

# EMEC7062 (PGMEC) / ECMA7042 (PIPE) Engenharia de Superfícies

O papel da corrosão em engenharia  
de materiais/superfícies

*Prof. Rodrigo Perito Cardoso*

# Cronograma para conclusão da disciplina

- Apresentações:
  - Tempo da apresentação será de 30 min.
  - As apresentações serão no dia 21/11
  - Pensar em um título e estrutura da apresentação
  - Aula dia 16/11?
- Prova 02 dia 23/11
- Listas de Tribologia e Corrosão devem ser entregues até o dia da Prova (23/11)
- **Atenção o tempo é curto!**

# Introdução

- Assim como tribologia, corrosão é um tema bastante amplo (disciplina disponível no PGMEC).
- Como aqui corrosão é parte de uma disciplina os objetivos são “modestos”
- Objetivos:
  - Entender a natureza da corrosão e suas formas de manifestação
  - Ganhar conhecimento sobre ensaios de corrosão
  - Correlacionar corrosão com Eng. de Superfícies

# Introdução

- De maneira simplificada a corrosão é o efeito do meio sobre a superfície -> degradação
  - Ex. automóvel, indústria de alimentos e embalagens, etc...
- O engenheiro, no momento do projeto deve saber levar em contas este aspecto
- Mas..... O que é corrosão?

# Introdução

- A maioria das pessoas associa corrosão com ferrugem, mas ferrugem é somente um produto da corrosão
- Uma definição simples de corrosão seria: “deterioração de um material ou de suas propriedades devido à reação com o ambiente”
  - Pode se manifestar com ganho ou perda de massa e mudança de propriedades.
- Na maioria dos casos se dá por processos eletroquímicos, mas não é sempre o caso

# Introdução

- Desconsiderar a corrosão pode ser um erro do projetista
  - ex. aço sofrem corrosão na maioria dos ambiente e pode trazer consequências ao equipamento além da aparência (ex. fadiga, acidentes ....)
- O gasto anual com corrosão nos EUA é estimado em US\$ 600.000.000.000,00.
- Setores mais afetados:
  - Água/esgoto, automóveis, pontes, industria química, petroquímica, papel e celulose, etc.
  - Causa problemas de infraestrutura e impacta fortemente na competitividade de países

# A Natureza da corrosão

- Porque a corrosão ocorre?
  - A resposta vem de cálculos envolvendo, energia livre, termodinâmica e cinética de reação
  - De maneira simples, metais corroem por não estarem em seu estado natural (mais estável), a maioria se encontra na natureza na forma de compostos (com raras exceções, ex. Au)
  - Assim todo metal tende a voltar à forma do minério de que foi extraído



*“Pois tu és pó e ao pó tornarás.” Gênesis 3, 19*

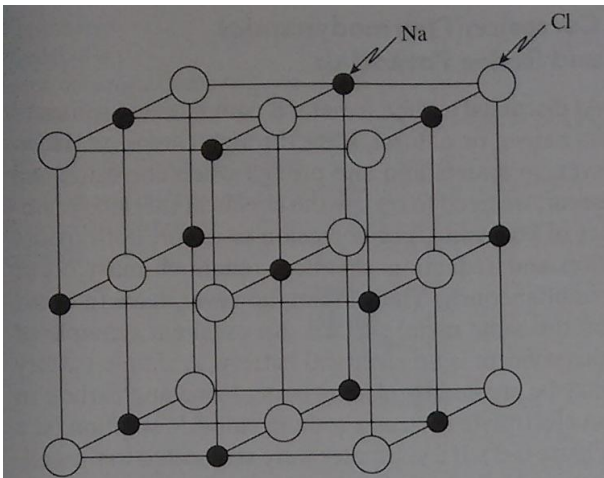


# A Natureza da corrosão

- Porque a corrosão ocorre?
  - No caso de plásticos e cerâmicas esta volta à “forma natural” não é tão óbvia
  - Em polímeros envolve ligações entre moléculas e mudança de propriedades (ex. envelhecimento de borrachas -> validade dos pneus) (Polímeros -> retorno ao  $\text{CO}_2$ )
  - Cerâmicas são relativamente inertes (feitas de compostos na “forma natural”) -> menor força motriz para corrosão
  - Outra diferença importante entre metais, polímeros e cerâmica é que os polímeros e cerâmicas não são bons condutores de eletricidade (pouco suscetível à reações eletroquímicas)

# A Natureza da corrosão

- Reações eletroquímicas
  - Em metais a corrosão é um processo eletroquímico e envolve íons e elétrons
  - Ex. da dissolução do NaCl



**Figure 6-1**

Crystal structure of sodium chloride, NaCl. The chlorine anions are arranged in the cubic close-packed position. The sodium cations fill the octahedral interstitial positions.

Dissolução em águas



Como metais não teriam ânions a “dissolução” envolveria elétrons

# A Natureza da corrosão

- Reações eletroquímicas
  - Quando sólidos como metais, sais, ácidos e bases se dissolvem estes passam a existir na forma de íons
  - Soluções que contém íons são chamados eletrólitos
  - Na dissolução de um metal, este produz íons e elétrons, causando polarização (se tornando carregado)

# A Natureza da corrosão

- Reações eletroquímicas
  - Ex. Fe em sol. diluída de HCl

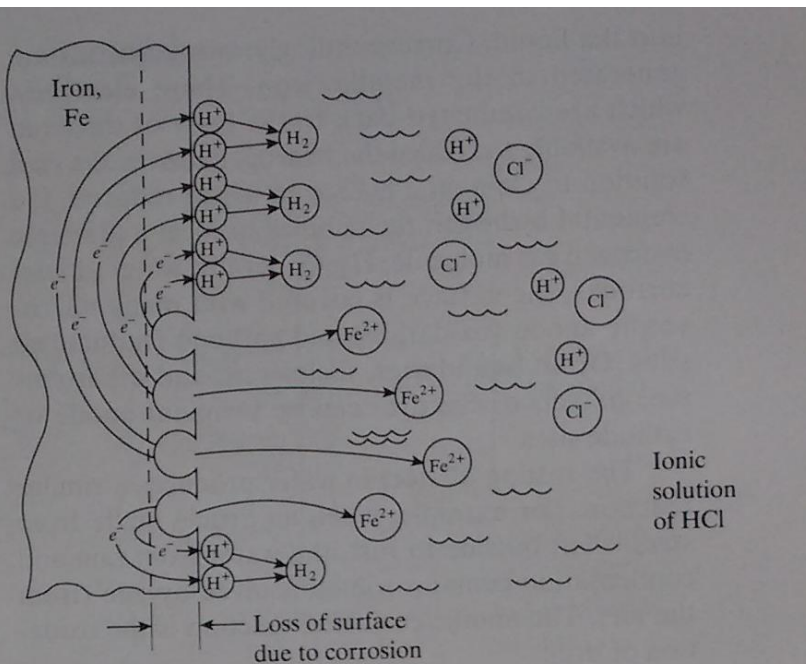
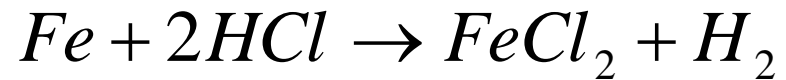


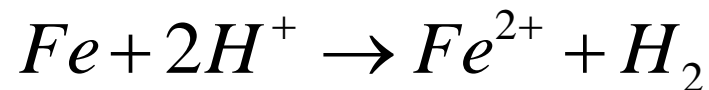
Figure 6-2

The corrosion of iron in hydrochloric acid. As iron dissolves in the solution, excess electrons become available to react with the hydrogen ions in the acid (*corrodent*).

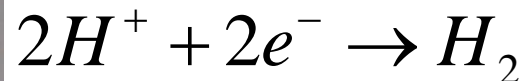


metal líquido Íons  $Fe^{2+}$  e  $Cl^-$  gás  
dissolvidos

O Cl não entra realmente na reação:



Processo parcial  
anódico



Processo parcial  
catódico

Fe liberou elétrons -> oxidou  
 $H^+$  foi reduzido

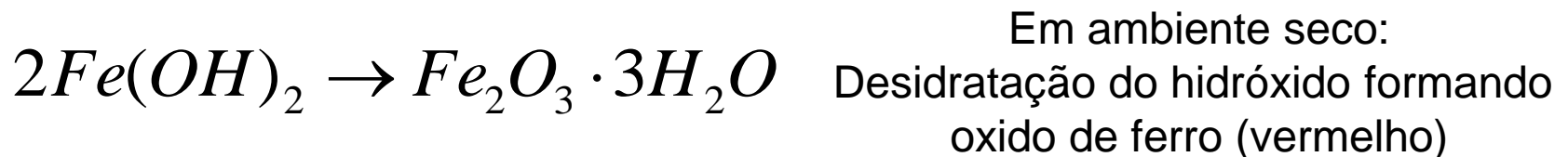
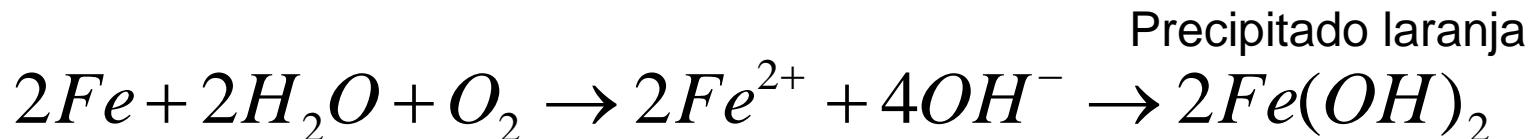
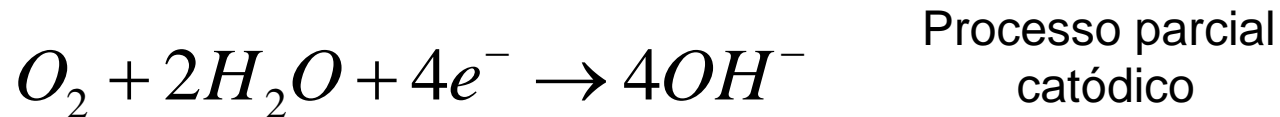
# A Natureza da corrosão

- Reações eletroquímicas
  - As relações apresentadas envolvem íons e elétrons -> eletroquímica, base para corrosão e metais
  - Envolve sempre, **simultaneamente**, uma reação parcial anódica e uma catódica -> Interromper qualquer uma delas interrompe a corrosão ← Eng. Sup.
  - No ex. anterior a superfície do aço apresenta várias áreas anódicas e catódicas microscópicas
  - Defeitos podem ser preferencialmente anodos ou cátodos

# A Natureza da corrosão

- Reações eletroquímicas

- Ex. Oxidação do Fe na águas (com O<sub>2</sub> dissolvido)

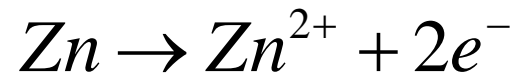


# A Natureza da corrosão

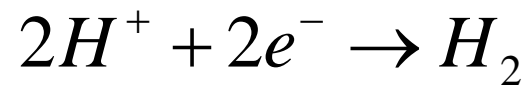
- Termodinâmica da corrosão e potenciais de redox
  - Corrosão é regida pela termodinâmica -> retorno ao “estado natural” de metais -> redução da energia livre
  - As reações de oxidação e redução devem ocorrer simultaneamente, mas não necessariamente na mesma superfície (ex. Pilha)

# A Natureza da corrosão

- Termodinâmica da corrosão e potenciais de redox
  - Ex. Pilha Zn-Carbono



Processo parcial  
anódico



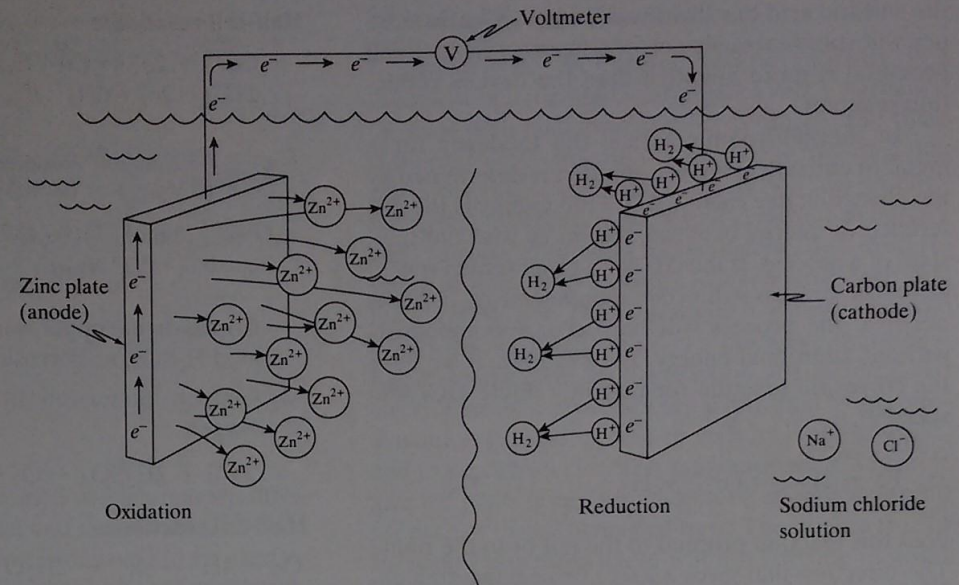
Processo parcial  
catódico

The Role of Corrosion in Engineering Materials

137

**Figure 6-3**

Model of an electrochemical battery. When zinc is electrically coupled to carbon, the electrons liberated during the zinc oxidation process flow to the carbon cathode.



