



SMM 0193 – ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS I

CORROSÃO E PROTEÇÃO

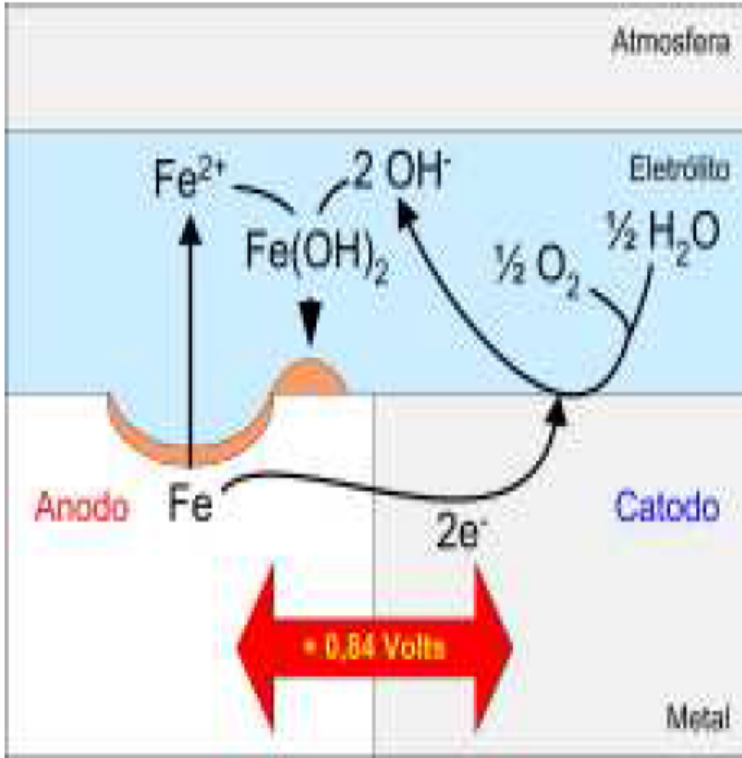


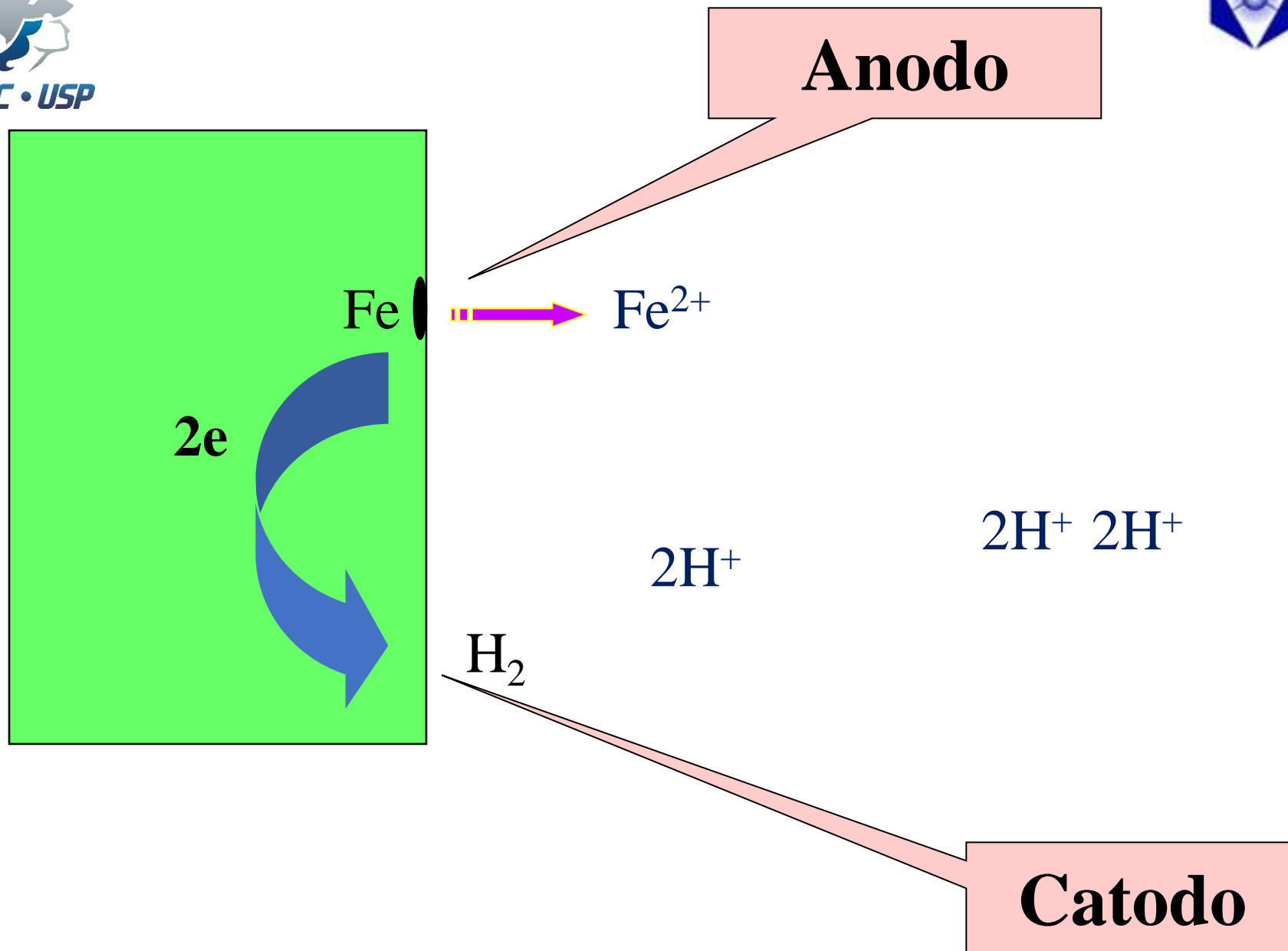
REFERÊNCIAS:

- 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





DEFINIÇÕES DE CORROSÃO



- **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





EESC • USP



Prof. Dr. José Benedito Marcomini

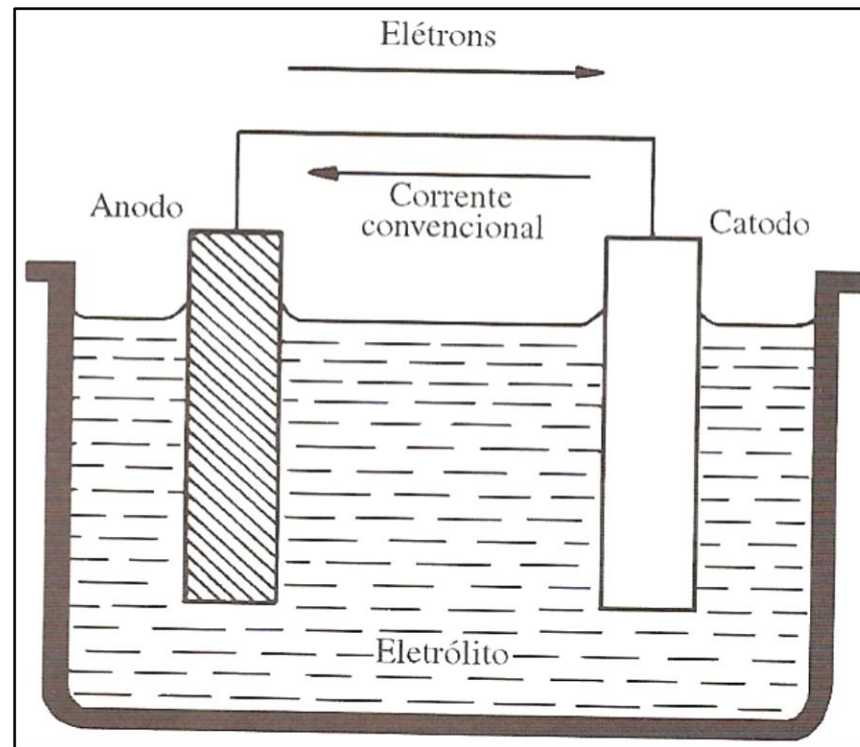


Causa: corrosão-fadiga

CORROSÃO

MECANISMO ELETROQUÍMICO

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





EESC • USP

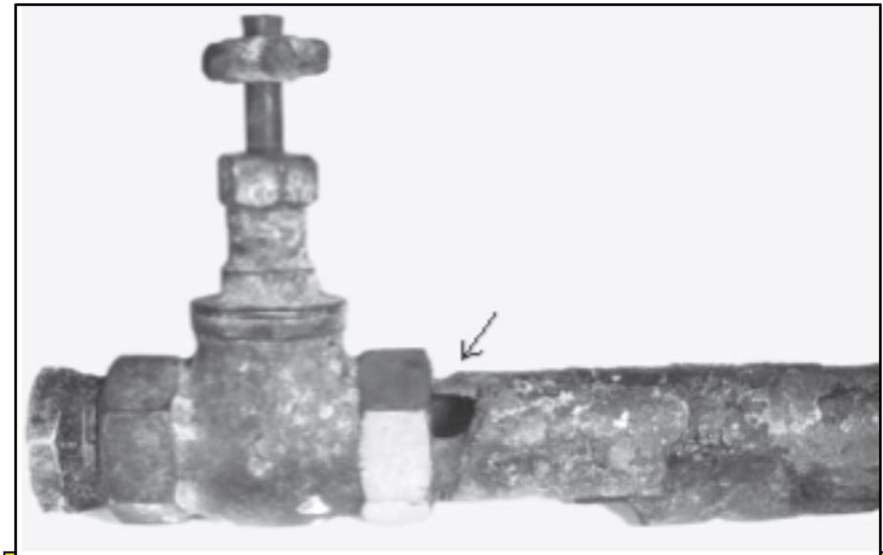
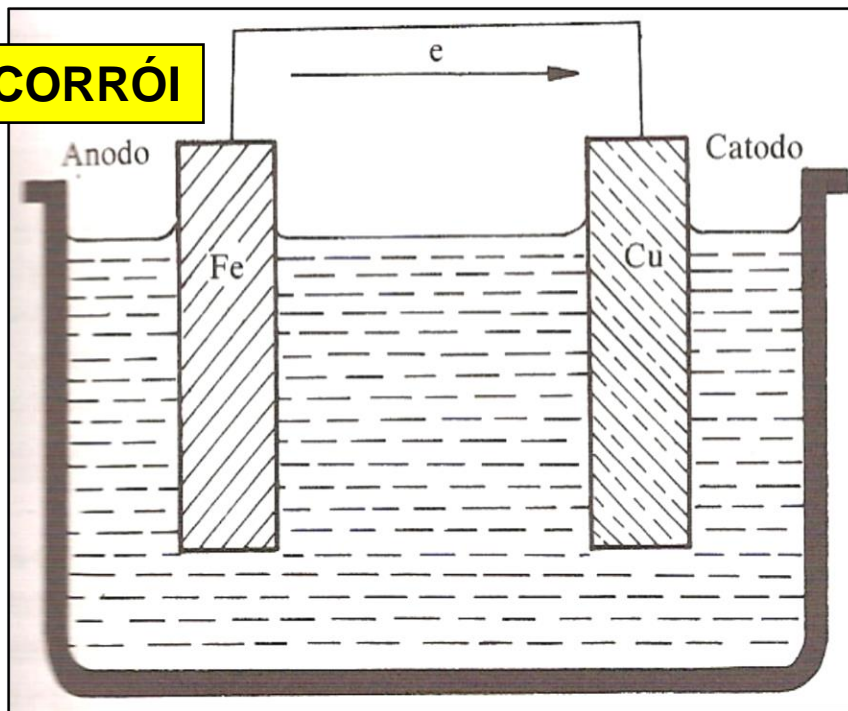
Pilhas de Eletrodos Metálicos Diferentes



CORROSÃO GALVÂNICA

Dois metais diferentes em contato, imersos num mesmo eletrólito.

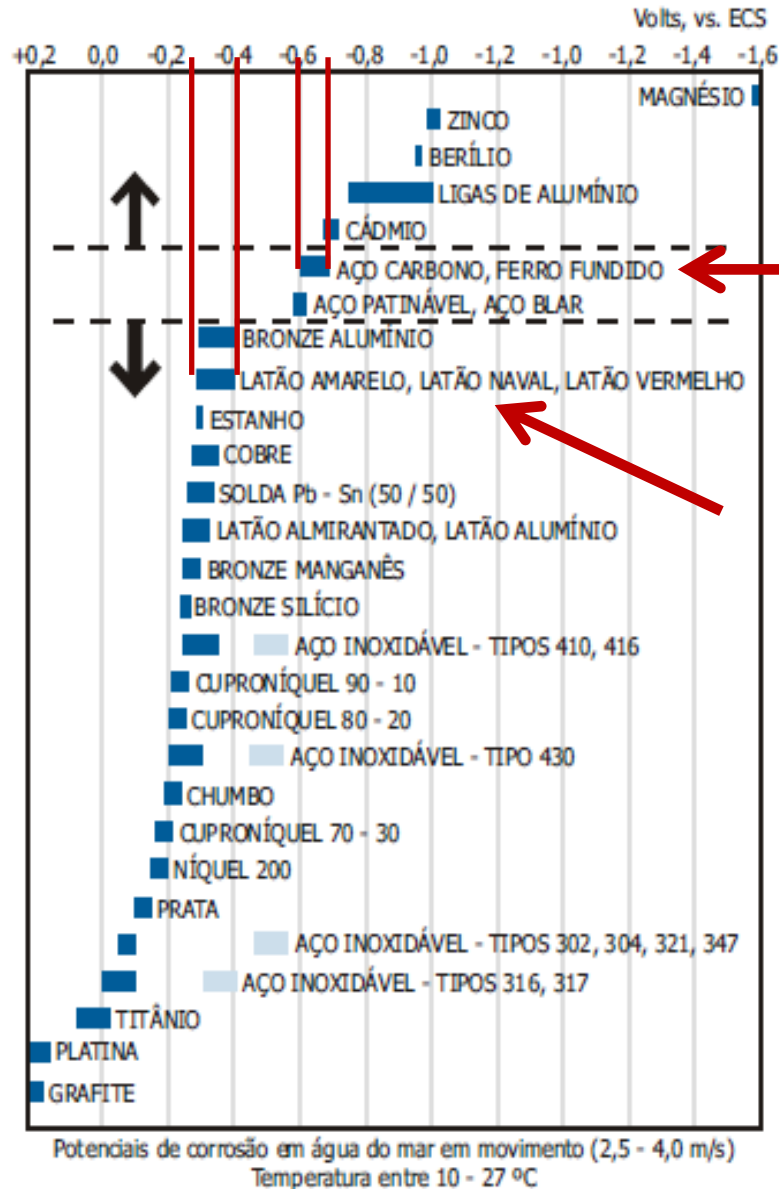
CORRÓI



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

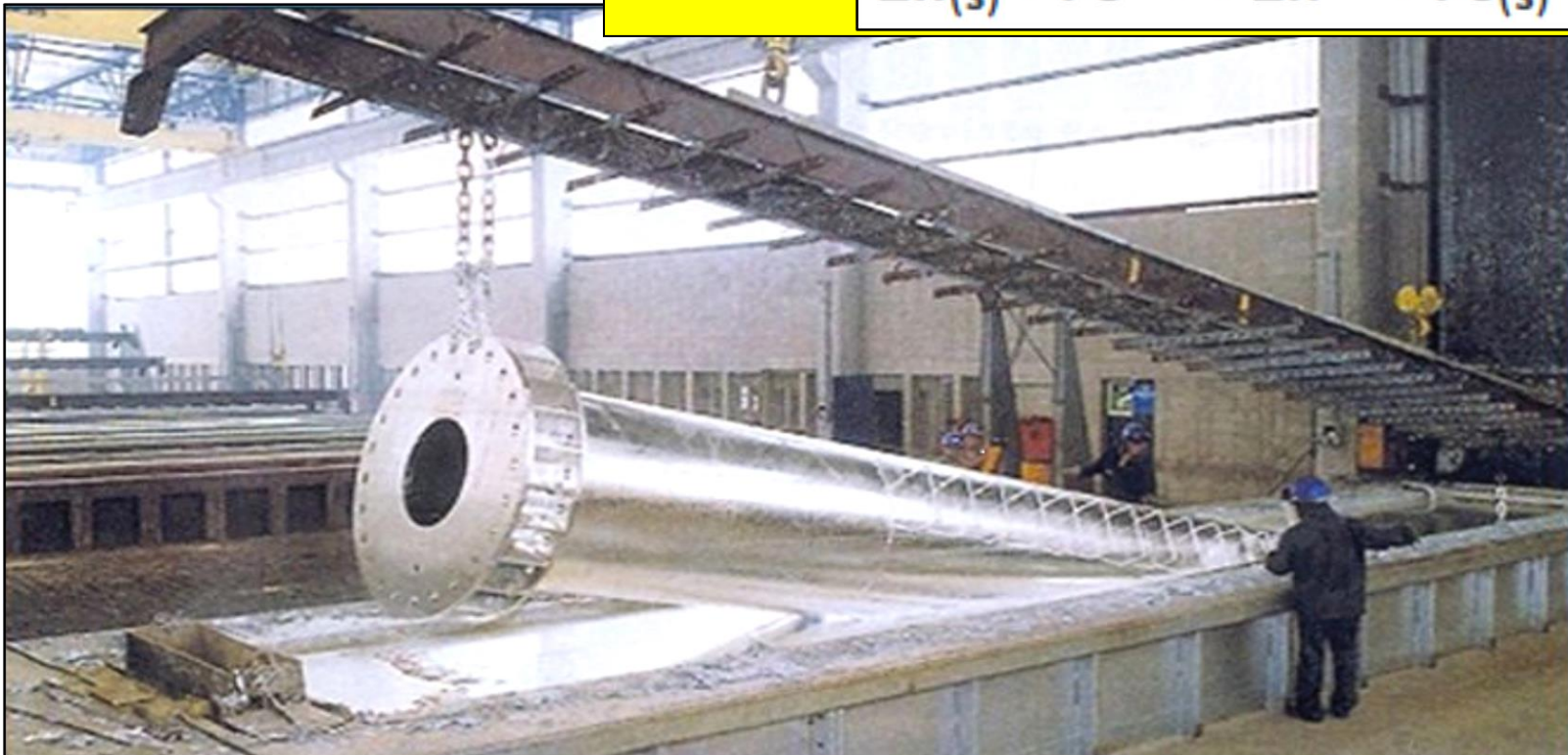
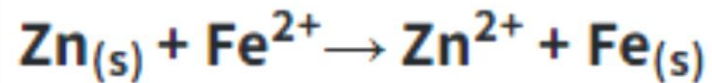


