



**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**Departamento de Engenharia Química**

**LEC - Laboratório de Eletroquímica e Corrosão**

**PQI 3406 – Corrosão e Seleção de Materiais**

**1ª. aula**

**Ministrado por: Idalina Vieira Aoki**

# DEGRADAÇÃO DE MATERIAIS: se manifesta por uma das três formas:

## Corrosão, fratura ou desgaste

**Corrosão:** processo indesejável, na Engenharia, em que materiais METÁLICOS são transformados em produtos de corrosão, sofrendo ataque que leva à falha em serviço, por mecanismo químico ou eletroquímico que pode acelerar processos concomitantes de fratura ou desgaste.

**Corrosão** : dano frequentemente insidioso e “oculto” até que aparece no pior momento da operação de um sistema.

**Corrosão:** causa **impacto na economia e na segurança** de sistemas em vários ambientes operacionais

Quando houver interesse na ocorrência da destruição de materiais metálicos, o fenômeno receberá outra denominação como a eletroerosão de metais, por exemplo.

Deve ser gerenciada por **inspeção e monitoramento** – estratégia de manutenção - avaliação de riscos

# Falhas por corrosão : não podem ser toleradas

Principalmente aquelas que levam a:

- ✓ Injúrias pessoais ou perda de vidas
- ✓ Acidentes e/ou paradas não programadas
- ✓ Contaminação ambiental



Run off de metais a partir de produtos de corrosão contaminando o solo e águas subterrâneas



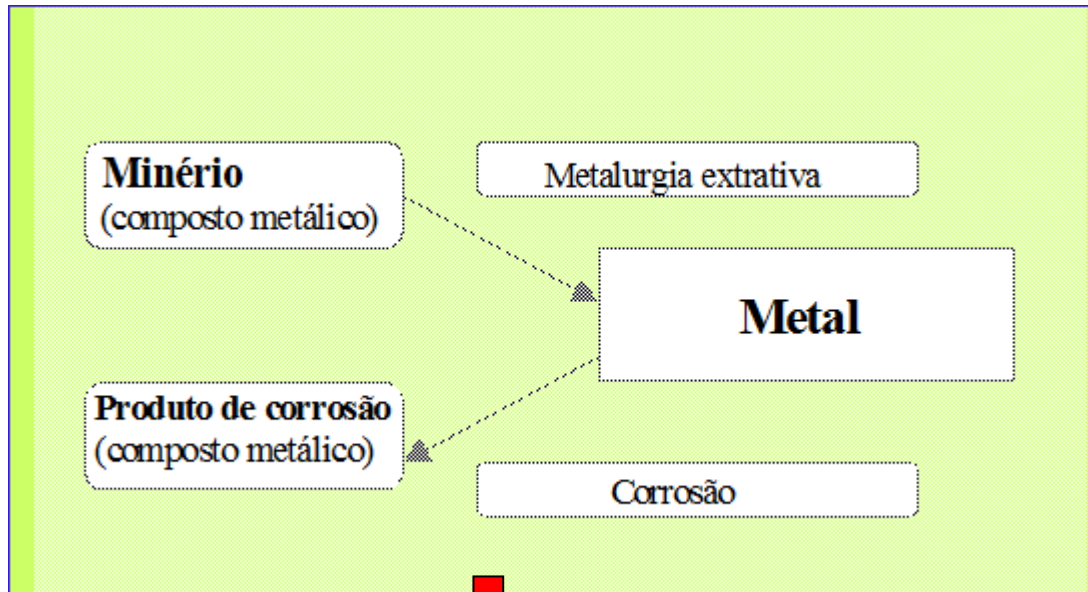
Válvula que parou de funcionar pelo seu bloqueio por produtos de corrosão



Defeito em válvula de retenção que provocou o acidente na Union Carbide em Bhopal, India, permitindo a entrada de água no tanque de **isocianato de metila**.

