


UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
 Escola Politécnica
 DCTM - Departamento de Ciência e Tecnologia dos Materiais

Materiais de Construção I
UNIDADE II
Ensaio Mecânicos, Aços Inoxidáveis, Ligas não ferrosas, Diagramas de Fase, TTT e Corrosão

Prof. Dr. Daniel Véras Ribeiro
 verasribeiro@hotmail.com



Ensaio Mecânicos
Destrutivos




Ensaio de Tração

- **Fornecer informações quantitativas das características mecânicas dos materiais:**
 - Limite de resistência à tração;
 - Limite de escoamento;
 - Módulo de elasticidade;
 - Resiliência;
 - Tenacidade;
 - Ductilidade.

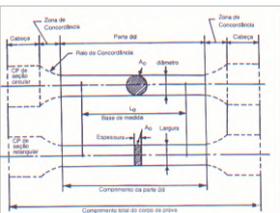

Ensaio de Tração

- **Precauções:**
 - Bom alinhamento, para evitar esforços assimétricos;
 - Controle da velocidade do ensaio (valores indicados por normas específicas).
- **É fortemente influenciado pela:**
 - Temperatura;
 - Velocidade de deformação;
 - Anisotropia do material;
 - Tamanho do grão;
 - % de impurezas.


Ensaio de Tração

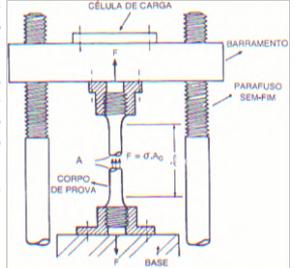
- **O ensaio é realizado em CP's padronizados, de modo que os resultados possam ser comparados e reproduzidos.**
 - Seção circular ou retangular;
 - Geometria:

A deformação fica confinada à região central;
 Reduzir a probabilidade de fratura nas extremidades.




Ensaio de Tração

- **Esquema.**
 - O CP é tracionado pelo deslocamento de um barramento acionado pela rotação de parafusos sem fim.
 - O CP é submetido a uma força de tração uniaxial, continuamente crescente, com registro simultâneo da deformação do mesmo;
 - Ocorrência de tensões uniformes até uma carga máxima;
 - Estricção (materiais dúcteis);
 - Ruptura no "pescoço".



Ensaio de Tração

- Esquema.

Tração

- Coefficiente de Poisson (ν):

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

$$\nu = \frac{-\delta_{lateral}}{\delta_{axial}}$$

Flexão e Dobramento (metais)

- Deformação elástica;
- Flexão.
- Deformação plástica.
- Dobramento.

Flexão e Dobramento (metais)

- Informação qualitativa sobre a ductilidade do material;
- Alumínio recozido X Alumínio encruado.
- Dobra-se um CP de eixo retilíneo, até que seja atingido um ângulo desejado.

Flexão e Dobramento (metais)

- O ângulo de dobramento determina a severidade do ensaio e é geralmente de 90°, 120° ou 180°;
- Ao se atingir o ângulo especificado, examina-se a olho nu a zona tracionada, que não deve apresentar trincas, fissuras ou fendas. Caso contrário, o material não terá passado no ensaio

Vergalhões para a Construção

| Diâmetro Nominal (DN) (mm) | Massa Nominal (kg/m) | Máxima variação permitida para Massa Nominal | CA-50 | | | CA-25 | | |
|----------------------------|----------------------|--|---|-----------------------------------|----------------------------|---|-----------------------------------|----------------------------|
| | | | Resistência Característica de Escoamento (fy) (MPa) | Limite de Resistência (ftk) (MPa) | Alongamento mínimo em 10 Ø | Resistência Característica de Escoamento (fy) (MPa) | Limite de Resistência (ftk) (MPa) | Alongamento mínimo em 10 Ø |
| 6,3 | 0,245 | ± 7% | 500 | 1,08 x fy | 8% | 250 | 1,20 x fy | 18% |
| 8,0 | 0,395 | ± 7% | | | | | | |
| 10,0 | 0,617 | ± 6% | | | | | | |
| 12,5 | 0,963 | ± 6% | | | | | | |
| 16,0 | 1,578 | ± 5% | | | | | | |
| 20,0 | 2,466 | ± 5% | | | | | | |
| 25,0 | 3,853 | ± 4% | | | | | | |
| 32,0 | 6,313 | ± 4% | | | | | | |
| 40,0 | 9,865 | ± 4% | | | | | | |

| Diâmetro Nominal (DN) (mm) | Massa Nominal (kg/m) | Máxima variação permitida para Massa Nominal | CA-60 | | |
|----------------------------|----------------------|--|---|-----------------------------------|----------------------------|
| | | | Resistência Característica de Escoamento (fy) (MPa) | Limite de Resistência (ftk) (MPa) | Alongamento mínimo em 10 Ø |
| 3,4 | 0,071 | ± 6% | 600 | 1,05 x fy | 5% |
| 4,2 | 0,109 | ± 6% | | | |
| 5,0 | 0,154 | ± 6% | | | |
| 6,0 | 0,222 | ± 6% | | | |
| 7,0 | 0,302 | ± 6% | | | |
| 8,0 | 0,395 | ± 6% | | | |
| 9,5 | 0,558 | ± 6% | | | |

Tenacidade

- Fratura por impacto: ensaio de Resistência ao choque (pêndulo);

Charpy: comum nos EUA
Izod: comum na Europa

$W_f = mg(h_i - h_f)$

W_f : trabalho de fratura
 m : massa do pêndulo
 g : aceleração da gravidade
 h_i : altura inicial do pêndulo
 h_f : altura final do pêndulo

Detalhes dos corpos de prova e da forma de ensaio Charpy e Izod

Dureza e Microdureza

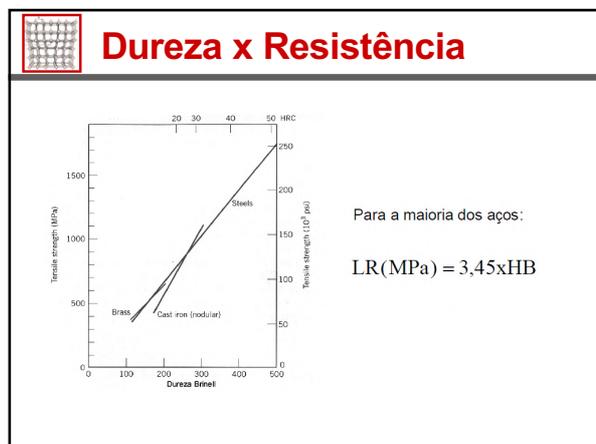
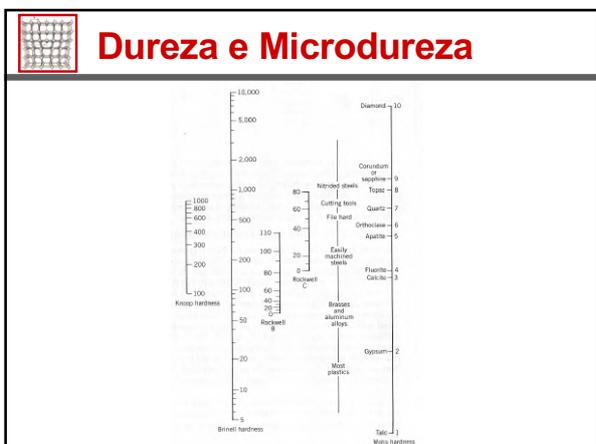
- É a medida da resistência de um material a uma deformação plástica localizada (por exemplo, uma pequena impressão ou um risco);
- Ao contrário do limite de escoamento e da tenacidade, a dureza não é um parâmetro característico do material; (depende da máquina, da carga, do tipo de penetrador, etc...).
- Sistemas Qualitativos de indexação da dureza
Ex: Escala de Mohs (minerais naturais).

Dureza e Microdureza

- O ensaio consiste na aplicação de uma carga conhecida através de um penetrador de geometria conhecida e na medição da área da impressão produzida na superfície do corpo de prova;
- Ensaio de grande importância tecnológica (controle de qualidade);
- Ensaio simples, rápido e barato.

Dureza e Microdureza

| Test | Indenter | Shape of Indentation | | Local | Formula for Hardness Number* |
|-----------------------------------|--|----------------------|----------|-------|---|
| | | Side View | Top View | | |
| Brinell | 10-mm sphere of steel or tungsten carbide | | | P | $HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$ |
| Vickers microhardness | Diamond pyramid | | | P | $HV = 1.854P/d^2$ |
| Knop microhardness | Diamond pyramid | | | P | $HK = 14.2P/l^2$ |
| Rockwell and Superficial Rockwell | Diamond cone, 1/8, 1/16 in. diameter steel spheres | | | P | 60 kg } Rockwell |
| | | | | | 100 kg } Rockwell |
| | | | | | 15 kg } Superficial Rockwell |
| | | | | | 30 kg } Superficial Rockwell |
| | | | | | 45 kg } Superficial Rockwell |





Dureza e Microdureza

Exemplos:

- Um penetrador para ensaios de dureza Brinell com 10mm de diâmetro produziu uma impressão com diâmetro de 1,62mm em uma liga de aço, quando foi usada uma carga de 500 Kgf. Calcule a dureza deste material.

- Qual deverá ser o diâmetro de uma impressão para produzir uma dureza de 450 HB, quando uma carga de 500 kgf é usada?

| Test | Indenter | Shape of Indentation | | Load | Formula for Hardness Number |
|---------|--|----------------------|----------|------|---|
| | | Side View | Top View | | |
| Brinell | 10mm sphere of steel or tungsten carbide | | | P | $HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$ |

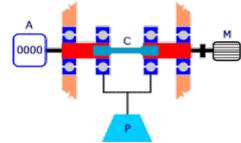


Ensaio de Fadiga

Método de Fadiga Rotativa.