Each half of the oxidation/reduction process has its own voltage relative to a reference



# A Natureza da corrosão

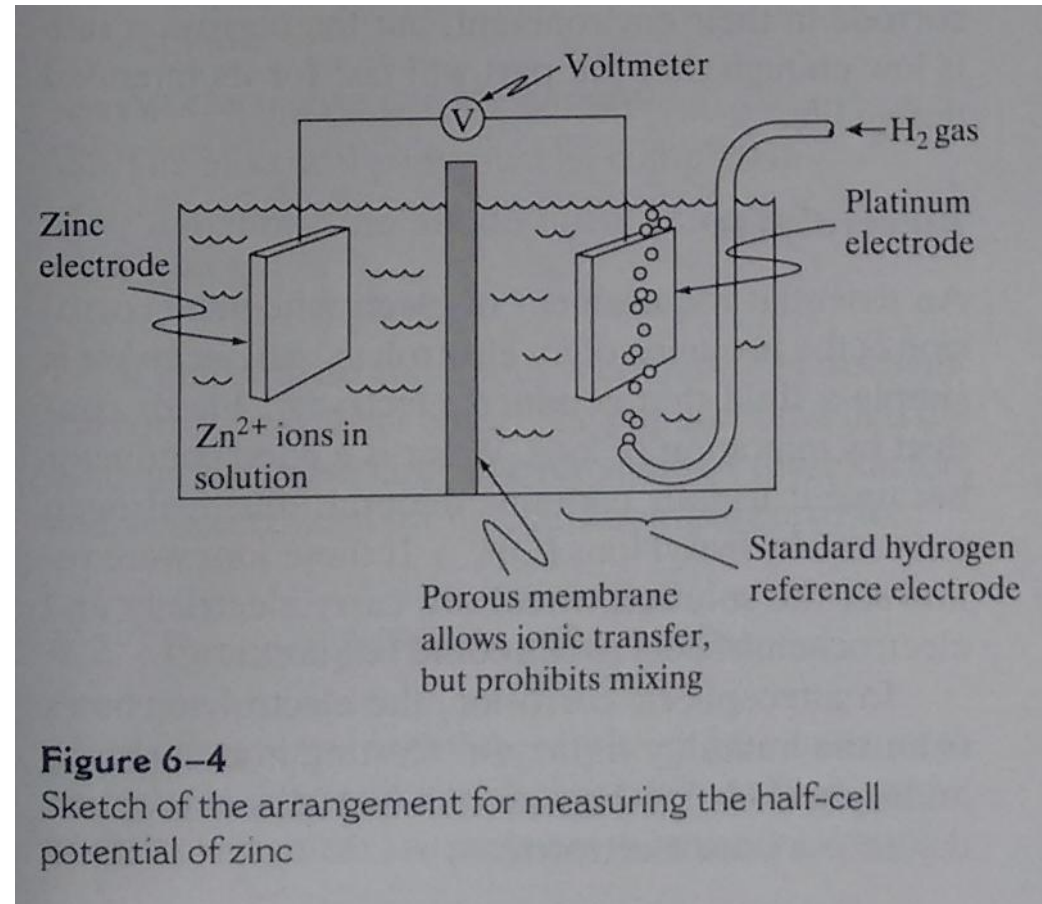
- Termodinâmica da corrosão e potenciais de redox
  - Cada eletrodo tem seu potencial e pode ser medido

$$E_{cell} = E_{redução} - E_{oxidação}$$

Eletrodo de referência

Por convenção:

$$E_{H_2} = 0V$$



# A Natureza da corrosão

- Termodinâmica da corrosão e potenciais de redox
  - Ex. de potenciais de eletrodo

Equilibrium Reaction	Potential, $V_{SHE}^*$
$Au^{3+} + 3e^- = Au$	+1.49
$O_2 + 4H^+ + 4e^- = 2H_2O$	+1.23
$Pt^{2+} + 2e^- = Pt$	+1.20
$Fe^{3+} + e^- = Fe^{2+}$	+0.77
$O_2 + 2H_2O + 4e^- = 4OH^-$	+0.40
$Cu^{2+} + 2e^- = Cu$	+0.34
$2H^+ + 2e^- = H_2$	0.00
$Ni^{2+} + 2e^- = Ni$	-0.25
$Fe^{2+} + 2e^- = Fe$	-0.44
$Zn^{2+} + 2e^- = Zn$	-0.76
$Al^{3+} + 3e^- = Al$	-1.66

\* $V_{SHE}$  = voltage relative to a standard hydrogen electrode.

O potencial de redox auxilia a determinar se a reação de oxidação é espontânea ou não (termodinâmica) -> força motriz  
 + negativo será oxidado e  
 + positivo será reduzido

Não fala nada da cinética

# A Natureza da corrosão

- Termodinâmica da corrosão e potenciais de redox
  - Exemplos:
    - Fe e Zn corroem em solução ácida ( $H^+$ ) sem oxigênio dissolvido, Cu não -> ver potencial com relação ao eletrodo de Hidrogênio
    - Entretanto, na presença de oxigênio dissolvido o Cu sofre corrosão -> ver potencial com relação ao potencial do Oxigênio com  $H^+$
  - Em termos da termodinâmica falamos em Energia Livre ( $\Delta G$ ) ->  $\Delta G$  negativo -> processo espontâneo

$$\Delta G = -nFE_{cell} \quad E_{cell} = E_{redução} - E_{oxidação}$$

Número de elétrons por mol      Constante de Faraday  
 Carga de um mol de eletrons

- !!!! Mesmo com  $\Delta G$  negativo em alguns casos a corrosão não ocorre !!!! -> Passivação (limitação cinética)

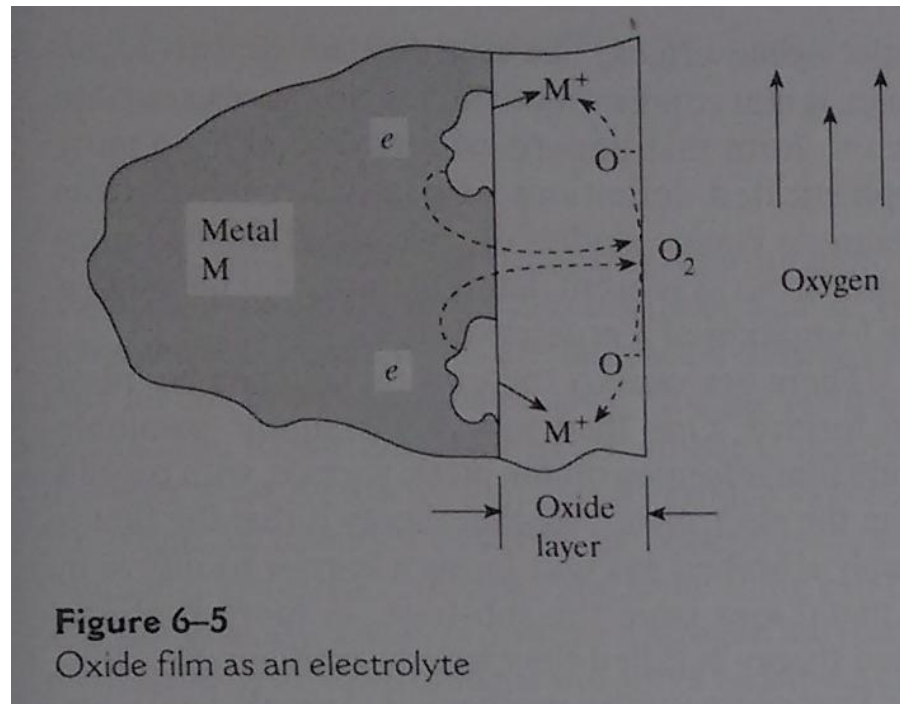
# A Natureza da corrosão

- Eletrólitos

- A presença de eletrólitos é essencial para corrosão eletroquímica -> conduz eletricidade pelo movimento de íons
- Água é um bom condutor por conter íons metálicos, de hidrogênio ( $H^+$ ) e hidroxilas ( $OH^-$ )
- Na corrosão atmosférica o eletrólito vem da umidade -> ar seco não é um bom eletrólito

# A Natureza da corrosão

- Eletrólitos
  - Em corrosão a alta temperatura o eletrólito é o próprio óxido (eletrólito sólido)



# A Natureza da corrosão

- Resumindo quesitos para corrosão eletroquímica
  - Metal oxida no ânodo
  - Íons são reduzidos no cátodo
  - Os processos de oxidação e redução ocorrem simultaneamente e na mesma taxa
  - Existe um potencial entre o ânodo e o cátodo (força motriz)
  - É necessária a presença de um eletrólito
  - O caminho elétrico deve ser fechado (acoplamento entre cátodo e ânodo)
- Para ocorrer a corrosão eletrolítica todos estes fatores devem ocorrer -> engenharia de superfície age no sentido de evitar que isso ocorra

# Fatores que afetam a corrosão

- Os fatores mais importantes estão ligados às propriedades dos materiais e ao ambiente
- Propriedade dos materiais
  - **Resistência à corrosão não é uma propriedade intrínseca do material** -> é resultado da interação com o meio -> sem meio não tem corrosão
  - As propriedades dos materiais afetam sua resistência à corrosão -> uma das mais óbvias é a composição química (Au x Cr x Fe x polímeros)

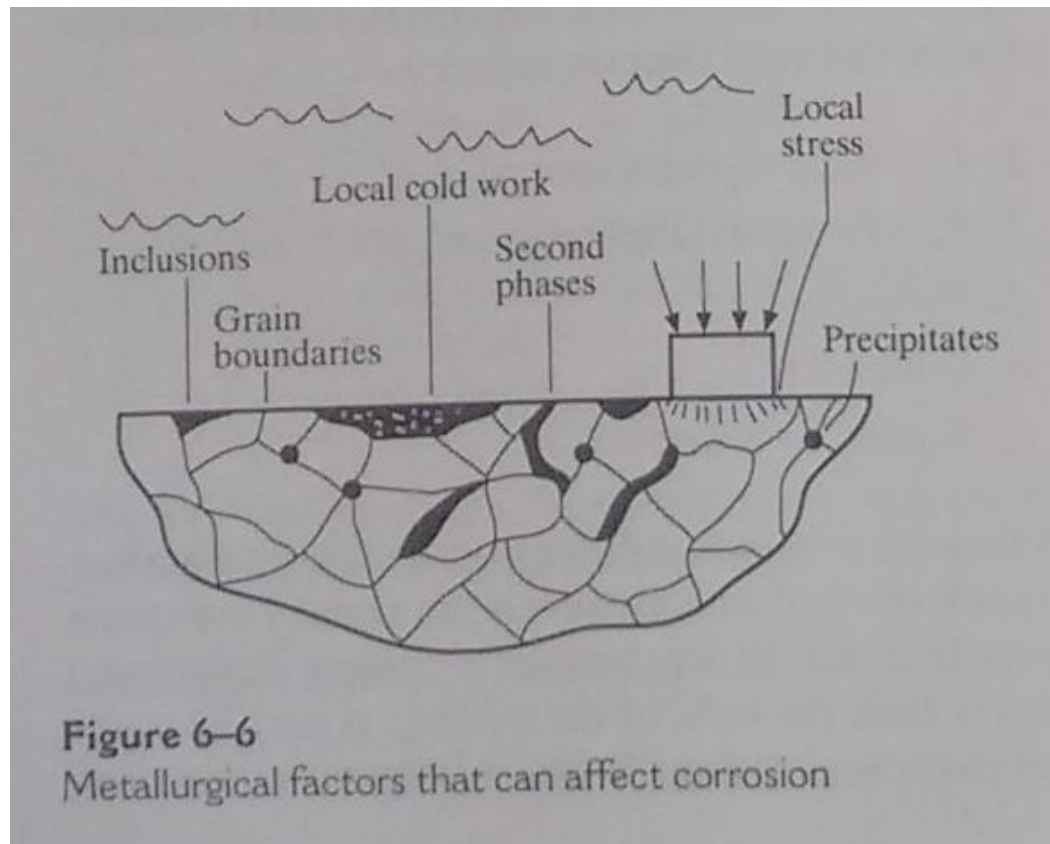
# Fatores que afetam a corrosão

- Propriedade dos materiais
  - Potencial de redox -> permite determinar se o processo de corrosão de um metal é favorável do ponto de vista da termodinâmica (em um meio) -> potencial mais positivo metal mais nobre
  - Fatores metalúrgicos (ex. tendência a ânodo/cátodo local)
    - Contornos de grão, diferentes tamanhos de grão...
    - Segregação química (forma células eletroquímicas)
    - Múltiplas fases (forma células eletroquímicas)
    - Inclusões
    - Encruamento (densidade de discordâncias)
    - Tensões não uniformes (espaçamento atômico)



