

Materiais de Construção Aeroespacial

Ruina dos Materiais

Mecanismos, prevenção e casos de estudo

Gilberto Novais
Nº27643

A importância do estudo da ruína de materiais, deve-se principalmente a três factores:

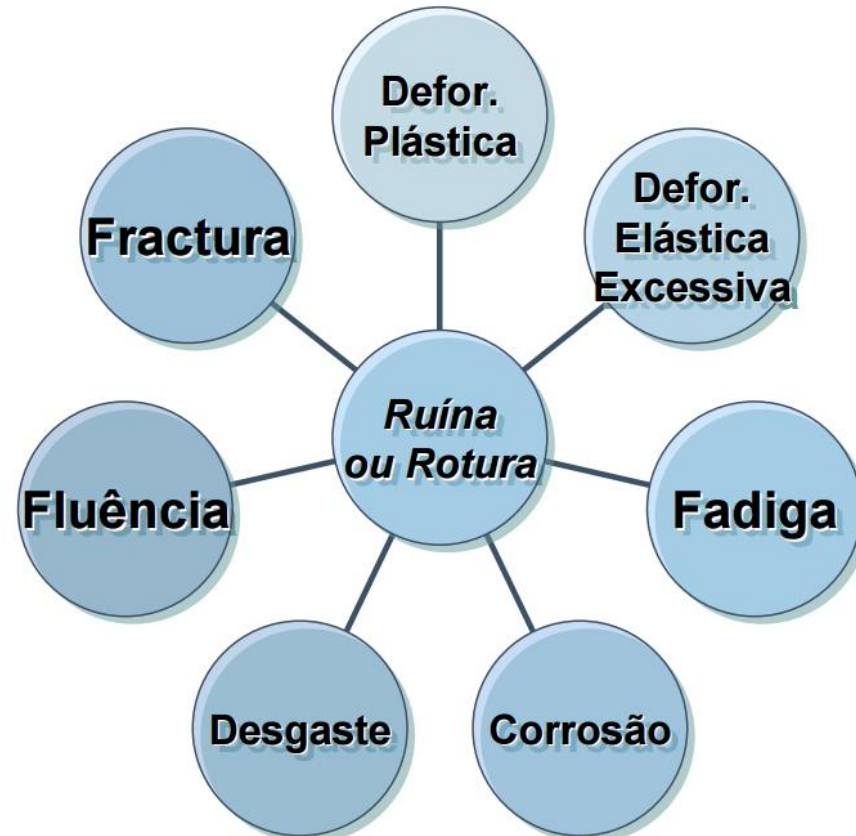
- ▶ Segurança;
- ▶ Razões económicas;
- ▶ Questões ambientais.



Principais causas da ruína dos materiais

- ▶ Material deficiente;
- ▶ Deficiência do projeto;
- ▶ Mau procedimento da manutenção e/ou reparação;
- ▶ Sobrecargas introduzidas em serviço;
- ▶ Fatores ambientais.

Principais causas da ruína dos materiais



Deformação plástica

A ruína do material por deformação plástica acontece quando é excedido o local ou mais generalizando o limite elástico.

Pode-se dizer que ocorreu uma alteração de forma, o que impede o funcionamento adequado do sistema.

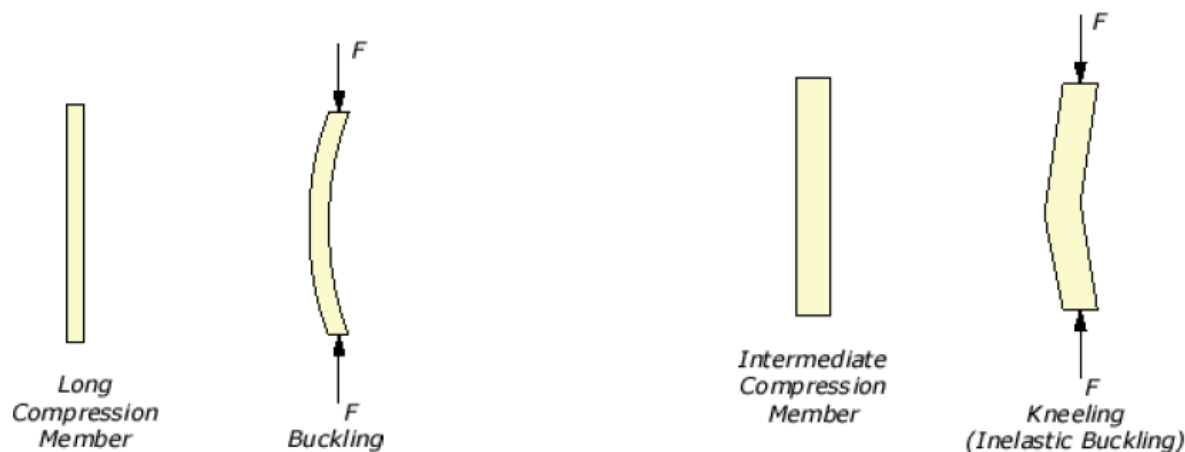
Deformação elástica excessiva

Modo de ruína que não leva à destruição do equipamento mecânico, mas ao incumprimento dos requisitos funcionais. Geralmente acontece em veios de transmissão de potencia e normalmente ocorre devido ao incumprimento dos valores limites impostos pelo projeto e ao uso com frequência do material.

A tensão de carregamento para a ocorrência da deformação para este caso, é quase sempre inferior à tensão de cedência do material.

Existem dois tipos de instabilidade estrutural:

- ▶ Primária;
- ▶ Secundária.



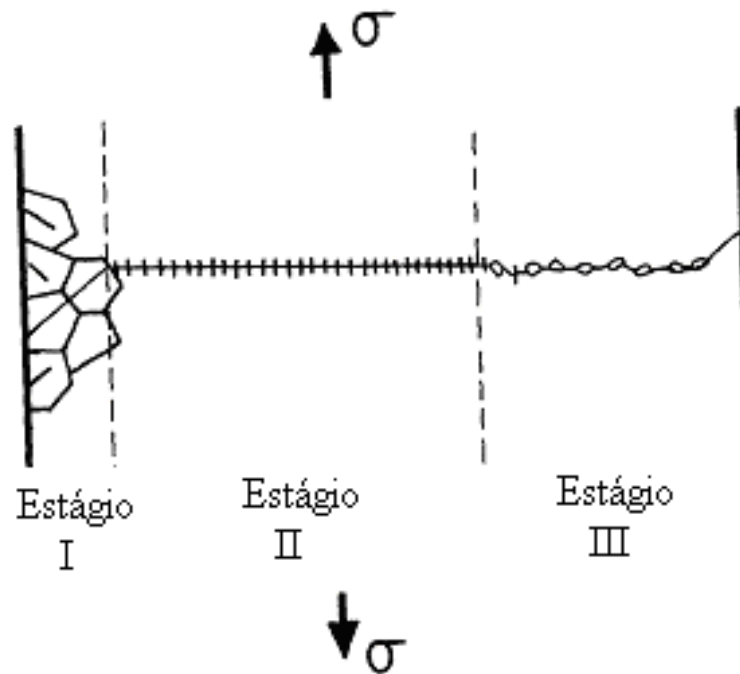
Fadiga

Em qualquer projeto de engenharia muito raramente observa-se um determinado componente submetido apenas a cargas estáticas mas sim cargas repetidas ou flutuantes, ou seja, cargas variáveis ao longo do tempo. Estas cargas variáveis resultam muitas vezes em falhas daí dizermos que ocorreu uma falha por fadiga. A fadiga pode ocorrer sob solicitações muito inferiores ao limite de resistência do material (região elástica) e é consequência de esforços alternados, que produzem fendas devido à concentração de tensões.

Processo de fadiga

O processo de fadiga está dividido em duas fases:

- ▶ o período de iniciação;
- ▶ período de propagação.



Tipos de fratura

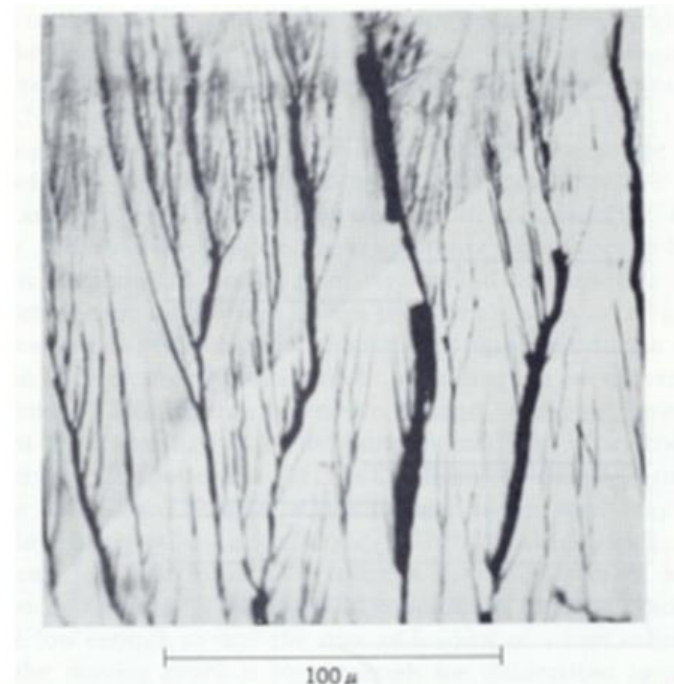
- ▶ Fratura dúctil - ocorre numa determinada zona do componente quando se atinge um nível de tensões superior ao limite elástico do material, então observa-se uma mudança irreversível da sua geometria. É um processo lento.
- ▶ Fratura fácil - é um processo mais rápido que a fratura dúctil. Ocorrem para tensões nominais inferiores à tensão de cedência do material. Esta acontece devido a baixas temperaturas que o material se encontra, elevadas velocidades de deformação ou de carregamento e em estados triaxiais de tensão.

