

---

# **SMM0193 – ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS I**

---

Prof. Dr. José Benedito Marcomini

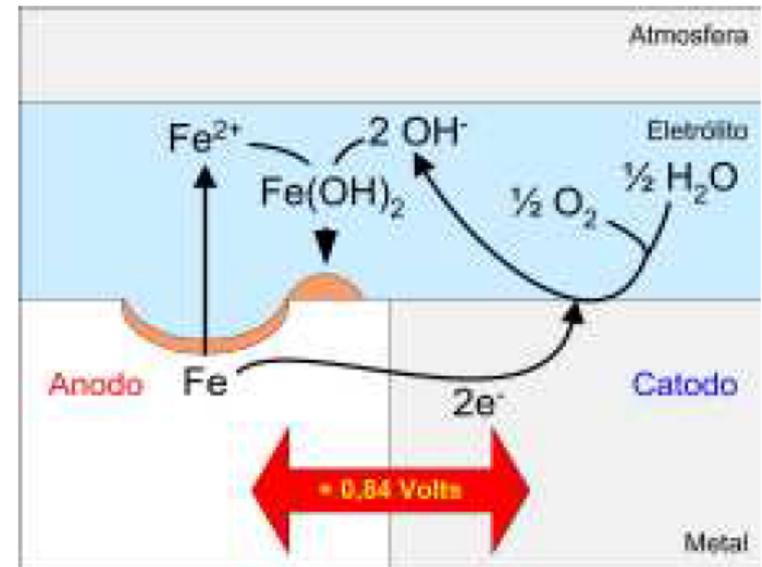
**CORROSÃO E PROTEÇÃO**

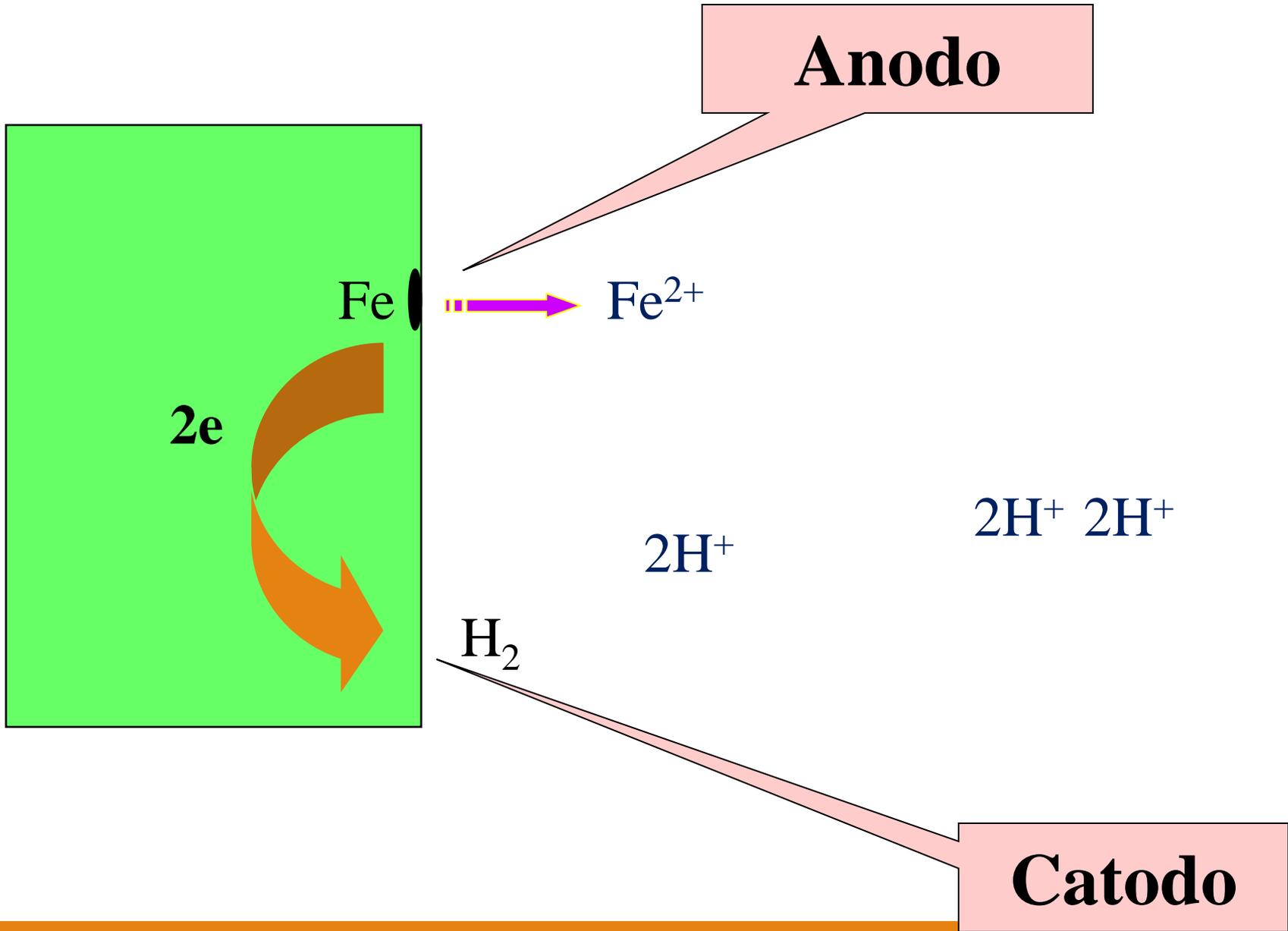
## REFERÊNCIAS:

- Vicente Gentil, **Corrosão**, LTC-4edição, 2003;
- Enori Gemelli, **Corrosão de Materiais metálicos e sua caracterização**, LTC, 2001;
- Lalgudi V. Ramanathan, **Corrosão e seu controle**, Hemus, **1997**;
- **Stephan Wolynech, Técnicas eletroquímicas em Corrosão, EDUSP, 2003.**

# CORROSÃO

O quadro que descreve este processo incorpora três constituintes essenciais: o anodo, o catodo e uma solução eletricamente condutora. O anodo (-) é o local onde o metal é corroído, a solução eletricamente condutora é o meio corrosivo, e o catodo (+) é parte da mesma superfície metálica (ou outro metal em contato com ela) que constitui o outro eletrodo da cela, e não é consumido no processo de





# 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.

Em 28 de abril de **1988**, o Boeing 737 da Aloha Airlines decolou do aeroporto da cidade de Hilo, no arquipélago do Havaí, em uma breve viagem de rotina até Honolulu, numa ilha próxima. Alguns dos noventa passageiros reclamaram um pouco da turbulência no início do voo, mas, minutos depois, **o sinal luminoso mandava manter os cintos de segurança atados (isso salvou vidas)**. Pois, assim que o avião, com dezenove anos de uso, nivelou a **7 000 metros**, a altitude prevista de voo, ouviu-se um forte estrondo e, subitamente, o **teto da primeira classe desapareceu** no ar deixando um rombo de 6 metros na fuselagem acima e ao lado da fileira de assentos.

**Uma comissária**, de pé no corredor, **foi sugada para fora**.

# 1988 – Acidente com o Boeing 737 da Aloha Airlines





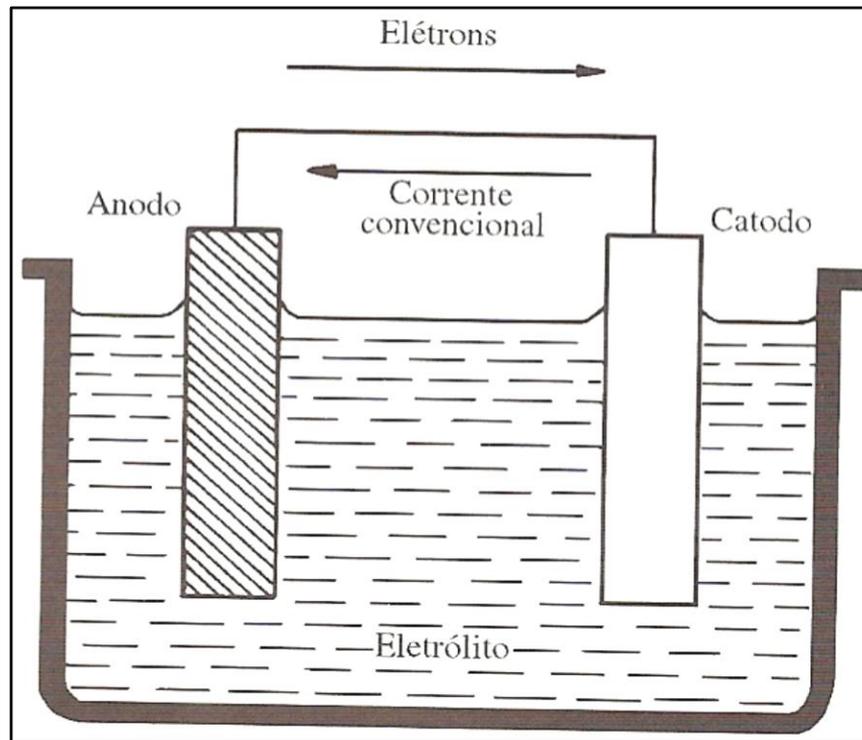


**Causa: corrosão-fadiga**

# CORROSÃO

## MECANISMO ELETROQUÍMICO:

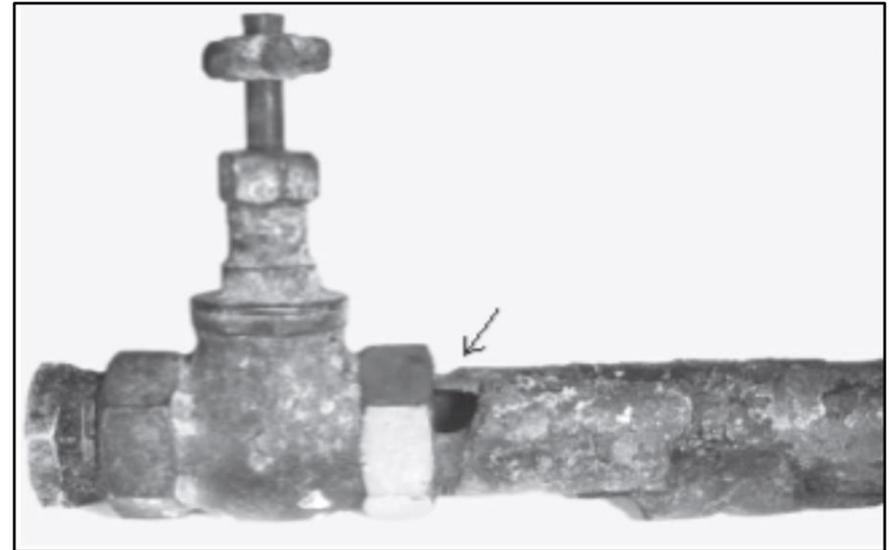
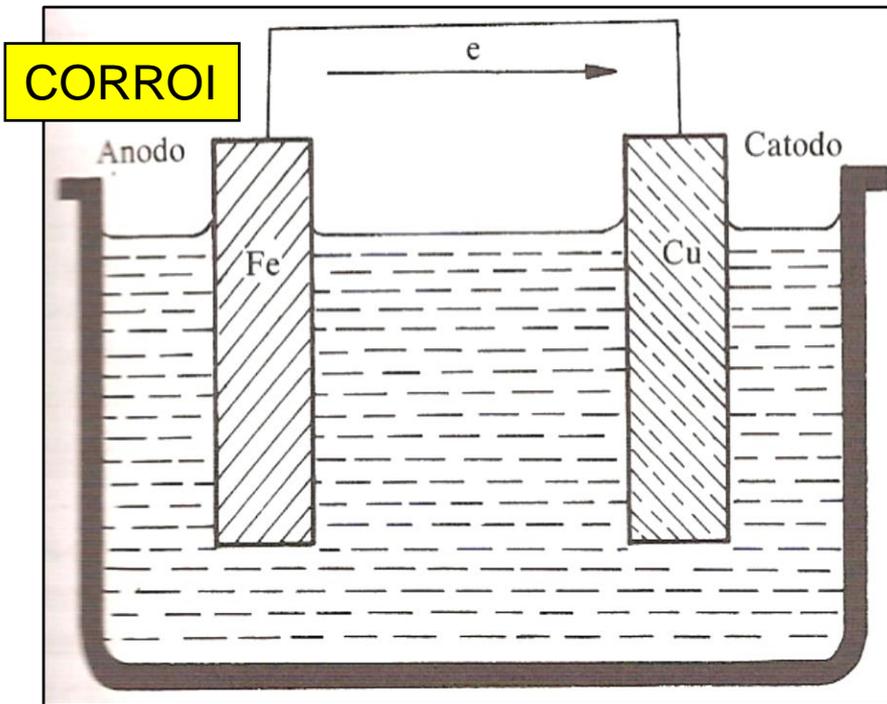
Na corrosão eletroquímica, os  $e^-$  são cedidos em determinada região e recebidos em outra, aparecendo uma pilha de corrosão.



# Pilhas de Eletrodos Metálicos Diferentes

## CORROSÃO GALVÂNICA:

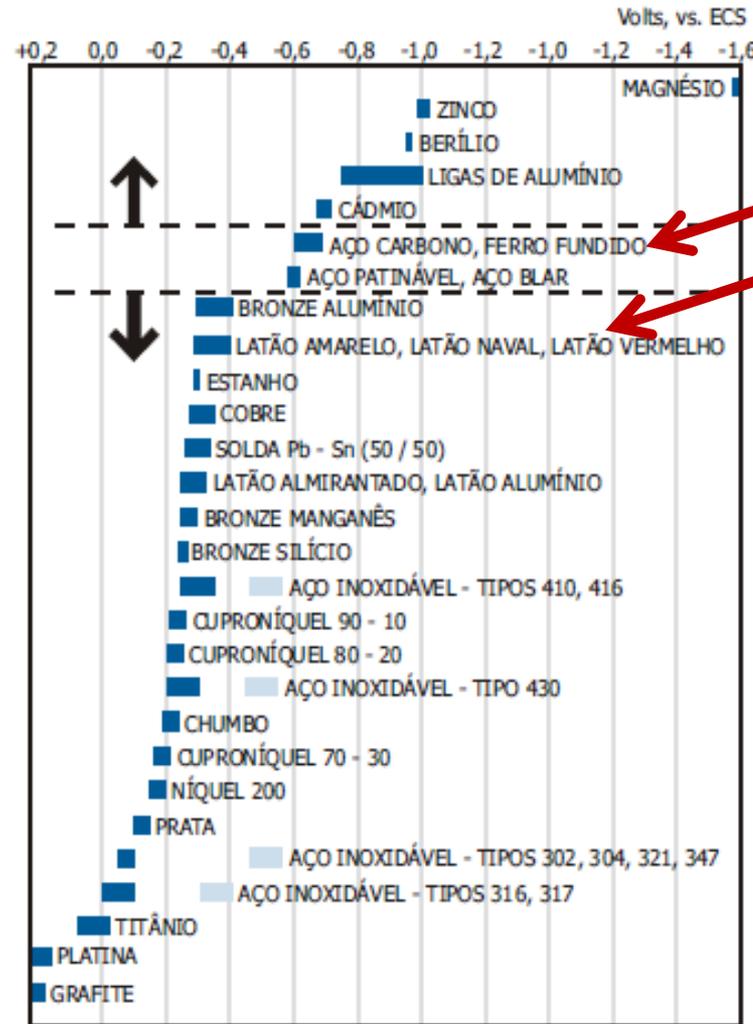
- Dois metais diferentes em contato, imersos num mesmo eletrólito.



