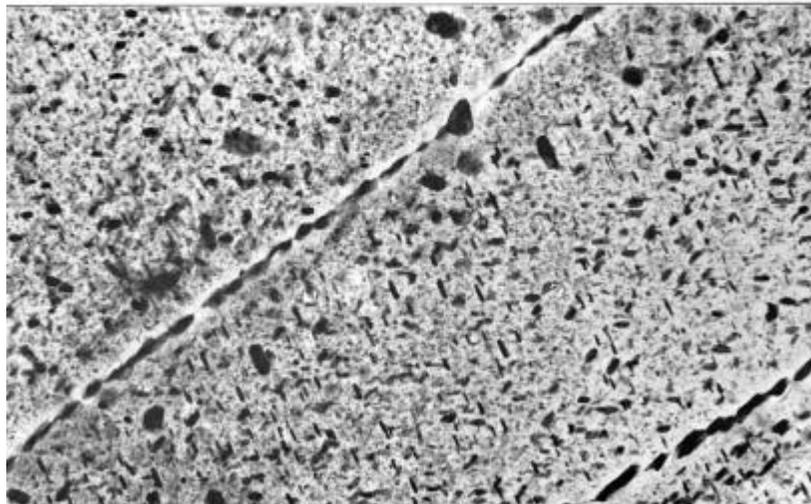




ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

DIAGRAMAS DE FASE II TRANSFORMAÇÕES DE FASE



PMT 2100 - Introdução à
Ciência dos Materiais para
Engenharia
2º semestre de 2005

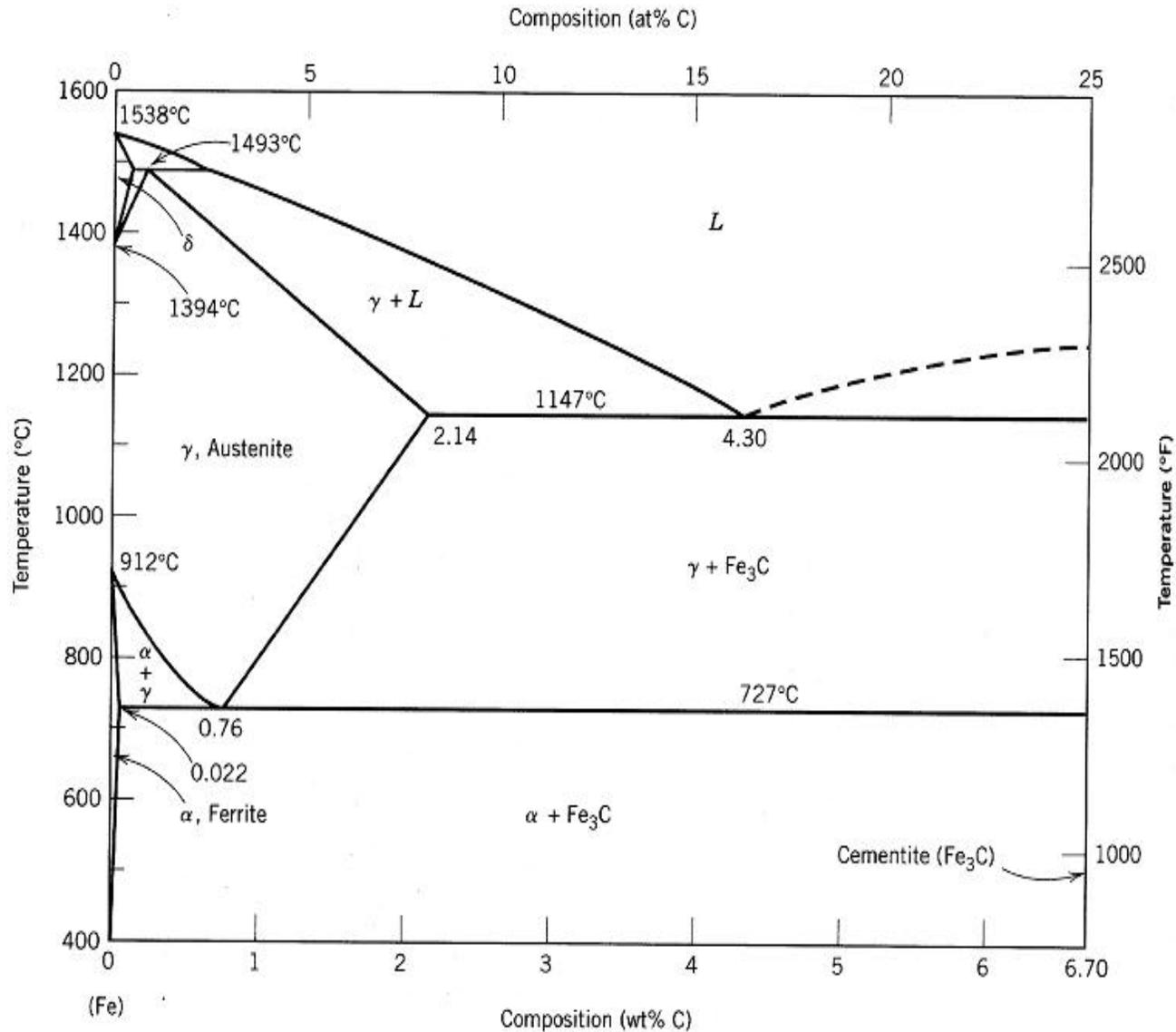
Acima: Boeing 767. Em baixo : microscopia eletrônica de transmissão de uma liga de alumínio 7150-T651 (6,2 %Zn-2,3 %Cu-2,3 %Mg-0,12% Zr) usada para a fabricação de partes das asas e da fuselagem.

ROTEIRO DA AULA

2

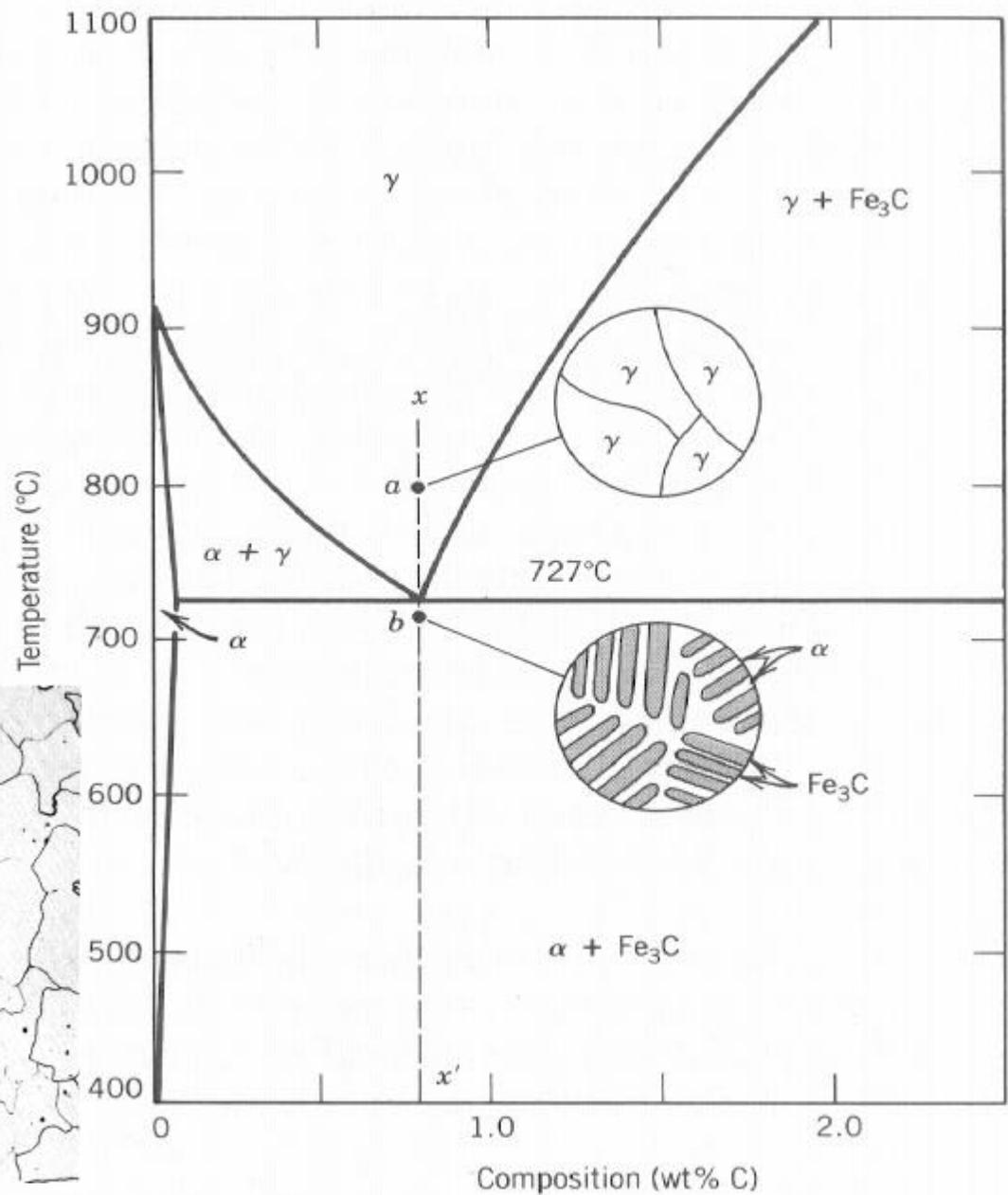
- Diagrama de fases Fe-Fe₃C
 - Microestruturas eutetóides
 - Microestruturas hipoeutetóides
- Transformações de fase
- Cinética
 - Cinética da reação eutetóide do aço fora do equilíbrio
 - Diagramas T T T
- Têmpera do aço
- Endurecimento por precipitação