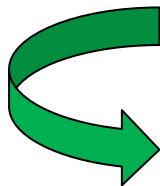
## A corrosão é fenômeno espontâneo: a termodinâmica está a seu favor

Corrosão: inverso do processo de extração metalúrgica



A energia contida nos produtos de corrosão é menor que a energia do metal

logo a tendência espontânea é a de transformação do metal nos seus compostos (produtos de corrosão)



Resta o **controle** *via cinética* das reações envolvidas

# CORROSÃO: IMPORTÂNCIA

A corrosão apresenta importância nas áreas:

- ❖ **social**
- ❖ **econômica**
- ❖ **técniológica**
- ❖ **conservação de reservas minerais**

## IMPORTÂNCIA SOCIAL

- ✓ **Aspectos de saúde**
- ✓ **Aspectos de segurança**
- ✓ **Aspectos tecnológicos**
- ✓ **Aspectos ambientais**

# CORROSÃO: IMPORTÂNCIA SOCIAL

## Aspectos de saúde



Implantes odontológicos



Geralmente feitos em ligas de titânio



Materiais para implantes ortopédicos

Ligas de Cr- Mo ou ligas de titânio



Ósseo-integração civilização Maia

## Instrumental cirúrgico



FIGURA 1. Instrumental cirúrgico | 1. Foleto apertor de Mayo-Heag, 2. Agulha com orelhinhos, 3. Foleto apertor de Mayo-Heag com orelhinhos para fixação, 4. Foleto com lâmina geminada, 5. Tesoura apertora com uma ponta fixa, 6. Tesoura Monstaden, 7. Foleto com uma ponta fixa, 8. Foleto com uma ponta fixa, 9. Foleto apertor.

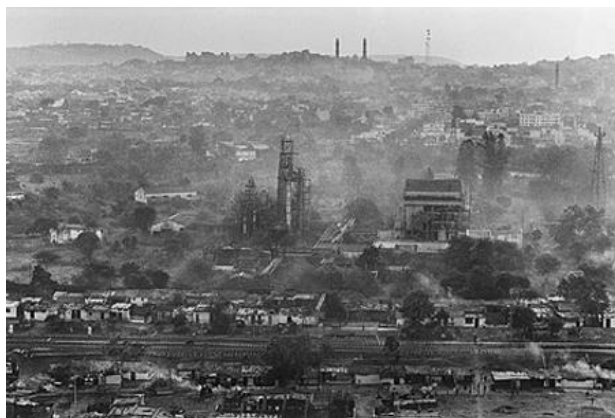


São geralmente feitos em aços inoxidáveis 316L ou liga de Ti-4V

# CORROSÃO: IMPORTÂNCIA SOCIAL

## Aspectos de segurança

Falhas por corrosão podem provocar acidentes graves



Na noite de 2 para 3 de Dezembro de 1984, na fábrica da Union Carbide em Bhopal, na Índia, entrou, inadvertidamente, água num tanque contendo 40 toneladas de MIC, tendo ocasionado uma ascensão rápida da pressão e da temperatura. O calor gerado pela reacção, pela presença de concentrações mais altas do que as normais do clorofórmio e pela presença de um catalisador de ferro produzido pela corrosão da parede do tanque de aço inoxidável deu origem a uma reacção de tal modo intensa que os gases não puderam ser contidos pelos sistemas de segurança. Como consequência, o MIC e outros produtos da reacção escaparam-se para as áreas vizinhas. Estima-se que neste acidente tenham morrido 3000 pessoas, muitas delas na sua própria cama ou a caminho do hospital, e ficado feridas entre 200.000 a 600.000. A fábrica foi fechada após o acidente.