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

# QUANTO MAIS NEGATIVO O POTENCIAL, MAIS FÁCIL A CORROSÃO

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



Potenciais de corrosão em água do mar em movimento (2,5 - 4,0 m/s)  
Temperatura entre 10 - 27 °C

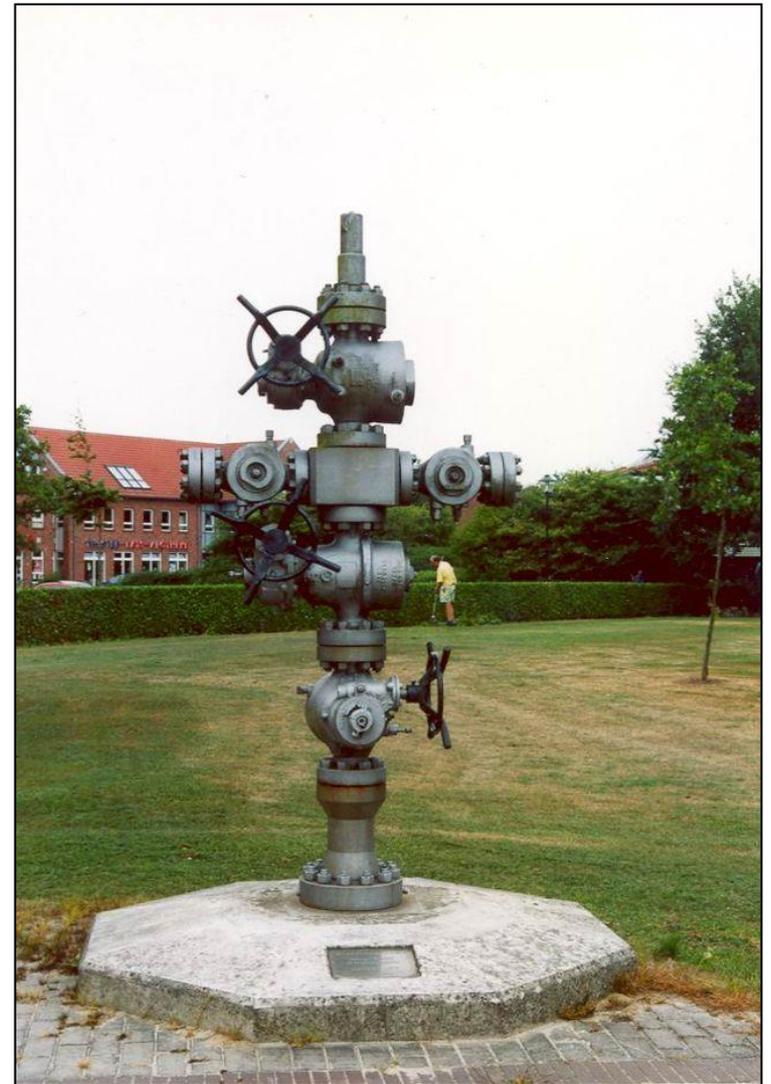
**Fe mais negativo  
que o latão: o Fe  
corrói e o Latão  
não!**



Corrosão localizada em componente de árvore de natal devido à corrosão galvânica



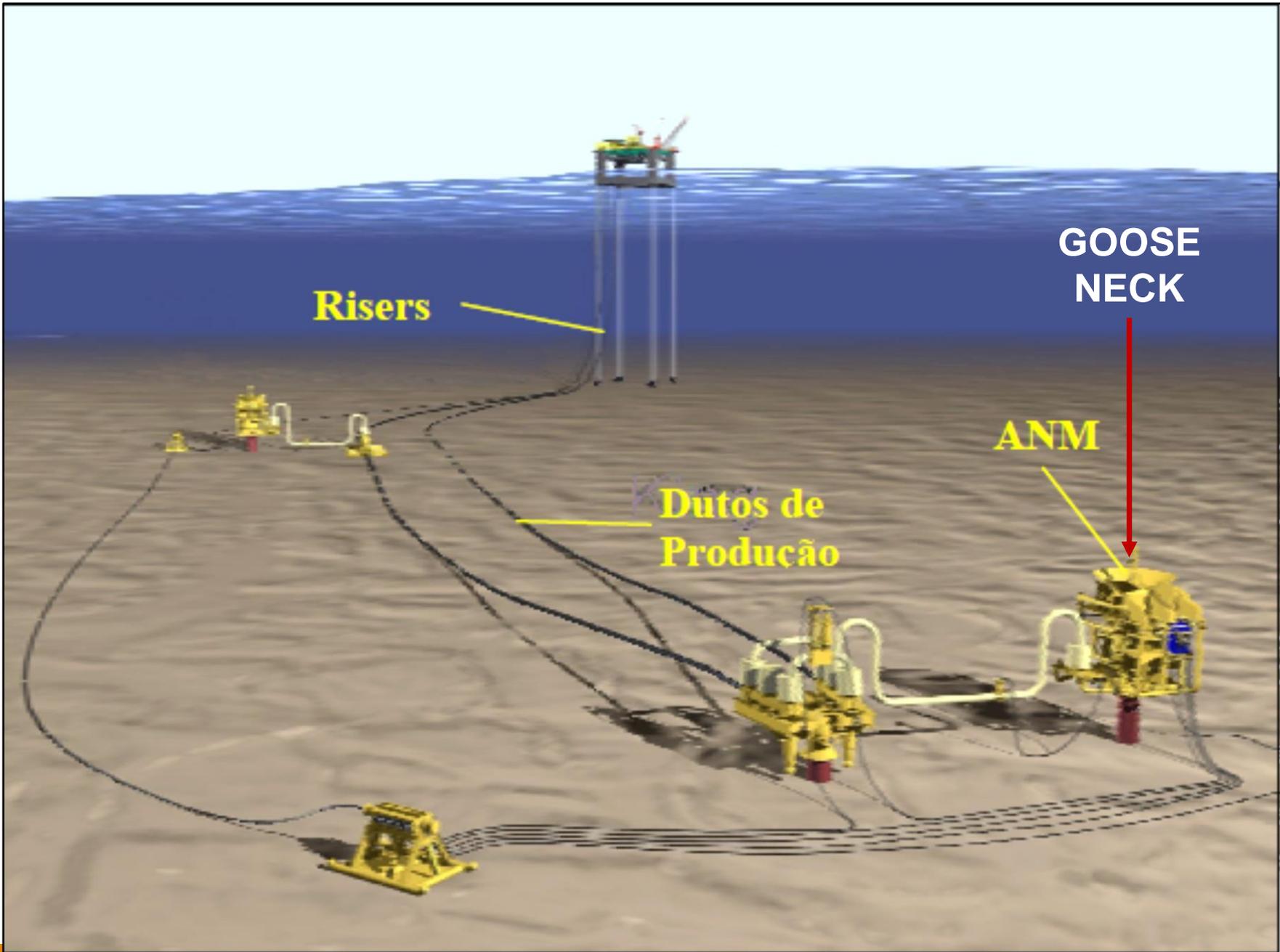
**ÁRVORE DE NATAL MOLHADA**



**ÁRVORE DE NATAL SECA**



**GOOSE NECK – PESCOÇO DE GANSO**



Risers

GOOSE  
NECK

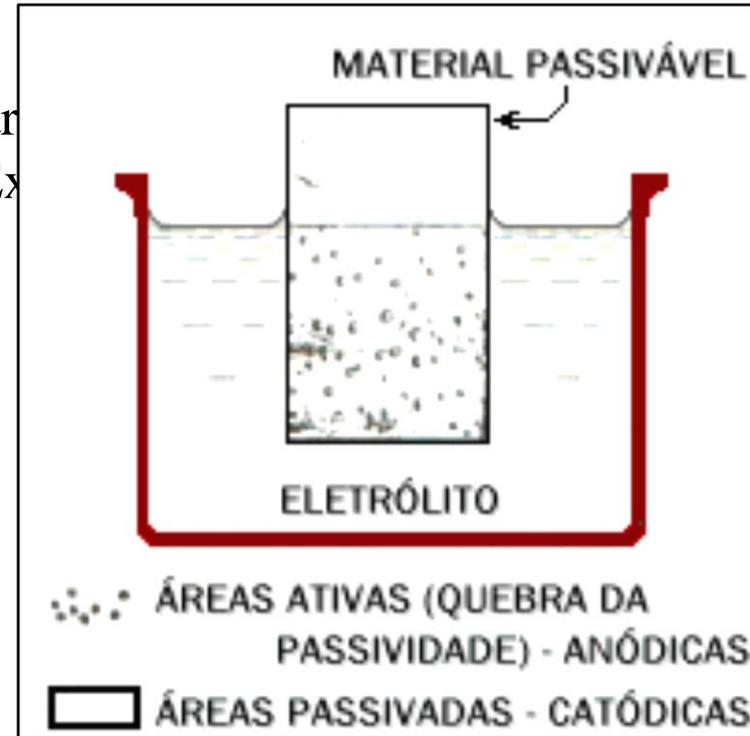
ANM

Dutos de  
Produção

# 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  $\text{I}^- \rightarrow$  Destroem a passivação ou impedem sua formação;
- **Área passivada: catodo.**



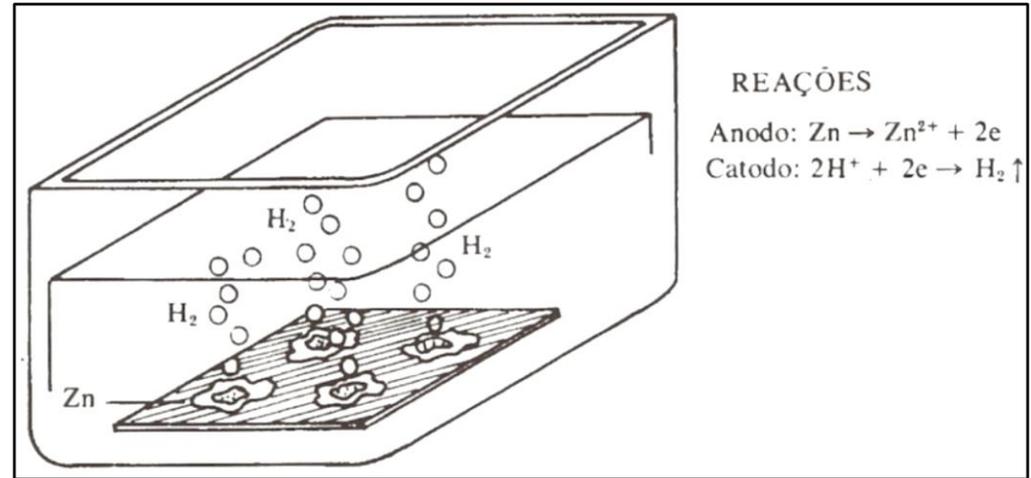
Destruição da passividade –pontos desprotegidos→ Pontos de metal ativo (anodos) vizinho de áreas de metal passivado (catodos): gera ddp da ordem de 0,5 V = **PILHA ATIVA-PASSIVA.**

# 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



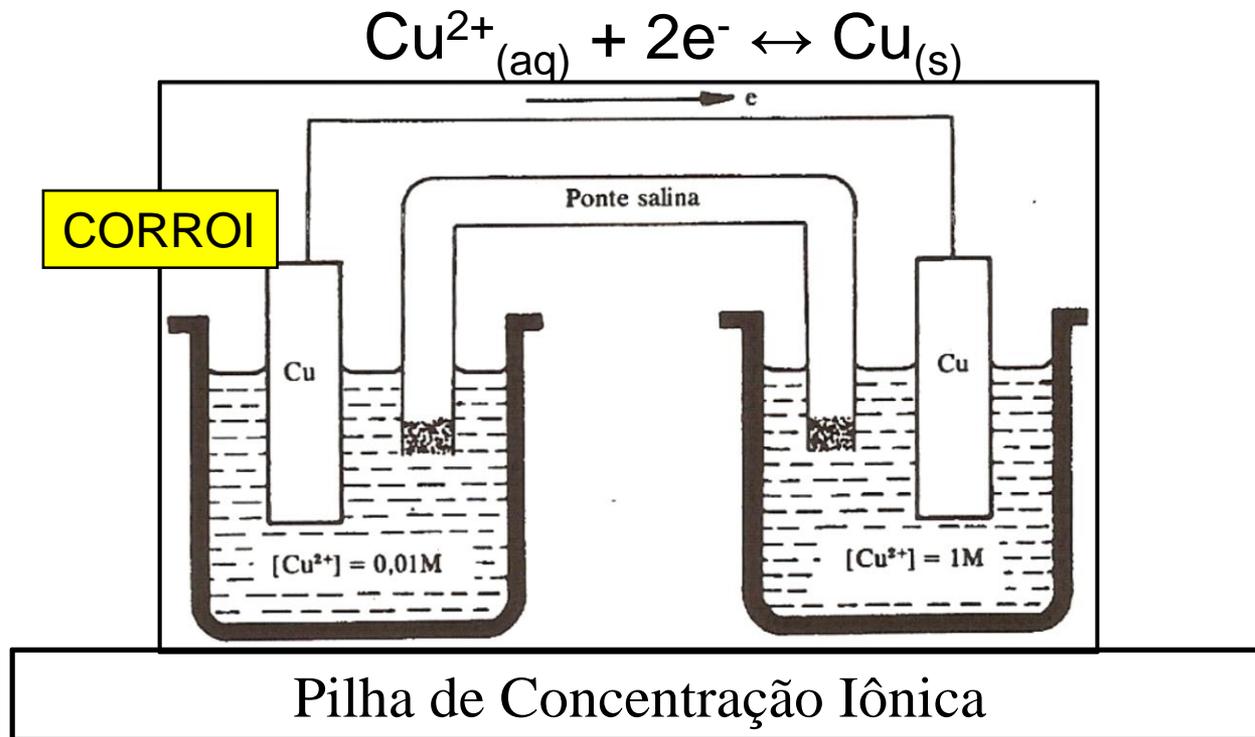
Placa de Zn impura em solução de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  = Pilha de Ação Local