**Fe mais negativo
que o latão: o Fe
corrói e o Latão
não!**



Luigi Galvani (1737 – 1798) Bioeletricidade

Galvanização: deposição de Zn em Fe/aço
Proteção catódica



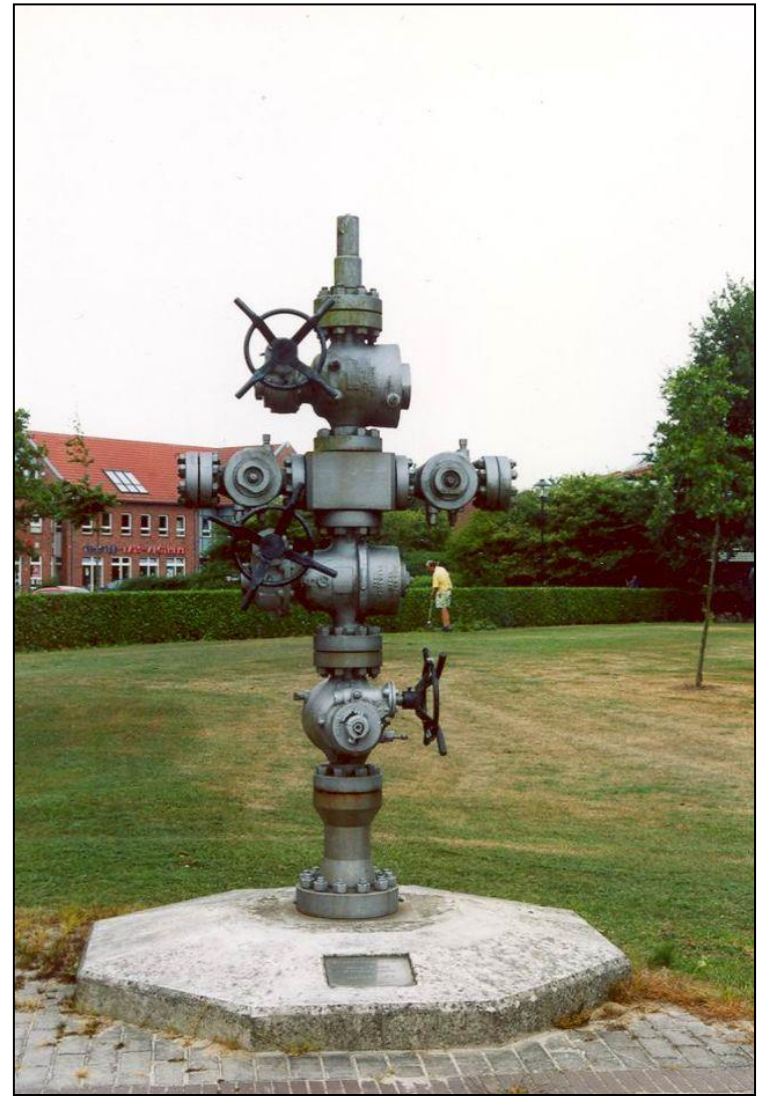


Corrosão localizada em componente de árvore de natal devido à corrosão galvânica





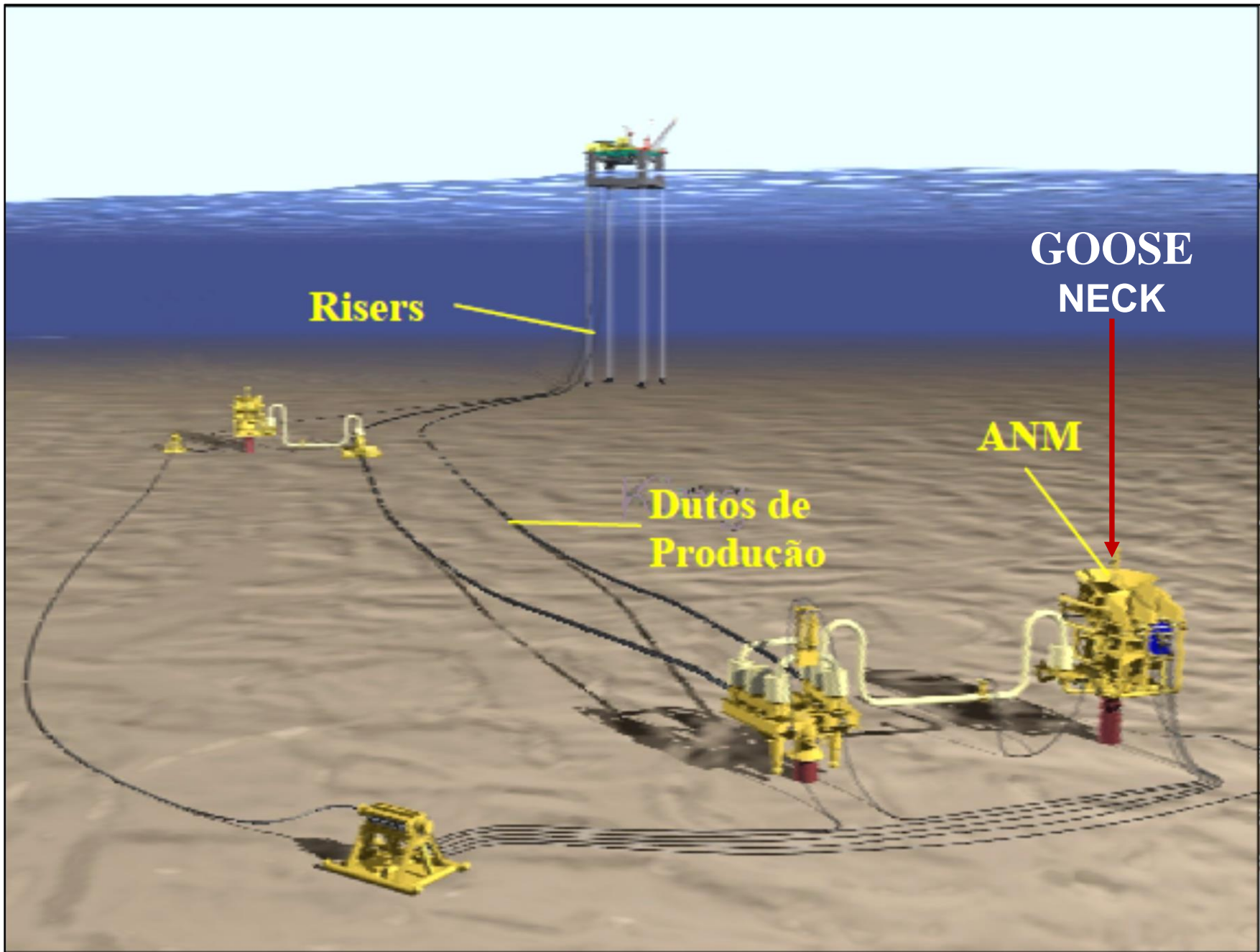
ÁRVORE DE NATAL MOLHADA



ÁRVORE DE NATAL SECA

GOOSE NECK – PESCOÇO DE GANSO





Risers

GOOSE
NECK

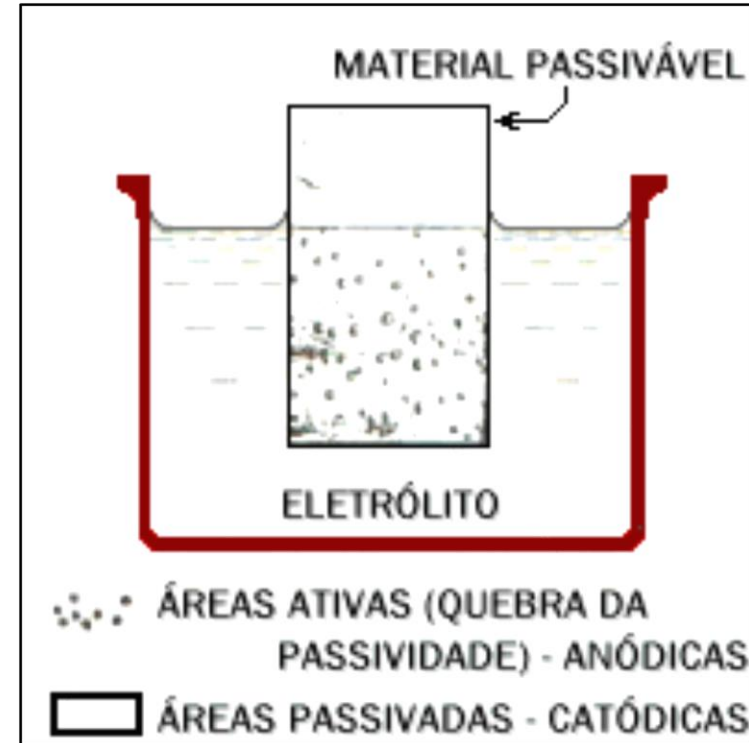
ANM

Dutos de
Produção

Material Passivável

PILHA ATIVA-PASSIVA

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



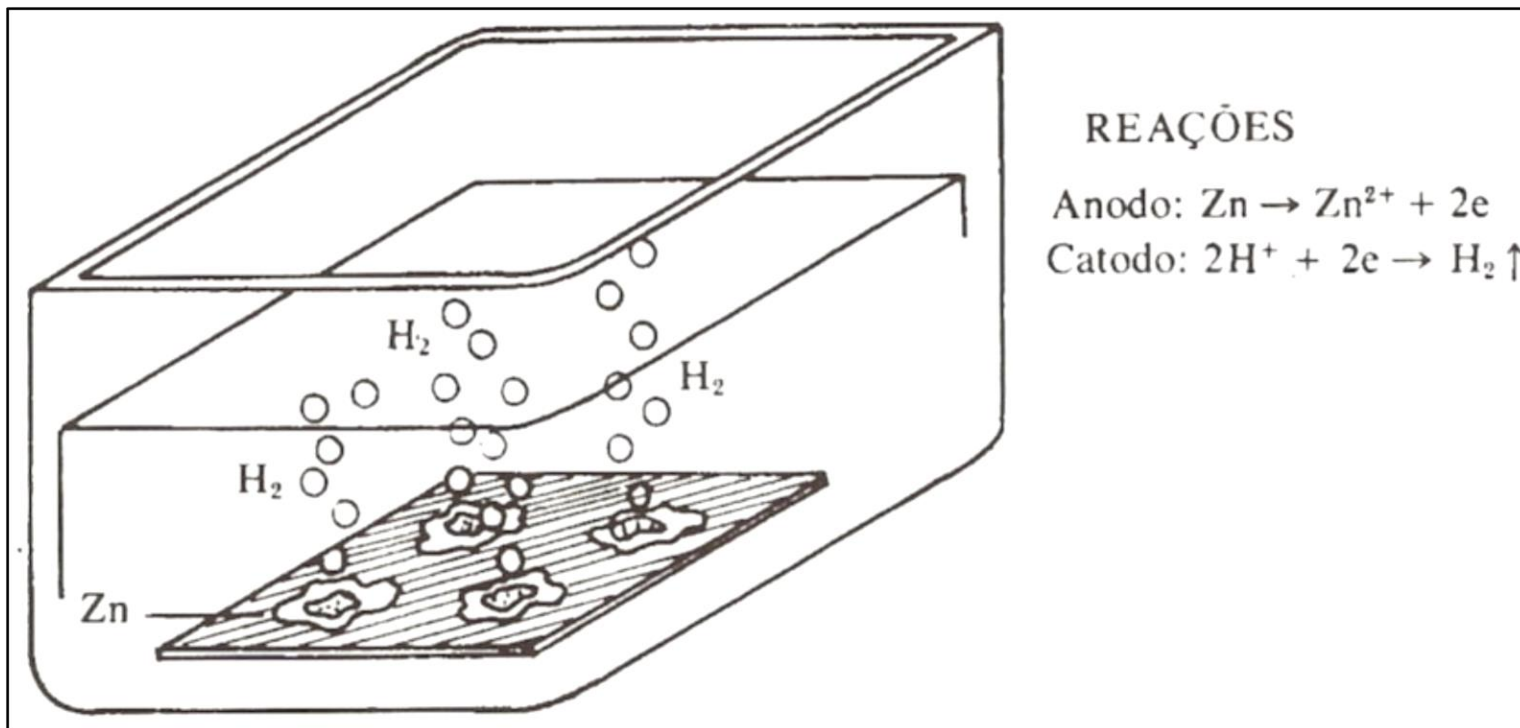
Destruição da passividade –pontos desprotegidos→ Pontos de metal ativo (anodos) vizinho de áreas de metal passivado (catodos): gera ddp da ordem de 0,5 V = **PILHA ATIVA-PASSIVA.**

Pilhas de Eletrodos Metálicos Diferentes

PILHA de AÇÃO LOCAL

Na peça de Zn:

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



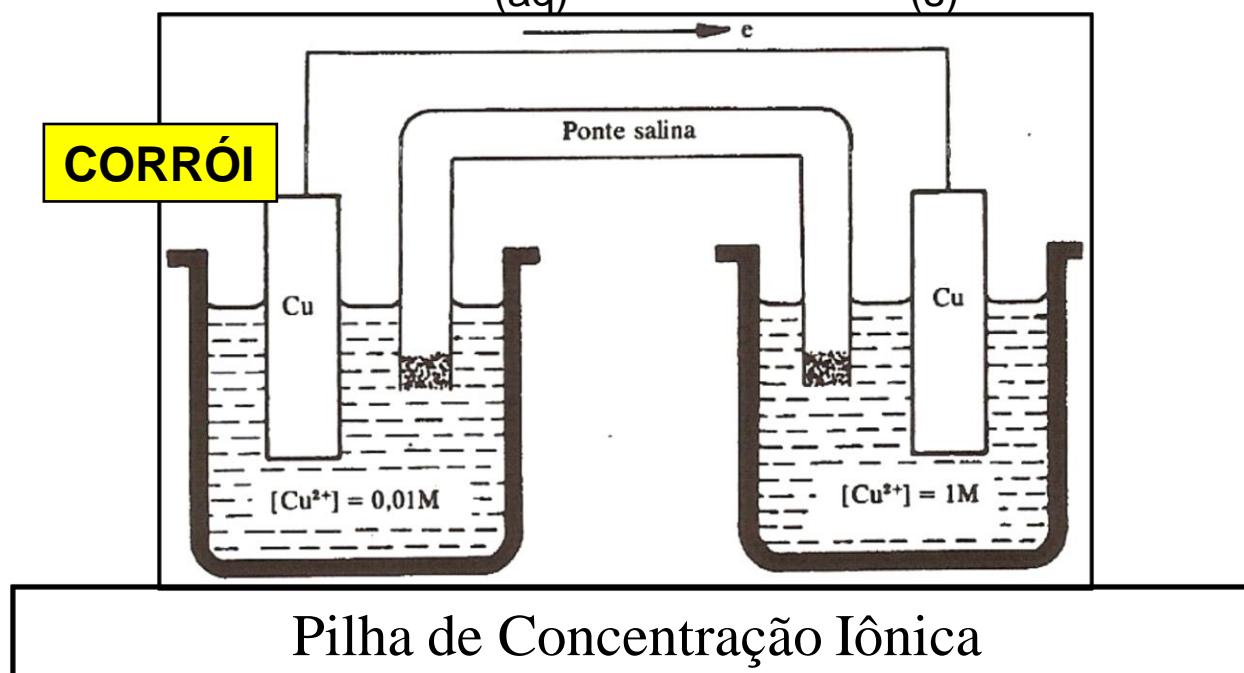
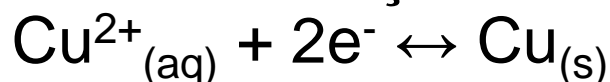
Placa de Zn impura em solução de H_2SO_4 = Pilha de Ação Local

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**.

