Transformações de Fase

Tópicos Especiais II

Responsável: Paulo J. Modenesi

Tópicos Especiais II:

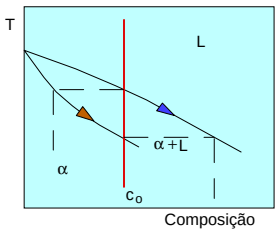
Relação estrutura-propriedades 1,5h
Estrutura cristalina 3h
Soluções em metais 1,5h
Diagramas de Equilíbrio 3h
Sistema Fe-C 3h
Transformações de fase 3h

Transformações de Fase

Tópicos Especiais II

Transformações de fase e Equilíbrio:

Ex.: (a) Solidificação no equilíbrio



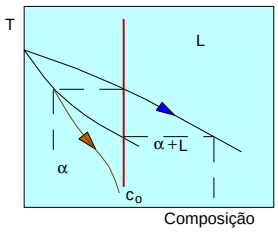
Modelo: Difusão completa no líquido e no sólido

Transformações de Fase

Tópicos Especiais II

Transformações de fase e Equilíbrio:

Ex.: (a) Solidificação fora do equilíbrio



Modelo: Difusão completa no líquido e ausente no sólido

↓

Segregação

Tópicos Especiais II

Transformações de Fase

Transformações Difusionais em Sólidos:

Modelo: **Nucleação e Crescimento**

- Precipitação: $\alpha' \rightarrow \alpha + \beta$
- Transf. eutetóide: $\gamma \rightarrow \alpha + \beta$
- Ordenação: $\alpha \rightarrow \alpha'$
- Transf. massiva: $\beta \rightarrow \alpha$
- Transf. polimórfica: $\gamma \rightarrow \alpha$

Mesma composição

Tópicos Especiais II

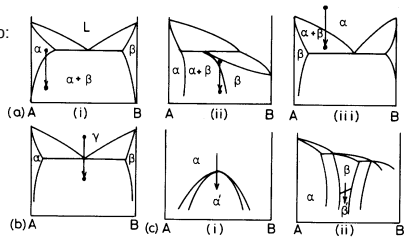
Transformações de Fase

Transformações Difusionais em Sólidos:

Modelo: **Nucleação e Crescimento**

Precipitação:

Eutetóide:



Ordenação:

Tópicos Especiais II

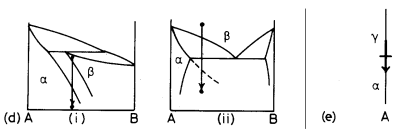
Transformações de Fase

Transformações Difusionais em Sólidos:

Modelo: **Nucleação e Crescimento**

Transformação Massiva:

Transformação Polimórfica:



Transformações de Fase

Tópicos Especiais II

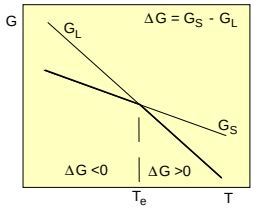
Nucleação Homogênea:

(a) Variação de Energia Livre

$$\Delta G_V = G_S - G_L = \Delta H - T\Delta S$$

No equilíbrio:

$$\Delta G_V = 0_{Te} \rightarrow \Delta S_{Te} = \Delta H_{Te} / T_e$$



$$\Delta G_V \approx \frac{\Delta H_{Te}}{T_e} \cdot \Delta T$$

$$\Delta T = T_e - T$$ (super-resfriamento)

Transformações de Fase

Tópicos Especiais II

Nucleação Homogênea:

(b) Barreiras para a Transformação

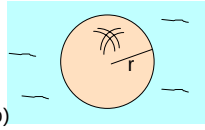
- Interfaces
- Variações de volume (deformações) etc.

(c) Variação da Energia na Transformação

$$\Delta G = (Área)\gamma + (Volume)\Delta G_V$$

$$\Delta G = (4\pi r^2)\gamma + \left(\frac{4}{3}\pi r^3\right)\Delta G_V$$

(núcleo esférico)



Transformações de Fase

Tópicos Especiais II

Nucleação Homogênea:

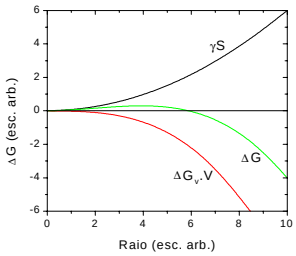
(d) Raio Crítico

$$r_C = -2\gamma / \Delta G_V$$

$$\Delta G_C = 16\pi\gamma^3 / 3(\Delta G_V)^2$$

$r < r_C \rightarrow$ Embrião (instável)

$r > r_C \rightarrow$ Núcleo (estável)



