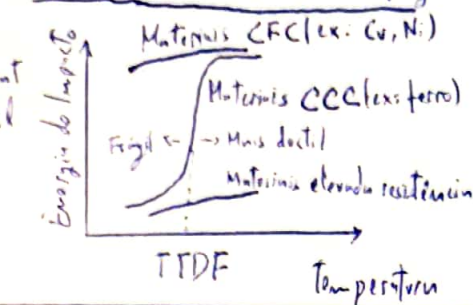


Propagação da fenda:

frágil > plástico > tensão crítica

Temperatura de transição dútil-frágil:



$$\sigma_c = \left(\frac{2 E \gamma_s}{rca} \right)^{1/2}$$

metade do comprimento da fenda
energia de superfície específica (por área)

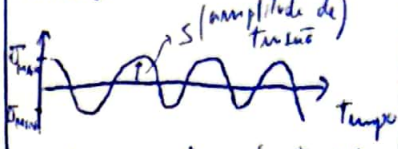
$$K_{Ic} = Y \sigma \sqrt{a}$$

constante geométrica (≈ 1)
tensão aplicada
comprimento da fenda crítica

(Tensão crítica (fendas))

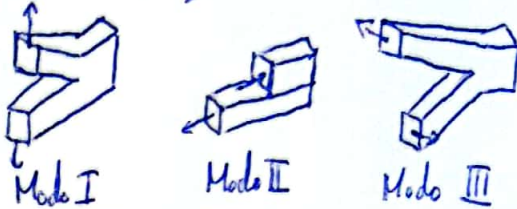
(Tenacidade à fratura em modo I)

Fadiga: fratura sob tensões cíclicas



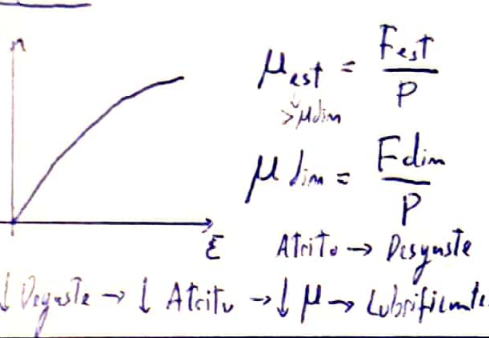
+ tensão - micrélulas necessários (segundo parâmetro)
tensão limite fadiga
tensão mínima para existir fadiga por fadiga

Modos de propagação



Compósitos: utilizar maior número de vantagens de cada material (Não há mistura de materiais)

Compressão: semelhante à curva real de tensão

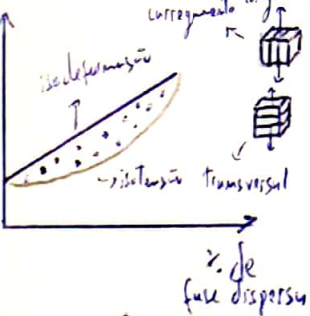


CMCs: o objetivo é aumentar a tenacidade

CMCs: o objetivo é aumentar o módulo de Young E (rigidez)

CMCs: o objetivo é aumentar a resistência à fluência

Reforço de partículas:



limite superior (isodéformação)

$$E_c = V_m E_m + V_p E_p$$

limite inferior (isotensão)

$$\frac{1}{E_c} = \frac{V_m}{E_m} + \frac{V_p}{E_p}$$

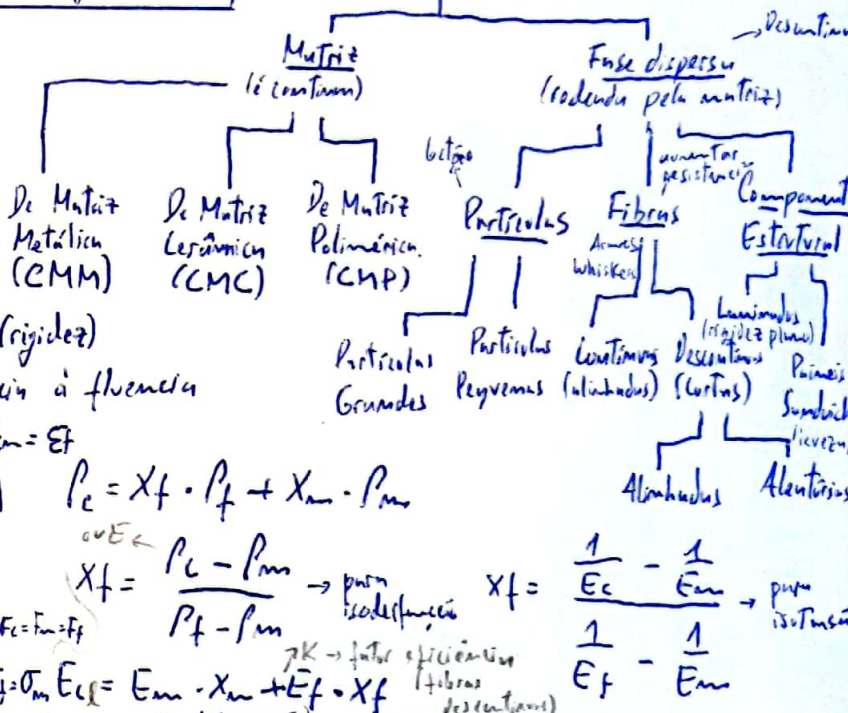
fração dispersa

$$E_c = \frac{E_m \cdot E_p}{X_m \cdot E_f + X_f \cdot E_m}$$

Comprimeto crítico das fibras = 15

(tem de ser maior que o crítico)

Nota: É melhor utilizar fibras longas e finas



Cerâmicos	Metais	Polímeros
Ligação iônica e covalente	Ligação metálica	Ligação covalente e secundária (entre moléculas)
+ T _f	+ T _f	- T _f
+ E	+ E	- E
- α	+ α	+ α
		coeficiente de expansão térmica

Materiais "Não densos"

Cristalinos (Metais e Cerâmicas)

átomos arranjados com ordem

resistência + baixas

Máxima compatibilidade

Resistência + baixas

Rede cristalina: arranjo periódico, infinito e tridimensional de pontos

Ponto = nó da rede

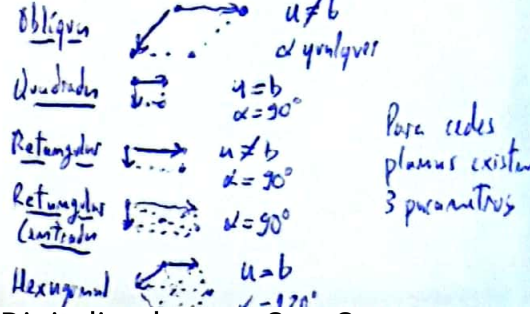
Vetor que une dois pontos = vetor de rede

Estutura = Unidade

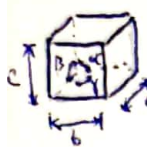
Estutura = Estutura + Rede cristalina

qualquer coisa que tenha regularidade cristalina (ex: atômica, iônica)

Redes planas:



Redes Tridimensionais (3D)



Existem 6 parâmetros de rede: $(a, b, c)(\alpha, \beta, \gamma)$

Cellula Unitária: menor volume definido a partir de vetores de rede, que contém o padrão completo da rede cristalina

