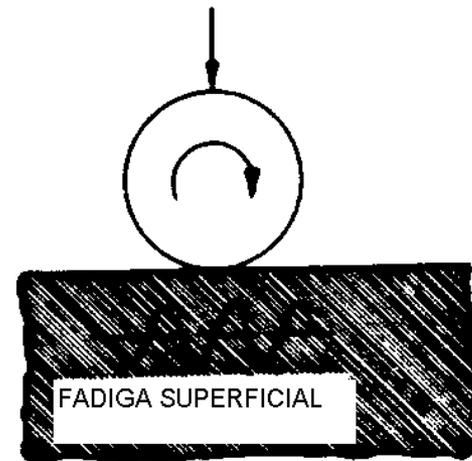
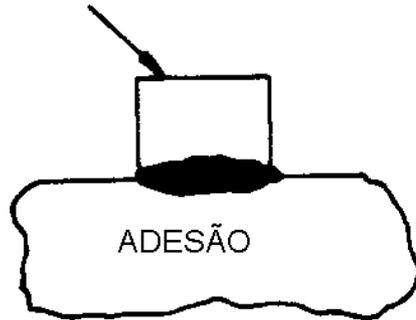
---

# Desgaste

- O desgaste é definido como a perda progressiva de material de uma superfície sólida devido ao contato e movimento relativo a um outro sólido, líquido ou gás
- O processo de desgaste não é exclusivamente mecânico, uma vez que processos corrosivos podem atuar sinergisticamente.
- Raramente provoca falhas catastróficas, pois é um processo razoavelmente previsível e detectável

# Desgaste

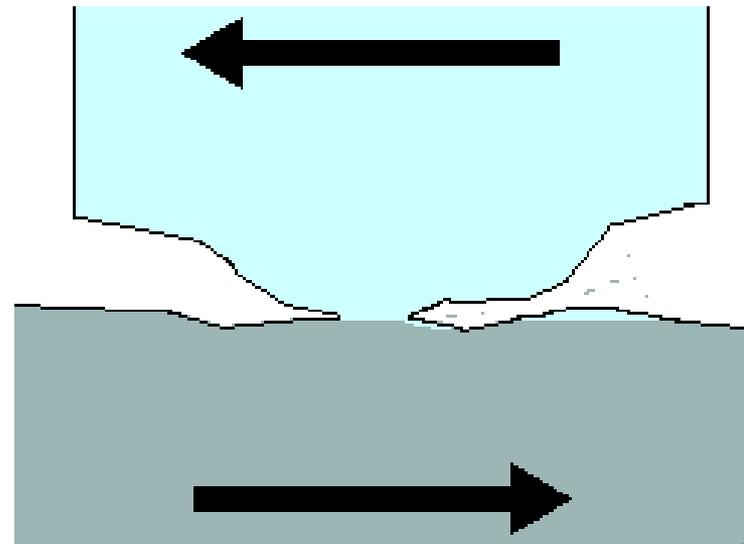
- Principais mecanismos de desgaste:



---

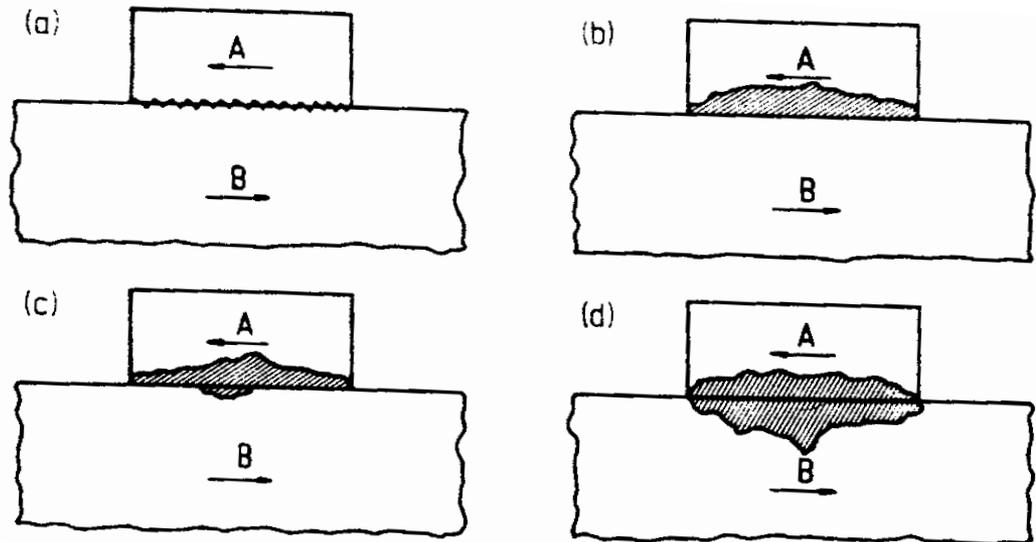
# Desgaste Adesivo

- É causado pela transferência de material de uma superfície a outra durante seu movimento relativo, devido a um processo de soldagem no estado sólido
- O escorregamento de uma superfície em relação a outra provoca ruptura da junção, resultando em um pico mais alto em uma superfície e mais baixo na outra
- Eventualmente, com uma progressão do deslizamento, pode ocorrer a quebra da ponta de um pico, formando uma partícula que atua como um abrasivo na superfície



# Desgaste Adesivo

- Se a resistência adesiva da junção é menor do que a resistência coersiva dos materiais, então a junção romperá no ponto original de contato e não haverá perda de material em nenhuma das superfícies (a) . Se a resistência adesiva for maior, a ruptura da junção se dará dentro da asperidade mais fraca (b) (c). Junções de alta resistência, devido à adesão entre materiais iguais ou similares, podem ser separadas em partes iguais em ambos os lados da interface formada (d).



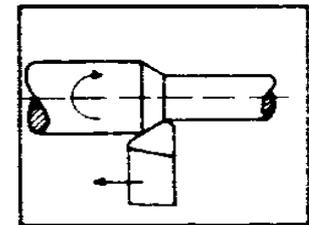
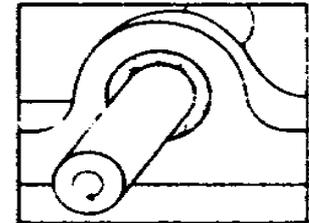
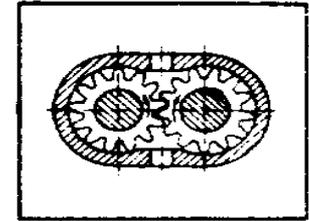
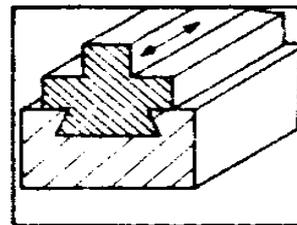
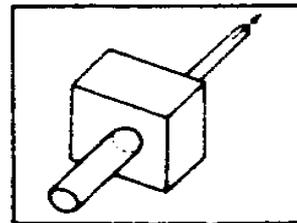
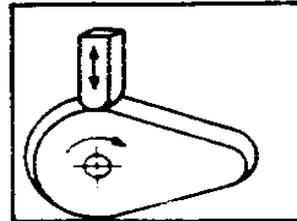
---

# Desgaste Adesivo

- Embora esta transferência represente uma forma de desgaste, processos típicos envolvem formação de partículas separadas ou detritos de desgaste
- No caso do desgaste adesivo, a formação de detritos provavelmente envolve o enfraquecimento do topo de uma asperidade devido à tensão e com pressão em ciclos repetidos
- Eventualmente o impacto contra uma asperidade oposta é suficiente para quebrar a partícula enfraquecida da superfície para formar uma partícula de desgaste

# Desgaste Adesivo

- Peças corrediças na indústria, em máquina ferramenta, matrizes de trefilação em trefilação de fios; cames e pistões, engrenagens, mancais secos ou lubrificados e ferramentas de corte são exemplos de componentes que podem sofrer prejuízo devido à adesão