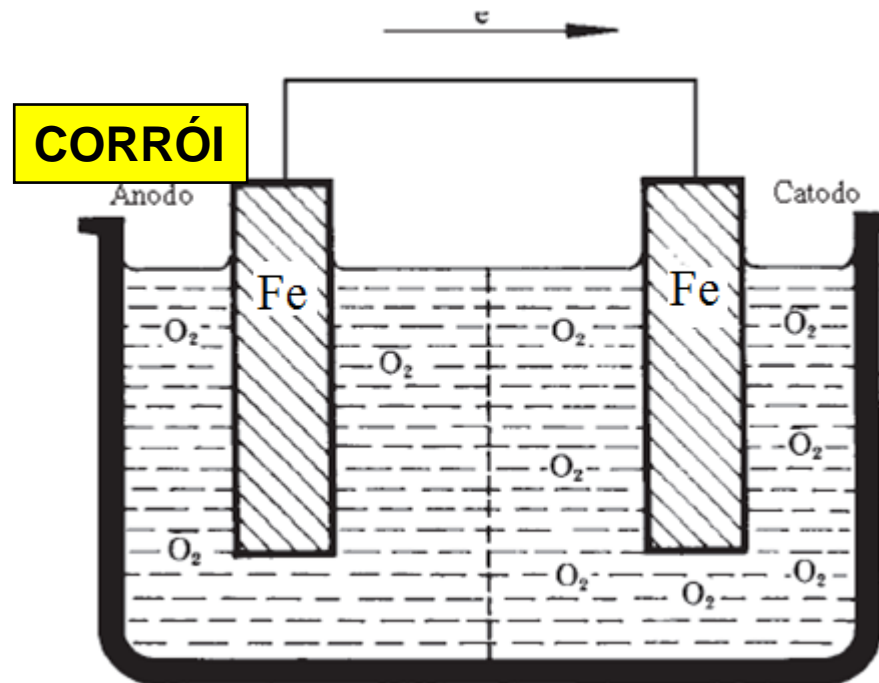


Pilhas de Concentração

PILHA DE AERAÇÃO DIFERENCIAL

Eletródos 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

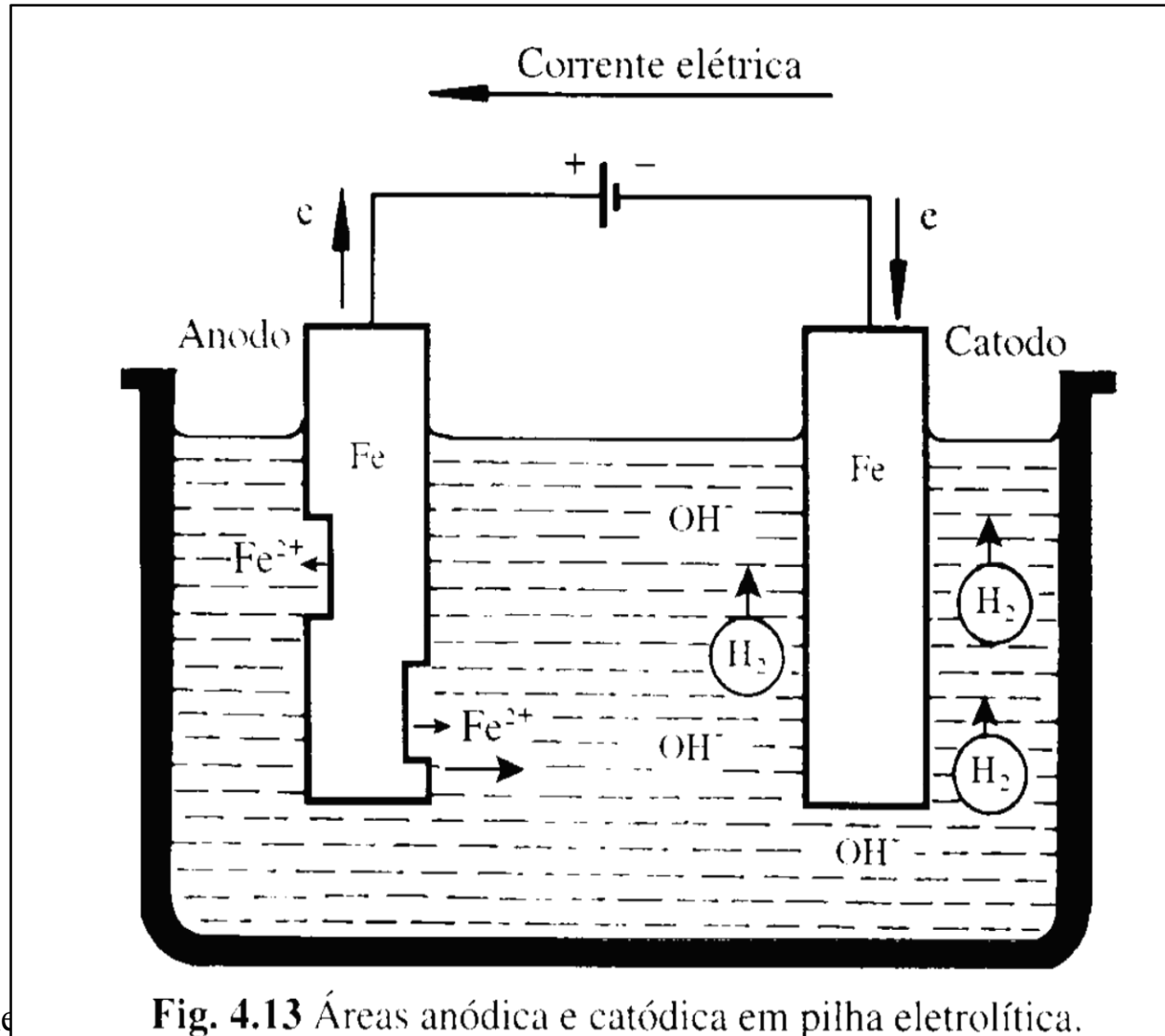


Fig. 4.13 Áreas anódica e catódica em pilha eletrolítica.



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

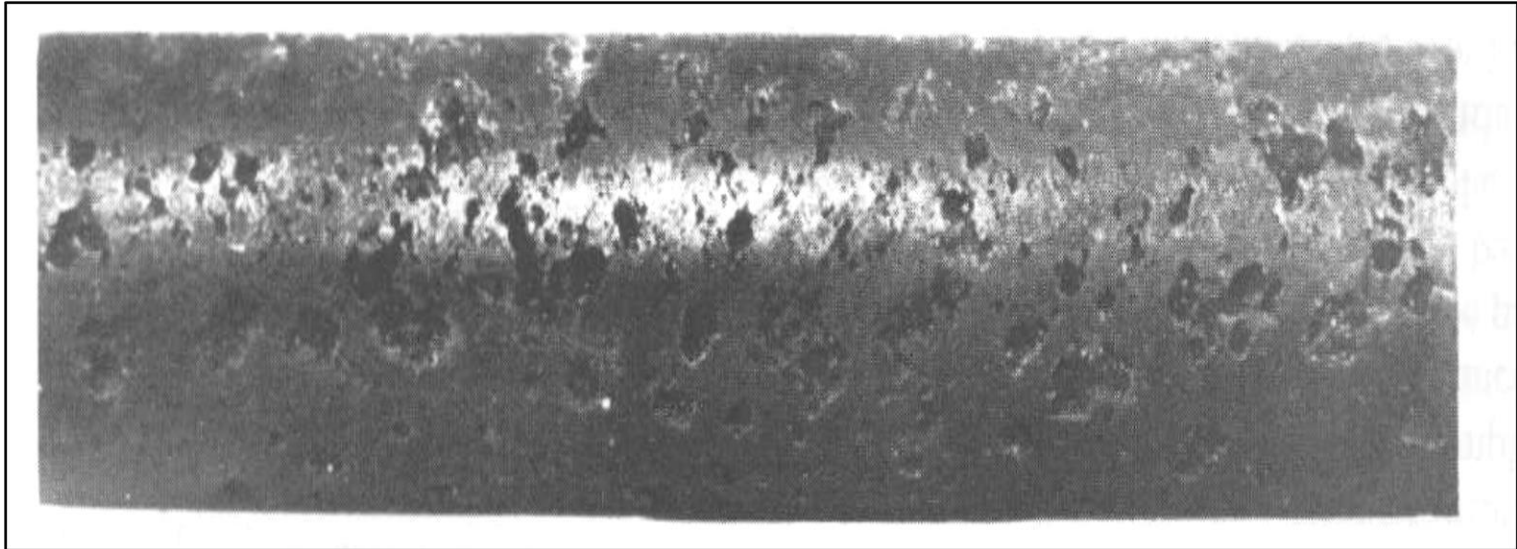


Apresentação de Álvaro Tancredo Dippold Jr., Clóvis Moraes, Dieter Flavius Rothenburg



ALVEOLAR

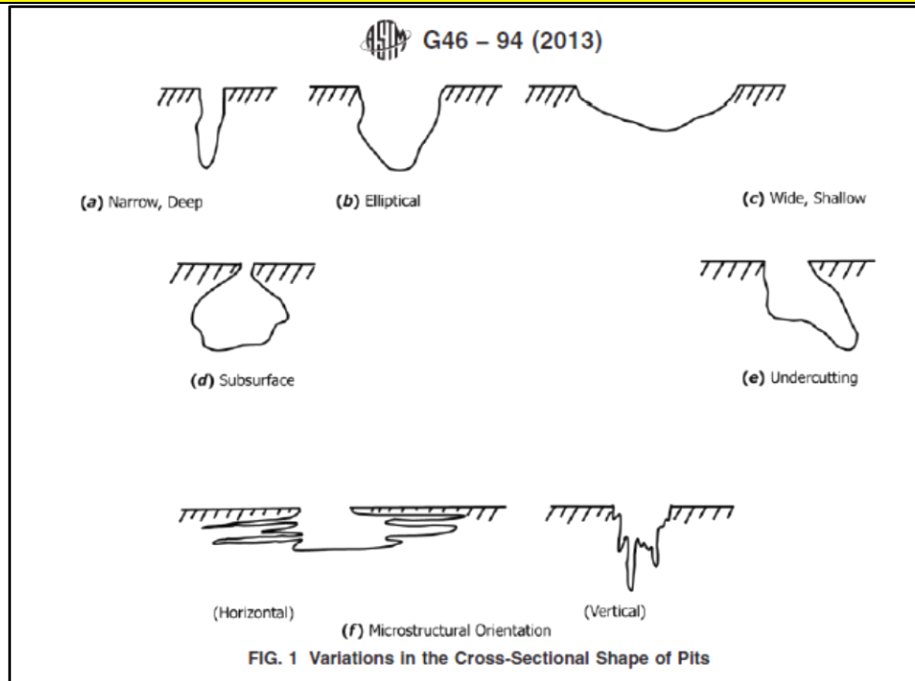
- **Aspecto de crateras;**
- **Películas semi-protetoras ou depósito de eletrólito. Ex: aeração diferencial**



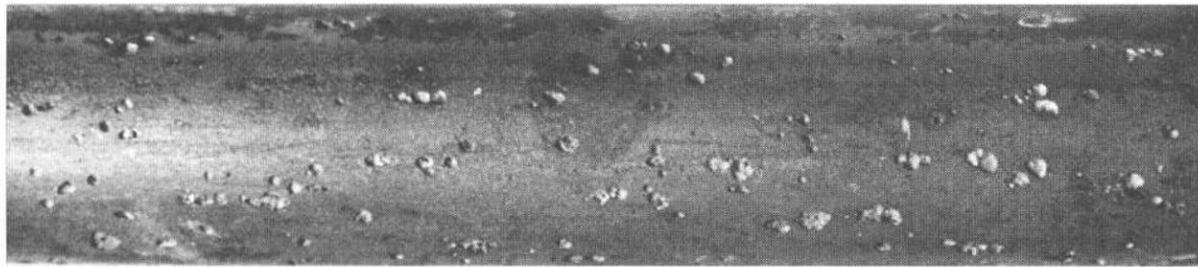
Corrosão alveolar em tubo de aço carbono.

Apresentação de Álvaro Tancredo Dippold Jr., Clóvis Moraes, Dieter Flavius Rothenburg

POR PITES: Pites localizados e com certa profundidade



Vários tipos de “pites” segundo a ASTM G46



Corrosão por “pites” em tubo de aço inoxidável AISI304

ESFOLIAÇÃO

- Peças conformadas por laminação ou extrusão;
- Grãos 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). etc...

- 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**

Apresentação de Álvaro Tancredo Dippold Jr., Clóvis Moraes, Dieter Flavius Rothenburg

Prof. Dr. José Benedito Marcomini



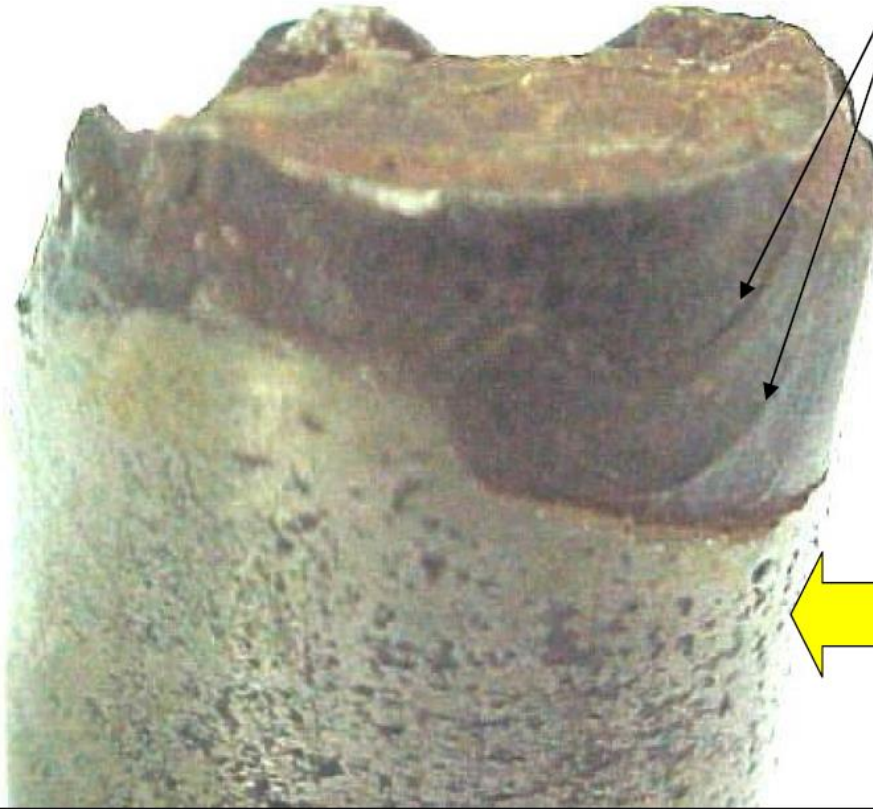
Aço laminado SAE4140, diâmetro 25,40mm - 2013



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

Aço laminado SAE4140, diâmetro 25,40mm - 2013

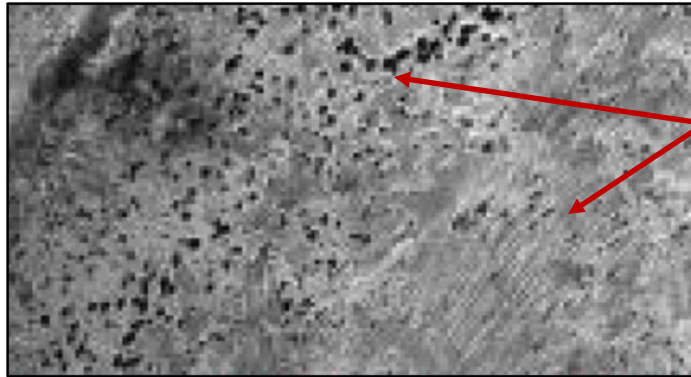
MARCAS DE PRAIA
PROPAGAÇÃO POR FA-
DIGA



CORROSÃO
ALVEOLAR-TÍPICA
DE DEPÓSITO DE
ELETRÓLITO.

**CORROSÃO ALVEOLAR + FADIGA:
CORROSÃO FADIGA POR IMPACTO
SUBMETIDO AO CORRROSION ATLAS-VOL.4-2024**

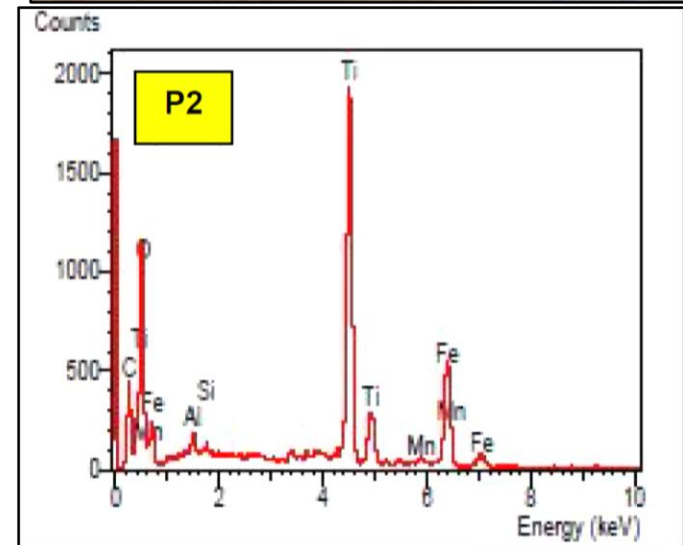
Aço laminado SAE4140, diâmetro 25,40mm - 2013