Transformações de Fase

Tópicos Especiais II

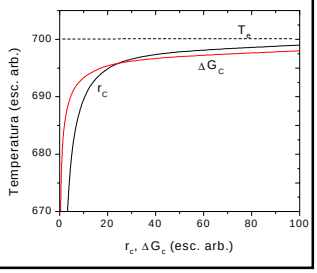
Nucleação Homogênea:

(e) Efeito de ΔT

$$\Delta G_V \approx \frac{\Delta H_{Te}}{T_e} \cdot \Delta T$$

$$r_C = -\frac{2\gamma T_e}{\Delta H_{Te} \cdot \Delta T}$$

$$\Delta G_C = \frac{16\pi\gamma^3 T_e^2}{3(\Delta H_{Te}\Delta T)^2}$$

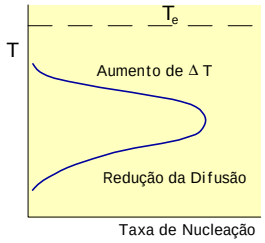


Transformações de Fase

Tópicos Especiais II

Nucleação Homogênea:

(e) Efeito de ΔT → DIFUSÃO



Transformações de Fase

Tópicos Especiais II

Nucleação Heterogênea:

ΔT máximo na solidificação de metais puros:

Metal	ΔT_{max} (°C)	Metal	ΔT_{max} (°C)
Mercúrio	88	Ferro	286
Alumínio	110	Níquel	365
Cobre	236	Nióbio	525

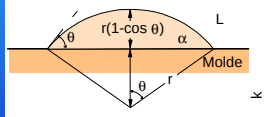
ΔT pode ser reduzido se γ for reduzido → Formação do embrião em contato com alguma interface ou defeito pré-existente

Transformações de Fase

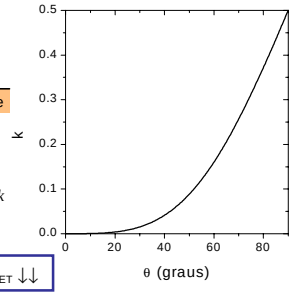
Tópicos Especiais II

Nucleação Heterogênea:

Exemplo: Nucleação na parede de um molde



$$\frac{(\Delta G_C)_{HET}}{(\Delta G_C)_{HOM}} = \frac{2-\cos\theta+\cos^3\theta}{4} = k$$



→ $\Delta T_{HET} \downarrow\downarrow$

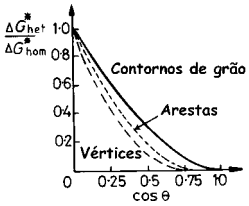
Transformações de Fase

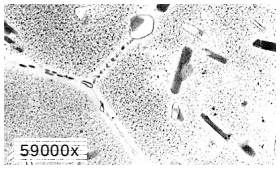
Tópicos Especiais II

Nucleação Heterogênea:

Nucleação em Sólidos:

- Contornos de grão
- Arestas de grão
- Vértices
- Inclusões/Precipitados
- Deslocações
- Falhas de empilhamento





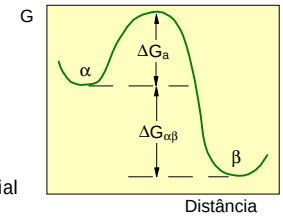
Transformações de Fase

Tópicos Especiais II

Crescimento:

(a) $\Delta T \uparrow\uparrow\uparrow$ / Irrelevante:

$$I \approx C\exp(-\Delta G_a / RT)$$



ΔG_a = Barreira Potencial

Transformações de Fase

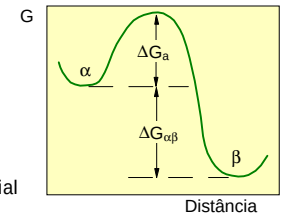
Tópicos Especiais II

Crescimento:

(b) Transformação Próxima do equilíbrio:

$$I \approx C\exp(-\Delta G_a / RT)[1-\exp(-\Delta G_{\alpha\beta} / RT)]$$

$(I_{\alpha\to\beta} - I_{\beta\to\alpha})$



ΔG_a = Barreira Potencial

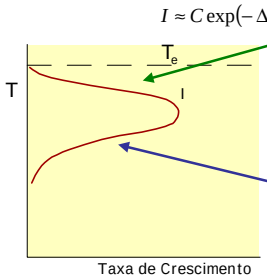
Transformações de Fase

Tópicos Especiais II

Crescimento:

(c) Taxa de Crescimento:

$$I \approx C\exp(-\Delta G_a / RT)[1-\exp(-\Delta G_{\alpha\beta} / RT)]$$

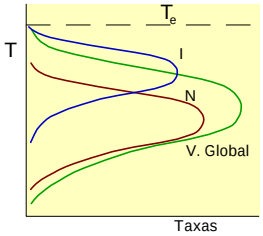


$$I \approx C\exp(-\Delta G_a / RT)$$

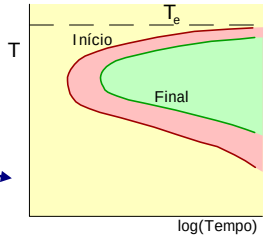
Transformações de Fase

Tópicos Especiais II

Nucleação/Crescimento:



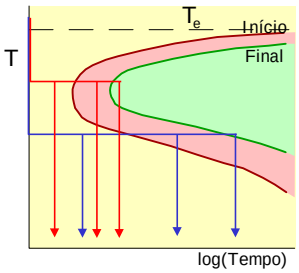
Diagramas TTT



Transformações de Fase

Tópicos Especiais II

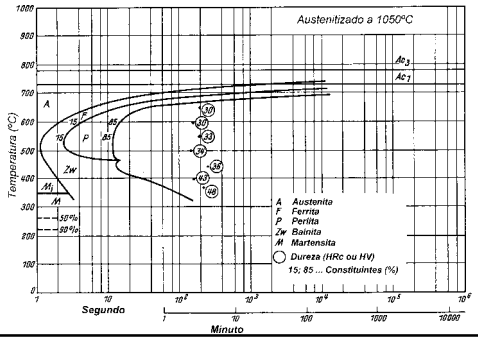
Nucleação/Crescimento: Diagramas TTT



Transformações de Fase

Tópicos Especiais II

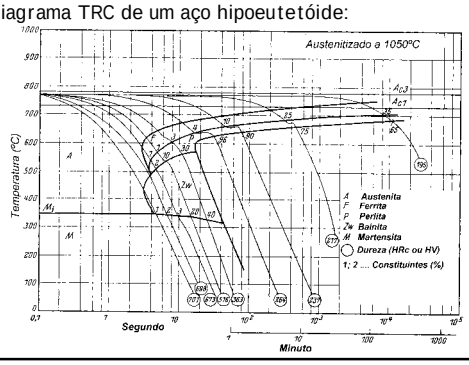
Diagrama TTT de um aço hipoeutetóide:



Transformações de Fase

Tópicos Especiais II

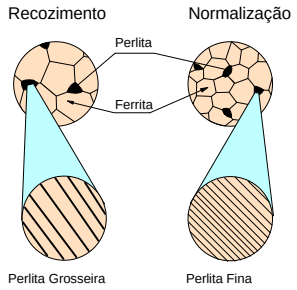
Diagrama TRC de um aço hipoeutetóide:



Transformações de Fase

Tópicos Especiais II

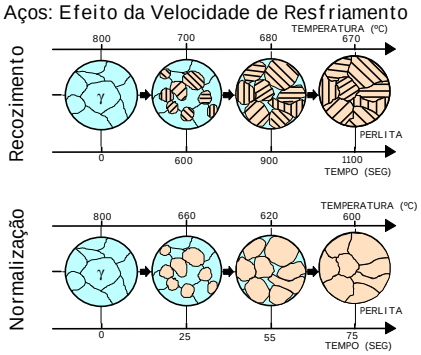
Aços: Efeito da Velocidade de Resfriamento



Transformações de Fase

Tópicos Especiais II

Aços: Efeito da Velocidade de Resfriamento



Aço 1080

Transformações de Fase

Tópicos Especiais II

Aços: Efeito da Velocidade de Resfriamento

ESTRUTURA ←→ PROPRIEDADES

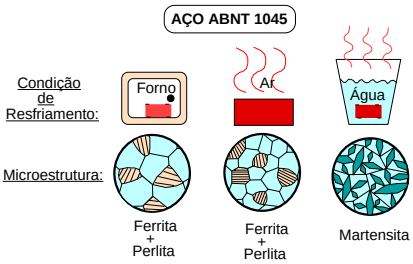
Ex.:

Aço SAE	Tratamento Térmico	Limite de Resistência (MPa)	Limite de Escoamento (MPa)	Alongamento (%)	Dureza Brinell
1015	Recozimento Normalização	420 455	280 310	34 32	128 134
1040	Recozimento Normalização	615 665	365 415	29 27	167 179
1060	Recozimento Normalização	660 755	405 455	24 20	187 229
1095	Recozimento Normalização	735 1040	425 505	23 11	201 285

Transformações de Fase

Tópicos Especiais II

Aços: Formação da Martensita

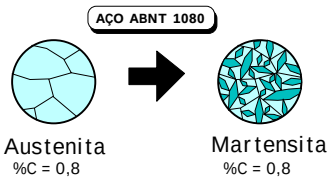


Transformações de Fase

Tópicos Especiais II

Características da martensita:

- Carbono permanece em solução sólida. Isto é, a composição química da martensita é a mesma da austenita. **Não ocorre a formação de cementita** junto com a martensita.