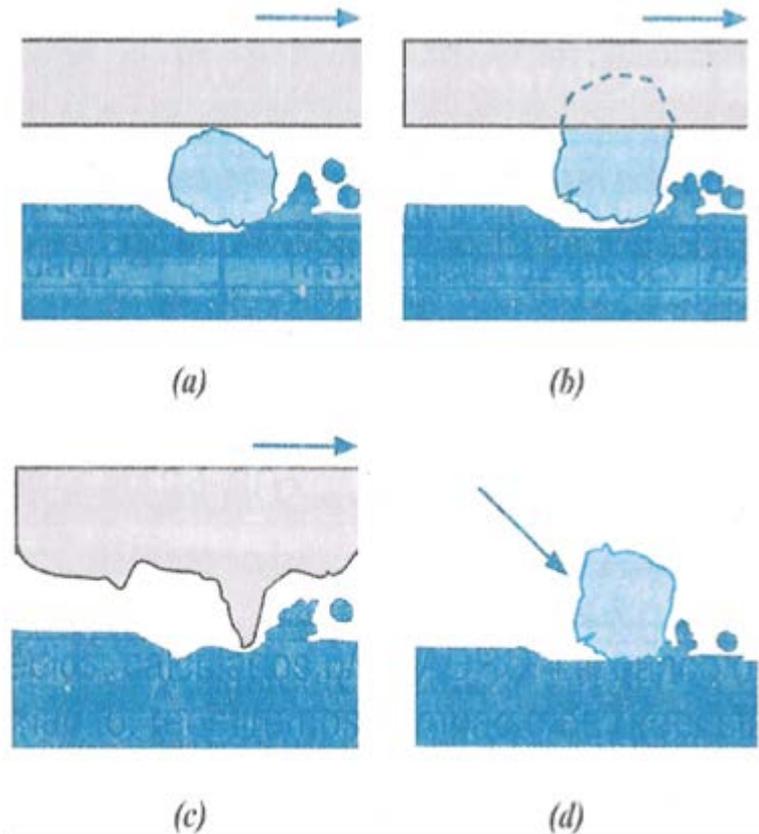
---

# Desgaste Adesivo

- Formas para minimização:
  - ✓ Utilização de materiais de alta dureza
  - ✓ Uso de lubrificantes adequados
  - ✓ Polimento das superfícies
  - ✓ Projetos que minimizem as cargas normais à superfície