- Um motor gira um corpo-de-prova C;
- Os rolamentos externos são fixos em apoios e os internos recebem uma carga P, produzindo um esforço de flexão alternado devido à rotação do CP.

- Um ciclo completo de flexão alternada é aplicado a cada volta do eixo e o número de voltas é registrado pelo contador A.

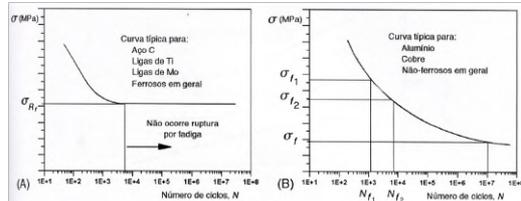


Ensaio de Fadiga

Curva de Wohler.

- A curva σ -N representa a tensão versus número de ciclos para que ocorra a fratura;

- Normalmente utiliza-se escala logarítmica para N.

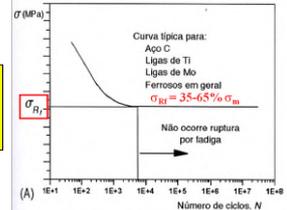


Ensaio de Fadiga

Limite de resistência à Fadiga (σ_{Rf}):

- Para algumas ligas ferrosas e de titânio, a curva σ -N se torna horizontal para maiores valores de N ou existe um nível de tensão limite, abaixo do qual o material nunca sofrerá ruptura por fadiga.

Para os aços, o limite de resistência à fadiga (σ_{Rf}) está entre 35-65% do limite de resistência à tração.

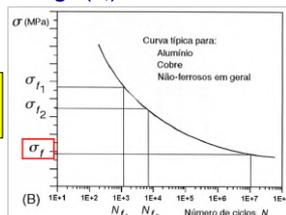


Ensaio de Fadiga

Resistência à Fadiga (σ_f):

- Para a maioria das ligas não ferrosas, a tensão na qual ocorrerá a falha decresce continuamente com o número de ciclos. Nesse caso, a fadiga é caracterizada pela resistência à fadiga (σ_f).

Corresponde à tensão na qual ocorre a ruptura para um n° arbitrário de ciclos



Ensaio de Fadiga

Vida em Fadiga (N_f):

- Corresponde ao número de ciclos necessários para ocorrer a falha em um nível de tensão específico.

- Existe uma dispersão muito grande nos resultados.

- A fratura por fadiga é facilmente identificável. A área de ruptura C tem um aspecto distinto do restante, restante, que se forma gradualmente.





Fatores – Vida em Fadiga

- **Tensão Média:**
 - O aumento do nível médio de tensão leva a uma diminuição da vida útil.
- **Efeitos de Superfície:**
 - Variáveis de projeto podem levar à concentração de tensões e, então, à formação de trincas.
 - Tratamentos superficiais (polimento, jateamento, endurecimento superficial) são benéficos.
- **Efeitos do Ambiente:**
 - Fadiga térmica (flutuações na temperatura) e fadiga por corrosão (ex. pites de corrosão).



Fatores – Vida em Fadiga

- **Exemplo:**
 - Um ensaio de fadiga foi conduzido onde a tensão média era 50 MPa e a amplitude da tensão era de 225 MPa.
 - a) Calcule os níveis de tensão máximo e mínimo
 - b) Calcule a razão de tensão
 - c) Calcule a magnitude do intervalo de tensões

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} = 50 \text{ MPa} \quad \text{a) } \begin{aligned} \sigma_{\max} &= 275 \text{ MPa (40.000 psi)} \\ \sigma_{\min} &= -175 \text{ MPa (-25.500 psi)} \end{aligned} \quad \text{c) } \sigma_r = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = 275 \text{ MPa} - (-175 \text{ MPa}) = 450 \text{ MPa}$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} = 225 \text{ MPa} \quad \text{b) } R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = \frac{-175 \text{ MPa}}{275 \text{ MPa}} = -0.64$$



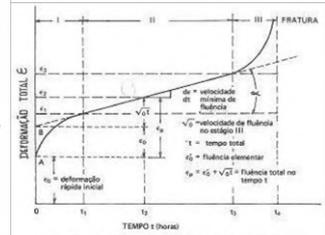
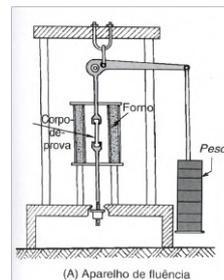
Ensaio de Fluência

- **Aplica-se uma carga uniaxial constante, a uma temperatura elevada e constante.**
 - O CP tem a mesma geometria dos utilizados no ensaio de tração;
 - O tempo de aplicação de carga é estabelecido em função da vida útil esperada do componente.
- **Mede-se as deformações ocorridas em função do tempo ($\epsilon \times t$).**



Ensaio de Fluência

- **Teste de Fluência e Curva Típica.**



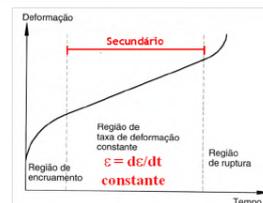
Ensaio de Fluência

- **Estágio Primário:**
 - Ocorre um decréscimo contínuo na taxa de fluência ($\epsilon = d\epsilon/dt$)
 - A inclinação da curva diminui com o tempo devido ao aumento da resistência por encruamento.



Ensaio de Fluência

- **Estágio Secundário:**
 - A taxa de fluência ($\epsilon = d\epsilon/dt$) é constante (comportamento linear).
 - Ocorrência de 2 fenômenos competitivos: encruamento e recuperação.



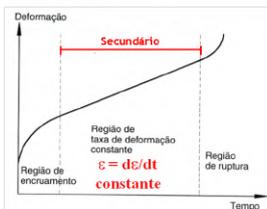


Ensaio de Fluência

• Estágio Secundário:

- A taxa de fluência nesse estágio é chamado de taxa de fluência em regime estacionário ($\dot{\epsilon}_e$).

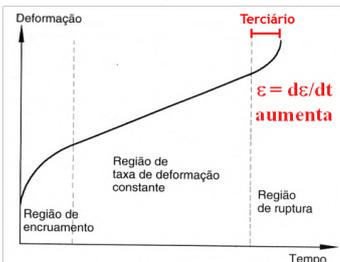
É o parâmetro de engenharia considerado em aplicações de longo prazo.



Ensaio de Fluência

• Estágio Terciário:

- Ocorre uma aceleração na taxa de fluência, que culmina com a ruptura do corpo-de-prova.



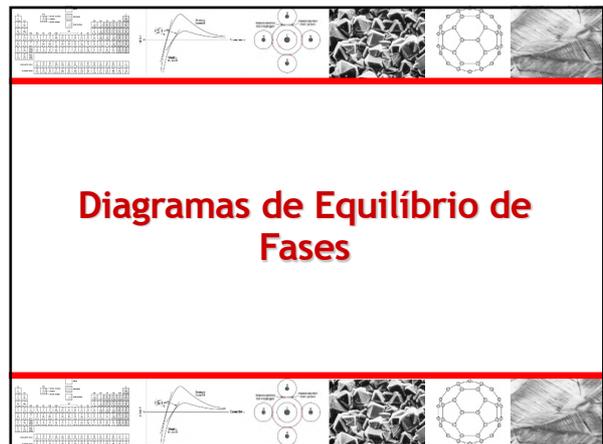
Ensaio de Fluência

• Estágio Terciário:

- Ocorre uma aceleração na taxa de fluência, que culmina com a ruptura do corpo-de-prova.

A ruptura ocorre com a separação dos contornos de grão, formação e coalescimento de trincas, conduzindo a uma redução de área localizada e conseqüente aumento da taxa de deformação;

O tempo para ruptura é o parâmetro de engenharia considerado em aplicações de longo prazo.



Introdução

• Importância

- Os diagramas de fases (também chamados de diagrama de equilíbrio) relacionam temperatura, composição química e quantidade das fases em equilíbrio;

Um diagrama de fases é um "mapa" que mostra quais fases são as mais estáveis nas diferentes composições, temperaturas e pressão.

- A microestrutura dos materiais pode ser relacionada diretamente com o diagrama de fases;

- Existe uma relação direta entre as propriedades dos materiais e as suas microestruturas.



Introdução

• Definições

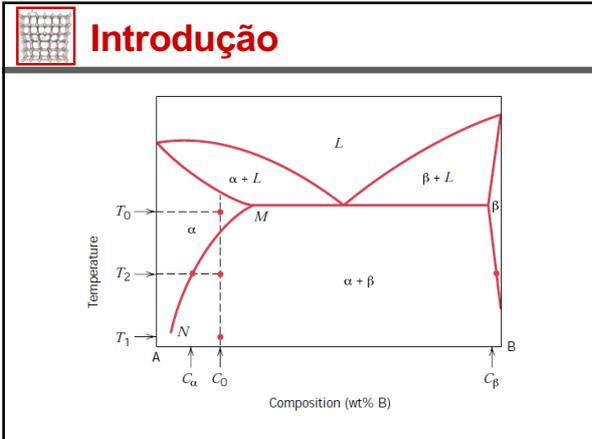
- **Componentes:** São elementos químicos e/ou compostos que constituem uma fase.

- **Sistema**

1) quantidade de matéria com massa e identidade fixas sobre a qual dirigimos a nossa atenção. Todo o resto é chamado vizinhança.

2) série de fases possíveis formadas pelos mesmos componentes, independentemente da composição específica. Exemplo: o sistema Pb-Sn.