# Fatores que afetam a corrosão

- Propriedade dos materiais
  - Fatores metalúrgicos



# Fatores que afetam a corrosão

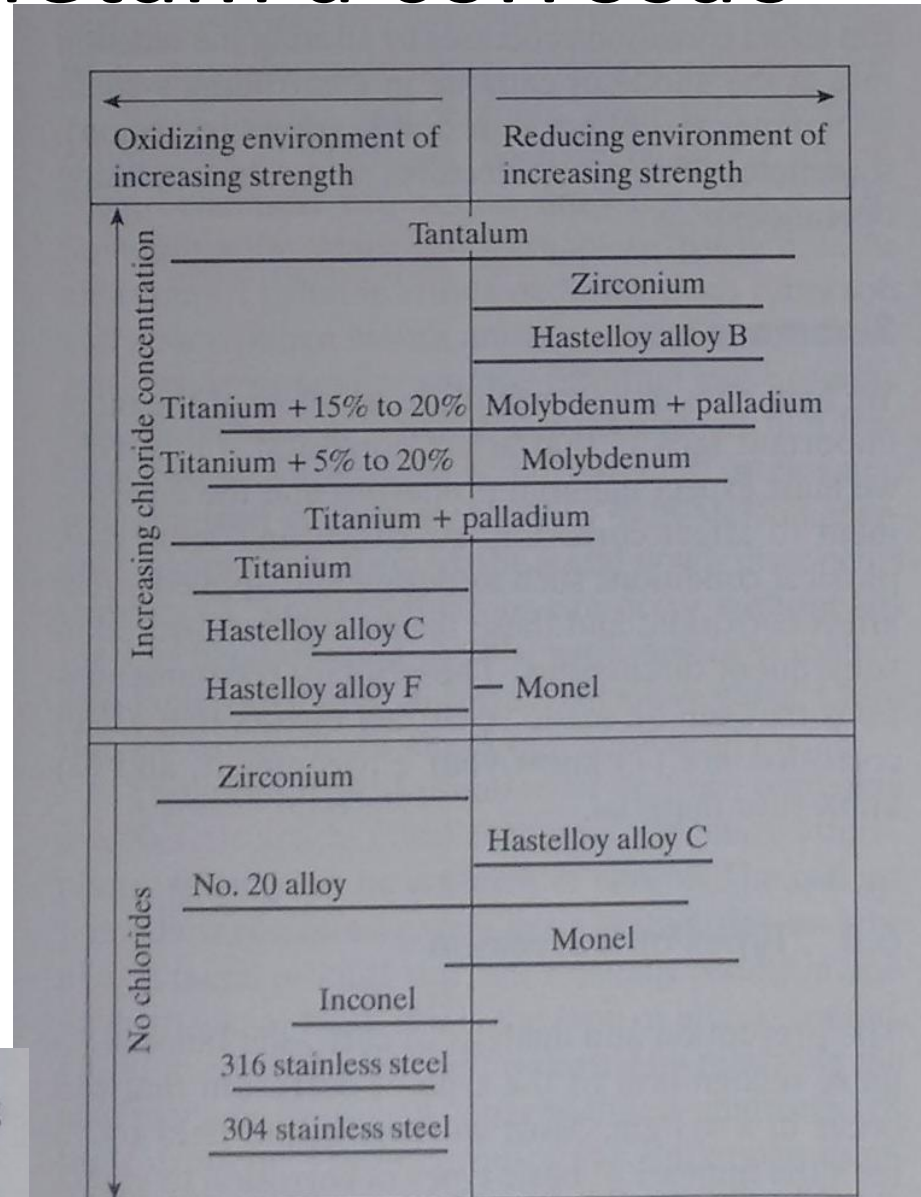
- Propriedade dos materiais
  - Passividade
    - Muitos metais apresentam elevada resistência a corrosão porque as condições de sua superfícies impedem a reação eletroquímica entre o ambiente e o metal -> Passividade
    - A interação do metal com o meio leva a formação de um filme passivo -> age como barreira separando o metal e o ambiente
    - Atenção à condições de aplicação que podem remover o filme passivo (ex. abrasão)

# Fatores que afetam a corrosão

- Ambiente
  - Diferentes ambiente reagem de maneira diferente com um dado material
  - Alguns tipos de meios
    - Acido ( $H^+$ )
    - Básico ( $OH^-$ )
    - Sais (ácidos, neutros ou alcalinos)
    - Gases
    - Solventes
  - Alguns materiais não mais adaptados a um meio que outro
  - A presença de íons halogênios (Cl, I, ...) podem levar a corrosão em meios que não seriam corrosivos sem sua presença

# Fatores que afetam a corrosão

- Ambiente



**Figure 6-7**

Satisfactory operating ranges for various metals in oxidizing and reducing environments

Source: Courtesy of Carpenter Technology Corp.

# Fatores que afetam a corrosão

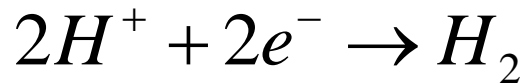
- Condições de operação
  - Tempo de vida pretendida
  - Temperatura -> normalmente aumenta a taxa de reação
  - Velocidade “do meio” -> remoção da camada passiva
  - Concentração -> nem sempre maior concentração leva a maior corrosão (passivação)
  - Impurezas -> pode causar abrasão (sólido) ou ataque (diluído)
  - Aeração -> pode não ter efeito, aumentar (processo parcial catódico) ou diminuir (passivação) a corrosão

# Fatores que afetam a corrosão

- Polarização (ligada a corrente)

- Polarização de ativação

- Inicialmente a reação é mais lenta
- Consome energia, ex. reação catódica

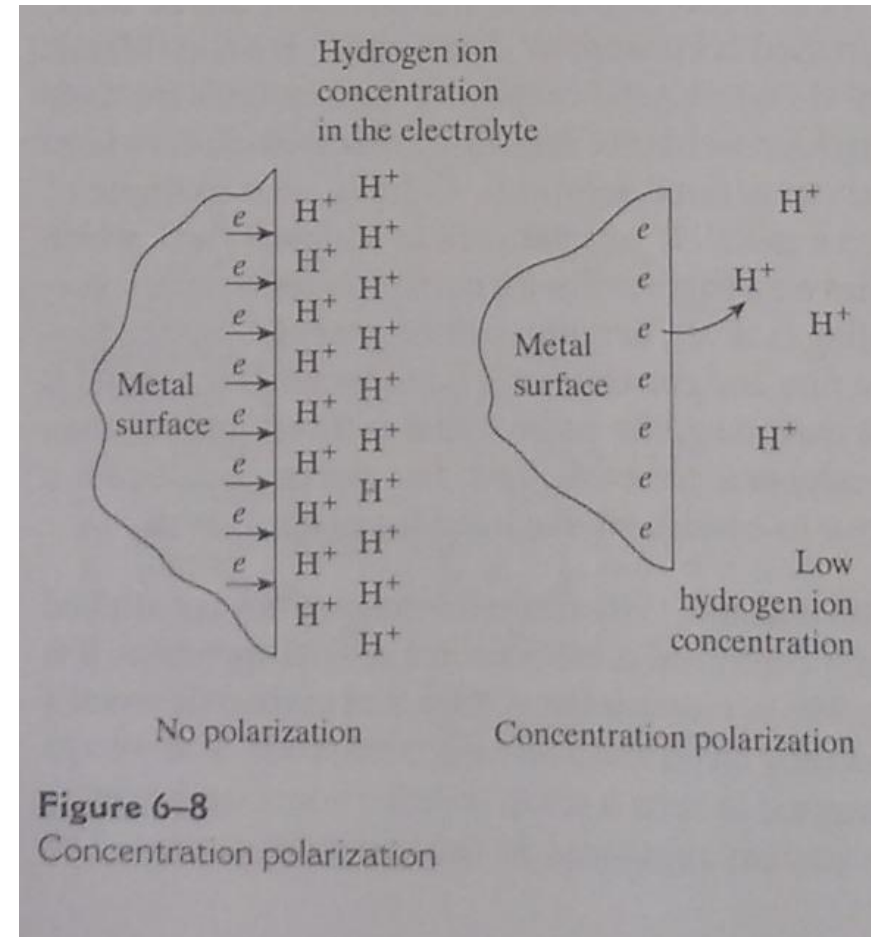


- Polarização de concentração

- Quando não existe concentração suficiente de espécie para a reação

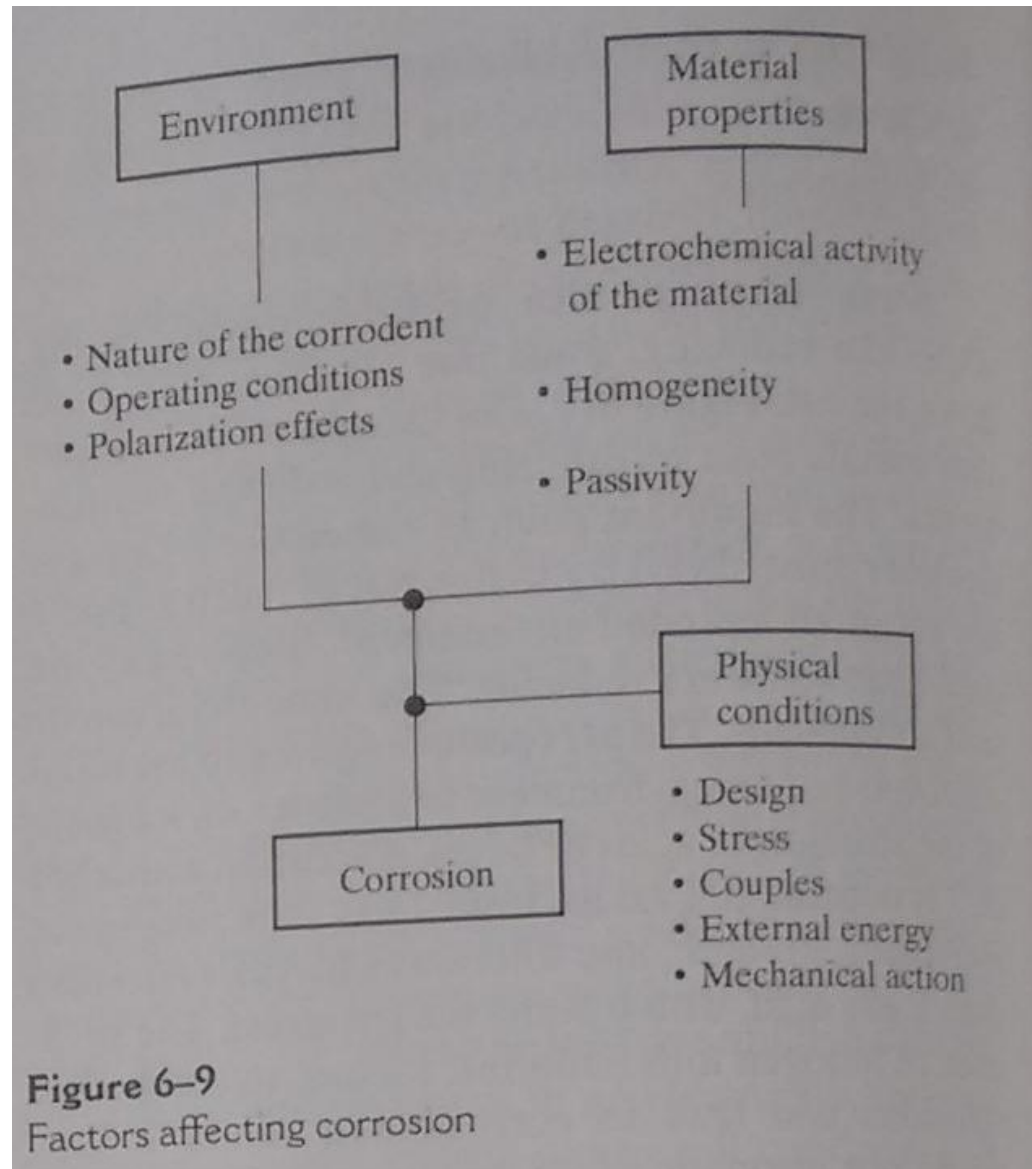
- IR drop

- Queda de potencial da célula por aumento de resistência no eletrólito (ex. Prod. de corrosão)