# Desgaste Abrasivo

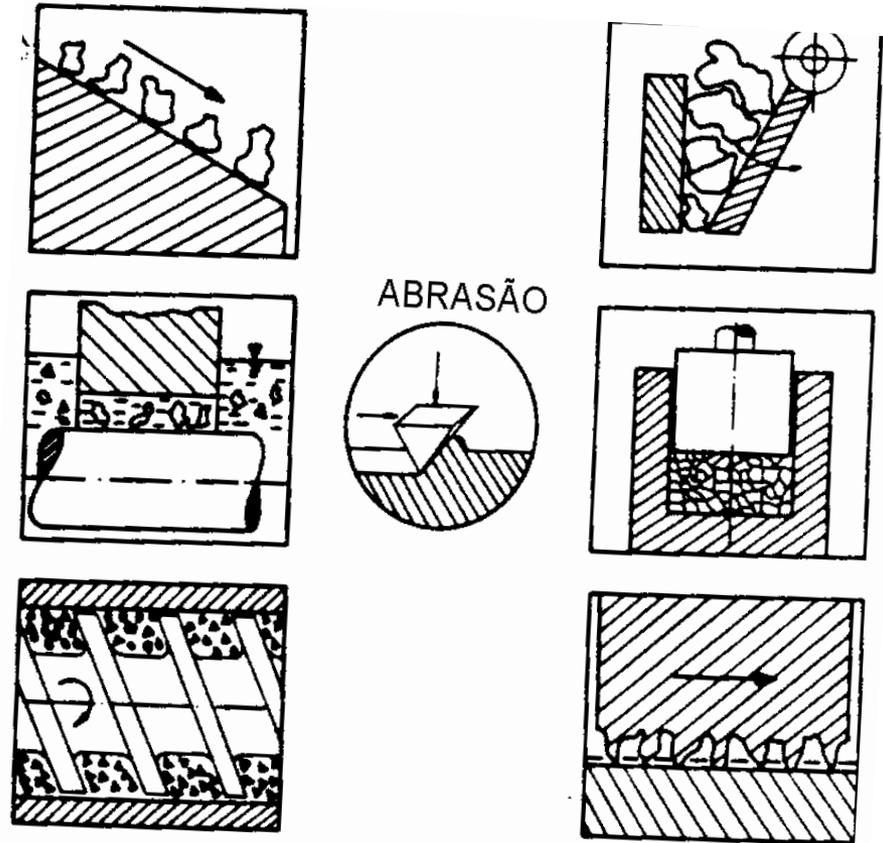
- Ocorre quando material é removido da superfície pelo contato com partículas abrasivas
- A fonte de partículas abrasivas pode ser externa, tal como poeira, ou pode ser interna, devido a partículas do próprio mecanismo de desgaste abrasivo ou adesivo como sílica e alumina
- O resultado é o corte ou sulcamento com uma perda de material de uma das superfícies que desenvolve uma aparência estriada, ranhurada



- (a) Partícula solta entre duas superfícies
- (b) partícula presa entre duas superfícies
- (c) aspereza
- (d) erosão

# Desgaste Abrasivo

- Calhas de transporte, sistemas hidráulicos com pó, extrusoras, trituradoras de rochas, matrizes em metalurgia do pó e escorregamentos nos quais a superfície do contracorpo exibe protuberâncias ou partículas duras encrustadas, são componentes que podem sofrer desgaste devido à abrasão

