

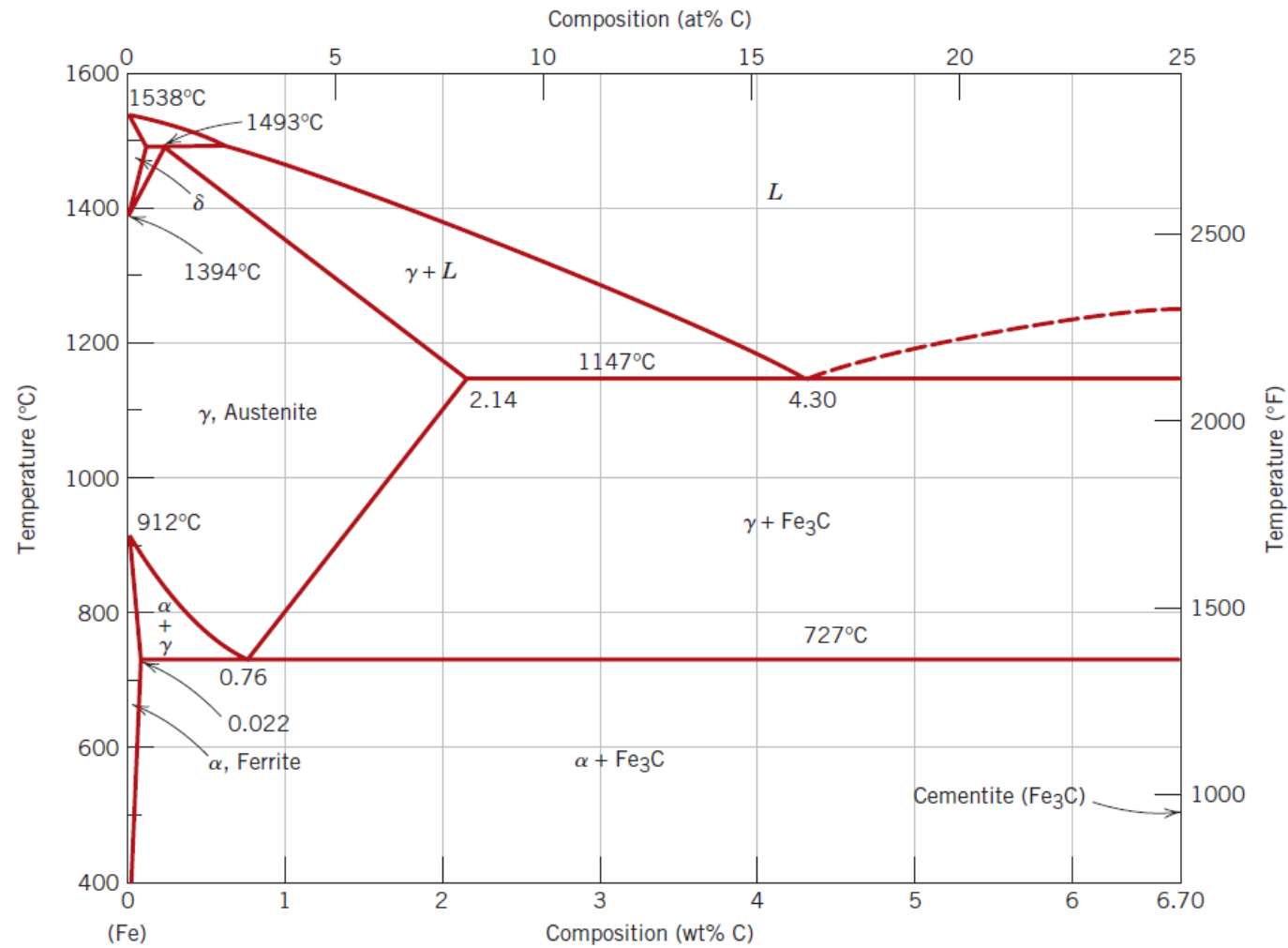
# ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS I

---

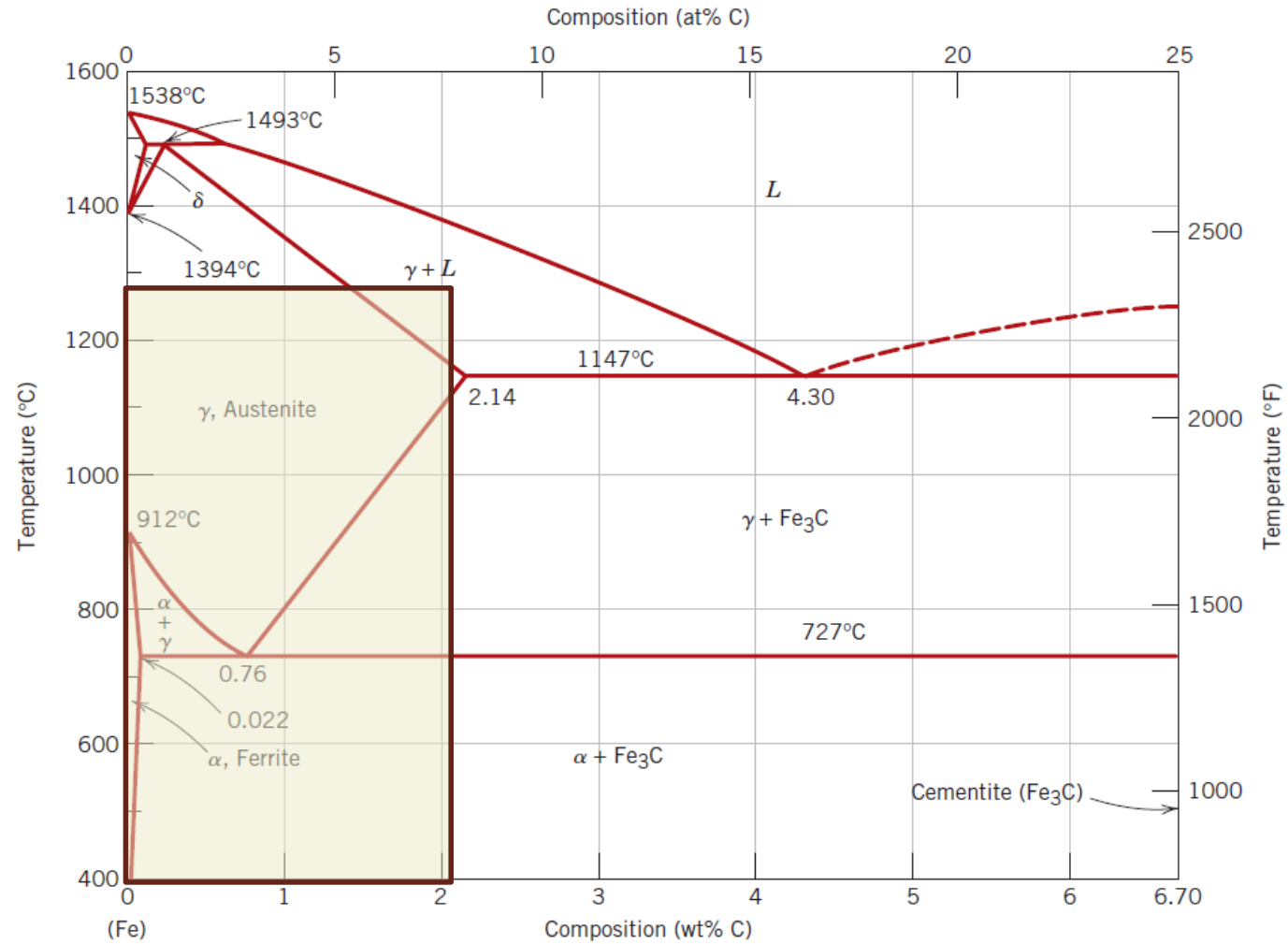
Aula 7

Conteúdo: Sistema Fe-C

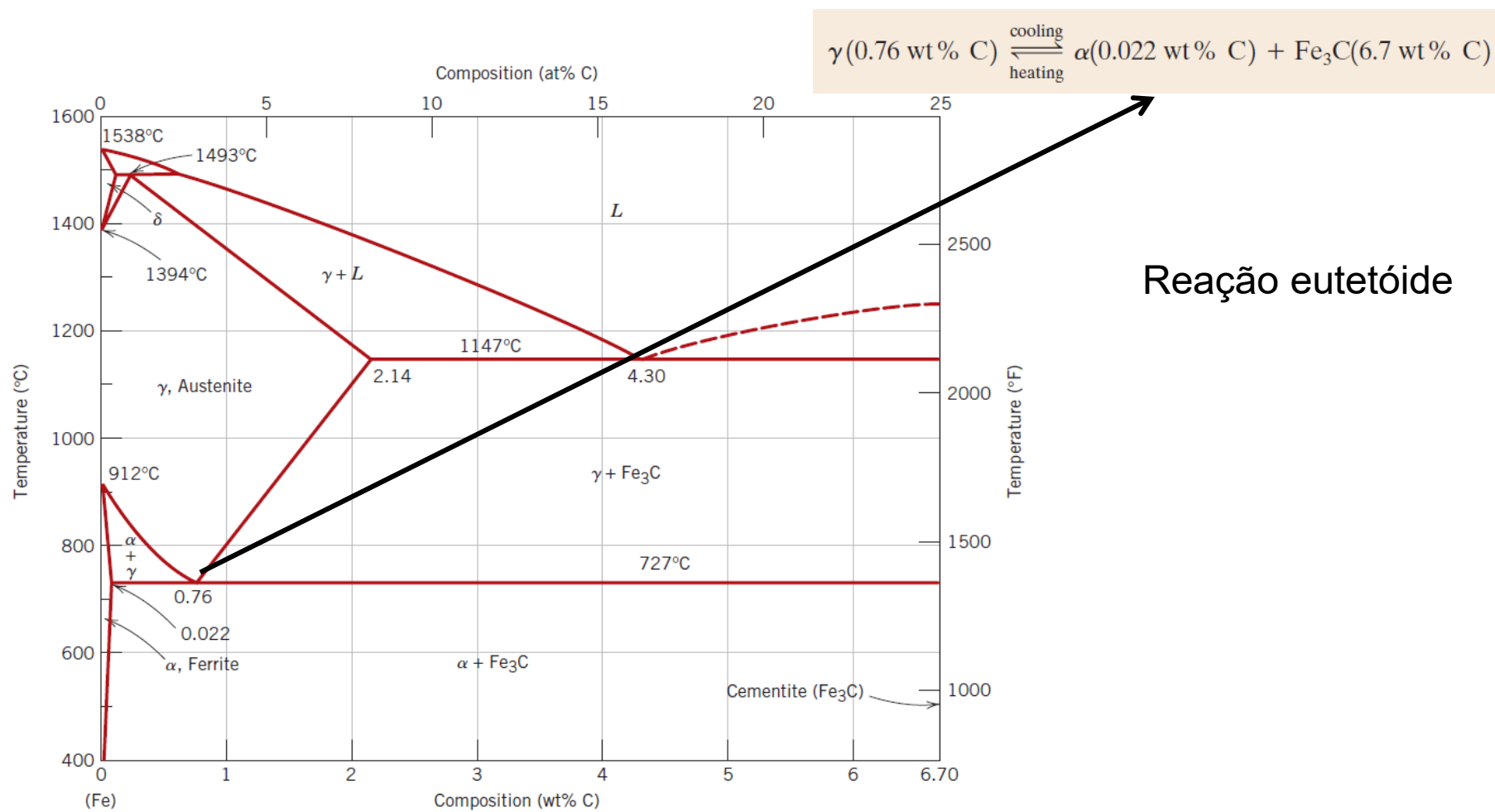
# Diagrama Fe-Fe<sub>3</sub>C



# Aços



# Aços



# Aços-C (ou aços ao carbono) e outros aços

- Aços ao carbono são ligas Fe-C com %C em peso  $< 2,11\%$ ;
  - Aços hipo-eutetóides %C  $< 0,76\%$
  - Aços eutetóides %C =  $0,76\%$
  - Aço hiper-eutetóides %C  $> 0,76\%$
- Elementos de liga comuns em aços: Mn, Si, Ni, Cr, Mo
- Aços especiais: Aços ferramenta; Aços Alta Resistência Baixa Liga (ARBL); Aços bi-fásicos; Aços IF; Aços inoxidáveis (ferríticos, austeníticos, martensíticos, duplex, etc).

# Aços Carbono

## **Vantagens:**

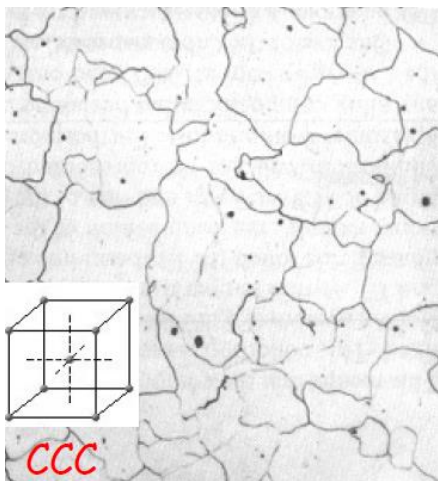
- Ampla faixa de propriedades mecânicas
- São baratos
- Representam cerca de 80% da produção mundial de aço

## **Limitações:**

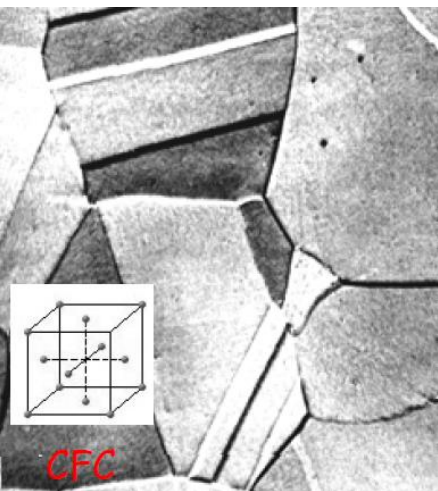
- Têmpera difícil para largas espessuras (perigo de deformação/fratura)
- Baixa tenacidade
- Baixa resistência à corrosão
- Difíceis de trabalhar para altos teores de C.