Cellulas unitárias

- Convencional: mostra a simetria de rede
- Primitiva: a cujo volume corresponde a 1 mó

Volume $\neq$ volume do mó
mó tem dimensões $\rightarrow$ ponto
volume $\rightarrow$ volume

14 Redes Bravais

7 Sistemas Cristalográficos

- triclínico $\begin{cases} a \neq b \neq c \\ \alpha \neq \beta \neq \gamma \end{cases}$
- monoclínico $\begin{cases} a \neq b \neq c \\ \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ \end{cases}$
- hexagonal $\begin{cases} a \neq b \neq c \\ \alpha = \beta = 120^\circ, \gamma = 90^\circ \end{cases}$
- romboédrico $\begin{cases} a = b = c \\ \alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ \end{cases}$
- ortorrômbico $\begin{cases} a \neq b \neq c \\ \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ \end{cases}$
- tetragonal $\begin{cases} a = b \neq c \\ \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ \end{cases}$
- cúbico $\begin{cases} a = b = c \\ \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ \end{cases}$

FCA = $\frac{\text{Volumes átomos na célula unitária}}{\text{Volume célula unitária}}$

$\downarrow$ fator de compactação atômica

Sistema cúbico:

- Cúbico Simples (CS)

Vol. célula convencional = a^3
Nº átomos célula convencional = $8 \times \frac{1}{8} = 1 \text{ mó}$
Célula convencional = célula primitiva
Volume/mó = a^3



$$a = 2R$$

Nº coordenação = 6
(m = de vizinhos + próximos)
Unidade estrutural = 1 átomo
 $\rightarrow$ átomos são as direções de máxima compactidade

$$FCA = \frac{1 \times \frac{4}{3} \pi (0,5a)^3}{a^3} = 0,52$$

$\frac{\text{Nº átomos}}{\text{célula unitária}} = \frac{\text{Volume}}{\text{célula unitária}}$

1 átomo/célula unitária estrutural

- Cúbico de corpo centrado (CCC)

Vol. célula convencional = a^3
Nº átomos célula convencional = $8 \times \frac{1}{8} + 1 = 2 \text{ mó}$
Célula convencional $\neq$ célula primitiva
Volume/mó = $a^3/2$ = Volume célula primitiva = (Volume célula convencional)/2



$$a = \frac{4\sqrt{3}}{3} R$$

Nº coordenação = 8
Unidade estrutural = 1 átomo

$$FCA = \frac{2 \times \frac{4}{3} \pi \left(\frac{\sqrt{3}}{4} a\right)^3}{a^3} = 0,68$$

2 átomos/célula unitária estrutural

- Cúbico de faces centradas (CFC)

Vol. célula convencional = a^3
Nº átomos célula convencional = $8 \times \frac{1}{8} + 6 \times \frac{1}{2} = 4 \text{ mó}$
Célula convencional $\neq$ célula primitiva
Volume da célula primitiva = Volume da célula
Volume/mó = $a^3/4$



$$a = 2\sqrt{2} R$$

$$d = \sqrt{2} a = 4R$$

Nº coordenação = 12
 $FCA = \frac{4 \times \frac{4}{3} \pi \left(\frac{\sqrt{2}}{4} a\right)^3}{a^3} = 0,74$

4 átomos/célula unitária estrutural

Estrutura CFC $\rightarrow$ A-B-C-A-B-C
Estrutura HC $\rightarrow$ A-B-A-B-A-B
(ordem do empilhamento)

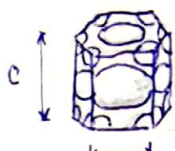
Densidade teórica: $\rho = \frac{m}{V} = \frac{N \cdot A}{V_c \cdot N_A}$
Nº átomos na célula unitária / Volume célula unitária

Alotropia/Polimorfismo
 $\rightarrow$ Material pode apresentar duas ou mais estruturas cristalinas

Sistema hexagonal: a célula convencional da rede hexagonal é um prisma hexagonal

Rede Hexagonal + Estrutura Hexagonal Compacta (HE)

Volume da célula convencional = $(3\sqrt{3}/2) a^2 c$
Nº átomos célula convencional = $12 \times \frac{1}{6} + 2 \times \frac{1}{2} = 3 \text{ mó}$
Célula convencional $\neq$ célula primitiva
Volume célula primitiva = Volume da célula convencional / 3 = $\sqrt{3}/2 \cdot a^2 c$



$$a = 2R \rightarrow R = \frac{a}{2}$$

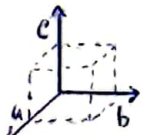
$$c = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{3}} a$$

Nº coordenação = 12
 $FCA = \frac{6 \times \frac{4}{3} \pi (0,5a)^3}{3\sqrt{3} a^3} = 0,74$

Célula primitiva é um prisma cuja altura é c e cuja área da base é $\frac{1}{2}$ da área do hexágono
unidade estrutural = 2 átomos

6 átomos/célula estrutural

Coordenadas de um ponto:



coordenadas do ponto da célula unitária
Translação: posição idêntica outra célula unitária

Direções cristalográficas:
exemplos: $1, 0, \frac{1}{2} \rightarrow 2, 0, 1 \rightarrow [201]$

Famílias de direções cristalográficas equivalentes: $\langle uvw \rangle$
exemplo: $\langle 111 \rangle = [111] + [\bar{1}\bar{1}1] + [1\bar{1}\bar{1}] + [\bar{1}1\bar{1}]$
diagonais do cubo

Planos Cristalográficos: (hkl)

Índices Miller: inversos das distâncias a que o plano corta cada um dos três eixos depois de reduzidos ao mesmo denominador.

$\rho_L = \frac{\text{Número átomos}}{\text{Comprimento da direção}}$
densidade atômica linear $\rightarrow$ modo compactado das direções

$d_{hkl} = \frac{a}{(h^2 + k^2 + l^2)^{1/2}}$
Espaçamento interplanar

$\rho_P = \frac{\text{Número Átomos}}{\text{Área Plano}}$
densidade atômica planar

Planos Cristalográficos na estrutura HC:
4 eixos $\rightarrow$ índices de Miller-Bravais (h, k, i, l)
 $i = -(h+k) \Leftrightarrow h+k+i=0$
 $\rightarrow$ bases e faces não tinham os mesmos tipos de índices daí se ter criado este novo índice.