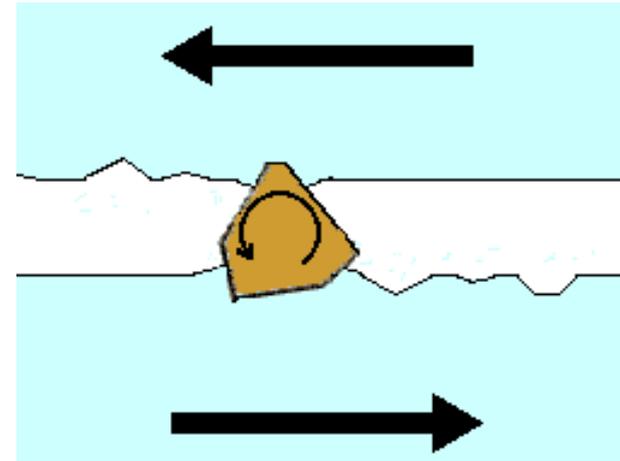
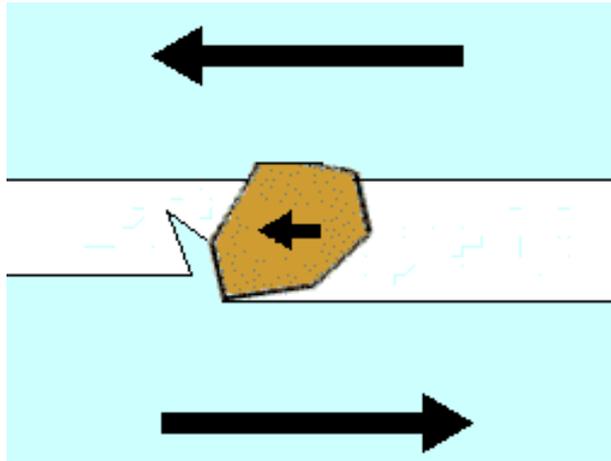
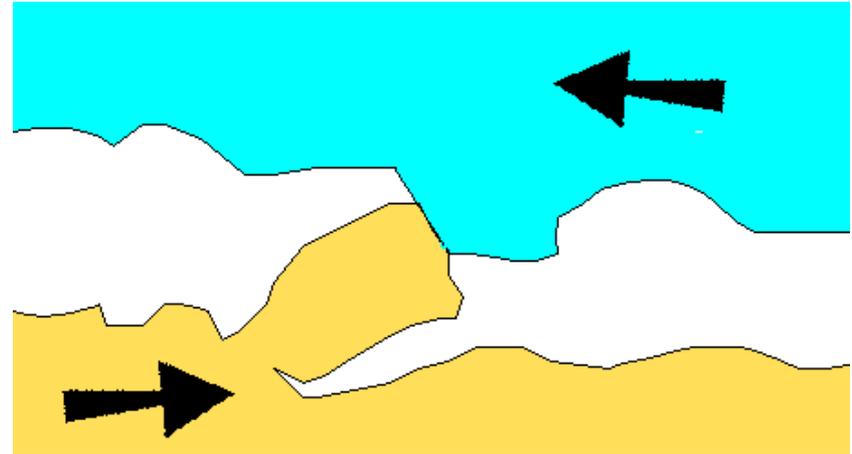
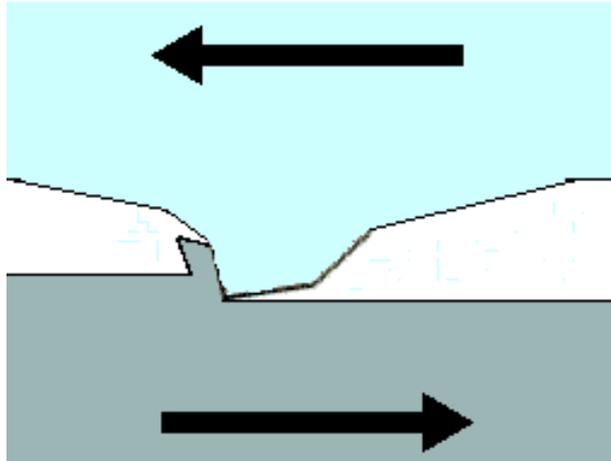


---

# Desgaste Abrasivo

- O desgaste abrasivo pode ser classificado como a dois ou três corpos, A dois corpos a remoção do material é provocada pelo riscamento ocorrido pela penetração do pico dos relevos da superfície com maior resistência mecânica ou maior dureza, na superfície com menor dureza. Eventualmente estes picos que são mais frágeis podem ser rompidos, podendo promover o aumento da intensidade deste processo
- No desgaste a três corpos, existem partículas duras se movendo entre as duas superfícies, onde dependendo dos ângulos instantâneos entre as extremidades destas partículas e as superfícies de contato, pode ocorrer um menor ou maior grau de penetração