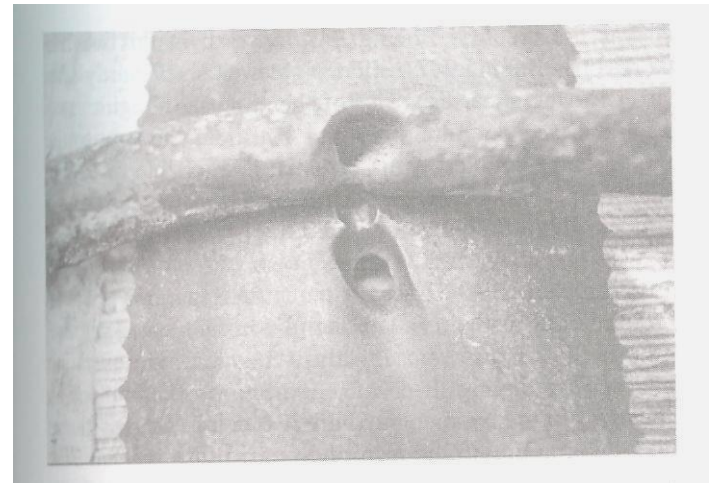
# CORROSÃO: IMPORTÂNCIA SOCIAL

## Aspectos de segurança

Falhas por corrosão podem provocar acidentes graves

Canos de água e esgoto e uma enorme quantidade de cabos de eletricidade e telecomunicações mantêm uma cidade moderna em plena atividade. Tomamos isso como normal até o dia em que algo sai errado. Em 22 de abril de 1992, a cidade de Guadalajara, no México, foi surpreendida por 17 explosões subterrâneas. O acidente destruiu diversas quadras e causou a morte de centenas de pessoas. Uma década depois, modernos programas de computação revelam o que realmente aconteceu naquele dia fatídico. Acidentes não acontecem por acaso. Eles são o resultado de uma sucessão de eventos críticos. O programa desvenda as ações fatais que levaram à catástrofe. No total o acidente causou a **morte de 211 pessoas e deixou 1.400 feridos**. A destruição atingiu uma área de 13 quilômetros, causando a **destruição de 1.120 residências e 450 estabelecimentos comerciais**. Cerca de 15 mil pessoas ficaram desabrigadas.

**Morreram 211 pessoas em Guadalajara , México (abril de 1992)**



Pites numa tubulação de água de aço galvanizado que contribuíram para a corrosão erosão e consequente vazamento na tubulação de gasolina que adentrou a tubulação do sistema de esgotos da cidade



# CORROSÃO: IMPORTÂNCIA SOCIAL

## Aspectos de segurança

Falhas por corrosão podem provocar acidentes graves



A tubulação passava em região alagadiça, em frente à vila constituída por palafitas. Na noite do dia 24, um operador alinhou inadequadamente e iniciou a transferência de gasolina para uma tubulação (falha operacional) que se encontrava fechada, gerando sobrepressão e ruptura da mesma, espalhando cerca de 700 mil litros de gasolina pelo mangue. Muitos moradores visando conseguir algum dinheiro com a venda de combustível, coletaram e armazenaram parte do produto vazado em suas residências. Com a movimentação das marés o produto inflamável espalhou-se pela região alagada e cerca de 2 horas após o vazamento, aconteceu a ignição seguida de incêndio. O fogo se alastrou por toda a área alagadiça superficialmente coberta pela gasolina, incendiando as palafitas

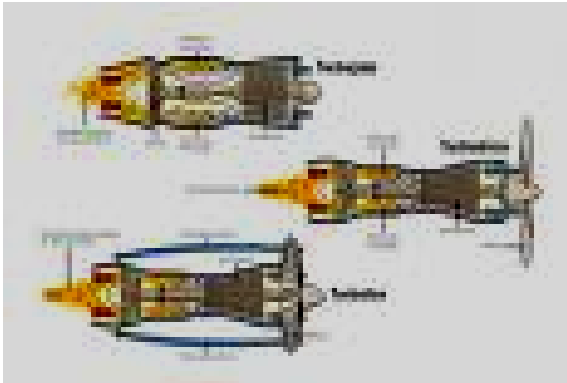
**O número oficial de mortos é de 93**, porém algumas fontes citam um número extra oficial superior a 500 vítimas fatais (baseado no número de alunos que deixou de comparecer à escola e a morte de famílias inteiras sem que ninguém reclamasse os corpos), dezenas de feridos e a destruição parcial da vila.

**Morreram 93 pessoas em Cubatão ,  
SP (abril de 1984)**

# CORROSÃO: IMPORTÂNCIA SOCIAL

## Aspectos tecnológicos

Projetos esperaram sua implantação até que novas ligas mais resistentes à corrosão fossem desenvolvidas



A primeira turbina a gás auto-propelida, entretanto, foi construída em 1903 pelo engenheiro norueguês [Egirdius Elling](#). As primeiras patentes para a 'propulsão' a jato foram encaminhadas em 1917. **Limitações do desenho e dos meios técnicos de engenharia e metalurgia (ligas resistentes a altas temperaturas)** aplicados na produção inviabilizaram, num primeiro momento, tais motores. Os principais problemas eram a segurança, confiabilidade, peso e, especialmente, a operação dos motores.

