

5. Corrosão e seu Controle



Definições de 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.

- **Federação Européia de Corrosão**

“Interação físico-química entre um METAL e o meio envolvente, da qual resultam mudanças nas propriedades do METAL, levando frequentemente 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”.



Exemplo de Falha por Corrosão



Falha em tubulação (diâmetro 7 polegadas) de uma coluna de produção de poço de gás (contendo CO_2 e H_2S), devido à corrosão. O custo de retirada e substituição de uma coluna em um poço típico *on-shore* é da ordem de US\$ 2 milhões, além do custo de produção cessante.

Generalidades sobre Corrosão

- Como é um processo espontâneo, sempre ocorrerá se não forem adotadas medidas protetivas. É responsável por enormes prejuízos decorrentes da necessidade de substituir equipamentos destruídos e do superdimensionamento de peças para evitar as falhas em serviço.
- Estima-se que 20% da produção mundial de aço destina-se exclusivamente a repor o material destruído por corrosão. No Brasil, gasta-se cerca de R\$ 10 bilhões por ano para reparar danos de corrosão.
- Alguns fenômenos relacionados à corrosão são muito complexos e envolvem numerosos fatores, alguns dos quais são difíceis de caracterizar com precisão.



Generalidades sobre Corrosão

A corrosão é muito comum em metais, mas também podemos identificá-la em não metálicos, como:

- ✓ Borrachas;
- ✓ Plásticos;
- ✓ Madeira;
- ✓ Rochas e minérios;
- ✓ Concreto

Corrosão da madeira

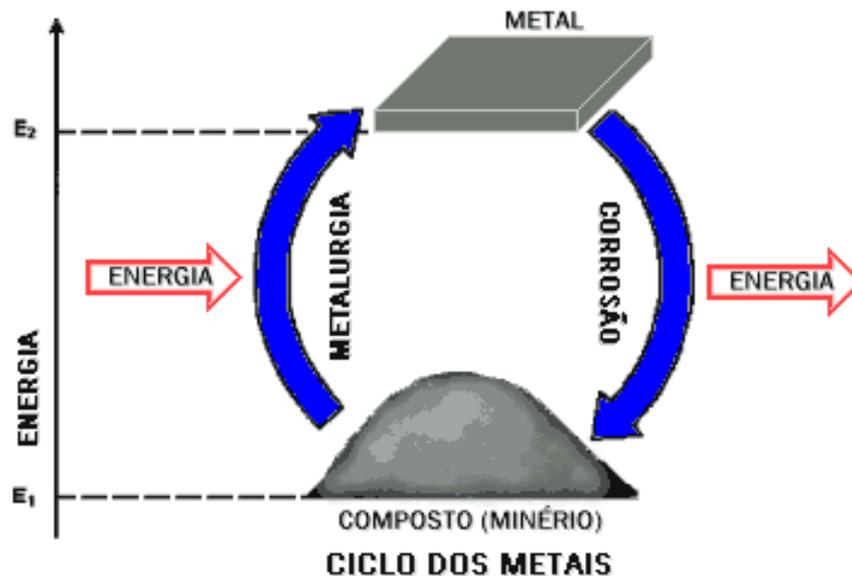


Corrosão do concreto



Corrosão Metálica

- Nos processos de corrosão, os metais reagem com o meio produzindo compostos semelhantes aos encontrados na natureza. Neste caso a corrosão funciona como o inverso dos processos metalúrgicos.
- O fenômeno essencial é o mesmo para todos os metais e ligas, diferindo apenas em grau, mas não em natureza.
- Do ponto de vista físico-químico, a corrosão dos materiais metálicos pode assumir duas formas gerais: a **corrosão eletroquímica** e o **ataque químico** (resultante da ação direta do agente agressivo sobre o material).
- A corrosão eletroquímica ou corrosão úmida, resulta de reações que envolvem o transporte de cargas elétricas. É a mais frequente e causadora de prejuízos.



Corrosão Úmida

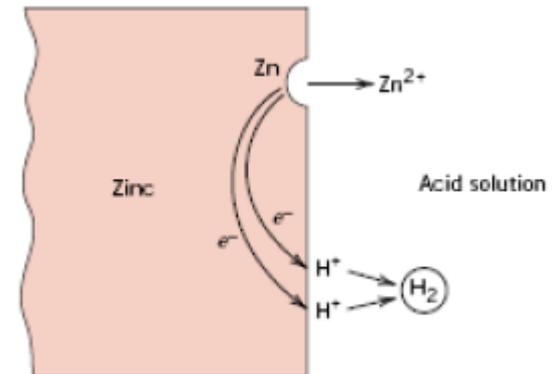
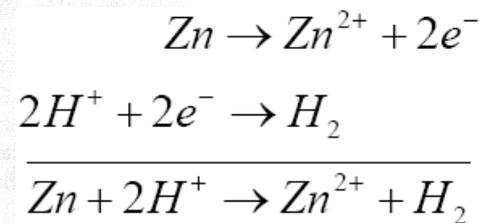
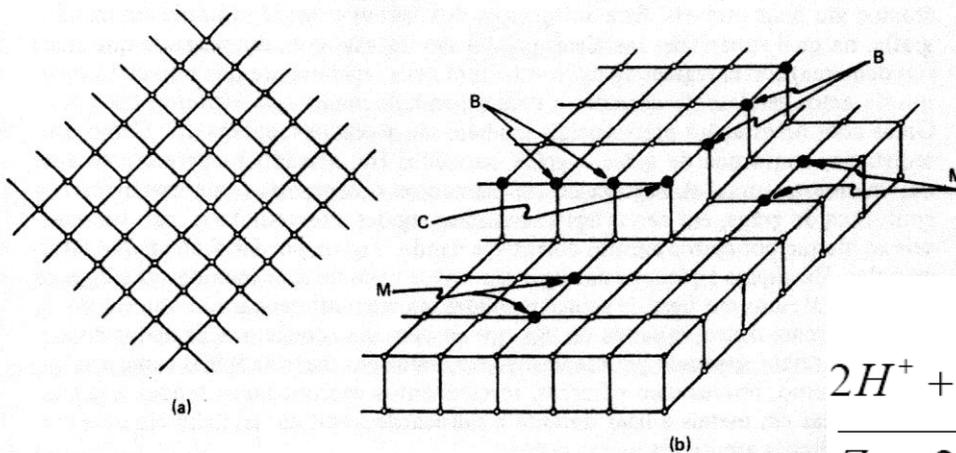
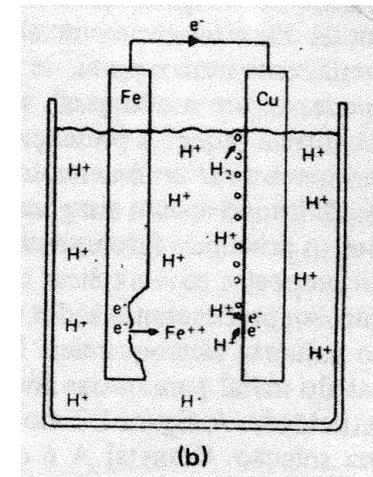
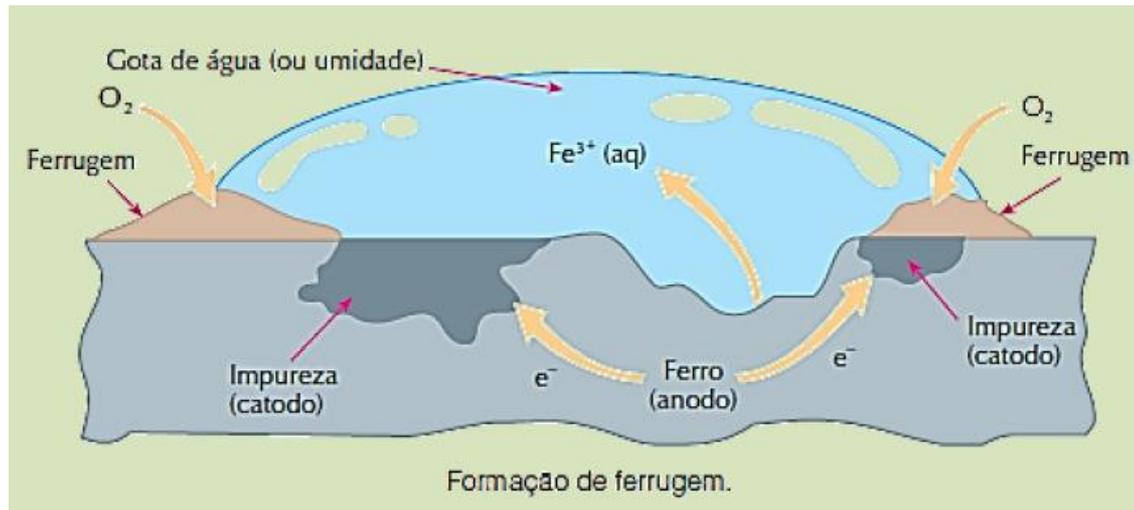


FIGURA 1.4. Representação esquemática de arranjo de átomos metálicos individuais em um cristal metálico: (a) perfeito e (b) real. B – bordas, C – cantos e M – meio.