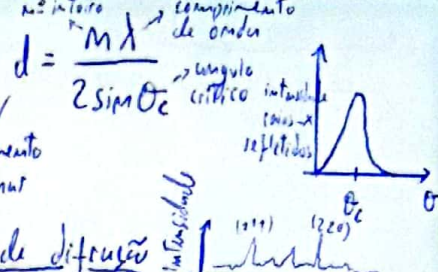
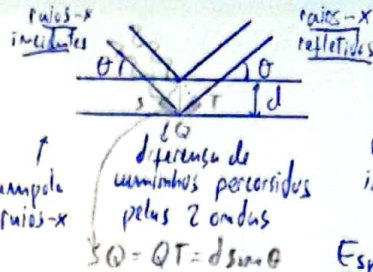
$[u'v'w'] + [uv'tw]$
 $u = \frac{1}{3}(2u' - v')$
 $v = \frac{1}{3}(2v' - u')$
 $t = -(u+v)$
 $w = w'$

Determinação de estruturas cristalinas:

seu ondas
ondas
raios-X

ondas difratadas
têm de estar em fase

raios incidentes
são difratados pelos
planos cristalográficos



Lei de Bragg: $m\lambda = 2d \sin \theta$

Método dos pó
c/ ampola de raios-X

- Radiação monocromática (λ constante)
- Amostra em pó $\rightarrow$ policristalino (todos os ângulos)
- Para cada $\{hkl\}$ há pelo menos uma partícula que verifica a lei de Bragg

Espectro de difração

$\rightarrow$ Para cada estrutura existe uma sequência de valores de $\{hkl\}$

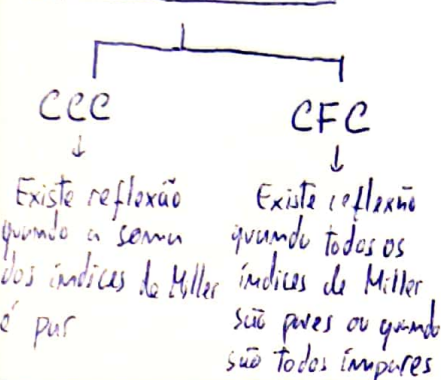
Angulo de difração, 2θ

Para estruturas cúbicas:

$\theta = \arcsin \frac{\lambda \sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}{2a}$

$2\theta \Rightarrow (h^2 + k^2 + l^2)^{1/2}$

Regras para determinação dos planos difratadores $\{hkl\}$



tendo 2 ângulos de difração do espectro:

$\frac{\sin^2 \theta_1}{\sin^2 \theta_2} = \frac{[(h_1)^2 + (k_1)^2 + (l_1)^2]}{[(h_2)^2 + (k_2)^2 + (l_2)^2]}$

= 0,50

CCC

= 0,75

CFC

Monocristais: Propriedades variam com a direção

Policristais: Se grãos estiverem orientados (anisotrópico) abatoriamente (isotrópico) se existirem texturas: anisotrópico

Estruturas cristalinas das cerâmicas:

ânions oxigênio > cátions metálicos

arrumam-se em estrutura compacta (geralmente CFC)

alojam-se nos interstícios da estrutura oxigênio.

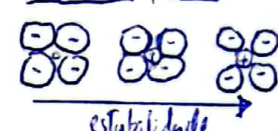
Óxidos

Seleção de interstícios:

se todos os interstícios de um tipo estiverem ocupados, os cátions restantes têm de ocupar interstícios de outro tipo

hibridação da ligação $\rightarrow$ se a ligação covalente for significativa as orbitais híbridas podem ser importantes

Seleção de posições



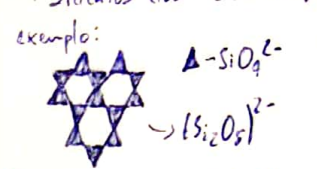
Neutralidade: carga na estrutura tem de ser zero

+ $\frac{\text{cátion}}{\text{ânion}} \rightarrow + N^\circ \text{ coordenação}$ (geral)

Nota: Metais > Cerâmicos > Polímeros (geral)

Silicatos $\leftarrow$ silício oxigênio $\Rightarrow$ Si-O (forte ligação)

$\rightarrow$ silicatos em camadas



Para conseguir a neutralidade, por exemplo, alteram-se as camadas $(\text{Al}_2(\text{OH})_4)^{2+}$

Conservação de equilíbrio de lacunas:

$\frac{N_v}{N} = \exp \left(-\frac{Q_v}{KT} \right)$

N_v : N.º de posições vacantes

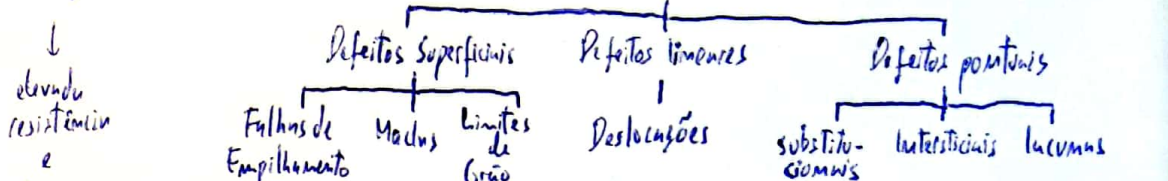
N : N.º de átomos

constante de Boltzmann

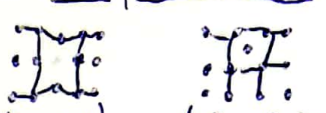
temperatura (K)

Determinação Energia Atômica:

$\ln \frac{N_v}{N} = -\frac{Q_v}{K} \cdot \frac{1}{T}$



Defeitos pontuais em Metais:



há distorção de plenas de plenas

defeitos que existem sempre

processo termicamente ativado

Resultado do fornecimento de elevada energia

Defeitos pontuais em ligas:



com defeitos pontuais eletrônicos

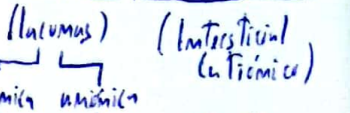
com defeitos pontuais atômicos

Regras de W. Hume-Rothery:

- $\Delta r < 15\%$ (tamanho)
- proximidade de P (eletrovalência $\sim$)
- estruturas cristalinas semelhantes
- valências

existem pelo menos 2 tipos de átomos

Defeitos pontuais Cerâmicos:



lacuna catiônica

lacuna aniônica

defeito

Schottky

Frenkel

lacuna catiônica

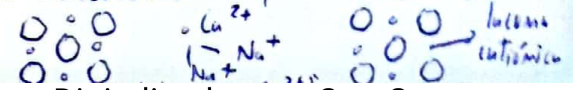
lacuna aniônica

lacuna intersticial

lacuna catiônica

Nota: Nas matérias cerâmicas, quando são introduzidas "impurezas" tem de se manter a neutralidade

$\rightarrow$ exemplo: "impureza" catiônica substitucional



Defeitos superficiais em sólidos:

Solidificação - ocorre no vazamento de um material fundido

Grãos →

columnares

equiaxiais

grãos alongados

Mesmo tamanho em todas as direções

Defeitos Lineares - Deslocações:

Limites de grão

- região entre cristais
- ligeiramente desordenados
- baixa densidade nos limites de grão
- elevada mobilidade, difusividade e reatividade química

Falhas de Empilhamento:

→ Em metais c/ estrutura FCC: erro na sequência de empilhamento dos planos de máxima compactitude
ex: ABCABABC
erro

Maclas:

→ Essencialmente uma reflexão das posições atômicas em relação ao plano de simetria



plano de simetria

Características

- são defeitos unidimensionais
- caracterizados pela linha de deslocação (vetor linha $\vec{l}$)
- caracterizados pelo vetor de Burgers $\vec{b}$ (i.e. determinando a distorção da rede ao redor)
- vetor de Burgers e linha de deslocação definem o plano de escorregamento

Classificação

Orientação Relativa

- Deslocação Paralela: $\vec{b} \parallel \vec{l}$
- Deslocação Mista: $\vec{b}$ é oblíquo a $\vec{l}$
- Deslocação em linha: $\vec{b} \perp \vec{l}$

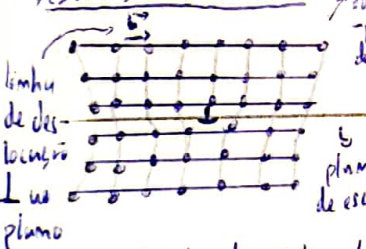
vetor de Burgers

- Parcial ou Imperfeita ($\vec{b} \neq$ vetor de rede)
- total ou perfeita ($\vec{b} =$ vetor de rede)

linha de deslocação

- curvilínea (se linha de deslocação $\vec{l}$ não for um círculo)
- retilínea

Deslocação em linha



Movimento parcial ou "semi-plano" de átomos

- apenas se pode mover uma família de planos
- O plano de deslocação é formado pela linha de deslocação e o vetor Burgers
- As ligações no plano de escorregamento são sucessivamente quebradas e refeitas

Deformação Para-fuso:



plano de escorregamento

"cunha em espiral" resultante da deformação no corte.