DIAGRAMA Fe-Fe₃C

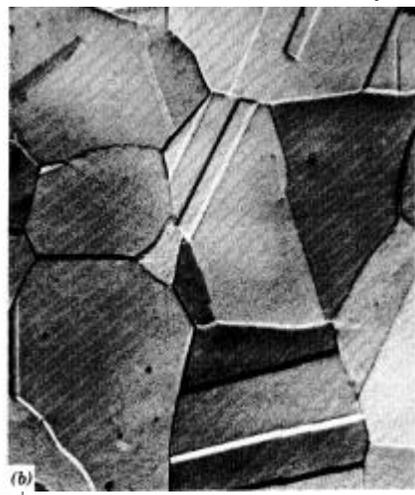
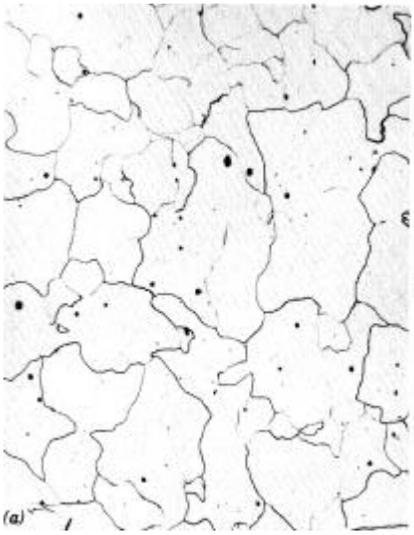


- Fundamental devido às aplicações do aço.
- AUSTENITA
 - Fe- γ - FCC
- FERRITA
 - Fe- α - CCC
- PERLITA
 - Microestrutura formada por finas camadas de Fe_3C numa matriz de Fe- α
- CEMENTITA
 - Fe_3C

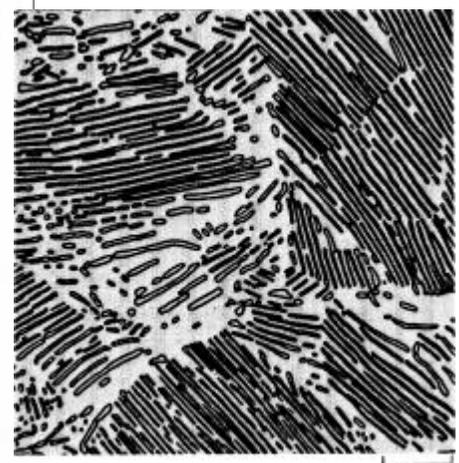
DIAGRAMA Fe-Fe₃C – MICROESTRUTURA EUTETÓIDE



Ferrita
Fe- α



Austenita
Fe- γ

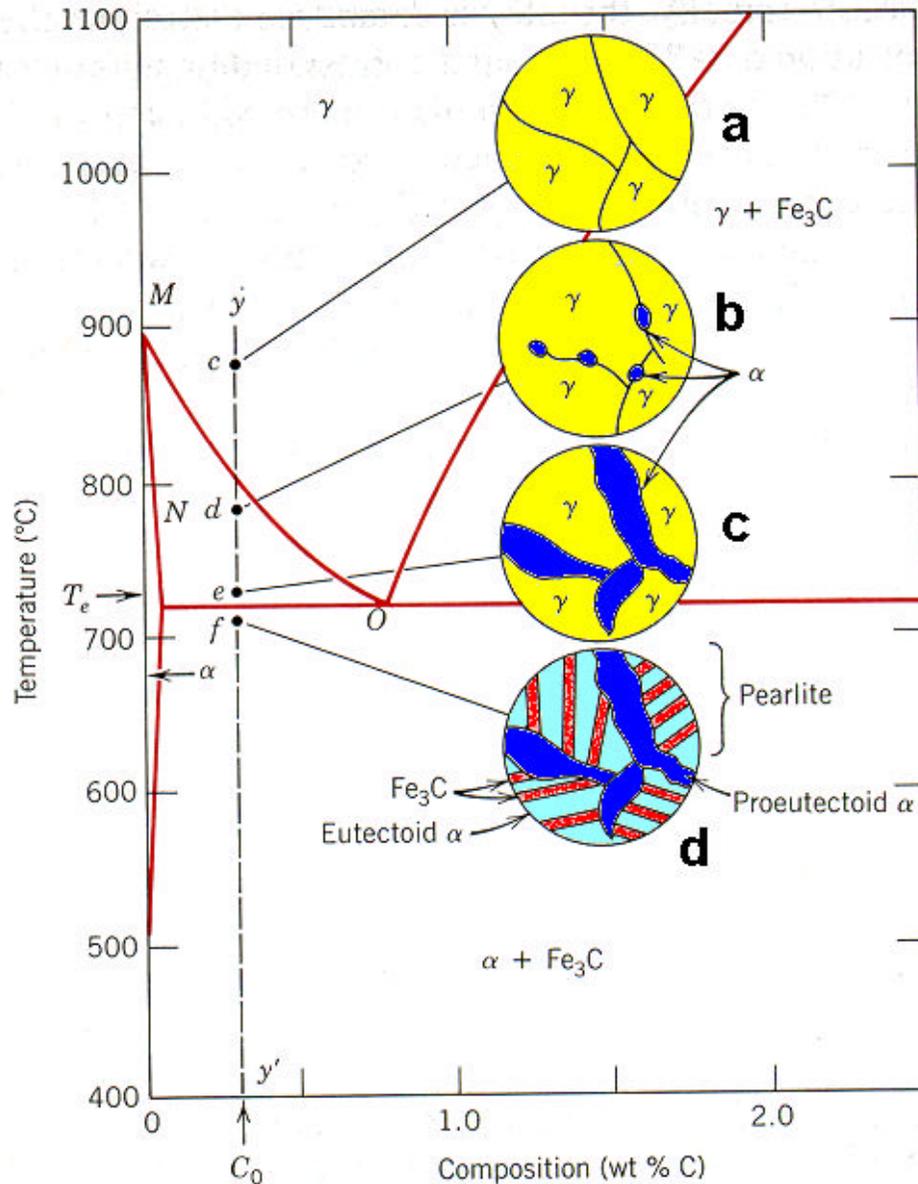


Microestrutura
de Perlita

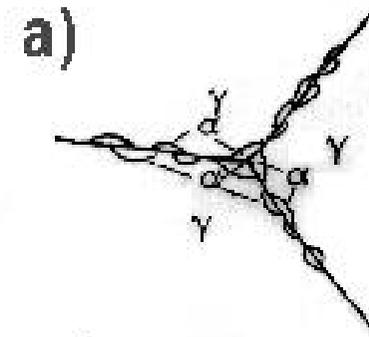
20 μm

DIAGRAMA Fe-Fe₃C

TRANSFORMAÇÃO NOS AÇOS HIPOEUTETÓIDES



a. Nucleação e crescimento da ferrita (Fe- α) nos contornos de grão da austenita (Fe- γ).



b. Crescimento da ferrita (Fe- α).