Formas de Corrosão Eletroquímica

- Caracterizam-se pela aparência da superfície corroída. Na prática são comuns os casos de mais de uma forma de corrosão simultaneamente na mesma peça.

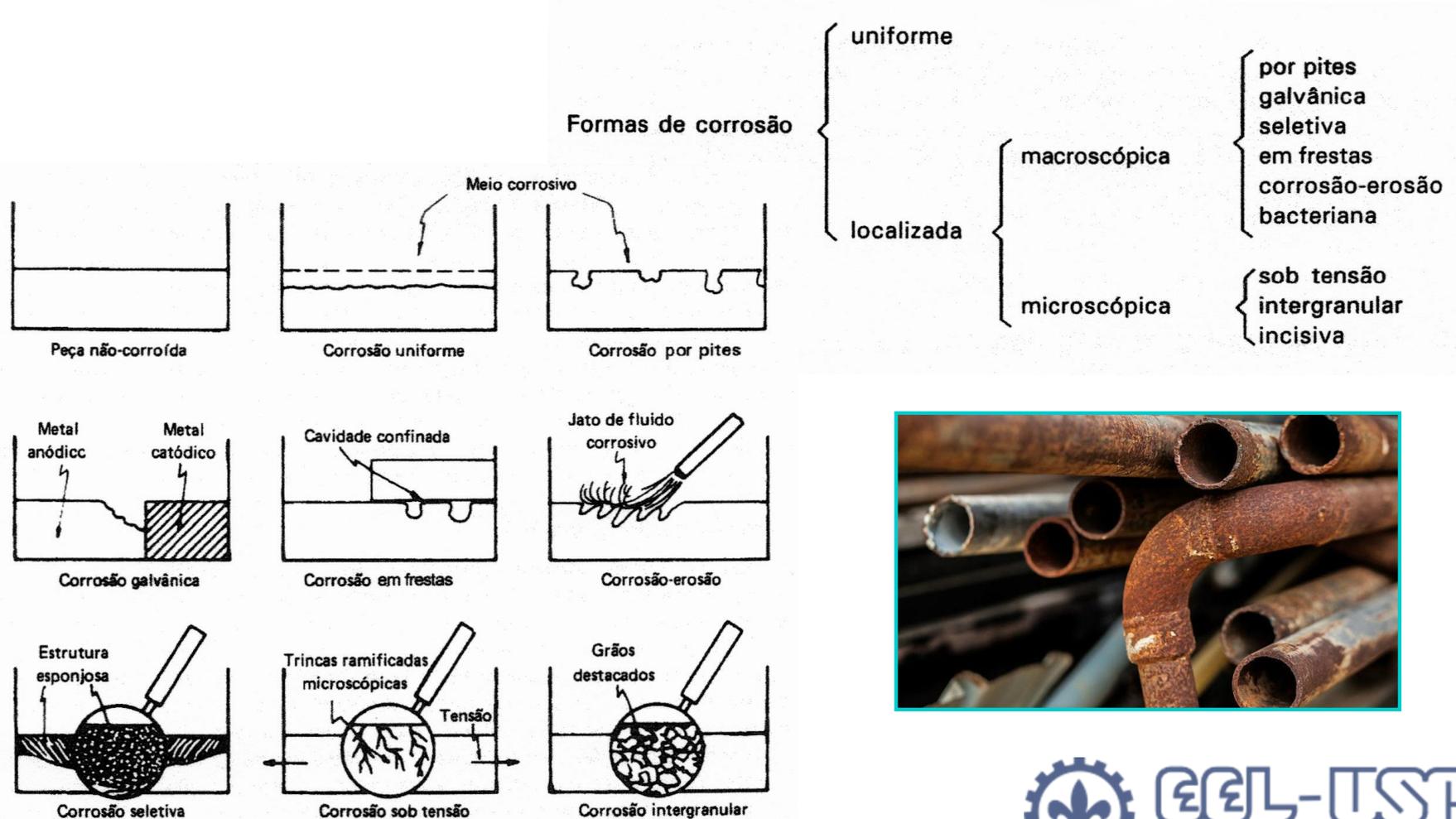
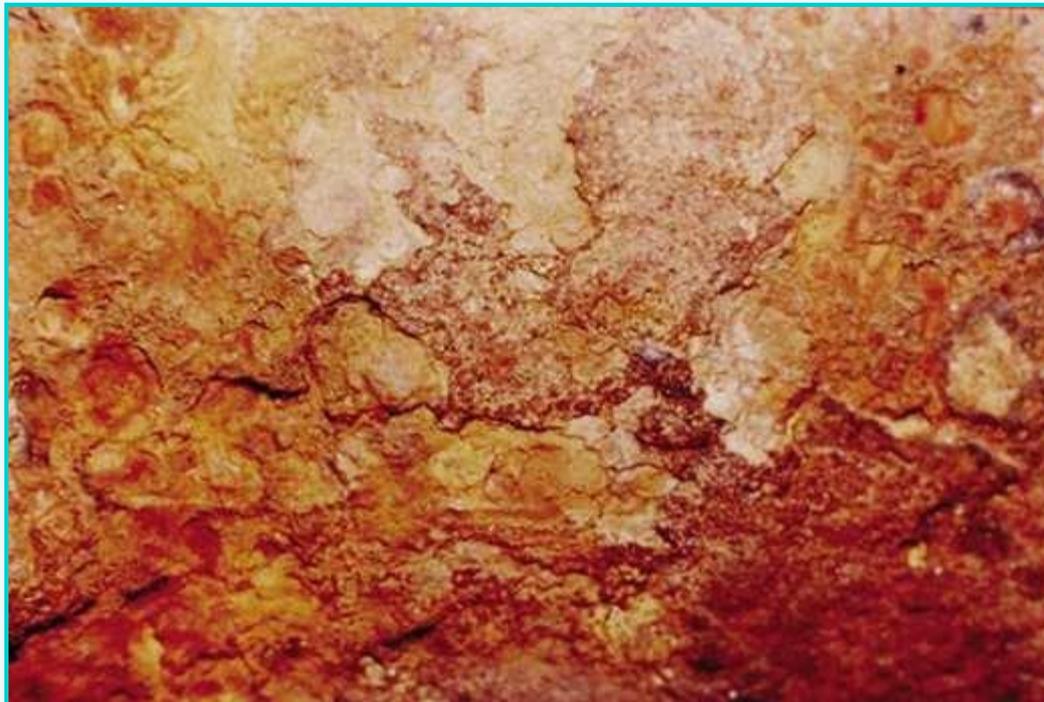


Figura 3.1 – Formas de corrosão.

Corrosão Uniforme

- É o tipo mais comum e ocorre sobre toda a superfície da peça. Irregularidades microscópicas formam milhões de anodos e catodos espalhados pela superfície do metal em contato com o meio eletrolítico (pilhas de ação local). Comum em metais que não formam camadas passivas protetoras. Exemplo: ferrugem no aço carbono.

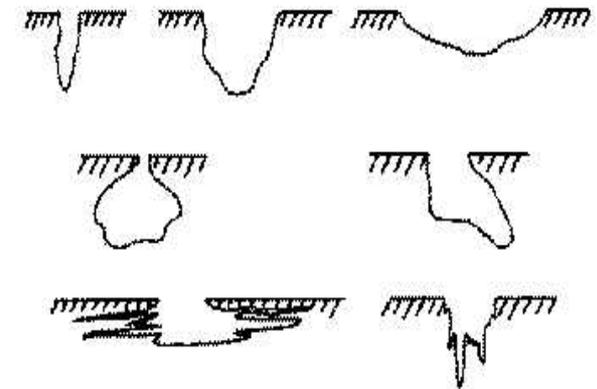
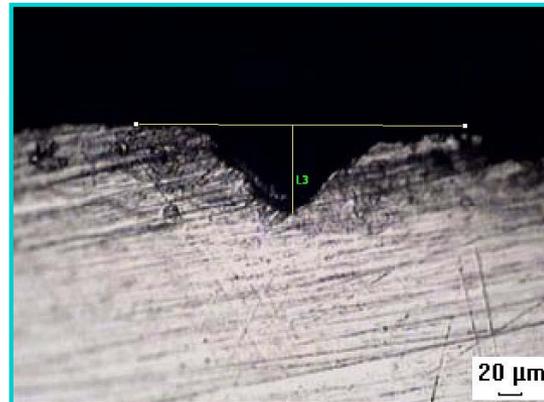
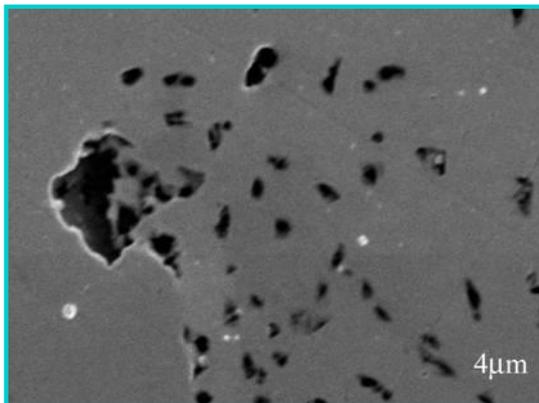


Corrosão por Pites

- Formação de cavidades de pequeno diâmetro e maior profundidade na peça metálica. Pode chegar a perfurar a chapa, com pouca ou nenhuma perda de espessura, sendo por isso muito perigosa. Quase sempre as cavidades crescem no sentido da ação da gravidade. Característica de materiais formadores de camadas passivas, que sob ação de certos agentes agressivos são destruídas localmente.