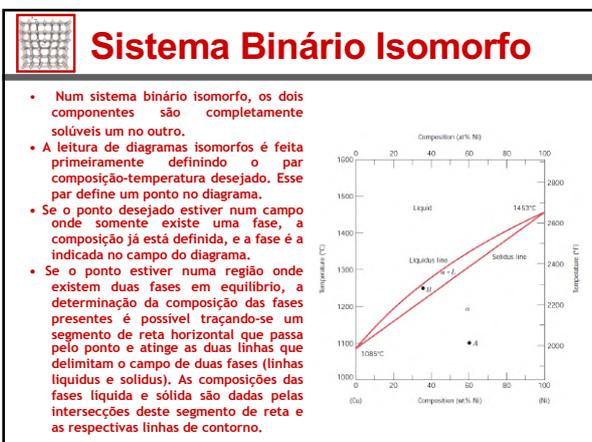
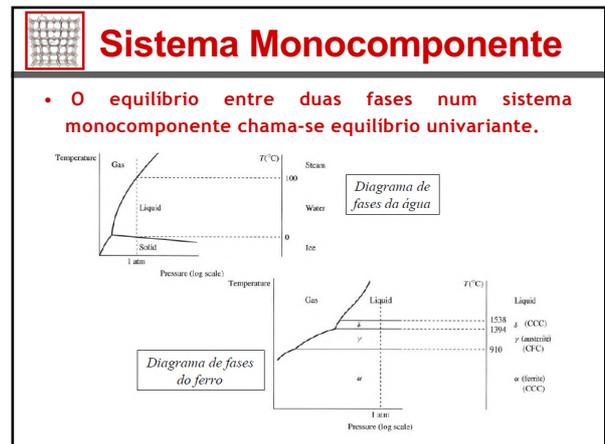
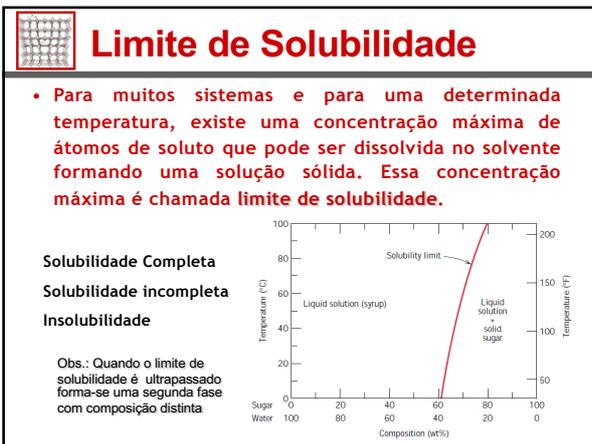
- **Fase:** Uma parte estruturalmente homogênea do sistema, que possui propriedades físicas e químicas características. Exemplo: fases α , β e L de uma liga.



Introdução

- **Equilíbrio**
- Em termos “macroscópicos”
- Um sistema está em equilíbrio quando suas características não mudam com o tempo, e tende a permanecer nas condições em que se encontra indefinidamente, a não ser que seja perturbado externamente.
- Em termos termodinâmicos

- 1) Um sistema está em equilíbrio quando sua energia livre é mínima, consideradas as condições de temperatura, pressão e composição em que ele se encontra.
- 2) Variações dessas condições resultam numa alteração da energia livre, e o sistema pode espontaneamente se alterar para um outro estado de equilíbrio (no qual a energia livre seja mínima para as novas condições de T, P e composição).



Regra da Alavanca

- É usada para se determinar as proporções das fases em equilíbrio em um campo de duas fases.

Dedução

→ Chega-se à regra das fases simplesmente através de um balanço de massa.

→ Consideremos W_L e W_α as frações mássicas, respectivamente, da fase líquida, L, e da fase sólida, α .

→ Cada componente do sistema pode estar em cada uma das fases, em concentração C_L (no líquido) e C_α (no sólido)

→ As duas equações abaixo podem ser escritas:

$$W_L + W_\alpha = 1 \rightarrow W_L = 1 - W_\alpha \quad (eq. I)$$

$$W_L C_L + W_\alpha C_\alpha = C_0 \quad (eq. II)$$

$$(1 - W_\alpha) C_L + W_\alpha C_\alpha = C_0$$

$$C_L - W_\alpha C_L + W_\alpha C_\alpha = C_0$$

$$W_\alpha (C_\alpha - C_L) = C_0 - C_L$$

$$W_\alpha = \frac{C_0 - C_L}{C_\alpha - C_L}$$

Se, ao invés de isolar W_L na (eq. I) isolarmos W_α , chega-se à equação da fração de fase líquida.

Regra da Alavanca

- Exemplo 15
- Determine as frações de líquido e sólido na liga abaixo, a 1250 °C, contendo 35% de Níquel

Resposta

| | |
|--|--|
| Fração de líquido | Fração de sólido |
| $W_L = \frac{S}{R+S}$ | $W_S = \frac{R}{R+S}$ |
| $W_L = \frac{C_S - C_0}{C_S - C_L}$ | $W_S = \frac{C_0 - C_L}{C_S - C_L}$ |
| $W_L = \frac{42.5 - 35}{42.5 - 31.5} = 0,68$ | $W_S = \frac{35 - 31.5}{42.5 - 31.5} = 0,32$ |

Regra da Alavanca

- Exemplo 16
- Para uma liga 40%p Sn - 60%p Pb a 150 °C, indique:

- Quais as fases presentes?
- Qual a composição das fases? Qual a concentração das mesmas?

Regra da Alavanca

- Respostas

- Quais as fases presentes?
α e β coexistem.
- Qual a composição das fases? Qual a concentração das mesmas?
α = 12% Sn e 88% Pb
β = 98% Sn e 2% Pb
67,4% α e 32,6% β

Regra das Fases de Gibbs

$$P + F = C + N$$

- Regra das Fases
- P = número de fases presentes
- C = número de componentes do sistema
- N = número de variáveis além da composição
- Ex.: temperatura, pressão
- F = número de graus de liberdade
- número de variáveis que pode ser alterado de forma independente sem alterar o número de fases existente no sistema
- A regra das fases representa um critério para o número de fases que coexistirão num sistema no equilíbrio.
- A regra das fases não representa um critério para quantidade relativa das fases que coexistem num sistema no equilíbrio.

Regra das Fases de Gibbs

REGRA DAS FASES : EXEMPLO – Sistema Cu-Ag

- Região A**
 - P = 1 (α); C = 2;
 - N = 1 (pressão é fixa)
 - F = 2
 - Para descrever as fases existentes, é preciso especificar dois parâmetros (temperatura e composição)
- Região B**
 - P = 2 (fases α e L); C = 2;
 - N = 1 (pressão é fixa)
 - F = 1
 - Para descrever as fases existentes, basta especificar um parâmetro (temperatura T₁ ou composição de uma das fases, C_L ou C_α)

$$P + F = C + N$$

Sistemas Binários

- Três fases em equilíbrio
- Em um sistema binário, quando 3 fases estão em equilíbrio, o número de graus de liberdade F é zero. Assim, o equilíbrio é invariante, ou seja, o equilíbrio entre 3 fases ocorre em uma determinada temperatura e as composições das 3 fases são fixas.

As principais reações, em sistemas binários envolvendo 3 fases são:

- Eutética:** L → α + β
- Eutetóide:** γ → α + β
- Peritética:** L + α → β
- Peritetoide:** α + β → γ

Sistemas Binários

- Eutético
- Ponto onde o equilíbrio é invariante, portanto o equilíbrio entre três fases ocorre a uma determinada temperatura e as composições das três fases são fixas.

Sistemas Binários

- Eutetóide (E) e Peritético (P)

Sistemas Binários

- Desenvolvimento da microestrutura em ligas eutéticas

É muito pequena a faixa de composições químicas em que pode se formar estrutura monofásica α .

Sistemas Binários

- Desenvolvimento da microestrutura em ligas eutéticas

PRECIPITAÇÃO

- Ao ser ultrapassado o limite de solubilidade (*linha solvus*) de Sn no Pb, ocorre a precipitação da fase β , de reticulado cristalino distinto do da fase α e com distintas propriedades físico-químicas.

Sistemas Binários

- Desenvolvimento da microestrutura em ligas eutéticas
- Transformação Eutética

A transformação eutética corresponde à formação de uma mistura de duas fases ($\alpha + \beta$) a partir do líquido formando um arranjo interpenetrado

Crescimento cooperativo

Sistemas Binários

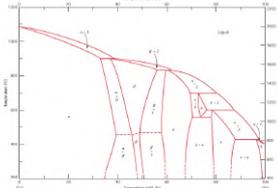
- Desenvolvimento da microestrutura em ligas eutéticas

Em ligas hipo-eutéticas ocorre inicialmente precipitação de fase primária - dendritas de α pró-eutéticas.

O líquido eutético residual L (18,3 wt% Sn) se transforma em microestrutura eutética [α (18,3% Sn)+ β (97,8% Sn)].

Sistemas Binários

- Soluções Sólidas Terminais**
 - Possuem apenas 2 fases sólidas, α e β
 - Existem ao longo de faixas de composição próximas às extremidades de concentração do diagrama de fases
- Soluções Sólidas Intermediárias**
 - Apresentam fases intermediárias.



Liga Cu-Zn

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
Escola Politécnica
DCTM - Departamento de Ciência e Tecnologia dos Materiais

Diagramas Fe-C e TTT



Transformações de Fases

- Congruentes**
 - Não existem alterações nas composições.
 - Ex.: Transformações alotrópicas e fusão de materiais puros.
- Incongruentes**
 - Existem alterações nas composições.
 - Ex.: Reações eutéticas e eutetóides, fusão de uma liga pertencente a um sistema amorfo.