# 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.

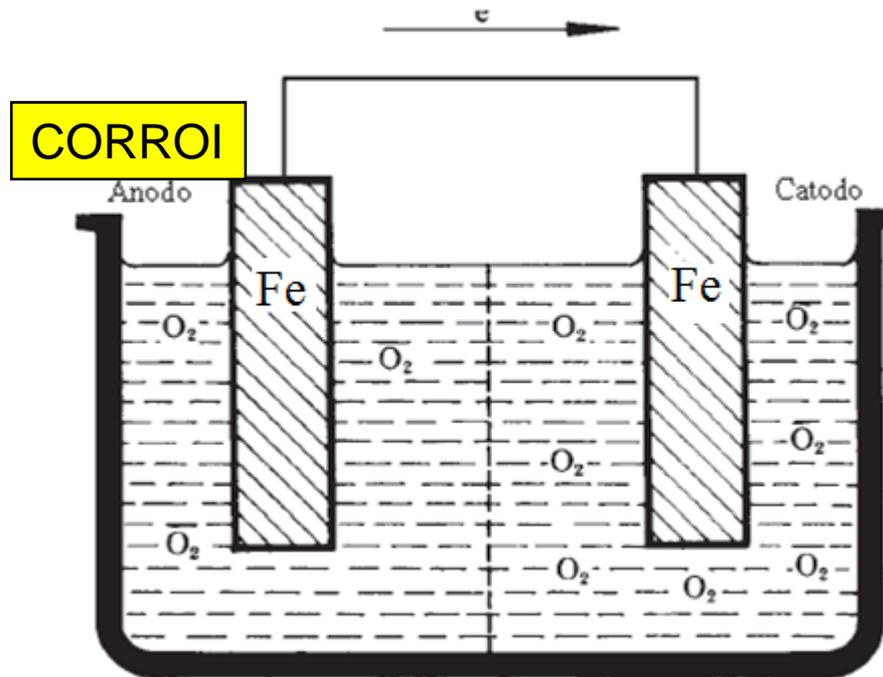


# Pilhas de Concentração

## 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.

# CORROSÃO ELETROLÍTICA

## CORRENTE ELÉTRICA EXTERNA

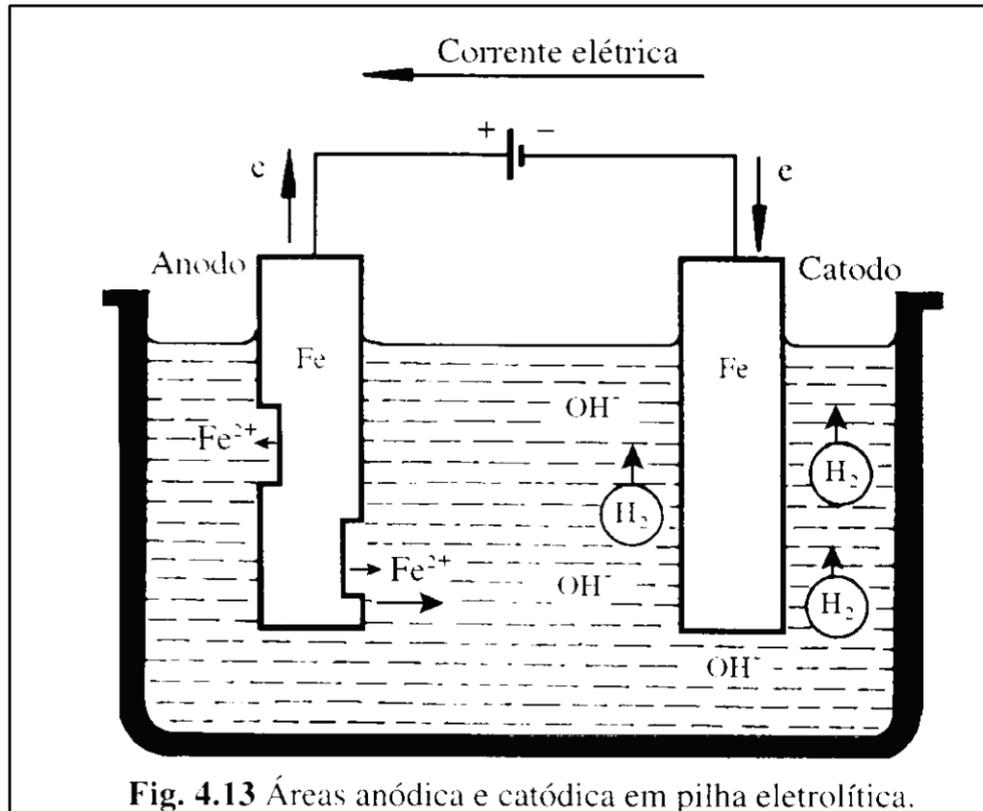


Fig. 4.13 Áreas anódica e catódica em pilha eletrolítica.

# **CLASSIFICAÇÃO DA CORROSÃO PELA MORFOLOGIA E MECANISMOS**

## EM PLACAS

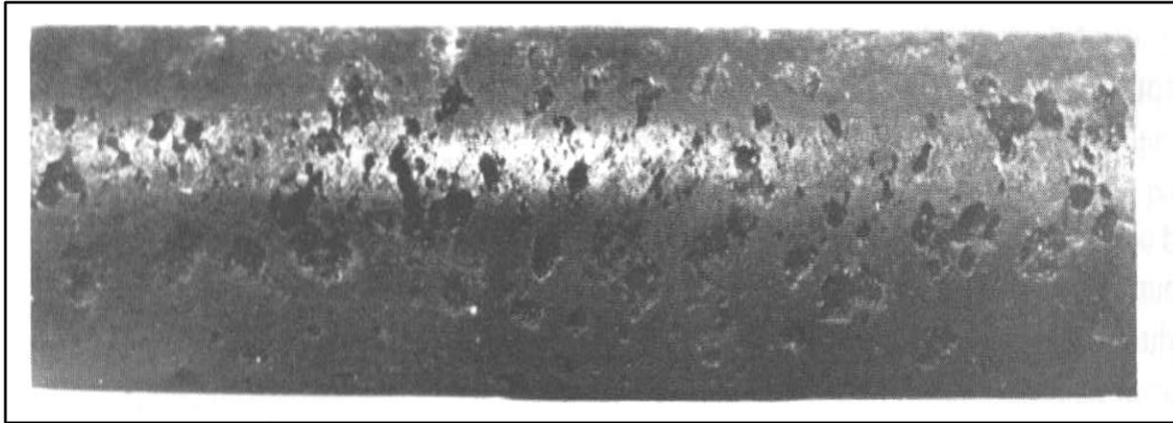
- Ocorre deslocamento;
- Placas de corrosão se torna muito espessa: fratura e perde aderência - exposição do metal.

**Corrosão em placas  
em chapa de aço  
carbono de costado  
de tanque**



## ALVEOLAR

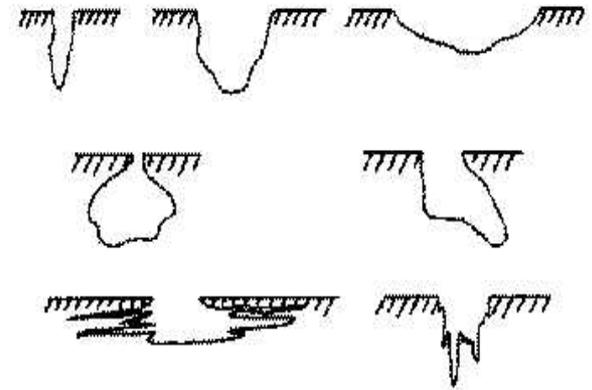
- Aspecto de crateras;
- Películas semi protetoras ou depósito de eletrólito. Ex: aeração diferencial



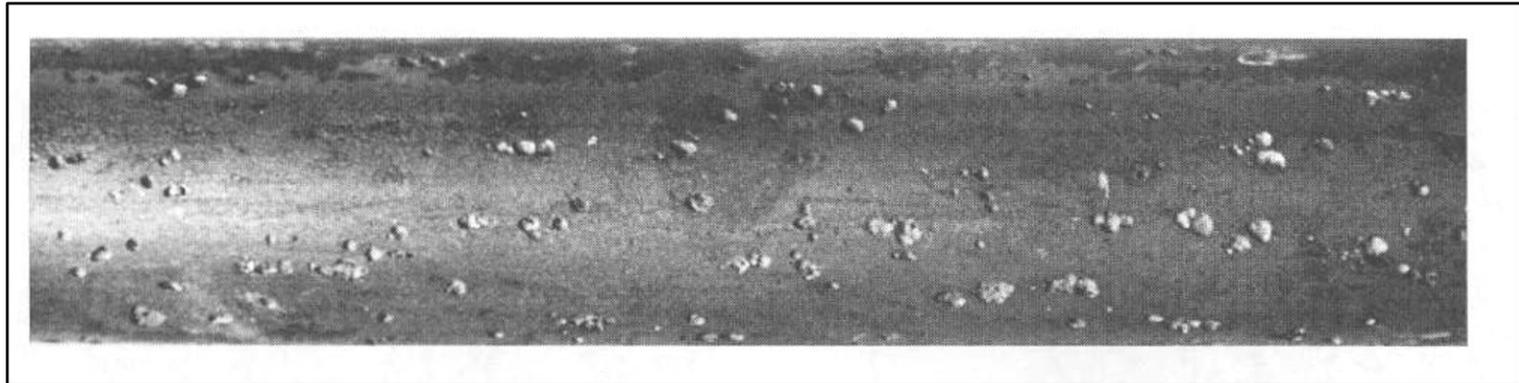
**Corrosão alveolar em tubo de aço carbono.**

## POR PITES

Pites localizados e com certa profundidade



Vários tipos de “pites” segundo a ASTM



Corrosão por “pites” em tubo de aço inoxidável AISI304

# ESFOLIAÇÃO

- Peças conformadas por laminação ou extrusão;
- Graãos alongados, inclusões ou segregações deformadas, em plaquetas alongadas;
- Pela corrosão, ocorre a separação das camadas e desintegração do material.

**Esfoliação em liga de alumínio**



## **CORROSÃO SELETIVA**

- **Corrosão preferencial de um elemento constituinte de uma liga.**
- **Caso mais comum: latão (dezincificação), podendo ocorrer também em outras ligas com remoção de alumínio (desaluminização), cobalto (descobaltização), ferro (grafitização).**
- **Latão: o zinco é corroído preferencialmente- a peça fica frágil e porosa;**
- **Regiões de cor avermelhada: cobre que não foi corroído que contrasta com a cor amarelada dos latões.**



**Parte interna de uma válvula de latão com corrosão por dezincificação: área de cor avermelhada e destruição da parte rosqueada.**

# TIPOS DE CORROSÃO

## CORROSÃO-FADIGA

Solicitação cíclica em meio agressivo



Corrosão por  
fadiga em junta de  
expansão

## FALHAS EM SERVIÇO

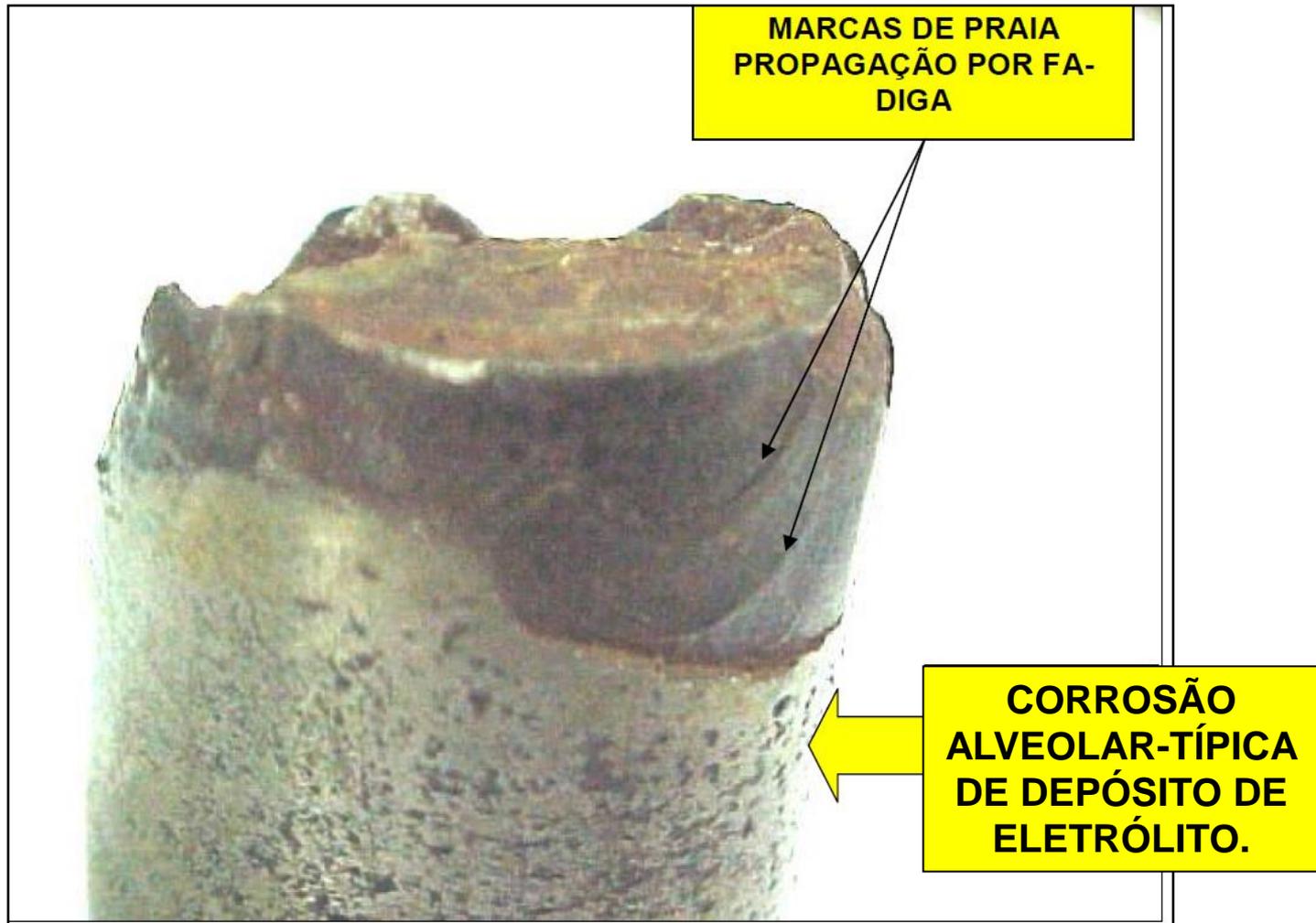
CASO IX -Aço laminado SAE4140,  
diâmetro 25,40mm - 2013