# Fases presentes nos Aços

ferrita

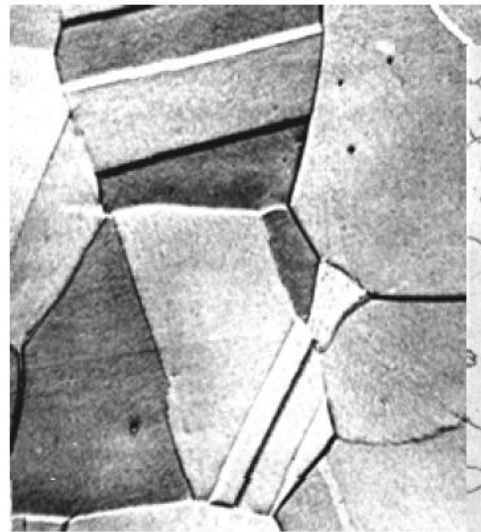


austenita

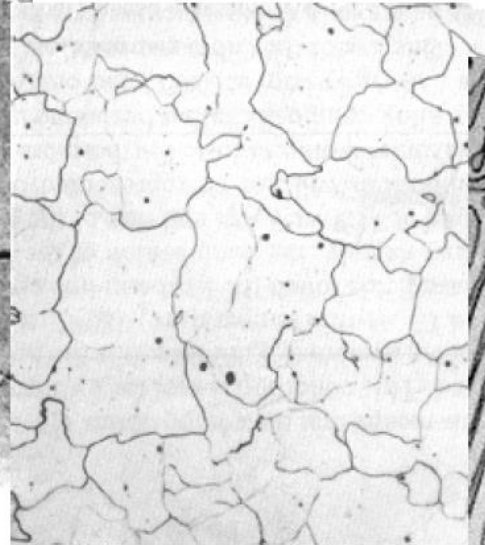


- **Ferrita – Fe  $\alpha$** : Solução sólida intersticial de C em ferro  $\alpha$  com estrutura CCC.
- É muito macia e dútil, com LRT < 310 MPa.
- É ferromagnética à  $T < 770 \text{ }^\circ\text{C}$  (exibe magnetismo)
- **Austenita – Fe  $\gamma$** : Solução sólida intersticial de C em ferro com estrutura cristalina CFC;
- É a forma estável do ferro puro entre 910 e 1400  $^\circ\text{C}$ .
- Não é ferromagnética.
- **Cementita – Fe<sub>3</sub>C**: É o carboneto de ferro Fe<sub>3</sub>C.
- Tem estrutura ortorrômbica.
- Possui 6,7% de carbono em peso.
- Comparativamente a ferrita e austenita, a cementita é muito dura e tem maior LRT, entretanto é muito frágil.

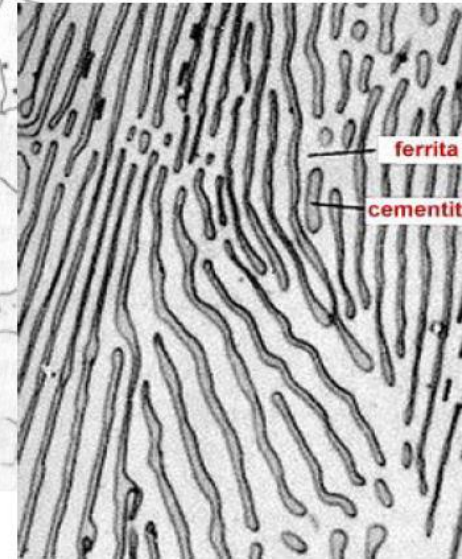
# Microestrutura Comuns em Aços



**Austenita**  
 $Fe_{\gamma}$



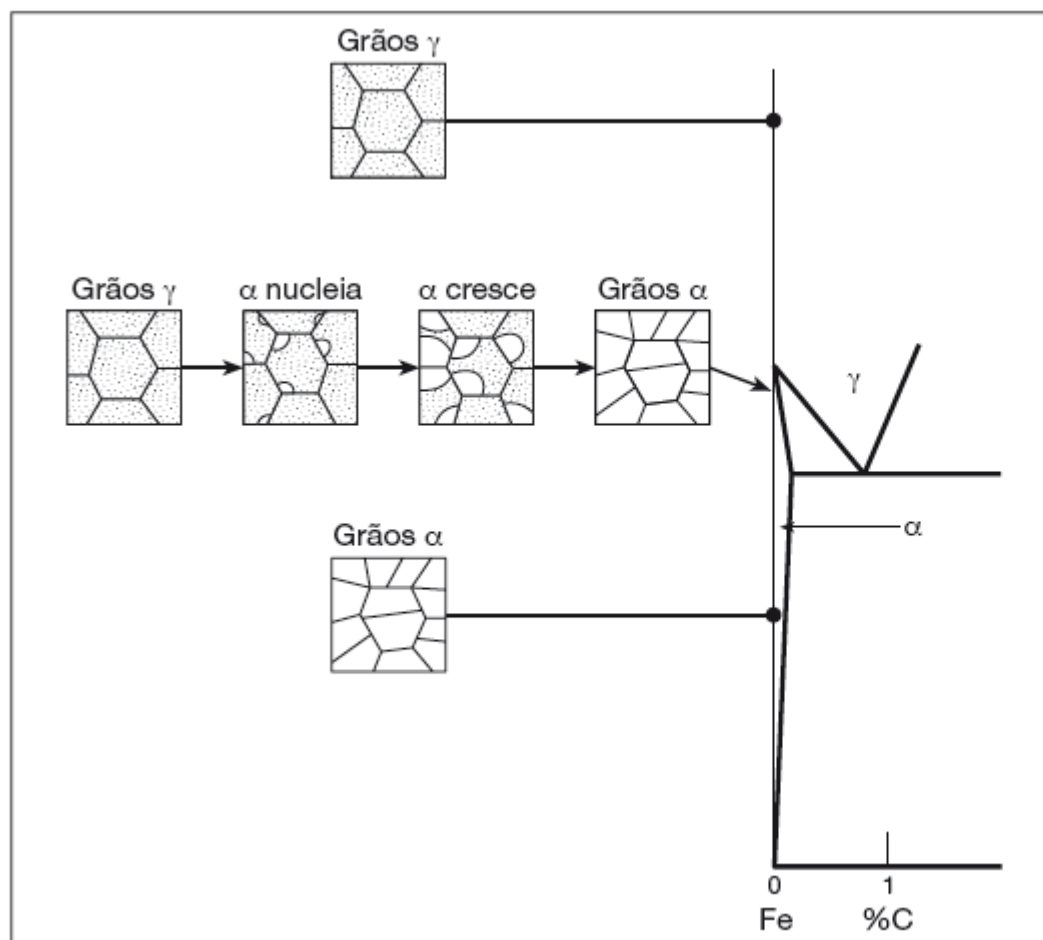
**Ferrita**  
 $Fe_{\alpha}$



**Perlita**  
 $Fe_{\alpha} + Fe_3C$



# Aços-C

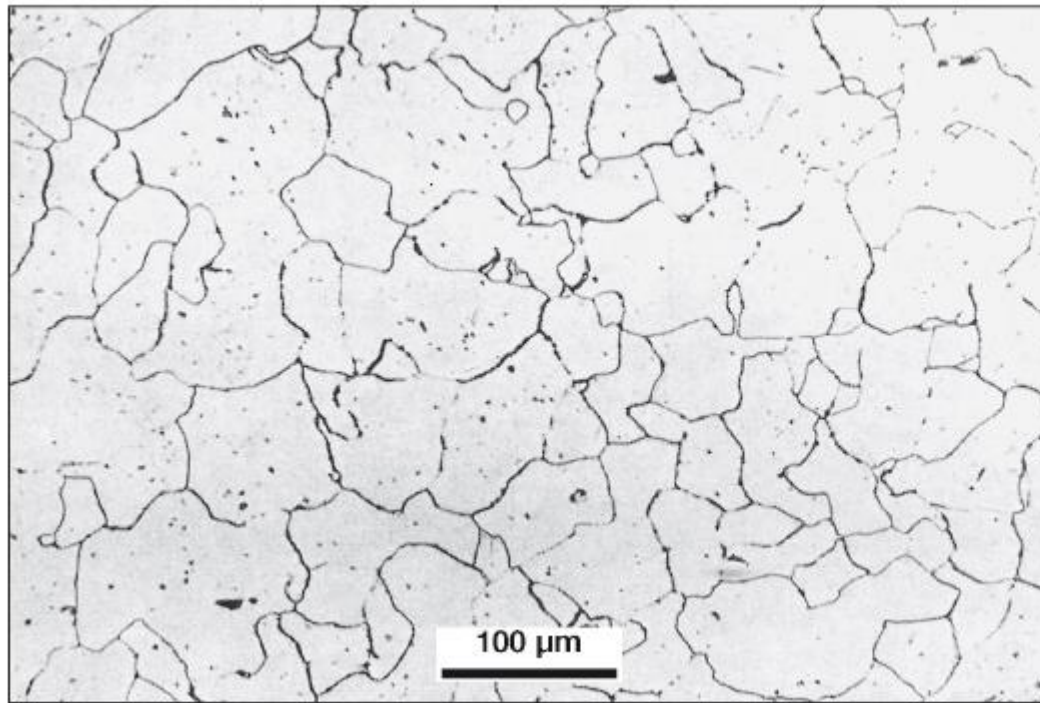


**Figura 7.2**

Representação esquemática da transformação da austenita em ferrita em condições próximas ao equilíbrio. Adaptado de Ashby [7].

Aço com baixíssimo teor de carbono

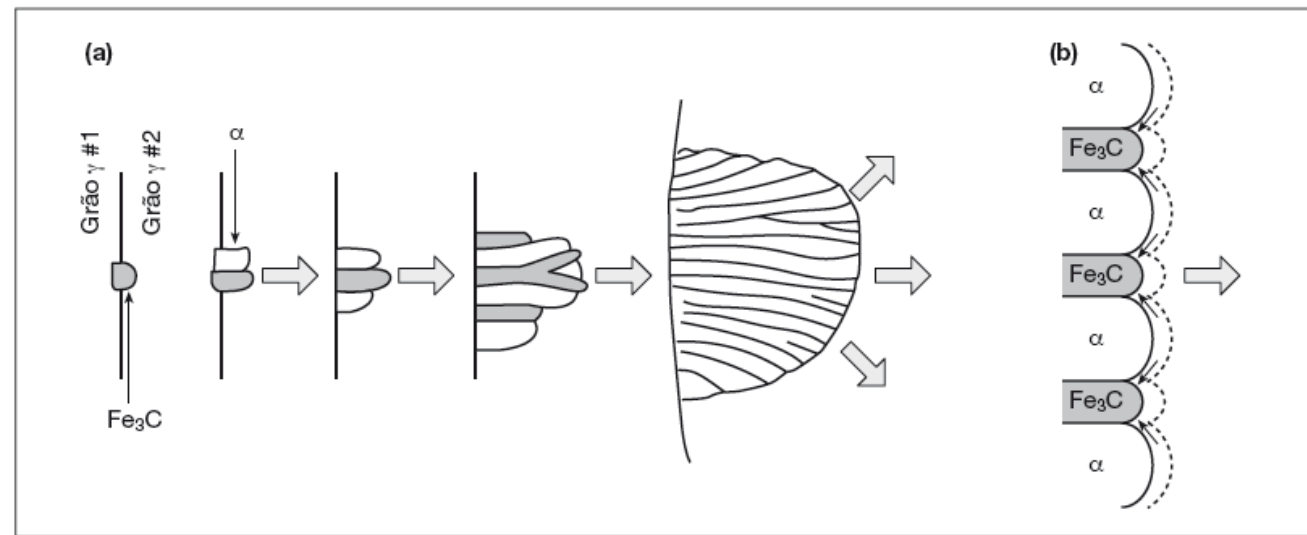
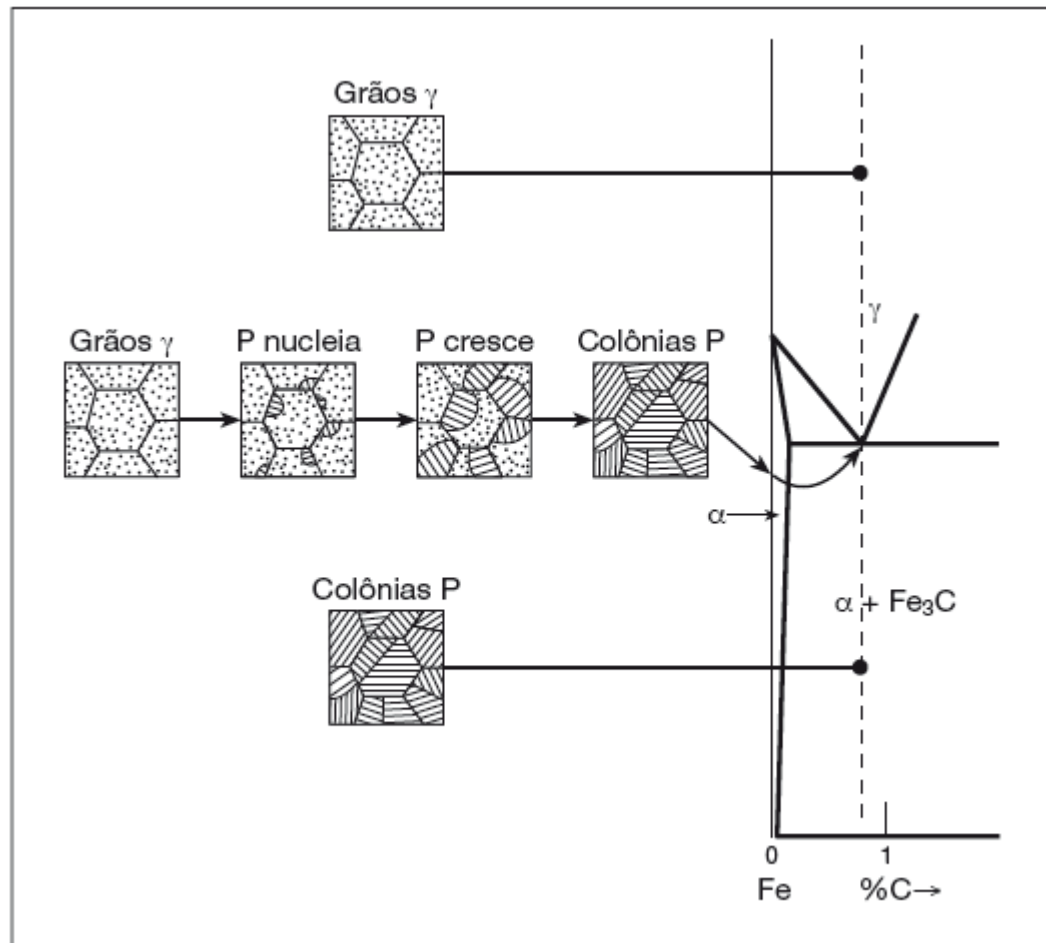
# Aços-C