Nota: Cálculo do Vetor de Burgers → traça-se um caminho fora da deslocação (clockwise) → traça-se o mesmo caminho no ramo de deformação e o que sobra para fechar é o vetor

Deslocações e classes de materiais

- Cerâmicos Iônicos: Movimento de deslocação difícil devido à necessidade de evitar vizinhos c/ mesmo sinal
- Cerâmicos Covalentes: Movimento de deslocação difícil devido às ligações direcionais
- Metais: Movimento de deslocação fácil devido às direções múltiplas - direcionais, escorregamento em direções e planos compactos

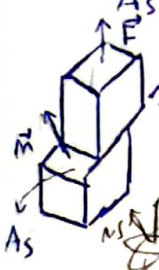
Movimento de deslocações ⇒ Sem movimento de deslocações não há deformação plástica

Plano de escorregamento + Direção escorregamento = Sistema de movimento escorregamento

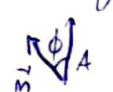
- + provável, em que escorregamento + fácil
- Distâncias Interplanares Grandes
- Densidade atômica planar elevada
- Movimento das deslocações
- habitualmente, a direção de + compressão (maior densidade atômica linear)
- Multiplicação de deslocações: Densidade de deslocações, ρ
- comprimento total de linha de deslocação por u. Vol. $\rightarrow \rho_D + \sigma_{CED} \rightarrow$ Enrijecimento

Escorregamento devido à tensão tangencial resolvida, T_R

$$T_R = \frac{F_s}{A_s}$$



relação entre a força aplicada e a direção do escorregamento



relação entre o vetor normal da base e o vetor normal do plano de escorregamento

tensão tangencial resolvida crítica (TTRE)

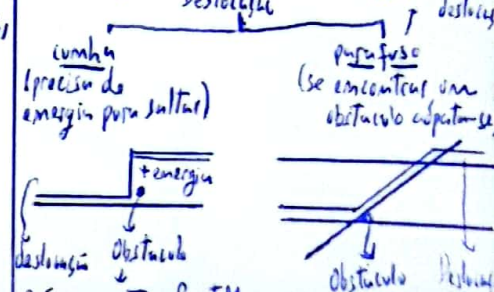
$T_R > T_{TRE} \rightarrow$ para haver deslocações

Tensão máxima para $\lambda = \phi = 45^\circ$

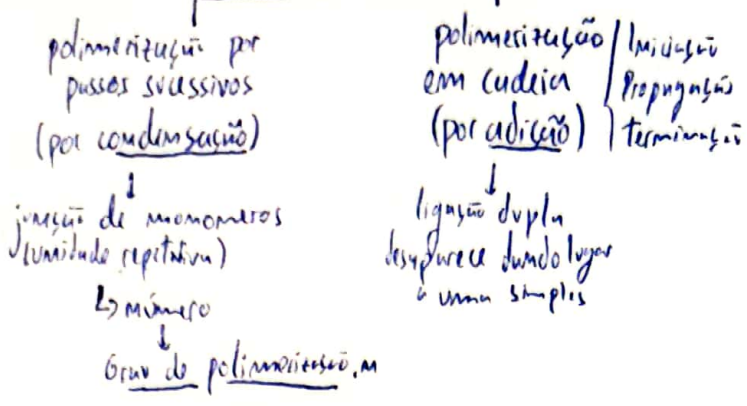
factor Schmid

$$\Rightarrow T_R = \sigma \cos \lambda \cos \phi$$

Ultrapassagem obstáculos Deslocação



Polímeros → focos de polimerização



Peso molecular médio ($\bar{M}_n$) = $\frac{\text{peso total polímero}}{n: \text{total moléculas}}$

Peso médio c/ fração número

$$\bar{M}_n = \frac{\sum N_i M_i}{N} = \sum x_i M_i$$

fração de moléculas na categoria i → $x_i = \frac{N_i}{N}$

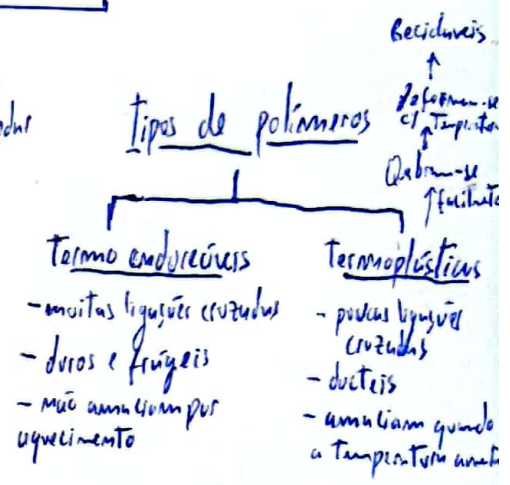
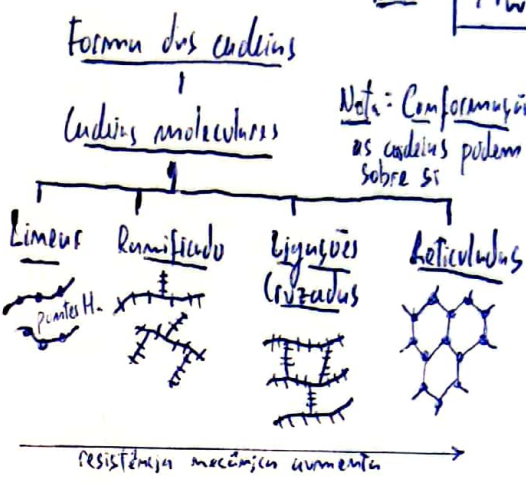
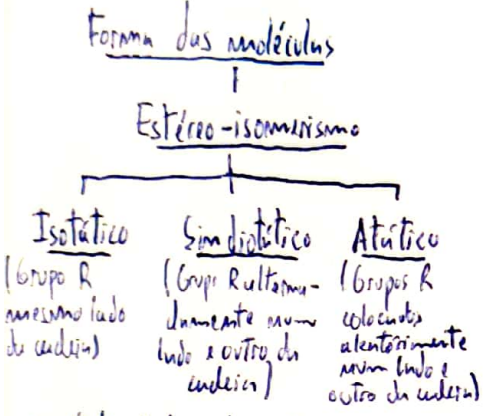
Peso médio c/ fração peso

$$\bar{M}_w = \frac{\sum p_i M_i}{\sum p_i} = \sum w_i M_i$$

Nota: $\bar{M}_w > \bar{M}_n$

$w_i = \frac{p_i}{\sum p_i}$ (fração peso na categoria i)