**EIXO DE CORRENTE DE ESTEIRA TRANSPORTADORA  
DE BAGAÇO DE CANA DE AÇUCAR-USINA DE ALCOOL**

# FALHAS EM SERVIÇO

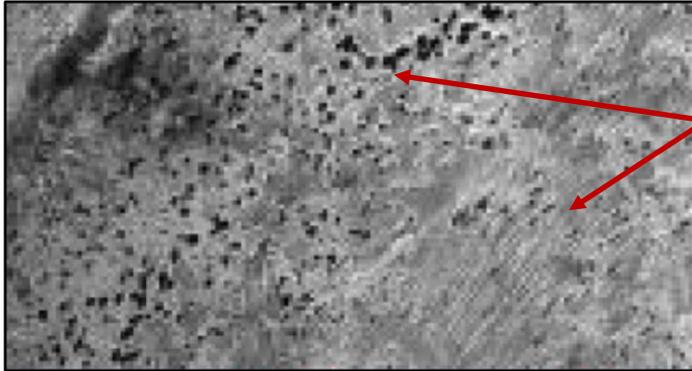
**CASO IX -Aço laminado SAE4140,  
diâmetro 25,40mm - 2013**



**CORROSÃO ALVEOLAR + FADIGA: FADIGA CORROSÃO**

# FALHAS EM SERVIÇO

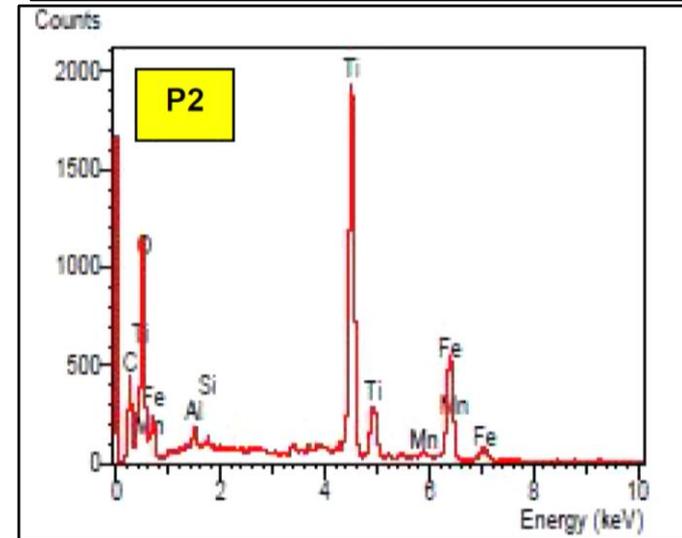
**CASO IX -Aço laminado SAE4140,  
diâmetro 25,40mm - 2013**



**ESTRIAS +  
CORROSÃO**



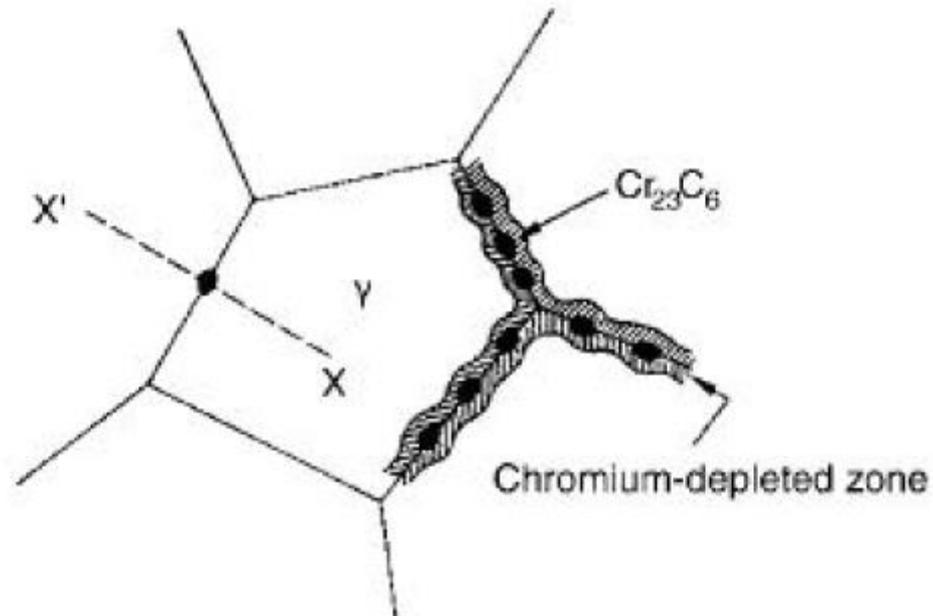
**POSSÍVEL ALOJAMENTO DE ELETRÓLITO**



**CORROSÃO ALVEOLAR + FADIGA: FADIGA CORROSÃO**

# Corrosão Intergranular

## Sensitização e corrosão intergranular



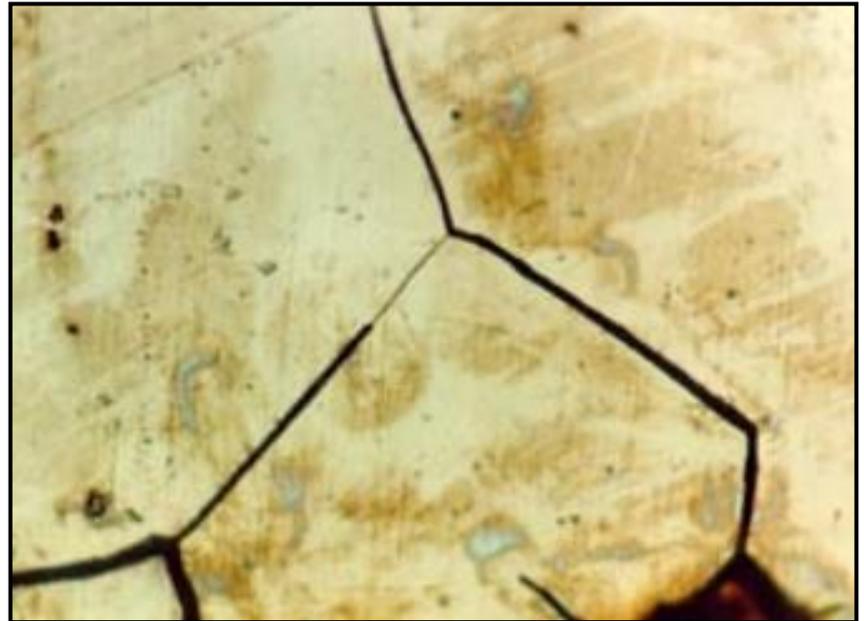
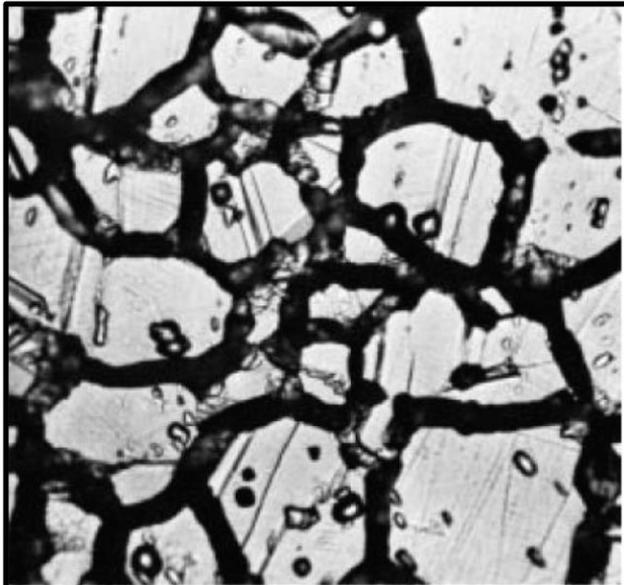
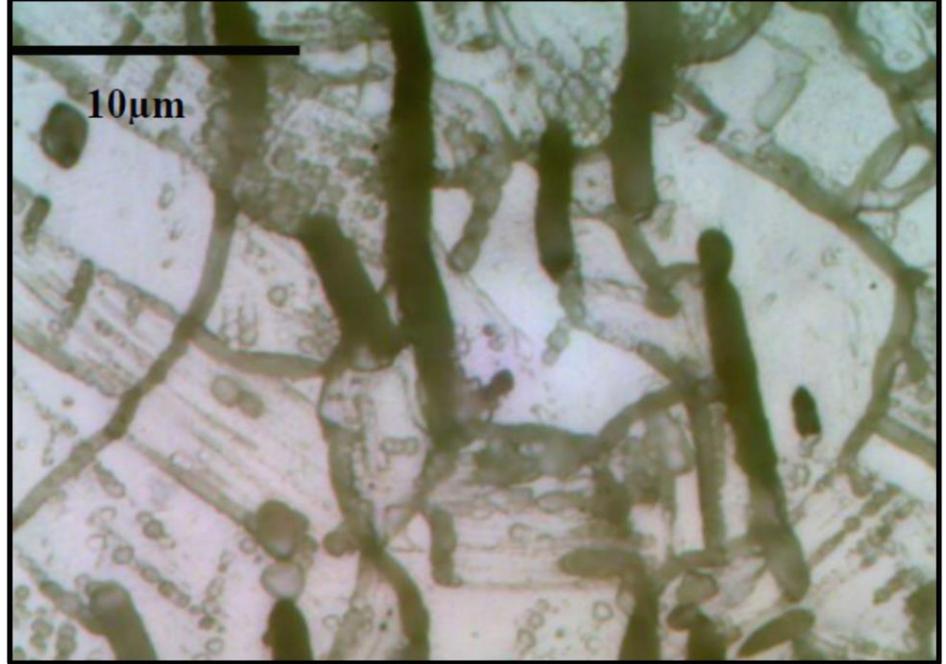
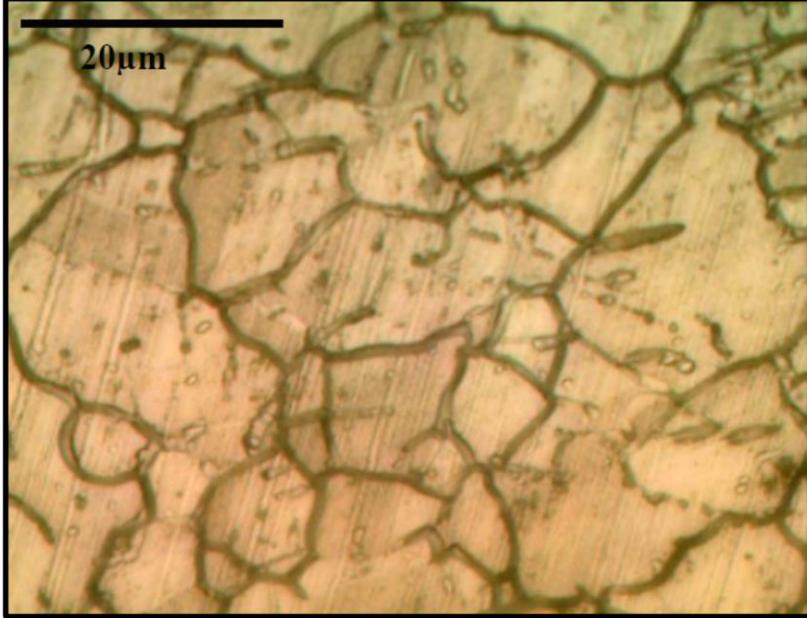
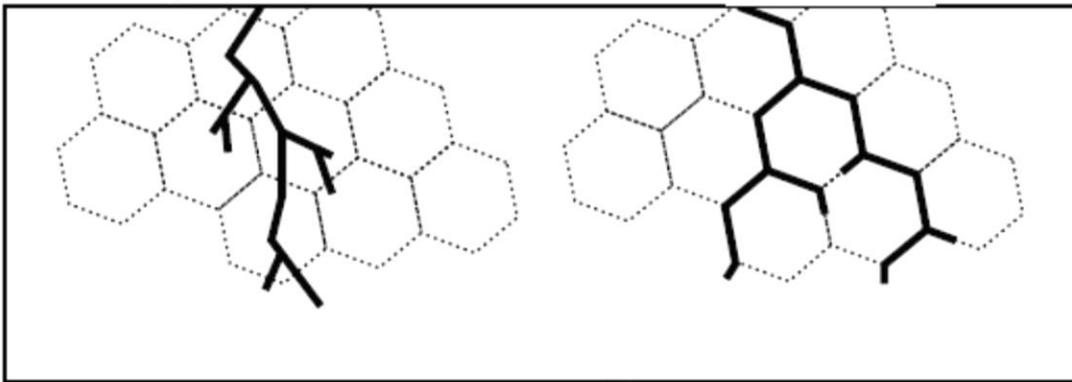


FIG. 3 Ditch Structure (500×) (One or more grains completely surrounded by ditches)

ASTM A 262-Fig.3 page 4.

# CORROSÃO SOB TENSÃO

UM PITE DE CORROSÃO (CONCENTRADOR DE TENSÕES) PODE SE FORMAR E, COMBINADO A SOLICITAÇÃO MECÂNICA OU TENSÃO RESIDUAL A TRINCA É NUCLEADA. A PROPAGAÇÃO É UMA COMBINAÇÃO ENTRE A CORROSÃO E TENSÃO MECÂNICA. AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS NA PRESENÇA DE  $\text{Cl}^-$  A  $60^\circ\text{C}$  (QUEBRA A CAMADA PASSIVADORA).