**ESTRIAS +
CORROSÃO**



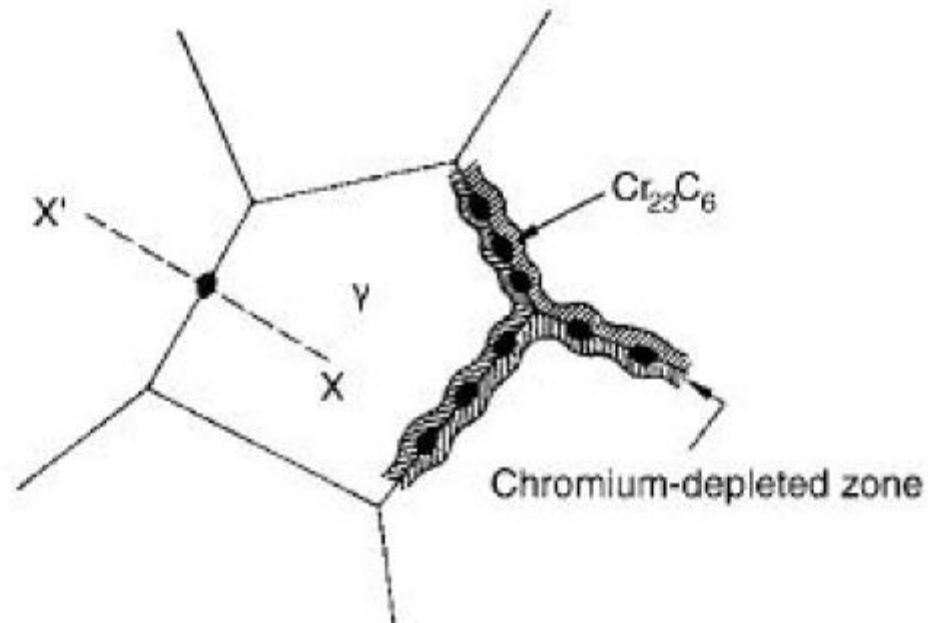
POSSÍVEL ALOJAMENTO DE ELETRÓLITO



CORROSÃO ALVEOLAR + FADIGA: CORROSÃO FADIGA

Corrosão Intergranular

Sensitização e corrosão intergranular



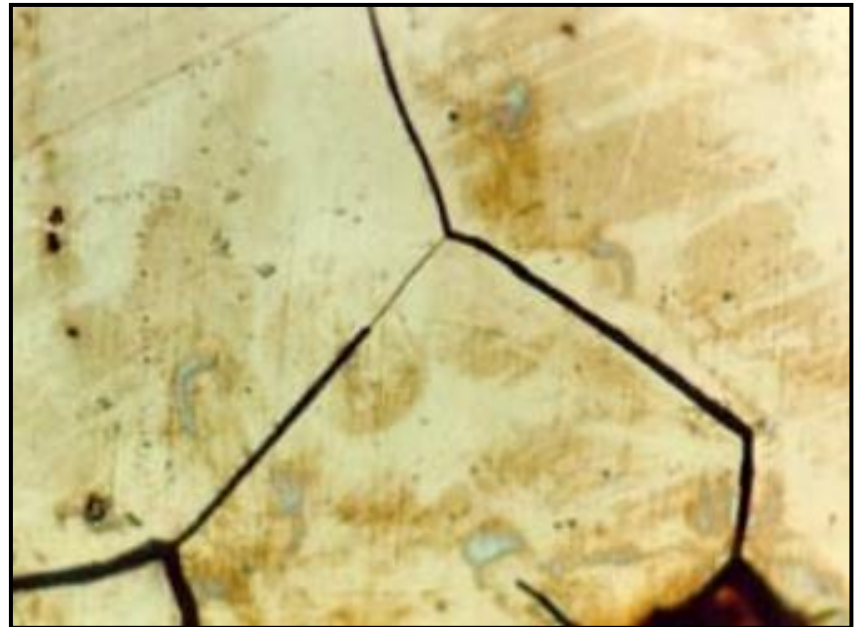
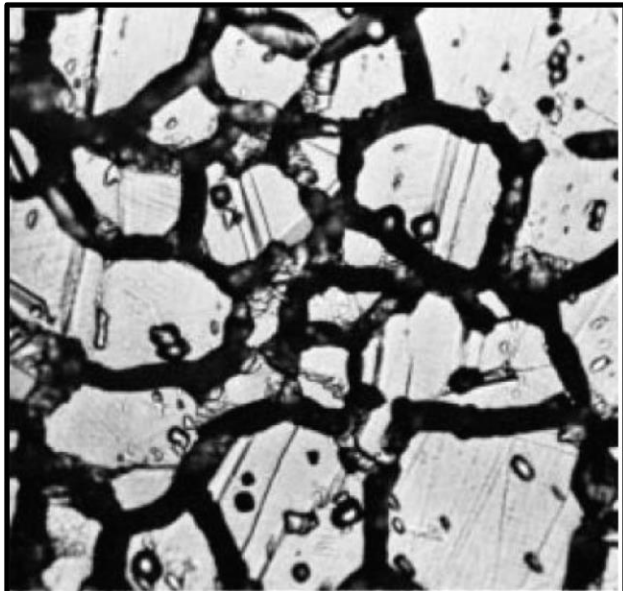
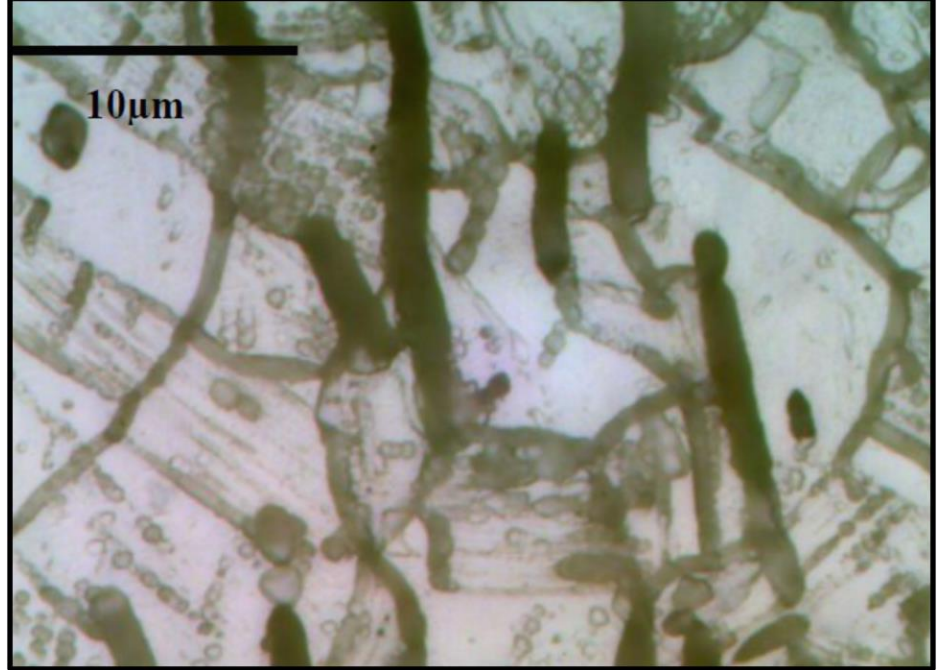
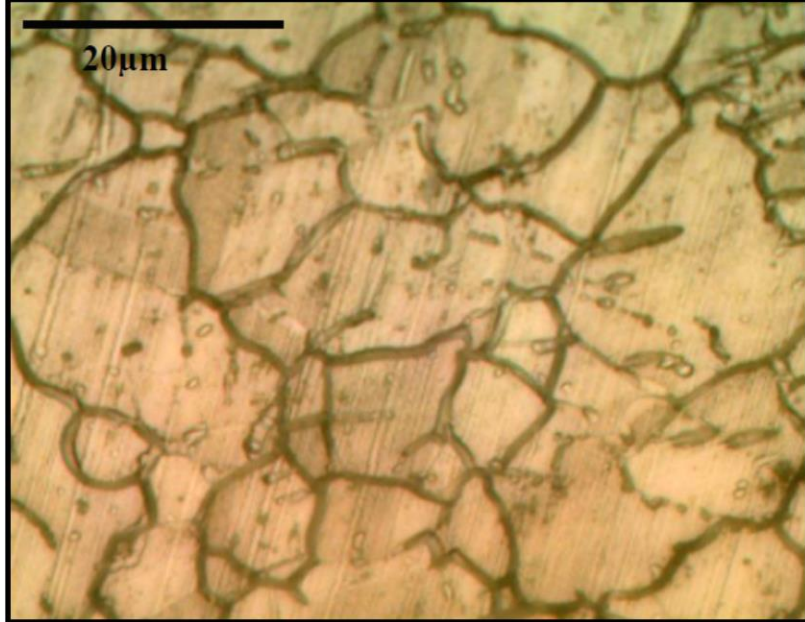


FIG. 3 Ditch Structure (500×) (One or more grains completely surrounded by ditches)

ASTM A 262-Fig.3 page 4.

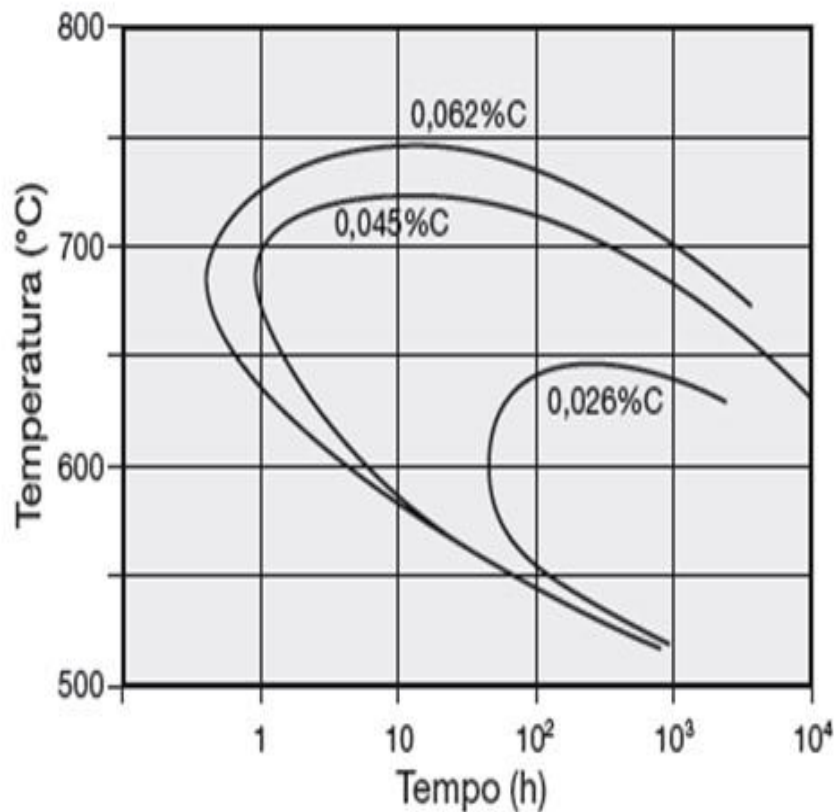


Figura 16.44

Tempo de tratamento, na temperatura indicada, necessário para que ocorra sensitização e o material seja rejeitado pelo ensaio do Método E da norma ASTM A262 para avaliação de resistência à corrosão intercrystalina. Resultados para AISI 304 com diferentes teores de carbono, solubilizado a 1050 °C, seguido de resfriamento em água.



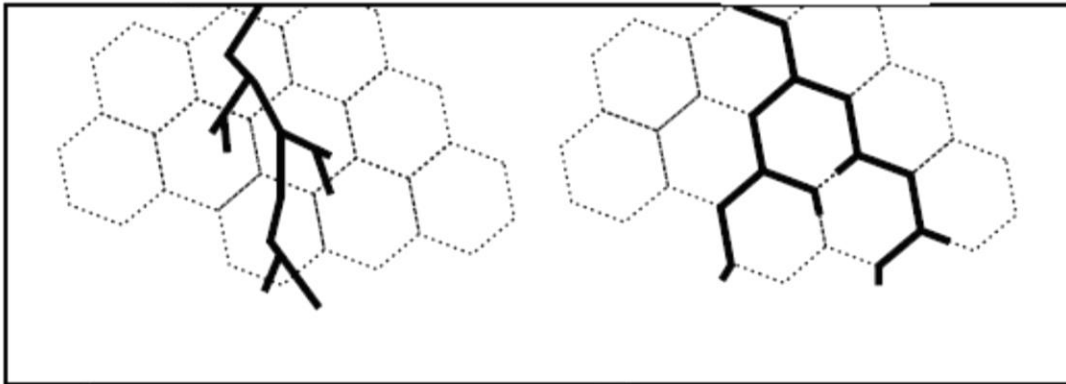
EESC • USP

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 Cl⁻ 60°C (QUEBRA A CAMADA PASSIVADORA).



Transgranular

Intergranular

**Stress Corrosion
Cracking**

CORROSÃO SOB TENSÃO

(METALS HANDBOOK, VOL.11)

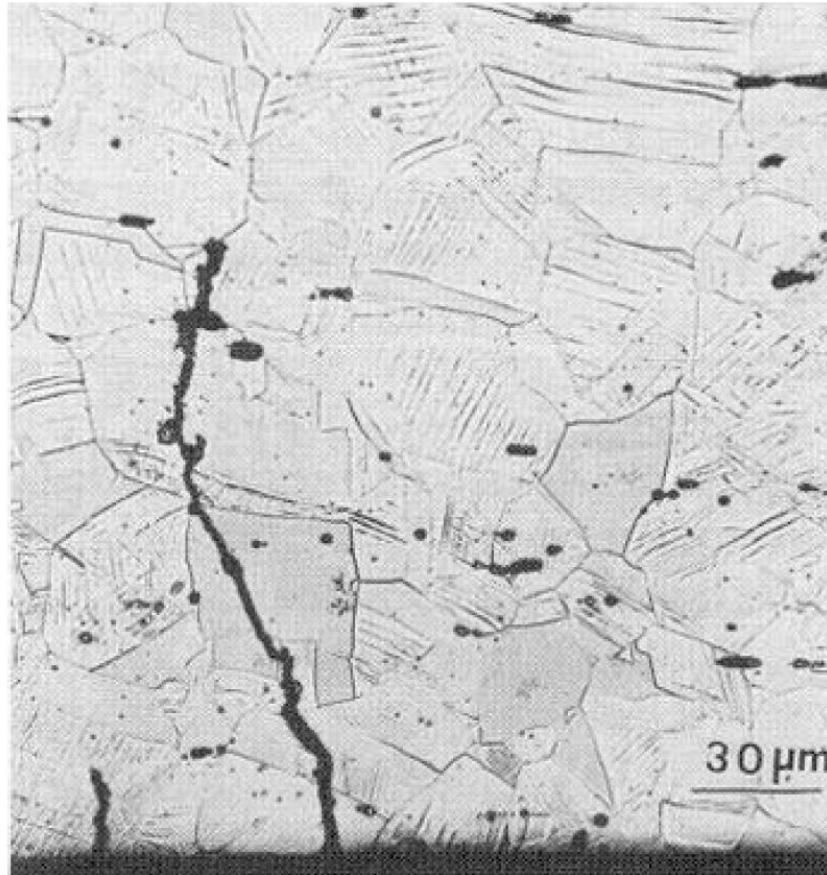
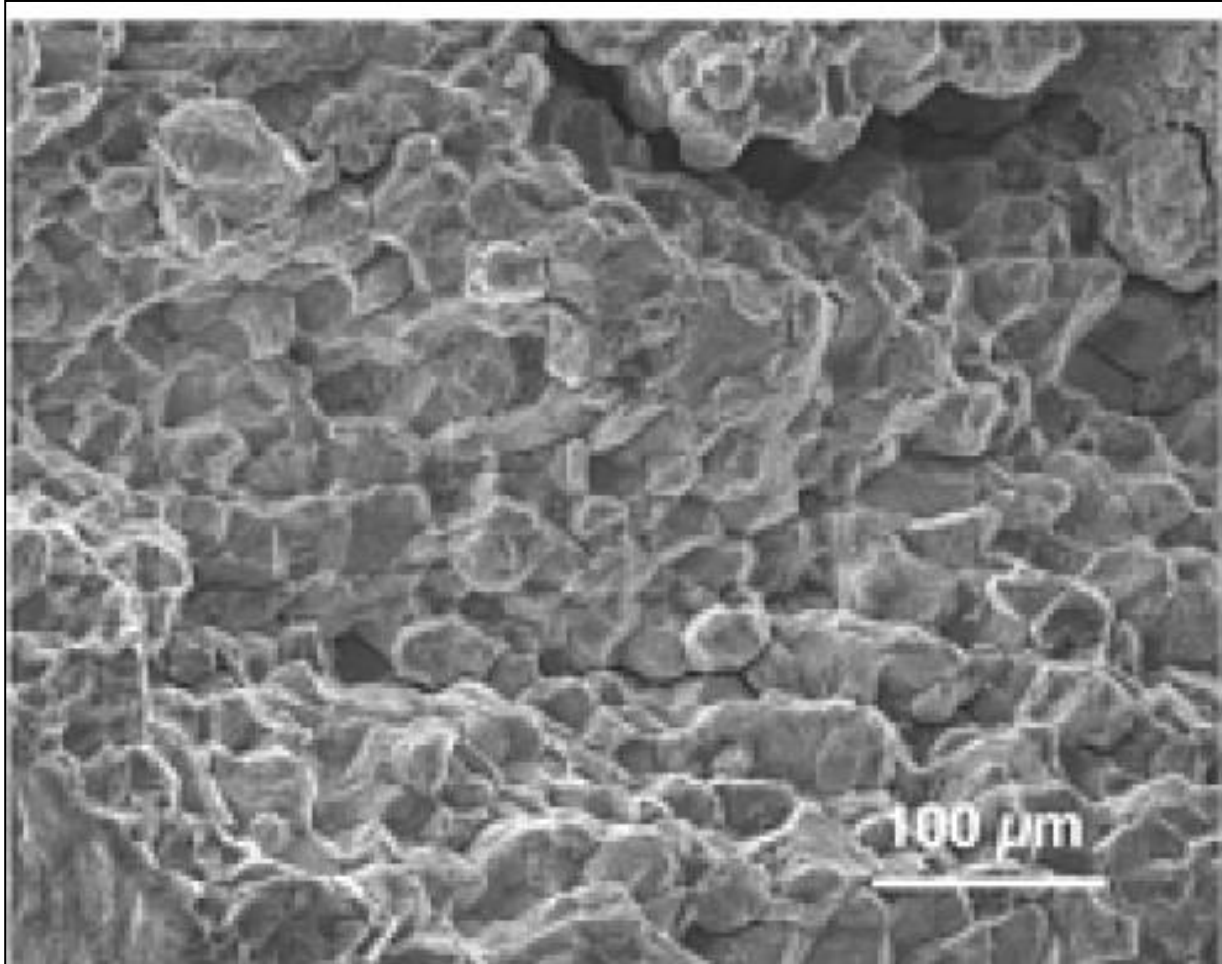


Fig. 39 Stress-corrosion cracking in a 316 stainless steel orthopedic implant

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*)



AERÓBICAS

bactérias oxidantes do enxofre (*Thiobacillus thiooxidans*)



**SUFETO ACELERA A
REAÇÃO ANÓDICA
(CORROSÃO)**

**ÁCIDO SULFÚRICO-MEIO
CORROSIVO**

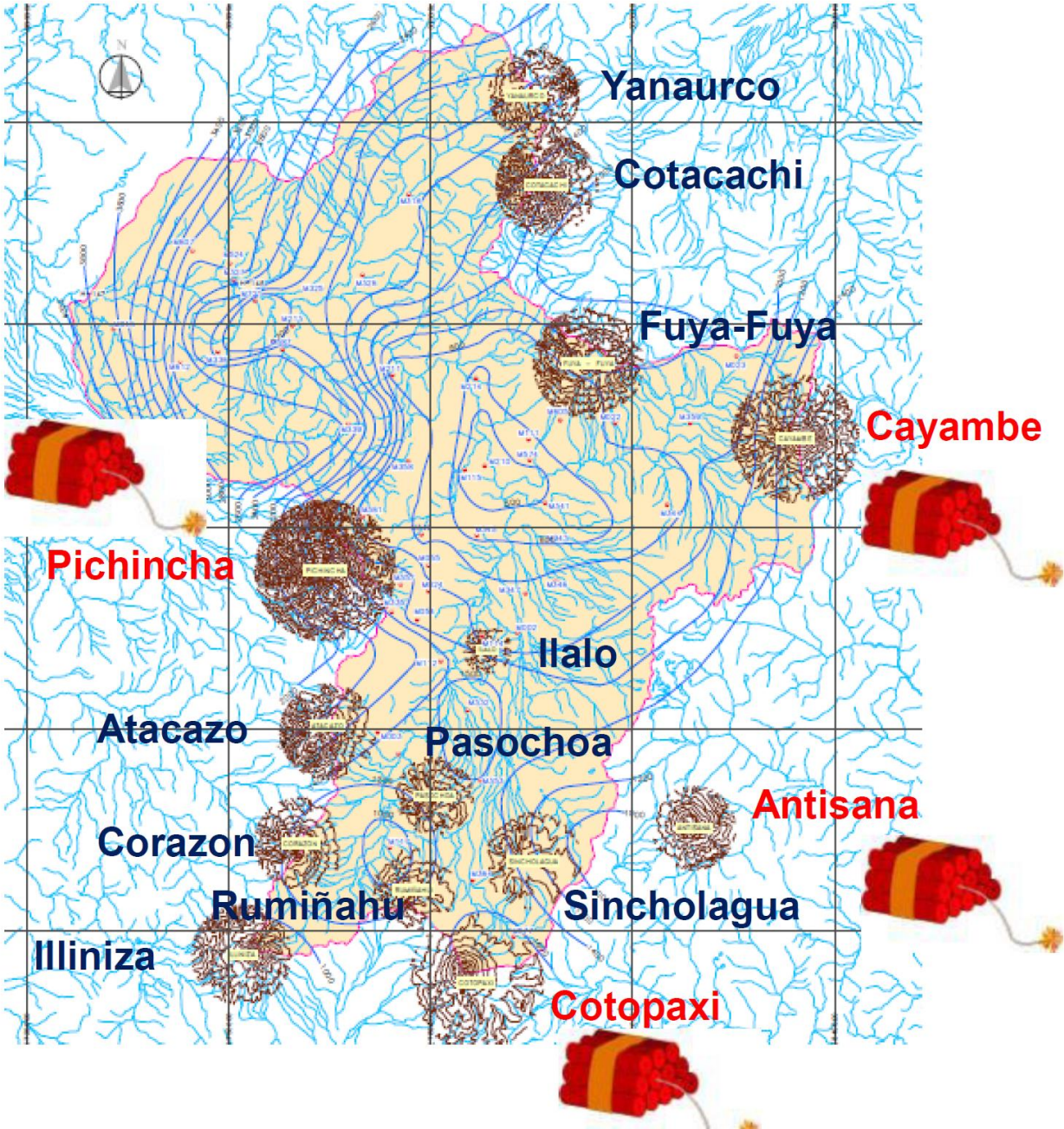
(Prof.Dr.João SalvadorFernandes)