# Fatores que afetam a corrosão

- Resumo



# Tipos de corrosão

- A prevenção e análise de falhas por corrosão depende do tipo de corrosão
- Tipos básicos de corrosão
  - Uniforme
  - *Pitting*
  - Corrosão em fresta
  - Corrosão Galvânica
  - Corrosão sob tensão
  - Ataque intergranular
  - *Dealloying*
  - Erosão

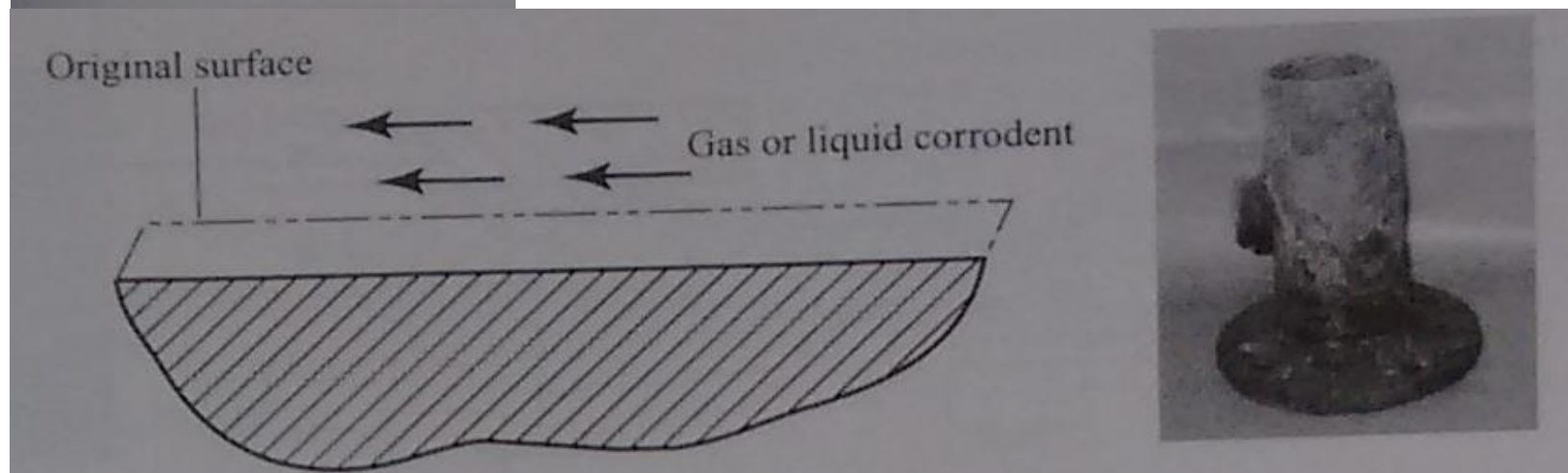


# Tipos de corrosão

- Corrosão Uniforme
  - É a forma mais simples -> corrosão uniforme de toda a superfície (perda de material uniforme)
  - Pode ser eletroquímica ou ataque direto

**Figure 6-10**

Uniform corrosion



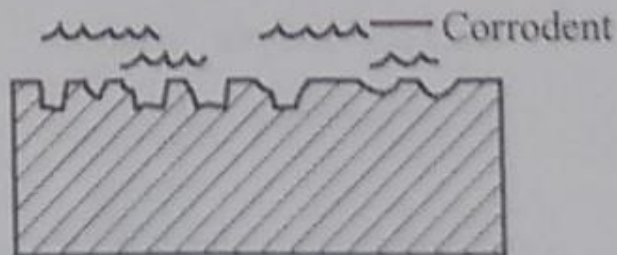
# Tipos de corrosão

- Corrosão Uniforme

- Comum em plásticos e cerâmicos (não condutores) submetidos a ataque direto
- Ataque direto também pode ocorreres em metais (ex. gás cloro, banho metálico, banho de sais ...)
- A corrosão uniforme mais comum envolve reações eletroquímicas (ex. corrosão atmosférica de aços)
  - Célula eletroquímica se forma por exemplo entre grão e contornos
  - Uma das maneiras de evitar é remover o eletrólito (na corrosão atmosférica umidade relativa < 30%, utilizar engenharia de superfície!)

# Tipos de corrosão

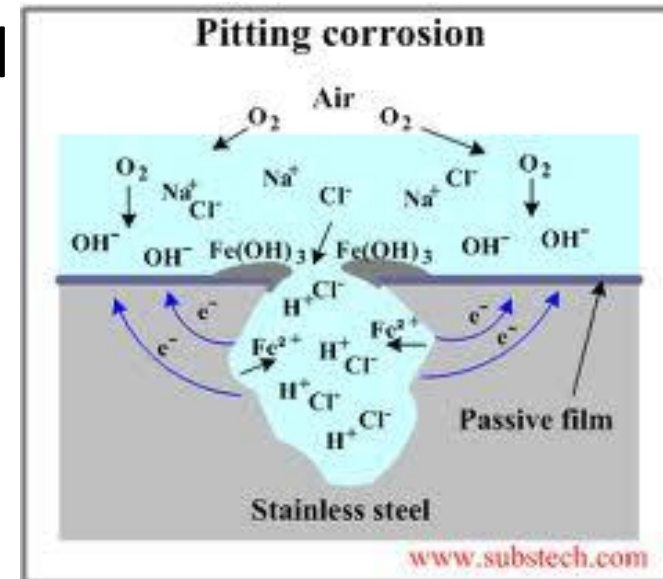
- Corrosão por *Pitting*
  - Corrosão localizada formando cavidades na superfície -> pode deteriorar componentes sem remover muito material (ex. *pitt* que atravessa a parede de um tanque ou tubulação -> vazamento)



**Figure 6-11**  
Pitting of copper in stagnant water

# Tipos de corrosão

- Corrosão por *Pitting*
  - Normalmente ocasionado pela natureza química do ambiente -> halogênios presentes (especial interesse ao Cl) -> comum em aços inoxidáveis
  - Ocorre mais facilmente em soluções estagnadas
  - Forma célula eletroquímica local



# Tipos de corrosão

- Corrosão em Fresta

- Ataque localizado em frestas -> para que ocorra uma parte da fresta deve estar exposta ao eletrólito e este deve preencher a fresta

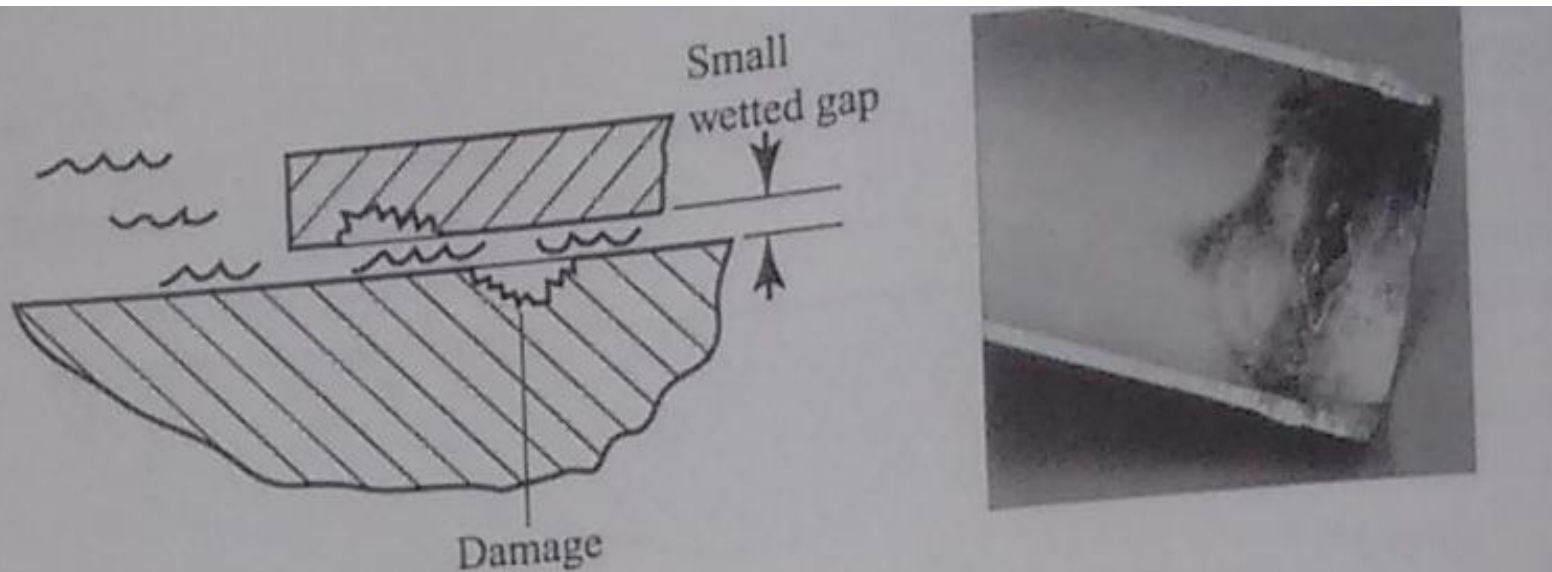
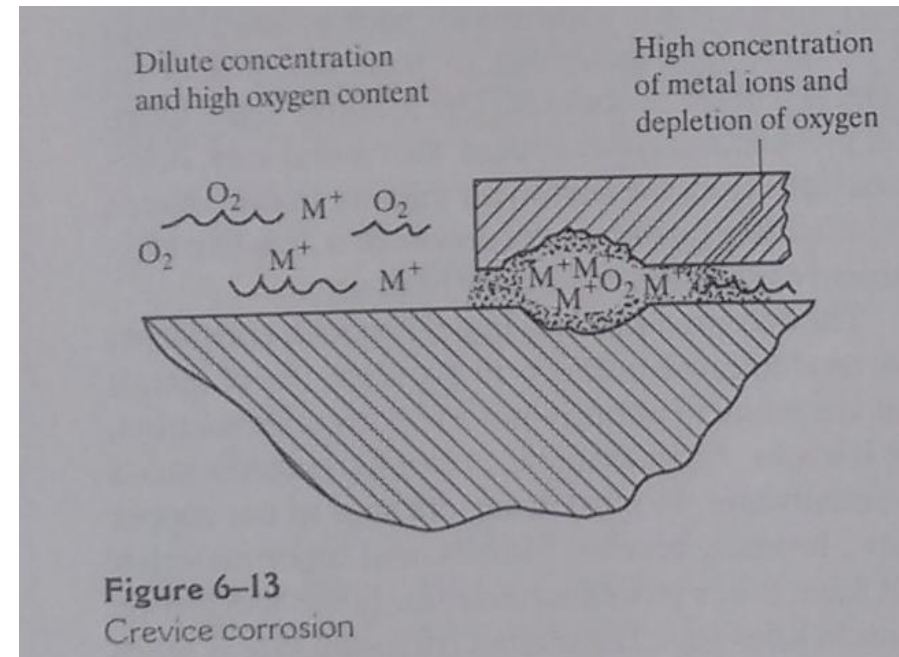