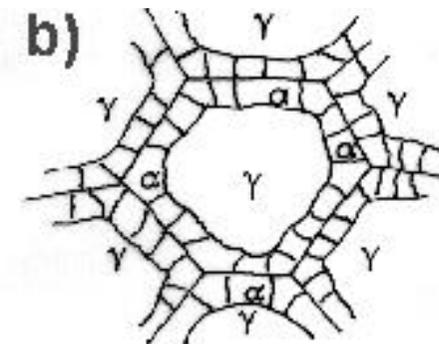
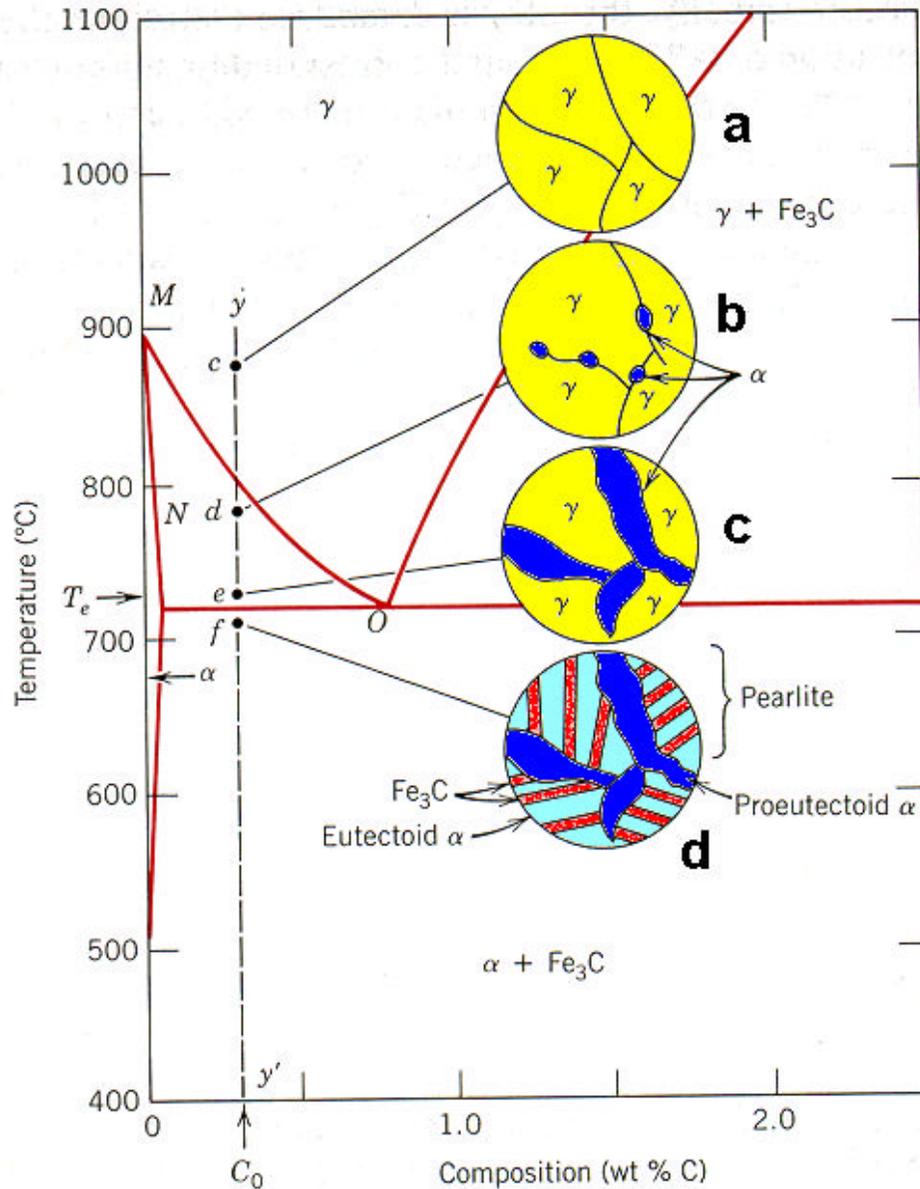
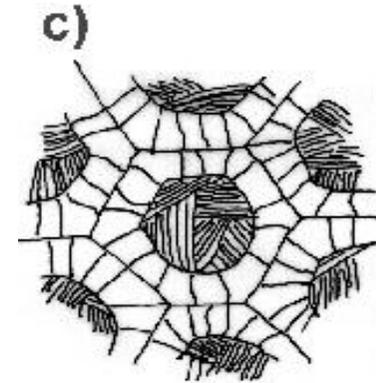


DIAGRAMA Fe-Fe₃C

TRANSFORMAÇÃO NOS AÇOS HIPOEUTETÓIDES



c. Crescimento de perlita a partir da austenita residual.

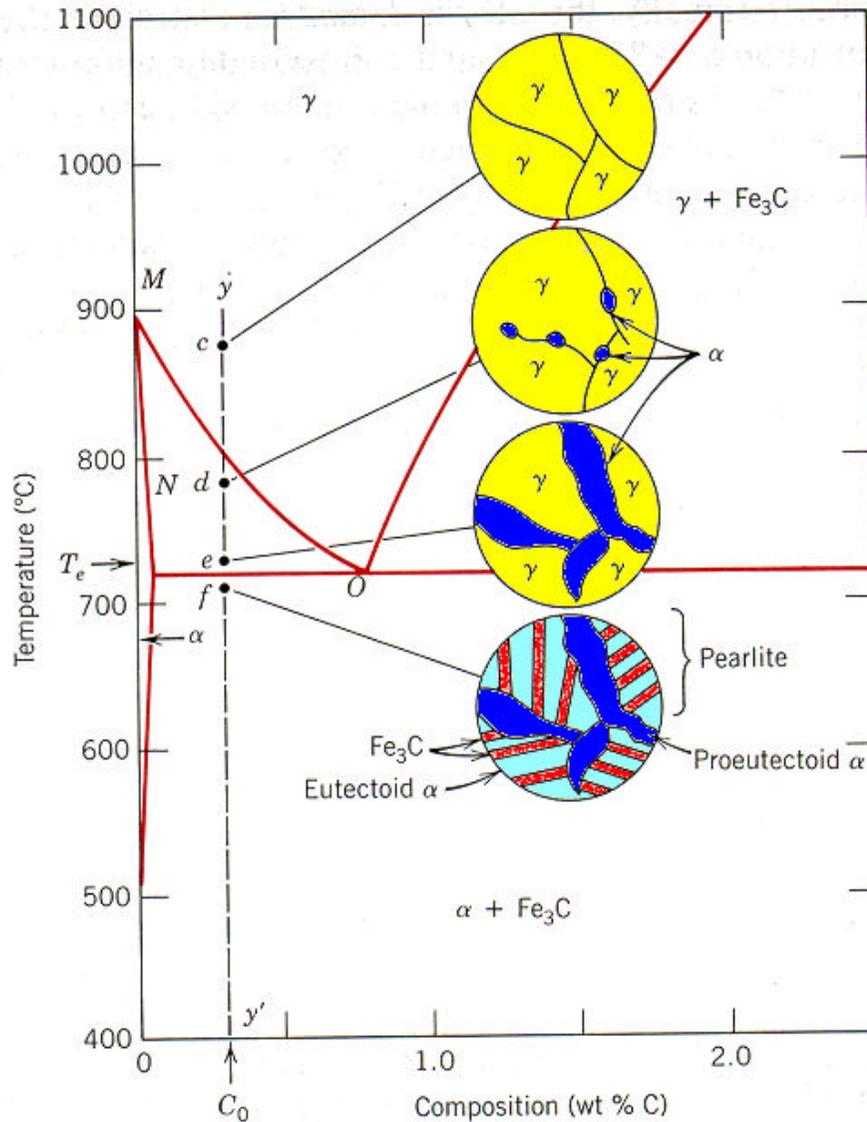


d. Microestrutura de um aço 0,4% C resfriado lentamente. d)



DIAGRAMA Fe-Fe₃C - MICROESTRUTURA HIPOEUTETÓIDE

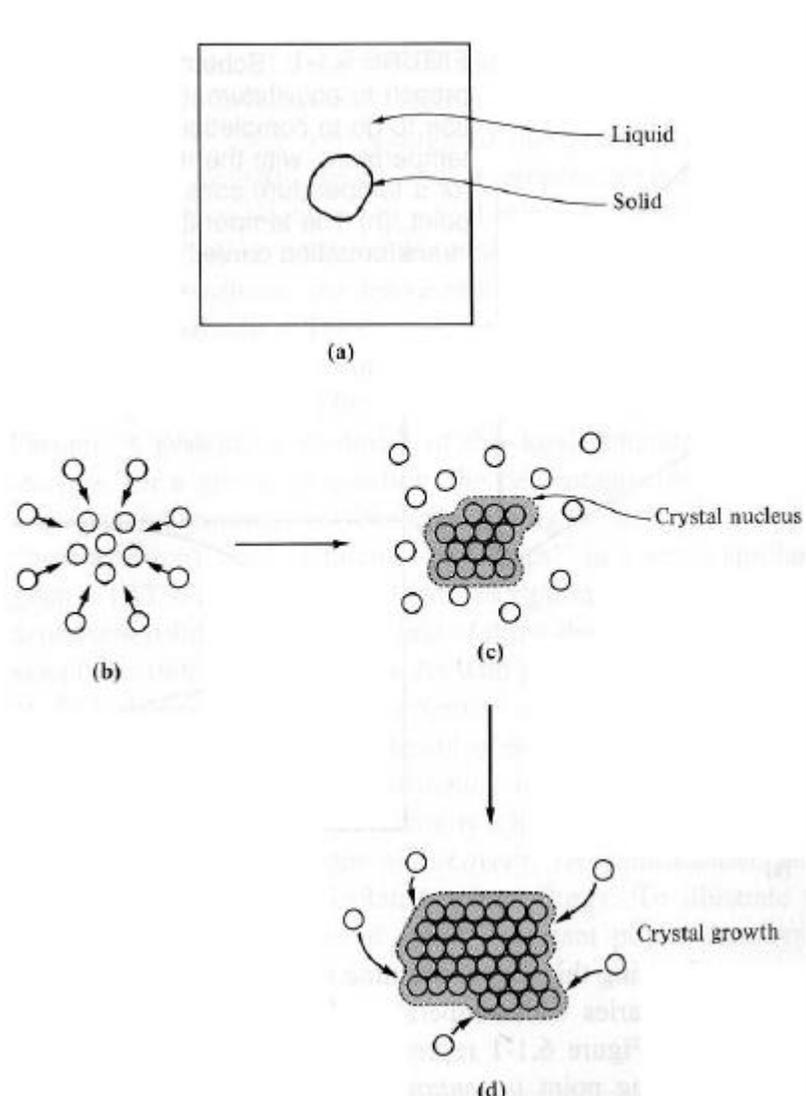
7



Microestrutura de um aço 0,38% C resfriado lentamente (em condições próximas ao equilíbrio).