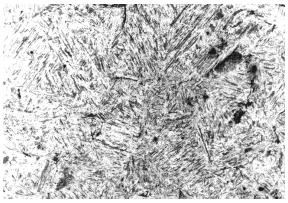


Transformações de Fase

Tópicos Especiais II

Características da martensita:

- Em uma amostra polita e atacada, a martensita aparece como uma série de agulhas quando observada ao microscópio



Transformações de Fase

Tópicos Especiais II

Características da martensita:

- A martensita é caracterizada por uma dureza e limite de resistência muito **elevados** e por um alongamento **baixo**.
- Dureza e o limite de resistência aumentam e o alongamento diminue fortemente com o teor de C do aço. Exemplo:

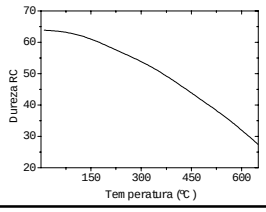
Teor de Carbono	0,10%	0,40%	0,80%
Dureza Vickers Aproximada	350	680	850

Transformações de Fase

Tópicos Especiais II

Características da martensita:

- A martensita é instável, isto é, ela pode ser decomposta por um tratamento térmico conhecido como REVENIMENTO, que é realizado a temperaturas menores que A_1. Durante o revenimento, a dureza e o limite de resistência se reduzem e o alongamento aumenta.



Transformações de Fase

Tópicos Especiais II

Formação da martensita:

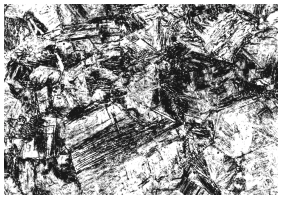
Fatores:

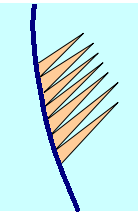
- Composição Química
- Homogeneidade da austenita
- Tamanho de grão austenítico

Transformações de Fase

Tópicos Especiais II

Estruturas Bainíticas:

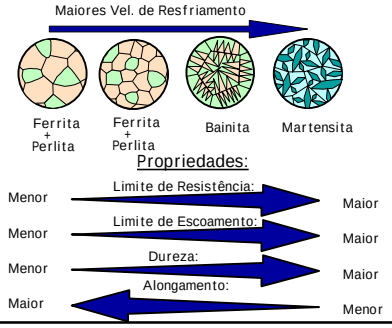




Transformações de Fase

Tópicos Especiais II

Resumo: Efeito nas Propriedades Mecânicas

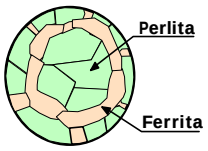


Transformações de Fase

Tópicos Especiais II

Constituintes Comuns dos Aços:

- **Ferrita Pró-eutetóide**: Solução sólida de C em Ferro CCC, é o primeiro constituinte a se formar no resfriamento lento de aços de baixo C. É macia (≃150 HV) e, quando de granulação fina, de boa dutilidade.

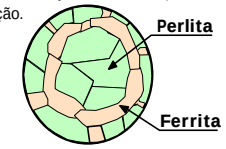


Transformações de Fase

Tópicos Especiais II

Constituintes Comuns dos Aços:

- **Perlita**: Agregado de ferrita e cementita formada de camadas alternadas das duas fases. A espessuras das camadas diminue com ΔT. Quando formada próximo de Ar_1, tem-se a **perlita grossa** (HR_C = 10-20). Próximo de 550C, a **perlita fina** é formada (HR_C = 30-40). É um constituinte mais duro e menos dútil do que a ferrita e, junto com esta, aparece nos aços comuns após um recozimento ou normalização.

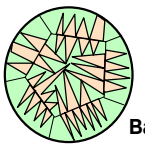


Transformações de Fase

Tópicos Especiais II

Constituintes Comuns dos Aços:

- **Bainita**: É formada entre 550 e 250 ºC, sua dureza varia entre 40 e 60 HR_C. Tem características entre a perlita e a martensita, sendo constituída por lâminas ou placas de ferritas com partículas muito finas de cementita. Não é, em geral, observada em aços comuns após resfriamento contínuo.



Bainita

Transformações de Fase

Tópicos Especiais II

Constituintes Comuns dos Aços:

- **Martensita**: Solução sólida super-saturada de carbono no ferro. Sua dureza, geralmente elevada, depende fortemente do teor de carbono, variando entre cerca de 300 e 1000 HV. Resulta de processos que causam elevadas velocidades de resfriamento (exemplo: têmpera em água). Quando reaquecida no revenimento, a martensita torna-se mais macia e dútil (martensita revenida).

Martensita