Figure 6-12  
Crevice corrosion in an  
incomplete penetration pipe weld

# Tipos de corrosão

- Corrosão em Fresta

- Ocasionada por mudança do eletrólito na região estagnada formando célula eletroquímica local devido à variação do eletrólito (ex. diferente concentração de oxigênio) -> material na fresta se torna ânodo
- Melhor maneira de evitar é Evitar as frestas



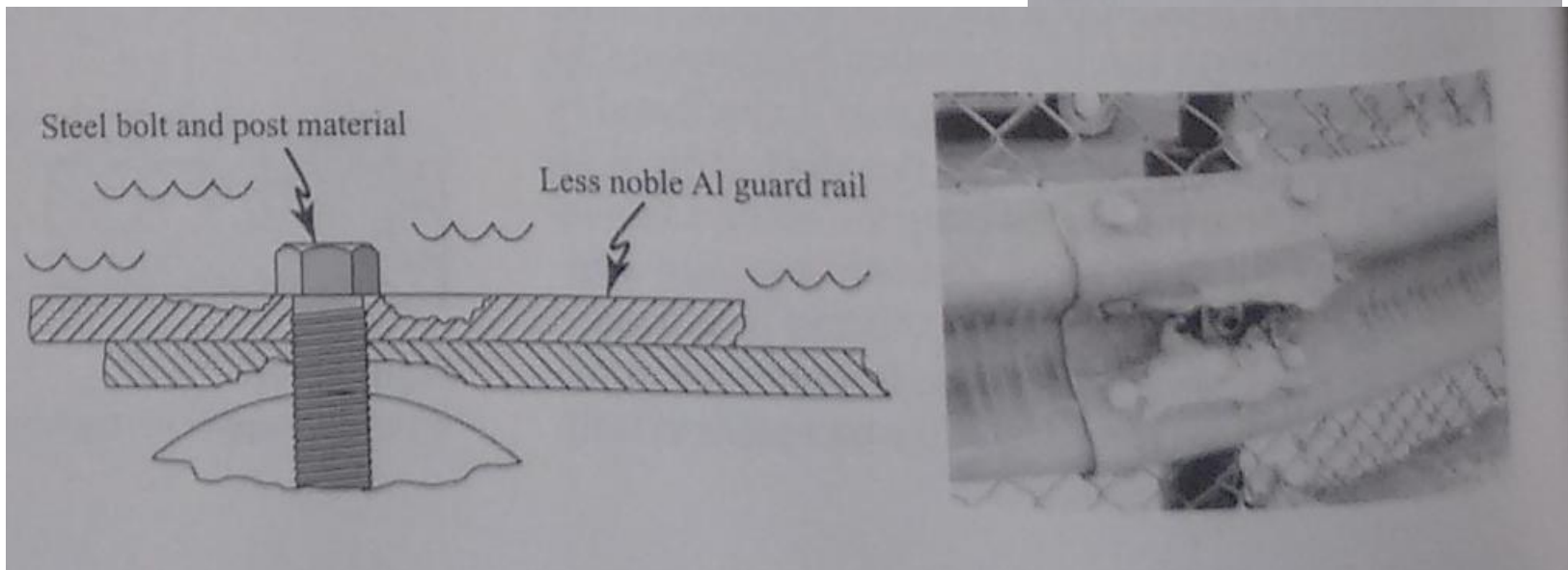
# Tipos de corrosão

- Corrosão Galvânica

- Devido ao contato (elétrico) de materiais dissimilares ( $\neq$  potencial) em um mesmo meio  $\rightarrow$  formando uma célula eletroquímica

Figure 6-14

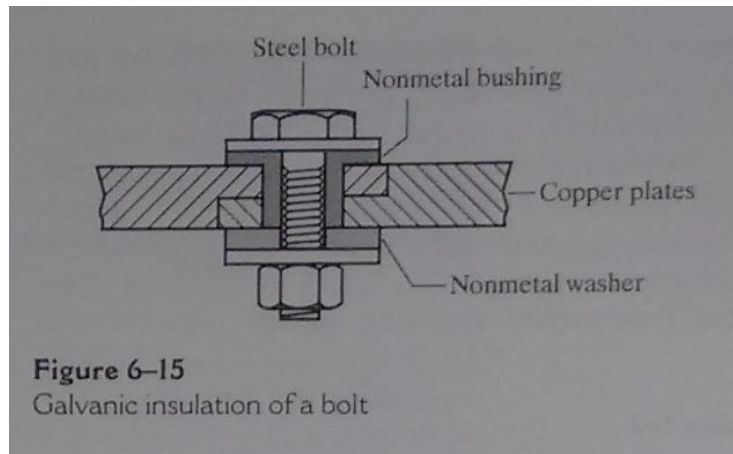
Galvanic attack of aluminum guard rail bolted to a steel post



# Tipos de corrosão

- Corrosão Galvânica

- Série galvânica de metais em água do mar
- O que seria uma boa e uma má combinação de metais?
- Efeito de tamanho
- Como evitar?



Isolar os metais dissimilares evitando a formação da célula

Table 6-1

Galvanic series of some metals in seawater

	Magnesium and magnesium alloys
	Zinc
	Galvanized steel
	Aluminum 5052
	Aluminum alloys 3003, 1100, 6061, 356
	Cadmium
Anodic or least noble (active)	Low carbon steel
	Wrought iron
	Cast iron
	Type 410 stainless steel (active)
	Type 304 (active)
	Type 316 (active)
	Lead
	Tin
	Manganese bronze (c 67000)
	Naval brass (c 46400)
	Nickel (active)
	78% Ni, 13.5% Cr, 6% Fe (Inconel) (active)
	Yellow brass (c 36000)
Admiralty brass (c 44300)	
Red brass (c 23000)	
Copper	
Silicon bronze (c 64700)	
Cathodic or most noble (passive)	5% Zn, 20% Ni, 75% Cu (c 73200)
	90% Cu, 10% Ni (c 70600)
	70% Cu, 30% Ni (c 71500)
	88% Cu, 2% Zn, 10% Sn (c 90500-cost)
	Nickel (passive)
	78% Ni, 13.5% Cr, 6% Fe (Inconel) (passive)
	70% Ni, 30% Cu
	Type 304 stainless steel (passive)
	Type 316 stainless steel (passive)
	Hastelloy C
	Titanium
	Gold
	Platinum

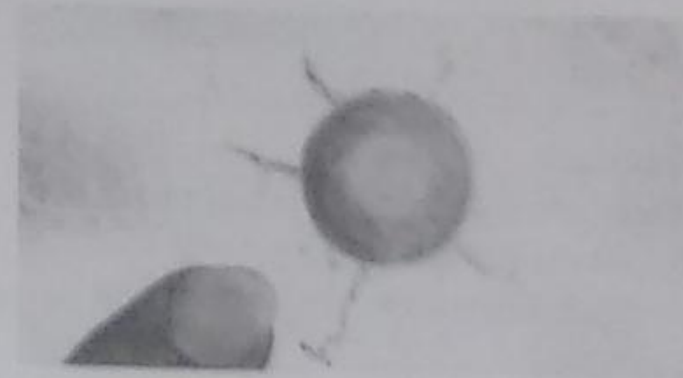
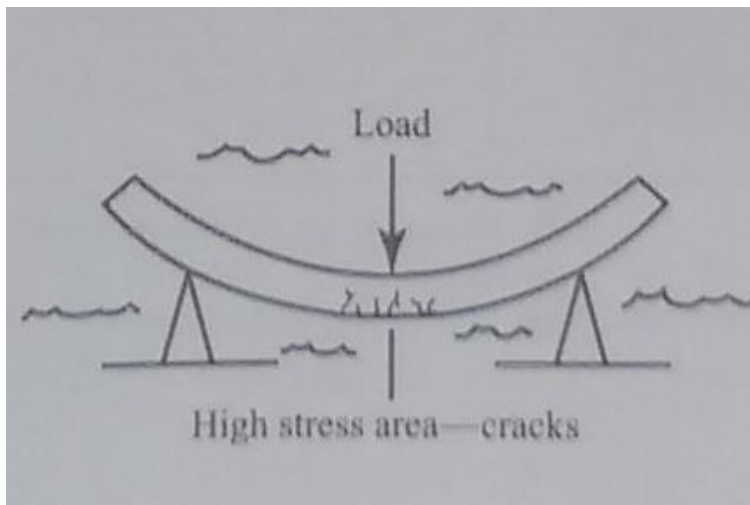


# Tipos de corrosão

- Corrosão sob tensão
  - Diferente dos demais tipos de corrosão por gerar trincas
  - Corrosão espontânea devido a tensões elásticas (residual ou imposta) -> falha por efeito combinado do ambiente e da tensão trativa

Figure 6-16

Stress corrosion cracking of stainless steel



# Tipos de corrosão

- Corrosão sob tensão
  - Maiores tensões aumentam a corrosão sob tensão
  - Só ocorre quando a superfície está sob tensões trativas
  - A corrosão sob tensão geralmente ocorre em ambientes pouco corrosivos
  - Melhor saída ainda é consultar dados disponíveis de corrosão para saber em que meio ocorre para um determinado material

**Table 6-2**  
Aqueous environments that can cause stress corrosion cracking in stainless steels

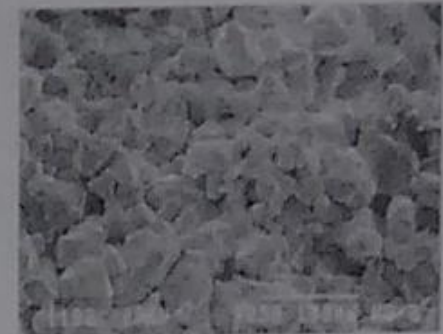
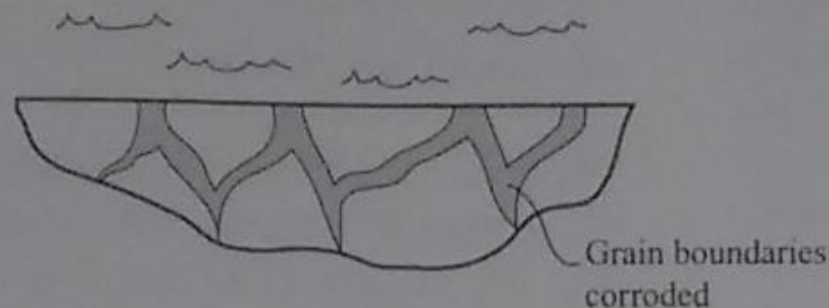
Material	Class	Cl <sup>-</sup> , acid	Cl <sup>-</sup> , neutral	Cl <sup>-</sup> , oxidizing	Br <sup>-</sup>	I <sup>-</sup>	OH <sup>-</sup>	F <sup>-</sup>	S <sup>2-</sup>	S <sup>2-</sup> /Cl <sup>-</sup>	S <sub>4</sub> /O <sub>6</sub> <sup>2-</sup>	SO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	CrO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>3</sub>	Ultrapure H <sub>2</sub> O + O <sub>2</sub>	Seawater	
405	Ferritic	4	1				1		4					1	5	1	1	x	
18-2		4	1	4			3		1	1			5	1	1	1		x	
26-1		4	1	4			4		2				5	1	1	1		x	
26-1S		4	1	4			4		2					1	1	1		4	
29-4		1	1	1			4		2					1	1	1		x	
430				1					1		1								
434				1							3								
431	Martensitic, quenched and tempered or precipitation hardened	5	5	5	5	5	4	2	5	5			2	1	1	1	2	x	
410		5	2				2	5	5	5				1	2	1		x	
Ca-6NM			5	5	5				5	5								x	
440 A, B, C		5	5	5					5	5				5	1	1	1		x
PH15-7Mo		5	4					1	5	5				5	1	1	1		x
17-4PH		5	4					1	5	5				5	1	1	1		x
PH13-8Mo		5	4						5	5									x
17-7PH		5	5					1	5	5									x
Custom 450		4	1	4			4	2	2	2	2			2	1	1	1		x
Custom 455		4	1	4			4	2	2	2	2			2	1	1	1		x
202	Austenitic	5	5	5		1	4	1	2		3	3	1	1	1	1		x	
216		5	5	5		1	4	1	2		3	3	1	1	1	1		x	
216L		5	5	5		1	4	1	2		3,4	3,4	1	1	1	1		x	
Nitronic 50		5	4	5		1	4	1	2		3	3	4	1	1	1	1	1	4
Nitronic 60		5	5	5		1	4	1	2		3	3	1	1	1	1			x
304		5	5	5		1	4	2	5	5	3	3	4	1	1	1	1	3	x
304L		5	5	5		1	4	1	2	5	3,4	3,4	4	1	1	1	1	3,4	x
309S		5	5	5		1	4	1	2		3	3	1	1	1	1	1	3	x
310S		5	5	5		1	4	1	2		3	3	1	1	1	1	1	3	x
316		5	5	5	4	1	4	1	2	5	3	3	1	1	1	1	1	3	x
316L		5	5	5			4	2			3,4	3,4	1	1	1	1	1	3,4	x
317		5	5	5		1	4	1	2		3	3	1	1	1	1	1	3	x
317L		5	5	5		1	4	1	2		3,4	3,4	1	1	1	1	1	3	x
321		5	5	5		1	4	1	2	5	1	1	1	1	1	1	1	1	x
347		5	5	5		1	4	1	2	5	1	1	4	1	1	1	1	1	x
329		Duplex	4	5	5		2	4	2					1	1	1	1		x
3RE60			4	1	5			3		4	4			1	1	1	1	3	4
18-18-2	4		4	5		1	4	1						1	1	1	1	x	

Code: 1 Resistant  
 2 Resistant unless cold-worked or hardened  
 3 Resistant unless sensitized  
 4 Resistant except at high temperatures and concentrations  
 5 Nonresistant  
 x Not recommended for this environment

Source: Chemical Engineering, reprinted with permission.