A fratura pode propagar-se de diferentes formas onde as principais são:

- ▶ Clivagem;
- ▶ Coalescência de cavidades;
- ▶ Estriação.

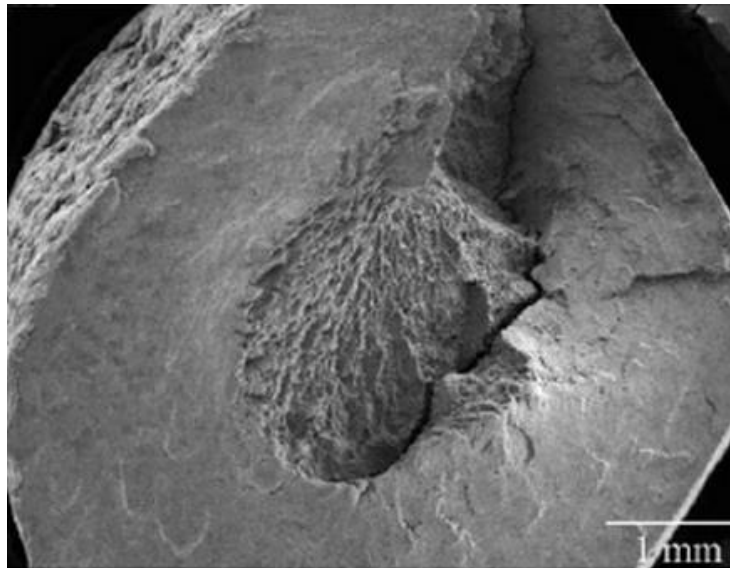
Clivagem

- ▶ A fenda propaga-se no interior dos grãos em várias direções, onde se pode observar um padrão característico na superfície de fratura, na qual pode observar-se superfícies planas que se sucedem aos socalcos com um aspeto brilhante. Normalmente está associado a aplicação de carregamentos de baixo valor de intensidade de tensões em materiais de frágeis e em ambientes de baixas temperaturas. Geralmente ocorre em materiais frágeis.



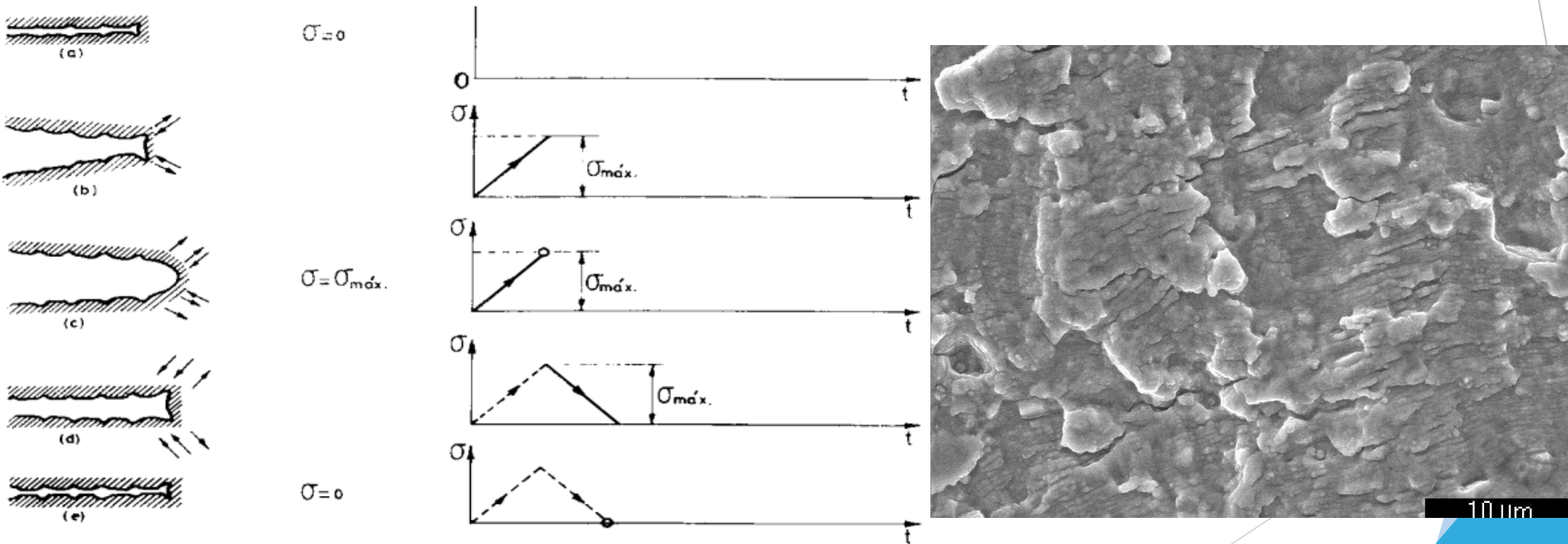
Coalescência de cavidades

- ▶ Está associado a maiores valores de energia de fratura e deformações plásticas mais intensas. A fratura propaga-se ao longo de zonas críticas que normalmente estão associadas a inclusões, associada ao processo de fabrico de grande parte das ligas metálicas, e a microcavidades provocadas pela concentração localizada de átomos de hidrogénio na rede cristalina do material. Está ocorre apenas através de esforços de corte, onde se formam microcavidades que se juntam e aumentam o comprimento da fissura. Geralmente ocorre em materiais dúcteis.



Estriação

- Acontece quando existe a propagação de uma fenda por fadiga com uma sucessão de etapas entre cada fase deste processo. É possível estabelecer uma interligação entre este processo e a formação de marcas visíveis na superfície de fratura e distanciadas a espaços regulares. Geralmente ocorre em materiais frágeis e dúcteis.



Fluência

A fluência é uma das principais contribuições para a fadiga dos materiais que ocorre geralmente na aplicação de uma carga constante que progride lentamente com o tempo até haver a ruptura do material, onde a velocidade com que ocorre a fluência é muito influenciada pela temperatura. A fluência tem grande importância nos mecanismos de fissuração de um componente quando a sua temperatura de serviço se situa entre 30% a 60% do valor relativo à temperatura de fusão do material.