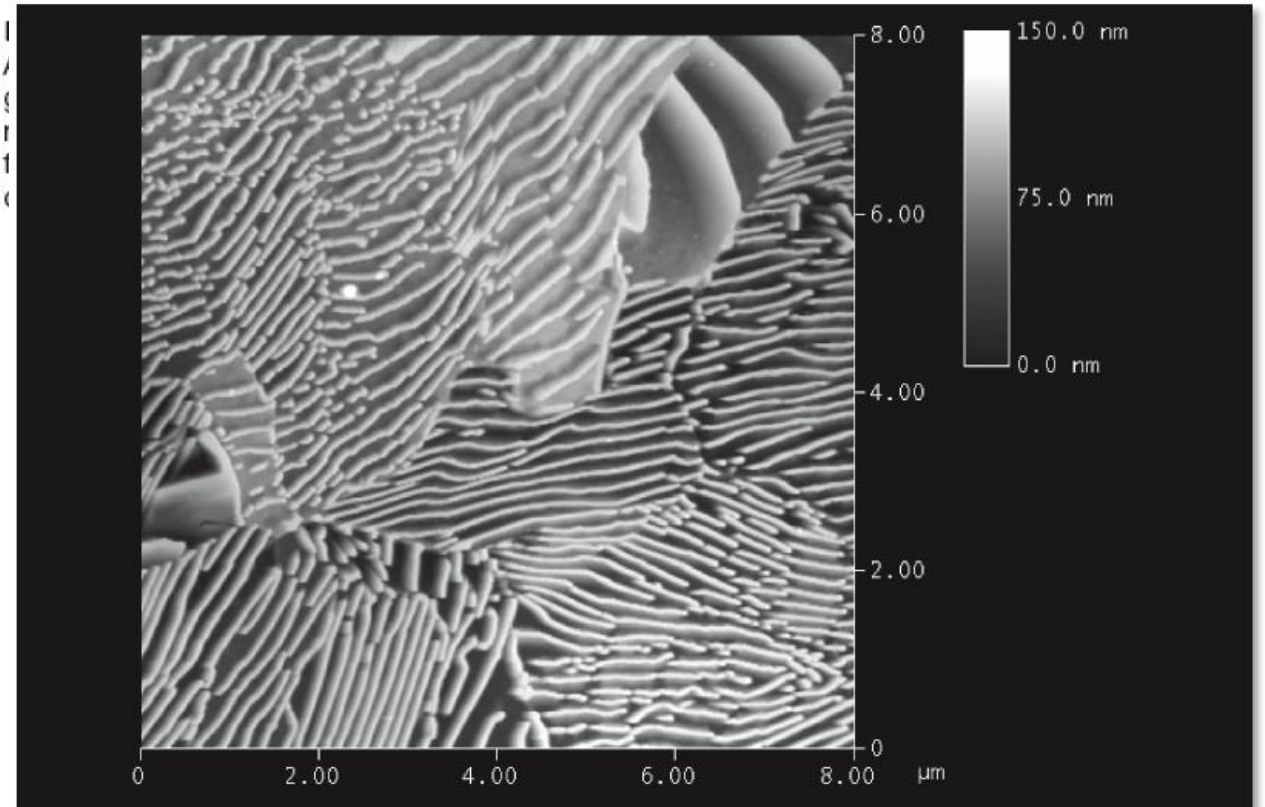
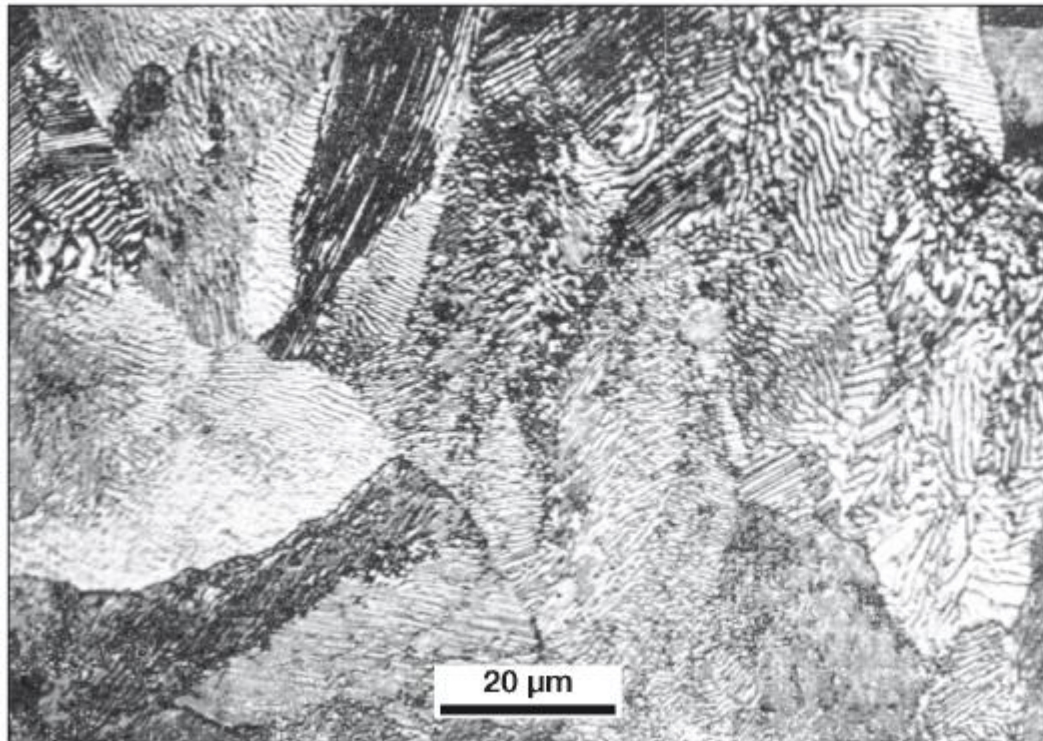
**Figura 7.3**

Aço de teor de carbono extra baixo<sup>(7)</sup> (no caso, Ferro Armco). Grãos de ferrita e pequenas inclusões não-metálicas. Ataque: água régia.

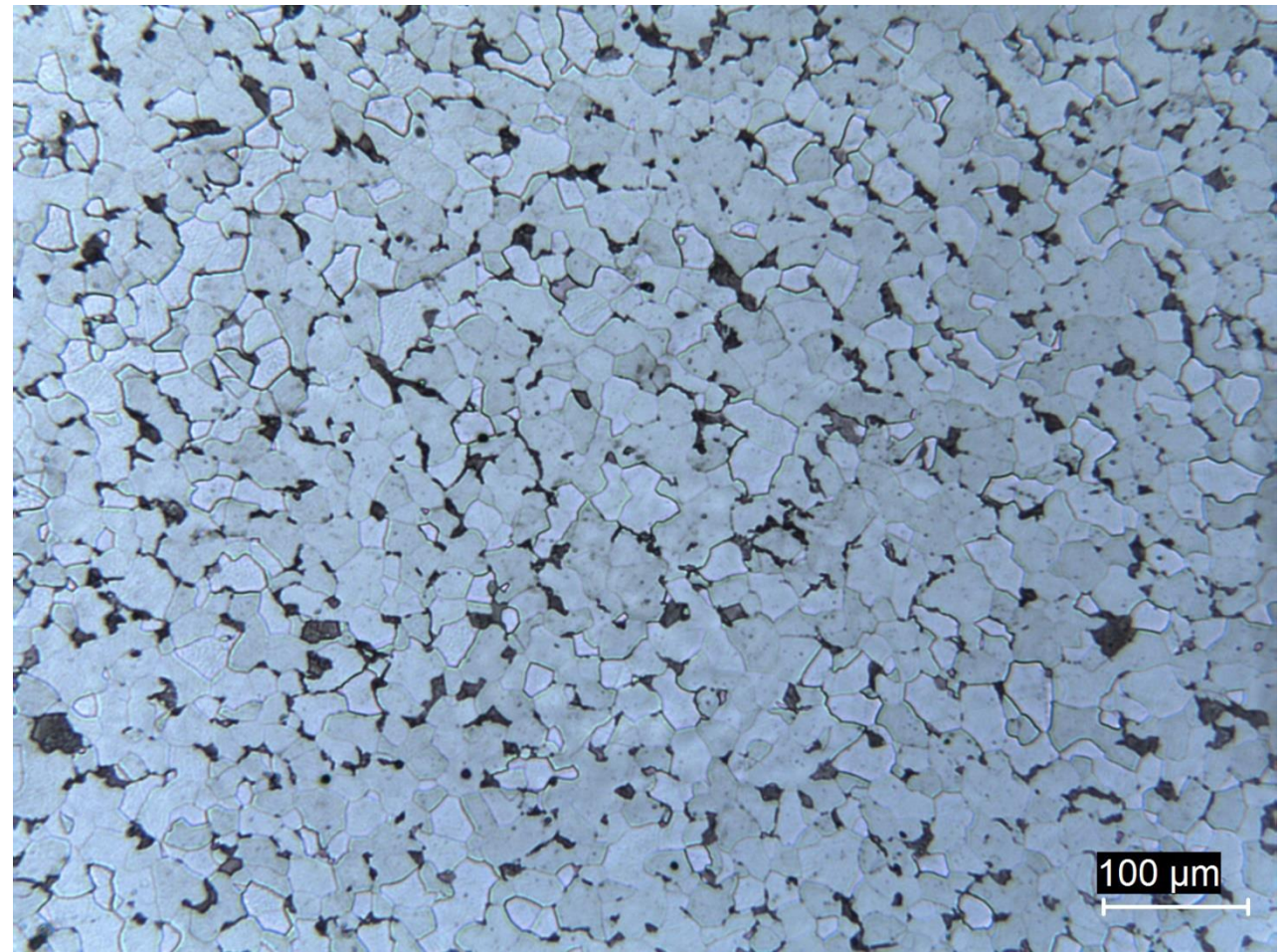
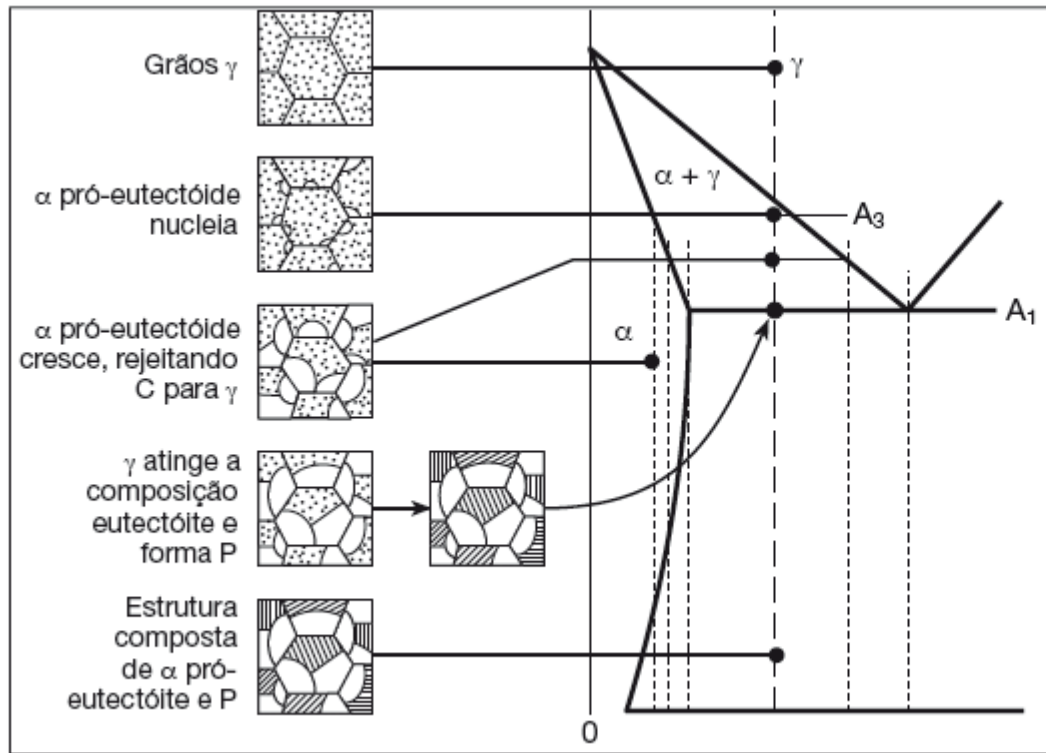
# Aços-C