# Tipos de corrosão

- Corrosão Intergranular
  - Ocorre preferencialmente nos contornos de grão -> geralmente associada à segregação



**Figure 6-17**

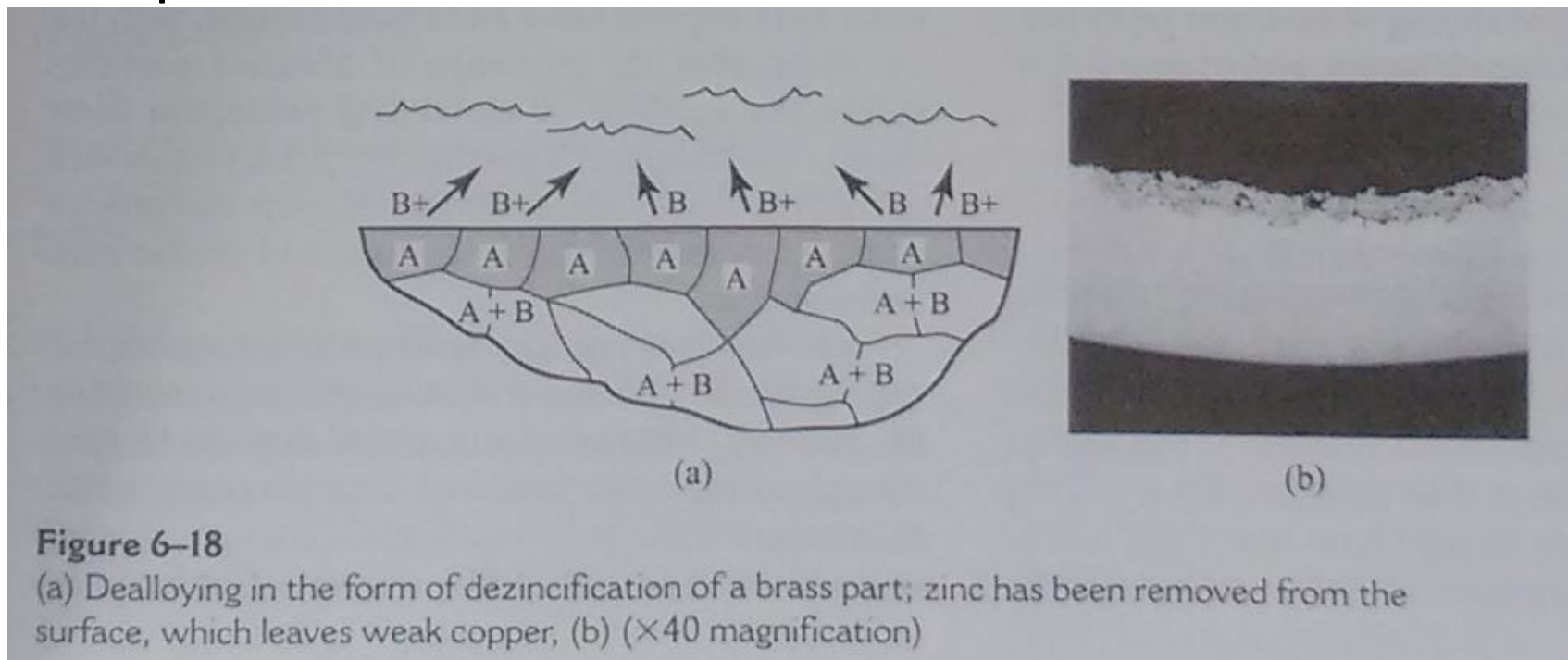
Scanning electron photomicrograph of intergranular corrosion on the surface of sensitized austenitic stainless steel. Improper annealing caused the sensitization. Note the gaps between the grain boundaries. The corrodent dissolved the material adjacent to the grain boundaries, allowing the grains to fall out of the surface. ASTM A 262 describes susceptibility tests ( $\times 250$  original magnification).

# Tipos de corrosão

- Corrosão Intergranular
  - Contornos de grão são regiões de maior energia e normalmente são regiões anódicas, mas não muito fortes no caso da corrosão uniforme
  - Corrosão intergranular ocorre se o contorno for quimicamente dissimilar ao grão (ex. sensibilização de aços inoxidáveis)

# Tipos de corrosão

- *Dealloying* (corrosão seletiva)
  - Ocorre quando um dos componentes da liga é preferencialmente removido



Mais comum: dezincificação do latão e grafitação de ferros fundidos

# Tipos de corrosão

- Erosão
  - Já descrito no capítulo de tribologia, mas alguns deles também podem ser considerados formas de corrosão
    - Por impacto de líquido
    - Por líquido
    - Por lama
    - Cavitação

# Tipos de corrosão

- Outros tipos de corrosão:
  - Corrosão fadiga
  - Esfoliação
  - Por corrente parasita
  - Microbiológica
  - Corrosão filiforme
  - Etc...

Para evitar a corrosão utilizando a engenharia de superfície é extremamente importante conhecer o tipo corrosão esperada



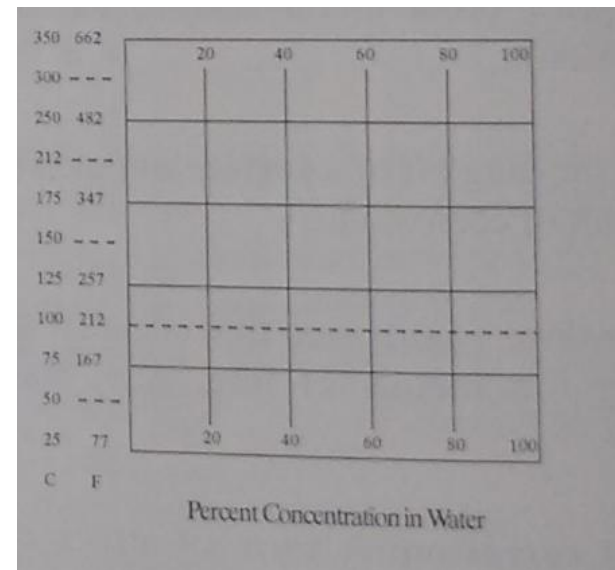
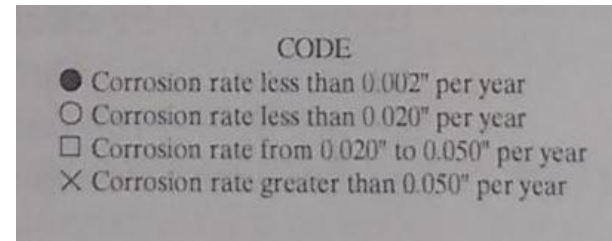
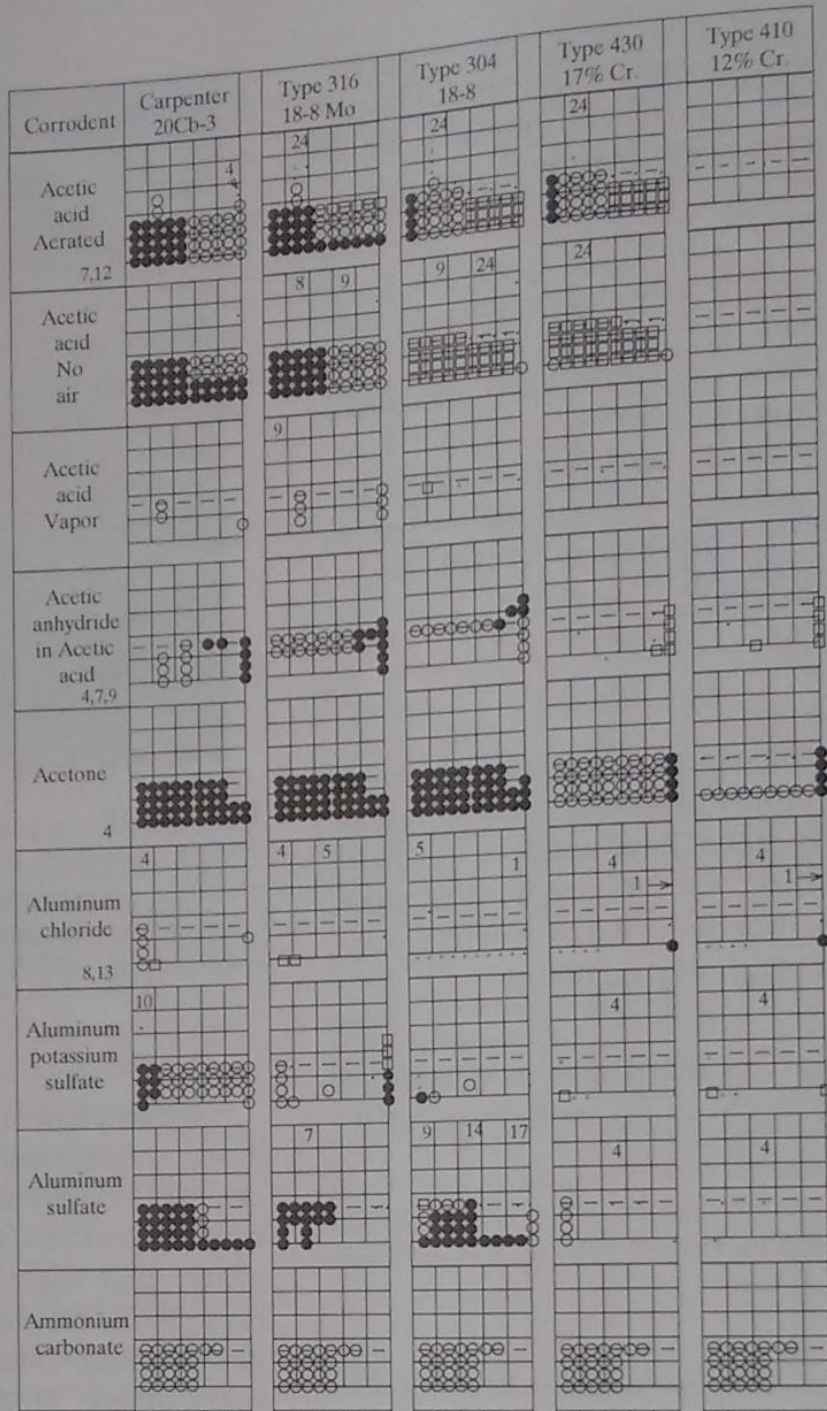
# Determinação das características de corrosão

- Grande quantidade de informação sobre corrosão de diversos materiais em diversos meios existem e devem servir de guia
- Softwares com esta base de dados existem

Figure 6-20

Typical corrosion data

Source: Courtesy of the National Association of Corrosion Engineers, © NACE International 2008.