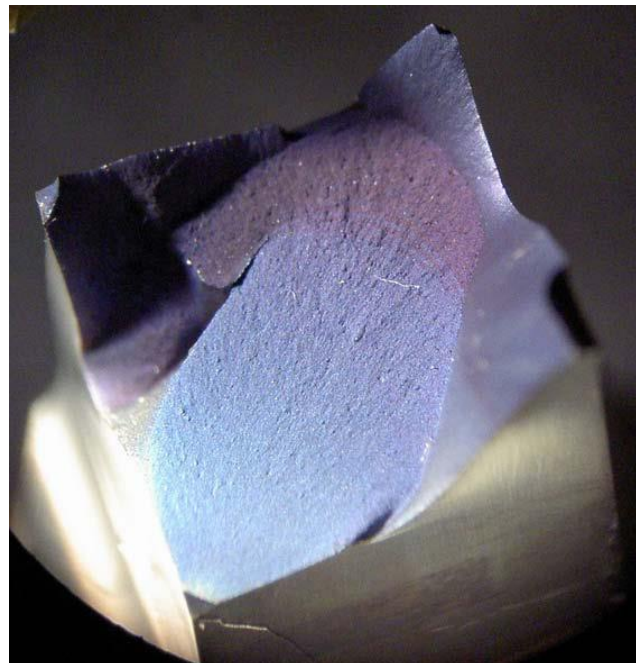
Maior ponto de fusão



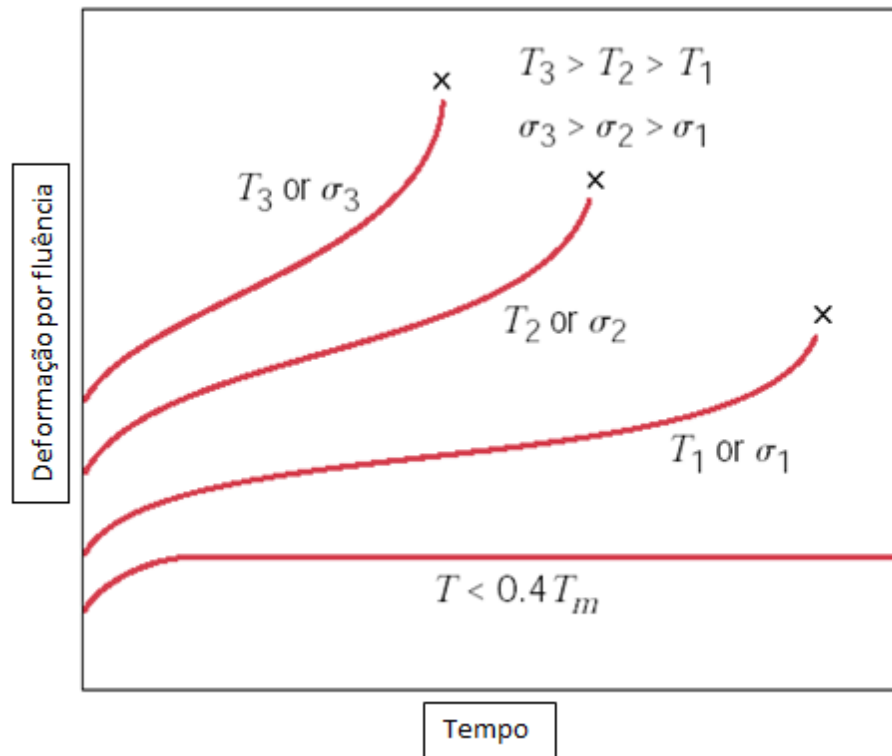
Maior módulo de elasticidade



Maior resistência à fluência



Fluência



Metais	Temperatura [°C]
Liga de alumínio	205
Liga de titânio	315
Aço e aço baixa liga	370
Aços austeníticos para elevadas temperaturas	540
Ligas de níquel e cobalto para elevadas temperaturas	640
Ligas refratárias	980-1540

Classificação das fraturas

As fraturas podem acontecer devido a vários fatores como a temperatura, atrito, propriedades do material mas principalmente devido a um elevado numero de ciclos que o material esta sujeito e diferentes fases. Então podemos classificar a fadiga do material em:

- ▶ **LCF (Low Cycle Fatigue)** - ocorre para níveis de tensão elevados que induzem deformações plásticas significativas nos componentes, que levarão á sua rutura apos um numero de utilizações reduzido, tipicamente entre 100 000 e 1 000 000 ciclos.
- ▶ **HCF (High Cycle Fatigue)** - ocorre para níveis de tensões inferiores, e consequentemente á deformação do material no domínio elástico. A sua rutura gerealmente ocorre para um numero de ciclos tipicamente acima dos 1 000 000.

Inspeção do material

Para precaver a rotura do material através da propagação de fendas devido a carregamentos cíclicos durante o seu tempo de serviço, desenvolveu-se um sistema de previsão de vida á fadiga, onde se garante a integridade estrutural do componente ao seu serviço. Destacam-se as seguintes normas:

- ▶ **LTFC (Life To First Crack)** - o material não tem qualquer dano no inicio da utilização e é retirado quando se encontra uma fenda de tamanho máximo de 0,38mm.
- ▶ **RFC (Retirement For Cause)** - nesta situação o material é continuamente inspecionado através de técnicas de inspeção não destrutivas, permitindo um prolongamento significativo do tempo de utilização do material.

Ensaio á fadiga

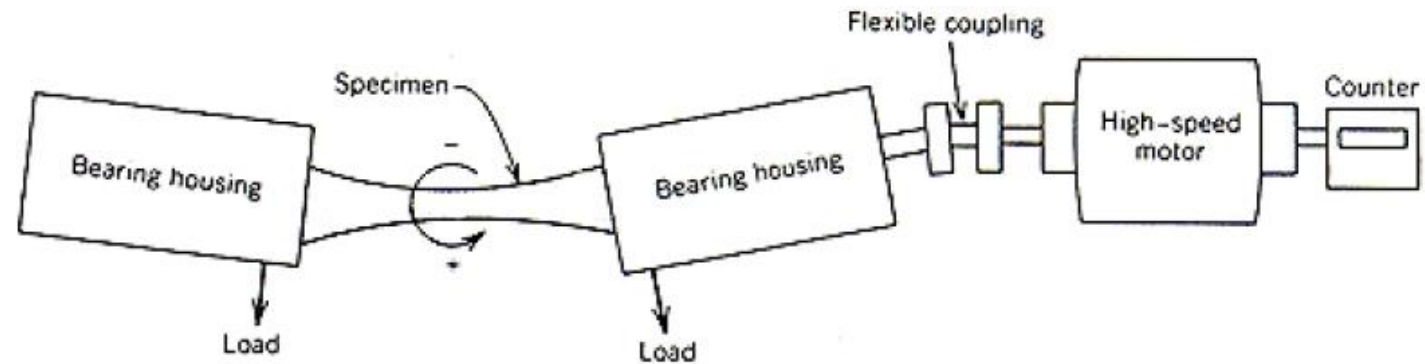
O comportamento á fadiga pode ser ensaiado de duas formas maneiras diferentes. Através de provetes ou nas próprias peças. Os ensaios em provetes são de mais fácil execução pois as suas dimensões reduzidas permitem o ensaio em laboratório enquanto que os ensaios nas peças são mais dispendiosos. Contudo, a industria automóvel e aeronáutica utilizam este processo na fase de projeto ou em protótipos.



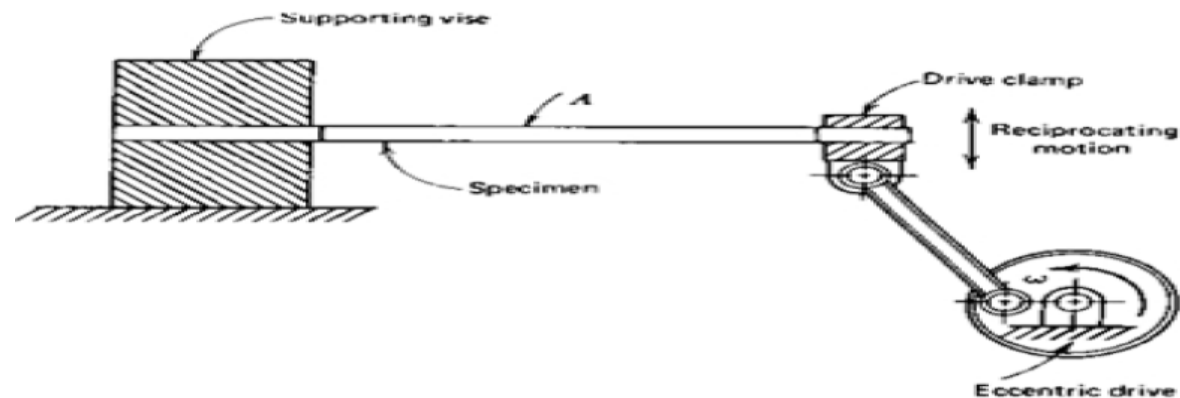
Ensaaios á fadiga

Nos ensaios com provetes pode-se ter vários tipos de ensaio tais como:

- Flexão rotativa;

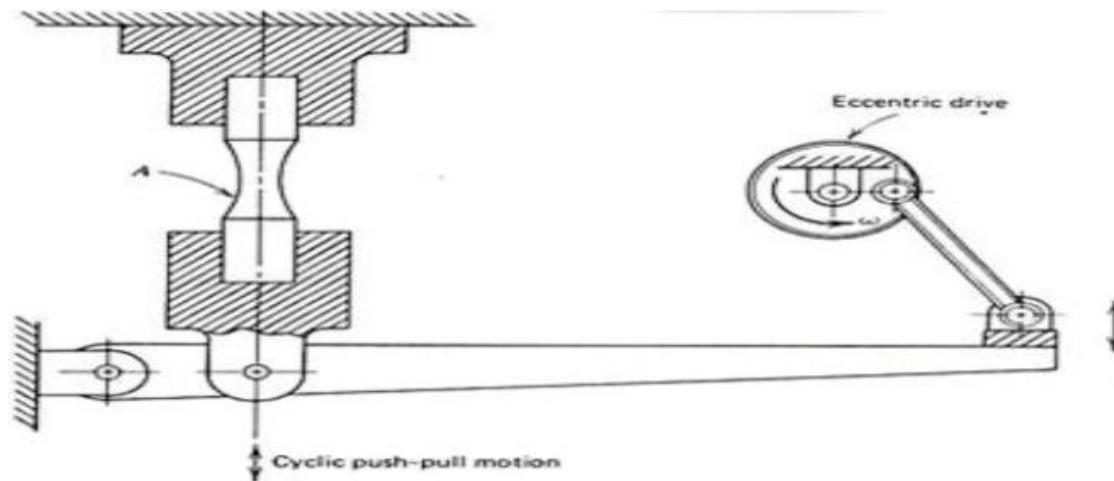


- Flexão alternada;