# CORROSÃO: IMPORTÂNCIA SOCIAL

## Aspectos ambientais e conservação de reservas minerais

Acidentes provocados por corrosão geralmente implicam em danos ambientais graves



Ação de contenção no espalhamento da mancha de óleo

O vazamento de cerca de 4 milhões de litros de petróleo (16 de julho de 2000) foi o pior desastre ambiental da história do Paraná.

O acidente aconteceu na **Refinaria Presidente Getúlio Vargas (Repar), da Petrobrás, localizada no município de Araucária, a 24 quilômetros de Curitiba.** O segundo acidente do ano envolvendo refinarias da Petrobras e o maior dos últimos 26 anos. A mancha de óleo atingiu o rio Barigui, afluente do Rio Iguaçu e o próprio Iguaçu, num raio de 15 quilômetros, de acordo com a Petrobrás.

# CORROSÃO: IMPORTÂNCIA SOCIAL

## Aspectos ambientais e conservação de reservas minerais

A reciclagem de metais e a prevenção da corrosão contribuem para a conservação das reservas minerais



Os metais são 100% recicláveis; fazê-lo depende da relação benefício custo e do comprometimento com as questões ambientais



REUTILIZAÇÃO DE MATERIAIS;

AÇO: 30 A 40 %

ALUMÍNIO: 92 % (Brasil é o segundo, no âmbito mundial)



# CORROSÃO: IMPORTÂNCIA

## Corrosão no cotidiano das cidades e cidadãos

### Corrosão e falhas em eletrodomésticos



Reparo em adutora de água



Corrosão em máquina de lavar roupas



Geladeira com vários pontos de corrosão (na parte inferior da porta)

## CORROSÃO: IMPORTÂNCIA

### Corrosão no cotidiano das cidades e cidadãos

Corrosão em monumentos de valor histórico e cultural



Estátua da tartaruga,  
Richmond, VA, EUA



Estátua de Marco Aurélio,  
Capitólio, Roma, Itália



Monumento à  
Washington, EUA

# CORROSÃO: IMPORTÂNCIA

## IMPORTÂNCIA ECONÔMICA

a economia mundial seria de outra grandeza  
caso a corrosão não existisse

- sem corrosão, os materiais empregados para atender as necessidades de resistência mecânica se limitariam ao ferro fundido e aos diferentes aços ao carbono
  - para atender à necessidade de condutibilidade elétrica, o cobre e o alumínio seriam suficientes.
- Ligas mais resistentes não teriam sido desenvolvidas
  - As indústrias de tintas e revestimentos metálicos protetores não existiriam

# CORROSÃO: IMPORTÂNCIA

## IMPORTÂNCIA ECONÔMICA

### CUSTOS ADVINDOS DE CORROSÃO

- **CUSTOS DIRETOS ESTIMADOS NOS DIFERENTES PAÍSES:**

De 1 a 5% do PIB

EUA – 3,1% PIB (2001) – 276 bilhões de US\$

Inglaterra – 3,5% PIB (1975)

**Brasil – estima-se em 3,5% PIB -**

- Apenas 10-15% dos custos de corrosão poderiam ser economizados se procedimentos corretos fossem sempre adotados.

- O **custo da prevenção** é que conta, pelo fato da corrosão ser espontânea.

**Custos totais** = custos diretos corretivos + custos diretos preventivos + custos indiretos



# CORROSÃO: IMPORTÂNCIA

## IMPORTÂNCIA ECONÔMICA

### Custos diretos corretivos

custos de **substituição de peças e equipamentos** que sofreram corrosão, incluindo **energia e mão-de-obra**

### Custos diretos preventivos

- custos de **implantação de sistemas protetores** contra a corrosão
- custos de **manutenção de sistemas de proteção anticorrosiva**
- **Superdimensionamento** para que os equipamentos tenham a vida útil desejada

# CORROSÃO: IMPORTÂNCIA

## IMPORTÂNCIA ECONÔMICA

### Custos indiretos

- a) Paralisações não previstas, pois as previstas estão embutidas nos custos de produção (lucros cessantes)
- b) Perda de produto com elevado valor agregado
- c) Perda de eficiência de equipamentos (bombas, válvulas, trocadores calor, etc)
- d) Contaminação de produtos

#### Exemplo:

Uma planta química possui uma linha de produção onde está instalada uma bomba centrífuga. Depois de certo tempo, a quantidade do produto produzido está aquém da quantidade planejada. Uma inspeção levou a constatar que a bomba não estava mais bombeando o volume especificado na etapa de projeto. A linha foi parada, por algumas horas, para a troca do rotor da bomba que estava bastante corroído. Identificar os custos diretos e indiretos causados pela corrosão do rotor da bomba.