# Desgaste Abrasivo

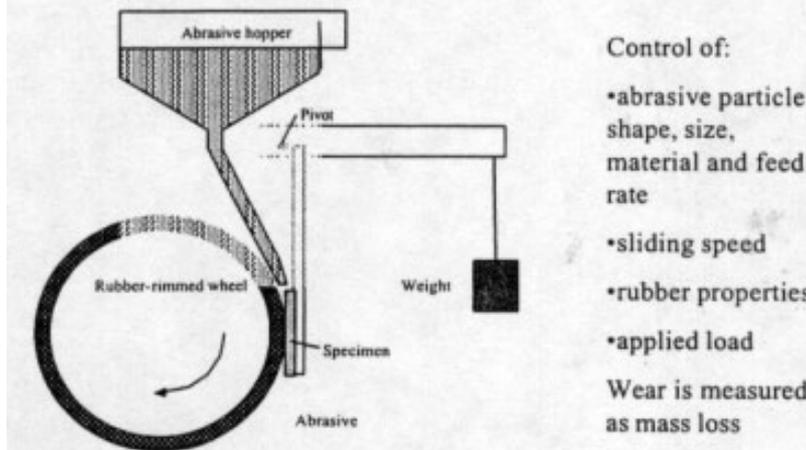


# Desgaste Abrasivo

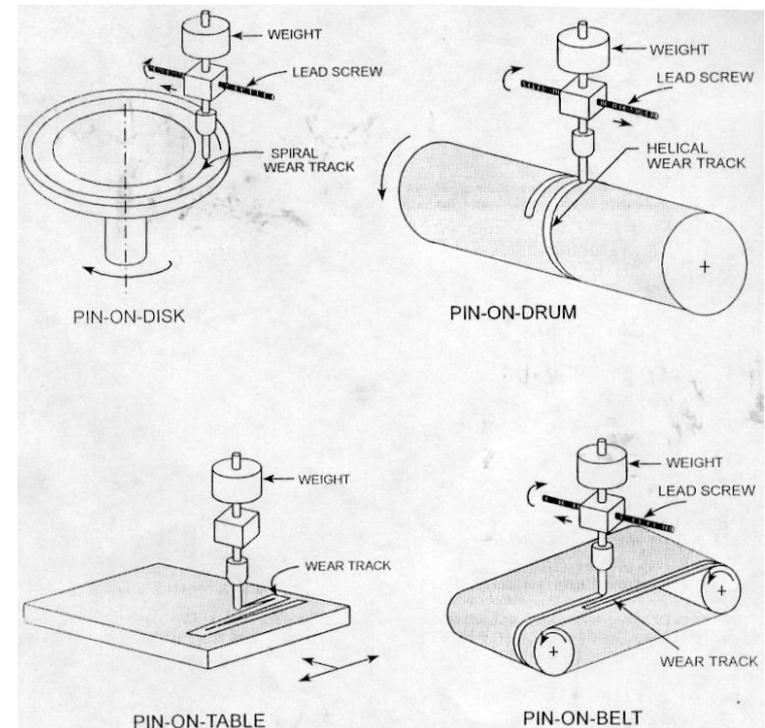
- Testes padronizados:

- ✓ 3 Corpos –  
Roda de borracha

## Dry sand rubber wheel test - ASTM standard G65



- ✓ 2 Corpos –  
Pino contra lixa



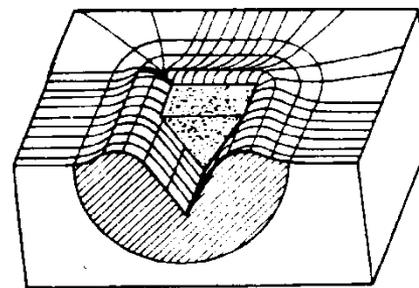
---

# Desgaste Abrasivo

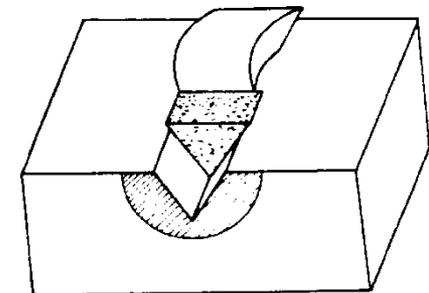
- Fatores que influenciam no desgaste abrasivo:
  - ✓ Tamanho das partículas do abrasivo: normalmente quanto maiores , maior o desgaste
  - ✓ Dureza das partículas com relação à dureza das superfícies: importante na medida em que determina se as partículas de desgaste se incrustarão nas superfícies
  - ✓ Forma das partículas: partículas angulares produzem maior desgaste
  - ✓ A interação entre a partícula abrasiva e a superfície pode se dar por microsulcamentos, microcortes, microtrincas ou microfadiga