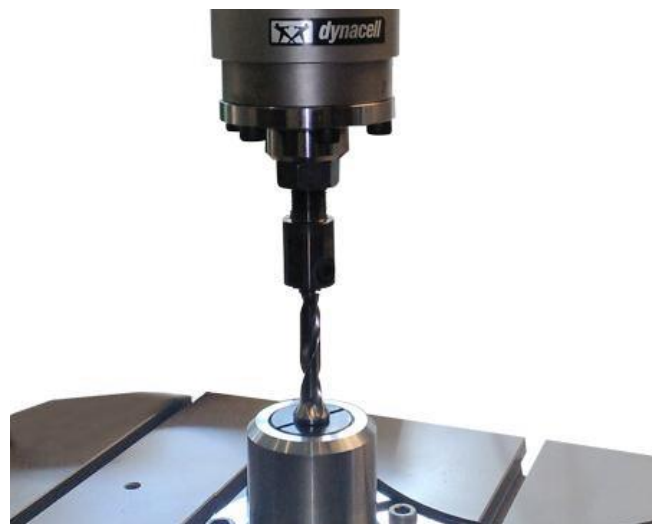


Ensaaios á fadiga

► Força direta;

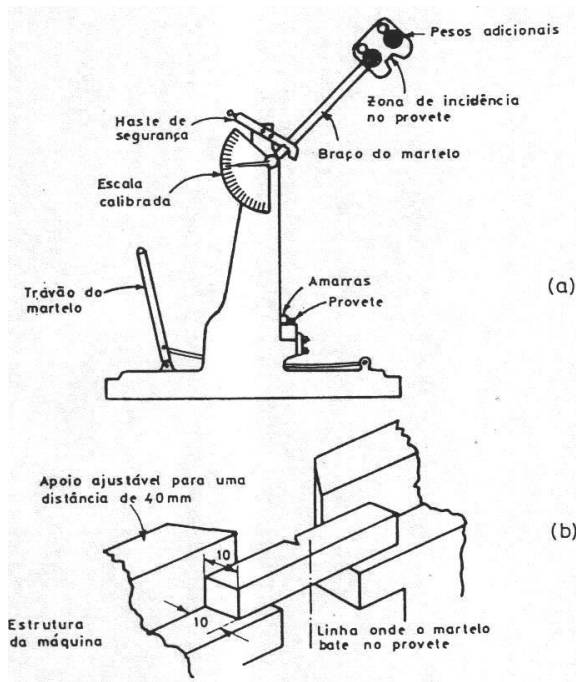


► torção;



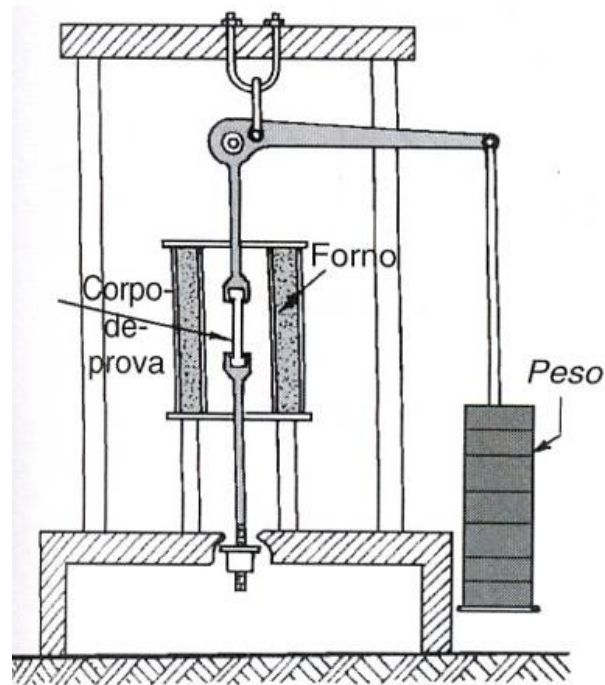
Ensaio á fadiga

- ▶ O ensaio mais convencional é o ensaio de Charpy, onde também recorre a provetes entalhados que sofrem esforços de flexão súbitos devido a um impacto provocado por um pendulo largado de diferentes alturas. A altura que é largado o pendulo esta diretamente relacionada com energia despendida no processo de fratura, ou seja, quanto maior for a energia absorvida na fratura, menor será a altura atingida pelo pendulo.

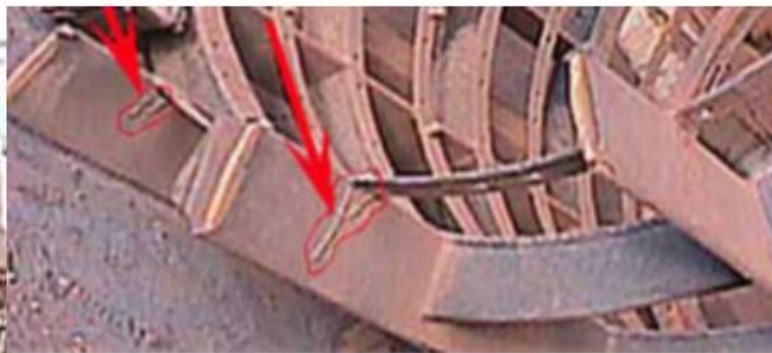


Ensaio á fadiga

- Para calcular a fluência de cada material coloca-se um provete num forno, a uma temperatura fixa, e sujeito a uma força (ou tensão) constante, que é garantida através de pesos, durante um longo período de tempo. No decorrer do ensaio, mede-se o alongamento do provete através de extensómetros mecânicos ou eléctricos. Os resultados obtidos deste ensaio vão nos permitir traçar as curvas de fluência.



Acidentes devido á fadiga

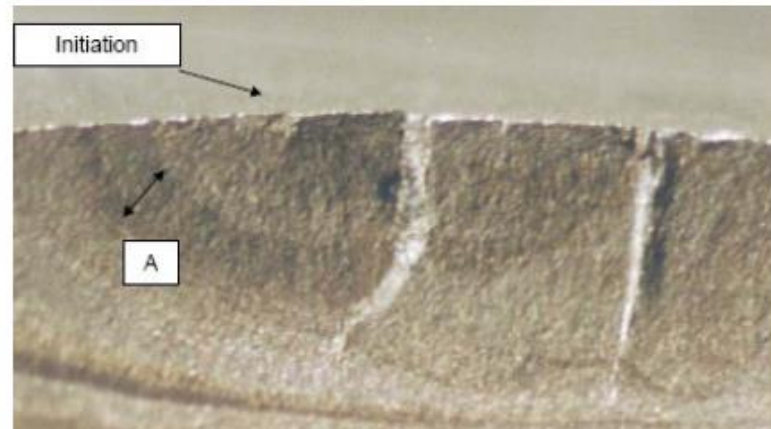
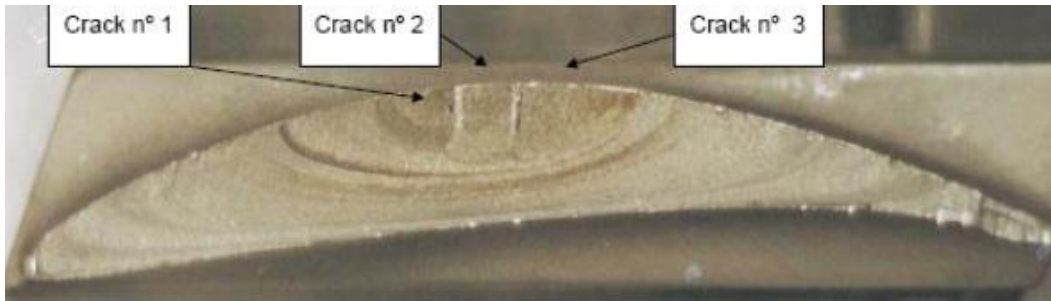


Fratura frágil ocorrida em um navio de carga Liberty que separou o navio em duas partes em 1941

Acidentes devido á fadiga



Acidentes devido á fadiga



Corrosão

A maioria dos metais são instáveis em contacto com a atmosfera. Isto resulta da sua produção através de métodos artificiais, tendendo assim a regressar á sua forma original ou para compostos metálicos semelhantes.