# Aços-C

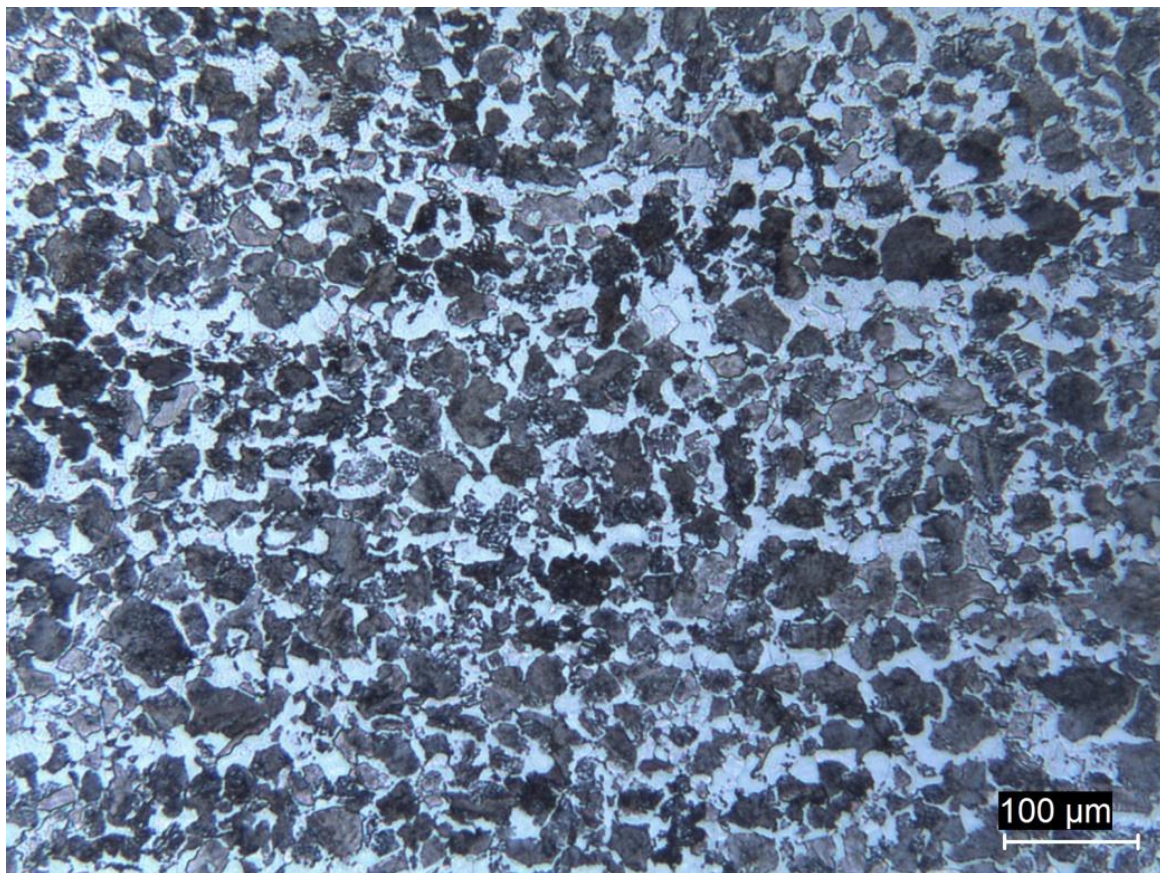


# Aços-C - Hipoeutetóides



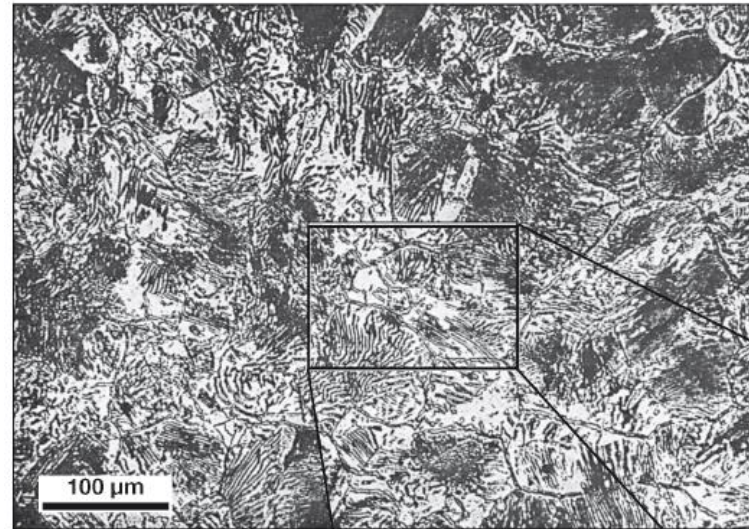
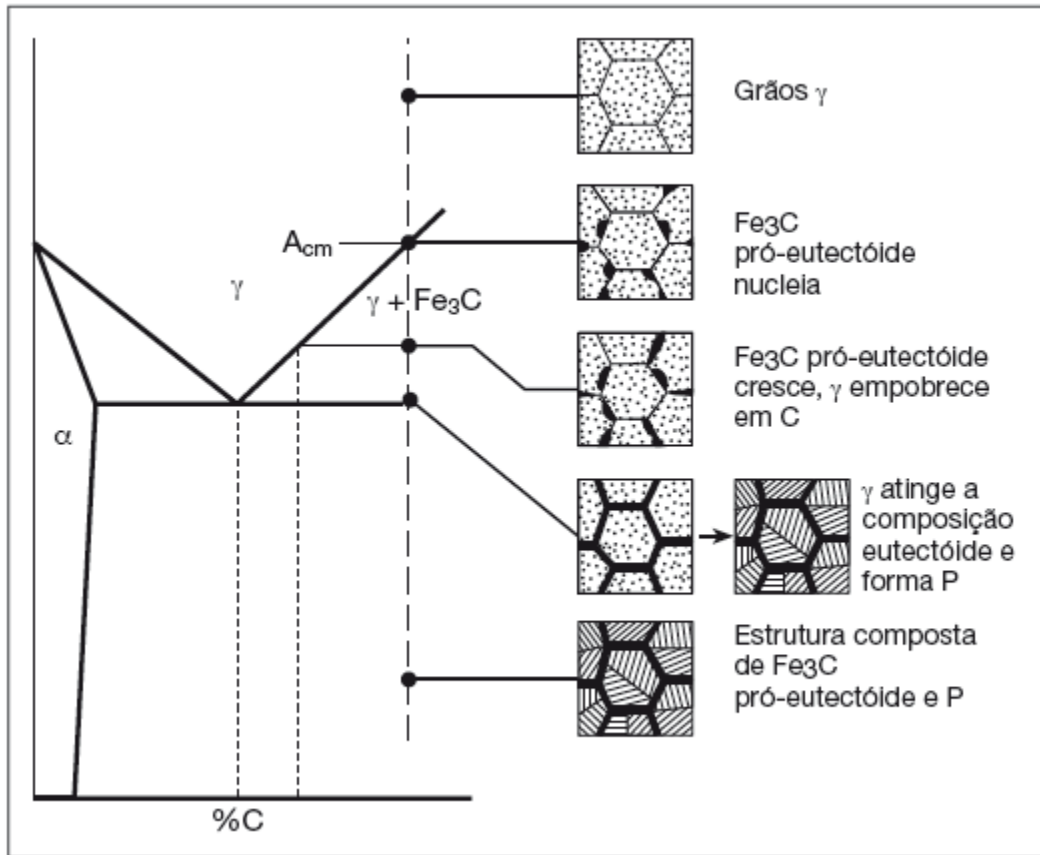
Aço 1010