UHE Manduriacu



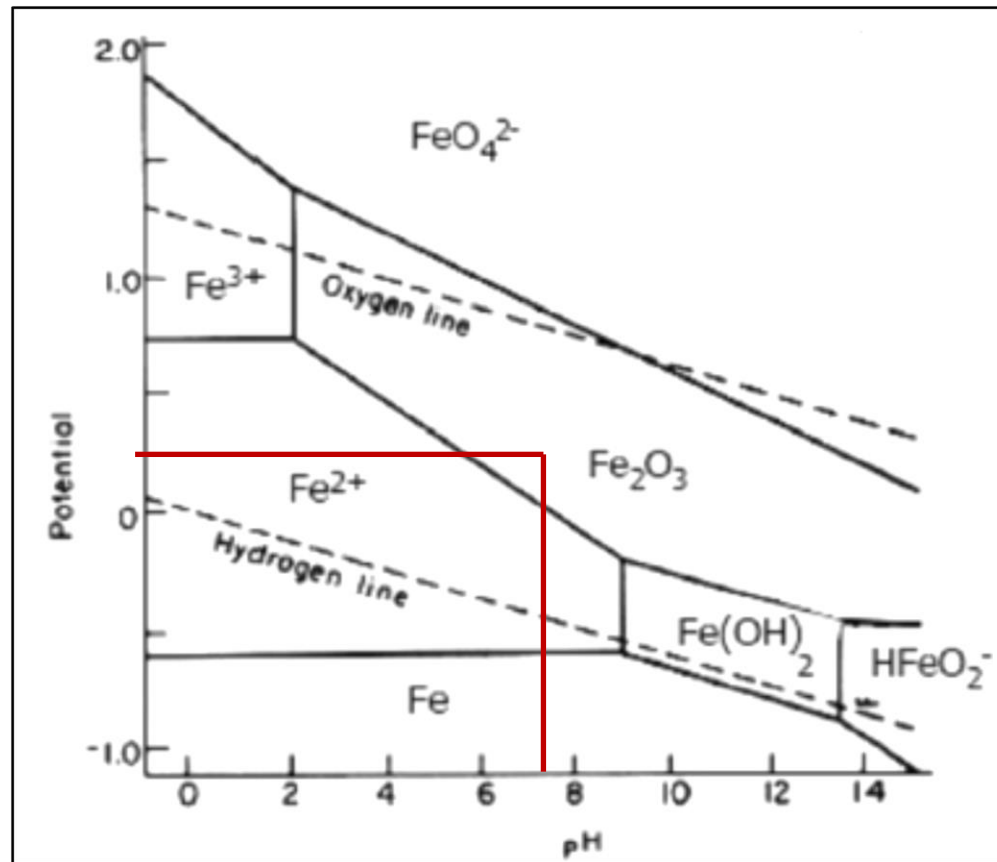
EXEMPLO

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



CORROSÃO EM ARMADURA DE CONCRETO

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

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

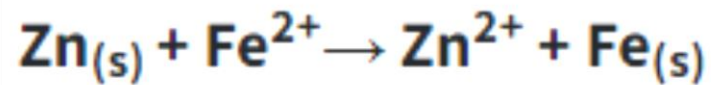
MÉTODOS DE APLICAÇÃO DOS REVESTIMENTOS METÁLICOS



MÉTODOS DE APLICAÇÃO DOS REVESTIMENTOS METÁLICOS

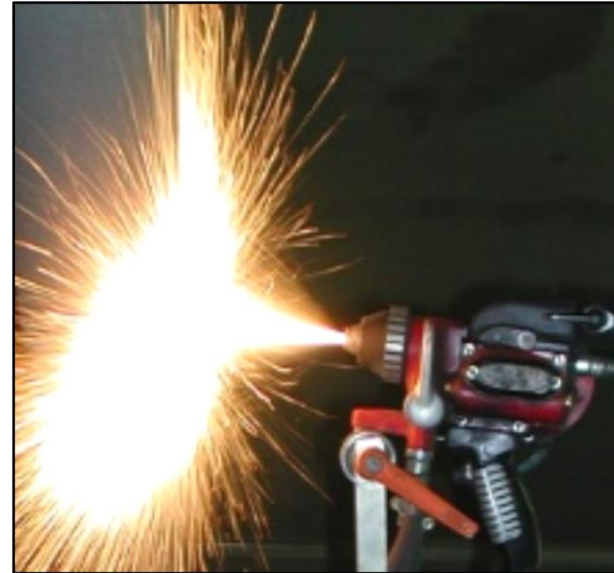
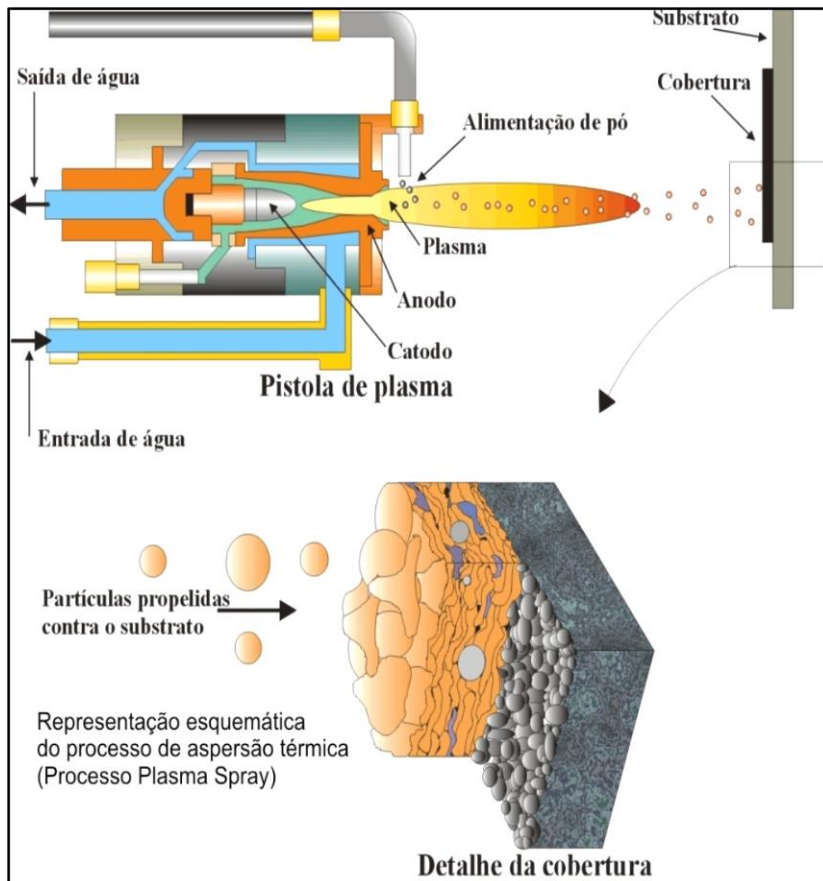
- **Eletrodeposição;**
- **Imersão à quente;**
- **Aspersão térmica;**
- **Cladd.**

Imersão a quente: Galvanização deposição de Zn em Fe/aço



ASPERSÃO TÉRMICA (METALIZAÇÃO)

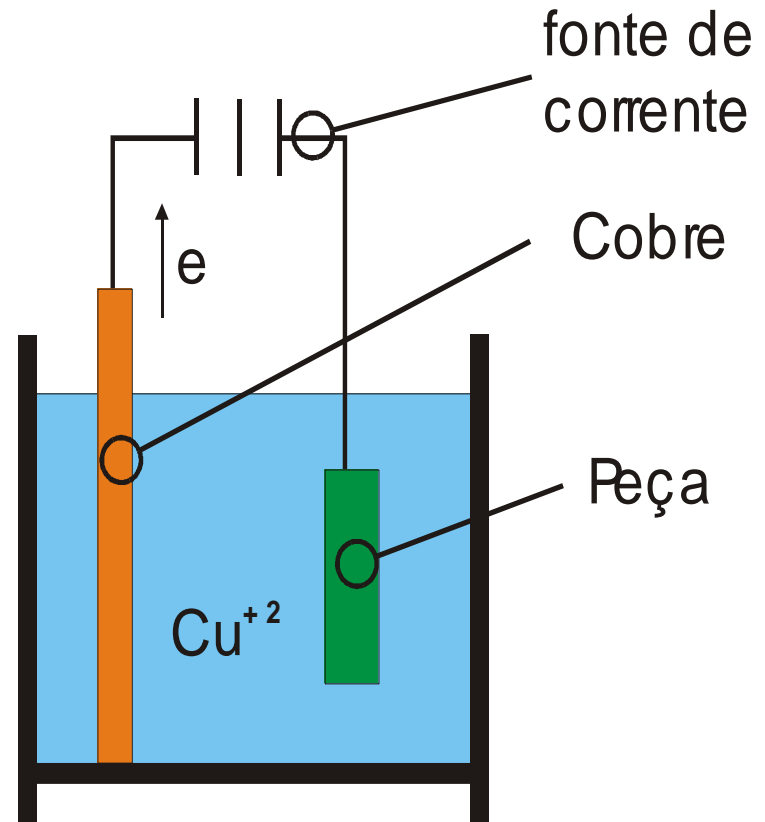
A liga é aquecida até a fusão e projetada por meio de ar comprimido.



MÉTODOS DE APLICAÇÃO DOS REVESTIMENTOS METÁLICOS

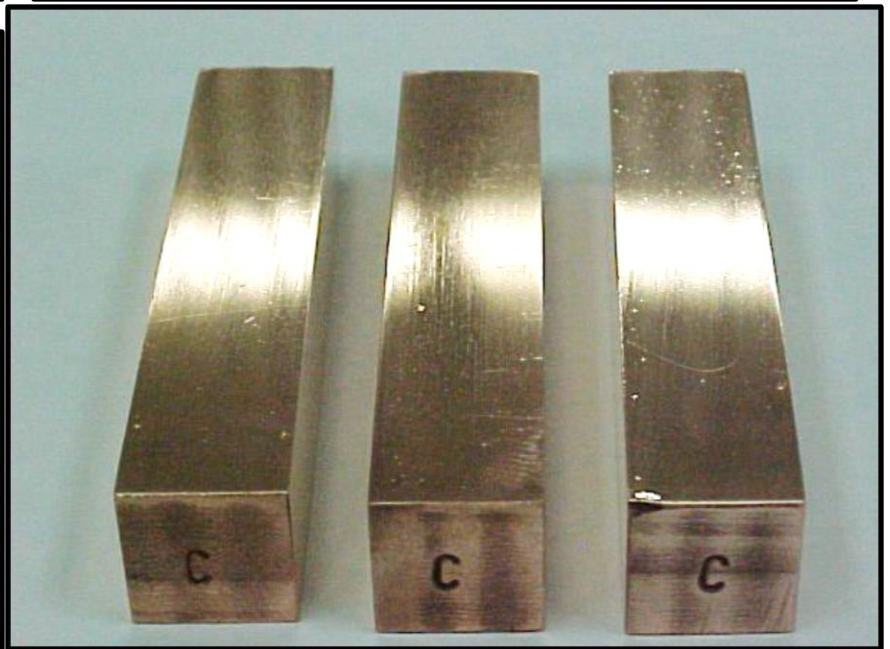
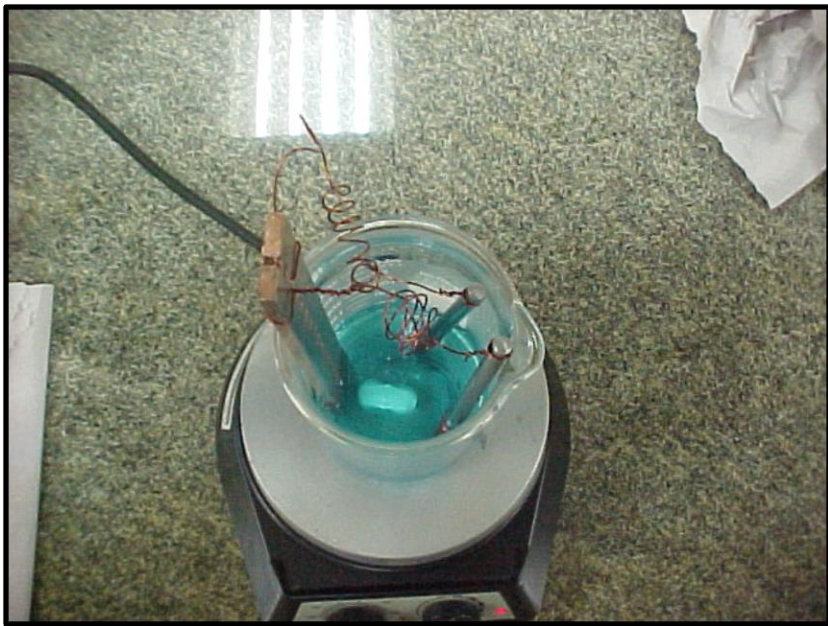
ELETRODEPOSIÇÃO DE COBRE, NÍQUEL, ETC

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



As reações eletrolíticas são:







EESC • USP



MÉTODOS DE APLICAÇÃO DOS REVESTIMENTOS METÁLICOS

CLADDING

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



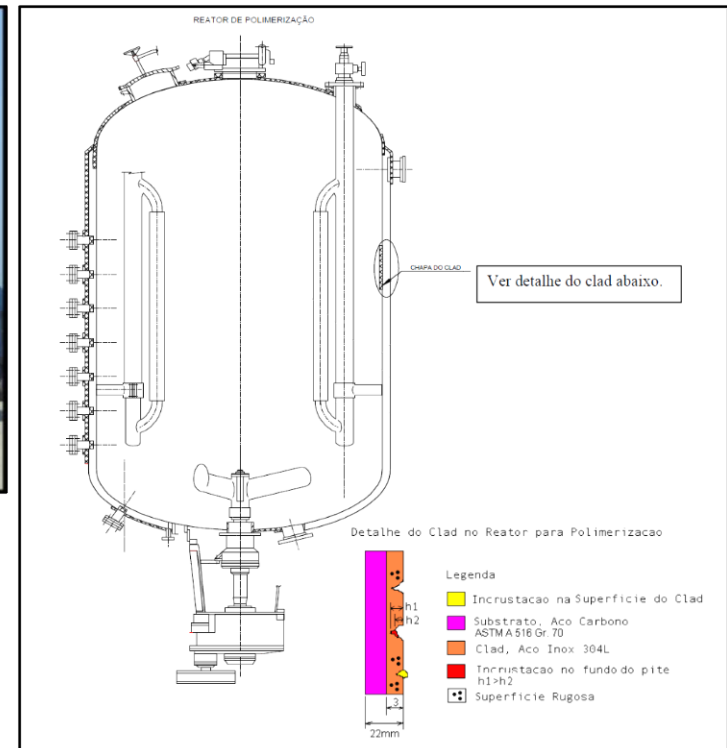


EESC • USP

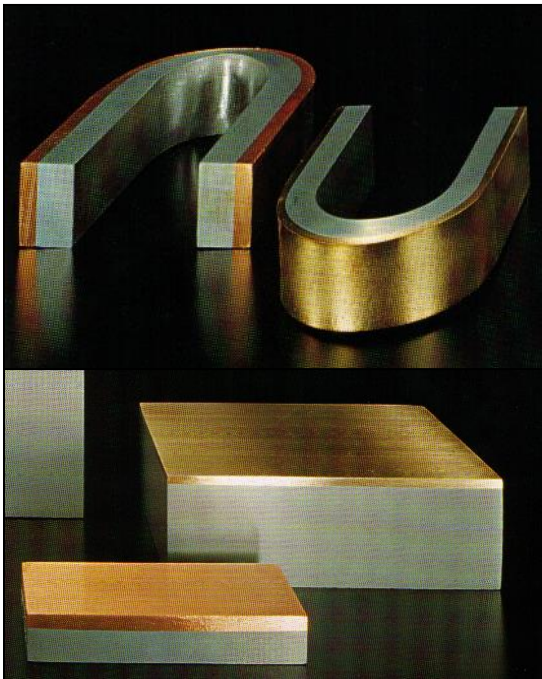
CASO DA TORRE COM CHAPA CLADEADA



- FORNECIDO TORRE COM CHAPA DE AÇO ASME SA 516 – GR 70 COM CLAD DE AISI 304L ;
- CHAPA CLADEADA POR EXPLOSÃO;