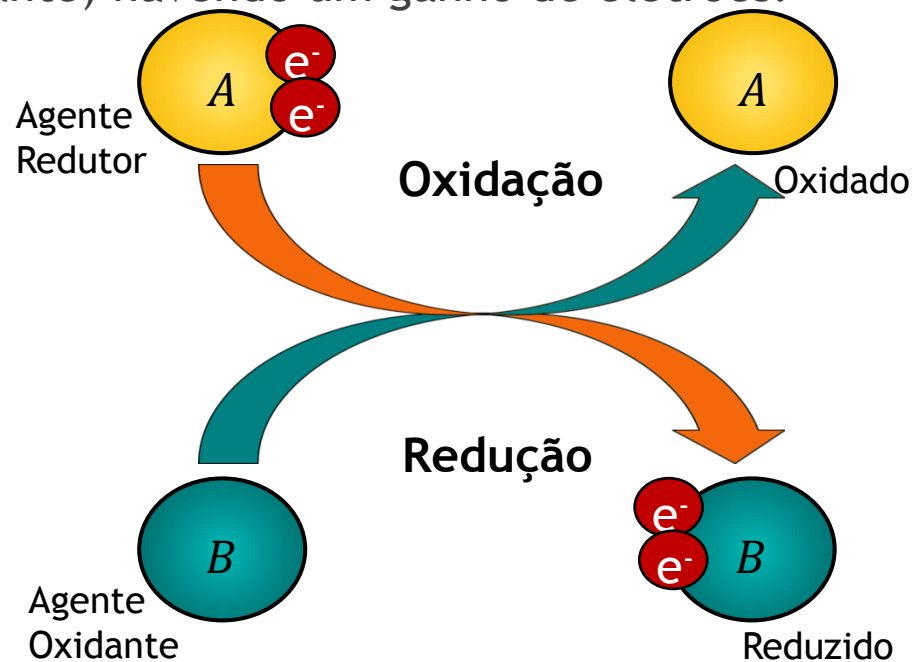
A corrosão é assim uma deteriorização superficial de um material por ação química ou eletroquímica do meio ambiente. Esta deteriorização representa alterações prejudiciais indesejáveis sofridas pelo material, tais como variações químicas ou modificações estruturais.



Processo Químico

Forma-se quando se ligam dois elétrodos através de um circuito metálico. Pode ocorrer a oxidação ou redução:

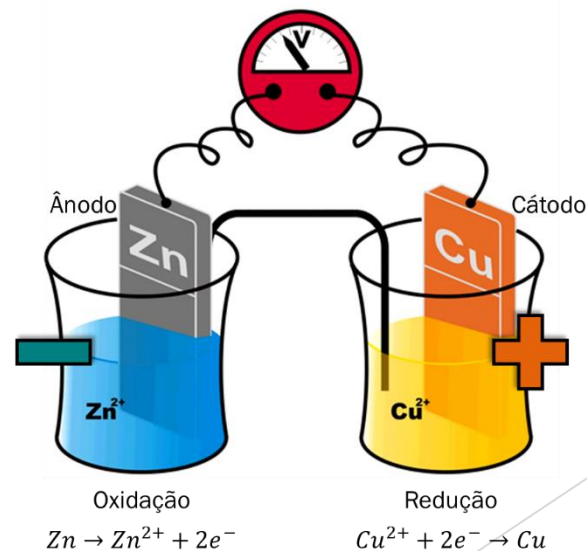
- ▶ **Oxidação** - reação onde ocorre ganho de oxigénio por parte de uma substancia (agente redutor) com consequente perda de eletrões;
- ▶ **Redução** - reação onde ocorre perda de oxigénio por parte de uma substancia (agente oxidante) havendo um ganho de eletrões.



Pilhas eletroquímicas

Este processo acontece quando se ligam dois elétrodos através de um circuito metálico externo:

- ▶ **Ânodo:** - sofre corrosão perdendo eletrões (polo negativo da pilha);
- ▶ **Cátodo** - elétrodo no qual há redução, ou seja, recebe eletrões (polo positivo da pilha);
- ▶ **Eletrólito** - solução ou substancia que conduz os eletrões;
- ▶ **Circuito metálico** - ligação metálica entre o ânodo e o cátodo por onde os eletrões circulam (sentido ânodo-cátodo).



Tipo de pilhas

- ▶ **Galvânicas** - tipo de pilha de corrosão que ocorre quando dois metais diferentes estão em contacto e imersos num mesmo eletrólito;
- ▶ **Ativa/passiva** - ocorre quando há destruição pontual da passivação pelo ião cloreto e consequentemente formação de pontos ativos (ânodos) rodeados por grandes áreas de metal passivo (cátodos);
- ▶ **Concentração diferencial** - ocorrem quando existem diferentes concentrações de um eletrólito em contacto com um metal;
- ▶ **Aeração diferencial** - ocorrem quando se tem um material metálico em contacto com um mesmo eletrólito, mas apresentando regiões com diferentes teores de gases dissolvidos (oxigénio);
- ▶ **Temperaturas diferentes** - constituída por eléctrodos de um único metal, mas sujeito a temperaturas diferentes.

Corrosão Uniforme

CARACTERÍSTICAS:

- Tipo de Corrosão mais comum;

- Geralmente previsível e identificável;

- Processa-se uniformemente por toda a extensão da superfície exposta ou sobre uma área extensa;

- Diminuição da espessura do metal;

CAUSAS:

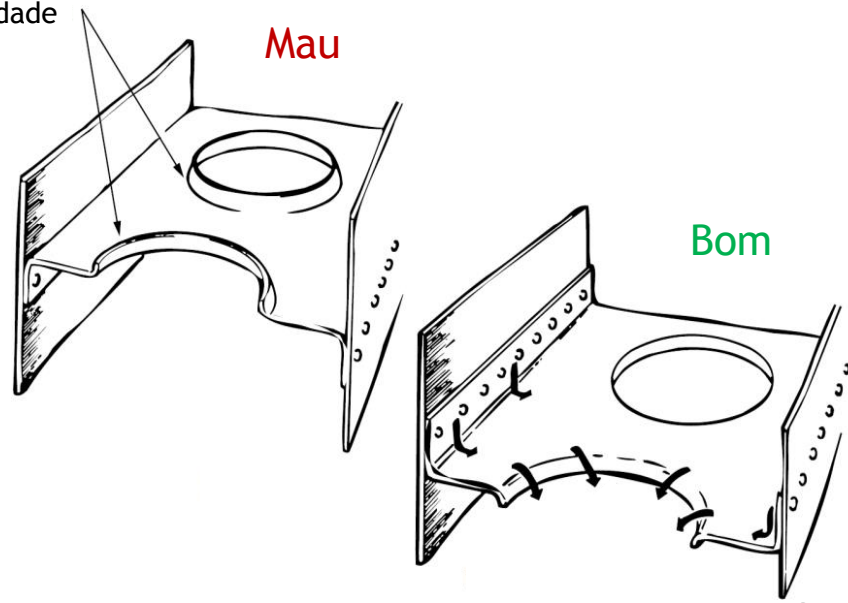
- Exposição a meios ambientes corrosivos sem proteção adequada.

PREVENÇÃO:

- Utilização de materiais adequados, incluindo revestimentos, inibidores, proteção catódica ou anódica.



Acumulação de
Humidade



Corrosão Galvânica

CARACTERÍSTICAS:

Verifica-se nas zonas de contato entre dois metais diferentes;

Corrosão de metais anódicos é mais acentuada e a dos metais catódicos menor.

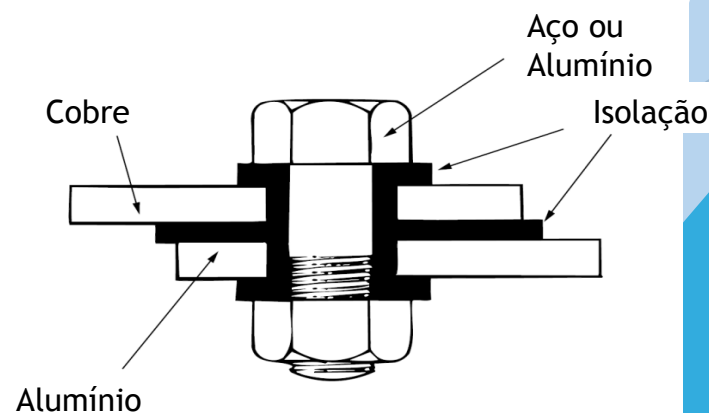
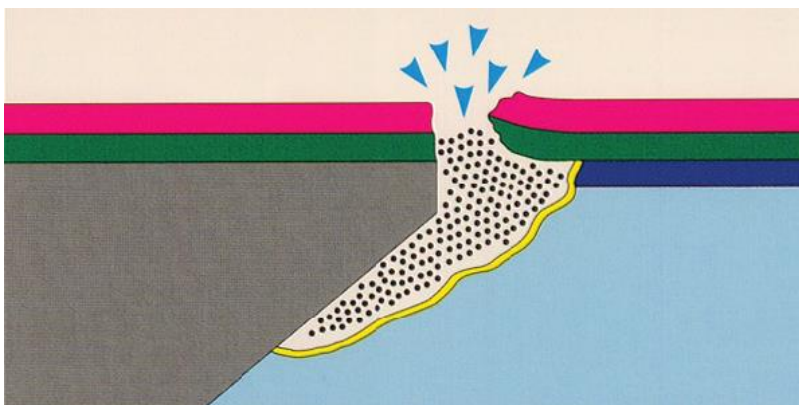
CAUSAS:

Dois materiais de diferentes potenciais em contato um com o outro, na presença de um eletrólito.