# Aços-C - Hipoeutetóides

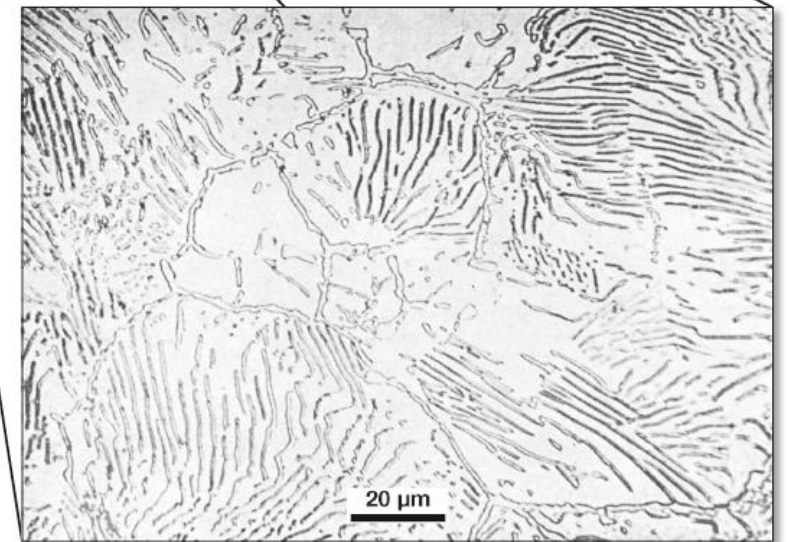


Aço 1050

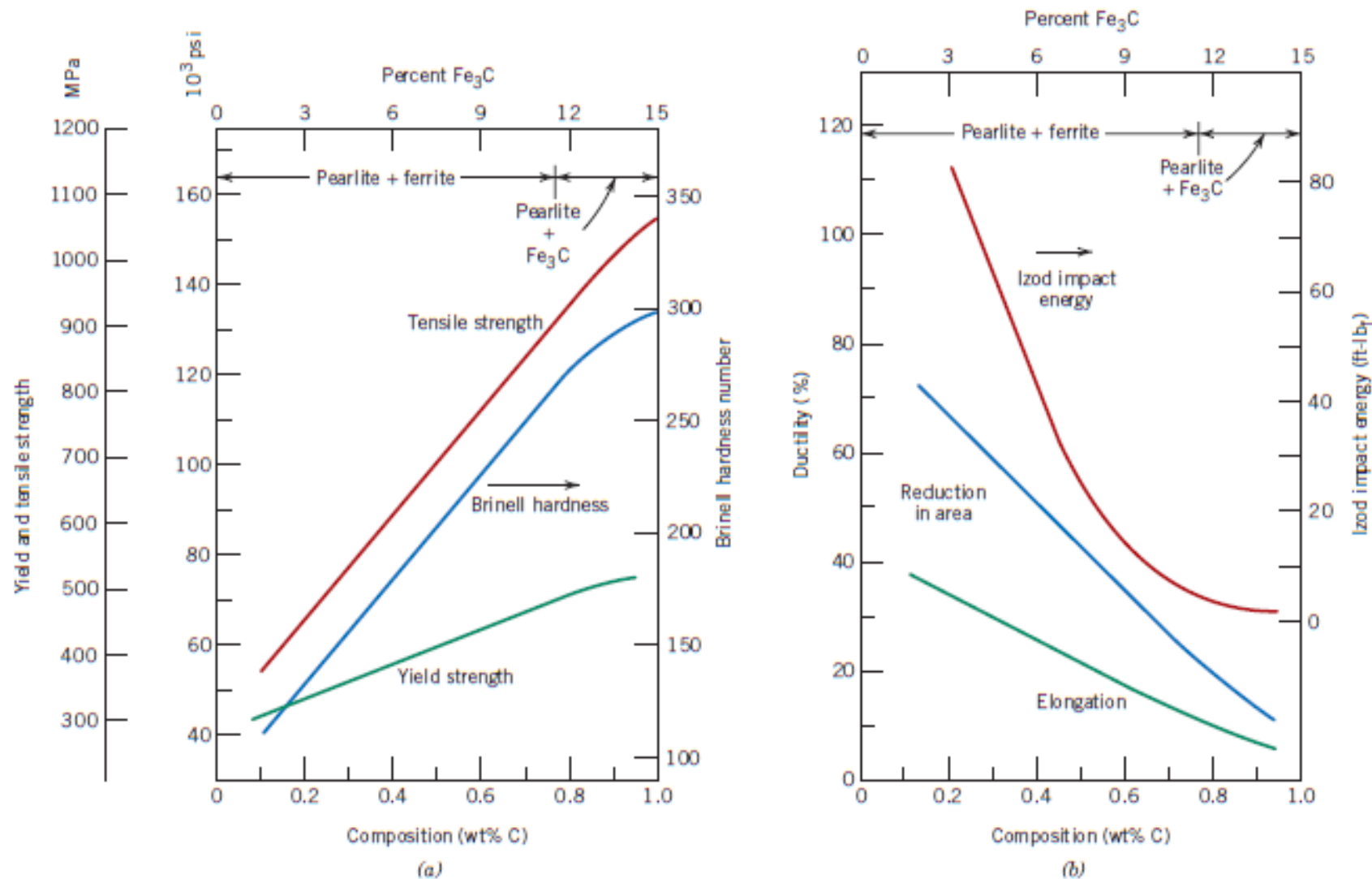
# Aços-C - Hipereutetóides



**Figura 7.32**  
Aço hipereutectóide.  
Cementita em rede.  
Ataque: Nital.



**Figura 7.33**  
Detalhe da região assinalada na Figura 7.31.



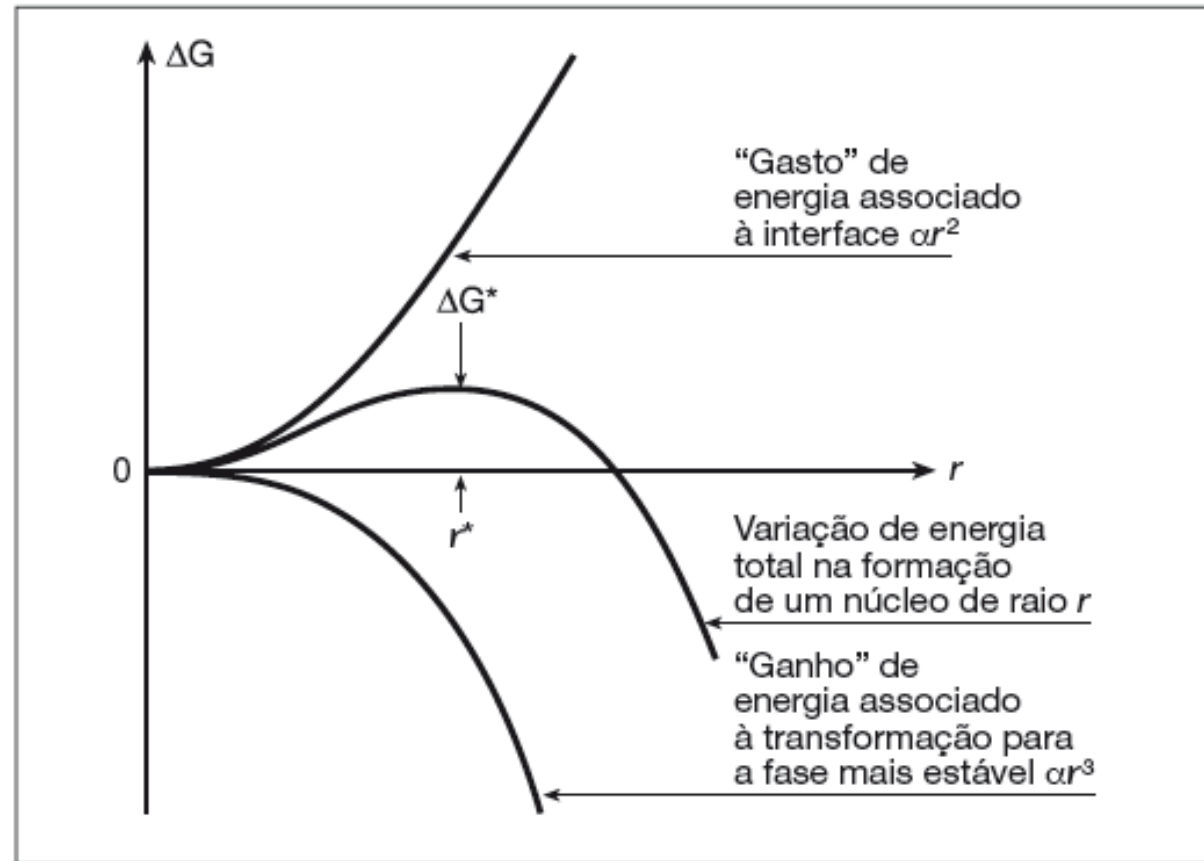
**Figure 10.29** (a) Yield strength, tensile strength, and Brinell hardness versus carbon concentration for plain carbon steels having microstructures consisting of fine pearlite. (b) Ductility (%EL and %RA) and Izod impact energy versus carbon concentration for plain carbon steels having microstructures consisting of fine pearlite. [Data taken from *Metals Handbook: Heat Treating*, Vol. 4, 9th edition, V. Masseria (Managing Editor), American Society for Metals, 1981, p. 9.]



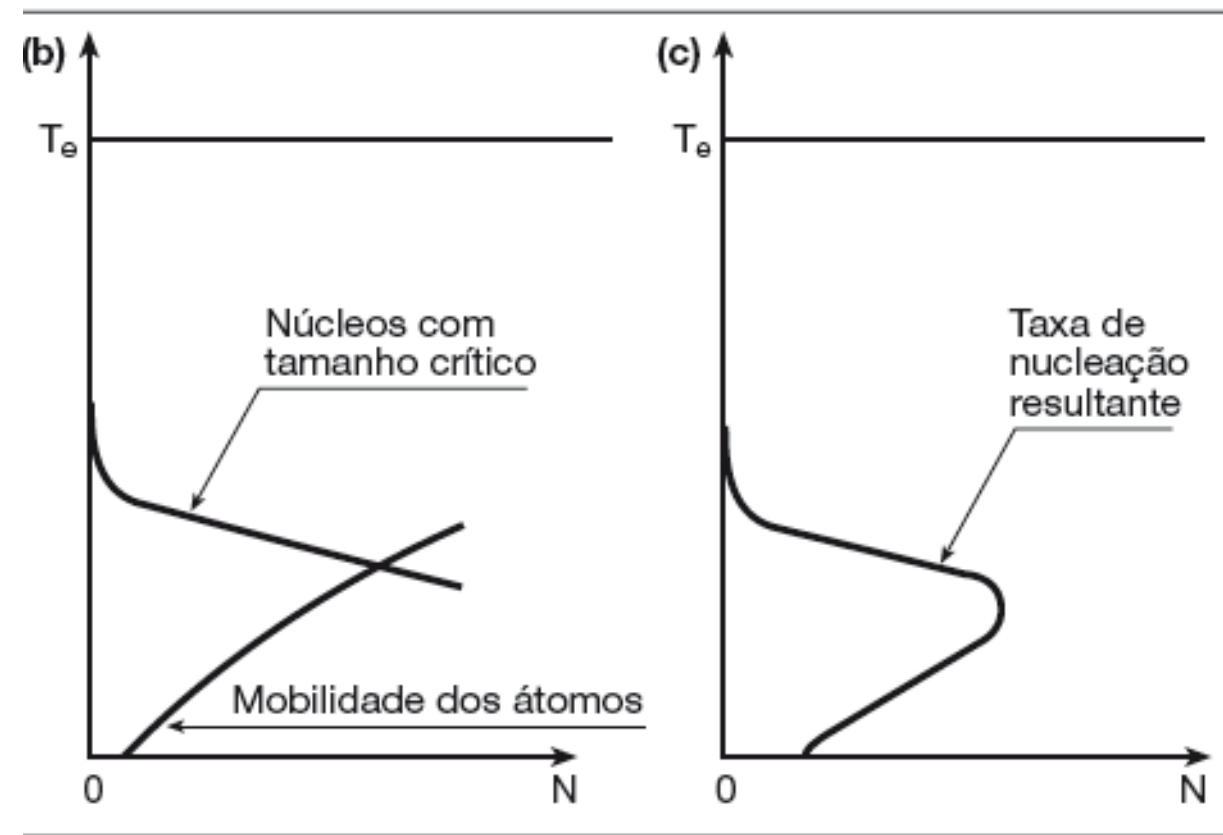
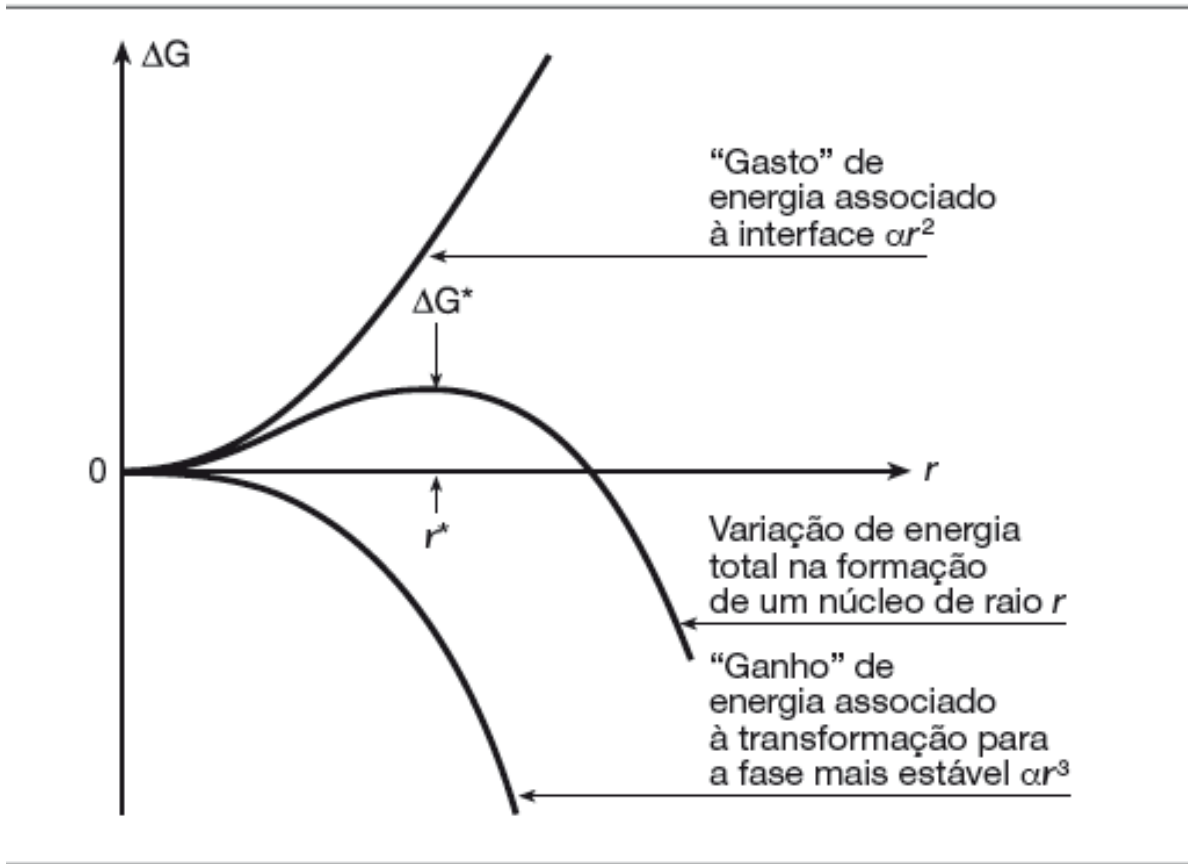
# Nucleação e Crescimento