Isomerismo - mesma fórmula química e estruturas diferentes



Cristalinidade de polímeros

- Polímeros 100% cristalinos são raros
- Em geral, + % cristalinidade ⇒ + E e + Resist. Mecânica
- Regiões cristalinas (cristalitos) (trios paralelos)

Nota: $V_{def} \approx T \downarrow \Rightarrow E \uparrow, \sigma_{max} \uparrow, \%EL \downarrow$

Propriedades Mecânicas dos Polímeros

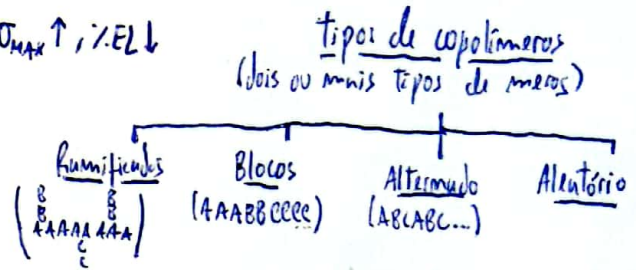
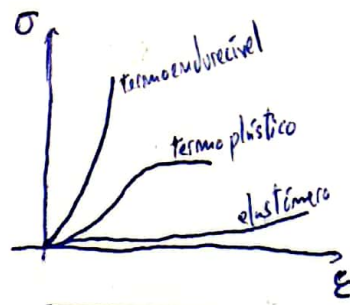
- $\sigma_{max} \approx 10\% \sigma_{max, metal}$
- $E_{pol} < E_{metal}$
- São visco-elásticos

Vulcanização da borracha

Adição enxofre às cadeias poliméricas (≈ 3%)

Aumento R. Mec. da borracha

Fica mais elástica que viscosa

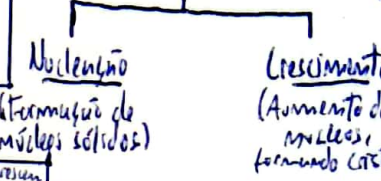


Temperatura de Transição vítrea (T_g)

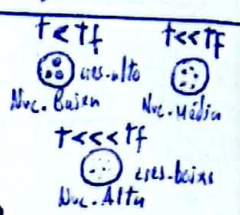
- Abaixo de T_g → vidro
- Acima de T_g → adquire alta deformabilidade

Nota: Dependência polímero - [temperaturas elevadas Radiação]

Solidificação (resultado do vazamento de material líquido)



- imbu-se quando se atinge certa crítica
- ocorre por acoplamento de átomos (Difusão Atômica)
- essa grad. fronteira cristal se torna
- velocidade crescimento aumenta com temperatura

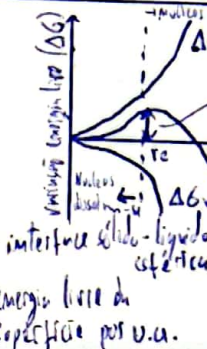


Nucleação Homogênea

- Núcleos formam-se no interior metal líquido
- Necessária superrefrigeração elevada ($\Delta T > 80^\circ C$)

energia para criar interface sólido-líquido esférica

$$\Delta G_s = 4\pi r^2 \gamma$$



energia livre de formação do sólido

$$\Delta G_v = \frac{4}{3}\pi r^3 \Delta g_v$$

energia livre de formação do sólido

$$\Delta G_v = \frac{4}{3}\pi r^3 \Delta g_v$$

energia livre total

$$\Delta G_t = \Delta G_s + \Delta G_v$$

Para baixar nucleação:

- $\Delta T > 0$ (fusão T_f)
- $+\Delta T \Rightarrow -r, -\Delta G_{critico}$
- + núcleos formados (nucleação + fácil)

Nucleação heterogênea

- Permite solidificação d ΔT baixo
- $\Delta G_{critico}$ (nucleação heterogênea) muito menor $\Delta G_{critico}$ (nucleação homogênea)

Limites grão

- AT baixo → poucos núcleos → estrutura em grão grosso → Mais macia e dúctil
- AT elevado → muitos núcleos → estrutura (pequenas) → Mais dura e resistente

Nota: T_f $\left\{ \begin{array}{l} \Delta T \\ T_f - T \end{array} \right.$ = sobreaquecimento
temperatura aquecimento do sólido

Difusão atômica - movimentação de átomos transportando massa

Fluxo - Quantidade de matéria que atravessa uma superfície e determinada área num intervalo de tempo

$$\text{Fluxo} = J = \frac{\text{átomos difusão}}{(\text{área superficial})(\text{tempo})} \text{ ou } \frac{\text{massa difusão}}{(\text{área sup.})(\text{tempo})}$$

Quantidade de difusão átomos $\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$

Inter-difusão
átomos tendem a migrar da região de maior concentração para a de menor concentração (concentração)

Auto-difusão
átomos do próprio elemento também migram.

Mecanismos de difusão

intersticial

átomos pequenos (H, C, N) podem difundir-se entre átomos maiores.

por lacunas

átomos "trocam" de posição e as lacunas
Fatores:
- N° lacunas
- Energia Atômica para migrar

Comentário

- difusão de átomos C na estrutura atômica Fe torna estrutura ferro mais dura e resistente

pequenos pastas muito finas com atmosfera rica em carbono

1ª Lei de Fick - Estado estacionário

u composição em cada ponto ($\frac{\partial C}{\partial t} = 0$)
é constante ao longo do tempo
a composição varia de ponto para ponto ($\frac{\partial C}{\partial x} \neq 0$)



Gradiente de concentração
 $\frac{dc}{dx}$
se linear = $\frac{dc}{dx} \approx \frac{c_2 - c_1}{x_2 - x_1}$

Se existir um gradiente de composição $\frac{dc}{dx}$, vai haver um fluxo J que é proporcional ao gradiente

$$J = -D \frac{dc}{dx}$$

coeficiente de difusão

A difusão é um fenômeno termicamente ativado

Lei de Arrhenius

$$D = D_0 e^{-\frac{Q}{RT}}$$

D_0 : fator pré-exponencial
 Q : energia de ativação
 R : constante dos gases
 T : temperatura absoluta

Difusão rápida

- Estruturas porosas compactas
- c/ lig. químicas
- átomos pequenos
- baixa densidade

Difusão lenta

- Estruturas compactas
- c/ lig. covalentes
- átomos grandes
- alta densidade

2ª Lei de Fick - estado não estacionário

A concentração da espécie em difusão é em função do tempo e da posição. ($C = C(x, t)$)

$$\frac{\partial C_x}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right)$$

↳ não tem solução exata

→ Solução particular, difusão de um gás para sólido (cementação)

$$\frac{C_s - C_x}{C_s - C_0} = \text{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right)$$