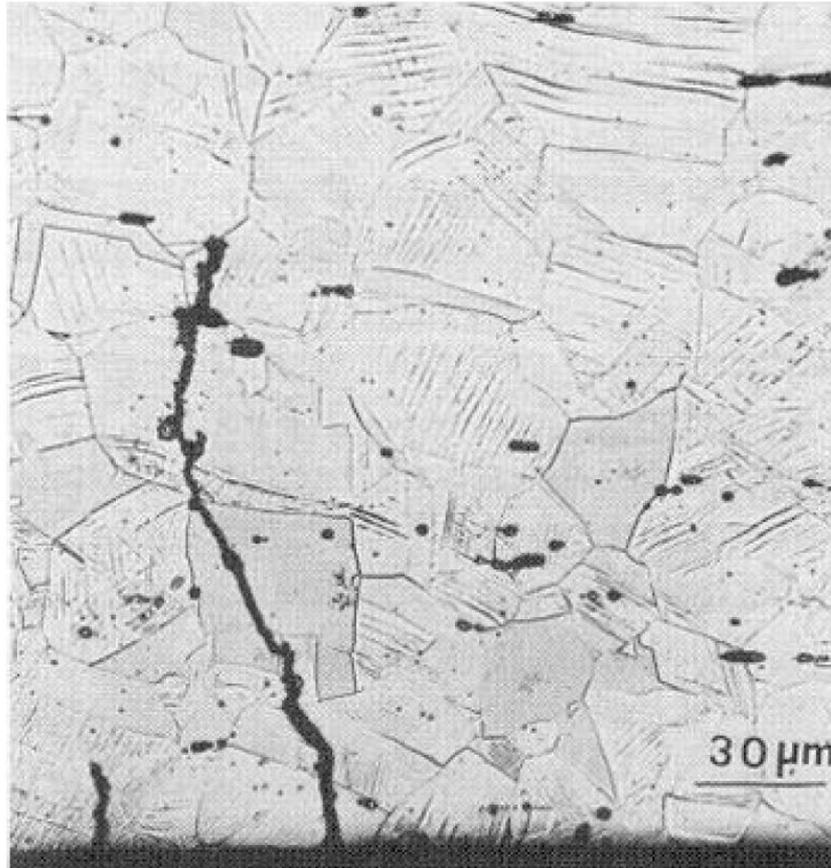
Transgranular

Intergranular

Stress Corrosion  
Cracking

# CORROSÃO SOB TENSÃO

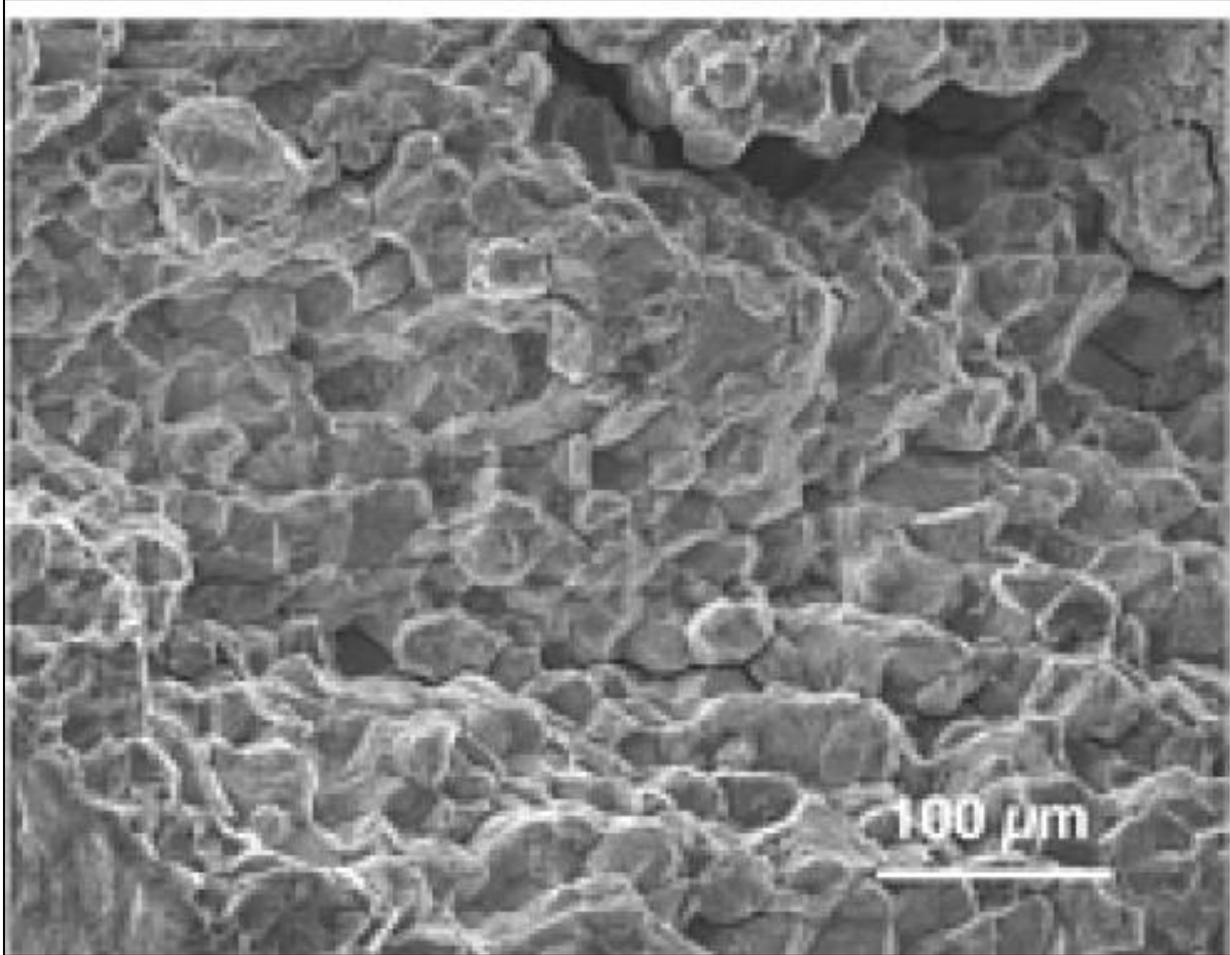
(METALS HANDBOOK, VOL.11)



**Fig. 39 Stress-corrosion cracking in a 316 stainless steel orthopedic implant**

# CORROSÃO SOB TENSÃO

(METALS HANDBOOK, VOL.11)



**FRATURA INTERGRANULAR POR SCC - MEV**

# Corrosão Biológica

deterioração de um metal



microorganismos (como bactérias)

ANAERÓBICAS

bactérias redutoras de sulfatos (*D. desulfuricans*)



SUFETO ACELERA A REAÇÃO ANÓDICA (CORROSÃO)

AERÓBICAS

bactérias oxidantes do enxofre (*Thiobacillus thiooxidans*)



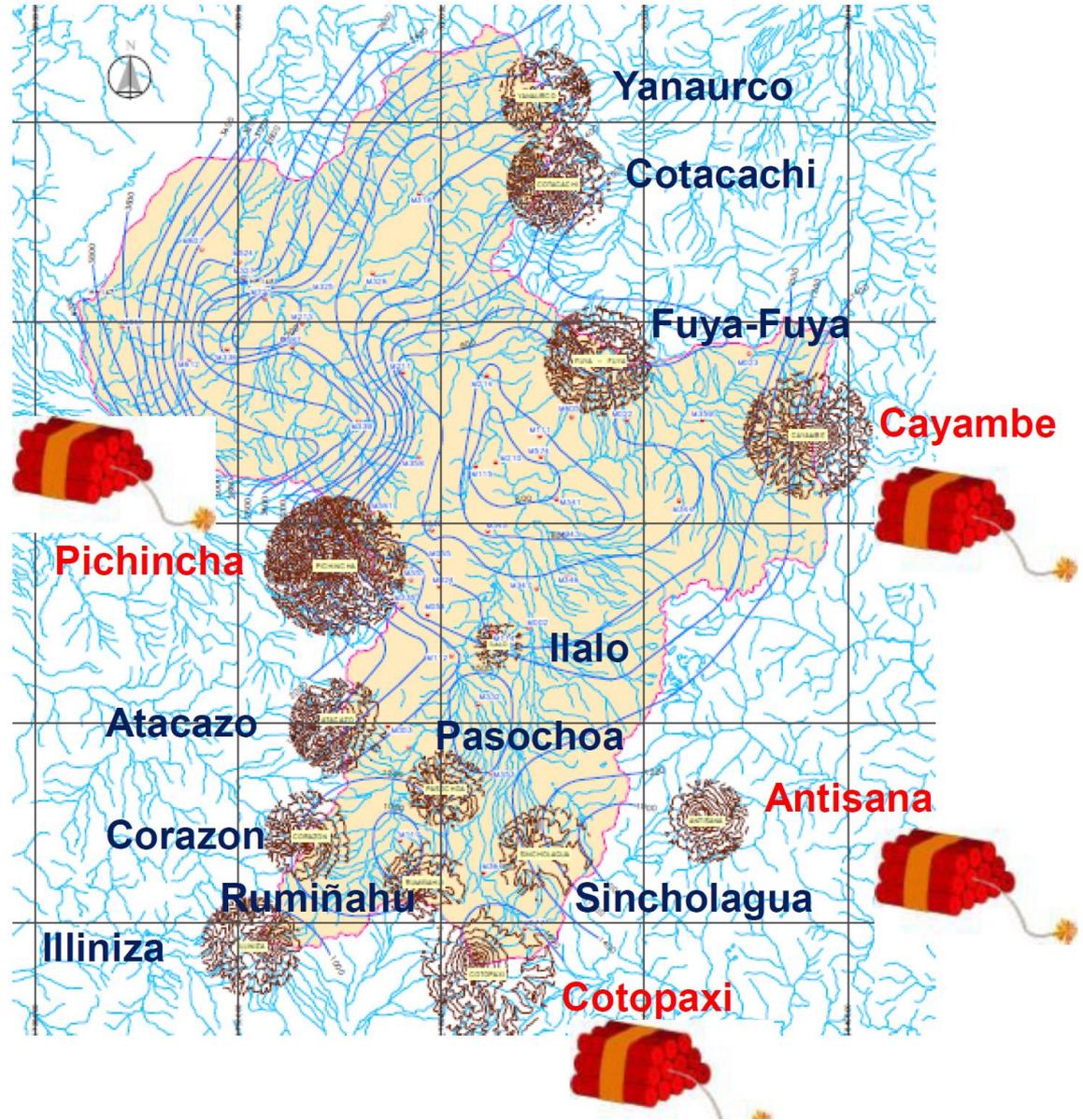
ÁCIDO SULFÚRICO-MEIO  
CORROSIVO

# UHE Manduriacu



# EXEMPLO

**UHE  
Manduriacu:  
Vulcões na  
Bacia do Rio  
Guayllabamba**



# CORROSÃO EM ARMADURA DE CONCRETO

**DIAGRAMAS DE POURBAX MOSTRAM QUE A CORROSÃO DO CONCRETO OCORRE DIRETAMENTE DO FERRO PARA O ÓXIDO DE FERRO, SEM PASSAR PELO ESTADO DE FERRO IÔNICO EM SOLUÇÃO AQUOSA.**

**DIAGRAMAS DE POURBAX : DIAGRAMAS DE POTENCIAL DE EQUILÍBRIO X PH, REPRESENTAM AS CONDIÇÕES DE EQUILÍBRIO DE TODAS AS REAÇÕES QUÍMICAS E ELETROQUÍMICAS POSSÍVEIS DE OCORRER NUM DETERMINADO SISTEMA METAL/MEIO.**



HIDROGÊNIO NA SUPERFÍCIE DO  
CATODO



CORROSÃO DIRETA PARA ÓXIDO  
DE FERRO, NO ANODO

# MÉTODOS PARA COMBATER A CORROSÃO

# **MÉTODOS PARA COMBATER A CORROSÃO**

## **Revestimentos protetores**

- **Revestimentos metálicos;**
- **Revestimentos orgânicos (tintas e resinas);**
- **Revestimentos inorgânicos (esmalte e cimentos).**

## **Alteração do processo de corrosão**

- **Proteção catódica com ânodos de sacrifício;**
- **Proteção catódica com tensões elétricas impostas.**

# MÉTODOS PARA COMBATER A CORROSÃO

## Revestimentos metálicos

Podem ser **catódicos** ou **anódicos**: depende da série galvânica.

## Série Galvânica dos Metais

	<b>Metal</b>	<b>Potencial de eletrodo</b>	
	magnésio	- 2,340	
	alumínio	- 1,670	
	zinco	- 0,762	
	cromo	- 0,710	
<b>menos nobres</b>	ferro	- 0,440	<b>anódicos</b>
	cádmio	- 0,402	
	níquel	- 0,250	
	estanho	- 0,136	
	chumbo	- 0,126	
<b>mais nobres</b>	cobre	+ 0,345	<b>catódicos</b>
	prata	+ 0,800	
	ouro	+ 1,680	

# MÉTODOS PARA COMBATER A CORROSÃO

**Revestimento Anódico** – exemplo: aplicação de Al, Zn e Cd, na superfície, que são anódicos em relação ao aço - potenciais são mais negativos que o metal base: no caso de falha no revestimento- servem como ânodo de sacrifício.

**Revestimento Catódico** – Aplicação de metais mais nobres que o metal base: camada protetora imune, contínua e não porosa, que serve como proteção.