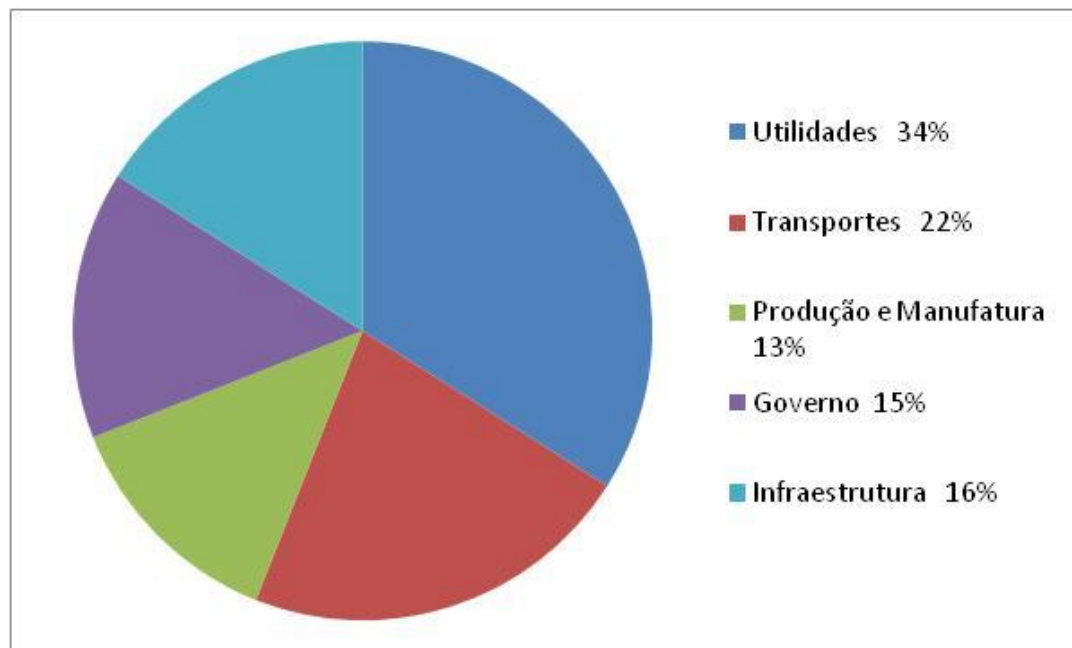
**Custos diretos:** aquisição de novo rotor e a mão de obra para a troca (**de menor valor**)

**Custo indireto:** o lucro cessante pela parada de produção da linha (**este é o custo mais elevado!**)

# CORROSÃO: IMPORTÂNCIA

## IMPORTÂNCIA ECONÔMICA

Nos EUA, estudo de 2001 revela que os custos diretos e indiretos podem impactar o PIB em até 6%



Custos pelos diferentes setores industriais da economia (EUA, 2001)

# CORROSÃO: importância econômica

## custo dos materiais metálicos

Os mais resistentes à corrosão, são, via de regra, os mais caros

### CUSTO RELATIVO DOS MATERIAIS

<b>Materiais</b>	<b>Custo relativo</b>	<b>Materiais</b>	<b>Custo relativo</b>
Aço-carbono estrutural	1,00	Aço inoxidável tipo 321	13,7
Aço-carbono qualificado	1,15	Aço inoxidável tipo 410	10,2
Aço-carbono acalmado (com Si)	1,25	Ferro fundido	0,95
Aço-liga ½ Mo	2,3	Latão de alumínio	7,6
Aço-liga 1¼ Cr – ½ Mo	3,1	Latão almirantado	7,8
Aço-liga 5 Cr – ½ Mo	3,8	Cupro-níquel 90-10	22,0
Aço-liga 3½ Ni	3,0	Cupro-níquel 70-30	27,0
Aço inoxidável tipo 304	11,5	Alumínio	2,5
Aço inoxidável tipo 304 L	13,3	Metal Monel	31,8
Aço inoxidável tipo 310	25,5	Titânio	41,0
Aço inoxidável tipo 316	15,0	Incoloy	48,5