C_s : superficial C_0 : inicial x : profundidade

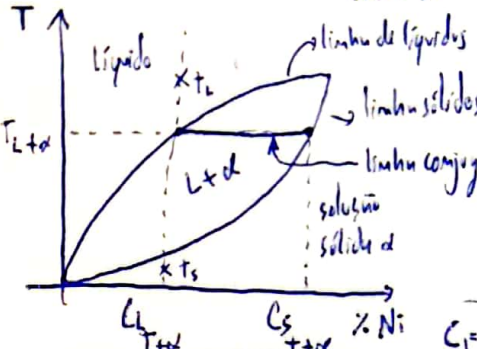
em condições de equilíbrio um sistema que não evolui 2ª lei termodinâmica se a sua energia for mínima

Diagramas de fase: representação gráfica das fases a várias temperaturas, pressões e composições
Fase: região de um material que tem determinada estrutura e composição
Limite de solubilidade: concentração máxima para a qual só existe uma fase

Diagramas Binários

entre duas regiões metálicas há uma região bifásica

• **Equilíbrios Bifásicos**: duas fases em equilíbrio entre si



Sistemas Isomorfo

é aquele que os componentes se dissolvem completamente um no outro (ex: sistema Cu-Ni)

Determinação da composição química

Fixar um C_0 e variar T
 $C_{L+D} = C_x = C_0$
 $C_{L+D} = C_{Lig} + C_{Sol}$
 $C_1 = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \times 100$ ou $C_1 = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \times 100$

Tipos de Diagramas de fases

Sistema ternário

- $C = 3$
- $V = 1 [E, e]$
- $P = 1 \text{ atm}$
- $T = \text{cte.}$

Sistema binário

- $C = 2$
- $V = 2 [T, e]$
- $P = 1 \text{ atm}$

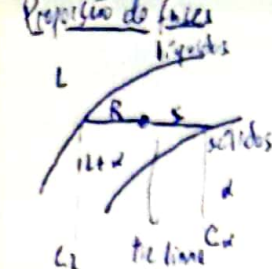
Sistema unário

- $C = 1$
- $V = 2 [T, P]$

Regra das fases de Gibbs:

$$F + V = C + 2 \text{ ou } F + V = C + 1, P = \text{cte.}$$

F : N° de fases
 V : N° de variáveis indep. (graus de liberdade)
 C : m° de componentes



$R = C_0 - C_L$; $S = C_L - C_0$

$\%L = \frac{S}{R+S} \times 100$

$\%R = \frac{R}{R+S} \times 100$ *Regra Aluvium*

$\% = \frac{\text{'Braço' oposto}}{\text{'Braço' adjacente + oposto}} \times 100$

• Temperatura de fusão: $\%L = 100\%$ ($R=0$)

• Temperatura de solidificação: $\%S = 100\%$ ($S=0$)

Nota: As ligas não têm uma T_f/T_s definida (são intervalos)

Microestrutura: aspecto físico do material quando observado ao microscópio

Microestruturas $L \rightarrow L+d \rightarrow d+d+\alpha$

- Sistemas Eutéticos (lamelas alternadas)
- Ligas Hipereutéticas (Manchas de α)
- Ligas Hipoeutéticas (Manchas de β)

Sistemas Peritéticos

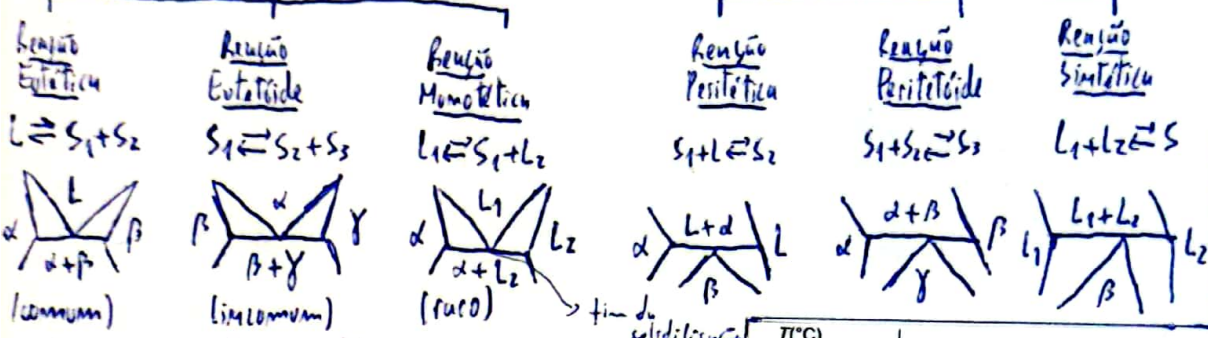
$L+S_1 \rightarrow L+S_1+S_2 \rightarrow S_2$

- Ligas Hipoperitéticas (Excesso de S_1)
- Ligas Hipoperitéticas (Sobra de S_1)

Equilíbrios Triplásicos

tipo Eutético (uma fase no ser arrefecido transforma-se e de duas fases).

tipo peritético (duas fases no ser arrefecido transformam-se numa só)



Equilíbrios isotérmicos

Reações e transformações a T constante:

- Eq. Triplásicos
- Pontos de fusão de elementos puros
- Pontos de fusão congruentes
- Transformações Alotrópicas

→ estas reações traduzem equilíbrios químicos reversíveis

→ no diagrama ir ao ponto eutético - A reação é acima e abaixo

→ $T = cte.$

Aço Hipoeutectoide

α -Ferrite (F) ($\%C < 0,76\%$)

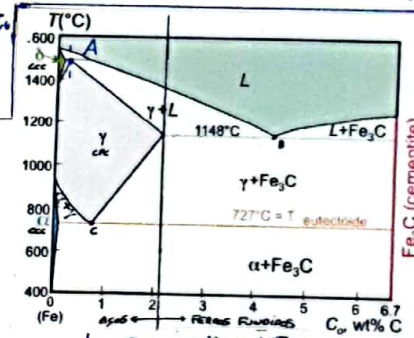
γ -Austenite (A) Lamelas de perlita

Fe_3C (Cementite) sob a matriz α

Aço Hipereutectoide

($\%C > 0,76\%$)

Lamelas de perlita sob a matriz Fe_3C



- A: Peritético: $L + S \rightleftharpoons \gamma$

- L: 0,53% C; γ : 0,16% C; δ : 0,09% C

- B: Eutético: $L \rightleftharpoons \gamma + Fe_3C$

- L: 4,3% C; γ : 2,1% C; Fe_3C : 6,7% C

- C: Eutetóide: $\gamma \rightleftharpoons \alpha + Fe_3C$

- α : 0,02% C; 6,7% Fe_3C ; γ : 0,76% C

Nota: Perlite - lamelas alternadas de α e Fe_3C

→ Arrefecimento em condições de não-equilíbrio

- Difusão no estado sólido não se realiza (processo mais lento)
- só no estado líquido

→ Fusão congruente

- transformação isotérmica que ocorre sem mudança de composição entre as fases envolvidas do composto químico (não elementares)

→ zonamento: a concentração do sólido varia no tempo do arrefecimento, se este for rápido pois há pouco tempo para ocorrer difusão.