# MÉTODOS PARA COMBATER A CORROSÃO

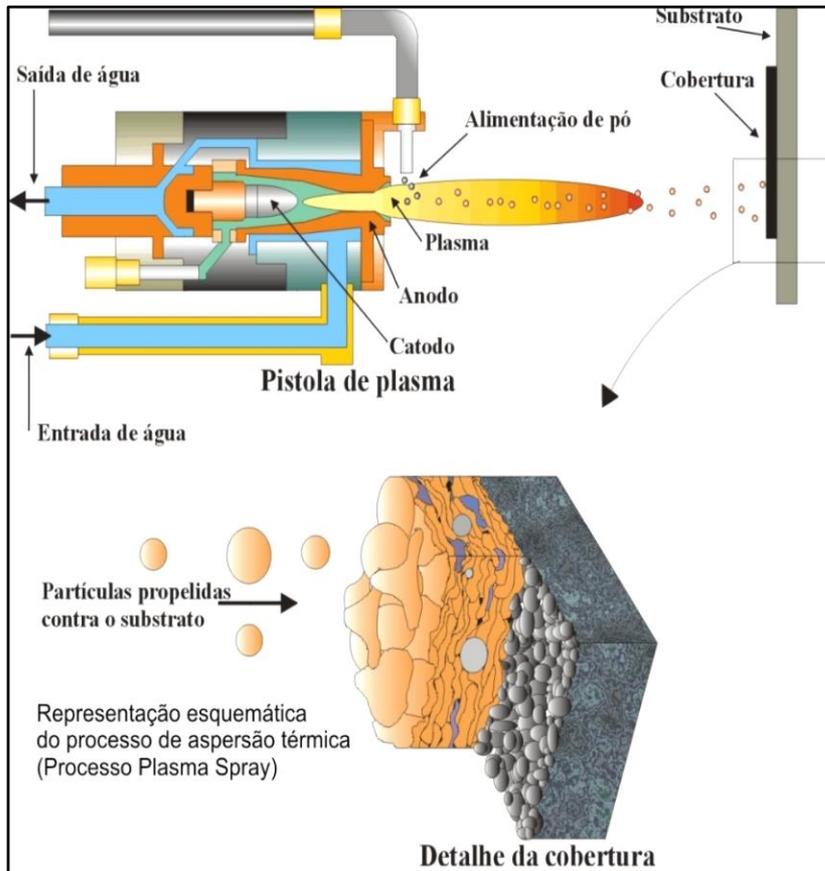
## MÉTODOS DE APLICAÇÃO DOS REVESTIMENTOS METÁLICOS

# MÉTODOS DE APLICAÇÃO DOS REVESTIMENTOS METÁLICOS

- **Eletrodeposição;**
- **Imersão à quente;**
- **Aspersão térmica;**
- **Cladd.**

# ASPERSÃO TÉRMICA (METALIZAÇÃO)

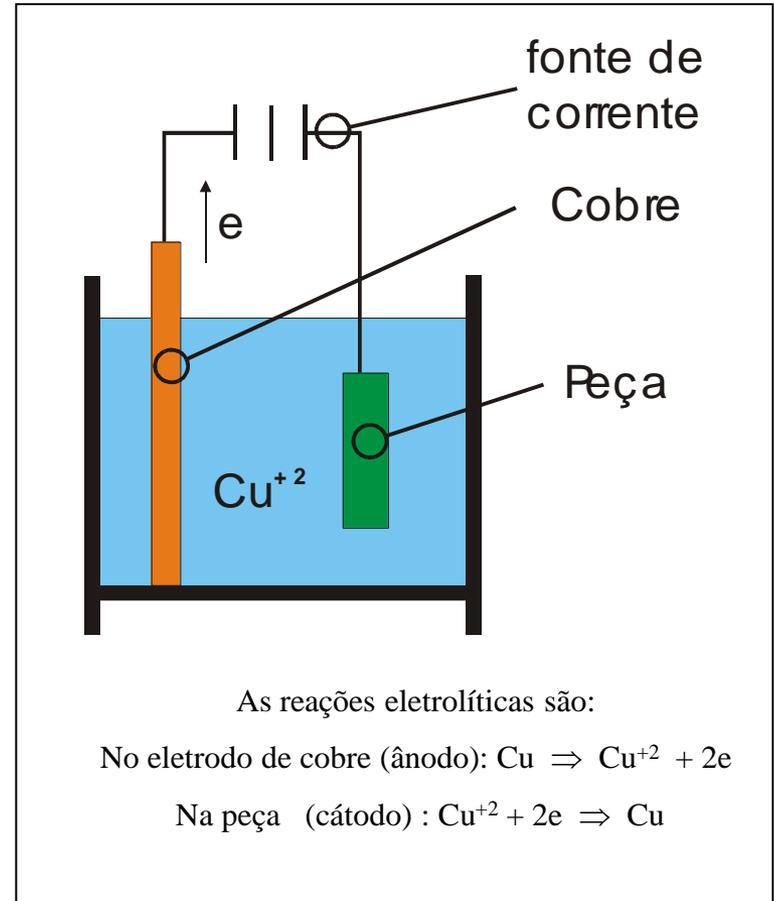
A liga é aquecida até a fusão e projetada por meio de ar comprimido.

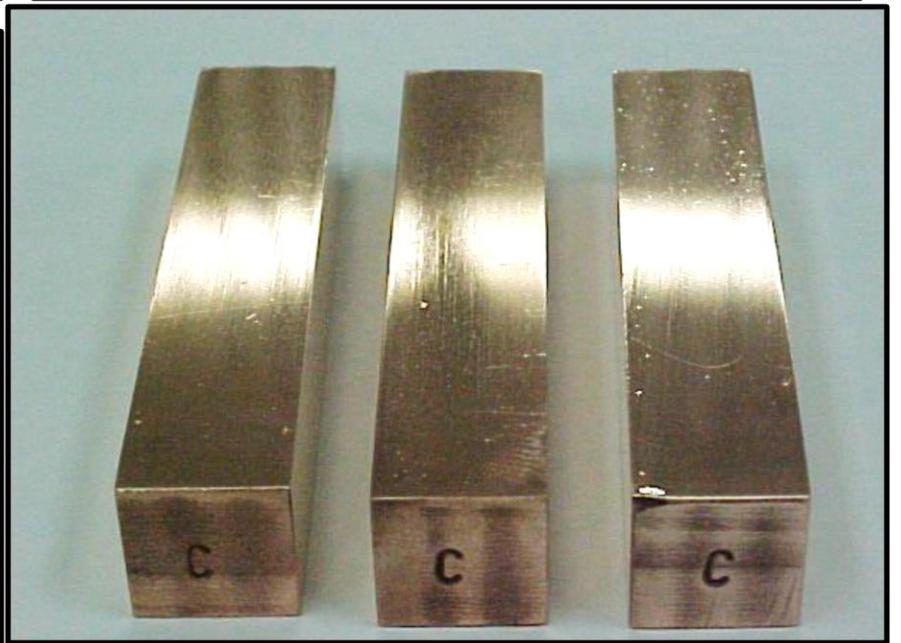
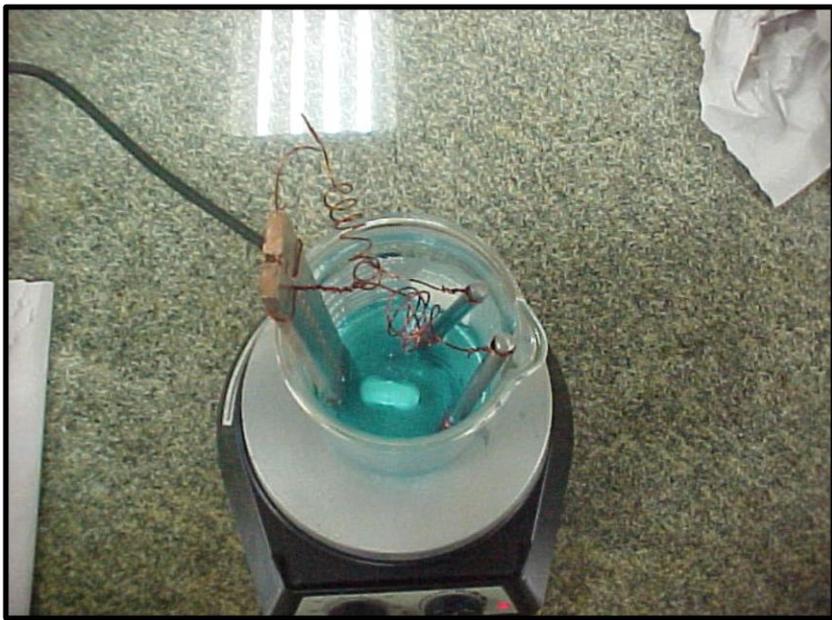


# MÉTODOS DE APLICAÇÃO DOS REVESTIMENTOS METÁLICOS

## ELETRODEPOSIÇÃO DE COBRE, NÍQUEL, ETC

É o oposto da corrosão. O ânodo de cobre é corroído e libera o cátion  $\text{Cu}^{+2}$  (aumentando a concentração da solução) que deposita no cátodo, que é a peça a ser revestida.





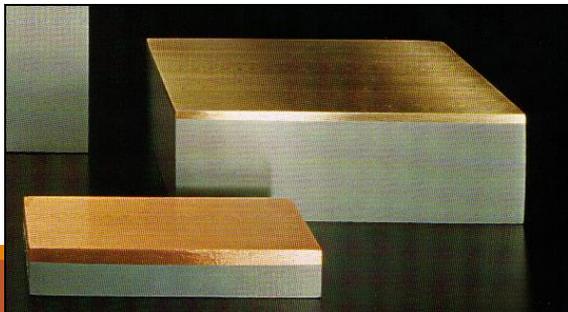
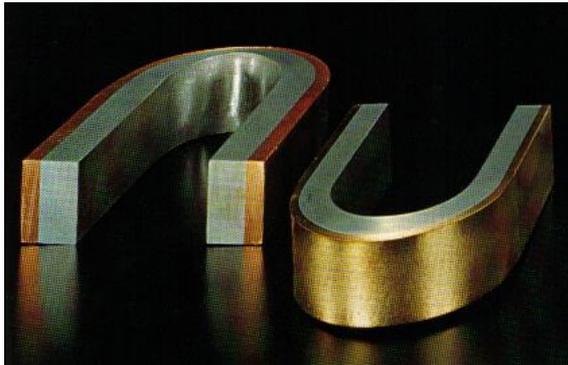
# MÉTODOS DE APLICAÇÃO DOS REVESTIMENTOS METÁLICOS

## CLADDING

- Muito utilizado na indústria química e petroquímica;
- Solda por explosão.



## Algumas Combinações:



METAL BASE	METAL CLADEADO
Aço	Ligas de Cobre
	Aço Carbono
	Latão
	Alumínio
	Ligas de Níquel
	Aço Inoxidável
	Aço Ligado
	Titânio
Cobre	Cobre-Níquel
	Ligas de Níquel
	Latão
	Alumínio

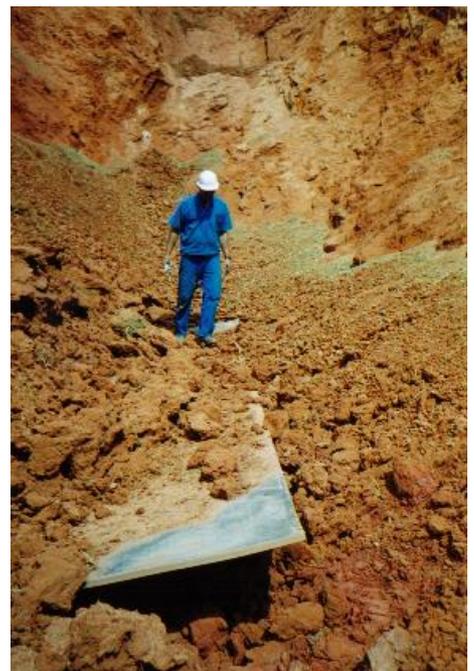
# CECAL



# CECAL

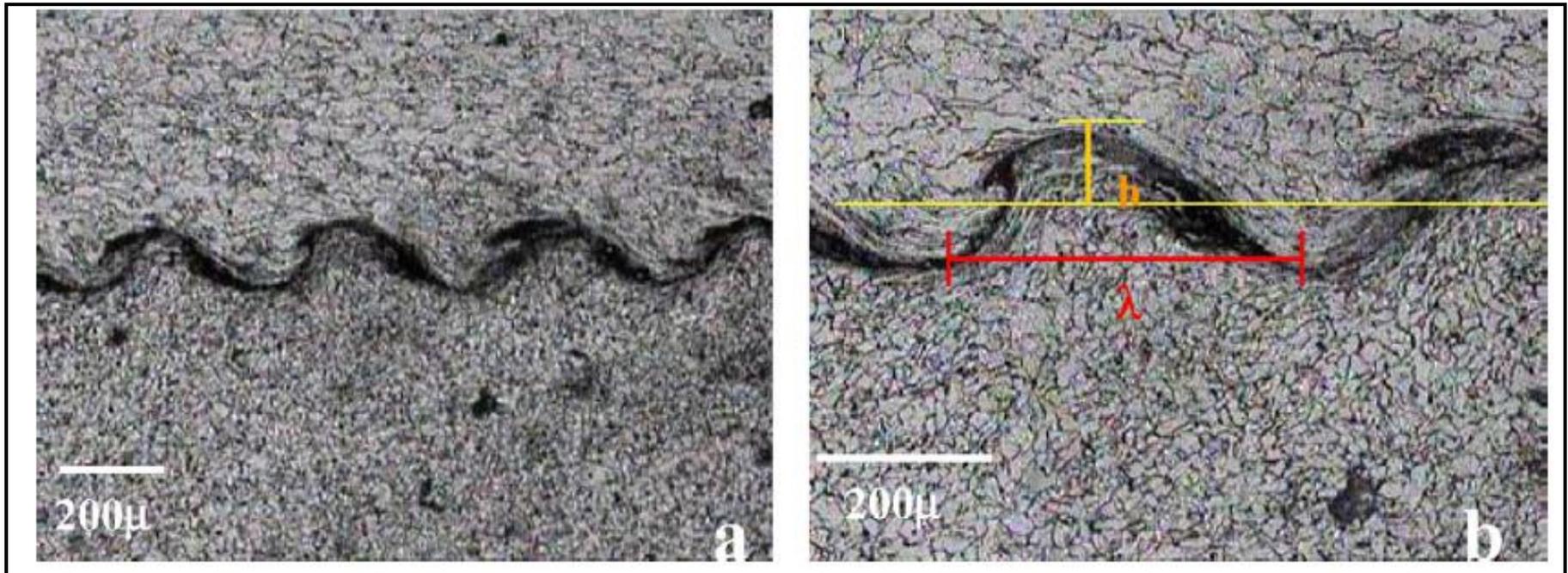


# CECAL





# MICROESTRUTURAS DO METAL BASE E CLADD POR EXPLOSÃO.



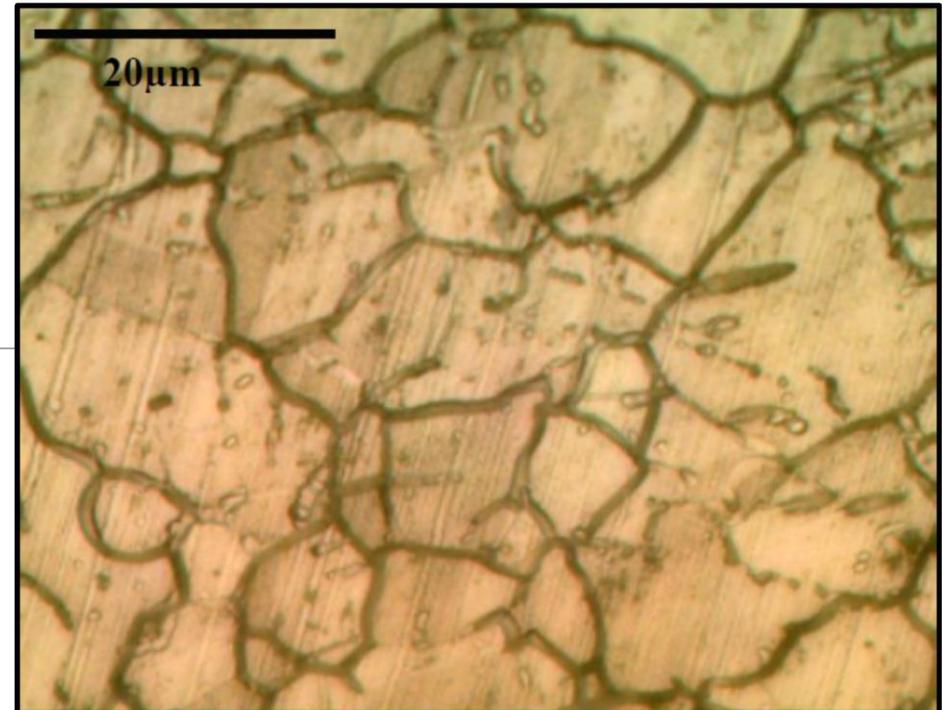
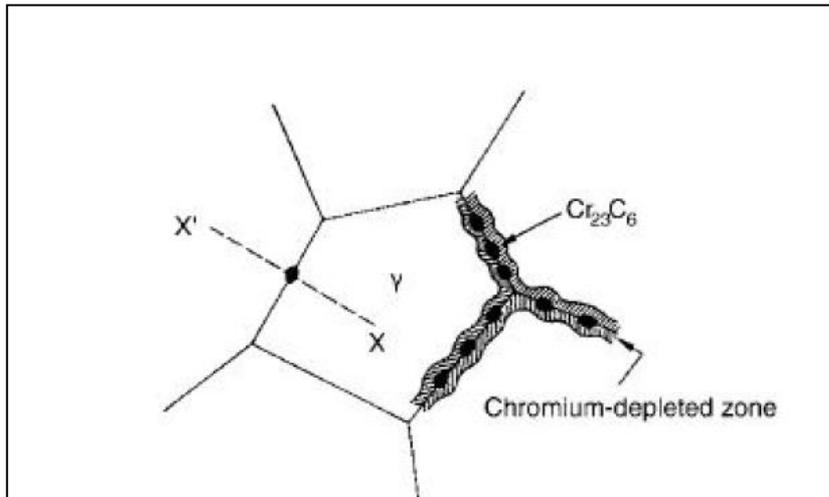
M. ACARER JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE 39 (2004) 6457–6466