TRANSFORMAÇÕES DE FASE

8

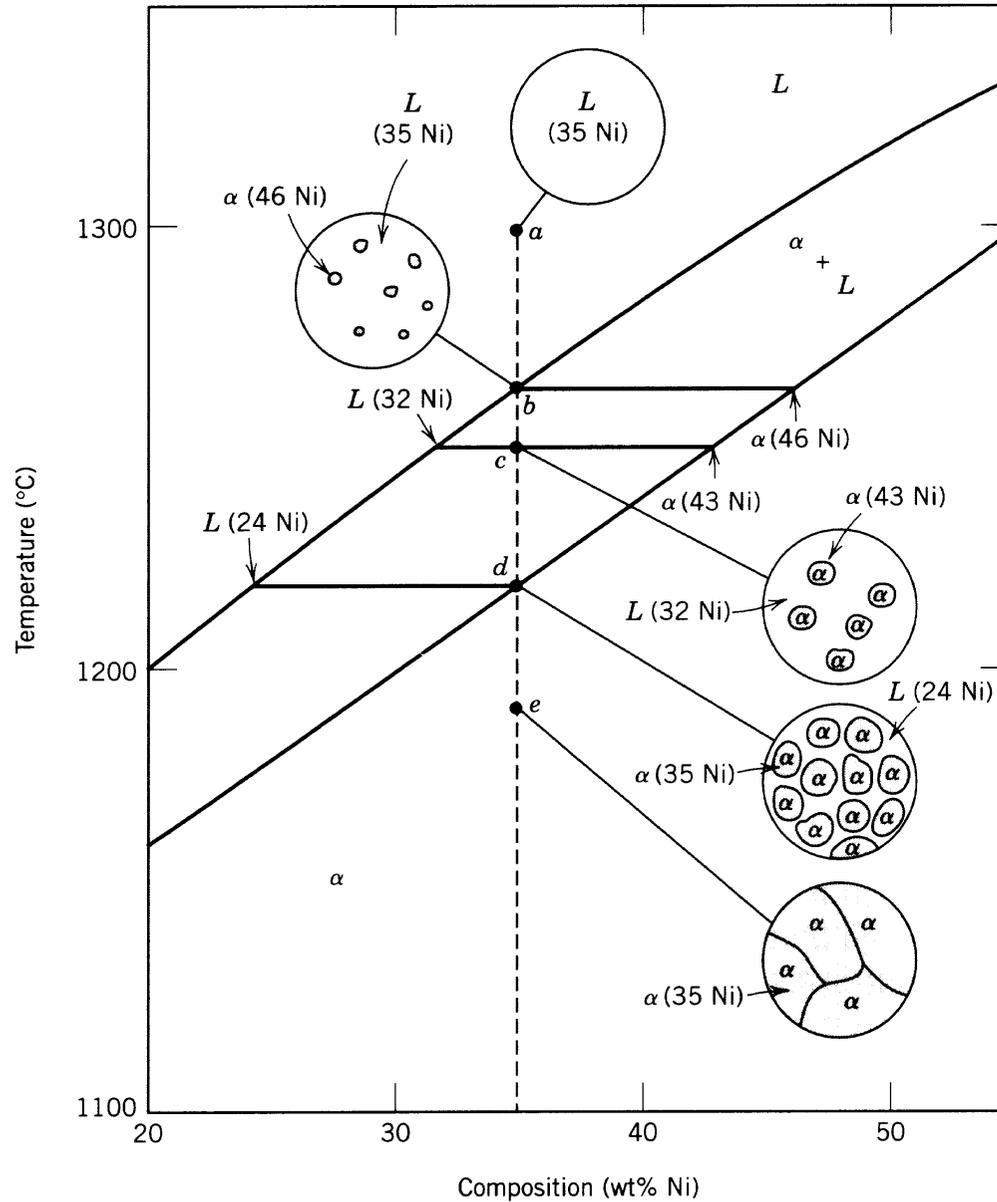


As transformações de fase nos materiais geralmente resultam em mudanças microestruturais.

A maioria das transformações de fase não ocorrem imediatamente, pois existem problemas de transporte de massa a serem superados. Daí decorre que a maioria das transformações de fase são dependentes do tempo.

Por exemplo quando há formação de uma nova fase, os átomos do reticulado devem se re-arranjar, havendo criação de uma interface que separa a nova fase da fase matriz. Além disso os átomos têm que se movimentar (difusão) para formar o núcleo cristalino.

CINÉTICA



A formação de uma nova fase ou de um novo arranjo ordenado de átomos ocorre por nucleação e crescimento.

O tempo necessário para nuclear e crescer um novo arranjo no interior do material pode ser medido e avaliado através do estudo da *cinética da transformação*.

CINÉTICA

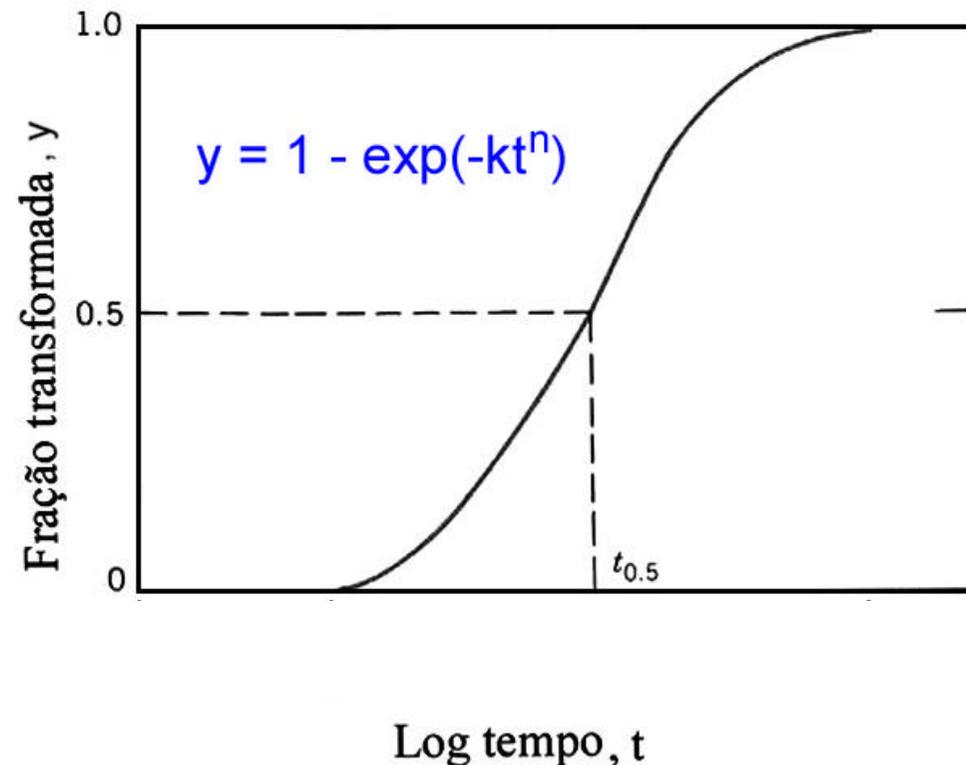
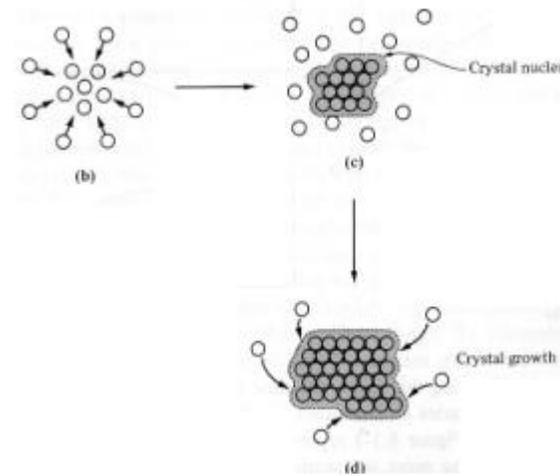
10

Em reações no estado sólido a quantidade de fase transformada varia de acordo com um comportamento sigmoidal (*S-shaped curve*) como o ilustrado na figura ao lado.