Transformações de Fases

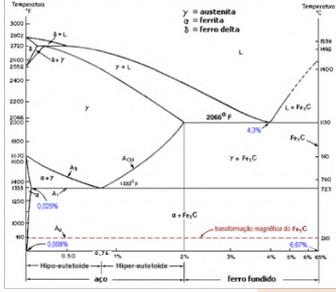
- Podem ser classificadas em três grupos distintos;**
 - Transformações dependentes de difusão sem alteração no número e/ou composição das fases;
 - Ex.: Alotropia, solidificação de metal puro, recristalização.
 - Transformações dependentes de difusão com alteração da composição e/ou número de fases;
 - Ex.: Reação eutetóide.
 - Transformações sem difusão com formação de fase metaestável.
 - Ex.: Transformação martensítica.

Transformações de Fases

- Transformações Isotérmicas:**
 - Perlita;
 - Bainita;
 - Cementita Globulizada;
 - Martensita;
- Transformações por Resfriamento Contínuo.**
- Martensita Revenida.**

Diagrama Fe – Fe₃C

- Porção mais importante do diagrama Fe - C.**



Reação eutética

Reação eutetóide

$$L \xrightarrow{\text{cooling}} \gamma + Fe_3C$$

$$L \xrightarrow{\text{heating}} \gamma + Fe_3C$$

$$\gamma (0.76 \text{ wt\% C}) \xrightarrow{\text{cooling}} \alpha (0.022 \text{ wt\% C}) + Fe_3C (6.7 \text{ wt\% C})$$

$$\alpha \xrightarrow{\text{heating}} \gamma + Fe_3C$$

Diagrama Fe – Fe₃C

- Reação eutetóide.

$\gamma (0.76 \text{ wt\% C}) \xrightarrow{\text{cooling}} \alpha (0.022 \text{ wt\% C}) + \text{Fe}_3\text{C} (6.7 \text{ wt\% C})$

heating

- Lentamente resfriado
- Formação da Perlita
- Espessura relativa da camada: 8:1

Diagrama Fe – Fe₃C

- Reação hipoeutetóide.

- Antes da eutetóide
- Após T_e, toda a fase γ se transformará em perlita;
- Ferrita α formada antes de T_e = proeutetóide
- Ferrita α formada após T_e = eutetóide

Diagrama Fe – Fe₃C

- Reação hipereutetóide.

- Após a eutetóide
- Após T_e, toda a fase γ se transformará em perlita;
- Cementita formada antes de T_e = proeutetóide
- Cementita formada após T_e = eutetóide

Diagrama Fe – Fe₃C

- Exemplo 18.

- Para uma liga composta por 99,65 %Fe e 0,35 %C, a uma temperatura imediatamente abaixo da eutetóide, determine o seguinte:

- As frações das fases ferrita total e cementita;
- As frações de ferrita proeutetóide e perlita;
- A fração de ferrita eutetóide.

Diagrama Fe – Fe₃C

- Resposta.

Diagrama Fe – Fe₃C

- Resposta.

(a) This part of the problem is solved by application of the lever rule expressions employing a tie line that extends all the way across the $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ phase field. Thus, C₀ is 0.35 wt% C, and

$$W_{\alpha} = \frac{6.70 - 0.35}{6.70 - 0.022} = 0.95$$

and

$$W_{\text{Fe}_3\text{C}} = \frac{0.35 - 0.022}{6.70 - 0.022} = 0.05$$

(b) The fractions of proeutectoid ferrite and pearlite are determined by using the lever rule, and a tie line that extends only to the eutectoid composition (i.e., Equations 10.20 and 10.21). Or

$$W_{\alpha} = \frac{0.35 - 0.022}{0.76 - 0.022} = 0.44$$

and

$$W_{\alpha} = \frac{0.76 - 0.35}{0.76 - 0.022} = 0.56$$

(c) All ferrite is either proeutectoid or eutectoid (in the pearlite). Therefore, the sum of these two ferrite fractions will equal the fraction of total ferrite, that is,

$$W_{\alpha} + W_{\alpha} = W_{\alpha}$$

where W_{α} denotes the fraction of the total alloy that is eutectoid ferrite. Values for W_{α} and W_{α} were determined in parts (a) and (b) as 0.95 and 0.56, respectively. Therefore,

$$W_{\alpha} = W_{\alpha} - W_{\alpha} = 0.95 - 0.56 = 0.39$$

Perlita

- Diagrama T-T-T.
- Boa precisão apenas para transformações isotérmicas;

$$r = \frac{1}{t_{0,5}}$$

Diagramas de Transformações Isotérmicas ou Transformação Tempo-Temperatura (TTT)

Perlita

- Espessura relativa das camadas: 8:1;
- Espessura absoluta: Depende da Temperatura.
- Temperatura imediatamente abaixo da eutetóide (grosseira);
- Temperaturas mais baixas, reduz-se a taxa de difusão (fina).

Perlita

- Perlita Grosseira X Perlita Fina

Bainita

- A transformação ocorre em temperatura inferior à de formação da perlita;
- O diagrama T-T-T é uma extensão da transformação perlítica.
- Bainita Superior 300 < T < 540 °C
- Bainita Inferior 200 < T < 300 °C

Bainita

- Microestrutura
- Bainita Superior x Bainita Inferior.

- As transformações perlíticas e bainíticas são concorrentes

Cementita Globulizada

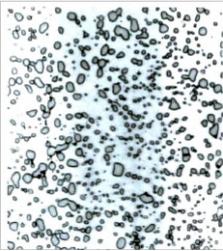
- Também conhecida como esferoidita;
- Uma liga com estrutura perlítica ou bainítica é aquecida e mantida a uma temperatura abaixo da eutetóide por um longo período de tempo;

$$\text{Aço(Perlítico/Bainítico)} \xrightarrow[18 \text{ a } 24 \text{ h}]{\text{Aquecimento } 700 \text{ } ^\circ\text{C}} \text{Cementita Globulizada}$$

- Difusão adicional de C, sem mudança nas composições das fases ferrita e cementita.
- Força motriz para essa transformação é a redução na área dos contornos entre as fases α e Fe_3C .

Cementita Globulizada

- **Microestrutura:**
- Partículas esféricas de Fe_3C dispersas em uma matriz contínua da fase α .



Martensita

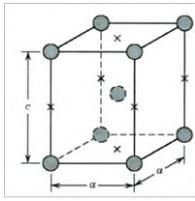
- Uma liga com estrutura austenítica é resfriada rapidamente até uma temperatura relativamente baixa (próxima à ambiente);
- A taxa é tão alta que previne a difusão do C.

Austenita (CFC) $\xrightarrow[\text{Elevadas Taxas}]{\text{Resfriamento}}$ Martensita (TCC)

- É uma estrutura monofásica que não se encontra em equilíbrio;
- Resulta de uma transformação não-difusional da austenita.

Martensita

- Compete com a formação da perlita e da bainita;
- Qualquer difusão que ocorra, resultará na formação das fases ferrita e cementita.
- Estrutura CFC apresenta uma transformação polimórfica para TCC;
- Por não haver difusão, a transformação ocorre quase que instantaneamente;
- Por ser uma fase fora do equilíbrio, não aparece no diagrama de fases Fe- Fe_3C .



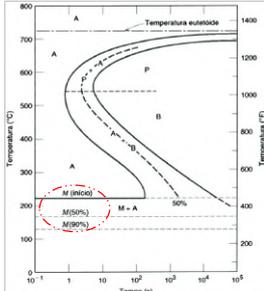
Martensita

- **Microestrutura:**
- Placas ou agulhas;
- Pode existir alguma austenita residual, que não sofreu transformação.



Martensita

- Por ocorrer sem difusão e de forma instantânea, é representada no diagrama T-T-T como linhas horizontais.



Martensita Revenida

- **Martensita:** Muito dura e muito frágil;
- Pouco utilizável.
- **Martensita → Revenimento → Revenido;**
- Aquecimento até uma temperatura abaixo da eutóide por um tempo específico.

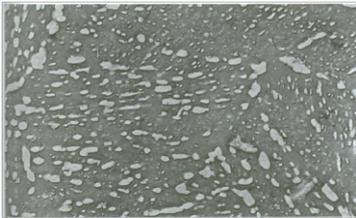
Martensita TCC Monofásica $\xrightarrow{250-650\text{ }^\circ\text{C}}$ Martensita Revenida Fase α + Fe_3C

- O revenimento melhora a ductilidade e a tenacidade da martensita;
- Aumento do tamanho das partículas.



Martensita Revenida

- **Microestrutura:**
- Partículas de cementita extremamente pequenas e uniformemente distribuídas em uma matriz contínua de ferrita.



Fragilização por Revenido

- **Redução na tenacidade devido ao revenimento.**
- Medida por ensaio de impacto;
- Propagação de trincas é intergranular.
- **Ocorrência:**
- 1) O aço é revenido a uma temperatura acima de 575 °C, seguido por um resfriamento lento, até a temperatura ambiente;
- 2) O aço é revenido entre 375°C e 575°C.



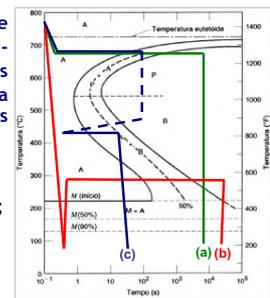
Fragilização por Revenido

- **Consequências:**
- Elementos de liga e impurezas segregam nos contornos de grãos.
- **Como evitar:**
- 1) Controle da composição;
- 2) Revenido abaixo de 375°C ou acima 575°C, seguido por resfriamento rápido (têmpera) até temperatura ambiente.