Corrosão por pites em tubo de aço inoxidável 304

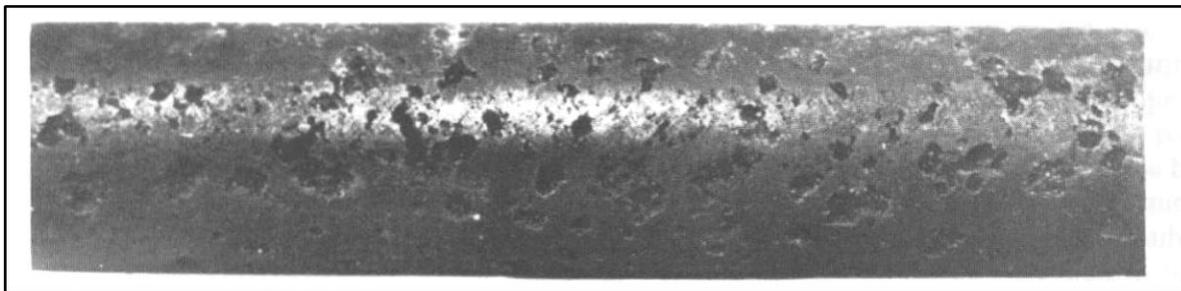


Vários tipos de “pites”, segundo a ASTM

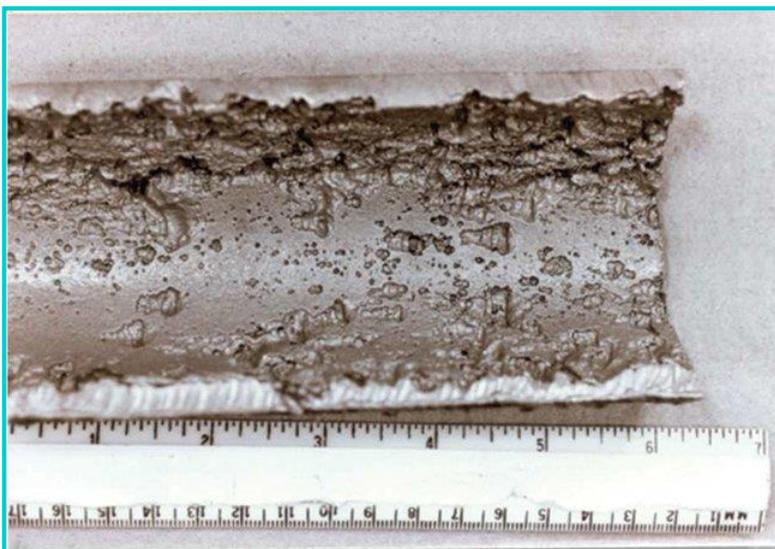


Corrosão Alveolar

- É uma variante da corrosão por pites, em que as crateras são de maior diâmetro e menor profundidade. É frequente quando há corrosão sob depósito de eletrólitos e no caso de aeração diferencial.



Corrosão alveolar em tubo de aço carbono



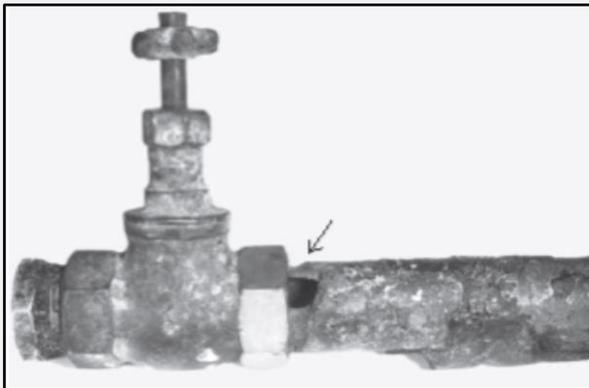
Corrosão alveolar e por pites

Corrosão alveolar



Corrosão Galvânica

- Embora de uso consagrado, essa denominação não é apropriada porque, estritamente todas as formas de corrosão eletroquímica resultam de ações galvânicas. Dois metais diferentes e contato formam uma pilha ativa-passiva, em que o metal “menos nobre”, ou seja, mais reativo (anodo) é corroído.



Corrosão galvânica em tubo de aço com válvula de latão



EEL-USP
Escola de Engenharia de Lorena

Corrosão Seletiva

- Corrosão preferencial de um elemento, quando existe grande diferença de potencial entre os elementos constituintes de uma liga. Resulta numa estrutura esponjosa, praticamente sem resistência mecânica.
- A dezincificação dos latões é detectada pelo surgimento de regiões avermelhadas (cobre), contrastando com a cor amarelada do latão, devido à corrosão preferencial do zinco. Na corrosão seletiva do ferro fundido cinzento, ocorre perda de ferro, restando uma massa porosa, de aspecto escuro (típico do grafite), vazios e ferrugem.



Corrosão seletiva do ferro fundido



Corrosão seletiva do latão



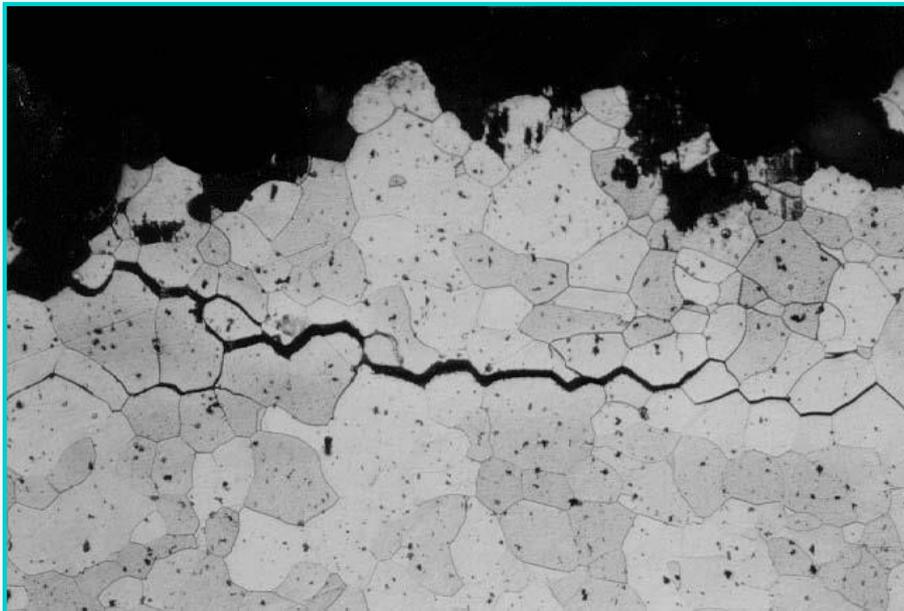
Corrosão em Frestas

- Quando pequena quantidade de líquido fica retida em um espaço confinado. No interior da fresta ocorrem reações eletroquímicas que modificam a composição do eletrólito, tornando-o mais ácido. A diminuição do pH permite por exemplo a ruptura da camada passivadora de aços inoxidáveis, resultando em intensa corrosão localizada. Este tipo de corrosão aparece em juntas rebitadas, soldadas com chapas sobrepostas, ligações rosqueadas, revestimentos com chapas aparafusadas.



Corrosão Intergranular

- Formam-se trincas microscópicas ao longo dos contornos de grão da estrutura metalúrgica. Quando as trincas atingem certa profundidade, podem se destacar pedaços do material ou mesmo ocorrer a ruptura da peça.
- Acontece principalmente em aços inoxidáveis em alguns meios corrosivos, quando a periferia dos grãos fica com menor quantidade de cromo livre do que o interior, tornando-se regiões anódicas. Pode ocorrer também em algumas ligas Al-Mg.