Algumas Combinações



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

CECAL



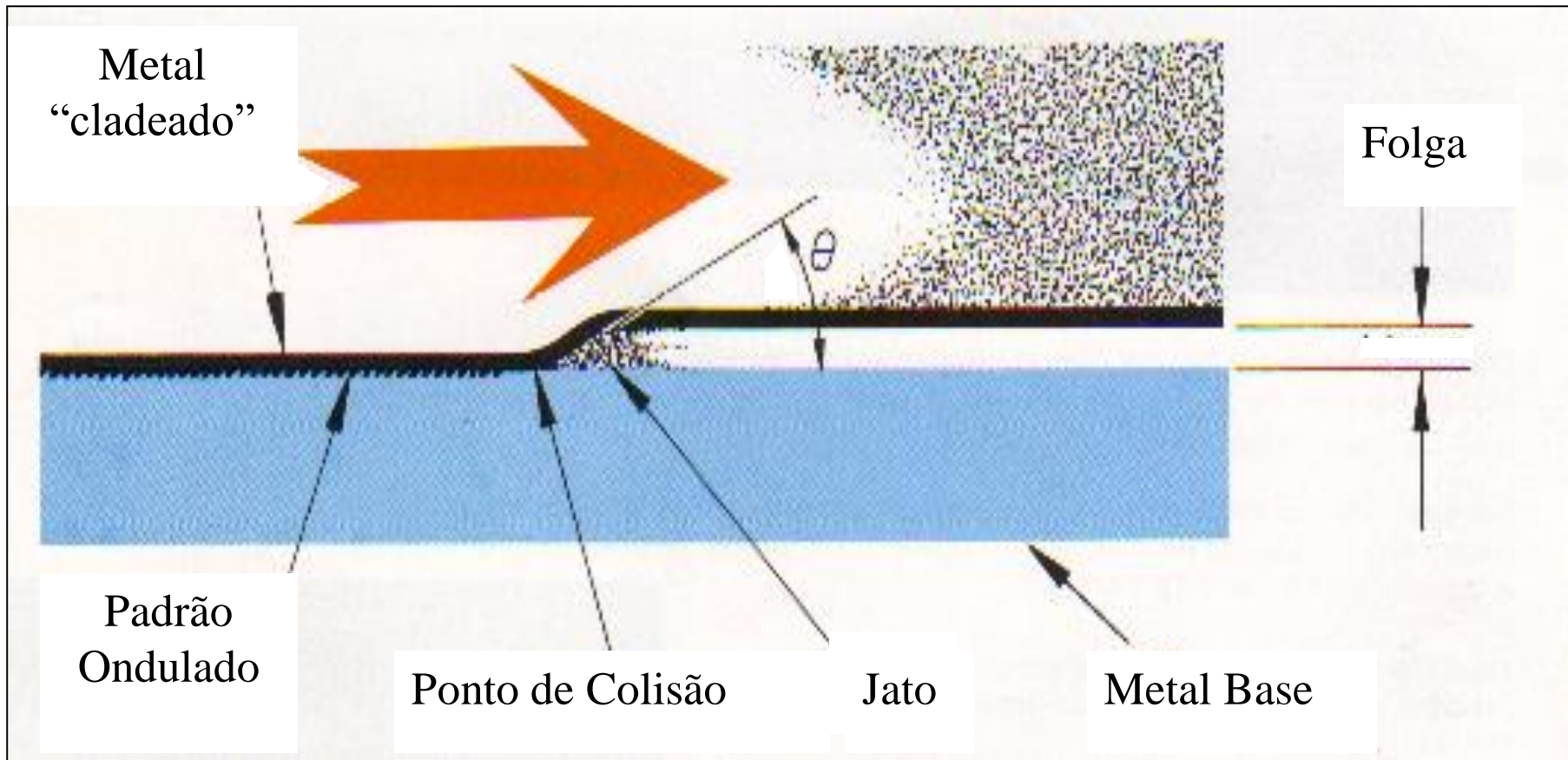
CECAL



CECAL



CECAL

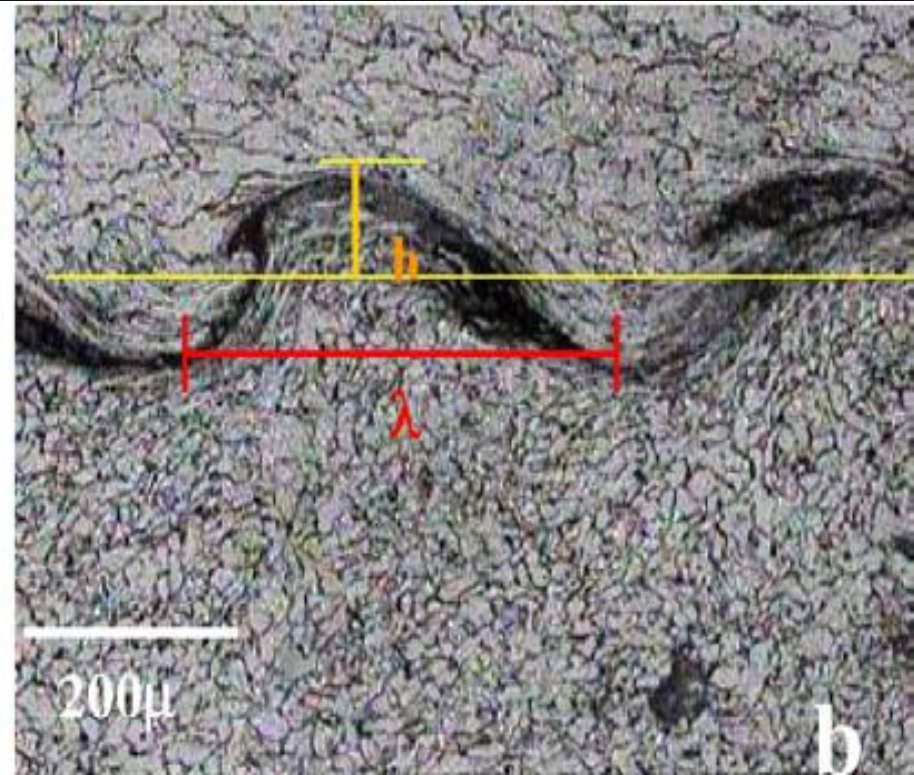
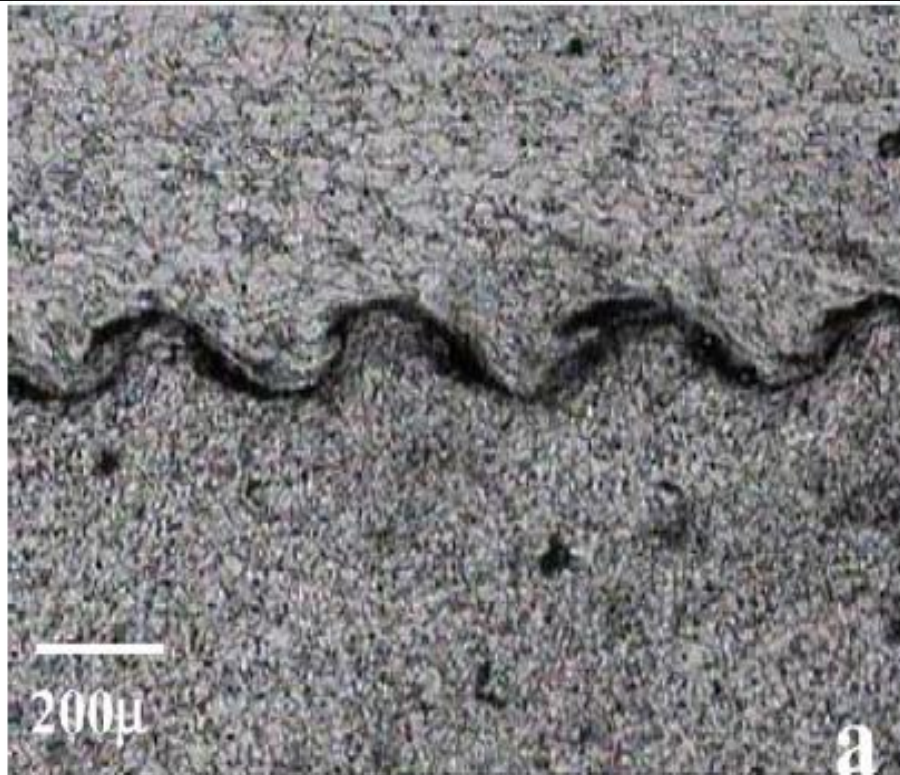




FEEC - USP



MICROESTRUTURAS DO METAL BASE E CLADD POR EXPLOSÃO.



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

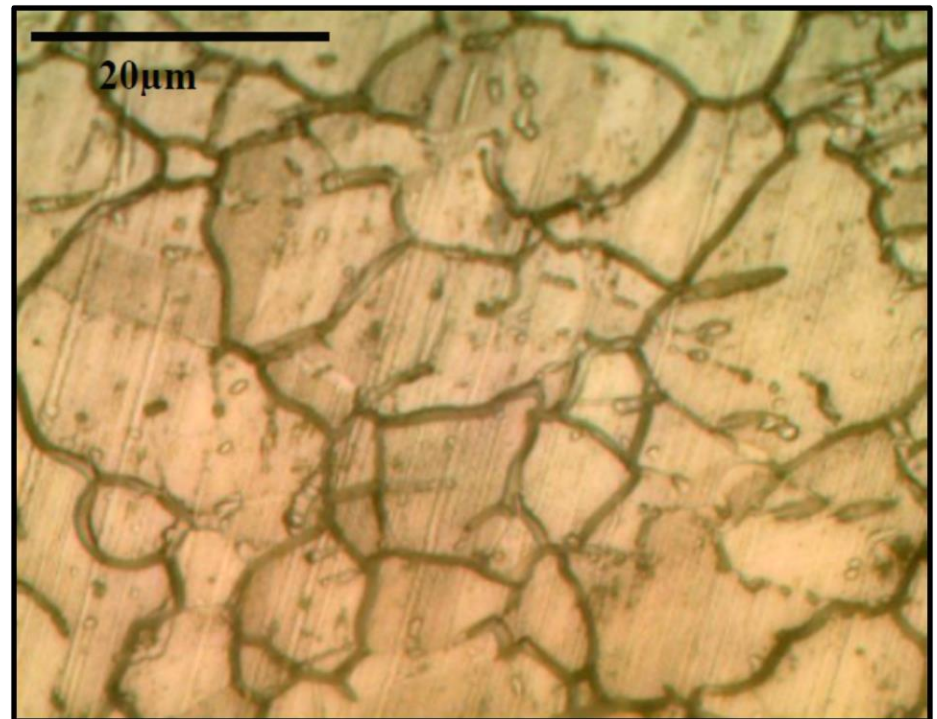
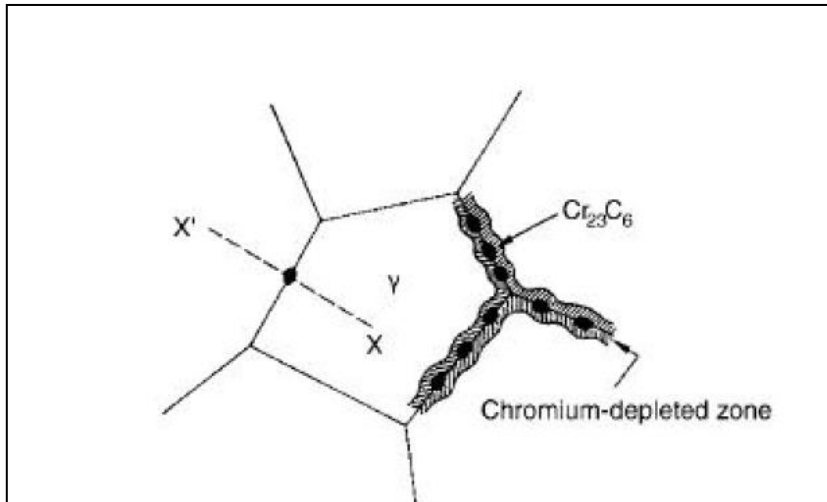
Prof. Dr. José Benedito Marcomini

- **CONSEQUÊNCIAS:**

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



- **SENSITIZAÇÃO**

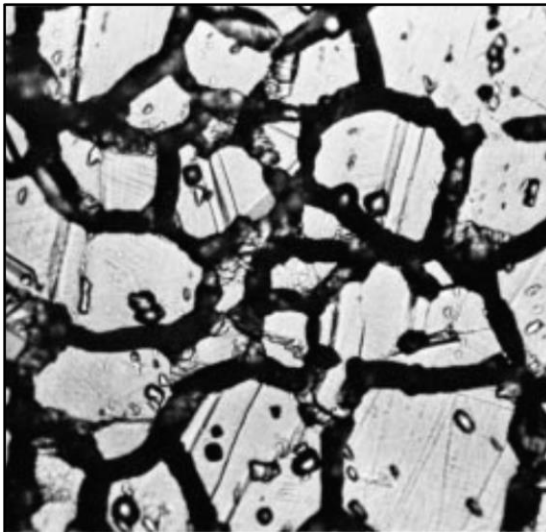




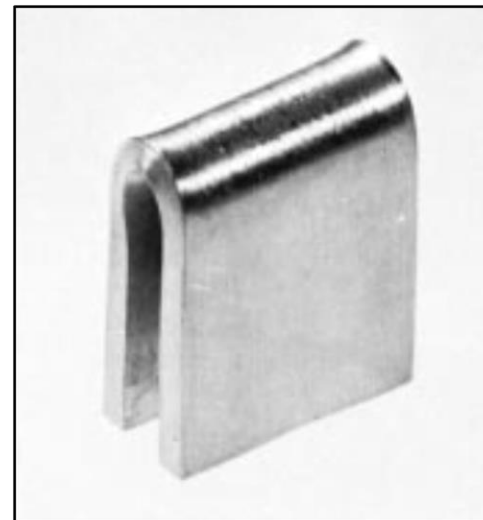
Designation: A 262 – 02a^{ε1}

Standard Practices for
Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Austenitic
Stainless Steels¹

PRÁTICA A
ATAQUE ELETROQUÍMICO
COM ÁCIDO OXÁLICO COM
CORRENTE ELÉTRICA DE 1
A/cm² for 1.5 min.



PRÁTICA E
A AMOSTRA FICA IMERSA EM
UMA SOLUÇÃO DE (CuSO₄.5H
₂O+H₂SO₄)16%-MÍNIMO DE 15
HORAS. ENSAIO DE
DOBRAMENTO



PRÁTICA E- CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO: NÃO OCORRER FRATURA INTERGRANULAR.

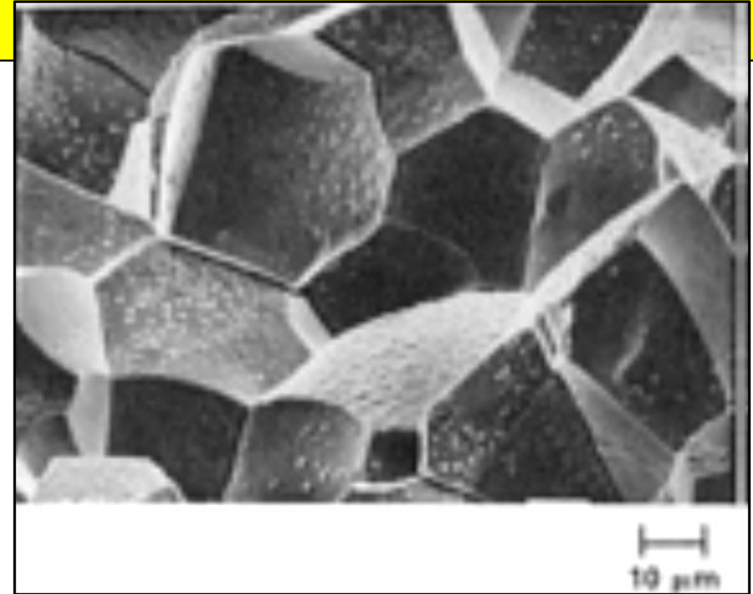


Figura 2

Vista da região dobrada do corpo-de-prova.

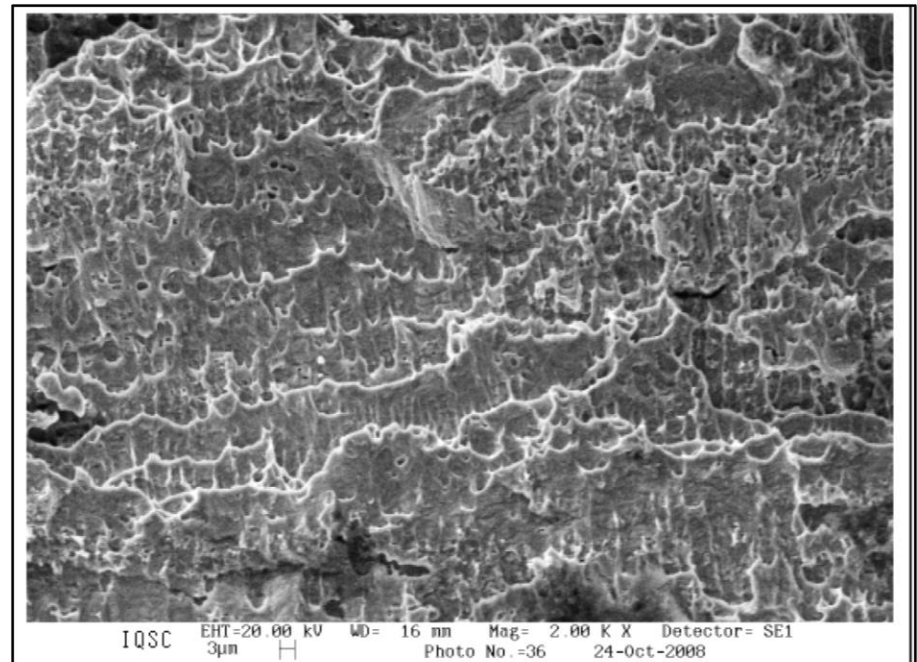
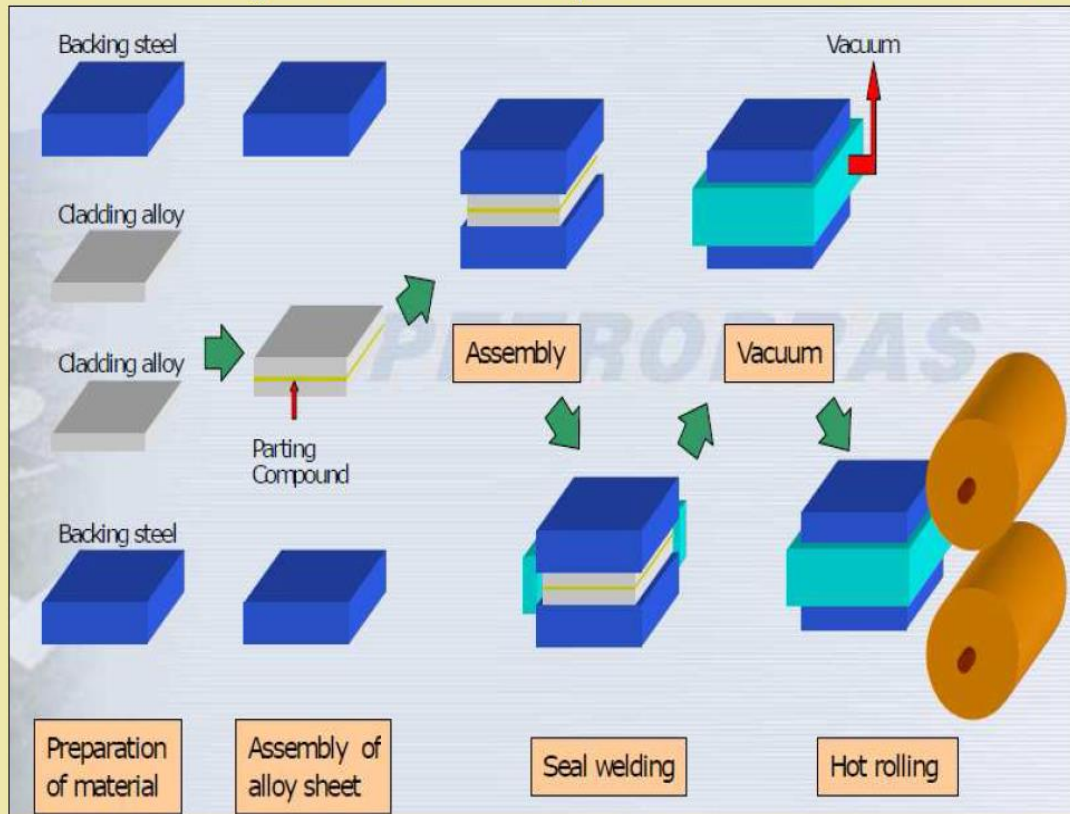


Figura 7 – Análise de MEV apresentando micromecanismo de fratura por "dimples"

Laminação de Chapas Bi-Metálicas:



COLAMINAÇÃO A QUENTE.