A fração transformada (y) em uma reação isotérmica, varia exponencialmente com o tempo transcorrido, t , conforme uma expressão denominada *equação de Avrami* :

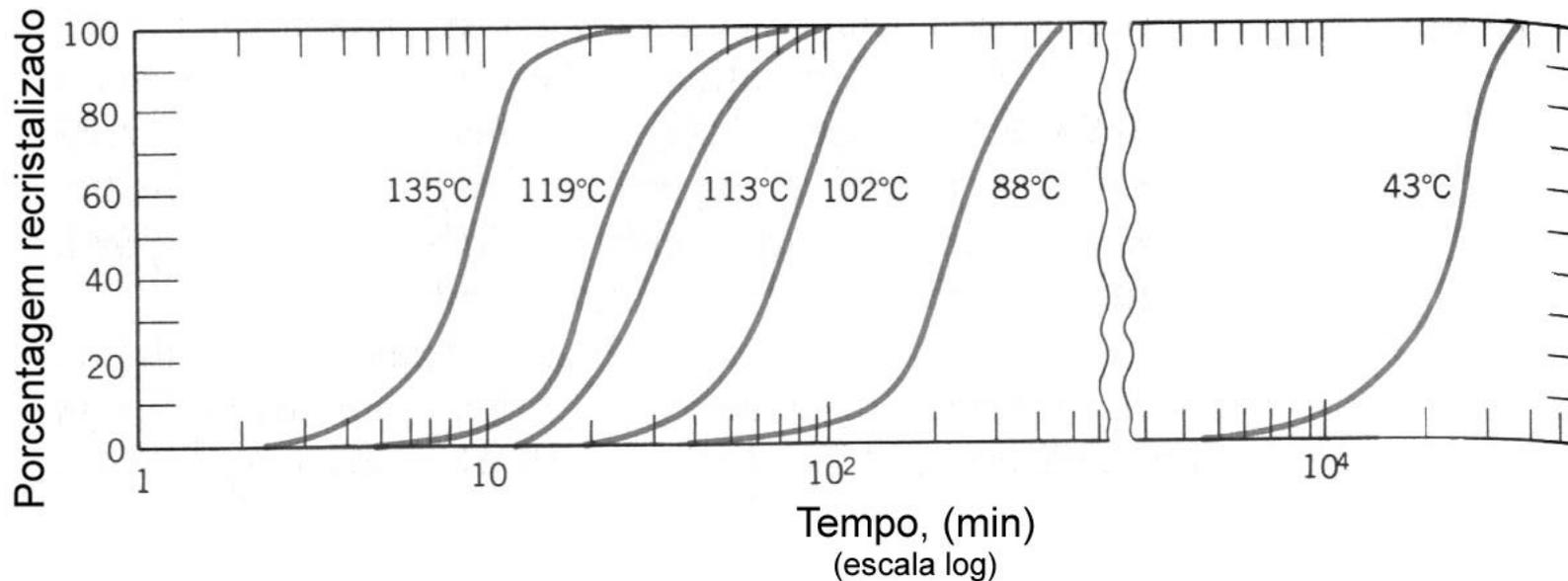
$$y = 1 - \exp(-kt^n)$$

onde k e n são constantes independentes do tempo, porém características do tipo de transformação.



CINÉTICA

11



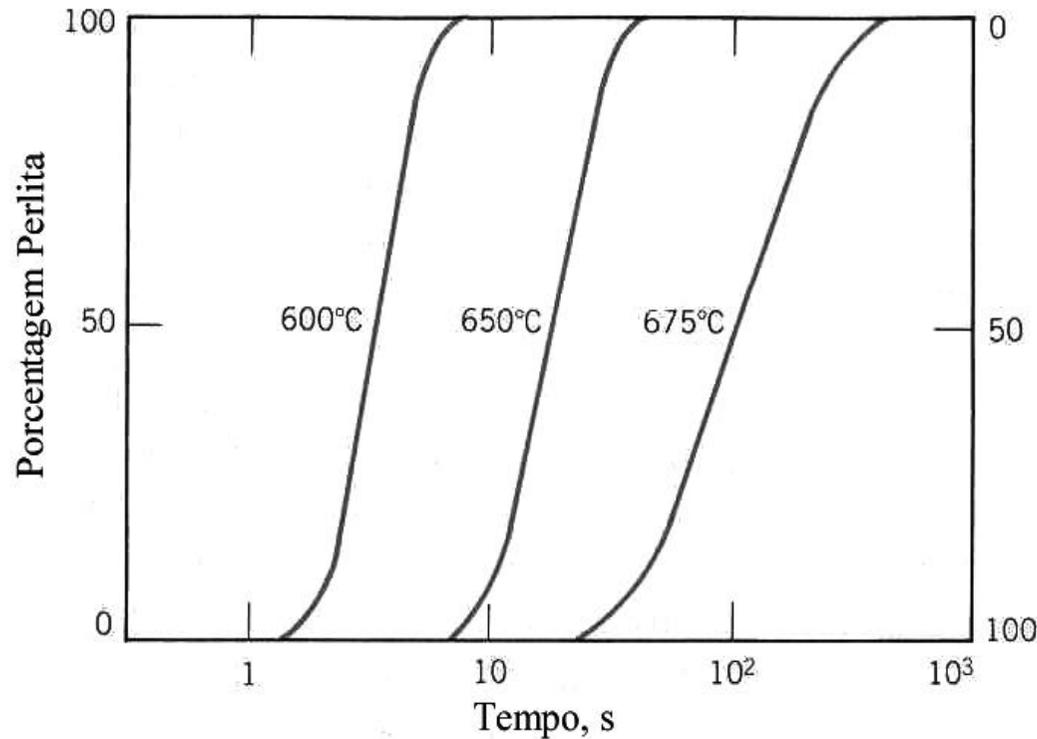
Porcentagem de recristalização isotérmica em função do tempo para cobre puro

Para a maioria das transformações de fase isotérmicas, a taxa de reação, r , varia exponencialmente com a temperatura, T :

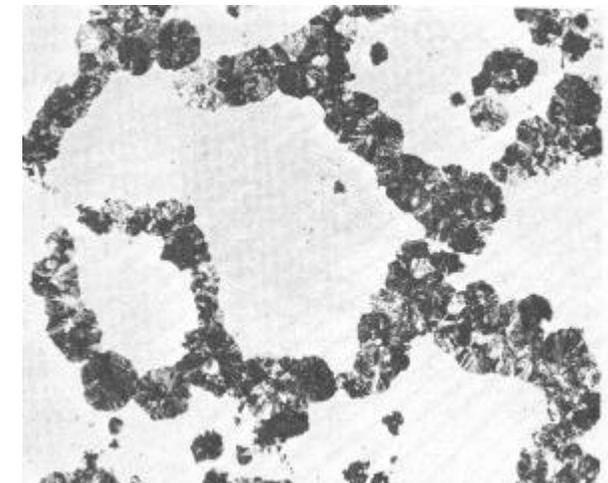
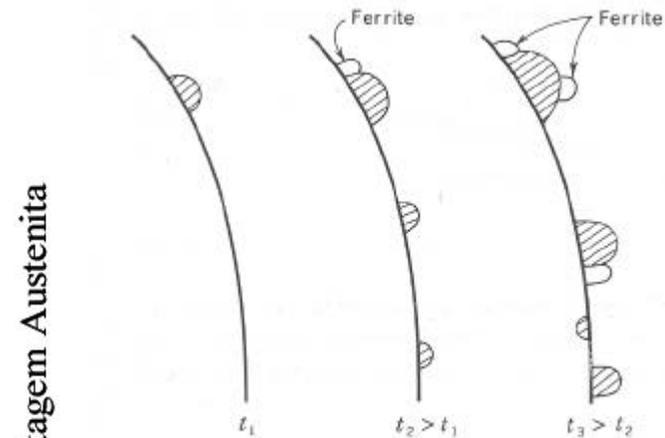
$$r = Ae^{-\frac{Q}{RT}}$$

onde R é a constante universal dos gases, T é temperatura absoluta, A é uma constante que independe da temperatura e Q é a energia de ativação da reação.

Cinética da reação eutetóide em aços *fora do equilíbrio* 12



Curvas em S para a cinética de transformação isotérmica de um aço com composição eutetóide (0,76 %C). Decomposição da fase austenita e formação dum agregado de ferrita + cementita denominado perlita.