Trincas de corrosão intergranular em aço inoxidável



Corrosão-Erosão

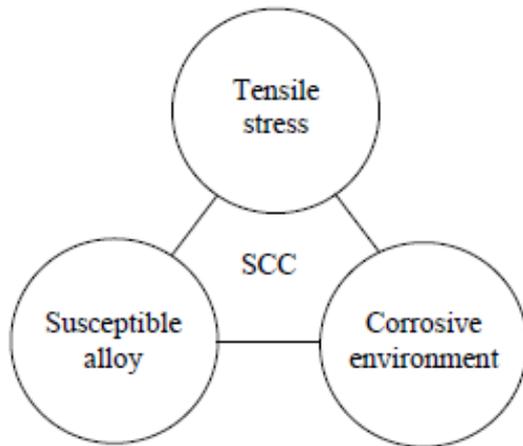
- Alguns fluidos quando em movimento com velocidade acima de um valor limite ou em movimento turbilhonar intenso provocam essa forma especial de corrosão, assim denominada devido à desagregação do filme passivador ou de outro revestimento protetor.
- A intensidade do ataque em geral é proporcional ao cubo da velocidade do fluido, sendo agravada quando existirem partículas em suspensão.



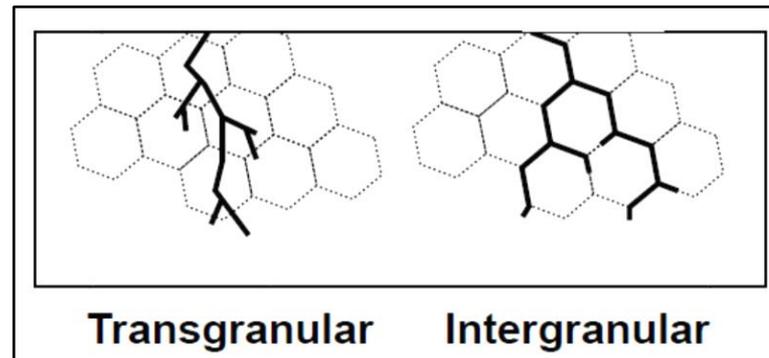
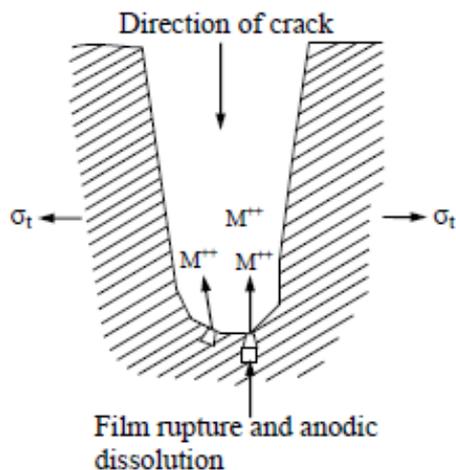
*Corrosão-erosão por CO₂
no interior de tubulação de
aço carbono*



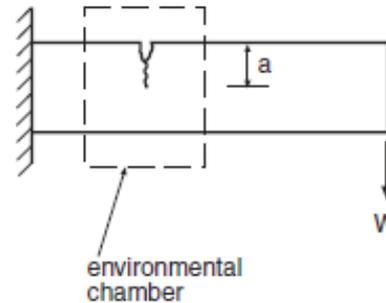
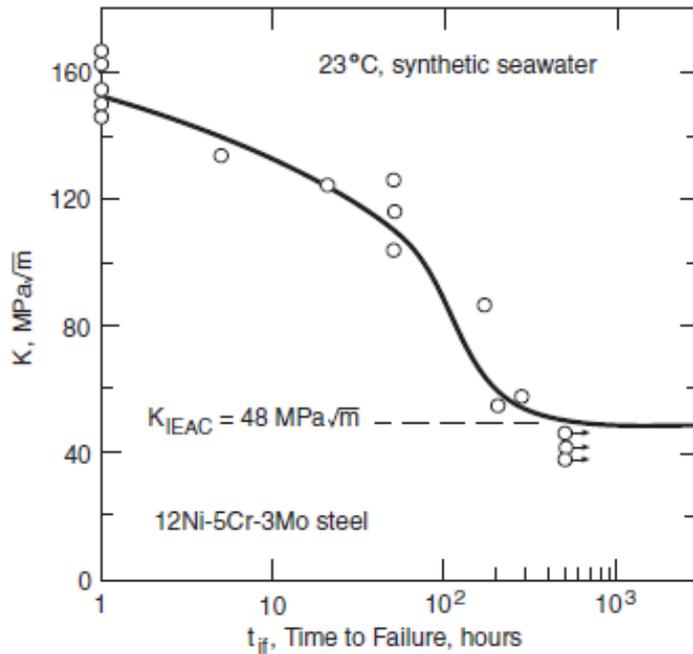
Corrosão sob tensão



- Está ligada à existência simultânea de eletrólitos e tensões mecânicas, bem como um metal suscetível.
- Pequenas trincas se formam a partir de um pite de corrosão e se propagam numa direção perpendicular à tensão de tração, podendo levar o componente à falha.
- O comportamento da falha é característico do apresentado por um material frágil (ou seja, sem deformação plástica significativa).



Corrosão sob Tensão



Corrosão sob tensão com crescimento de trinca intergranular em Inconel (500x).

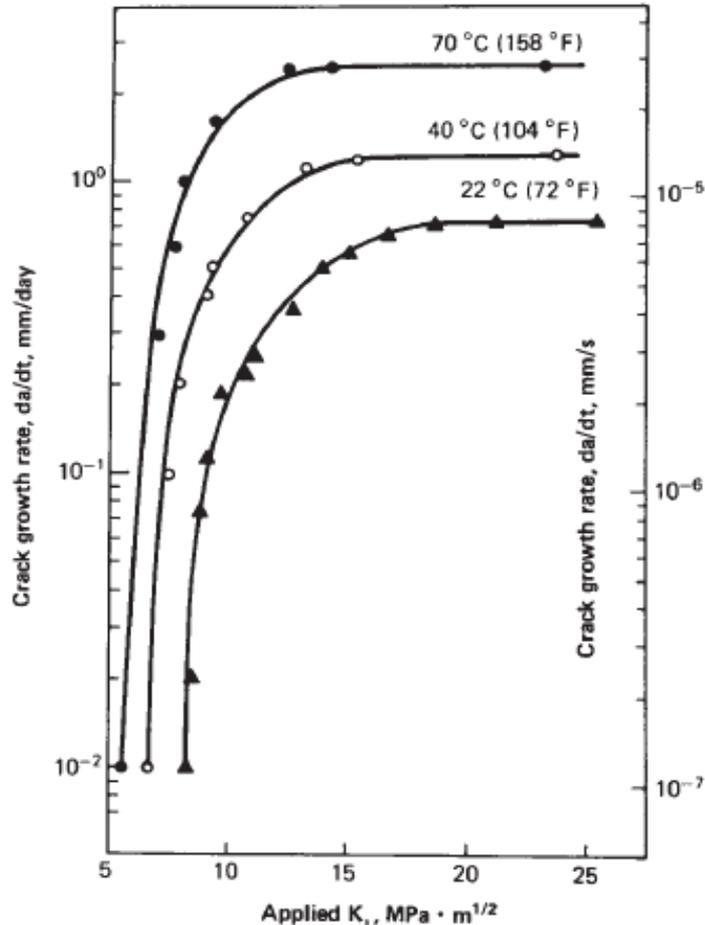
Esquema do ensaio de corrosão sob tensão para determinar K_{I-EAC} .

Corrosão sob tensão em tubo de aço inoxidável austenítico usado em equipamento de processo químico, com crescimento de trinca transgranular multi-ramificada (300x).



EEL-USP
Escola de Engenharia de Lorena

Corrosão sob Tensão



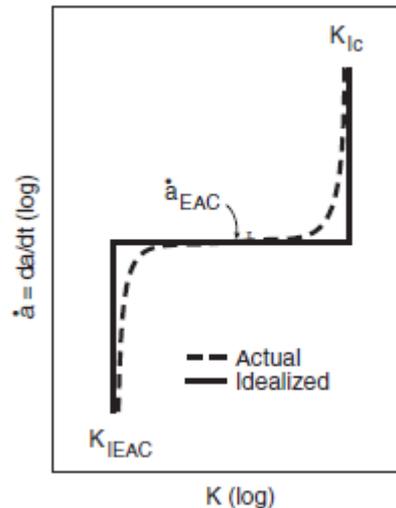
Há 3 regimes básicos de crescimento da trinca:

Regime I – com K relativamente baixo, a taxa de propagação varia fortemente com K .

Regime II – Pode ocorrer um platô, com taxa de aproximadamente constante.