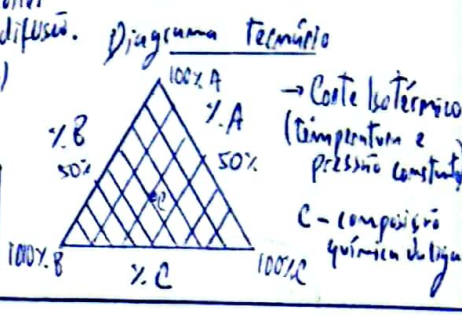
→ encapsulamento: reações peritéticas (sobre sólido)

→ eutéticos divorciados

Nomenclatura Aisi e SAE:

- 90xx - Aços carbono
- 11xx - Aços carbono (resulfurizados)
- 15xx - Mn (10-20%)
- 40xx - Mn (0.2-0.3%)
- 43xx - Ni (1.65-2%), Cr (0.4-0.9%), Mo (0.2-0.3%)
- 44xx - Mo (0.5%)

xx → teor em %C $\times 100$



Ligas ferrosas:

Ferros fundidos ($\%C$: 2 a 4,5%)

Aços inoxidáveis:

Aços ($\%C$: 0 a 2%)

$\%Cr > 11\%$

O cromo forma uma camada protetora de óxido de cromo que resiste à corrosão

- baixo carbono ($< 0,25\%$)
- médio carbono (0,25 a 0,6%)
- alto carbono ($> 0,6\%$)

Aços com baixo carbono:

Ferros fundidos

- obtidos por fundição sem trabalho mecânico
- 2 a 4% de carbono e 1 a 3% de Si
- Elevada resist. mecânica e dureza
- Baixa ductilidade
- fáceis produzir - Baixa T_f
- ao adicionarmos elementos do ligam: resist. ao desgaste, abrasão, corrosão elevada

- Baixa resist. mecânica
- Ductilidade elevada
- Em alguns casos, não se usava de 100x do material
- Baixa resist. à corrosão e oxidação
- Baixa resist. ao impacto

Contêm: cementite, ferrite e grafite

Tipos de Ferros Fundidos

Limitações

- Densidade elevada
- Baixa resist. à corrosão

Cimentos

Nodulares

Branco

Maleáveis

- Grafite em flocos
- Resistente à compressão, frágil sob tração
- Resistente ao desgaste
- Excelente amortecedor de vibrações

- Adição de Mg ou Ce
- Grafite em nodulos
- Maior ductilidade
- $< 1\%$ Si
- Mais duros e frágeis
- Mais cementitos
- Tratados termicamente a 800-900°C
- Grafite em coquetos
- Mais dúcteis

Tratamentos térmicos - a transformação de fases muitas leva tempo
Cinética - estuda as velocidades das reações das transformações de fase
 → Uma transformação de fase requer sempre tempo pois é baseada na difusão no estado sólido ou líquido.

Diagramas TTT (tempo-temperatura-transformação)

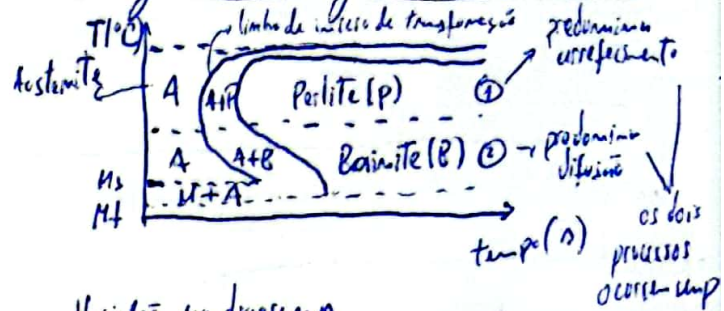
Equação de Avrami: $M = 0, \dots, 9$ (Número de transformações)
 $K = \frac{\pi \Delta G^2}{3 k T \Delta T}$ → T em K, ΔT em K

Representa a fração de uma fase que se transformou depois tempo t .

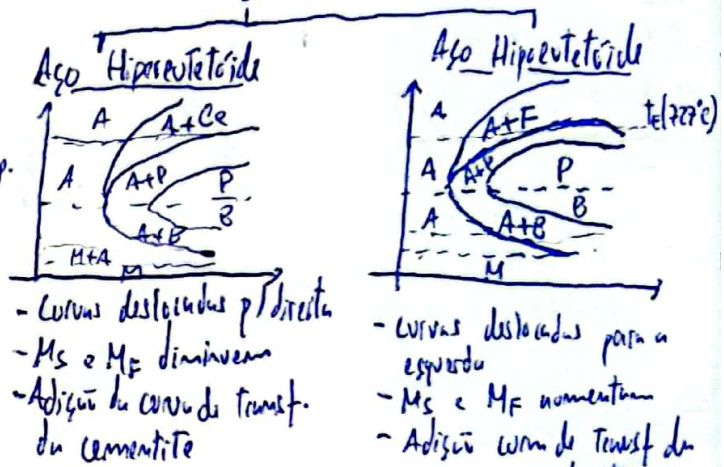
TTT-Ti
 (transformação isotérmica)
 - Material Monofásico
 - Rapidamente arrefecido até uma dada temperatura
 - Mantido a essa temp. até se dar a transformação, seguindo-se um arrefecimento

TTT-AC
 (Arrefecimento contínuo)
 - Material Monofásico
 - Material é arrefecido continuamente
 - Muito utilizado em operações comerciais quando as peças são grandes e complexas

Forma geral de um diagrama TTT-Ti de um aço



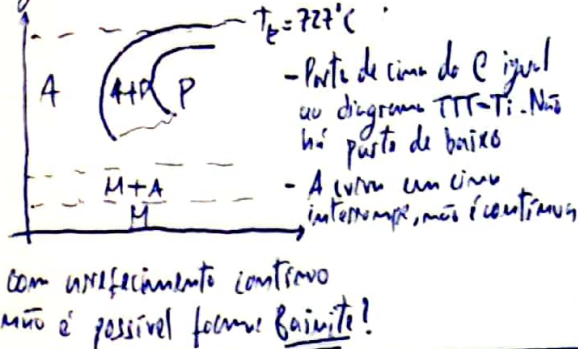
Variações no diagrama



- Produtos da transformação da Austenite
 - Perlite ($\alpha + Fe_3C$) (Lamelas)
 - Resultado do arrefecimento lento
 - Formada a temp. elevada
 - Macia
 - Bainite
 - Resultado do arrefecimento rápido
 - Estrutura não-lamelar (ferrita α' intertuda em C) e Fe_3C (Peguetas)
 - Formada a temp. baixa
 - Dura
 - Martensite (Ferrita α' sobresaturada em C)
 - Muito dura e instável. Quebra-se
 - Arrefecimento ultra-rápido da austenite
 - Transformação não-isotérmica

conclusão: $\geq 0,2\% C$ → com desloc-se do M_s e M_f diminuem
Nota: Para formar perlite, bainite ou martensite temos que formar austenite primeiro (aquecer) e depois arrefecer

Diagrama TTT-AC (Aço Eutetóide) [$C=0,76\%$]



com arrefecimento contínuo não é possível formar Bainite!