Diagrama Fe – Fe₃C

- **Exemplo 19.**
- **Esboce e identifique sobre o diagrama tempo-temperatura (TTT) as trajetórias utilizadas para produzir as seguintes microestruturas:**
- a) 100% perlita grosseira;
- b) 100% martensita revenida;
- c) 50% perlita grosseira, 25% bainita e 25% martensita



Desequilíbrio

- **Resfriamento fora das condições de equilíbrio.**
- Supõe-se que, durante o resfriamento, as condições de equilíbrio metaestável eram continuamente mantidas;
- Situação impraticável na maioria das situações por serem muito lentas;
- 2 efeitos importantes:
- 1) A ocorrência de mudanças ou transformações de fases em temperaturas não previstas;
- 2) Existência de temperatura ambiente de fases fora do equilíbrio que não aparecem no diagrama de fases.



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
Escola Politécnica
DCTM - Departamento de Ciência e Tecnologia dos Materiais

Tratamentos Térmicos e Termoquímicos





Introdução

- **Finalidade:**
- Alterar a microestrutura e, como consequência, as propriedades mecânicas das ligas metálicas;



Introdução

- **Objetivos**
- Remoção de tensões internas (oriundas de esfriamento desigual, trabalho mecânico, etc.);
- Aumento ou diminuição da dureza;
- Aumento da resistência mecânica;
- Melhora da ductilidade;
- Melhora da usinabilidade;
- Melhora da resistência ao desgaste;
- Melhora das propriedades de corte;
- Melhora da resistência à corrosão;
- Melhora da resistência ao calor.



Introdução

- **Fatores**
- Tempo de aquecimento;
- Temperatura;
- Velocidade de resfriamento;
- Composição química;
- Atmosfera.



Tipos de Tratamento

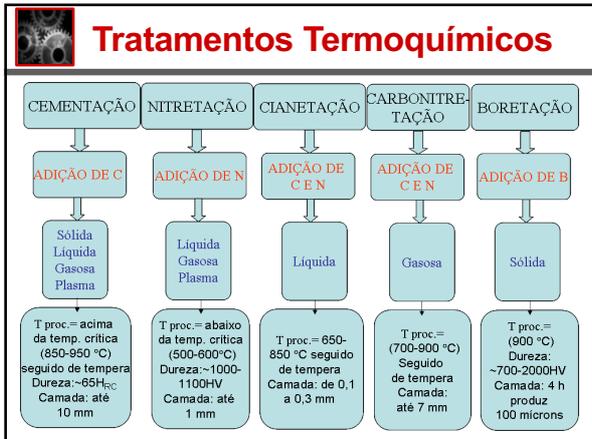
- **Térmicos:**
- Por meio de simples aquecimento e resfriamento, são modificadas as propriedades de toda a massa do aço.
- **Isotérmicos:**
- Utilizados apenas em aços-ligas;
- Diferença do tratamento térmico: resfriamento em óleos e sais fundidos, evitando trincas e rachaduras.
- **Termoquímicos:**
- Modificam as propriedades superficiais da peça, aquecendo-a juntamente com produtos químicos e posteriormente resfriando-a.

Tratamentos Térmicos



Tratamentos Termoquímicos





Trabalho 1

- Fazer um trabalho sobre metais e ligas:
 - Equipe 1 : Ferros Fundidos Cinzentos e Nodular;
 - Equipe 2 : Ferros Fundidos Branco e Maleável;
 - Equipe 3 : Aços Inox Martensíticos, Ferríticos e Austeníticos;
 - Equipe 4 : Aços Inox Duplex e Endurecíveis por Precipitação;
 - Equipe 5 : Ligas não ferrosas: Bronzes + Ligas de Ti;
 - Equipe 6 : Ligas não ferrosas: Latões (Cu-Zn) + Ligas refratárias;
 - Equipe 7 : Ligas não ferrosas: Liga Cu-Ni + Ligas de Al. ★

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
Escola Politécnica
DCTM - Departamento de Ciência e Tecnologia dos Materiais

Corrosão

Introdução

- Definição
 - Ataque destrutivo e não intencional de um metal;
 - Deterioração e/ou perda de propriedades do material devido a ação química ou eletroquímica do meio ambiente, aliado ou não a esforços mecânicos.
- Começa normalmente pela superfície;
- Significativas perdas econômicas.
 - ¼ do aço produzido mundialmente;
 - 3 - 5% do PIB de uma nação industrializada.

Introdução

- Os compostos tendem a buscar o estado de menor energia.
 - Para METAIS: o estado de menor energia → óxidos metálicos (ou sulfetos ou carbonatos);
 - Exceções: Ouro (Au) e Platina (Pt).
- Corrosão: inverso da metalurgia extrativa;

Introdução

- Benefícios da corrosão.
 - Baterias de pilhas secas: geração de energia elétrica pela ação do processo de corrosão;
 - Eletro-polimento.

Obtenção de superfícies lisas e polidas.
E no processo de preparação de amostras para a microscopia eletrônica de transmissão.

Introdução

- Meios Corrosivos:
 - **Atmosfera:** poeira, poluição, umidade, gases (CO, CO₂, SO₂, H₂S, NO₂,...);
 - **Água:** bactérias (corrosão microbiológica), chuva ácida, etc;
 - **Solo:** acidez, materiais orgânicos, umidade, sais;
 - **Produtos químicos:** HCl, NaOH, etc.

Um determinado meio pode ser extremamente agressivo, sob o ponto de vista da corrosão, para um determinado material e inofensivo para outro

Oxidação / Redução

- Oxidação: Aumento algébrico do NOX.
- Redução: Diminuição algébrica do NOX.

Numero de Oxidação

$\xleftarrow{\text{Redução}}$
 ... -5 -4 -3 -2 -1 0 +1 +2 +3 +4 +5 ...
 $\xrightarrow{\text{Oxidação}}$

- Termos Elétricos

Oxidação é a perda de elétrons por uma espécie química e redução é o ganho de elétrons. Exemplos:

Fe \rightarrow Fe⁺² + 2e (Oxidação do ferro)

Cl₂ + 2e \rightarrow 2 Cl⁻ (redução do Cloro)

Oxidação / Redução

- Uma corrosão eletroquímica global deve consistir em pelo menos uma reação de oxidação e uma reação de redução;
- A taxa total de oxidação deve ser igual à taxa total de redução;
- Todos os elétrons gerados na oxidação devem ser consumidos na redução.
- O material que sofre redução é o catodo e o que sofre oxidação é o anodo.

Potencial de Eletrodo

- Nem todos os metais oxidam com a mesma facilidade;
- Pilha Eletroquímica (eletrodos de Fe e Zn);

Fe electrodeposita (catodo)

Zn corrói (anodo)

- Par Galvânico;
- Diversos pares de eletrodos \rightarrow diferentes V.

Potencial de Eletrodo

- Metais podem ser classificados de acordo com a sua tendência em sofrer oxidação quando acoplados a outros metais;
- Eletrodo de H \rightarrow adotado como referência;
- Série de Potenciais de Eletrodo.
- Verificar a espontaneidade de uma reação;
- Série gerada sob condições ideais;
- Utilidade Limitada.

Potencial de Eletrodo

- Série de Potenciais de Eletrodo Padrão

| Reação do Eletrodo | Potencial de Eletrodo Padrão, V ^o (V) |
|--|--|
| Au ³⁺ + 3e ⁻ \rightarrow Au | +1,420 |
| O ₂ + 4H ⁺ + 4e ⁻ \rightarrow 2H ₂ O | +1,229 |
| Pt ²⁺ + 2e ⁻ \rightarrow Pt | +1,2 |
| Ag ⁺ + e ⁻ \rightarrow Ag | +0,800 |
| Fe ³⁺ + e ⁻ \rightarrow Fe ²⁺ | +0,771 |
| O ₂ + 2H ₂ O + 4e ⁻ \rightarrow 4(OH ⁻) | +0,401 |
| Cu ²⁺ + 2e ⁻ \rightarrow Cu | +0,340 |
| 2H ⁺ + 2e ⁻ \rightarrow H ₂ | 0,000 |
| Pb ²⁺ + 2e ⁻ \rightarrow Pb | -0,126 |
| Sn ²⁺ + 2e ⁻ \rightarrow Sn | -0,136 |
| Ni ²⁺ + 2e ⁻ \rightarrow Ni | -0,250 |
| Co ²⁺ + 2e ⁻ \rightarrow Co | -0,277 |
| Cd ²⁺ + 2e ⁻ \rightarrow Cd | -0,403 |
| Fe ²⁺ + 2e ⁻ \rightarrow Fe | -0,440 |
| Cr ³⁺ + 3e ⁻ \rightarrow Cr | -0,744 |
| Zn ²⁺ + 2e ⁻ \rightarrow Zn | -0,763 |
| Al ³⁺ + 3e ⁻ \rightarrow Al | -1,662 |
| Mg ²⁺ + 2e ⁻ \rightarrow Mg | -2,363 |
| Na ⁺ + e ⁻ \rightarrow Na | -2,714 |
| K ⁺ + e ⁻ \rightarrow K | -2,924 |



Potencial de Eletrodo

- Espontaneidade da Reação



Se $\Delta V^0 > 0 \rightarrow$ reação espontânea

Se $\Delta V^0 < 0 \rightarrow$ reação inversa



Série Galvânica

- Representa as reatividades relativas de diversos metais e ligas comerciais na água do mar.

- Classificação mais realística.

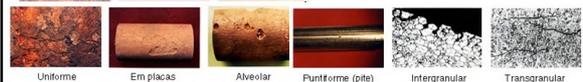
- As ligas próximas ao topo são catódicas (não reativas) e as da parte de baixo são mais anódicas, ou seja, mais ativas.