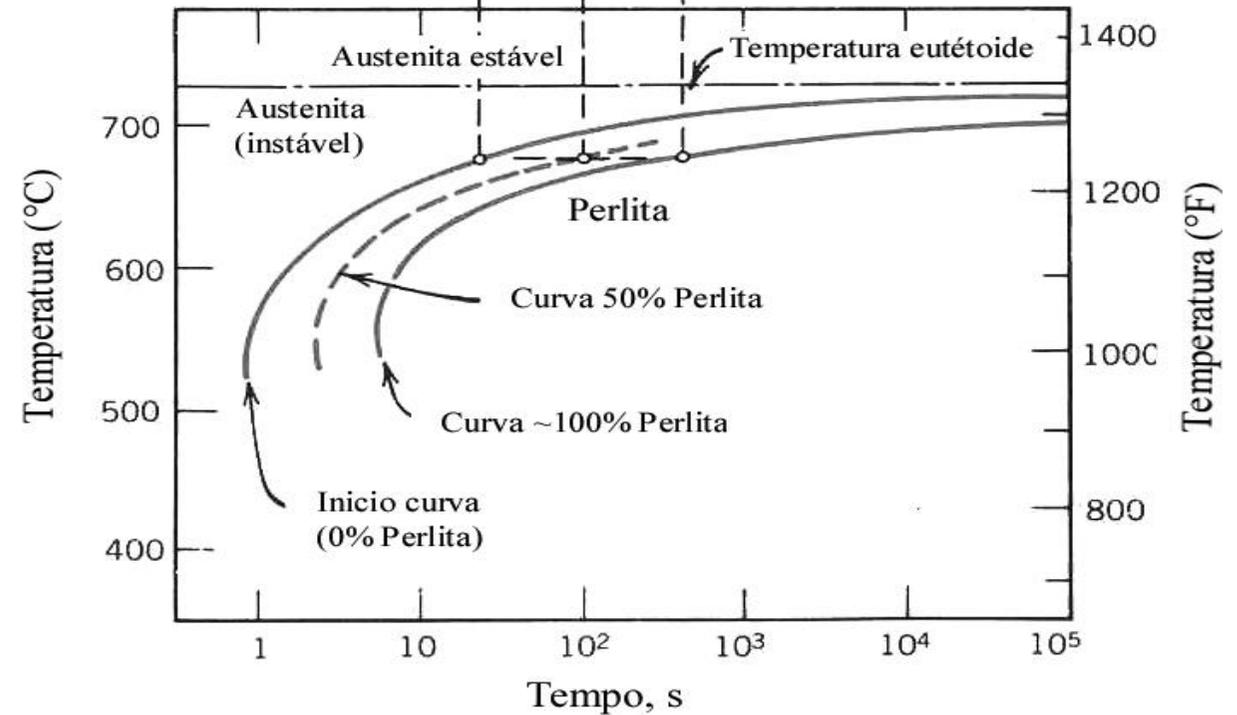
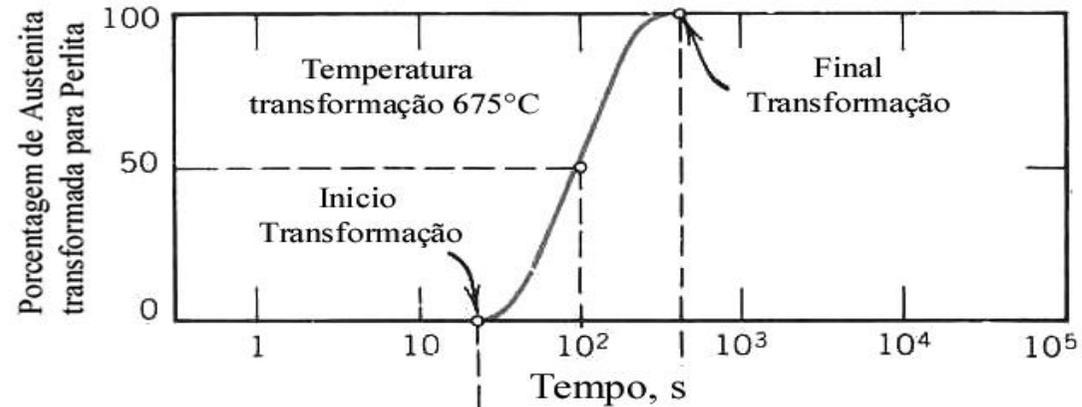


Nucleação e crescimento de perlita nos contornos de grão da austenita.

Cinética da reação eutetóide em aços *fora do equilíbrio* 13

Diagrama
TTT

Diagrama de transformação isotérmica TTT (Tempo-Temperatura) para a reação eutetóide em aços



Cinética da reação eutetóide em aços *fora do equilíbrio* 14

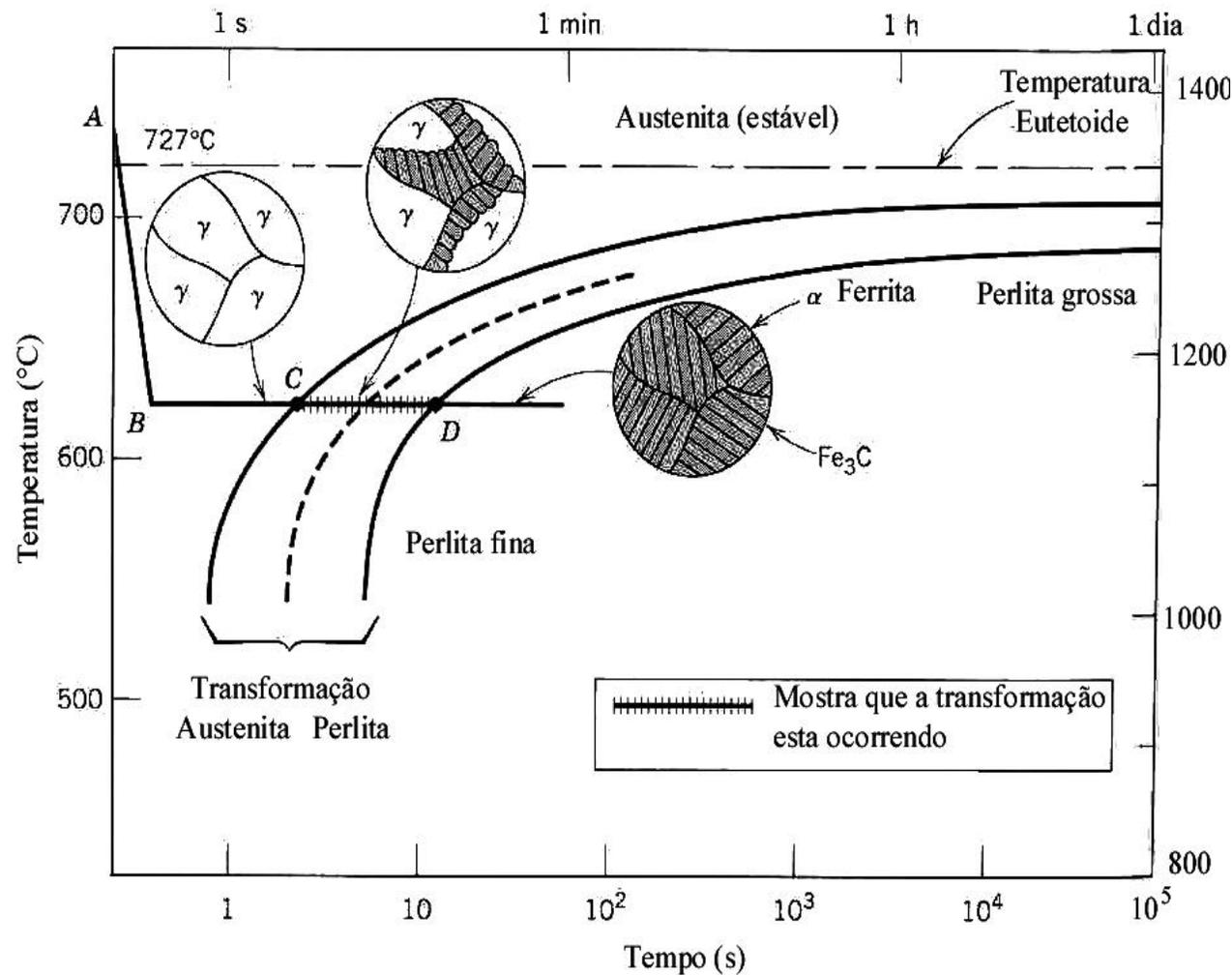


Diagrama de transformação isotérmica TTT (Tempo-Transformação-Temperatura) para a reação eutetóide em aços

TÊMPERA DOS AÇOS (*fases de não-equilíbrio*)

O tratamento de têmpera do aço é descrito na Odisséia, obra de Homero escrita supostamente entre os séculos XII e VIII a.C. .

A têmpera consiste em resfriamento brusco (em água ou óleo) do aço a partir do campo austenítico.