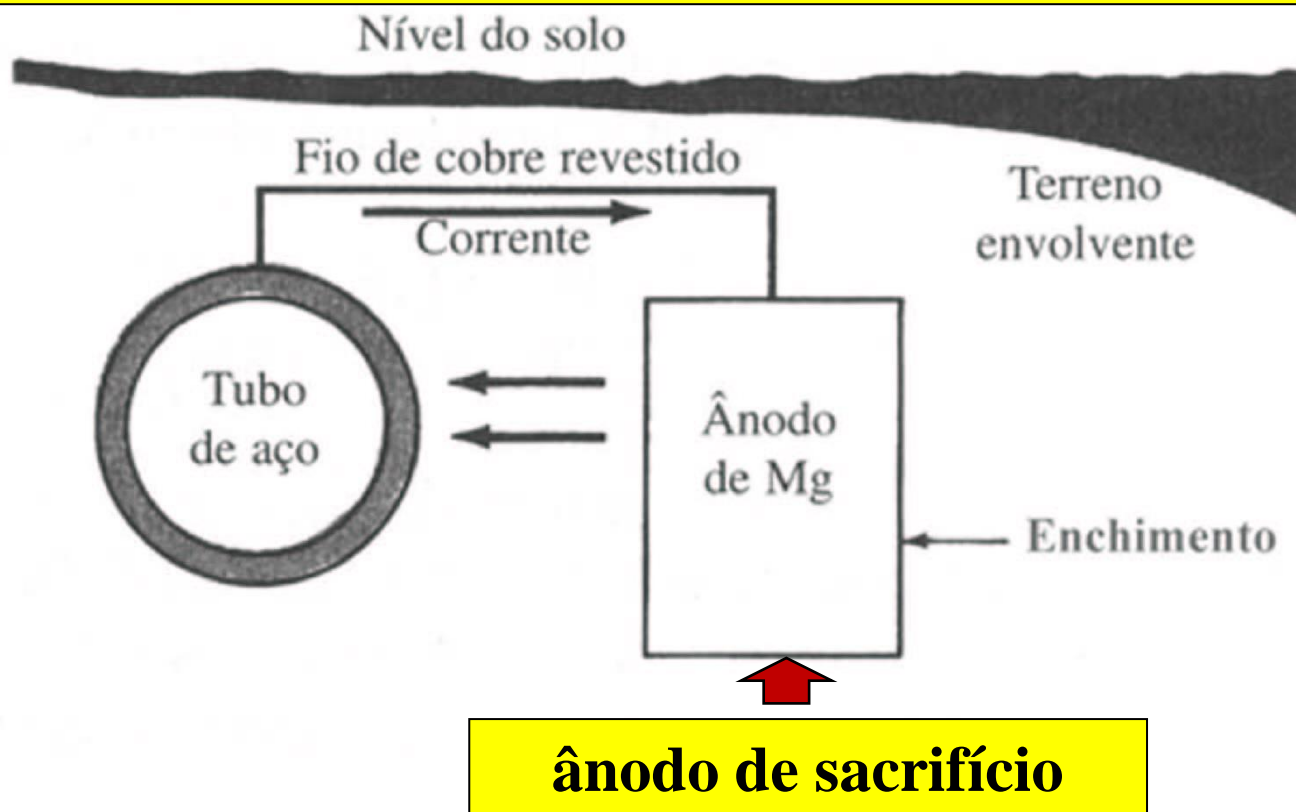
Fotos: Butting

MÉTODOS PARA COMBATER A CORROSÃO

PROTEÇÃO CATÓDICA

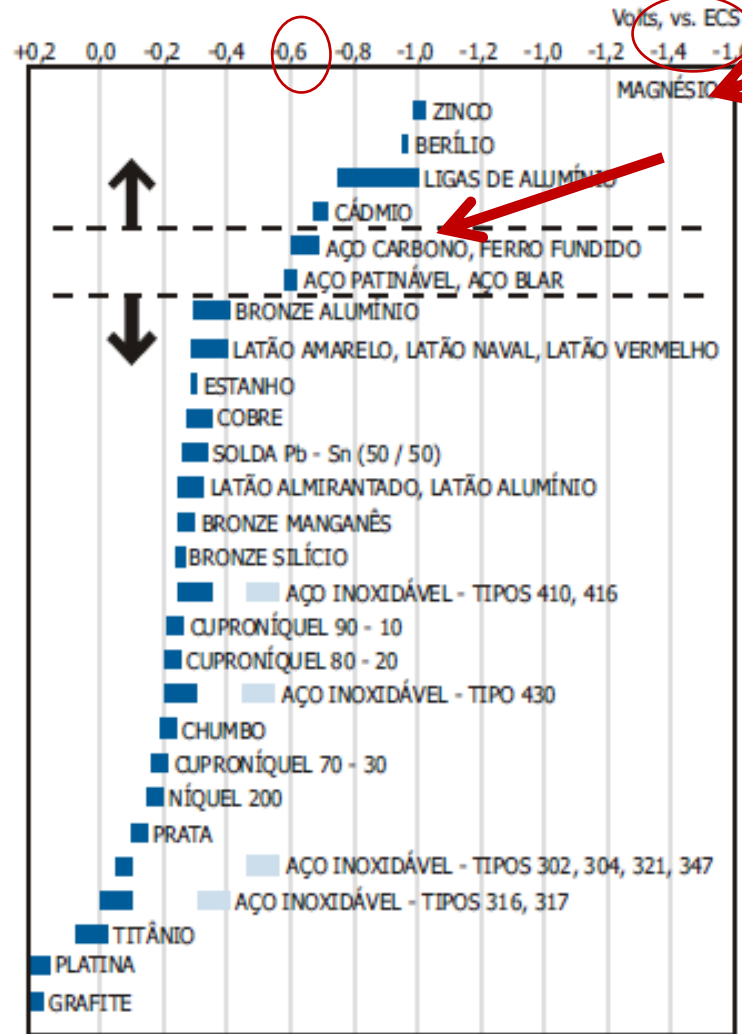
- Empregado principalmente em **estruturas metálicas de grandes dimensões (navios, tubulações);**
- **Princípio: formação de uma pilha galvânica entre o material a proteger (cátodo) e um eletrodo de sacrifício (ânodo);**
- **Com ou sem aplicação de corrente externa.**

PROTEÇÃO CATÓDICA COM ANODO DE SACRIFÍCIO SEM CORRENTE EXTERNA



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
CORRÓI E O AÇO
NÃO**

PROTEÇÃO CATÓDICA COM ANODO DE SACRIFÍCIO SEM CORRENTE EXTERNA



Anodo de magnésio



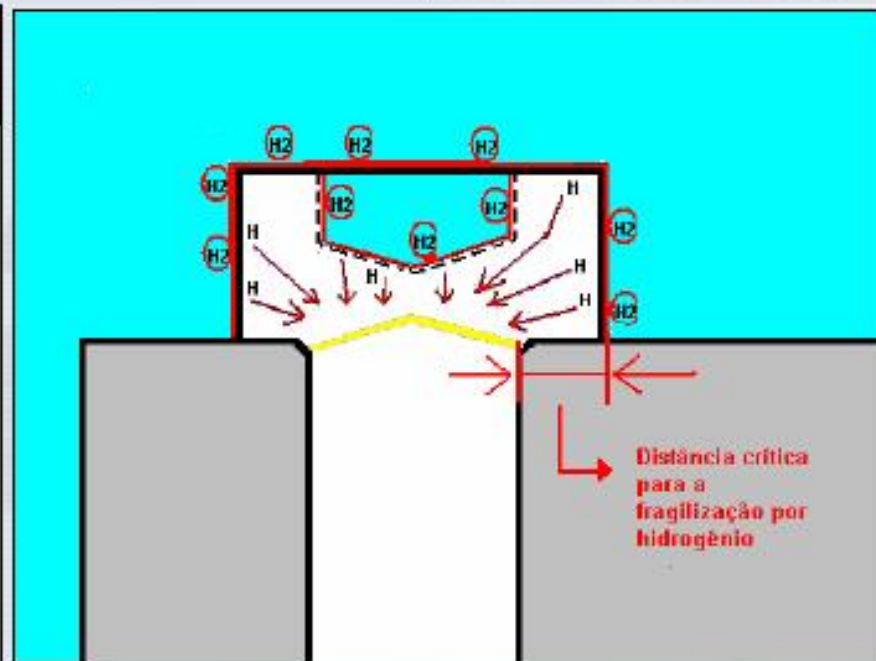
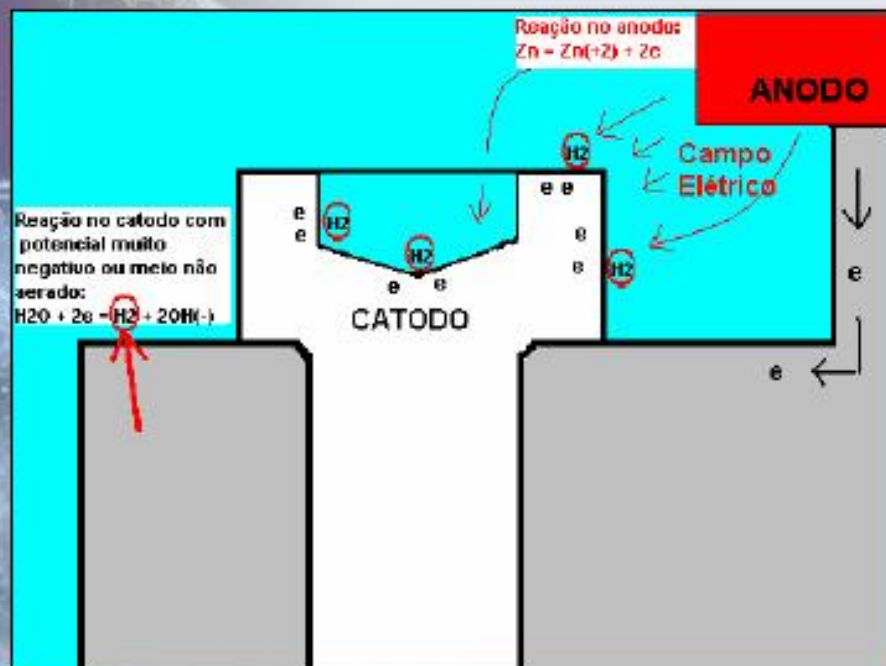
<http://becominglistless.blogspot.com.br/>



DETALHE DO ÂNODO DE SACRIFÍCIO DE LIGA DE ALUMÍNIO

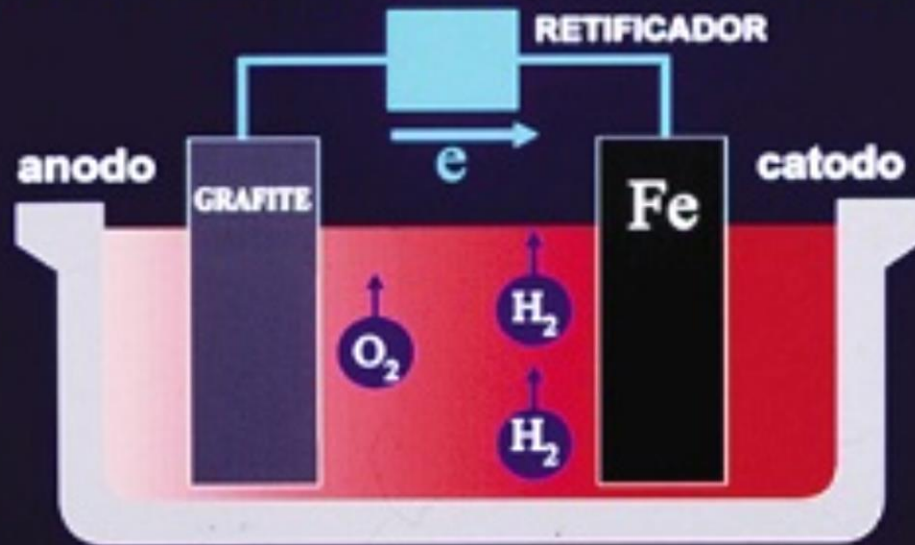
(Cantarin, T.N.-IPEN-2011)

- ☑ **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.



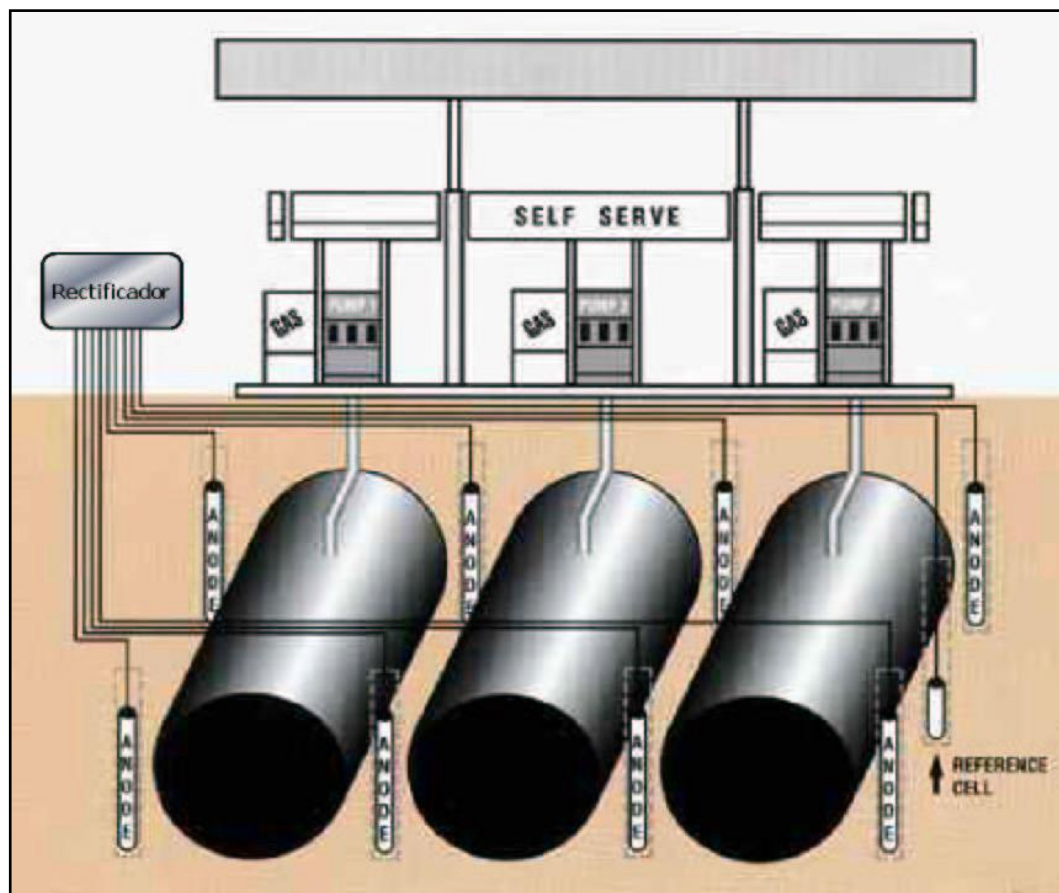
MÉTODOS PARA COMBATER A CORROSÃO

PROTEÇÃO CATÓDICA POR CORRENTE IMPRESSA OU FORÇADA



Aplicação de potencial elétrico (corrente imposta)

PROTEÇÃO CATÓDICA COM ANODO DE SACRIFÍCIO COM CORRENTE EXTERNA



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



MÉTODOS PARA COMBATER A CORROSÃO

REVESTIMENTOS NÃO METÁLICOS

EX: TINTAS EVITAM BIOCORROSÃO



MATERIAIS RESISTENTES À OXIDAÇÃO E CORROSÃO

AÇOS INOXIDÁVEIS

- **1908 - 1910** (laboratório de físico-química da Krupp, Essen, Alemanha): **Dr. Eduard Maurer e Dr. Breno Strauss** desenvolveram aços contendo **35% p Ni 13 a 14%p Cr**. Dois anos depois, patentearam os **Aços Inoxidáveis Austeníticos V2A** (V de *Versuch*, “experimento”, e A de *Austenit*, *Austenítico em alemão*) contendo **20% de cromo, 7% de níquel e 0,25% de carbono**;
- **1911 (EUA): Christian Dantsizen** desenvolveu ligas com **14 a 16% p Cr e 0,007 a 0,015% p C: Aços Inoxidáveis Ferríticos** e em **1915**, por sugestão do próprio Dantsizen, passaram a ser **utilizadas na construção de turbinas**;
- **1912 (Sheffield-Inglterra): Harry Brearley**. Buscava uma liga **mais resistente ao desgaste** (interior dos canos das armas se esfarelava com a explosão). Produziu **aços com 12.8%p Cr** (dois artigos não publicados): **Aço Inoxidável Martensítico**