- Martensite
- Martensite revenida
- Bainite
- Perlite fina
- Perlite grosseira

Resistência
 ↑
 Martensite
 ↑
 Perlite
 ↑
 Bainite
 ↑
 Martensite revenida
 ↑
 Perlite fina
 ↑
 Perlite grosseira

Tratamentos térmicos das aços
 1. Tempera
 Injeção, manutenção e arrefecimento rápido
 - Tempera em óleo e em água
 a única diferença é a velocidade do arrefecimento (mais rápida em água)
 - Austempera - maior ductilidade, tenacidade e menores distorções, obtém-se bainite (fina e dura)
 - Martempera - menores gradientes térmicos, menores distorções e fissuras, obtém-se martensite
 2. Revenido - promove a difusão do carbono da martensite (martensite revenida), reduz tensões internas, diminuem dureza e fragilidade, tensão mais a tensão de cedência diminuem e aumento ductilidade.
 3. Recaloramento
 aquecimento, manutenção e arrefecimento lento.
 - Relaxação de tensões - reduz tensões devido à deformação plástica, contrapõe no arrefecimento e transformação de fase
 - Esfecoidização - amacia os aços para melhorar a maquinabilidade, camentita fica esfecoidizada.
 - Recaloramento completo - aquecimento na zona γ ou $\gamma + Fe_3C$ e arrefecimento lento dentro do forno (perlite grosseira)
 - Recaloramento após deformação - eliminam os efeitos do encruamento devido à deformação
 - Normalização - aquecimento na zona γ e arrefecimento ao ar (perlite fina)

Ligas Não-Ferrosas

(No Al, Mg, Cu) Resistência a altas T
 Metais Refratários Sem fundir ou deformar
 Muito alta densidade

Ligas de cobre

- O cobre apresenta elevada condutividade elétrica, boa resist. à corrosão, facilidade fabrico, resist. à tração média e propriedades de recozimento controláveis

- Cu-Zn (latão): moedas, condutores
- Cu-Sn (bronze): colamentos, engraxamento
- Cu-Be: resist. corrosão e fadiga elevada (Orgãos de Máquinas por precipitação)

Ligas de titânio

- Baixa densidade
 - Muito reativo a altas temperaturas
 - Resistente à corrosão, fácil de maquinar
 - Elevada biocompatibilidade

Aplicações: próteses e indústria aeronáutica

Nomenclatura da liga:

- Wrought [Deformação plástica]
- 1xxx - 99% Al
- 2xxx - Al-Cu
- 3xxx - Al-Mn
- 4xxx - Al-Si
- 5xxx - Al-Mg
- 6xxx - Al-Mg-Si
- Fundição (cast)
- 1xx.x, 2xx.x, 3xx.x...

Ligas Alumínio

- Baixa densidade
 - Adição de Cu, Mg, Si
 Mas em condiz. quim. mudanças de propriedades
 - Boa resist. à corrosão
 - Não-tóxico
 - Boas propriedades elétricas

Aplicações: Aeronáutica, Automóveis, embalagens.

Ligas Níquel

- Boa resist. à fluência e oxidação/redução a temperaturas elevadas

Ligas de Magnésio

- Muito leve
 - Fácil Auto-ignição
 Aplicações: Mísseis, Automóvel.

Endurecimento de precipitação

- Sistemas que podem levar este tratamento:
 - Solução sólida terminal (α) de alta solubilidade
 - Solubilidade de α diminuir rapidamente com T
 ex: Al-Cu; Cu-Be; Cu-Sn; Mg-Al...
 - só aplicável ao grupo de composição de α .

Fases:

1 - Solubilização
 Aumentar T até formar solução sólida (α)

2 - Tempera
 Diminuição rápida de T para criar solução sólida α sobressaturada.

3 - Envelhecimento - Resquecimento para a formação do produto de precipitação na fase α . Estes precipitados constituem obstáculos ao movimento das deslocacões

Materiais Celulares - conjunto de células com arestas e faces sólidas, arredondadas de forma a preencher o espaço. (tem densidade relativa inferior a 0,3)

Materiais celulares naturais (cortice, esponja, aço, coral...)

Materiais celulares artificiais - o homem é capaz de produzir materiais celulares bidimensionais (furos de metal) (É útil porque é resistente em direção ao peso) e na direção dos furos

Módulo de Young

→ Em comparação c/ o mesmo material compacto, é inferior
 → O módulo de Young sobre o peso é superior nos materiais celulares.

Estrutura dos materiais celulares

Poliedro de Kelvin (tetracaidecaedro)

12 faces:
 - 6 quadrados
 - 8 hexágonos
 modelo + usado para as células

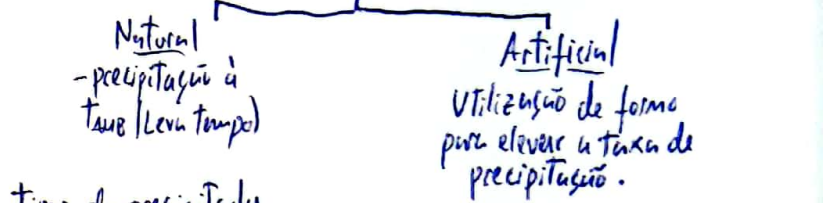
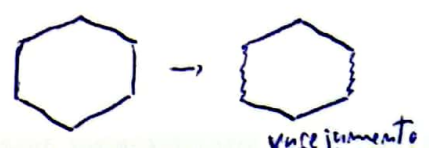
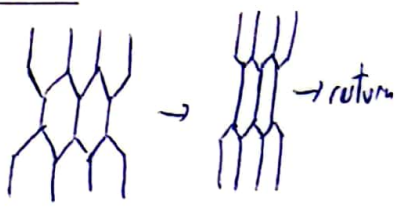
Lei de Euler:

$$2D: F + V = A + 1$$

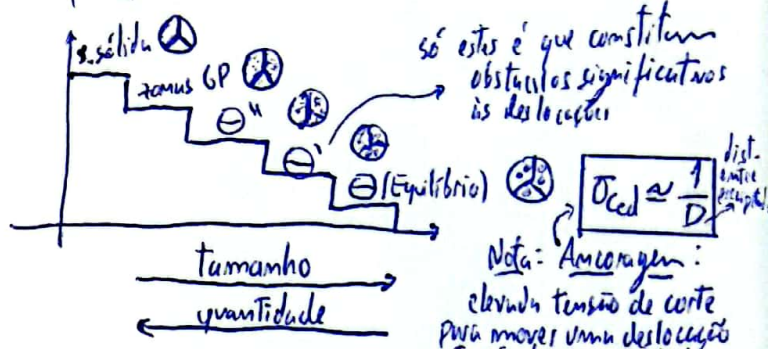
$$3D: F + V = C + A + 1$$

C - células
 F - Faces
 A - arestas
 V - vértices

Comportamento mecânico

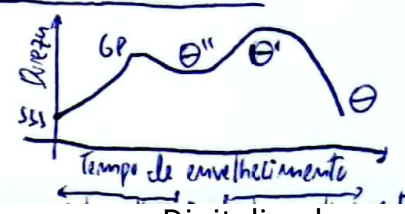


Tipos de precipitados



- inútil GP: Muito pequenos e coerentes c/ a matriz
- inútil θ'' : Maiores e incoerentes c/ a matriz (mesma estrutura cristalina)
- útil θ' : Maiores e incoerentes c/ a matriz
- inútil θ : Muito grandes e incoerentes, dispersos

Curva de envelhecimento



T ↑ = Envelhecimento mais rápido