# Determinação das características de corrosão

- Se não existirem dados para um determinado meio ou material, testes de corrosão em laboratórios são necessários
  - Ex. impurezas em baixa quantidade podem afetar fortemente a corrosão e provavelmente este caso não estará descrito em *handbooks*
- Existem muitos testes, relativamente simples -> mas testes podem ser muito longos -> especialmente para materiais bastante resistentes à corrosão

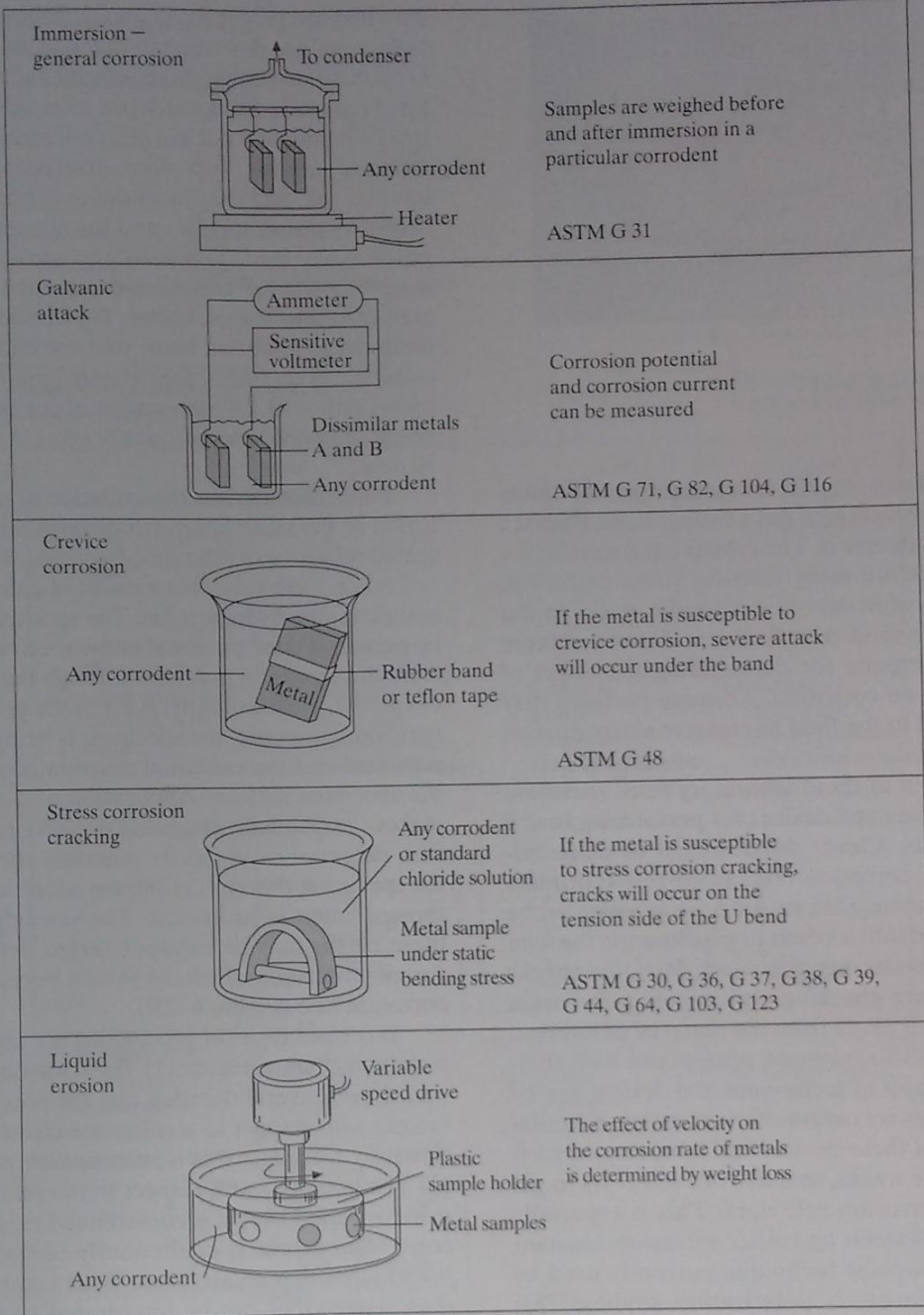
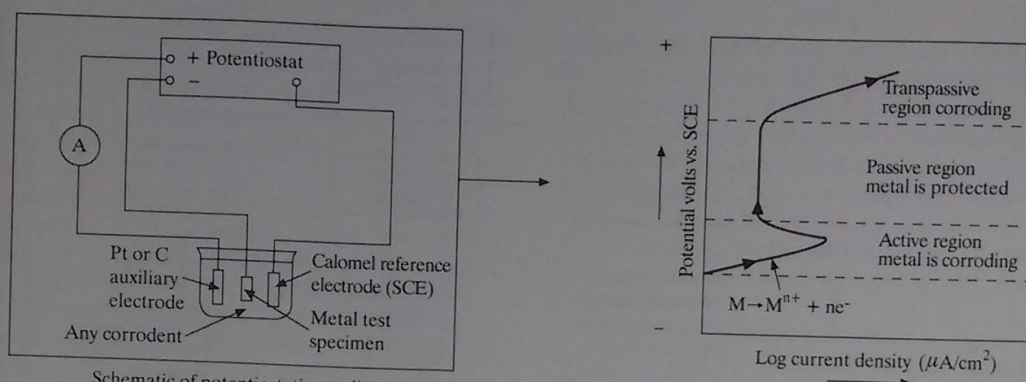


Figure 6-21 Laboratory corrosion-testing techniques

Nevoa salina bastante usada

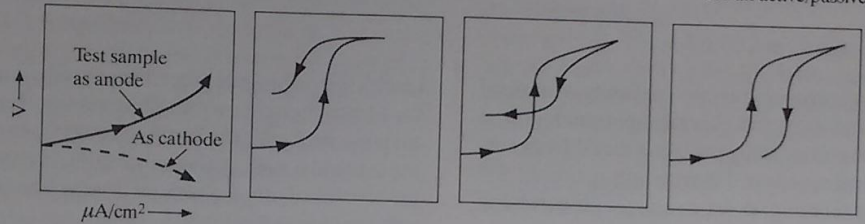
# Determinação das características de corrosão

- Para materiais resistentes a corrosão ensaios de polarização podem trazer resultados em poucas horas.
- Como em geral a corrosão é um processo eletroquímico, medidas elétricas podem ser usadas para monitorar a corrosão.
- A amostra a ser testada pode ser colocada no ânodo de uma célula eletroquímica, com o eletrólito de interesse, e a corrente pode ser registrada variando-se a polarização -> obtém-se uma “impressão digital” da corrosão deste material neste meio

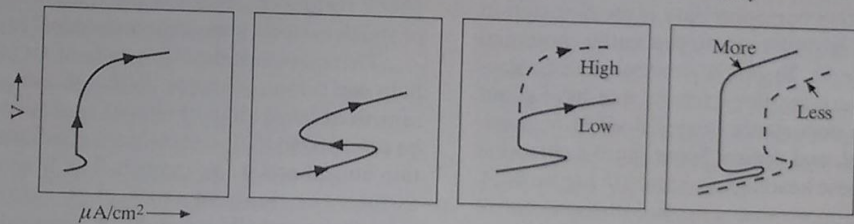


Schematic of potentiostatic anodic polarization cell (ASTM G 5)

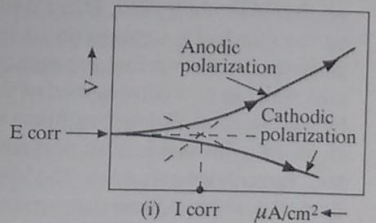
Typical polarization curve for an active/passive metal



(a) Curve for freely corroding active metal  
 (b) Resistant to pitting and crevice corrosion of an active-passive alloy  
 (c) Subject to crevice corrosion of an active-passive alloy  
 (d) Subject to pitting and crevice corrosion of an active-passive alloy



(e) Likely to passivate  
 (f) Not likely to passivate  
 (g) Pitting resistance  
 (h) Comparison of corrosion resistance



(i)  $I_{\text{corr}}$

A polarização acelera os processos oxidação e redução

Um ensaio leva tipicamente 1h, enquanto um ensaio de imersão leva tipicamente 30 dias

Técnicas de polarização pode ser usada para ajudar na seleção de materiais, entender a influencia do meio, da temperatura....

Figure 6-23 Schematic of a potentiostatic polarization setup (ASTM G 5). Figures (a) to (i) are examples of the shapes of curves that are obtained and their interpretation.

# Controle da corrosão

- Prevenir o problema de corrosão selecionando materiais com base em dados existentes ou ensaios é o primeiro passo
- Três fatores importante: Material, meio e projeto

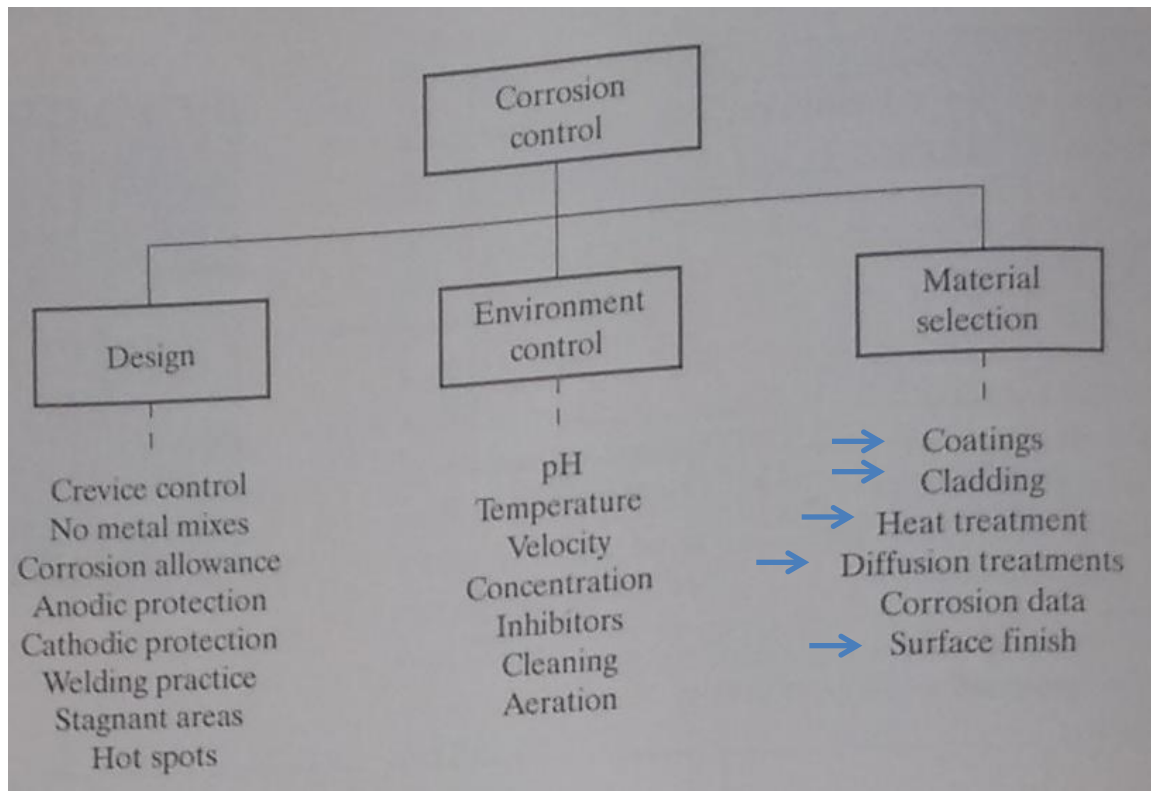


Figure 6-24  
Techniques for corrosion control

# Controle da corrosão

- Seleção do material
  - Pode levar em conta tratamentos de superfícies (normalmente quando um metal de preço aceitável não é encontrado), ex.
    - *conversion coatings*, para resistência à corrosão atmosférica
    - Pinturas, camadas cerâmicas ou vítreas (cuidado com trincas)
    - Camadas anódicas (Zn)
    - Tratamentos de difusão (Cr, Nitetratação ....)
    - Tratamento térmico (solubilização em inoxidáveis e homogeneização em fundidos)
  - Outro ponto a ser considerado é o acabamento superficial  
-> reduz área, fresta(depósitos) e facilita limpeza