Série Galvânica

| | |
|---|---|
| ↑ | Progressivamente mais inerte (catódico) |
| ↓ | Progressivamente mais ativo (anódico) |

| |
|--|
| Platina Ouro Grafita Titânio Prata Aço inoxidável 316 (passivo) Aço inoxidável 304 (passivo) Inconel (80Ni-13Cr-7Fe) (passivo) Níquel (passivo) Monel (70Ni-30Cu) Ligas cobre-níquel Bronzes (ligas Cu-Sn) Cobre Latões (ligas Cu-Zn) Inconel (ativo) Níquel (ativo) Estanho Chumbo Aço inoxidável 316 (ativo) Aço inoxidável 304 (ativo) Ferro fundido Ferro e aço Ligas de alumínio Cádmio Alumínio comercialmente puro Zinco Magnésio e ligas de magnésio |
|--|



Formas de Corrosão



Classificação

- Formas de Classificar:

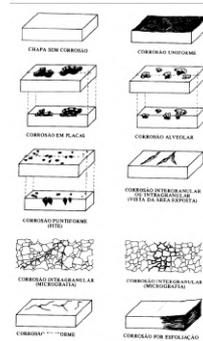
- Morfologia;
- Causas ou Mecanismos;
- Meio Corrosivo;
- Localização do Ataque.



Formas de Corrosão

- Classificação:

- Uniforme;
- Galvânica;
- Em frestas;
- Puntiforme (pites);
- Intergranular;
- Lixívia seletiva;
- Erosão-corrosão;
- Corrosão sob tensão;
- Fragilização por H (falha)





Corrosão Uniforme

- Ocorre com a mesma intensidade em toda a superfície exposta;
- Microscopicamente, as reações de oxidação e redução ocorrem aleatoriamente sobre a superfície.
- Geralmente deixa uma incrustação;
- Forma mais comum de corrosão.
- É também a forma menos questionada, pois pode ser prevista em projeto com facilidade.



Corrosão Galvânica

- Ocorre quando dois metais ou ligas de composições diferentes são acoplados eletricamente ao mesmo tempo que são expostos a um eletrólito;
- O metal menos nobre (mais reativo) sofrerá corrosão e o mais inerte (catodo) será “protegido”.
- Série Galvânica;
- Taxa de ataque galvânico
- $f (A_{\text{catodo}}/A_{\text{anodo}})$;
- $\uparrow (A_{\text{catodo}}/A_{\text{anodo}}) \Rightarrow \uparrow \text{ taxa}$



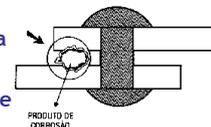
Corrosão Galvânica

- A taxa depende da densidade de corrente por unidade de área da superfície corroída;
- Medidas de prevenção:
- Usar metais que estejam próximos na série galvânica;
- Evitar uma razão desfavorável entre as áreas das superfícies do anodo e do catodo (anodo deve ser maior);
- Isolar eletricamente metais não semelhantes;
- Conectar eletricamente um terceiro metal com características anódicas (proteção catódica).



Corrosão em Frestas

- Ocorre como consequência de diferenças na concentração de íons ou gases dissolvidos na solução eletrolítica e entre duas regiões da mesma peça metálica;
- A corrosão ocorre no local que possui a menor concentração de O.
- Tamanho da fresta:
- Larga o suficiente para que a solução penetre.
- Estreita o suficiente para que o fluido fique estagnado.



Corrosão em Frestas

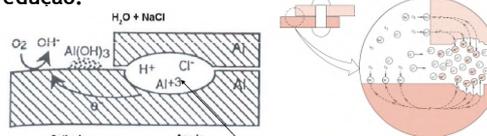
- As frestas podem ser formadas:
- Devido a geometria de um sistema, como no caso de placas rebitadas;
- Devido ao contato com não-metais, tais como plásticos, borrachas, etc. (revestimento mal selado);
- Devido a depósitos de sujeiras ou produtos de corrosão.
- Após o oxigênio ser exaurido no interior da fresta, a oxidação do metal ocorre nessa posição.



Corrosão em Frestas

- Os mecanismos da corrosão em frestas são:
- Pilhas de concentração de oxigênio;
- Variações de pH local.

Os elétrons dessa reação eletroquímica são conduzidos através do metal para regiões externas adjacentes, onde serão consumidos em reações de redução.



Corrosão em Frestas

- **Prevenção:**
 - Atuar no projeto para que se evite frestas;
 - Uso de junções soldadas ao invés de rebitas;
 - Remoção frequente de depósitos acumulados.



EVITAR



ADOTAR

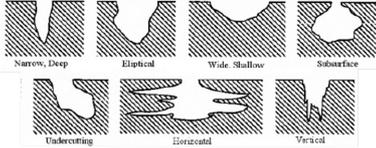
Corrosão Puntiforme (por pites)

- Caso extremo de corrosão localizada que pode levar à falha em serviço de modo rápido e traiçoeiro;
 - Pequena perda de material;
 - Podem promover pontos de início de trincas;
 - Diminuir a área de resistência total;
 - Penetrar totalmente na seção e promover vazamentos de gases ou líquidos;
- Penetra da superfície para o interior, em uma direção praticamente vertical.



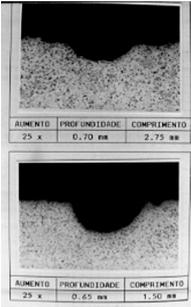
Corrosão Puntiforme (por pites)

- Todos os fatores da corrosão sob frestas são aplicados:
 - Defeito superficial localizado (arranhões);
 - Pequena área anódica com relação a catódica;
 - Diferença de concentração;
- **Formas de Pite (ASTM)**



Corrosão Puntiforme (por pites)

- **Profundidade de Pite.**





Corrosão Puntiforme (por pites)

- **Prevenção:**
 - Evitar soluções concentradas com íons agressivos;
 - Polir as superfícies;
 - Revestimento da superfície metálica com metal mais anódico;
 - Usar proteção catódica.



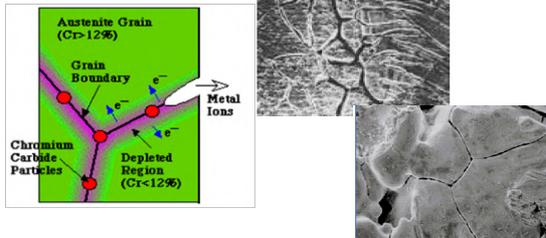
Corrosão Intergranular

- Ocorre no contorno do grão, devido à formação de pilhas locais entre um composto intermetálico e a matriz do grão;
- A corrosão fragiliza o material mecanicamente;
- As trincas ou perda de material podem ocorrer nos contornos do grão ou ao redor dos contornos.



Corrosão Intergranular

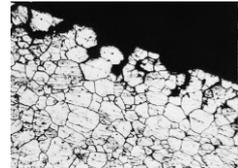
- O contorno de grão funciona como região anódica, devido ao grande número de discordâncias presentes nessa região.



Corrosão Intergranular

• **Prevenção (aço inoxidável):**

- Submeter o material a um tratamento térmico em temperatura elevada, onde todas as partículas de carbeto sejam dissolvidas;
- Reduzir o teor de C (< 0,03%p C) para minimizar a formação de carbetos;
- Adicionar ao aço inoxidável outro metal com maior tendência a formar carbetos.



Lixívia Seletiva

- Encontrada em ligas formadas por solução sólida e ocorre quando um elemento ou constituinte é removido preferencialmente;
- O elemento seletivamente removido é o mais anódico na matriz;
- Nenhuma evidência visível de perda de material, ou alteração dimensional ou pites;
- O metal muda de cor e perda de propriedades mecânicas.
- As propriedades da liga são comprometidas, uma vez que apenas uma massa porosa da matriz permanece.



Lixívia Seletiva

• **Casos mais comuns:**

| Elemento | Removido da liga | Nome da corrosão |
|----------|----------------------|-------------------|
| Al | Cu – Al | Desaluminização |
| Co | Estellite (Co-Cr-W) | Descolbatificação |
| Cu | Cu-Au ou Cu-Ag | Descobreação |
| Mn | Cu-Mn | Desgamanização |
| Ni | Cu-Ni | Niquelificação |
| Si | Si-Cu | Desiliconificação |
| Fe | Fe-C (Ferro Fundido) | Corrosão gráfrica |
| Zn | Cu-Zn (latão) | Dezincificação |

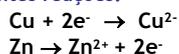
- A dezincificação é o caso mais comum.



Lixívia Seletiva

• **Mecanismo:**

- Ocorrem em soluções de Ph variante. Favorecida por pela elevada concentração de Cl⁻, altas temperaturas, frestas e depósitos sobre a superfície.
- O ataque ocorre em regiões ricas do metal mais anódico, no caso do latão, o zinco. O zinco passa para a solução tornando a região rica em cobre (Cu).
- Desta forma cria-se um sistema de células locais anódica e catódica. No caso do latão, a região anódica é o zinco e a catódica é o cobre. A reação anódica com relação a região rica em zinco é:



O Cu²⁺ volta a se depositar no catodo de cobre e o Zn²⁺ se combina com OH⁻ e vai para a solução, tendo como resultado final apenas a remoção do Zn da matriz.



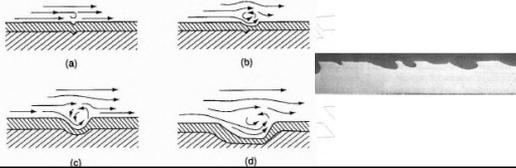
Erosão-corrosão

- Surge da ação combinada de um ataque químico com a abrasão (ou desgaste mecânico), como consequência do movimento de um fluido;
- A película de proteção é removida pela ação abrasiva de fluidos (ou gases);
- Diferentes tipos de meios corrosivos podem causar a erosão-corrosão: soluções aquosas, fluidos orgânicos, gases e metais líquidos;
- O ataque ocorre onde a película foi removida;
- A ação abrasiva pode ser causada por partículas sólidas (produtos de corrosão, pós e sais insolúveis)



Erosão-corrosão

- **Visualmente fácil de identificar;**
- A corrosão é caracterizada morfologicamente por sulcos, superfície ondulada, buracos arredondados e valas que mostram um padrão direcional;
- A superfície fica isenta dos produtos da corrosão pelo próprio processo erosivo;



Erosão-corrosão

- **A velocidade é o fator fundamental na erosão-corrosão.**
- Até determinado valor, a influência da velocidade é pouco significativa até um ponto em que ela se torna crítica (velocidade crítica) e o ataque se torna acelerado.

INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE NA TAXA DE CORROSÃO

| Material | Taxas de Corrosão Típicas (mdd) | | |
|---------------------------|---------------------------------|------------------------|------------------------|
| | 30,48 cm.s ⁻¹ | 122 cm.s ⁻¹ | 823 cm.s ⁻¹ |
| Aço-carbono | 34 | 72 | 254 |
| Ferro fundido | 45 | — | 270 |
| Bronze-silício | 1 | 5 | 343 |
| Latao de almirantado | 2 | 20 | 170 |
| Bronze-alumínio (10%) | 5 | — | 236 |
| Latao de alumínio | 2 | — | 105 |
| 90-10 Cu-Ni (0,8% Fe) | 5 | — | 99 |
| 70-30 Cu-Ni (0,05% Fe) | 2 | — | 199 |
| Aço inoxidável (Tipo 316) | 1 | 0 | 1 |
| Titânio | 0 | — | 0 |



Erosão-corrosão

- **Prevenção:**
- Utilizar materiais com maior dureza superficial;
- Projetar peças que gerem fluxo menos turbulentos e mais laminares;
- Adotar seções maiores para reduzir velocidade do meio;
- Revestir peças com materiais termoplásticos ou metálicos com dureza maior;
- Proteção catódica.



Corrosão sob Tensão

- **Também conhecida como “trincamento por corrosão sob tensão”;**
- **Resulta da ação combinada da aplicação de uma tensão de tração e de um ambiente corrosivo, simultaneamente.**
- As trincas se formam e se propagam perpendicularmente à tensão;
- O comportamento é típico de de um material frágil, apesar da liga ser dúctil.



Corrosão sob Tensão

- **O trincamento é, freqüentemente, transgranular, isto é, se desenvolve rompendo todo o grão, sem a preferência de propagação segundo os contornos de grão;**
- As trincas se formam sob níveis de tensão relativamente baixos (menores que o LRT).



Corrosão sob Tensão

- **O tempo de ocorrência da falha depende:**
- **Tensão;**
Quanto maior, menor o tempo por isto deve-se evitar entalhes e pites que são concentradores de tensão.
- **Concentração do meio;**
- **Temperatura;**
- **Estrutura.**
Ligas com grão menores resistem mais do que ligas com grão maiores. (Tenacidade a fratura).



Corrosão sob Tensão

- **Prevenção:**
 - Redução dos níveis de tensão;
- Recozimento;
- Aumento da seção da peça;
- Redução da carga aplicada.
- Eliminação de agentes críticos do ambiente, utilizando, por exemplo, processos de degaseificação, desmineralização ou destilação.



Fragilização por H

- **Tipo de falha produzida pelo H gerado a partir das reações de corrosão;**
- Redução significativa na ductilidade e no LRT quando o H atômico difunde intersticialmente na rede cristalina;
- Concentrações reduzidas podem levar ao trinca-mento.
- **Fratura Frágil (catastrófica);**
- **Presença de compostos à base de enxofre aceleram o processo.**



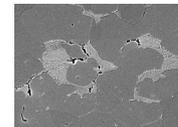
Fragilização por H

- **Mecanismos:**
 - A maior parte se combina molecularmente escapando como bolhas de gás H₂;
 - A fração que penetra é determinada pela presença de substâncias que retardam a formação de H molecular (H₂) e aumentam o tempo de residência do H atômico sobre a superfície;
 - Substâncias que retardam a formação do H₂: Sulfeto, cianeto, arsênico, selênio, P e antimônio;
 - A fração que penetra (dissolução) pode formar hidretos [ex: TiH₂] ou incorpora-se na malha cristalina [H].



Fragilização por H

- **Prevenção:**
 - Deve-se evitar a presença de fontes de H;
 - Pós-aquecimento em torno de 190° C;
- Permitir a difusão e escape do H adsorvido.**
- Tratamento térmico de alívio de tensões que reduzem as tensões e auxiliam no escape do H;
- Não utilizar soldas de encaixes ou rosqueadas, que possam reter H.



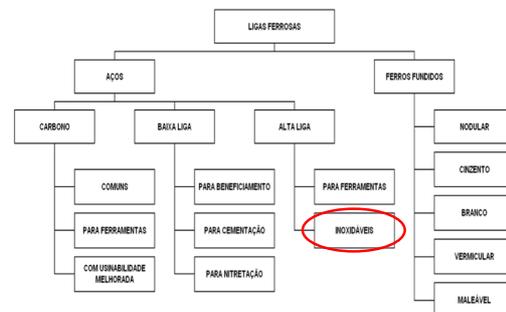
UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
Escola Politécnica
DCTM - Departamento de Ciência e Tecnologia dos Materiais

Aço Inoxidável



Introdução

- **Fluxograma de ligas ferrosas**





Ligas Ferrosas

- São ligas metálicas onde o ferro é o principal constituinte;
- São produzidas em maior quantidade que qualquer outro tipo de material;
- Largamente aplicadas como materiais de engenharia.



Ligas Ferrosas

- Sua ampla utilização se deve principalmente a três fatores:

1. Abundância de minérios contendo ferro;
2. Ligas ferrosas podem ser produzidas através de técnicas relativamente baratas de extração, refino, adição de elementos de liga e conformação mecânica;
3. São versáteis, podendo ser produzidas dentro de uma ampla variedade de propriedades mecânicas, químicas e físicas.



Ligas Ferrosas

- As ligas ferrosas são divididas em dois grandes grupos, de acordo com o teor de carbono presente em cada uma:
 - Aços: Teor de carbono inferior a 2,14 %C;
 - Ferros fundidos: Teor de carbono acima de 2,14 %C até 6,67 %C.



Aços

- São ligas metálicas constituídas por ferro e carbono.
- Podem conter quantidades significativas de elementos de liga, dando origem aos aços liga, inoxidáveis, ferramentas, etc.
- Suas propriedades são fortemente influenciadas pelo teor de carbono presente.



Aços

- Aumento do teor de C.
 - Propriedades que aumentam: Dureza, resistência mecânica, resistência ao desgaste, temperabilidade;
 - Propriedades que diminuem: Ductilidade, tenacidade.

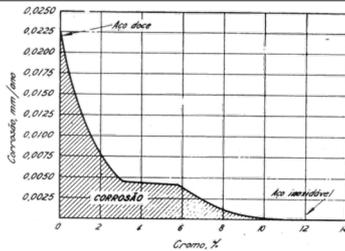


Aços Inoxidáveis

- Principal característica: a resistência à corrosão, mesmo em ambientes de alta temperatura ou temperaturas criogênicas (Temperaturas muito baixas);
- Contém um mínimo de 10,5% de Cromo como principal elemento de liga;
- O Cr, em contato com o oxigênio, permite a formação de uma finíssima película de óxido de cromo (Cr_2O_3) sobre a superfície do aço, que é impermeável e insolúvel em meios corrosivos usuais.



Aços Inoxidáveis



- Ni, Mb, C, Ti, Al, Si, N e Se podem ser adicionados para a obtenção de características mecânicas particulares.



Aços Inoxidáveis

- Principais características da película passivadora de óxidos e hidróxidos de cromo:
 - Resistente e Uniforme;
 - Excelente aderência e plasticidade;
 - Baixa porosidade;
 - Volatilidade e solubilidade praticamente nulas.



Aços Inoxidáveis

- Efeitos de Algumas Adições:
 - Cr: Formação da película protetora (+)
Restringe a formação de austenita (-)
 - Ni: Formação da película protetora (+)
Favorece a formação de austenita (+)
Melhora Propriedades Mecânicas (+)
Custo Elevado (-)
 - Mn: Aumento da resistência à corrosão por pites (+)
Favorece a formação de austenita (+)
Melhoria no LRT e soldabilidade (+)
 - Mo: Estabilidade do filme na presença de Cl⁻(+)
Aumento da resistência à corrosão por pites e em frestas (+)



Aços Inoxidáveis

- Classificação
 - Os aços inoxidáveis são divididos em cinco famílias, de acordo com a microestrutura, estrutura cristalina das fases presentes ou tratamento térmico utilizado;
 - As cinco famílias são: *martensíticos, ferríticos, austeníticos, duplex (austenítico e ferrítico) e endurecíveis por precipitação.*

Corrosão em Estruturas de Concreto Armado



Corrosão



Corrosão

Corrosão

Corrosão

Corrosão uniforme

Trincas de corrosão sob tensão

— direção do carregamento —

Corrosão por pite

N = 2,6 x 10⁴ 7 x 10⁴ 8 x 10⁴ 9 x 10⁴

5 μm

Despassivação da Armadura

- **Despassivação por Carbonatação**
 - Ação do gás carbônico da atmosfera que penetra por difusão e reage com os hidróxidos alcalinos da solução dos poros do concreto reduzindo o pH. (Não perceptível a olho nu).
- **Despassivação por elevado teor de íons cloreto (cloretos)**
 - Penetração de cloretos por difusão, impregnação ou absorção capilar de águas contendo teores de cloreto que despassivam a superfície do aço e iniciam a corrosão.