Regime III – Ao se aproximar de K_{Ic} um mecanismo de fratura frágil irá dominar.

O platô no regime II deve-se ao balanço entre o avanço da trinca e o *arrest* devido ao arredondamento da ponta da trinca por plasticidade ou ataque químico.



$$t_{if} = \frac{a_f - a_i}{\dot{a}_{EAC}} \quad (K > K_{IEAC})$$



Corrosão sob Tensão

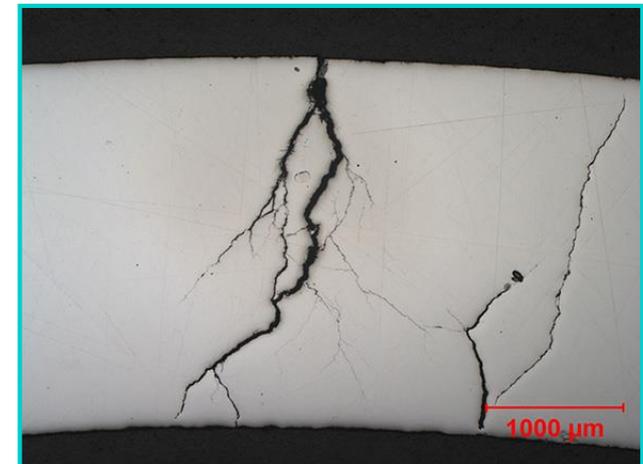
Table 12.1 EAC threshold and crack tip velocity data for various alloys in various environments

Material	Environment	K_{IEAC} , MPa \sqrt{m}	\dot{a} , m/s	K_{Ic} , MPa \sqrt{m}
2024-T351 Al, T-L	3.5% NaCl, wet 3 times a day	8	7.4×10^{-9}	22
7075-T651 Al, T-L	saturated NaCl, 23°C	7	1.5×10^{-8}	16.5
7075-T651 Al, T-L	liquid mercury, 23°C	1	1.8×10^{-1}	16.5
7079-T651 Al, T-L	saturated NaCl, 23°C	5	1.5×10^{-5}	16.5
AISI 304L stainless steel, annealed	22% NaCl, 105°C	19.5	3.6×10^{-9}	>200
Ti-8Al-1Mo-1V, annealed	liquid mercury, 24°C	11	5.0×10^{-2}	82
Ti-8Al-1Mo-1V, annealed	10M HCl, 24°C	19	4.6×10^{-4}	82

Algumas combinações conhecidas de material metálico – meio corrosivo capazes de provocar trincas por corrosão sob tensão

TABELA 3.1

Materiais	Meios corrosivos	Condições
Aço-carbono e aços-liga ferríticos	Soda cáustica.	Concentrações e temperaturas dentro da região I da figura 4.4.
	Nitratos.	
	Amônia anidra.	Tensões elevadas, temperaturas superiores a -5 °C.
	H ₂ S.	Meio úmido – Dureza do aço elevada.
Aços inoxidáveis austeníticos	HCl, cloretos, hipocloritos, clorofórmio, água salgada (íon cloro em geral).	Meio úmido, temperaturas acima de 50 °C.
	Ácidos politiônicos.	Meio úmido – Aços sensibilizados.
	Soda cáustica.	Temperaturas acima de 120 °C.
Cobre, latões, bronze	Aminas, amônia, soluções amoniacaais.	Meio úmido com oxigênio.
	Mercúrio e seus sais.	
Alumínio	HCl, cloretos, hipocloritos (íon cloro em geral).	Meio úmido.
	Mercúrio e seus sais.	



Corrosão sob Tensão

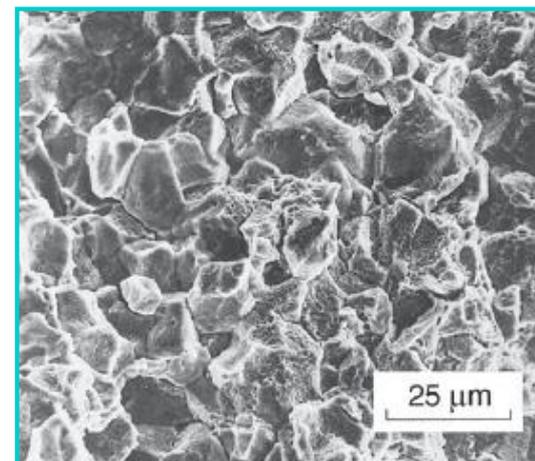
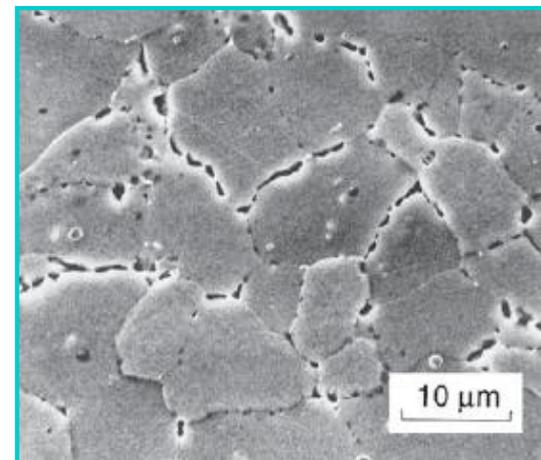
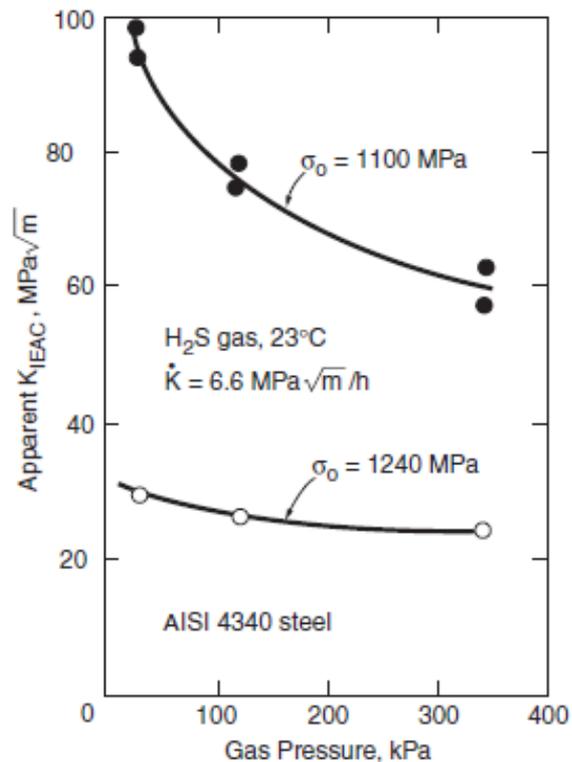
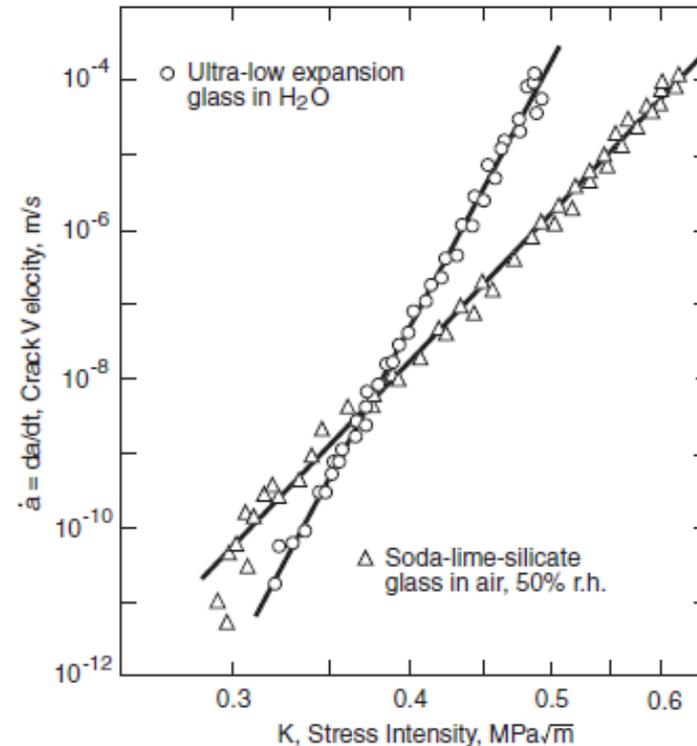


Figure 11.41 Effect of H_2S gas pressure on K_{IEAC} for two yield strength levels of AISI 4340 steel, tested as compact specimens with $b = 64.8 \text{ mm}$ and $h/b = 0.486$. (Adapted from [Clark 76]; copyright © ASTM; reprinted with permission.)



Corrosão sob Tensão



Em algumas situações, a taxa de crescimento da trinca varia linearmente com o Fator Intensidade de Tensão quando os dados são apresentados em um gráfico log-log.