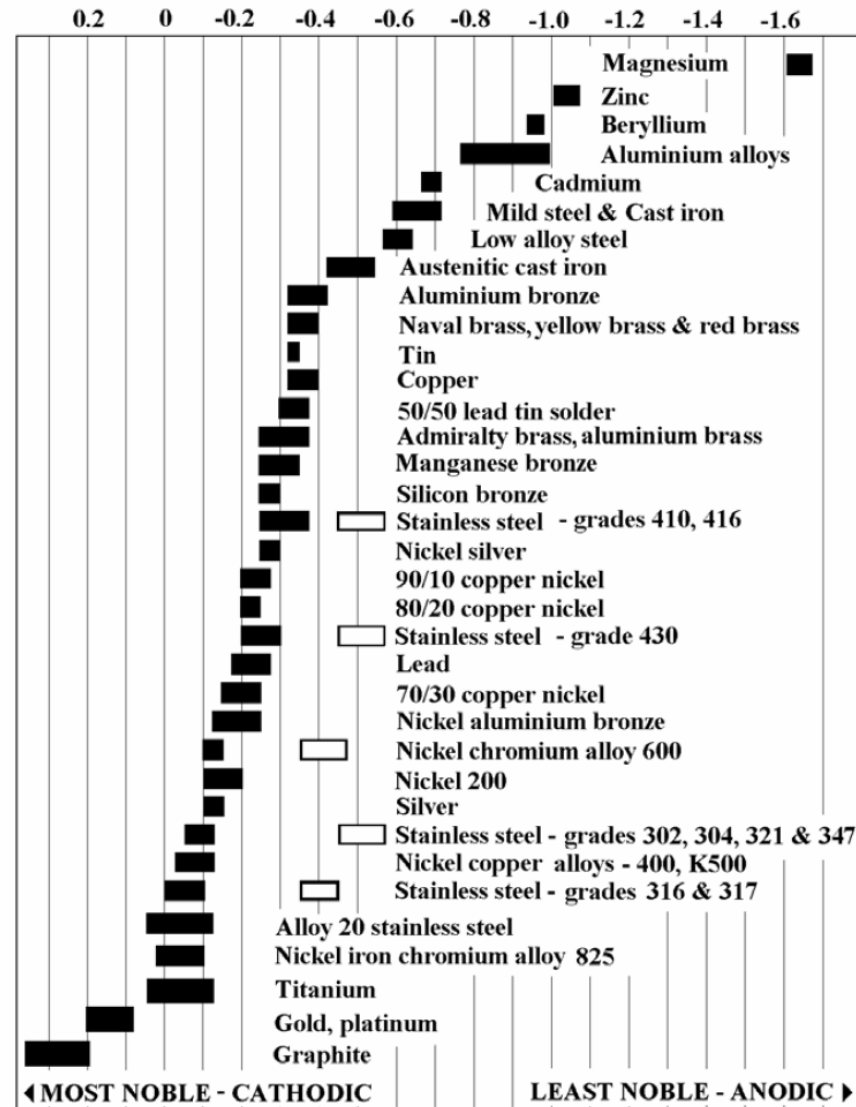
PREVENÇÃO:

Tratamentos de proteção;

Técnicas de montagem especiais (selagem, isolamento elétrico dos metais).



Corrosão Galvânica



Corrosão Puntiforme

CARATERÍSTICAS:

Difícil de produzir em testes de laboratório, de detetar e de medir quantitativamente;

Processa-se em pontos ou em pequenas áreas localizadas na superfície metálica produzindo pites;

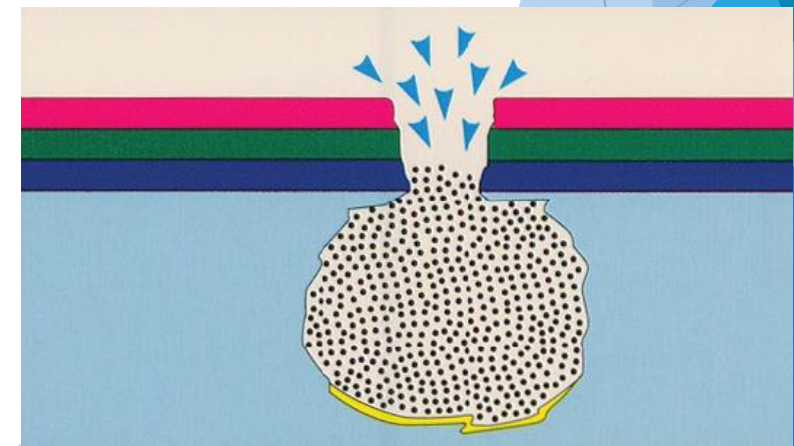
Normalmente, desenvolvem-se na direção da gravidade.

CAUSAS:

Heterogeneidade física e química do metal.

PREVENÇÃO:

Utilização de materiais adequados, incluindo inibidores.



Corrosão Intergranular

CARATERÍSTICAS:

Normalmente impercetível à superfície;

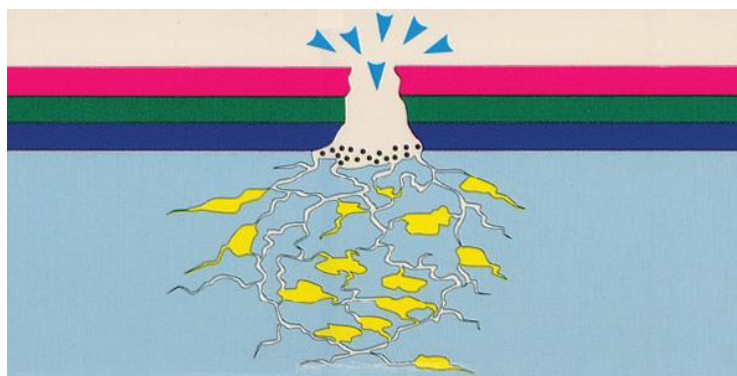
Processa-se entre os grãos da rede cristalina do metal, o qual perde as suas propriedades mecânicas;

CAUSAS:

Heterogeneidade física e química entre os grãos e as suas fronteiras.

PREVENÇÃO:

Tratamentos térmicos adequados.



Corrosão por Esfoliação

CARATERÍSTICAS:

Processa-se em diferentes camadas e o produto de corrosão, formado entre a estrutura de grãos alongados, separa as camadas provocando o avolumar do metal;

Laminação é paralela à superfície metálica;

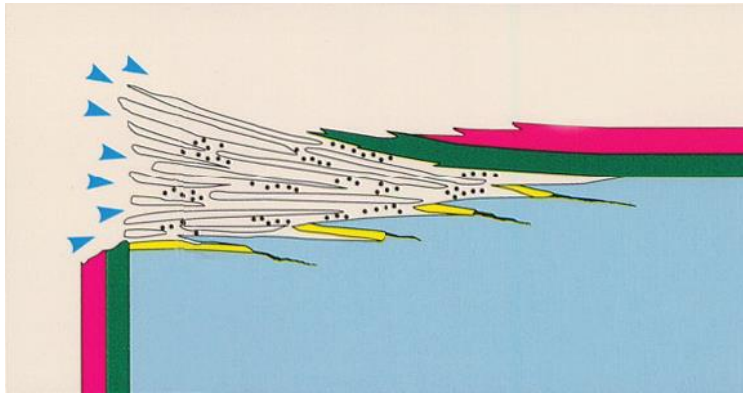
Forma particular da corrosão intergranular.

CAUSAS:

“Escamação” da camada protetora do metal.

PREVENÇÃO:

Tratamentos térmicos adequados.



Corrosão por aeração diferencial

CARATERÍSTICAS:

Processo autossuficiente;

Ocorre em áreas deficientes em oxigénio;

Diferenças entre concentrações de oxigénio nos metais;

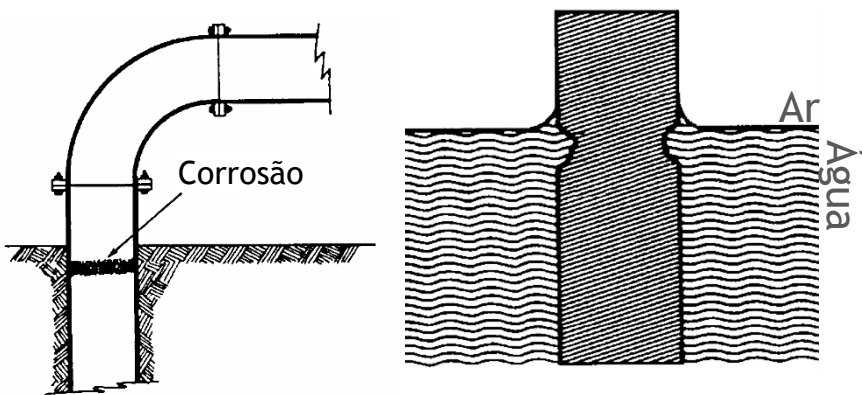
Locais de acumulação de pó e areia.

CAUSAS:

Metais expostos a eletrólitos com variações na concentração de oxigénio.