154

Despassivação da Armadura

- **Despassivação por Carbonatação**
 - Ação do gás carbônico da atmosfera que penetra por difusão e reage com os hidróxidos alcalinos da solução dos poros do concreto reduzindo o pH. (Não perceptível a olho nu).
- **Despassivação por elevado teor de íons cloreto (cloretos)**
 - Penetração de cloretos por difusão, impregnação ou absorção capilar de águas contendo teores de cloreto que despassivam a superfície do aço e iniciam a corrosão.

155

Corrosão

- **Íons Cloreto**
 - **Fontes**
 - Uso de aceleradores de pega que contêm CaCl₂;
 - Impurezas (agregados e água);
 - Atmosfera;
 - Sais de degelo;
 - Processos Industriais.
 - **Formas no concreto**
 - Quimicamente Combinados (cloroaluminatos);
 - Adsorvidos na superfície dos poros capilares;
 - Livres, na solução dos poros.

Cl⁻ Quimicamente Ligado

Cl⁻ Adsorvido

Cl⁻ Livres

156

Corrosão

- Íons Cloreto
- Eletrólito forte (NaCl) → aumento de condutividade;
- Podem destruir a película passivadora proporcionada pelo meio alcalino e acelerar permanentemente a corrosão, sem consumir-se;

$$\text{Fe}^{3+} + 3\text{Cl}^- \rightarrow \text{FeCl}_3 + \text{H}_2\text{O}$$

$$\text{FeCl}_3 + 3\text{OH}^- \rightarrow 3\text{Cl}^- + \text{Fe(OH)}_3$$

157

Corrosão

- Íons Cloreto
- Diferença de potencial entre as áreas anódicas (-0,5 V) e as partes catódicas (-0,1V) gera uma diferença de potencial de 0,4V

158

Corrosão

- Íons Cloreto

159

Corrosão

- Íons Cloreto
- Detecção:
- Retirada de Testemunhos - Análise Química a cada profundidade;
- Solução de AgNO_3
Precipitado Branco (AgCl) → Cl^- livre
Precipitado Marrom → ausência de Cl^- livre
- Dissolução em ácido ou água.

160

Corrosão

- Corrosão das Armaduras
- ~~Oxidação (corrosão química);~~
- Ação Eletroquímica (criação de pilhas eletroquímicas);

161

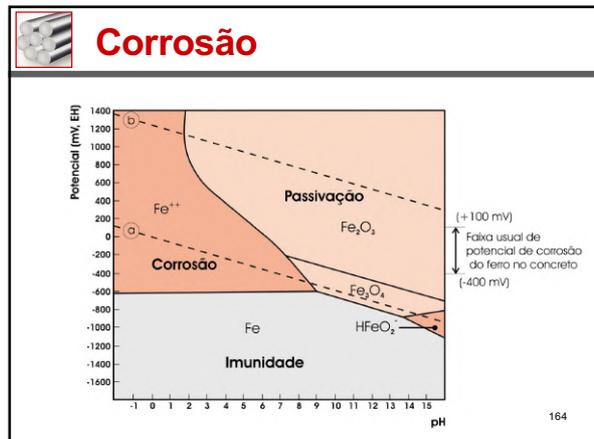
Corrosão

- Corrosão das Armaduras
- Ação Eletroquímica (criação de pilhas eletroquímicas)
- UR > 60%;
- Formação de óxidos e hidróxidos de ferro, produtos de corrosão avermelhados, pulverulentos e porosos, denominados ferrugem;
- Deve existir um eletrólito.
- Deve existir uma diferença de potencial.
- Deve existir oxigênio.
- Podem existir agentes agressivos.

162

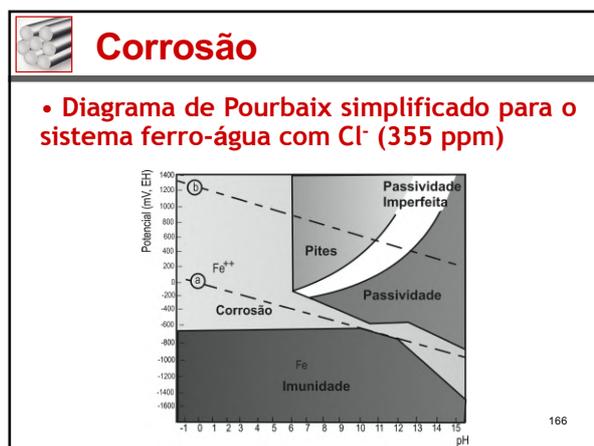
Corrosão

- Corrosão das Armaduras**
- Passivação
 - Elevação do seu potencial de corrosão em qualquer meio de pH > 2, de modo a estar na região de passivação (inibidores anódicos);
 - Abaixamento de seu potencial de corrosão, com o fim de passar ao domínio da imunidade (proteção catódica) e;
 - Manter o meio com pH acima de 10,5 e abaixo de 13, que é o meio natural proporcionado pelo concreto, desde que seja homogêneo e compacto.



Corrosão

- Principais causas de destruição do filme de óxidos:**
- 1. Redução do pH resultante da carbonatação
- 2. Presença de cloretos no concreto junto às armaduras.



Corrosão

Morfologia do produto de corrosão formado na região da armadura

Morfologia do produto de corrosão após passagem pelos poros do concreto.

Carbonatação

- Mecanismo**
- Gás carbônico (CO₂), Dióxido de enxofre (SO₂) e Gás sulfídrico (H₂S);
- Redução do pH; $Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O$
- $2Na,K(OH) + CO_2 \rightarrow Na_2,K_2CO_3 + H_2O$
- pH CaCO₃ = 9,4;
- Influência da relação a/c;
- Influência da Umidade;
- Presença de Adições
- Reduz a reserva alcalina

Carbonatação

$e_{CO_2} = k\sqrt{t}$

Difusão do CO_2 em poros cheios de ar

Reação Química com a Portlandita
 $Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O$

Redução do pH
 pH: de 12,5 \rightarrow < 9

MODELO

Poros

Difusão

Profundidade de Carbonatação

169

Carbonatação

- Frente de carbonatação.

CARBONATAÇÃO COMO AGENTE DA CORROSÃO

CO₂

COBRIMENTO

pH < 9

pH > 12

(CASTRO, 2002)

170

Carbonatação

- Diagrama de Equilíbrio Termodinâmico do Sistema Fe-H₂O a 25°C - Diagrama de Pourbaix.

Potencial (mV, EN)

pH

Corrosão

Passivação

Imunidade

Fe²⁺

Fe₂O₃

Fe₃O₄

Fe

HFeO₄⁻

Faixa usual de potencial de corrosão do ferro no concreto (-400 mV)

(+100 mV)

(-400 mV)

171

Carbonatação

Taxa de corrosão (ppm)

pH

Início de desprendimento de H₂

172

Carbonatação

Poros

Concreto

Filme de Água

Ar (+ CO₂)

173

Carbonatação

BAIXA UR

ALTA UR

SATURADO

GRAU DE CARBONATAÇÃO

UMIDADE RELATIVA DO AR %

174



Métodos de Proteção contra a Corrosão



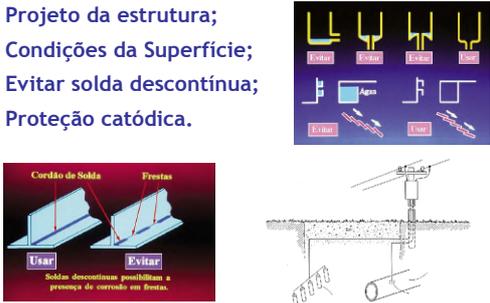
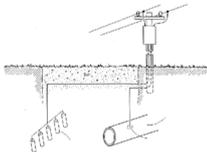

Principais Métodos

- Baseados na modificação do processo;
- Baseados na modificação do meio corrosivo;
- Baseados na modificação do metal;
- Baseados nos revestimentos protetores.



Principais Métodos

- Baseados na modificação do processo:
 - Projeto da estrutura;
 - Condições da Superfície;
 - Evitar solda descontínua;
 - Proteção catódica.


Principais Métodos

- Baseados na modificação do meio corrosivo:
 - Desaeração da água ou solução neutra;
 - Purificação ou diminuição da umidade do ar;
 - Adição de inibidores de corrosão.





Principais Métodos

- Baseados na modificação do metal.
 - Aumento da Pureza;
 - Adição de elementos de liga;
 - Tratamento Térmico.




Principais Métodos

- Baseados nos revestimentos protetores:
 - Revestimentos com produtos da reação; Tratamento químico ou eletroquímico da superfície
 - Revestimentos orgânicos; Tintas, resinas ou polímeros, etc.
 - Revestimentos inorgânicos; Esmaltes, cimentos, etc.
 - Revestimentos Metálicos;
 - Protetores Temporários.



Principais Métodos

- Baseados nos revestimentos protetores:

| Tipo | Exemplo | Vantagens | Desvantagens |
|----------|---------------------------------|--|--|
| Orgânica | Tintas | Flexibilidade Facilidade de aplicação Baixo custo | Oxida Camada mole (relativamente) Limitações de temperaturas |
| Metálica | Metais nobres eletrodepositados | Deformável Insolúvel em soluções orgânicas Condutividade térmica | Formam células galvânicas, ao serem perfuradas |
| Cerâmica | Esmaltes vítreos | Resistência à temperatura Dureza Não formam células com o metal base | Fragilidade Isolantes térmicos |




UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
Escola Politécnica
DCTM - Departamento de Ciência e Tecnologia dos Materiais

Materiais de Construção I

UNIDADE II

Ensaios Mecânicos, Aços Inoxidáveis, Ligas não ferrosas, Diagramas de Fase, TTT e Corrosão

Prof. Dr. Daniel Véras Ribeiro
verasribeiro@hotmail.com