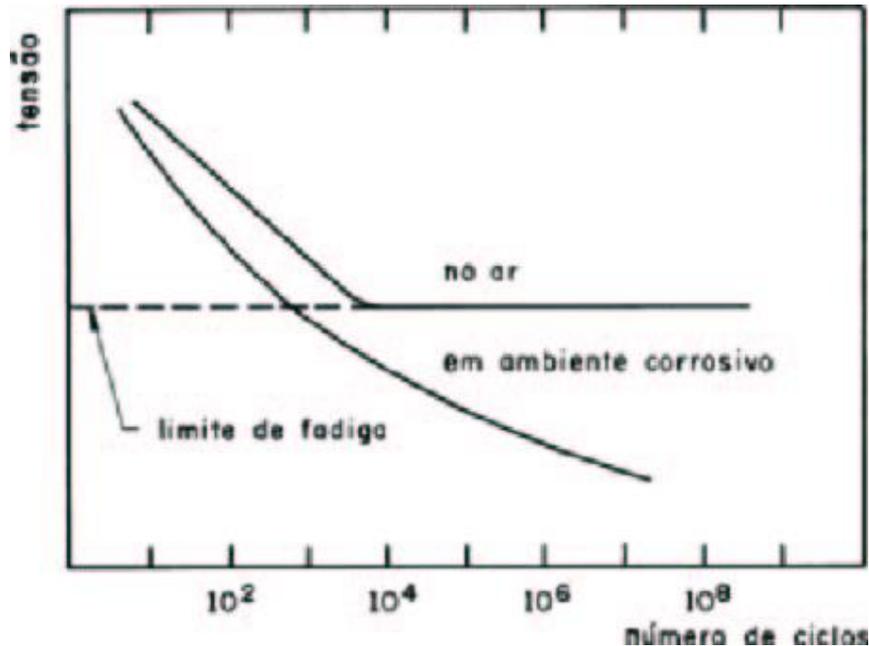
O fenômeno é descrito por uma lei de potência, da mesma forma que a propagação de trincas por fadiga.

$$\dot{a} = \frac{da}{dt} = AK^n$$

$$t_{if} = \frac{a_f^{1-n/2} - a_i^{1-n/2}}{A (FS\sqrt{\pi})^n (1 - n/2)} \quad (n \neq 2)$$

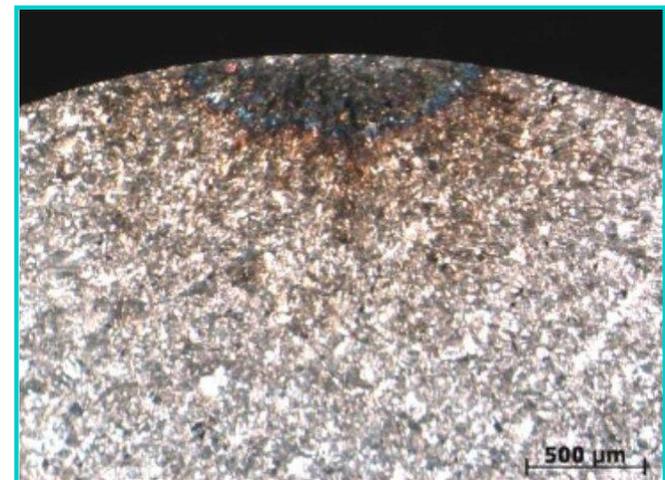


Fadiga-Corrosão



Curvas de fadiga e corrosão-fadiga para um material ferroso.

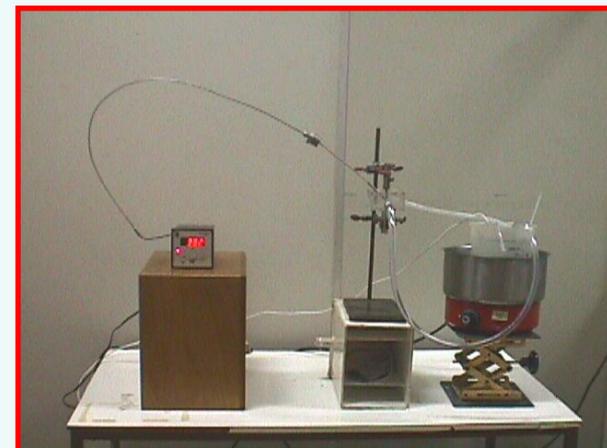
- Fadiga é a tendência de um metal falhar quando sujeito a cargas alternadas ou cíclicas.
- Quando um componente é sujeito a esforços cíclicos num meio que pode atacá-lo química ou eletroquimicamente, verificam-se condições para que ocorra corrosão sob fadiga.



Ensaios de Fadiga em ambiente agressivo (EEL)



Teste de estanqueidade



Propagação da Trinca por Fadiga-Corrosão (UFSCar)



● CP1-AR (20 Hz) ● CP2-AR (20 Hz) ▲ CP1-ETANOL (0,5 Hz) ▲ CP2-ETANOL (0,25 Hz)

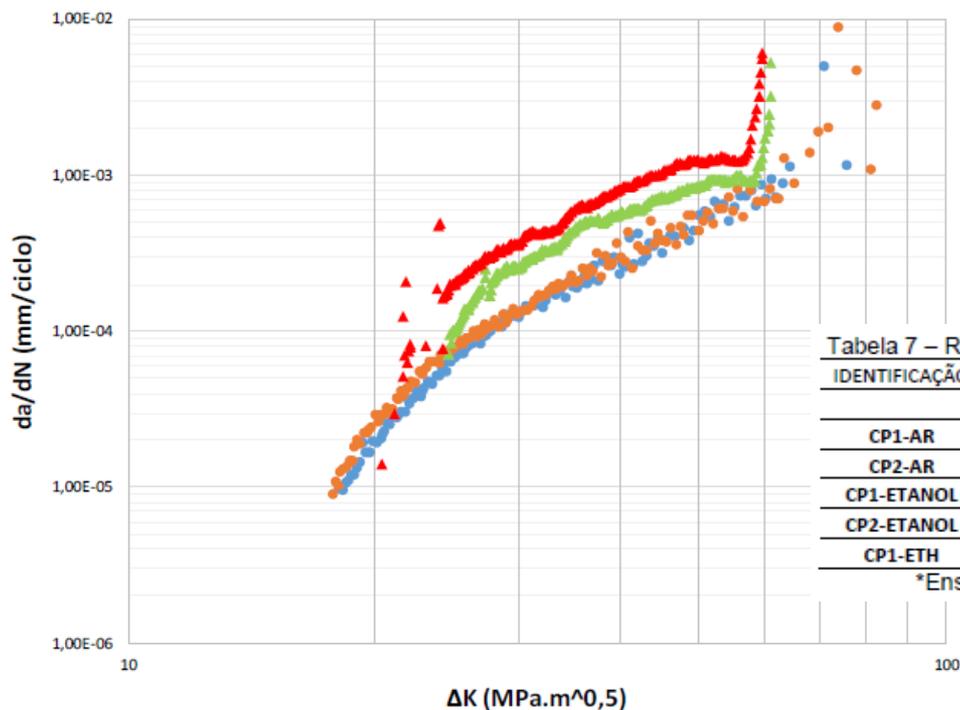


Tabela 7 – Relação de Ensaios

IDENTIFICAÇÃO	FREQÜÊNCIA (Hz)	DURAÇÃO (DIAS)	Δk
CP1-AR	20	3	CRESCENTE
CP2-AR	20	3	CRESCENTE
CP1-ETANOL	0,5	4	CRESCENTE
CP2-ETANOL	0,25	5	CRESCENTE
CP1-ETH	0,25	15*	DECRESCENTE

*Ensaio interrompido com 15 dias



Exemplo: Acidente com o Voo 243 Aloha Airlines

Official Accident Report Index Page

Report Number	NTSB/AAR-89/03
Access Number	PB89-91C404
Report Title	Aircraft Accident Report--Aloha Airlines, Flight 243, Boeing 737-200, N73711, near Maui, Hawaii, April 28, 1988
Report Date	June 14, 1989
Organization Name	National Transportation Safety Board Bureau of Accident Investigation Washington, D.C. 20594

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). Assim que o avião, com 19 anos de uso, nivelou a 7 000 metros (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. O motor esquerdo deixou de funcionar devido ao rompimento dos cabos de comando.



Exemplo: Acidente com o Voo 243 Aloha Airlines



At the time of the accident, the N73711 had accumulated 35,496 flight hours and 89,680 flight cycles (landings), the second highest number of cycles in the worldwide B-737 fleet. Due to the short distance between destinations on some Aloha Airlines routes, the maximum pressure differential of 7.5 psi was not reached on every flight. Therefore, the number of equivalent full pressurization cycles on the accident airplane is significantly less than the 89,680 cycles accumulated on the airplane.