**Figura 9.2**

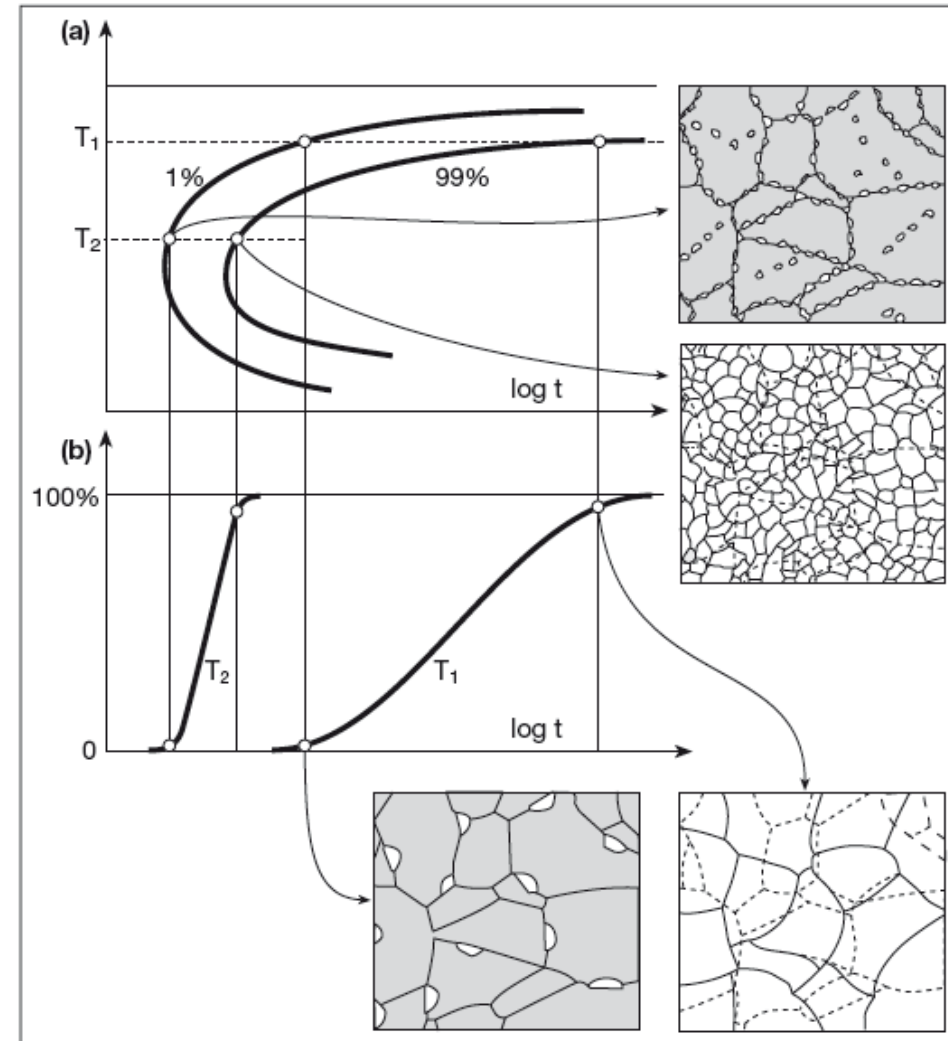
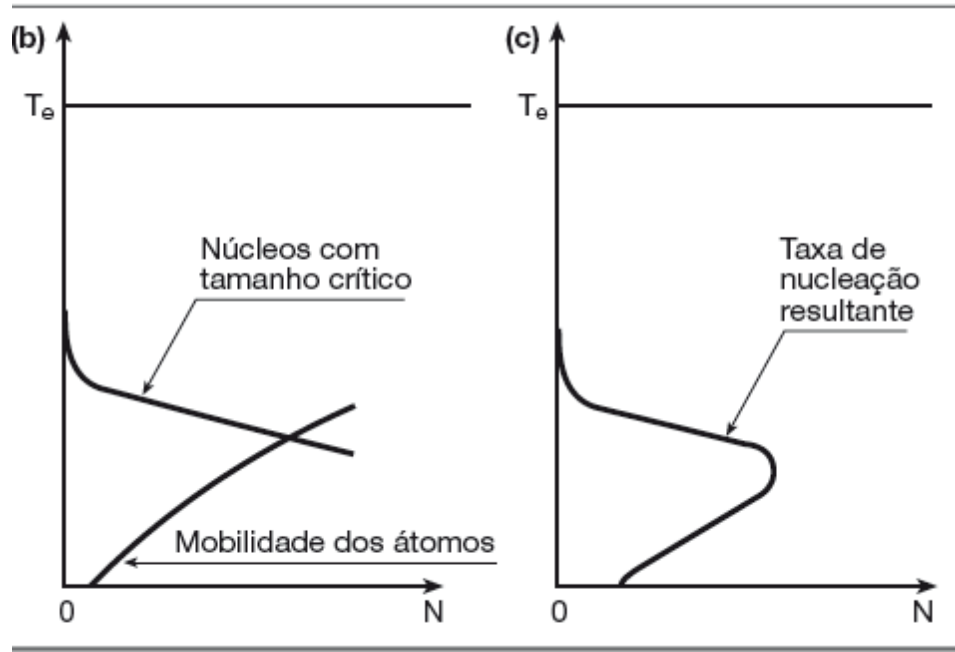
Parcelas da energia associada a formação de um núcleo de uma fase mais estável em uma fase menos estável, em função do raio do núcleo ( $r$ ). Uma parcela corresponde ao gasto energético associado a formar uma interface entre as duas fases. Outra parcela corresponde ao ganho de energia associado a formar a fase mais estável a partir da menos estável. A curva que representa a variação de energia total passa por um máximo no raio chamado "crítico" ( $r^*$ ). Núcleos que atinjam esta dimensão podem reduzir sua energia continuando a crescer, logo são viáveis. Núcleos menores que esta dimensão tendem a reduzir sua energia diminuindo e desaparecendo. A energia total é máxima em  $r^*$ , tendo o valor da barreira de nucleação. Discussões completas e quantitativas são encontradas em diferentes níveis em [4] ou [5].



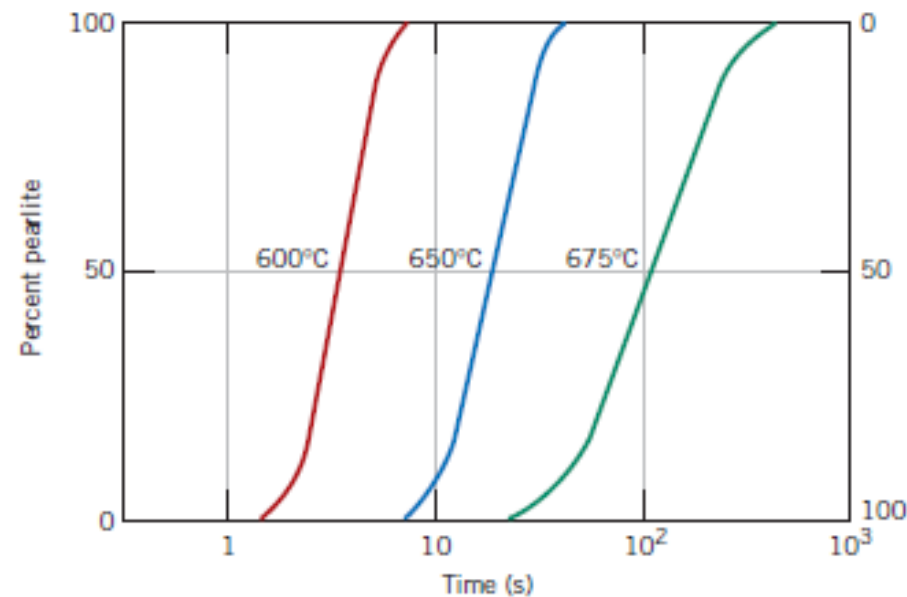
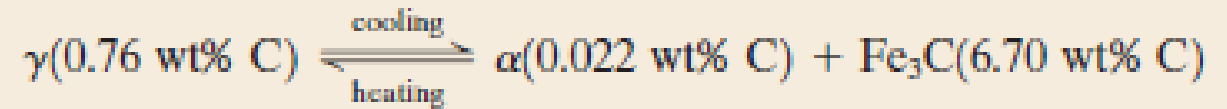
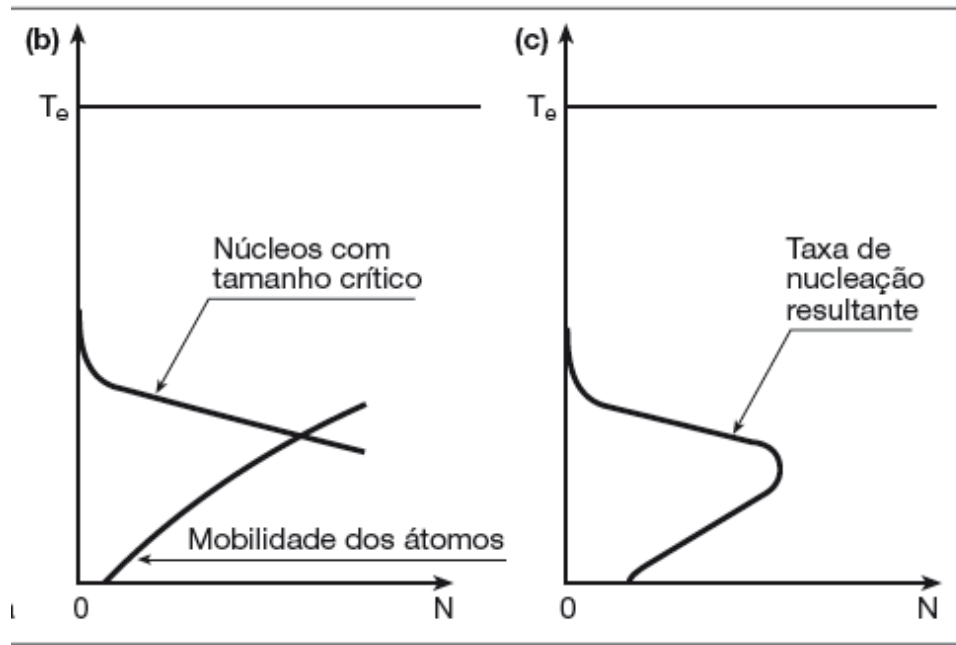
# Nucleação e Crescimento