**CONSEQUÊNCIAS:**

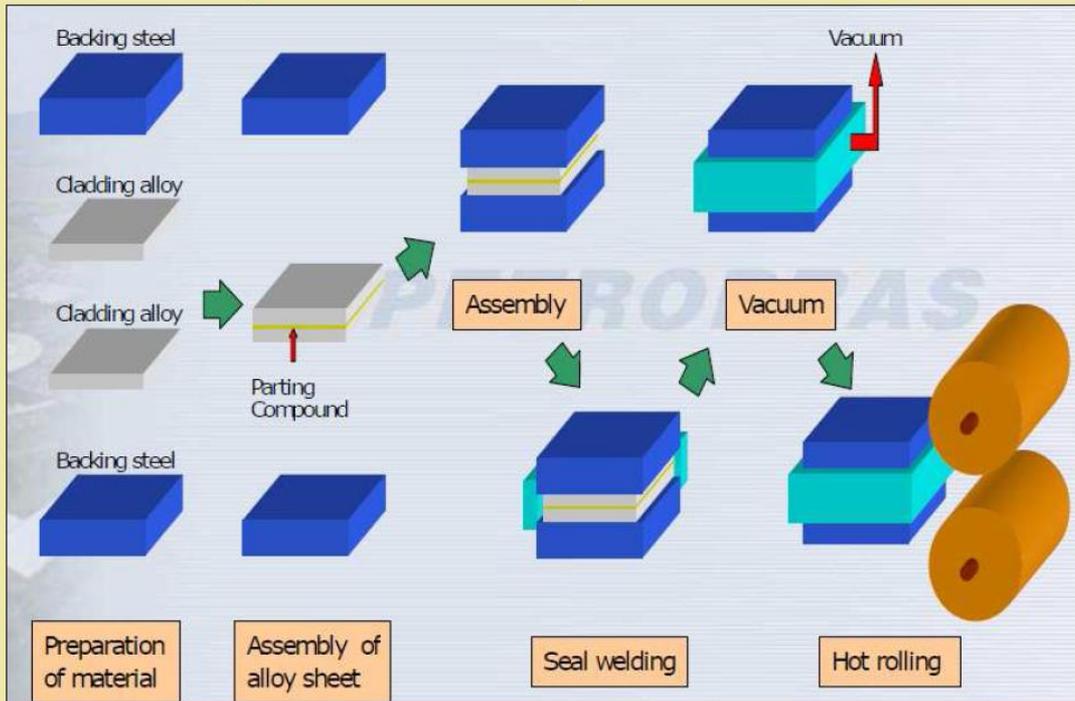
**NECESSIDADE DE ALÍVIO DE TENSÕES EM  
600°C**



**SENSITIZAÇÃO**



## Laminação de Chapas Bi-Metálicas:



**COLAMINAÇÃO A QUENTE.**

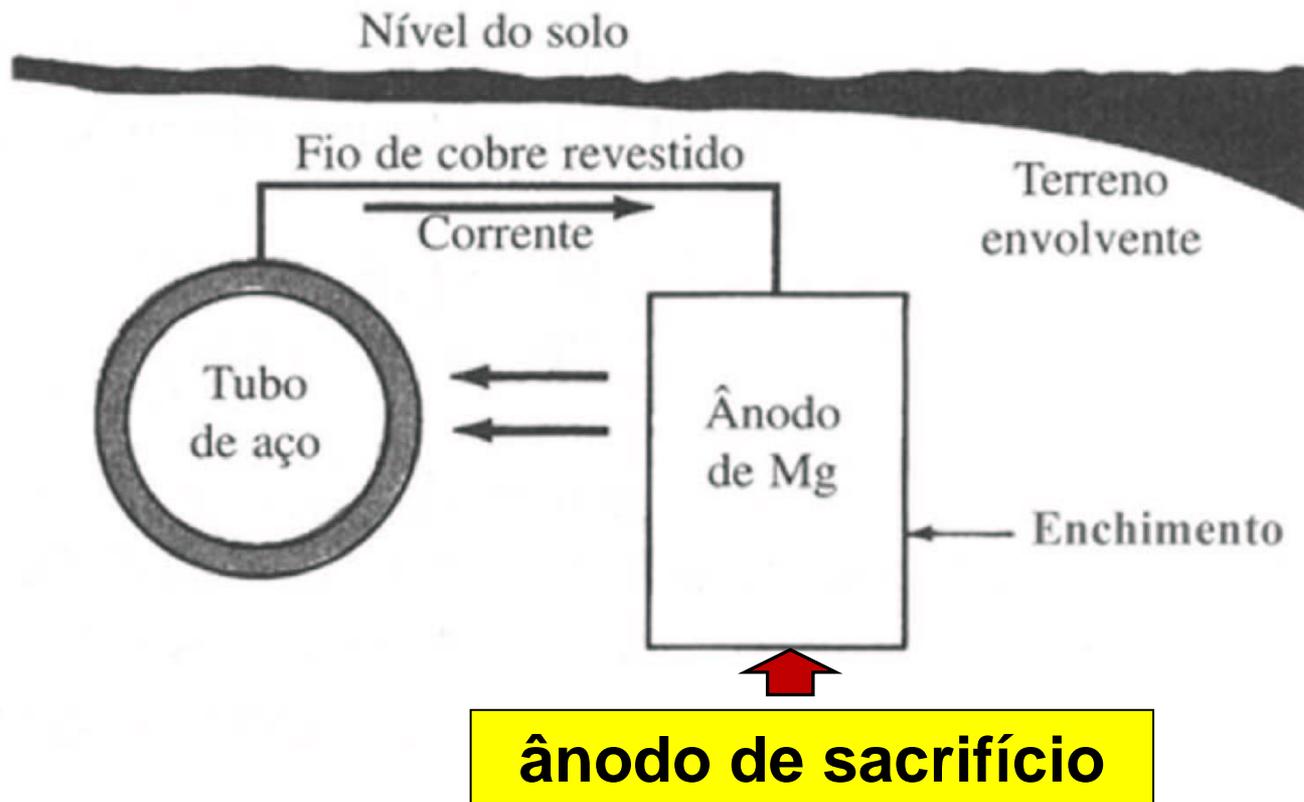
Fotos: Butting

# MÉTODOS PARA COMBATER A CORROSÃO

## PROTEÇÃO CATÓDICA

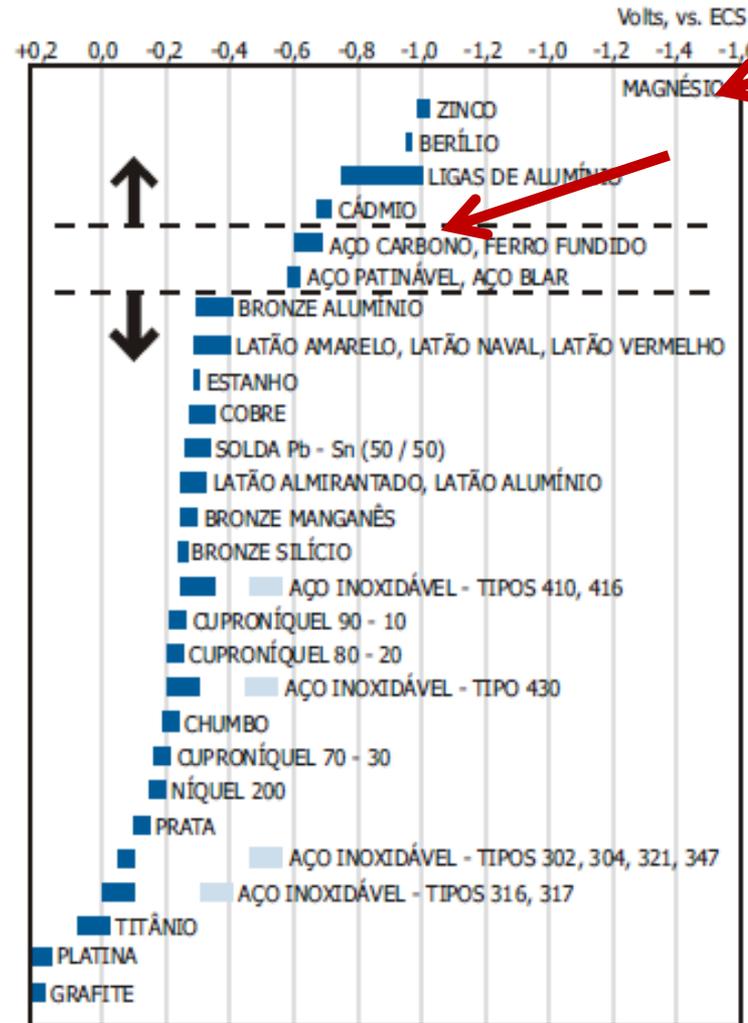
- Empregado principalmente em estruturas metálicas de grandes dimensões (navios, tubulações);
- Princípio: formação de uma pilha galvânica entre o material a proteger (cátodo) e um eletrodo de sacrifício (ânodo);
- Com ou sem aplicação de corrente externa.

# MÉTODOS PARA COMBATER 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



Potenciais de corrosão em água do mar em movimento (2,5 - 4,0 m/s)  
Temperatura entre 10 - 27 °C

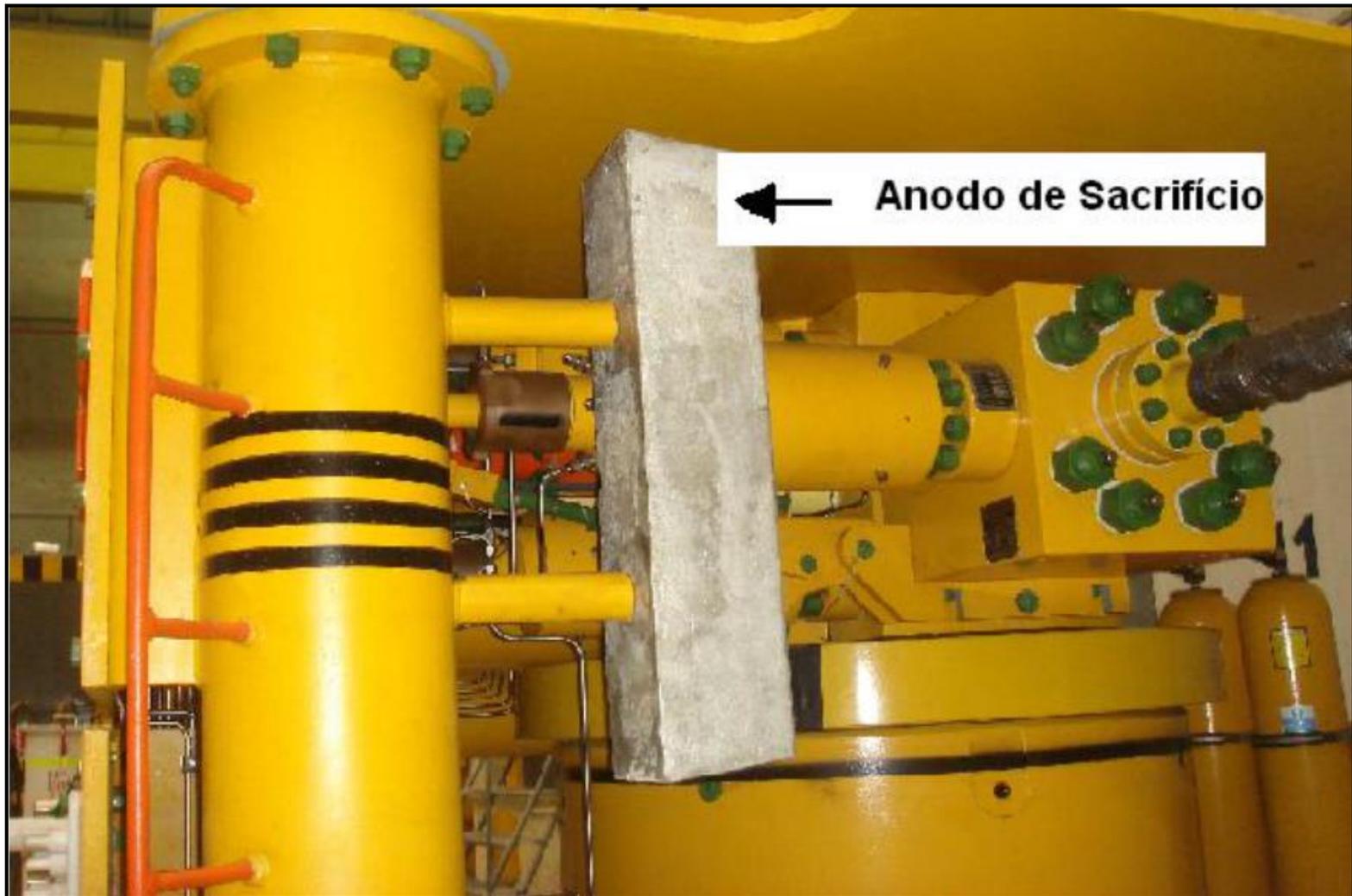
**EX: AÇO E  
MAGNÉSIO- O  
MAGNÉSIO CORROI  
E O AÇO NÃO**