PREVENÇÃO:

Revestimentos adequados do metal.



Corrosão associada a solicitações mecânicas

CARATERÍSTICAS:

Fratura repentina de certos metais, quando solicitados mecanicamente em certos ambientes;

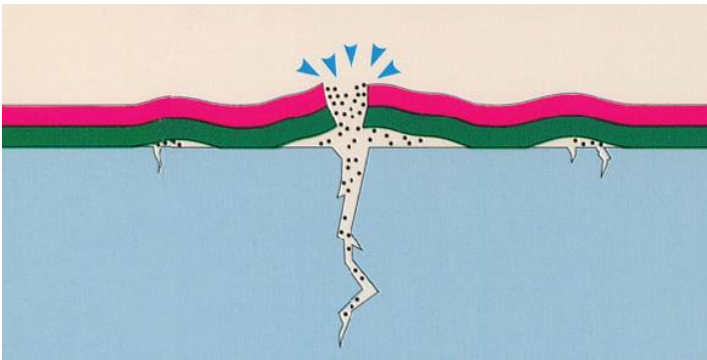
Não se observa perda de massa por parte do metal;

CAUSAS:

Fragilização pelo hidrogénio em metais sujeitos a cargas constantes.

PREVENÇÃO:

Uso de material de baixa dureza; Inibidores; Proteção catódica.



Corrosão Induzida por Fretagem

CARACTERÍSTICAS:

Ocorre em áreas de contato entre materiais sujeitos a vibrações e deslizamentos relativos;

Forma particular da corrosão associada a solicitações mecânicas.

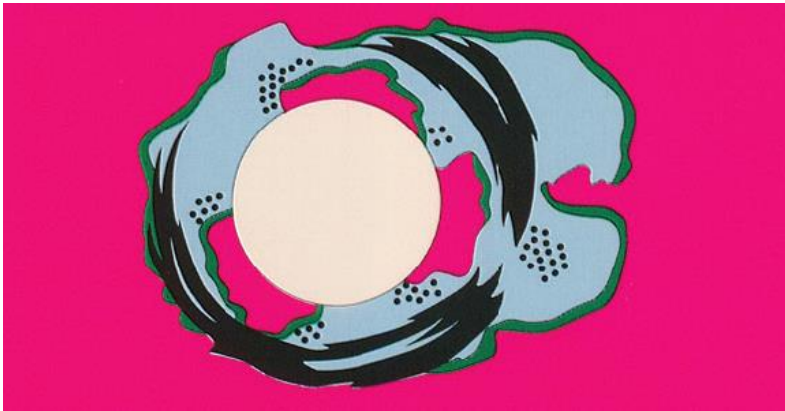
CAUSAS:

Desgaste do metal sob a carga em condições ambientais húmidas.

PREVENÇÃO:

Utilização de materiais adequados;

Lubrificação das áreas com óleos ou graxas de baixa viscosidade e alta tenacidade.



Corrosão Microbiológica

CARATERÍSTICAS:

Processa-se sob influência de microrganismos;

Ambientes propícios: água do mar, de rios e de sistemas de refrigeração, regiões pantanosas, sedimentos oleosos e solos que contêm resíduos orgânicos;

CAUSAS:

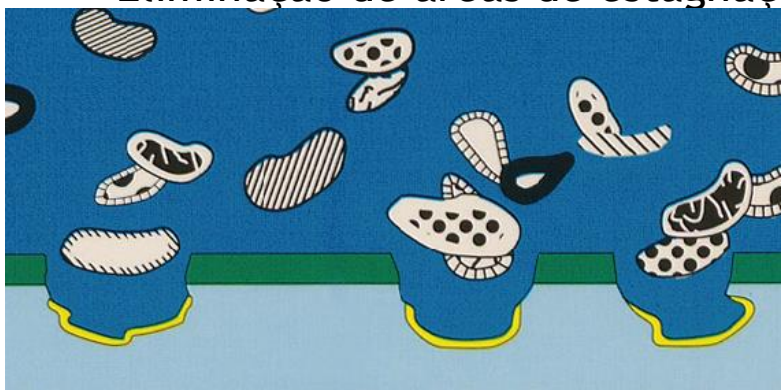
Influência direta na velocidade das reações anódicas e catódicas;

Modificação na resistência de películas existentes nas superfícies metálicas.

PREVENÇÃO:

Proteção catódica; Revestimentos;

Eliminação de áreas de estagnação.



Corrosão Filiforme

CARATERÍSTICAS:

Apresenta-se sob a forma de finos filamentos que se propagam em diferentes direções;

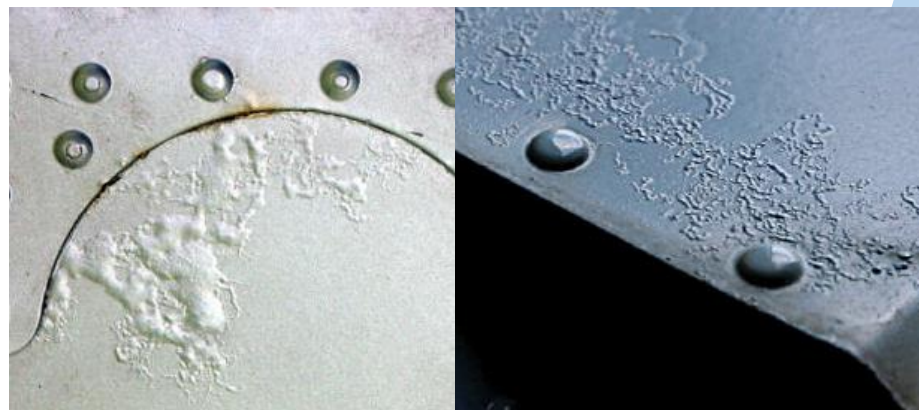
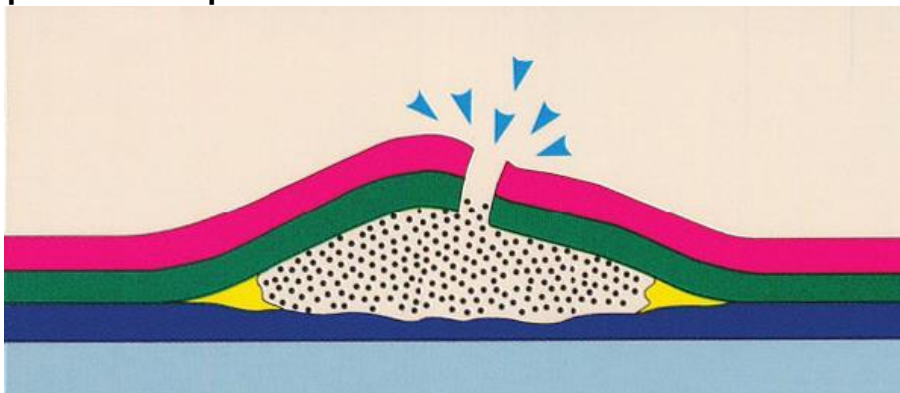
Provocam o deslocamento do revestimento (tintas ou metais) das superfícies metálicas;

CAUSAS:

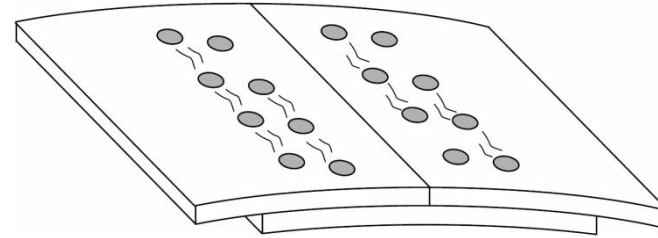
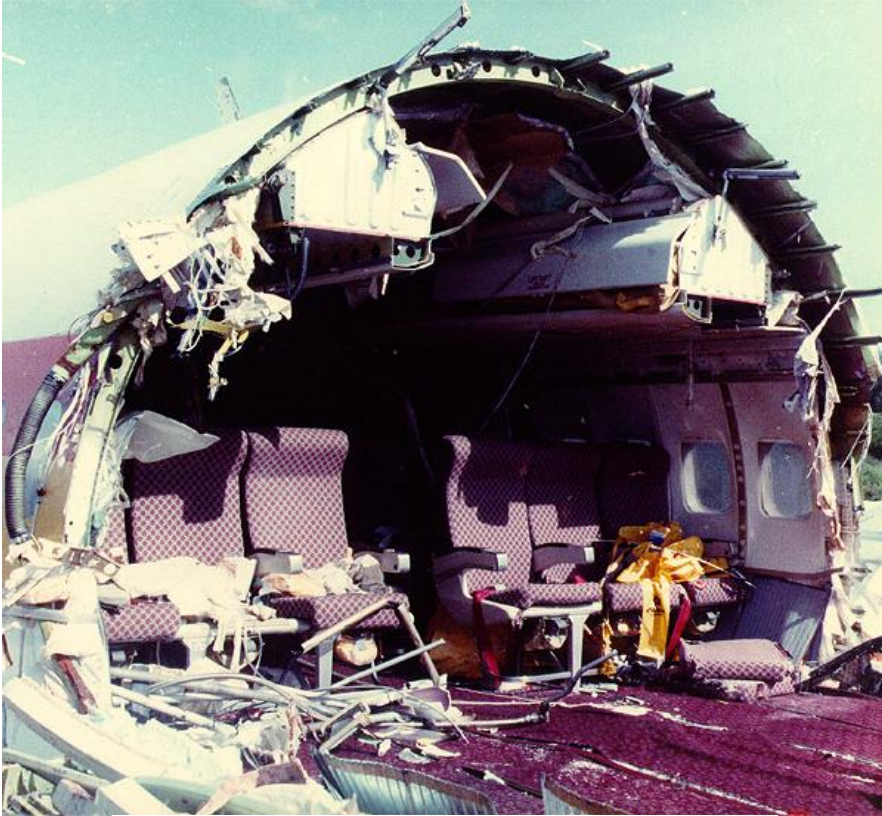
Danificação dos revestimentos.