# Nucleação e Crescimento e Curvas TTT

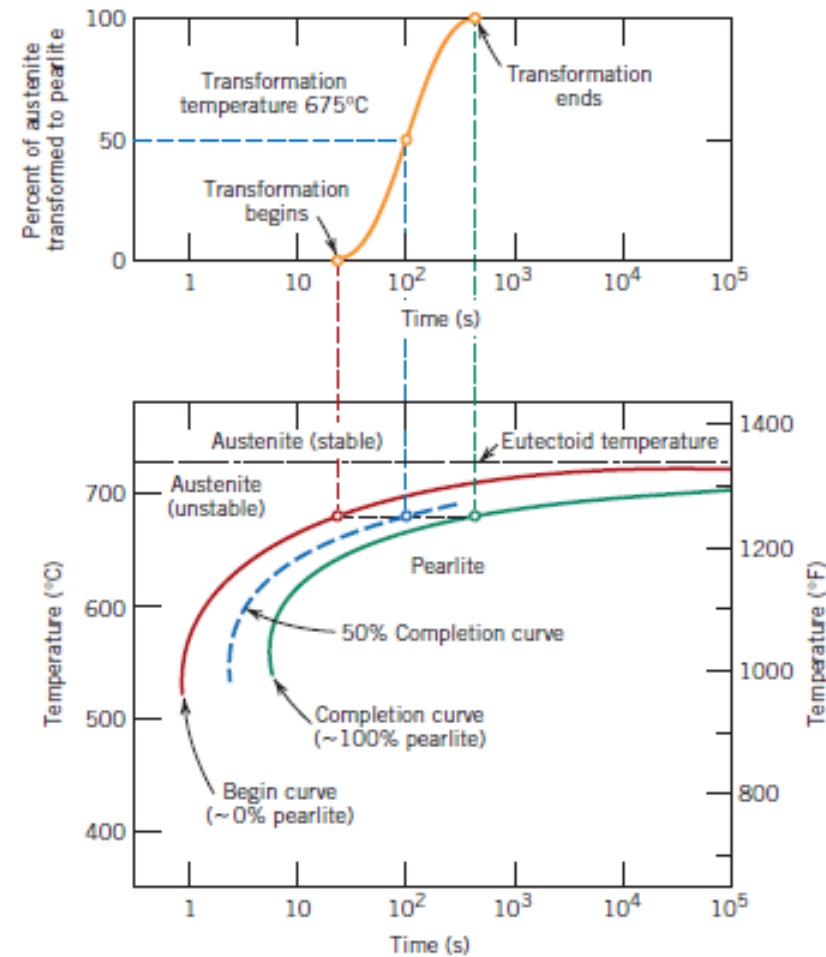


# Diagramas de Transformação Isotérmica em aços – Curvas TTT



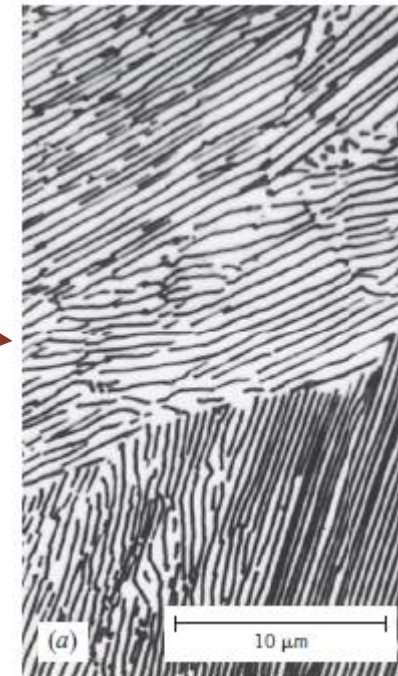
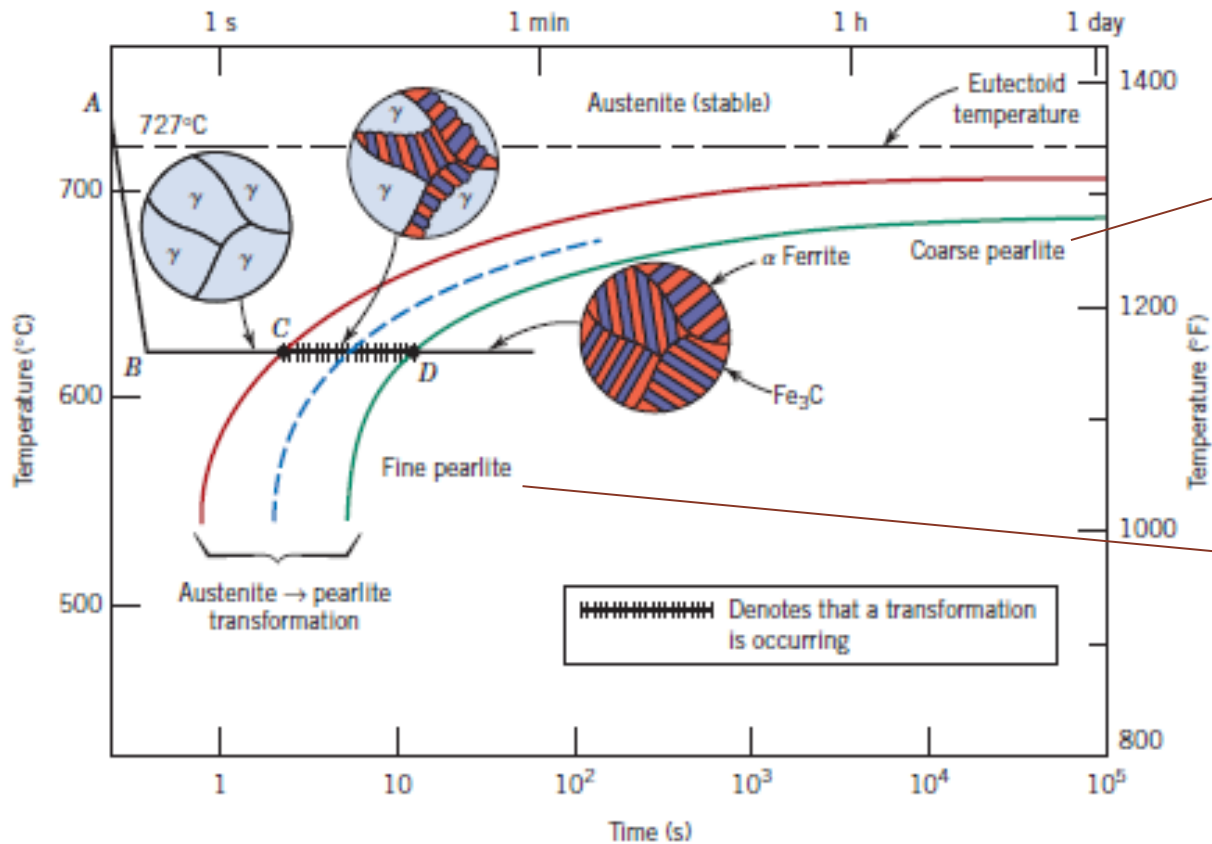
**Figure 10.12** For an iron-carbon alloy of eutectoid composition (0.76 wt% C), isothermal fraction reacted versus the logarithm of time for the austenite-to-pearlite transformation.

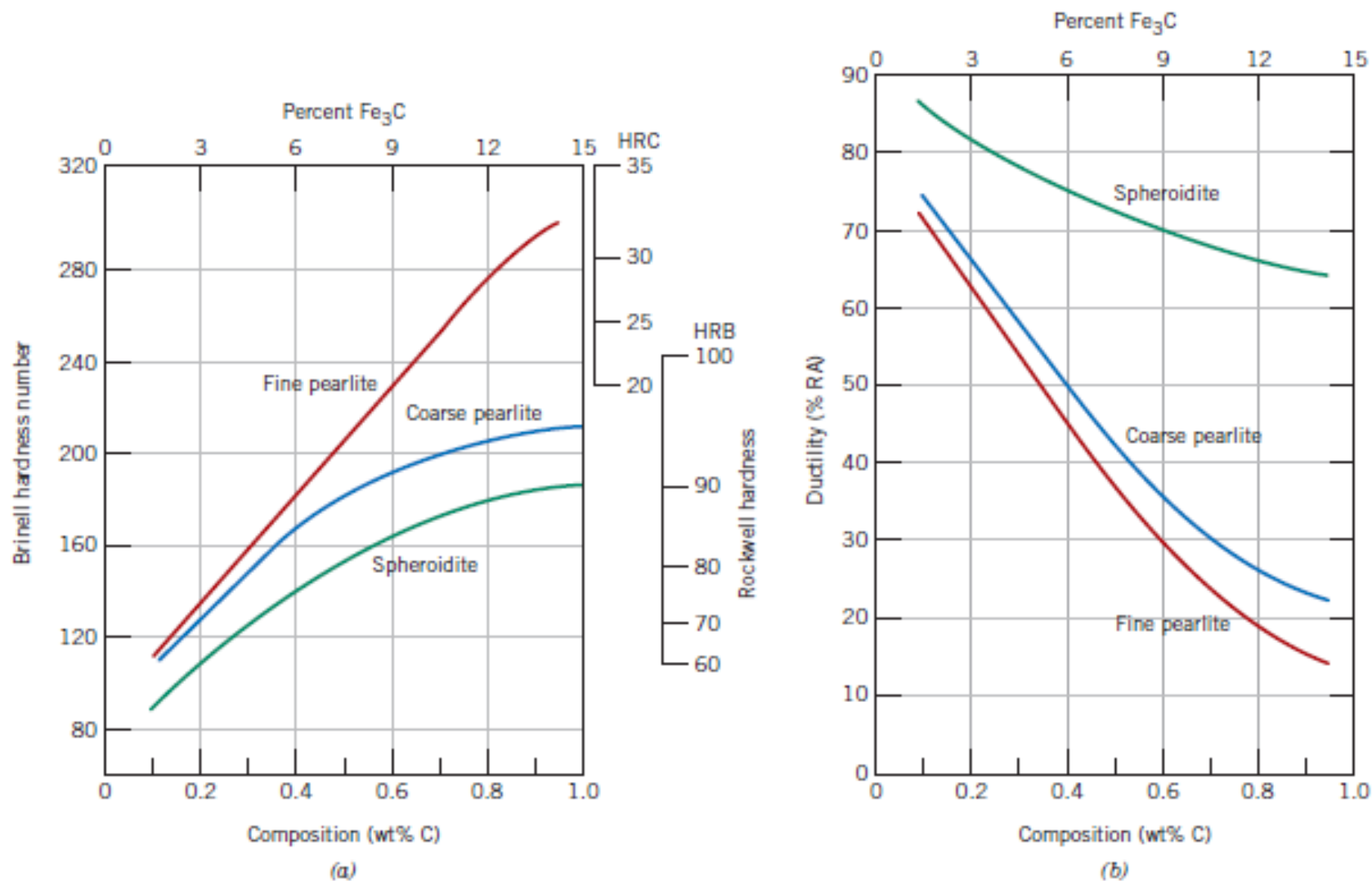
# Diagramas de Transformação Isotérmica em aços – Curvas TTT



**Figure 10.13**  
Demonstration of how an isothermal transformation diagram (bottom) is generated from percentage transformation-versus-logarithm of time measurements (top). [Adapted from H. Boyer, (Editor), *Atlas of Isothermal Transformation and Cooling Transformation Diagrams*, American Society for Metals, 1977, p. 369.]

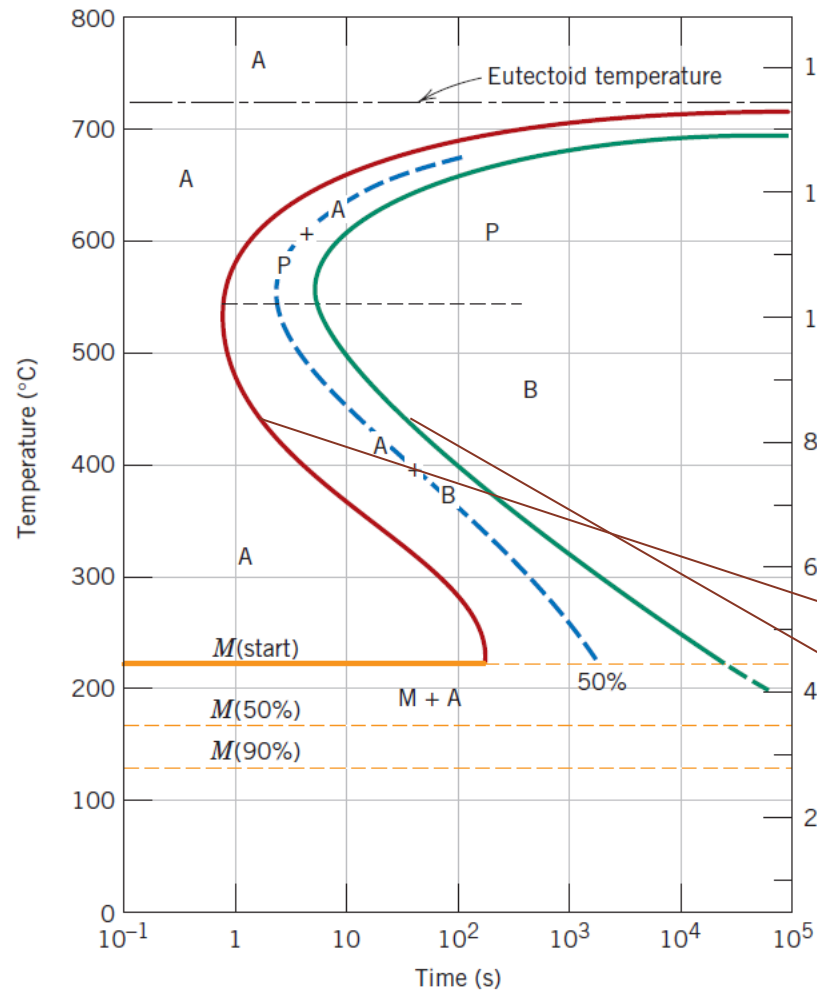
# Diagramas de Transformação Isotérmica em aços – Curvas TTT





**Figure 10.30** (a) Brinell and Rockwell hardness as a function of carbon concentration for plain carbon steels having fine and coarse pearlite as well as spheroidite microstructures. (b) Ductility (%RA) as a function of carbon concentration for plain carbon steels having fine and coarse pearlite as well as spheroidite microstructures. (Data taken from *Metals Handbook: Heat Treating*, Vol. 4, 9th edition, V. Masseria, Managing Editor, American Society for Metals, 1981, pp. 9 and 17.)

# Aços-C - Influência taxa de resfriamento



Curva TTT para um aço eutetóide.

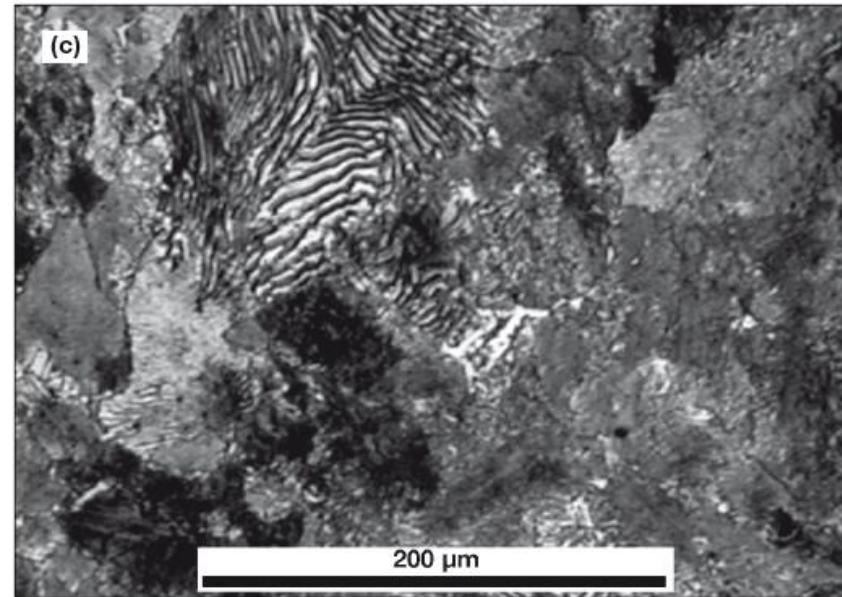
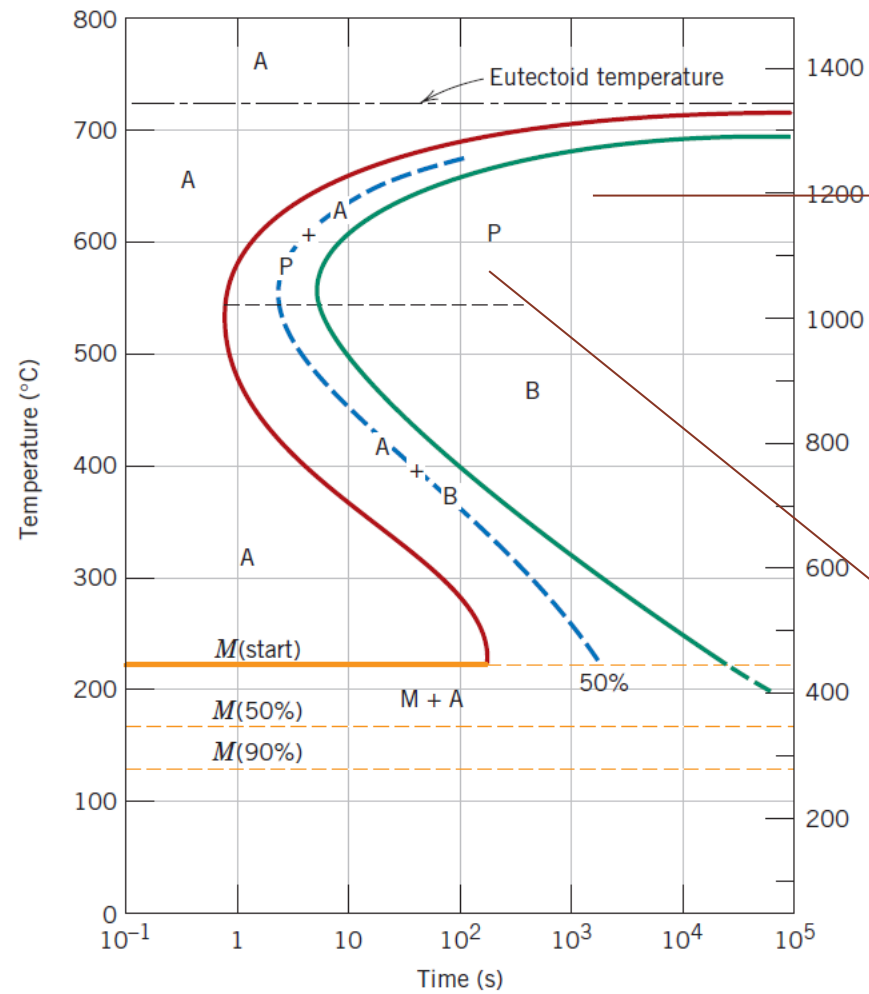
P → perlita  
 A → austenita  
 B → Bainita  
 M → Martensita