FONTE: SILVA TELES

Idalina Vieira Aoki 2021

## CORROSÃO: CLASSIFICAÇÃO

Há várias formas de se classificar a corrosão e elas variam de autor para autor. Numa tentativa de mostrar as formas mais comumente adotadas, tem-se:

- Quanto ao mecanismo de interação: corrosão química  
corrosão eletroquímica
- Quanto à forma de ataque: **corrosão uniforme ou generalizada**  
**corrosão localizada**
- Quanto à presença de água: corrosão a úmido  
corrosão a seco
- Quanto à temperatura: corrosão a baixas temperaturas  
corrosão a elevadas temperaturas (> 200<sup>0</sup>C)

# CORROSÃO: CLASSIFICAÇÃO

## Corrosão generalizada

É o ataque uniforme onde a superfície corrói em toda sua extensão, sem áreas preferenciais de ataque.

$$v_{corr} = \frac{\Delta m}{\text{Area} \cdot \text{tempo exposição}} = \frac{\Delta m}{A \cdot \theta}$$

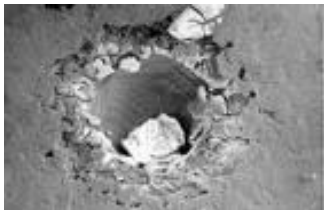
$$\text{Perda espessura} = PE = \frac{\text{perda massa}}{\text{massa específica}} = \frac{v_{corr}}{\rho} \equiv \frac{[ML^2\theta^{-1}]}{ML^3} = \frac{L}{\theta}$$



Corrosão atmosférica de aço patinável

## Corrosão localizada

É o ataque que se estabelece em áreas preferenciais ou em pontos discretos da superfície



É o tipo mais grave, pois as falhas ocorrem de forma inesperada. A inspeção deve ser feita com muita atenção!



## TERMINOLOGIA DA CORROSÃO

**Tabela 1 – Terminologia usada na identificação dos tipos de corrosão versus diversos fatores**

<b><u>TIPO DE ATAQUE</u></b>	<b><u>MEIO AGRESSIVO</u></b>	<b><u>CAUSA DO ATAQUE</u></b>	<b><u>FATORES MECÂNICOS</u></b>	<b><u>PRODUTOS DE CORROSÃO</u></b>
<b>Uniforme</b>	<b>Úmida</b>	<b>Pilha de concentração</b>	<b>Sob tensão</b>	<b>Escurecimento</b>
<b>Pite</b>	<b>Seca</b>	<b>Par bimetalico</b>	<b>Sob fadiga</b>	<b>Enferrujamento</b>
<b>Intergranular</b>	<b>Atmosférica</b>	<b>Célula ativo passiva</b>	<b>Erosão</b>	<b>Carepa</b>
<b>Seletiva</b>	<b>Por imersão</b>	<b>Corrente de fuga</b>	<b>Atrito</b>	
<b>Transgranular</b>	<b>Em solo</b>	<b>Impingimento</b>		
<b>Catastrófica</b>	<b>Em água do mar</b>	<b>Fragilização por H<sub>2</sub></b>		
<b>Esfoliação</b>	<b>Sais fundidos</b>	<b>Fragilização Cáustica</b>		
<b>Filiforme</b>	<b>Microbiológica</b>			
	<b>Alta temperatura</b>			
	<b>Por metal líquido</b>			

## CORROSÃO: PRINCIPAIS TIPOS

Corrosão atmosférica  
Corrosão galvânica  
Corrosão por pite  
Corrosão por aeração diferencial  
Corrosão intergranular  
Corrosão eletrolítica ou por corrente de fuga  
Corrosão seletiva

*Corrosão associada a solicitações mecânicas*

Corrosão sob tensão fraturante

Corrosão sob fadiga

Corrosão –erosão

Cavitação

Corrosão por atrito oscilante

Fragilização por metal líquido

Fragilização por hidrogênio

Fratura por álcalis

Corrosão microbiológica

Corrosão por oxidação a temperaturas elevadas

Corrosão em armaduras de concreto

Serão tratados  
com algum  
detalhe neste  
curso





## Exemplos de Corrosão atmosférica



**FIGURE 12.5** Detail of bronze sculpture with a streaky patina before (left) and after restoration (right). (Reproduced with permission from J. Gullman and M. Törnblom, *Bronze Sculpture. Its Making and Unmaking*, The Central Board of National Antiquities, Stockholm, Sweden, 1994, Figure 1.)