# Desgaste Abrasivo

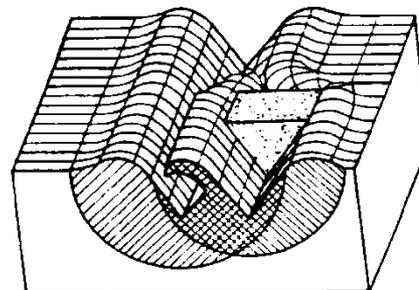
- O microtrincamento pode ocorrer quando altas tensões concentradas são impostas pelas partículas abrasivas, particularmente na superfície de materiais frágeis
- O microssulcamento e o microcorte são as interações dominantes em muitos materiais duteis
- O material que é empurrado continuamente para os lados pela passagem das partículas, pode “quebrar” por fadiga de baixo ciclo



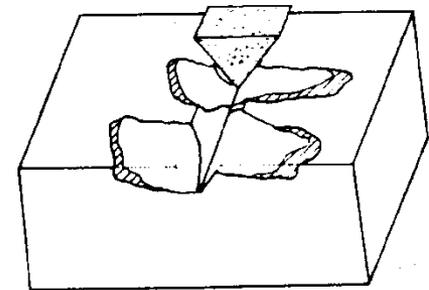
Microssulcamento



Microcorte



Microfadiga



Microtrinca

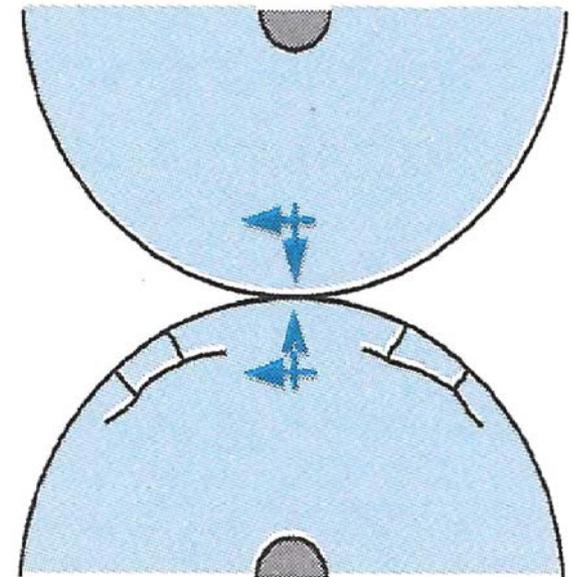
---

# Desgaste Abrasivo

- Como reduzir o desgaste abrasivo:
  - ✓ Abrasão a dois corpos:
    - Melhorar o estado superficial
    - Reduzir as cargas aplicadas localmente
    - Aplicação de camadas superficiais em elastômeros
    - Rodagem cuidada
    - Aumentar a dureza das superfícies (alternativa aumentar a tenacidade)
  - ✓ Abrasão a dois corpos:
    - Evitar a entrada de partículas
    - Existência de zonas próprias para capturar partículas
    - Filtragem apropriada em sistemas lubrificados

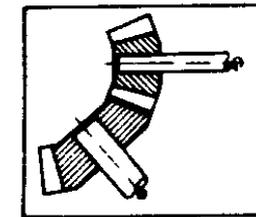
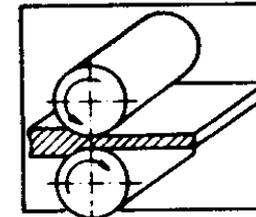
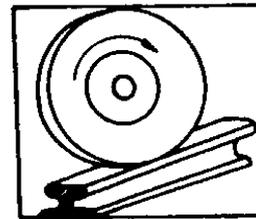
# Desgaste por Fadiga

- Pode ser caracterizado pela formação de trincas superficiais e/ou sub-superficiais, e posterior remoção de material devido ao comportamento cíclico de superfícies sólidas
- Contato por escorregamento e/ou rolamento entre sólidos ou impacto respectivo de sólidos e/ou líquidos em uma superfície são os principais responsáveis pela fadiga do material
- Quando ocorre rolamento entre superfícies, a máxima tensão cisalhante ocorre abaixo da superfície, dando origem a trincas que se propagam paralelamente à superfície e, posteriormente, afloram, destacando material