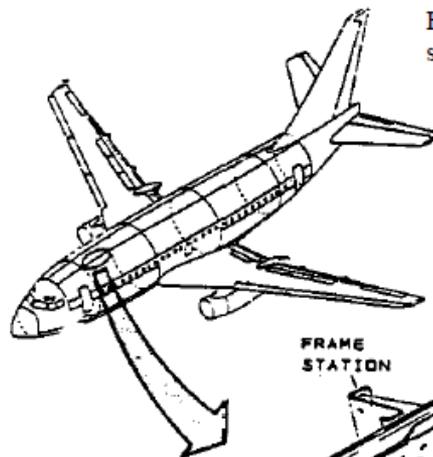
After the accident, the Safety Board conducted visual inspections of the exterior of the airplanes in the Aloha Airlines B-737 fleet. Considerable evidence of corrosion on the fuselage of the airplanes in the fleet was seen. Swelling and bulging of the skin (pillowing), dished fastener heads, pulled and popped rivets, and blistering, scaling, and flaking paint were present at many sites along the lap joints of almost every airplane.

- the B-737s in the Aloha Airlines' fleet were high-cycle airplanes accumulating cycles at a faster rate than any other operator;
- Aloha Airlines operated in a harsh corrosion environment;
- Aloha Airlines previously had discovered a 7.5-inch crack along lap joint S-10L on another B-737 airplane;

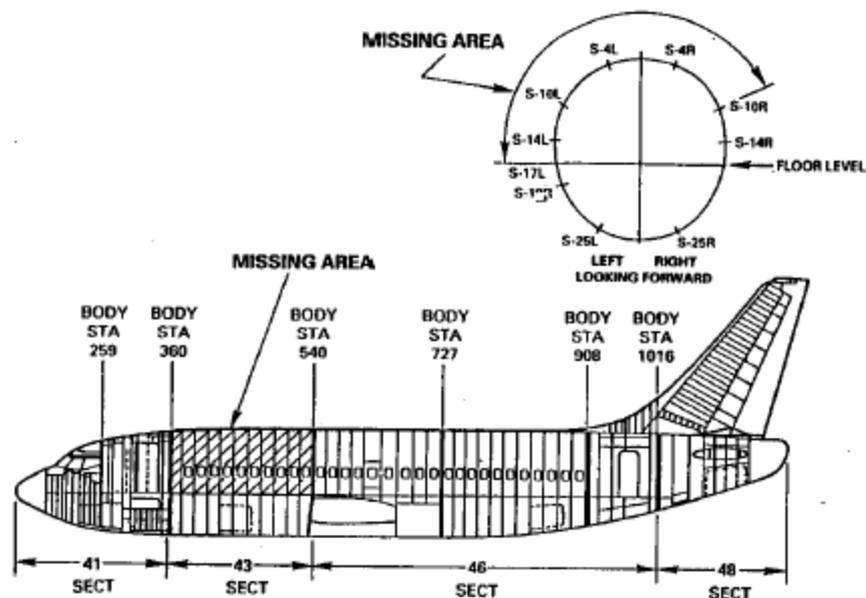
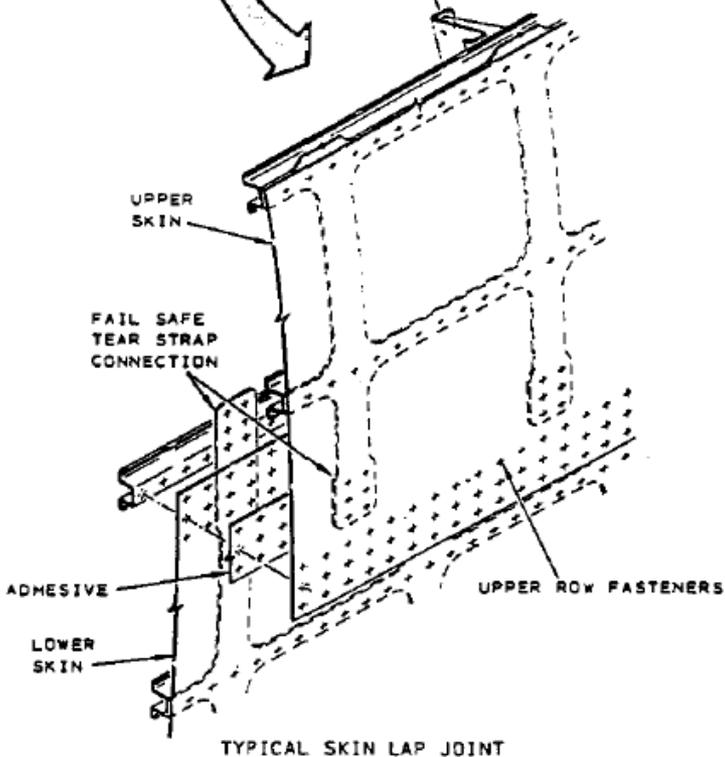


Exemplo: Acidente com o Voo 243 Aloha Airlines

The fracture surfaces and the immediate areas surrounding the separation perimeter generally were corrosion free. However, areas of corrosion and disbanded surfaces were noted in the butt joints at BS 360 and 540. Additionally, some areas of bulged skin were noted on the intact skin lap joints and circumferential butt joints that remained with the



The lap joint sample, S-4R between BS 360 and BS 420 (found wedged in the right wing area), contained two external doubler patches. The patches were removed to examine the holes for evidence of cracks. There was extensive fatigue cracking in the upper row rivet holes both under and between the patches. The examination found one of the longest cracks on the airplane, 0.27 inch, in this piece. This stringer section (S-4R) contained three areas where the tear straps are riveted above the primary lap joint. There was extensive fatigue cracking present in all three locations. Also, the entire cold-bonded lap joint had become disbanded. There was light to moderate corrosion with severe corrosion (unrepairable depletion of metal) in some areas. Nearly all of the hot-bonded tear straps were disbanded in the vicinity of the lap joint.



Exemplo: Acidente com o Voo 243 Aloha Airlines

11. Disbonding of B-737 lap joints, with resulting corrosion and probable fatigue cracking, was explicitly defined in Boeing Service Bulletin 737-53-1039, Revision 2 dated February 8, 1974; however the serious implications of multiple site damage were not realized, a permanent solution was not determined, and corrective action was relegated to repetitive visual inspections and damage repair.

15. A properly conducted eddy current inspection, performed in accordance with AD-87-21-08 in November 1987, would have detected additional fatigue cracks in the holes of the upper rivet row of the lap joint along S-4R.

17. There are human factors issues associated with visual and nondestructive inspection which can degrade inspector performance to the extent that theoretically detectable damage is overlooked.



Exemplo: Acidente com o Voo 243 Aloha Airlines

18. Aloha Airlines management failed to recognize the human performance factors of inspection and to fully motivate and focus their inspector force toward the critical nature of lap joint inspection, corrosion control and crack detection. However, reports of fleet-wide cracks received by the FAA after the Aloha Airlines accident indicate that a similar lack of critical attention to lap joint inspection and fatigue crack detection was an industry-wide deficiency.

3.2 Probable Cause

The National Transportation Safety Board determines that the probable cause of this accident was the failure of the Aloha Airlines maintenance program to detect the presence of significant disbonding and fatigue damage which ultimately led to failure of the lap joint at S-10L and the separation of the fuselage upper lobe. Contributing to the accident were the failure of Aloha Airlines management to supervise properly its maintenance force; the failure of the FAA to evaluate properly the Aloha Airlines maintenance program and to assess the airline's inspection and quality control deficiencies; the failure of the FAA to require Airworthiness Directive 87-21-08 inspection of all the lap joints proposed by Boeing Alert Service Bulletin SB 737-53A1039; and, the lack of a complete terminating action (neither generated by Boeing nor required by the FAA) after the discovery of early production difficulties in the B-737 cold bond lap joint which resulted in low bond durability, corrosion, and premature fatigue cracking.



Causa: trincas iniciadas por corrosão-fadiga cresceram por fadiga até atingirem tamanho crítico, resultando em falha catastrófica.