Escultura de bronze com pátina mal formada (à esquerda) e após restauração (à direita) - Suécia

## Exemplos de Corrosão galvânica



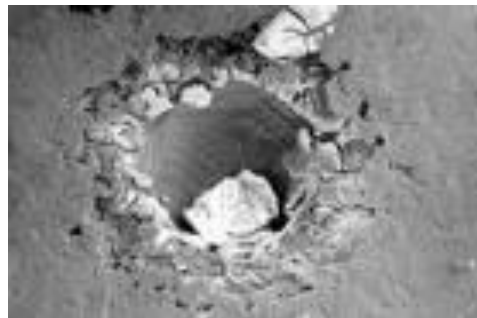
Montagem com  
contato entre cobre e  
aço zincado

Verifica-se ataque intenso no  
revestimento de zinco com  
produtos de corrosão brancos  
(chamada de corrosão  
branca)

## Exemplos de Corrosão por pites



Corrosão por pites e em frestas -aço inox 304 – região de falha na solda do trocador de calor



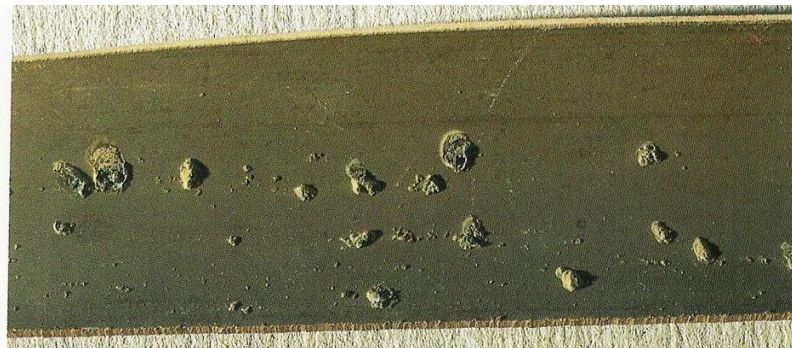
Detalhe de um pite em aço inox 316

## Exemplos de Corrosão por pites



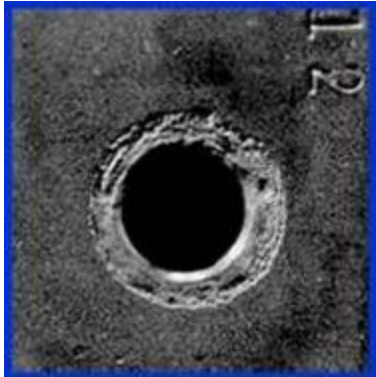
Ataque localizado por pites em máquina de papel, em aço inoxidável 316L.

Tem-se a impressão de que a parte central foi feita inadvertidamente de aço 304L com menor resistência a esse tipo de corrosão



Cobre em água fria potável - pites

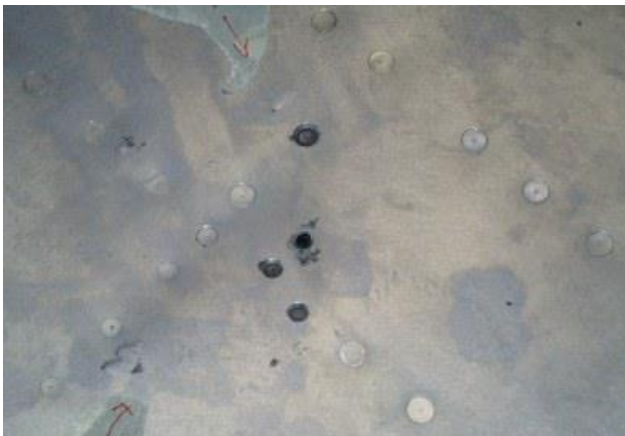
## Exemplos de Corrosão em frestas



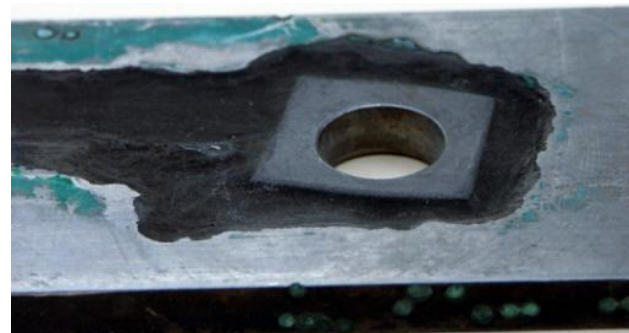
Frestas em aço inox 304 – meio com cloretos