Harry Brearley
1871-1948



Кристиан Данцизен

Christian Dantsizen
1887-1962



Eduard Maurer
1886 – 1969

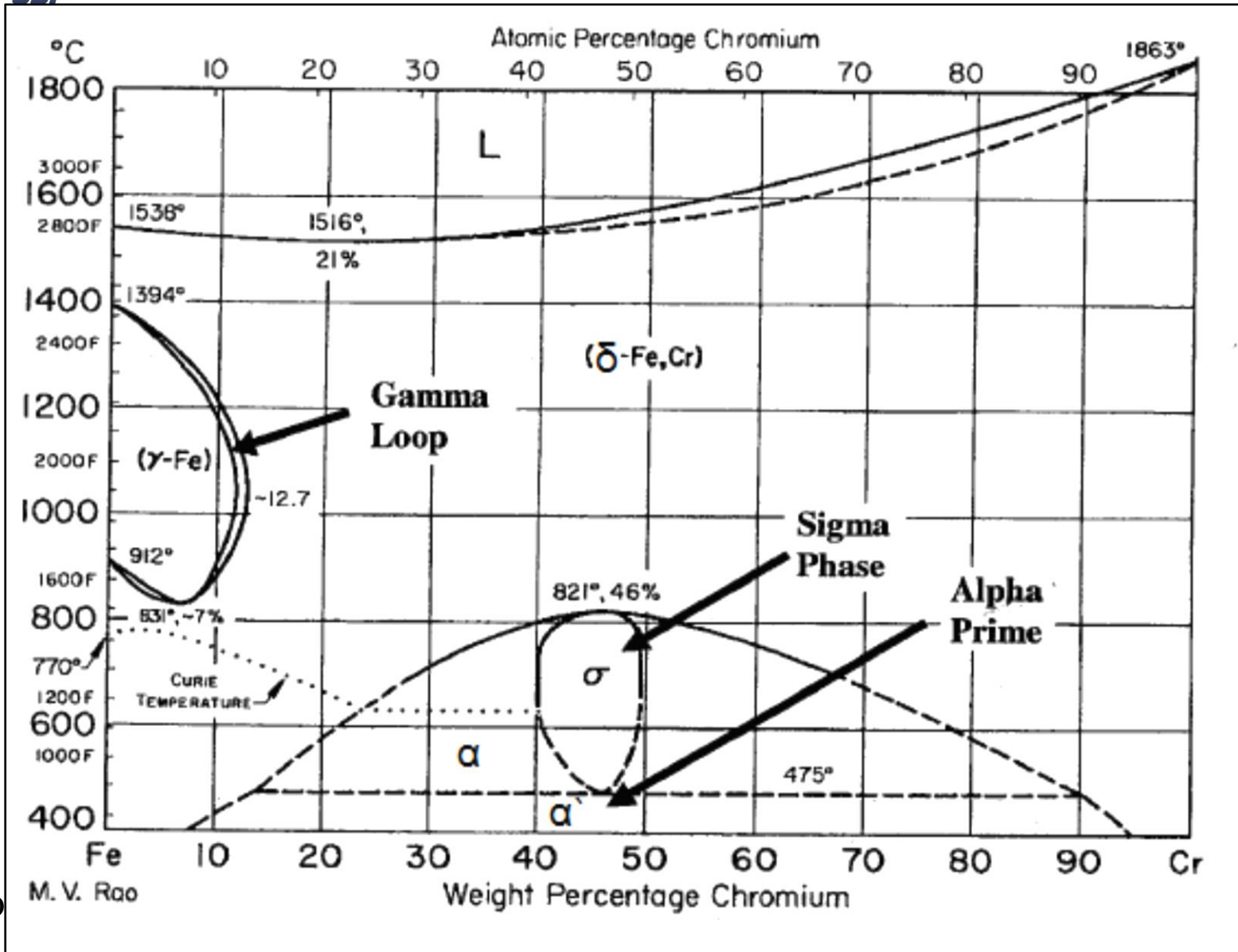


Benno Strauß
1873-1944

**Pioneiros dos Aços
Inoxidáveis**

AÇOS INOXIDÁVEIS

(ADAPTADO: COLPAERT)



MARTENSÍTICOS

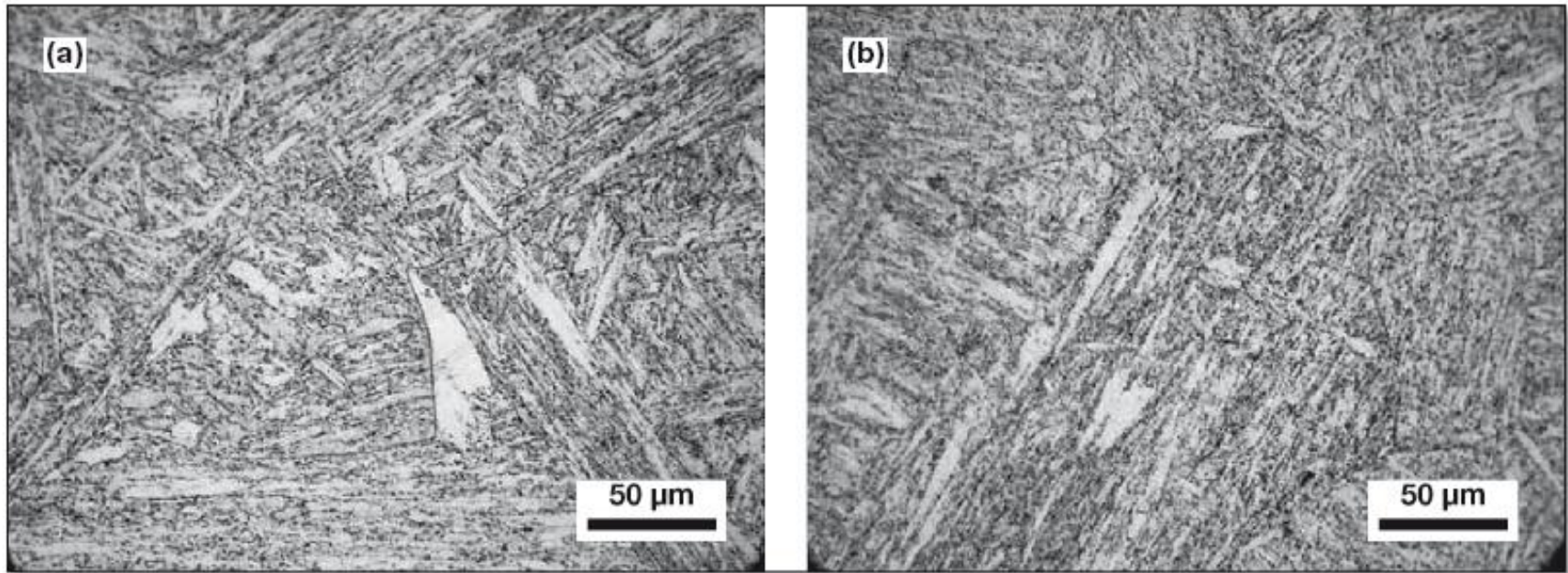


Figura 16.2(a)

Aço inoxidável martensítico AISI 410 temperado e revenido. (a) e (b) Martensita revenida. Ataque: Kalling. Cortesia A. Zeemann, Tecmetal, Rio de Janeiro, Brasil.

(ADAPTADO: COLPAERT)

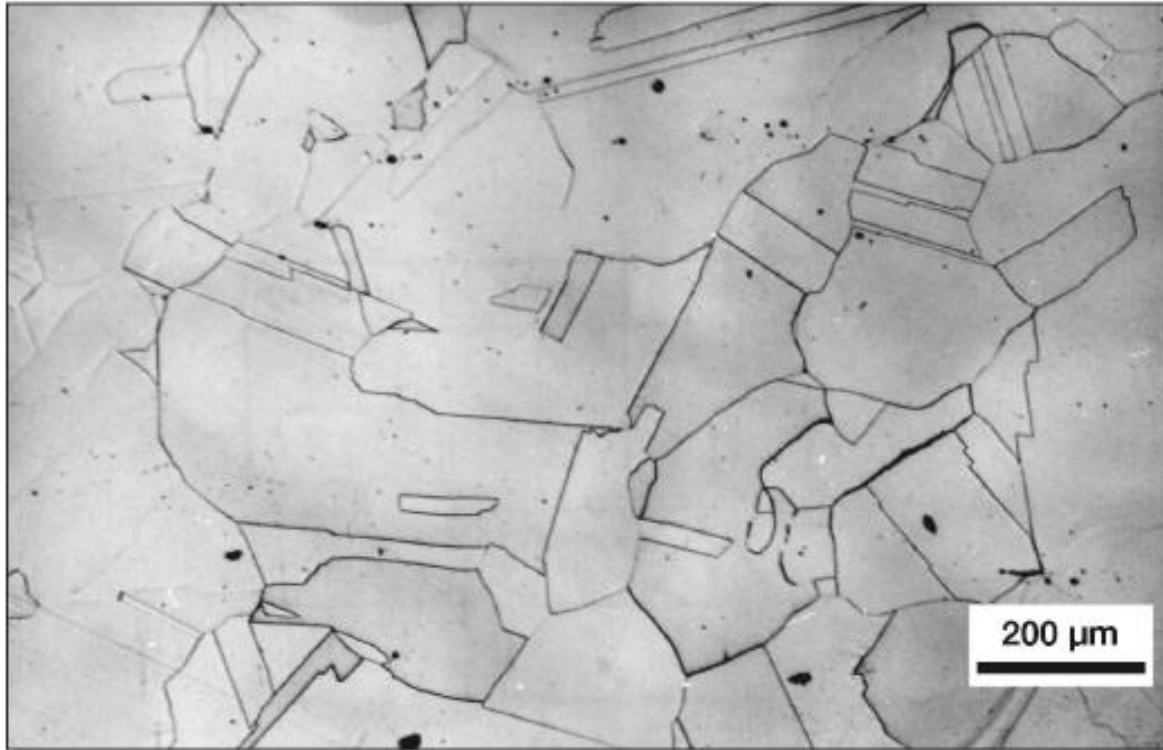


Figura 16.12

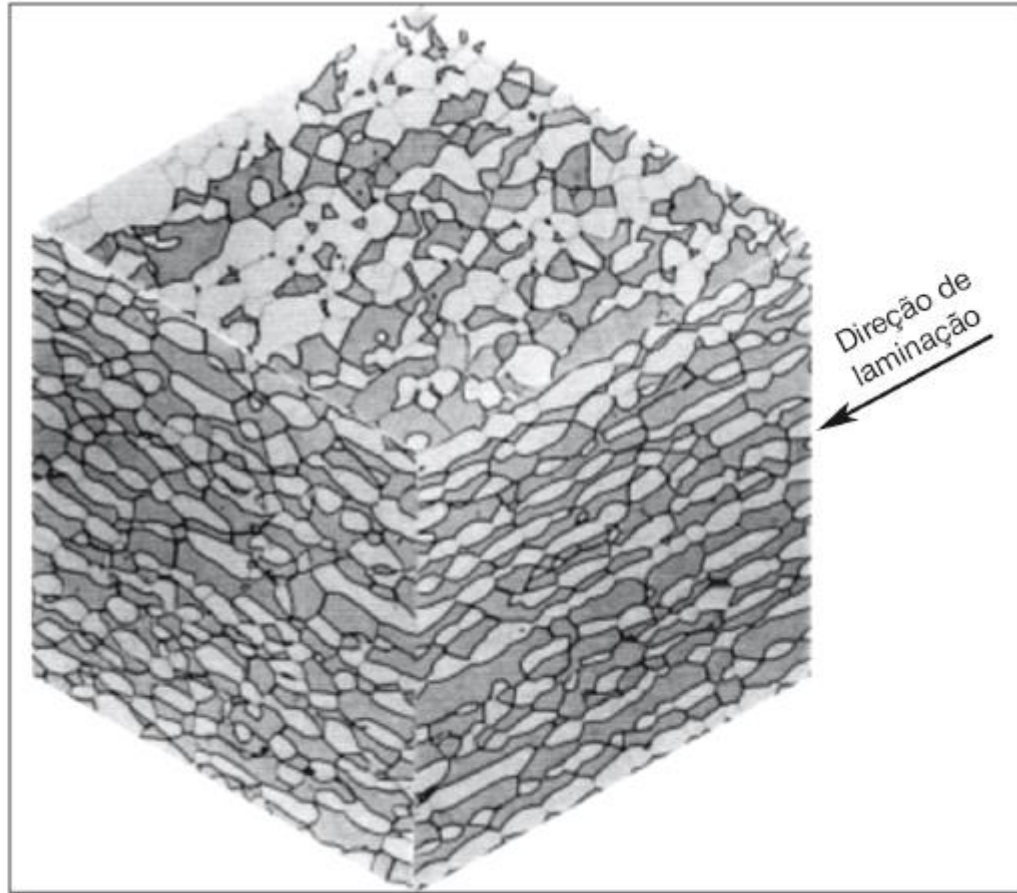
Aço austenítico W.Nr. 1.4439 forjado e solubilizado. Austenita, tamanho de grão austenítico ASTM 2-4.

(ADAPTADO: COLPAERT)



Figura 16.28

Microestrutura de chapa do aço inoxidável dúplex UNS S31803 laminada e solubilizada a 1050 °C por 30 minutos. Ferrita (escura) e ilhas de austenita (clara). A conformação se dá no campo bifásico. Ataque eletrolítico com solução 30% (vol) HNO₃. Cortesia A Ramirez, LNILS, Campinas, SP, Brasil [23].

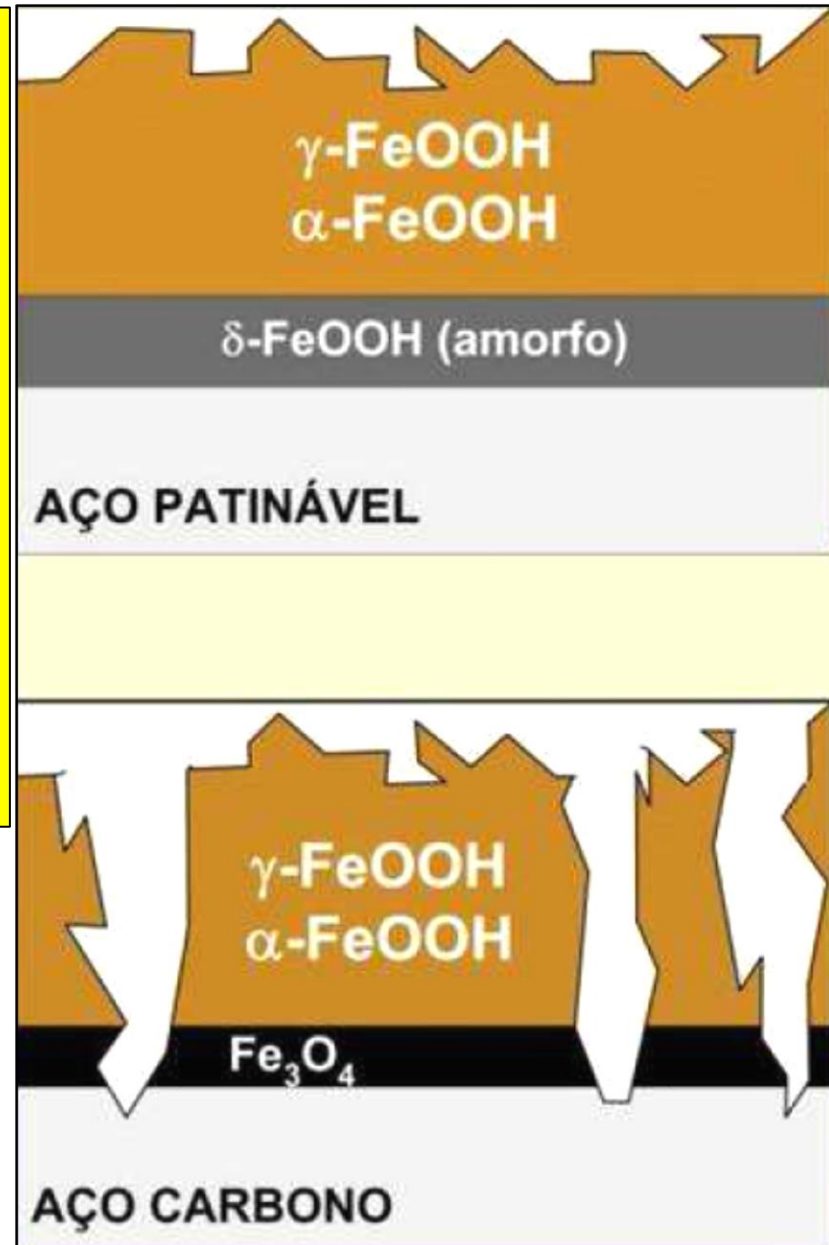


(ADAPTADO: COLPAERT)

AÇO PATINÁVEL

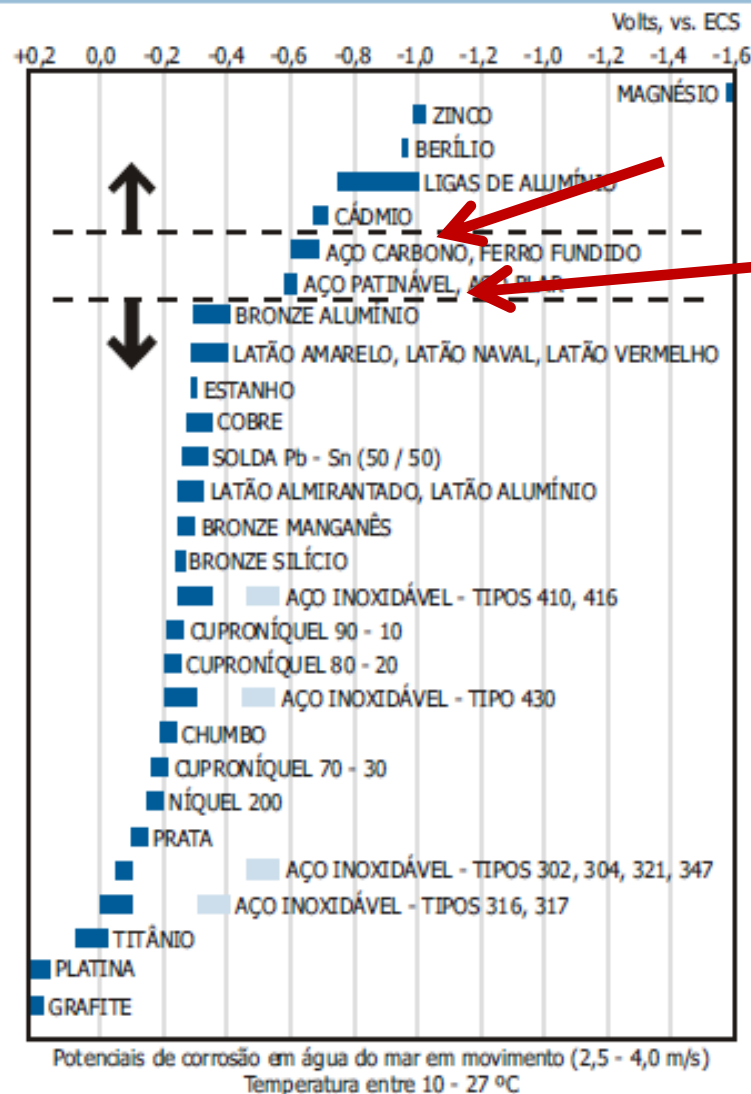
É um aço com pequenas adições (máx de 3% p, no total) de Cu, Ni, Cr, Si que levam à formação de uma camada de óxido amorfa e mais densa, de oxido. Essa camada é mais impermeável que a de um aço carbono, porém não tão passiva quanto a de um aço inoxidável.

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

FIM