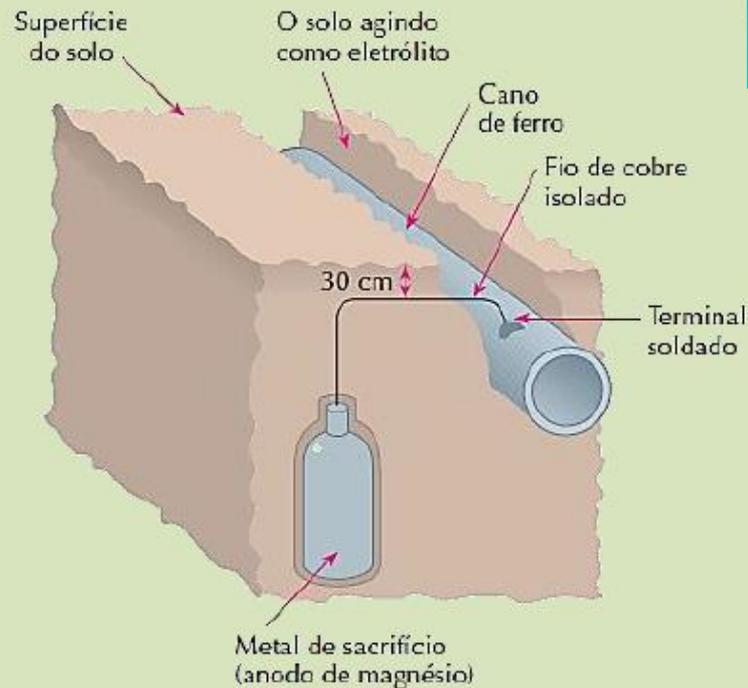
EEL-USP
Escola de Engenharia de Lorena

Controle da Corrosão

O processo de corrosão pode ser retardado por alguns métodos:

- ✓ *Modificação do processo: eletrodo de sacrifício e correntes catódicas*
- ✓ *Modificação do meio corrosivo: inibidores de corrosão*
- ✓ *Modificação do metal: ligas metálicas e tratamento térmico*
- ✓ *Revestimentos protetores: pinturas e recobrimentos metálicos*

Eletrodo de sacrifício (proteção catódica)



Controle da Corrosão

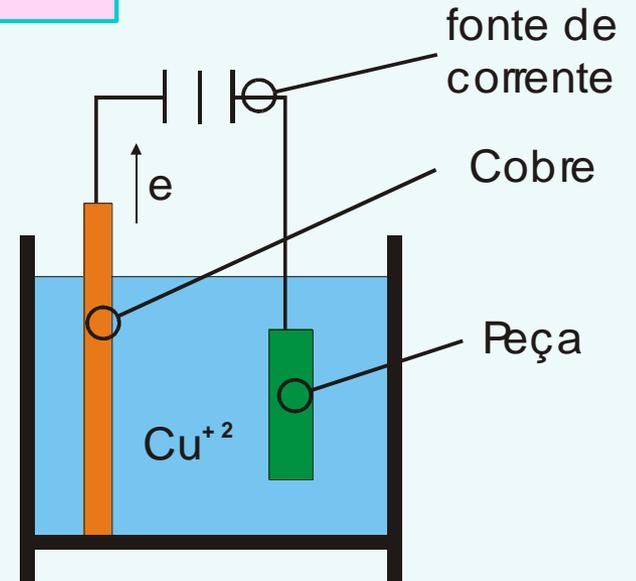
- Revestimentos protetores
 - Revestimentos metálicos
 - Revestimentos orgânicos (tintas e resinas)
 - Revestimentos inorgânicos (esmalte e cimentos)



Controle da Corrosão

Métodos de Aplicação de Revestimentos Metálicos

- Eletrodeposição
- Imersão à quente
- Aspersão térmica
- Cladd



Controle da Corrosão

Cladding

Exemplo: Soldagem por Explosão

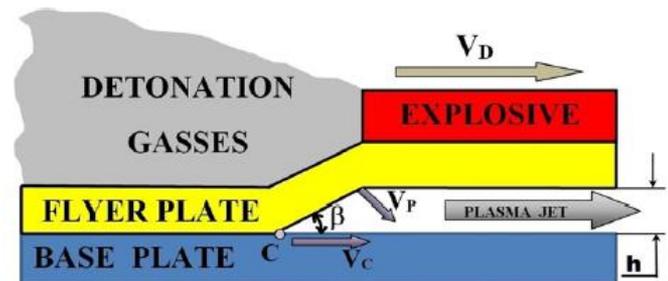
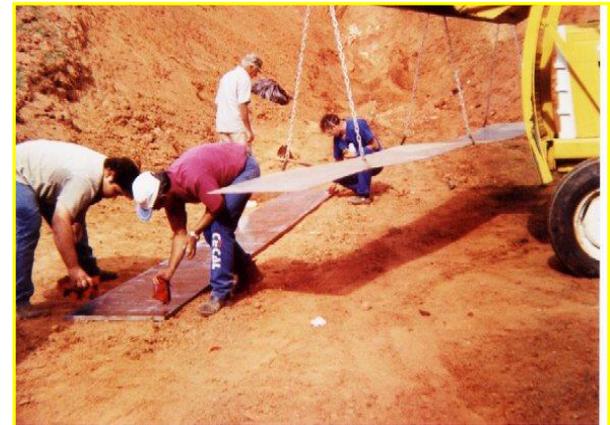
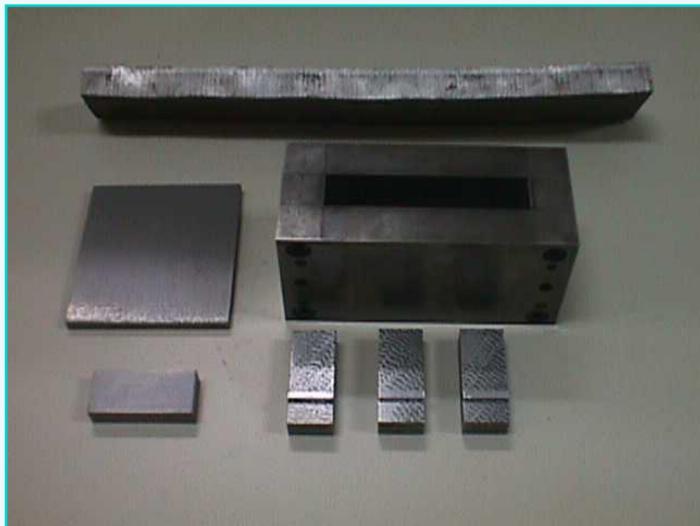


Fig. 1. Explosive welding process and its parameters.



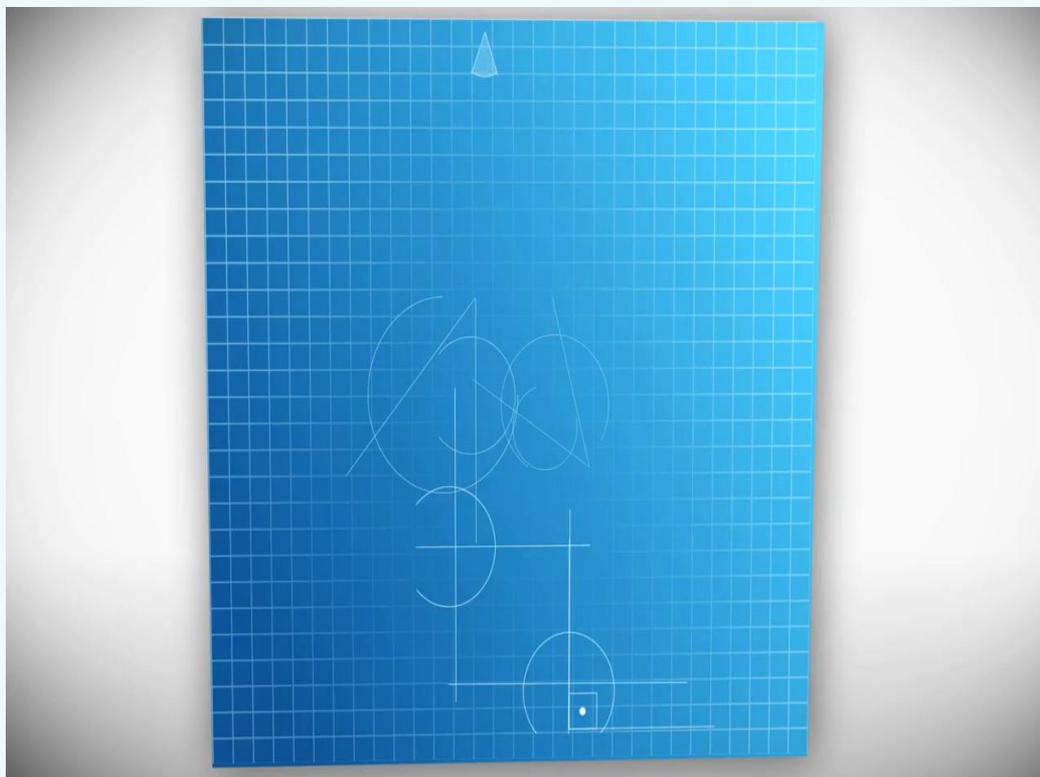
Ensaio de Cisalhamento em Cladds

Aço estrutural + alumínio



Controle da Corrosão

Vídeo: Proteção contra Corrosão



FIM do Capítulo 5



EEL-USP
Escola de Engenharia de Lorena