Fresta formada entre duas paredes metálicas em contato

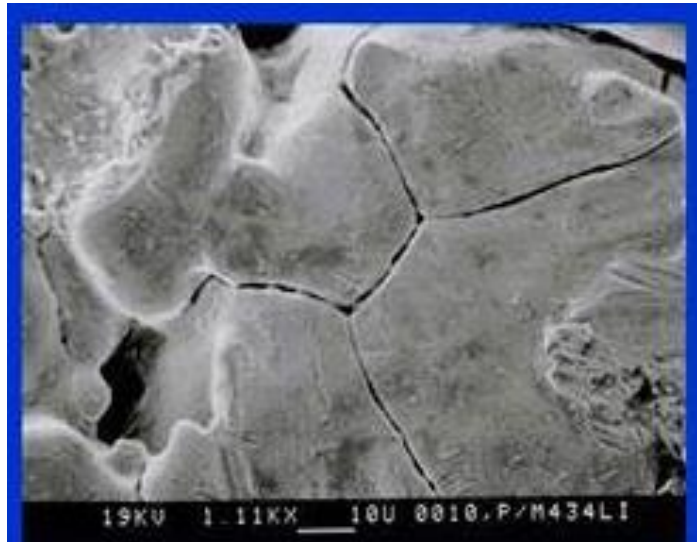


Frestas sob rebites - aeronave - Al

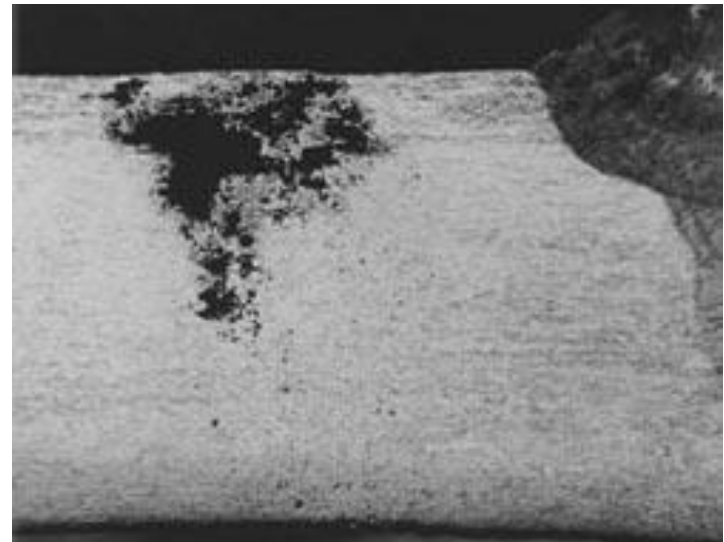


Fresta em Monel em água do mar

## Exemplo de Corrosão intergranular



Ataque em aço inox  
próximo a região  
sensitizada durante  
soldagem

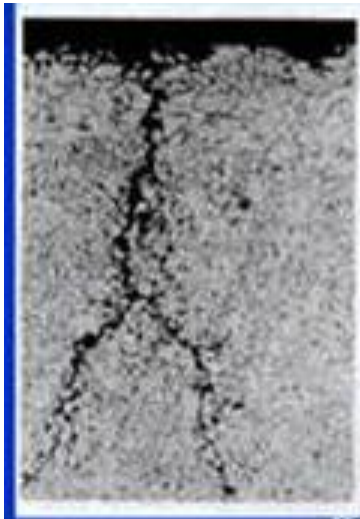


Em aço inox 304 em meio de  
 $\text{HNO}_3$  – próximo a uma solda

## Exemplos de Corrosão associada à solicitações mecânicas



Trinca transgranular em latão – **corrosão sob fadiga**



Trinca intergranular em aço carbono – **Corrosão sob tensão fraturante**