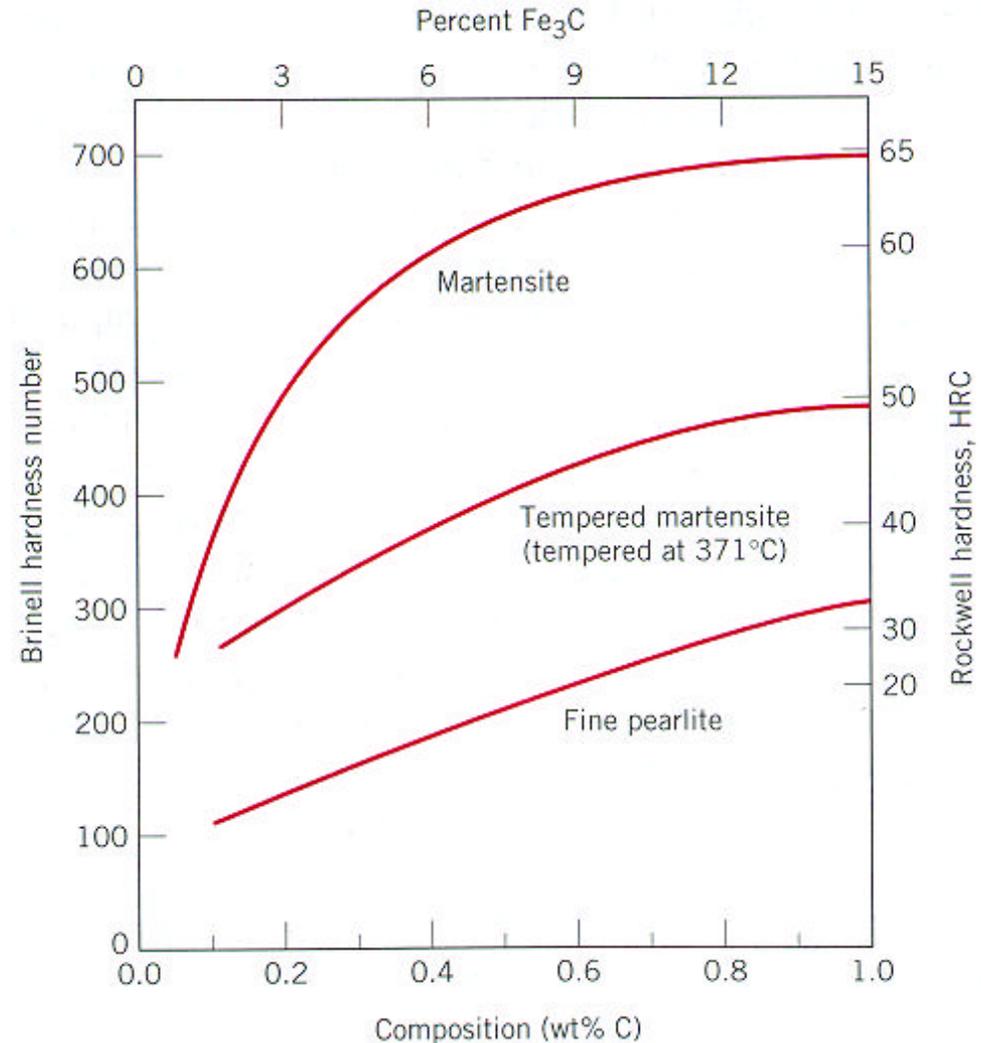
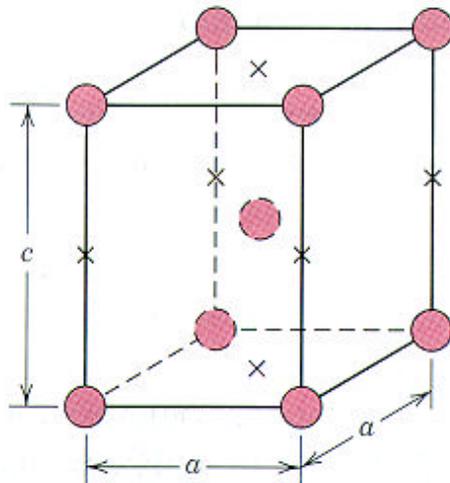
Forma-se uma fase acicular de não-equilíbrio denominada *martensita*.



Plaquetas de martensita em um fundo de austenita retida.

TÊMPERA DOS AÇOS (*fases de não-equilíbrio*) ¹⁶

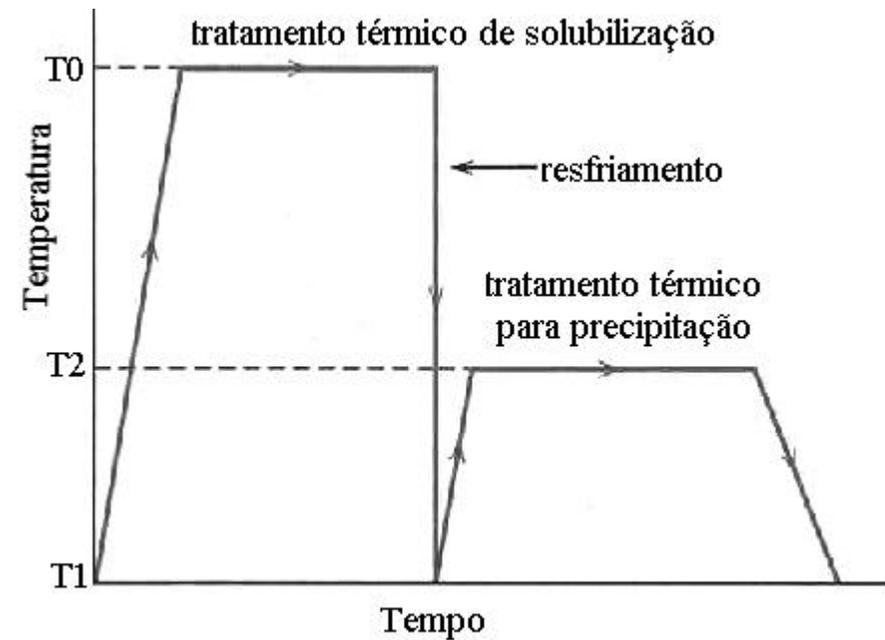
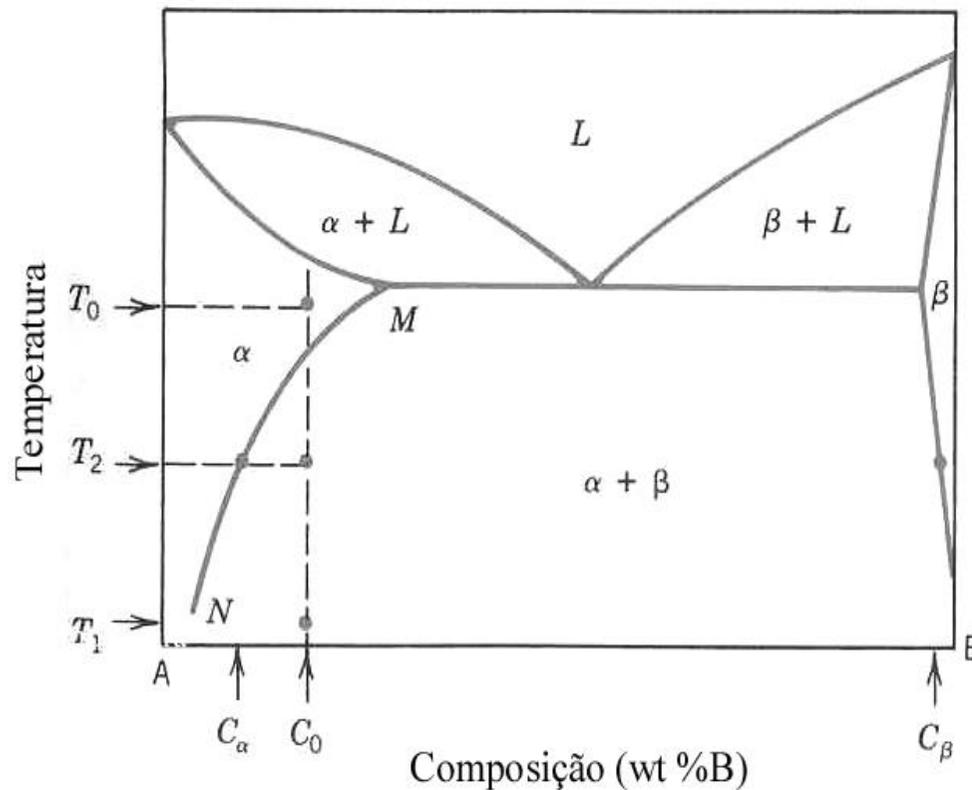
- A transformação martensítica ocorre quando a velocidade de resfriamento é rápida o suficiente para impedir a difusão do carbono.
- A martensita é uma fase dura e frágil.
- Sua dureza aumenta com o teor de carbono do aço.