# MÉTODOS PARA COMBATER A CORROSÃO



**ânodo de magnésio**

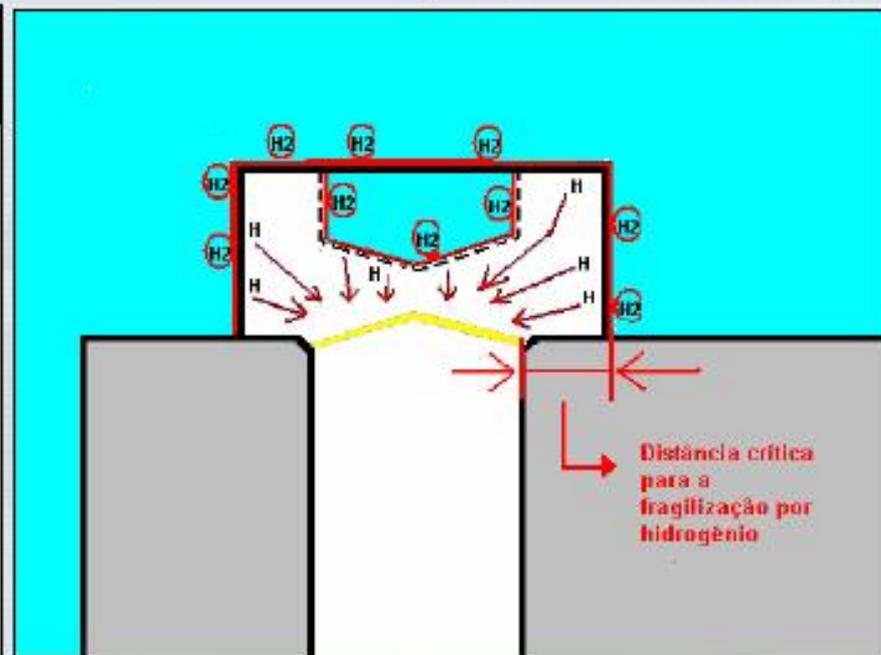
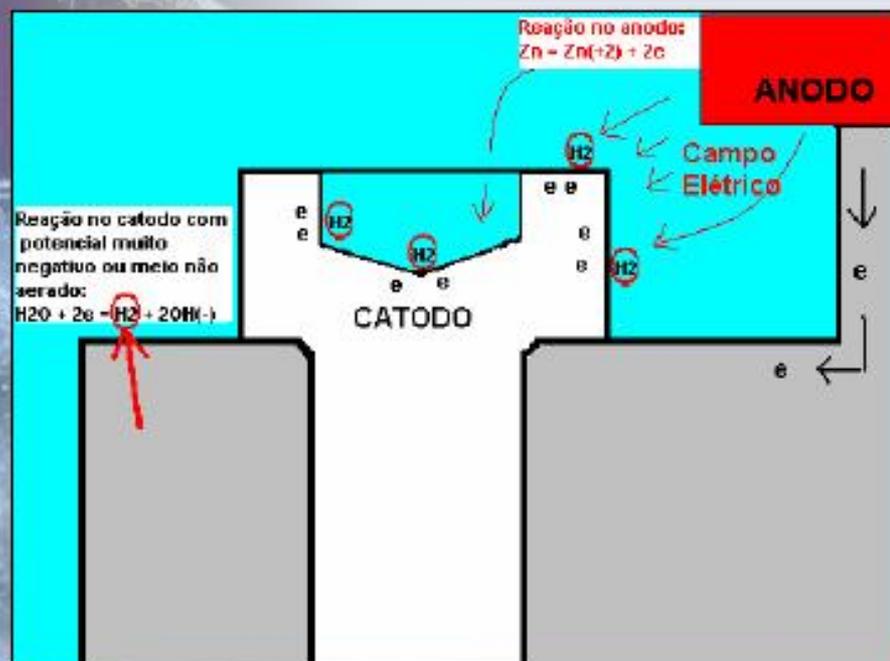
<http://becominglistless.blogspot.com.br/>



## **DETALHE DO ÂNODO DE SACRIFÍCIO DE LIGA DE ALUMÍNIO**

(Cantarin, T.N.-IPEN-2011)

- ☑ **Fontes** → Presença de hidrogênio livre:
  - Proteção Catódica;
  - Fatores de Fabricação e Soldagem;
  - $H_2S$  e suas espécies dissociadas.
- ☑ **Efeito Primário** → Interação do  $H_0$  com discordâncias, contornos de grão e defeitos.

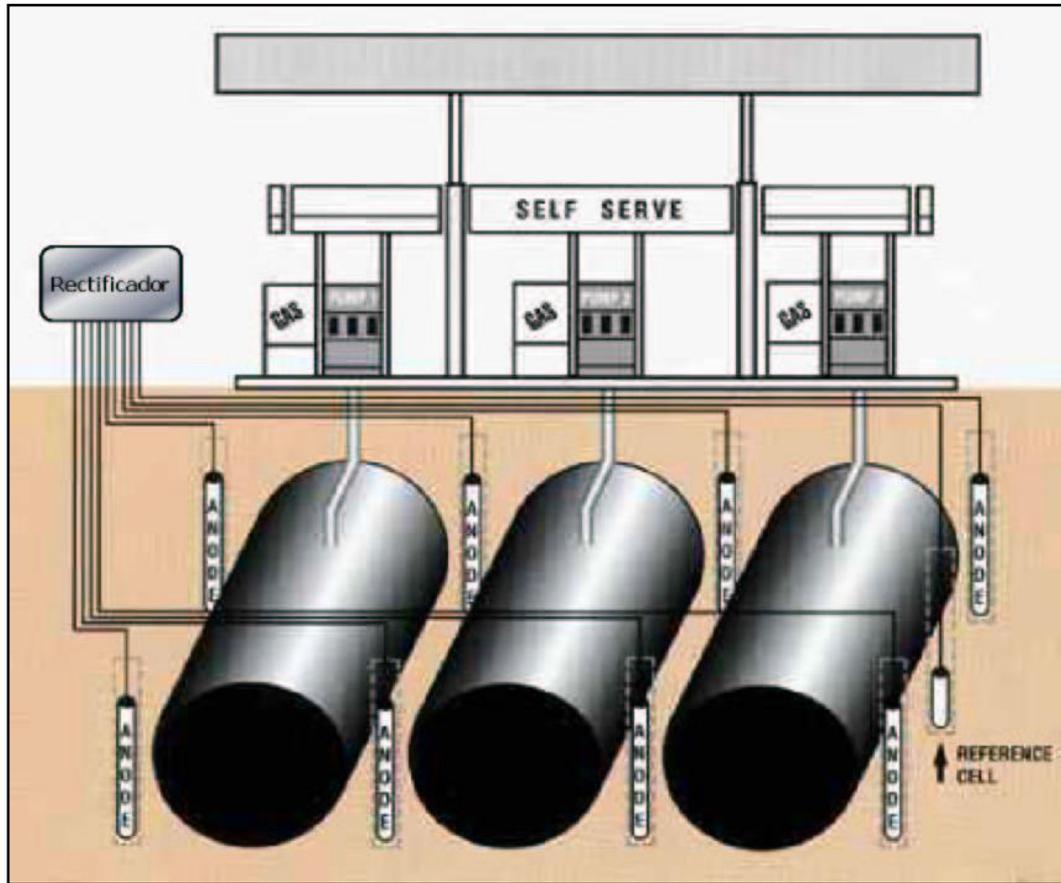


# MÉTODOS PARA COMBATER A CORROSÃO



**aplicação de potencial elétrico (corrente imposta)**

# MÉTODOS PARA COMBATER A CORROSÃO



**Ex: proteção de tanques de combustível subterrâneos pela aplicação de corrente imposta**

# **MÉTODOS PARA COMBATER A CORROSÃO**

**REVESTIMENTOS NÃO METÁLICOS**

**EX: TINTAS EVITAM BIOCORROSÃO**

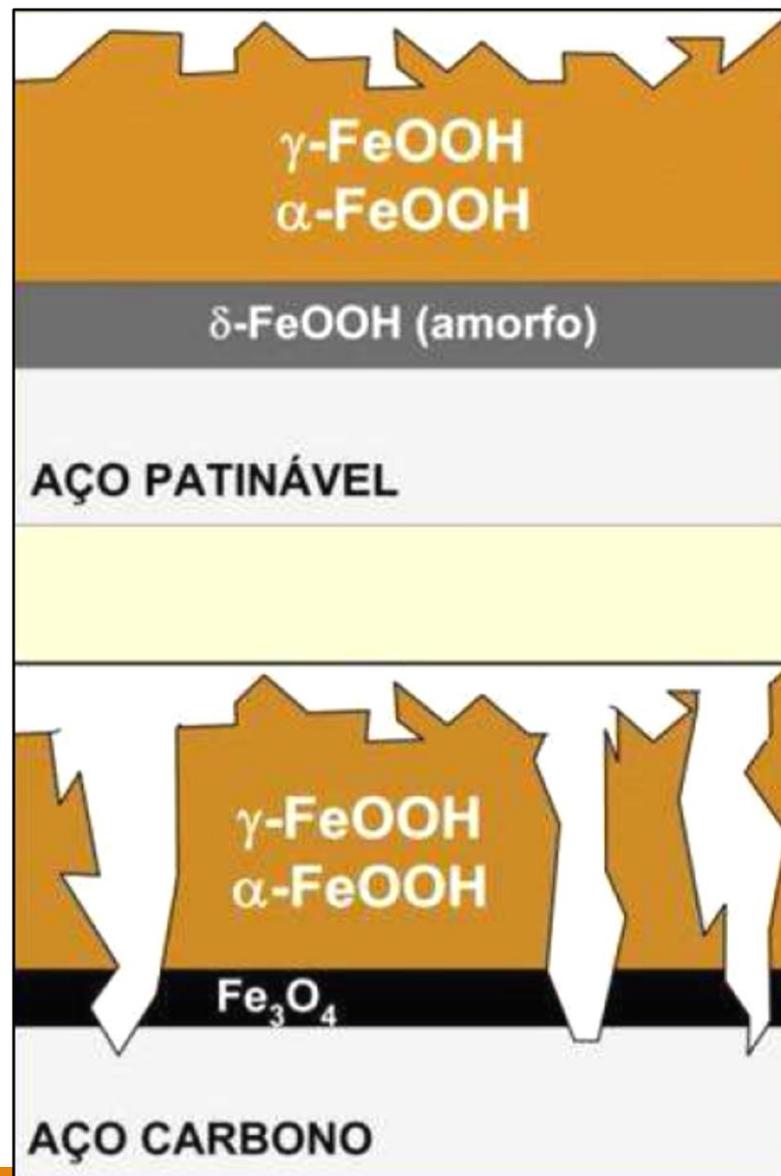
# MÉTODOS PARA COMBATER A CORROSÃO

ALÉM DA SUBSTITUIÇÃO POR AÇO INÓXIDÁVEL:

**AÇO PATINÁVEL.**

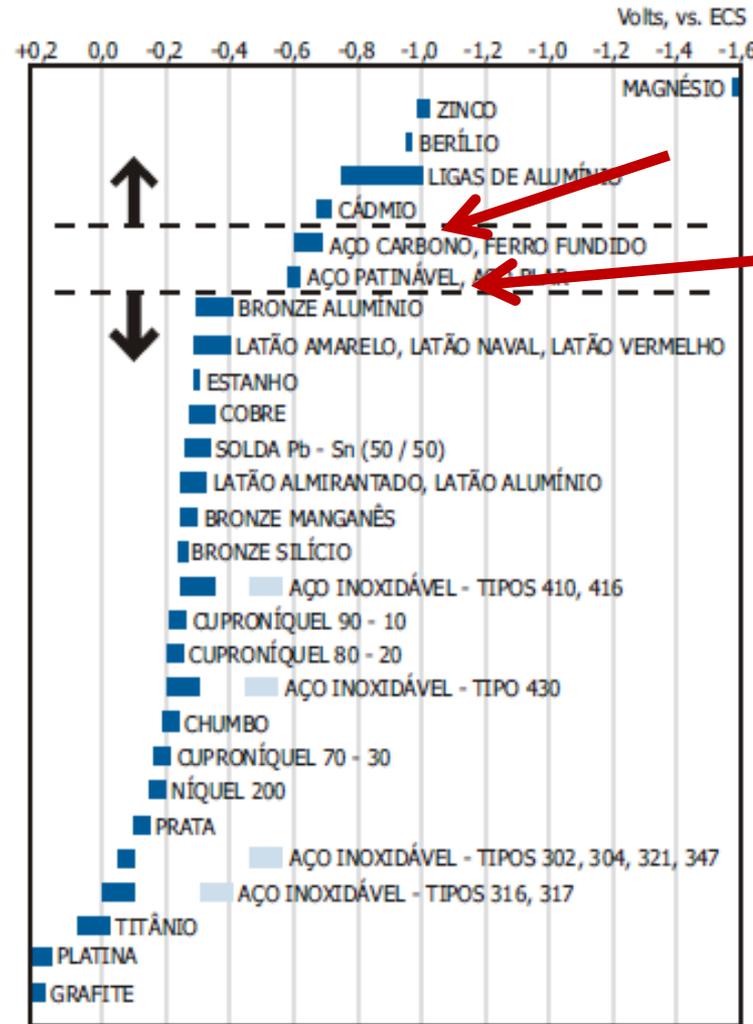
A ferrugem comum é porosa e permite que a água, o oxigênio e os poluentes do ar possam atravessá-la, de modo a manter a continuidade do ataque na interface metal-ferrugem. A adição de pequenas quantidades (até 3%) de certos elementos de liga ao aço, como o cobre, o níquel, o cromo e o silício promove a alteração da estrutura interna da ferrugem formada. Os elementos de liga encorajam a formação de uma camada mais densa e amorfa que isola até certo ponto o aço.

(Fabio Domingos Pannoni, Ph.D.)



# QUANTO MAIS NEGATIVO O POTENCIAL, MAIS FÁCIL A CORROSÃO

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



**AÇO PATINÁVEL**

Potenciais de corrosão em água do mar em movimento (2,5 - 4,0 m/s)  
Temperatura entre 10 - 27 °C

---

**FIM**