# Controle da corrosão

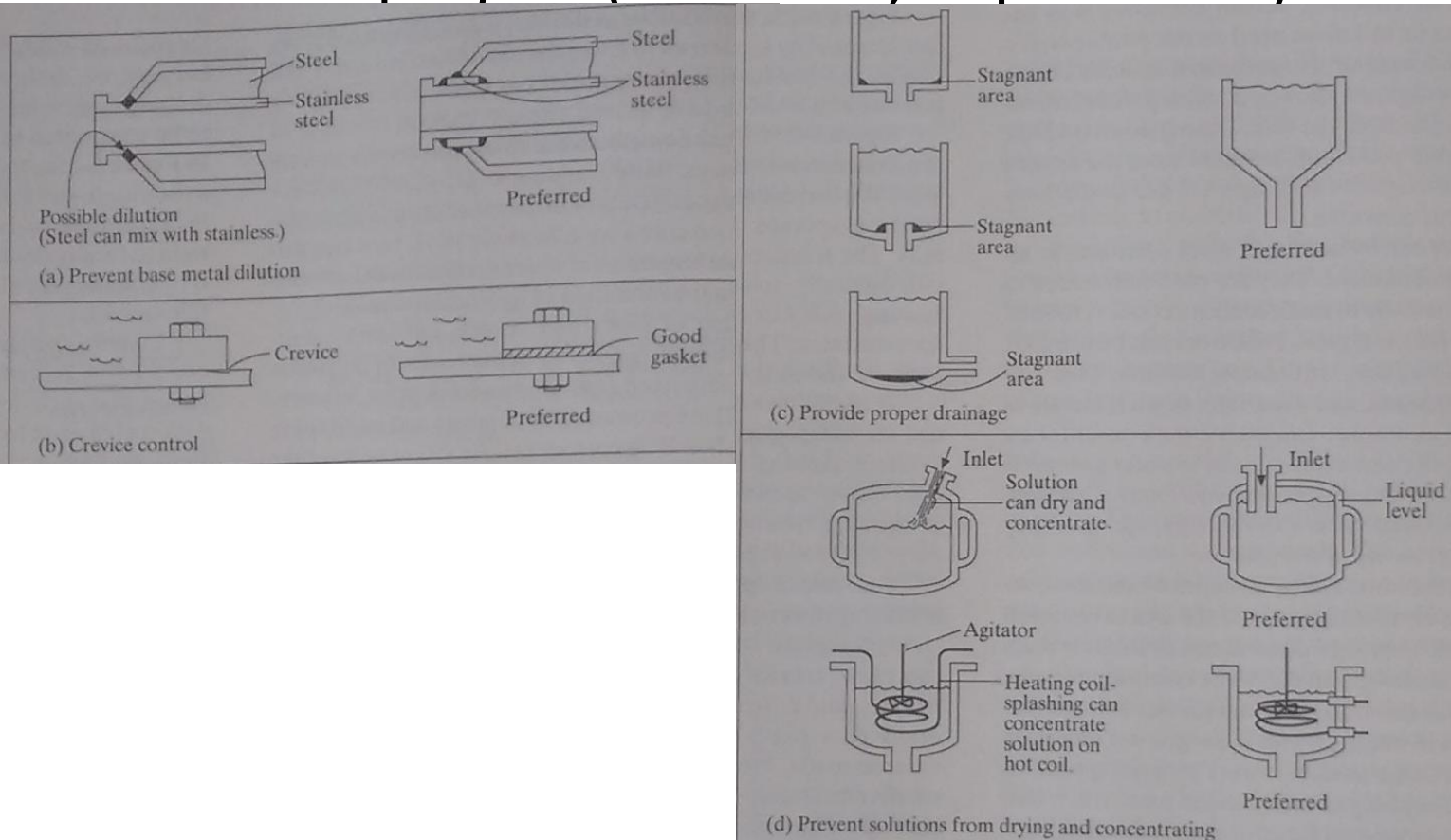
- Controle do ambiente
  - Temperatura, concentração, velocidade são fatores óbvios
  - Outros fatores não tão óbvios podem ser importantes
    - Gases dissolvidos podem reduzir o pH da água
    - Concentrações de cloro de 1ppb pode ser suficiente para causar corrosão sob tensão
    - A limpeza é importante para reduzir corrosão por fresta, sob depósitos e por variação de concentração no eletrólito
  - Inibidores de corrosão podem ser usados para alterar o meio -> agem no meio de diversas maneiras limitando alguma etapa da reação eletroquímica

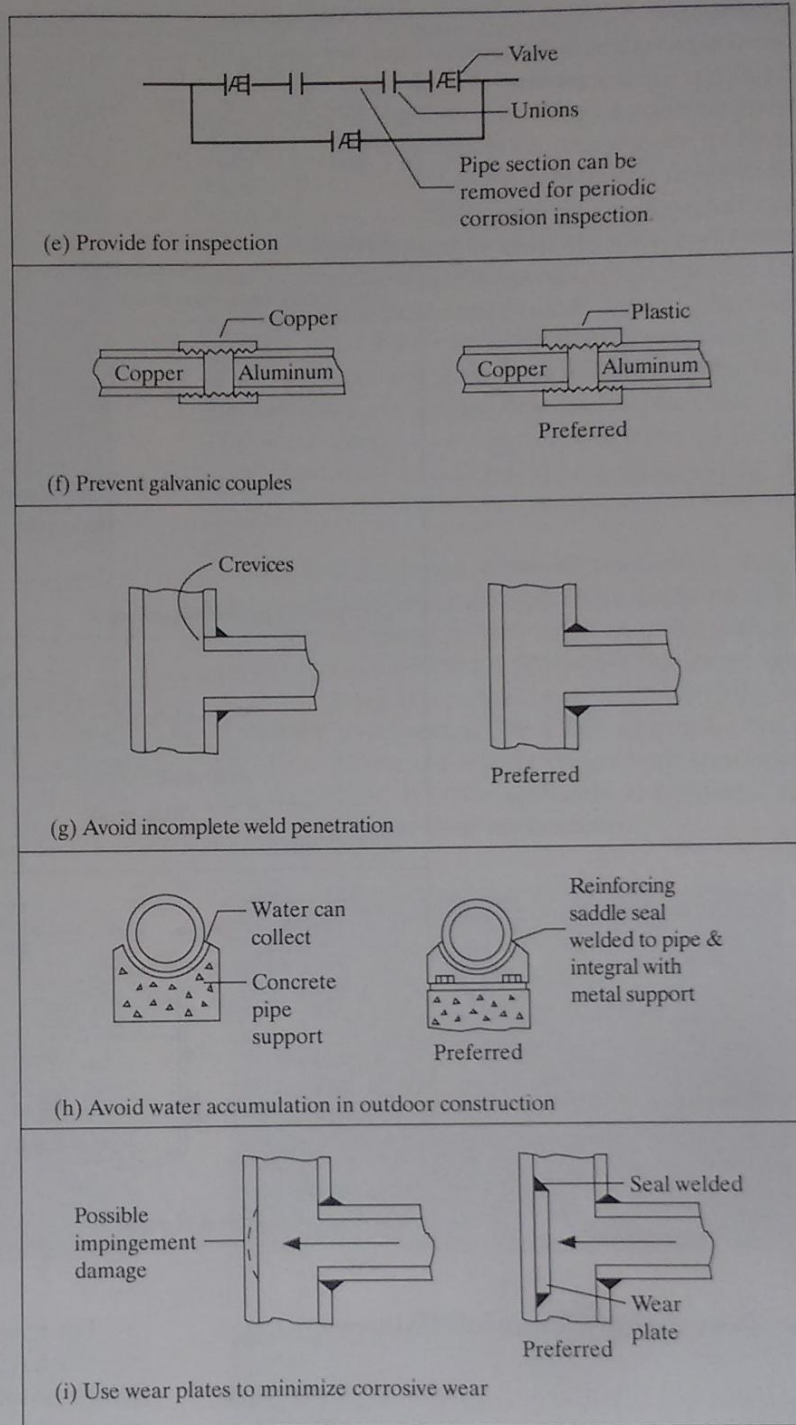
# Controle da corrosão

- Projeto

- Parte importante do problema de corrosão pode ser resolvido no projeto (ex. fresta, depósitos ...)

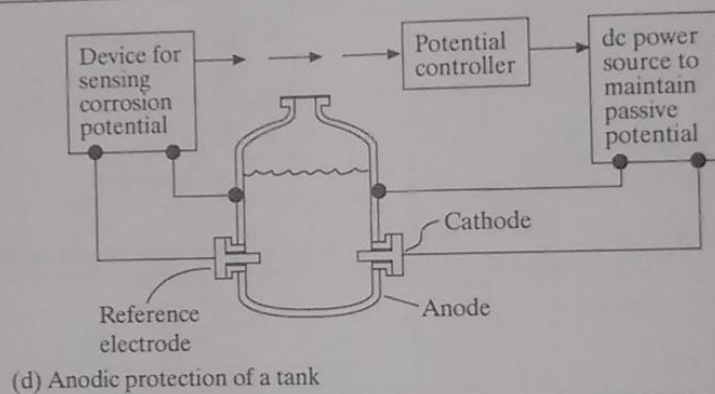
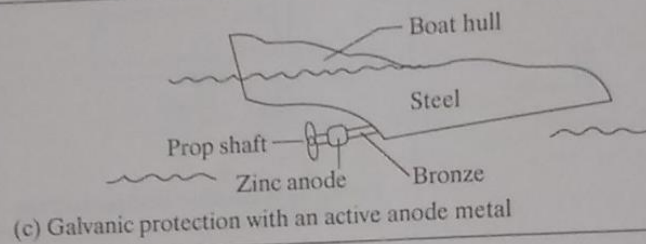
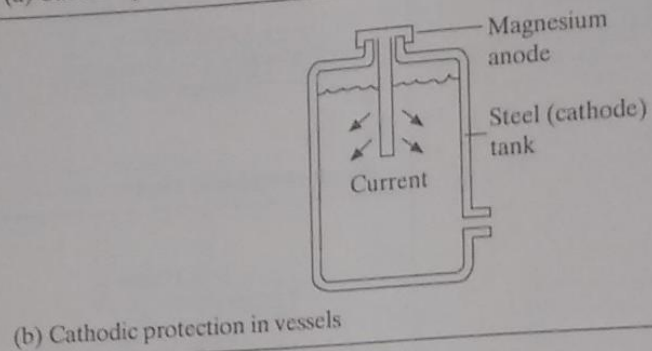
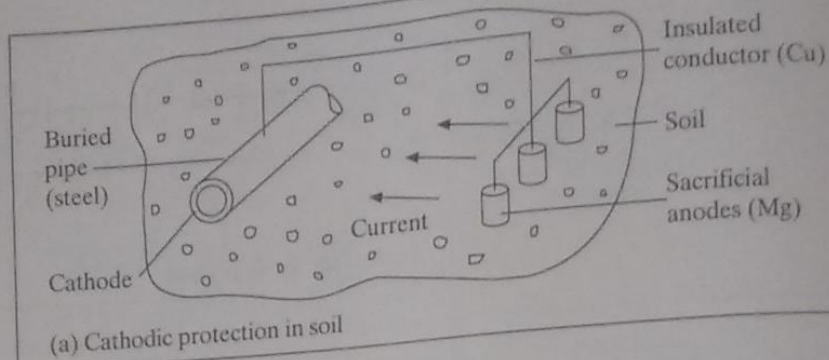
Figure 6-25  
Preventing corrosion by design





Um projeto apropriado pode até ser mais caro, mas em geral é viável

Figure 6-26  
Corrosion-protection techniques



Técnicas de proteção:

“Usando a célula eletroquímica a seu favor”

Ânodo de sacrifício e polarização

# Prevenindo falhas por corrosão

- As maneiras de prevenir falhas por corrosão são basicamente as mesma usadas para o controle de corrosão
- Na grande maioria das vezes as falhas por corrosão se devem ao projeto inadequado
- Relacionados à filmes depositados (eng. de superfícies) -> dar preferência a camadas anódicas, evitar trincas e furos -> cuidado com recobrimentos mais nobres que o substrato
- Ler texto do livro para exemplos

# Pontos importantes a ser destacados

- Conhecer os fundamentos da corrosão é essencial para resolver/prevenir problemas deste tipo
- Corrosão é geralmente um processo eletrolítico -> envolve sempre ânodo (corroído), cátodo e eletrólito (materiais isolantes elétricos são “imunes”)
- Cada material pode ser mais adequado para um determinado meio (ácido, básico, neutro ....) -> fazer escolhas baseadas em dados da literatura e/ou testes de laboratório
- A etapa de projeto é muito importante para muitos tipos de corrosão (certamente o projeto adequado é a melhor maneira de prevenir e controlar a corrosão)
- **Resistência à corrosão não é uma propriedade do material**