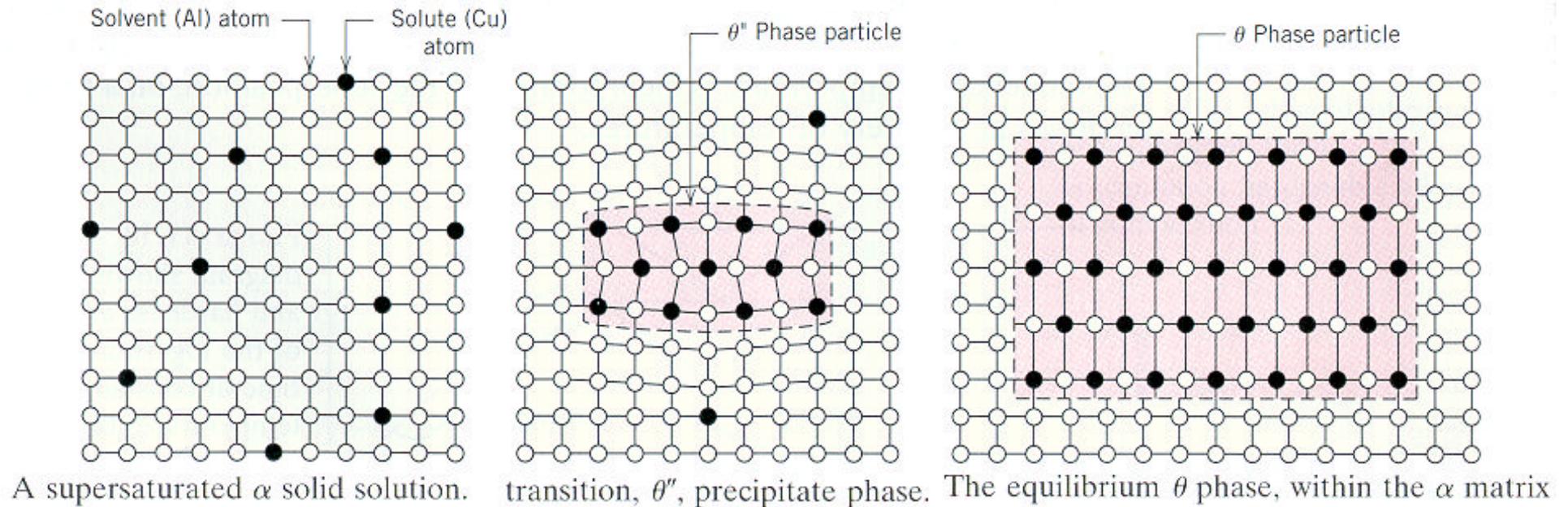
Estrutura da martensita (tetragonal de corpo centrado) : os círculos indicam as posições dos átomos de Fe, enquanto os X indicam posições que podem ser ocupadas por átomos de C.

ENDURECIMENTO POR PRECIPITAÇÃO (*fora do equilíbrio*)

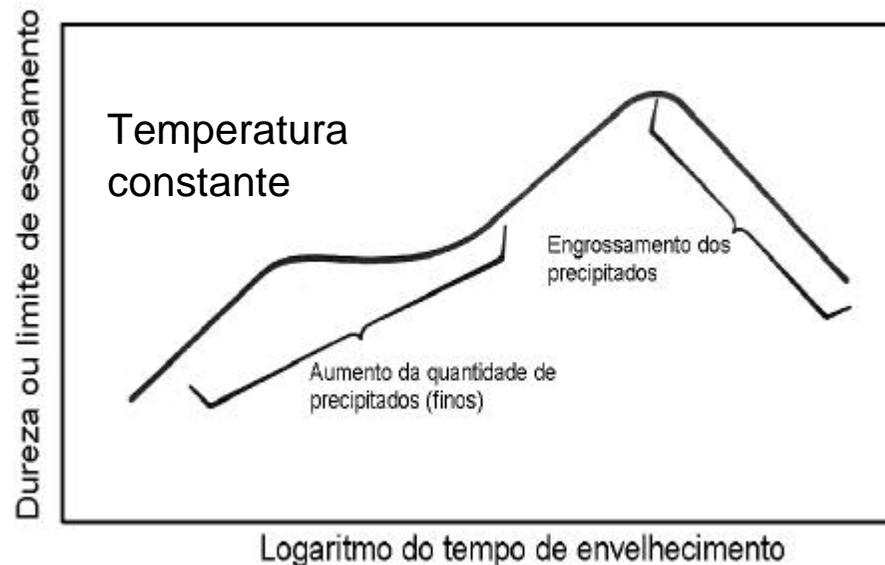
A principal condição para que uma liga possa ser envelhecida é que a solubilidade diminua com o decréscimo da temperatura, de forma que uma solução sólida supersaturada possa ser obtida (não há tempo suficiente para precipitar a fase β).



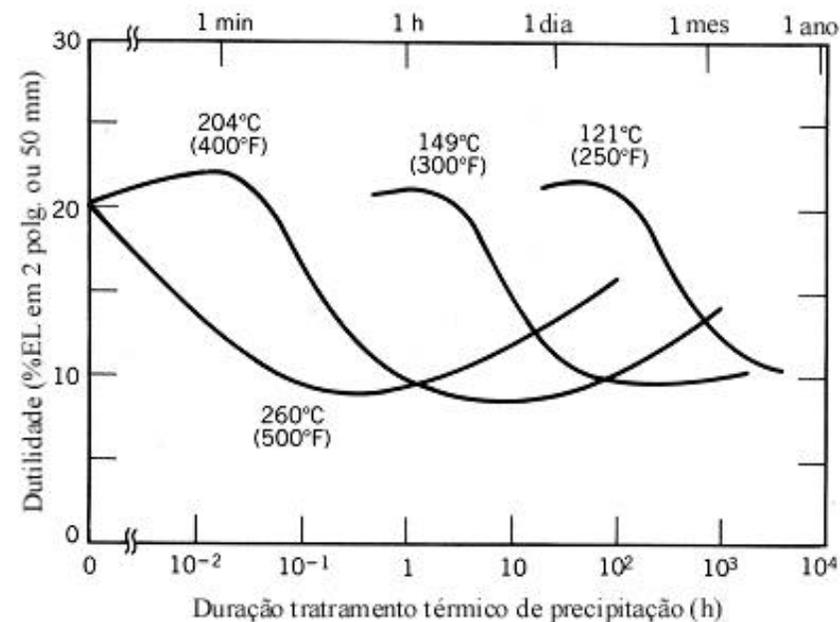
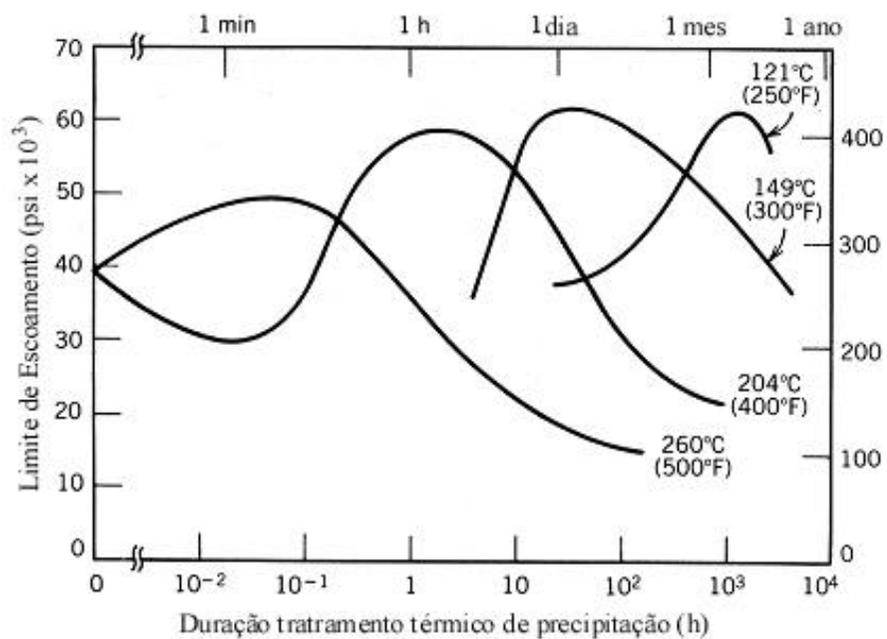
ENDURECIMENTO POR PRECIPITAÇÃO (*fora do equilíbrio*)



No tratamento de precipitação, após solubilização, ocorre a formação de precipitados *metaestáveis* muito finos que *endurecem* o material.



Endurecimento por precipitação (Duralumínio)



Liga de alumínio 2014 (0,9%Si; 4,4%Cu; 0,8%Mn; 0,5%Mg)

- **Capítulos do Callister tratados nesta aula**
 - Itens do Capítulo 9 :
 - 9.13 e 9.14 (somente até ligas hipoeutetóides)
 - Itens do Capítulo 10 :
 - 10.1 a 10.5; 10.7
 - Itens do Capítulo 11 :
 - 11.7 e 11.8

- Outras referências importantes
 - Van Vlack , L. - Princípios de Ciência dos Materiais, 3ª ed.
 - os temas tratados nesta aula estão dispersos pelo livro do Van Vlack, e não são completamente cobertos nessa referência; os itens que apresentam assuntos tratados na aula são os seguintes: Itens 9-10 a 9-12;10-1 a 10-7; 10-10; 11-7