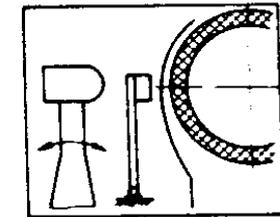
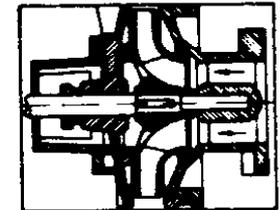
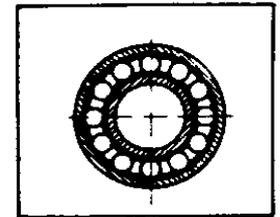
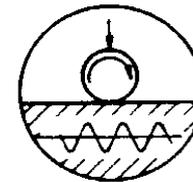


# Desgaste por Fadiga

- Pode ocorrer severo prejuízo em sistemas de rodas de trem e trilho, rolos para laminação a quente e a frio, bombas envolvendo partículas que impactam e outros artifícios mecânicos. Este mecanismo é particularmente importante em mancais de rolamento e é usualmente chamado "fadiga de contato por rolamento".
- A fadiga de superfície pode também ser causada pelo contato lubrificado hidrodinamicamente como em cames e seguidores

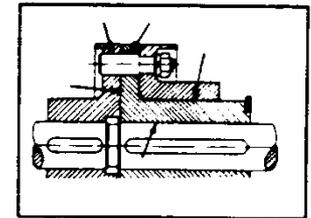
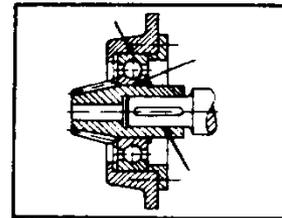


FADIGA

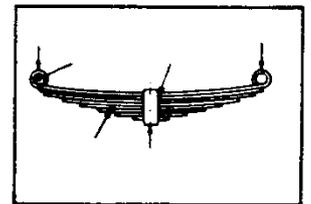
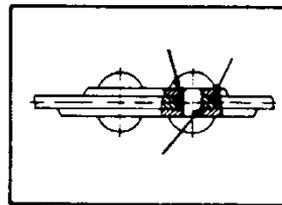
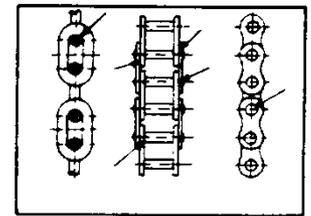
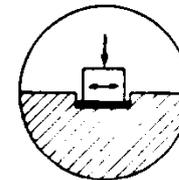
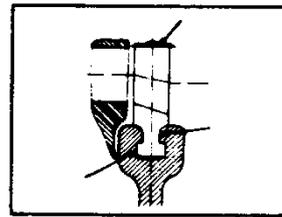


# Desgaste Triboquímico

- É caracterizado pela fricção de duas superfícies metálicas que sofrem um processo corrosivo pelo meio que as cercam
- O desgaste é estabelecido pela remoção contínua de material da superfície e formação de novas camadas que reagem com o meio
- Componentes montados por interferência, feixes de molas, fios de cabos, juntas rebitadas, qualquer situação que envolva movimentos de pequena magnitude entre duas superfícies sólidas



DESGASTE  
TRIBOQUÍMICO



---

# Desgaste Triboquímico

- Existe uma especial forma de desgaste triboquímico. É o FRETTING, que é causado quando duas superfícies estão em contato sob movimento relativo tangencial oscilatório de pequena amplitude
- A amplitude do movimento relativo é realmente muito pequena, da ordem de  $80\mu\text{m}$ . Amplitudes maiores resultam em prejuízo similar ao do desgaste por escorregamento

---

# Bibliografia Recomendada

- VICENTE GENTIL, CORROSÃO;
- ASKLAND, D.R. - The Science and Engineering of Materials - Solution manual, Chapman & Hall, 1996. 400p.
- CALLISTER JR, W.D. - Ciência e engenharia e materiais: uma introdução. 5 ed.; LTC, Rio de Janeiro, 2000. 259p.