PREVENÇÃO:

Reduzir a humidade; Aperfeiçoamento das técnicas de preparação das superfícies para o revestimento.

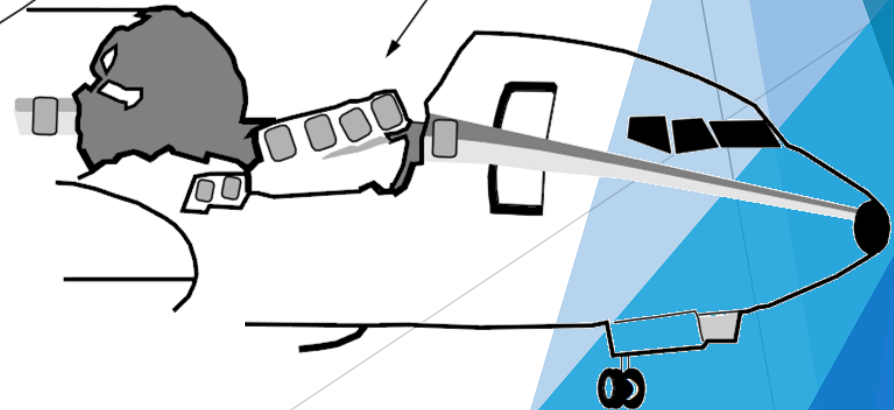


Acidentes devido á corrosão



Fratura numa secção da fuselagem a 24 000 pés sob pressão interna.

Miraculosamente, os pilotos conseguem aterrar o avião em segurança.

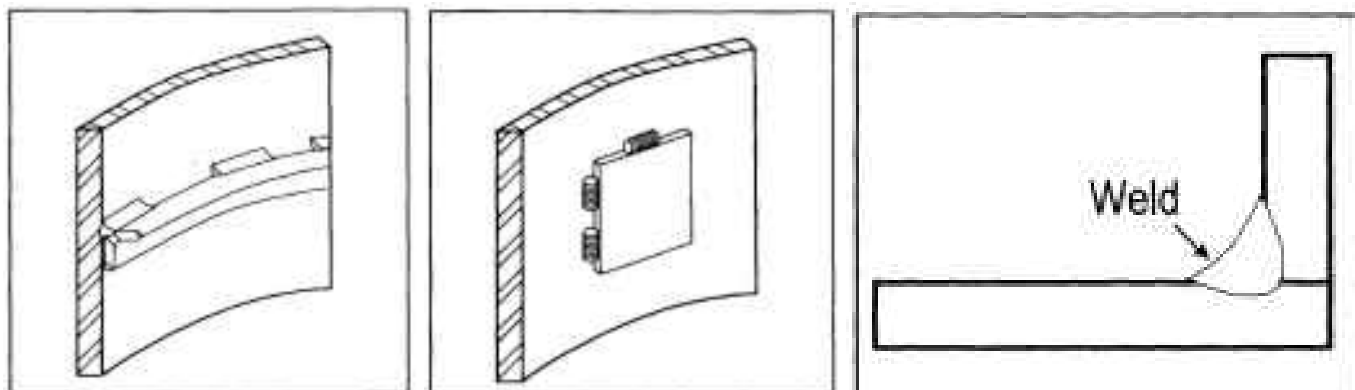


Prevenções da corrosão em aeronaves

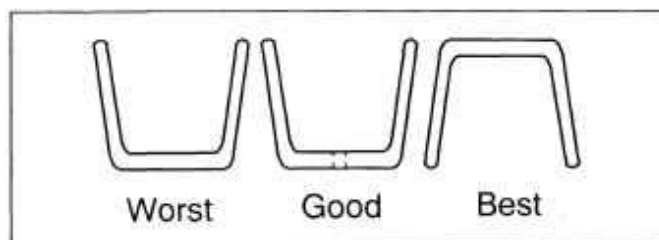
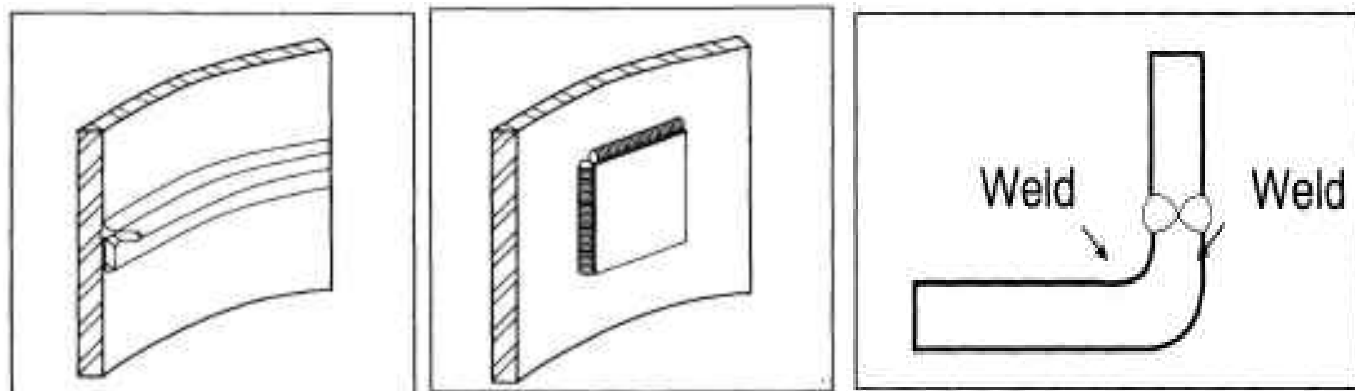
- ▶ **Seleção de materiais** - Uso de novas ligas de alumínio mais resistentes à corrosão, uso cada vez maior das ligas de titânio, abandono dos componentes em magnésio em estruturas primárias, uso crescente de compósitos, novas técnicas de fabrico;
- ▶ **Acabamentos** - Uso de filmes protetores para evitar corrosão galvânica, não aplicar selante aos painéis em alumínio anodizado para melhorar a adesão do primário (pintura mais resistente).
- ▶ **Drenagem** - aplicar drenos a todas as cavidades;
- ▶ **Selagem** - todas as juntas podem ser seladas recorrendo a um composto de polisulfida que impede a corrosão por aeração diferencial (junções de painéis, junta asa/fuselagem, etc), pode ser utilizado para evitar a corrosão galvânica em metais com diferentes potenciais de corrosão;
- ▶ **Facilidade de inspeção** - devem ser contempladas portas e/ou outras zonas de acesso destinadas à inspeção de áreas não visíveis da aeronave.

Alguns exemplos de projeto

► Bom



► Mau



Processos de Controlo de Corrosão

- ▶ **Eletrodeposição** - consiste em promover um revestimento metálico fino, para garantir a proteção adequada da peça base. Normalmente, faz-se passar uma corrente elétrica por um banho contendo iões dissolvidos que irão ser atraídos para o substrato (cátodo). Para que o depósito seja cristalino, o processo deve ser lento, o que garante uma boa adesão;
- ▶ **Deposição auto-catalítica** - semelhante à eletrodeposição, mas dispensa a aplicação de uma fonte de corrente elétrica externa. A deposição do metal é feita por uma reação espontânea na superfície do material dando origem a revestimentos de alta qualidade e muito compactos. Recomendado para peças com geometrias complexas e zonas de difícil acesso;
- ▶ **Anodização** - formação de um filme de óxido passivo num metal (normalmente alumínio) através de processos eletrolíticos ou químicos; deve-se proceder à selagem desta camada de óxido que é porosa;
- ▶ **Proteção Catódica** - utilização de ánodos de sacrifício (magnésio) ou aplicação de uma corrente impressa;
- ▶ **Proteção Anódica** - utilização de uma corrente elétrica externa suficientemente elevada de modo a promover a passivação do material;
- ▶ **Pintura eletroforética** - processo de pintura de materiais condutores por tintas poliméricas compostas por agregados com grande carga; ideal para zonas de difícil acesso;