1% de transformação

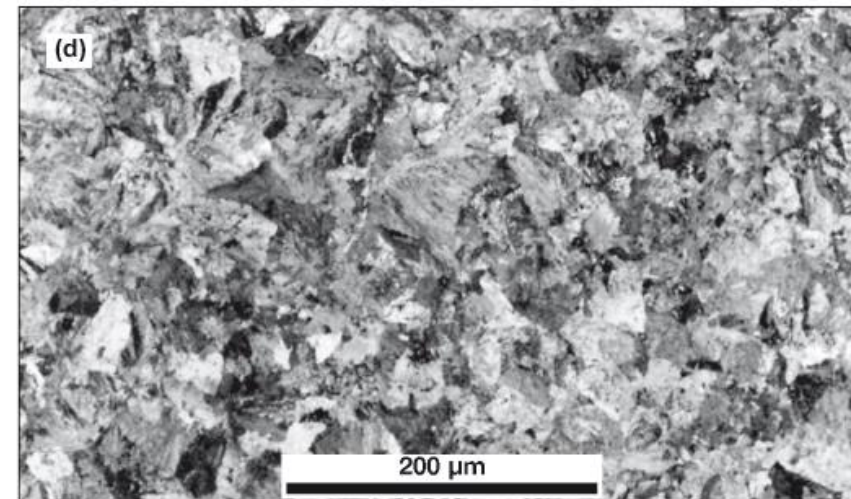
99% de transformação



# Aços-C - Influência taxa de resfriamento

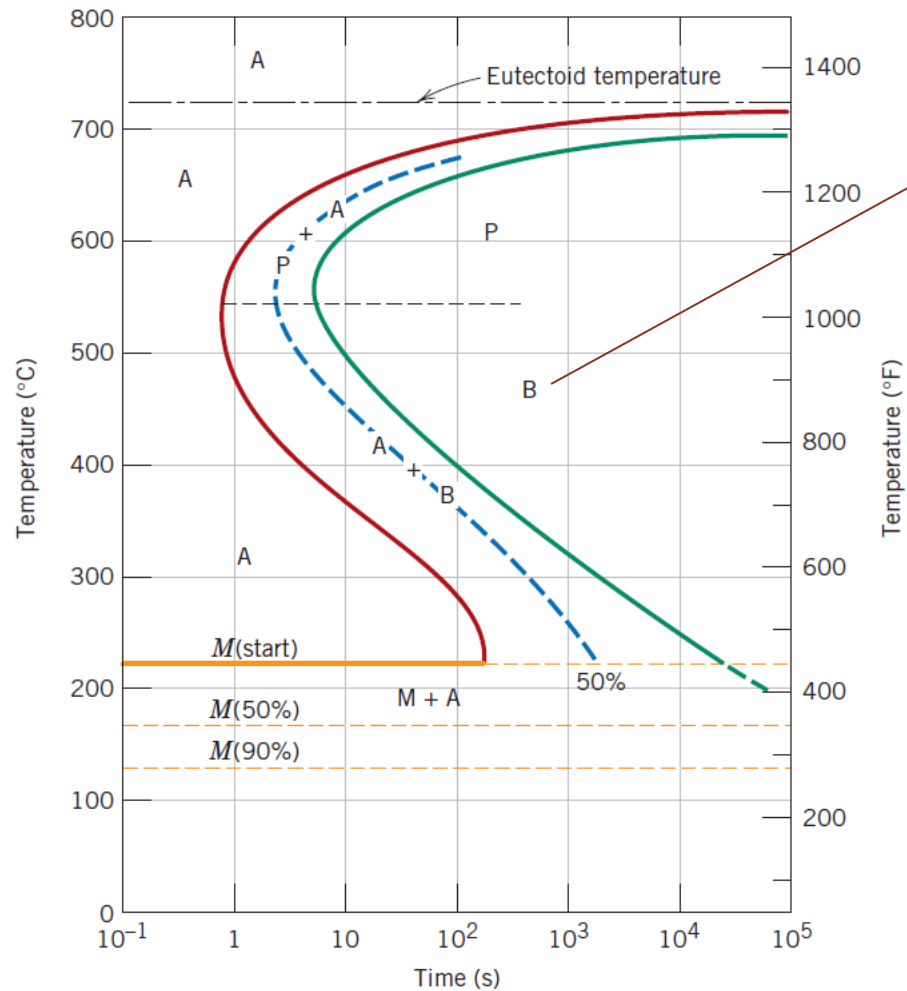


perlita grosseira



perlita fina

# Aços-C - Influência taxa de resfriamento

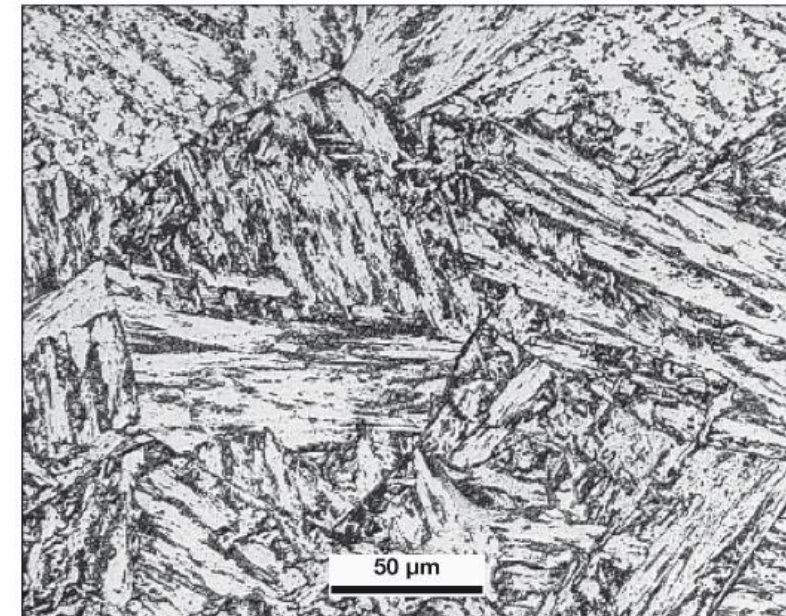


Bainita:

Outro microconstituente dos aços. Consiste em ferrita e cementita (assim como a perlita).

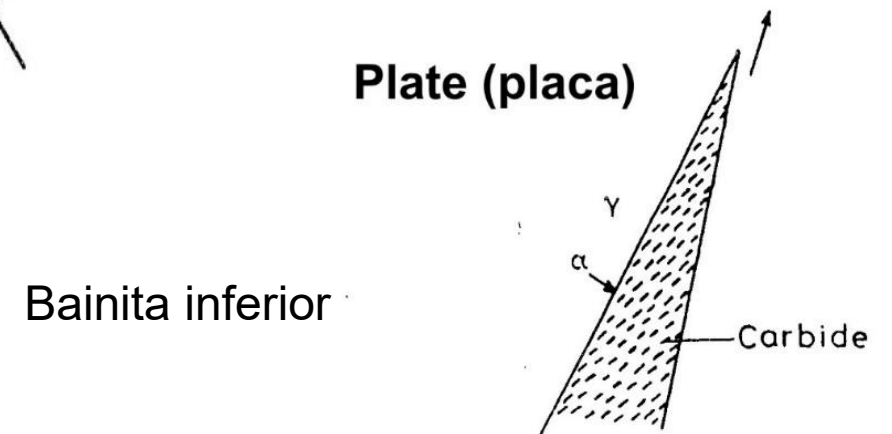
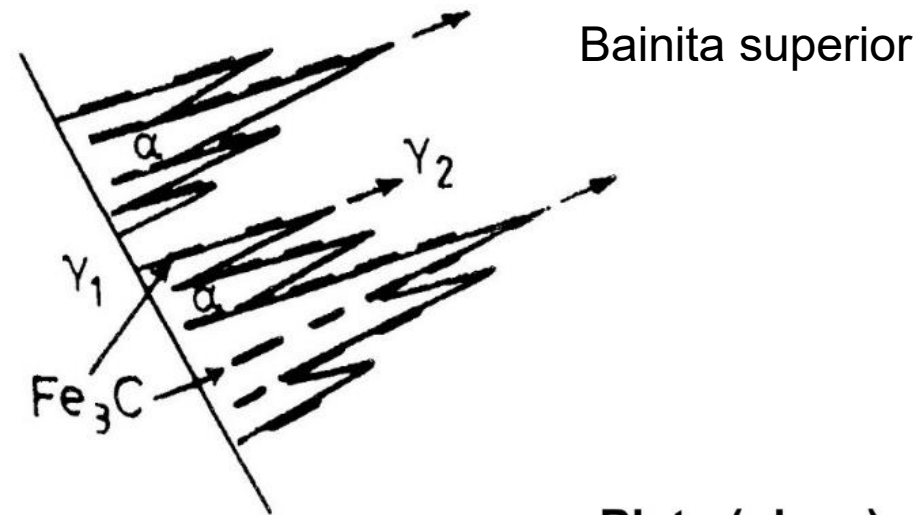
Se forma como agulhas ou placas.

Microestrutura muito refinada.

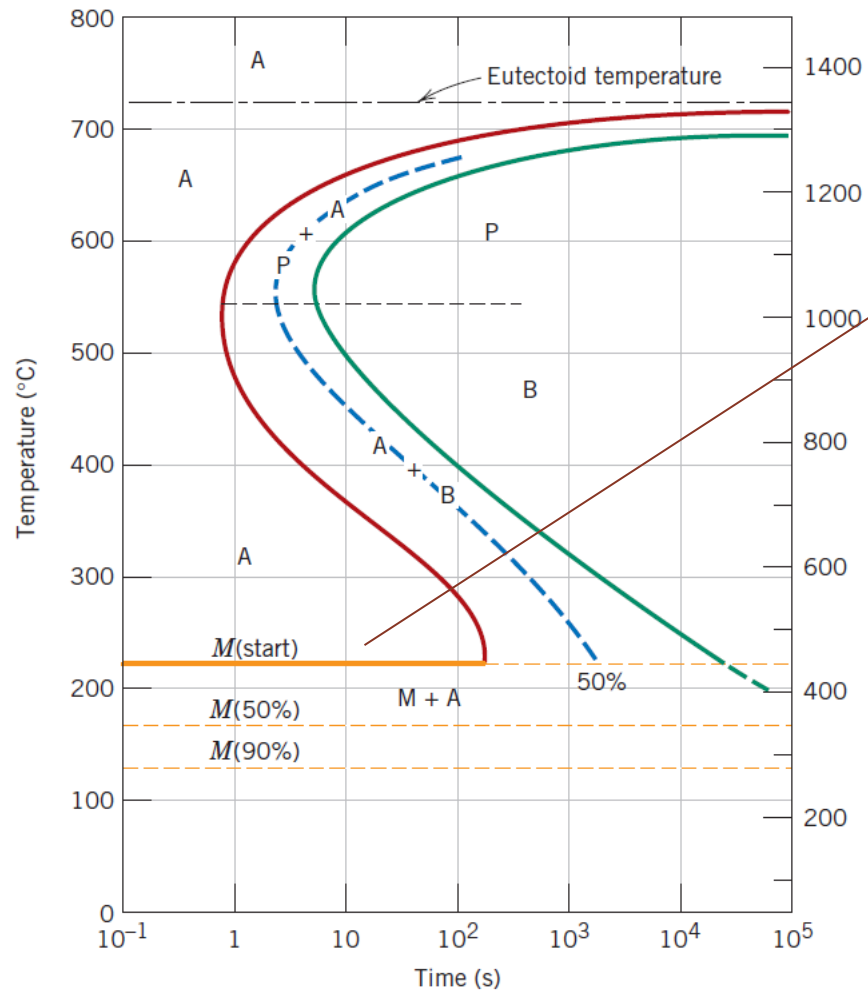


# Reação Bainítica

- Assim como a perlita, a bainita não é uma fase mas sim um microconstituente (ferrita+carboneto).
- Entretanto, o mecanismo de formação da bainita é diferente da perlita, resultando em microestruturas diferentes.
- A bainita cresce como ripas ou agulhas (o que lembra martensita).



# Aços-C - Influência taxa de resfriamento

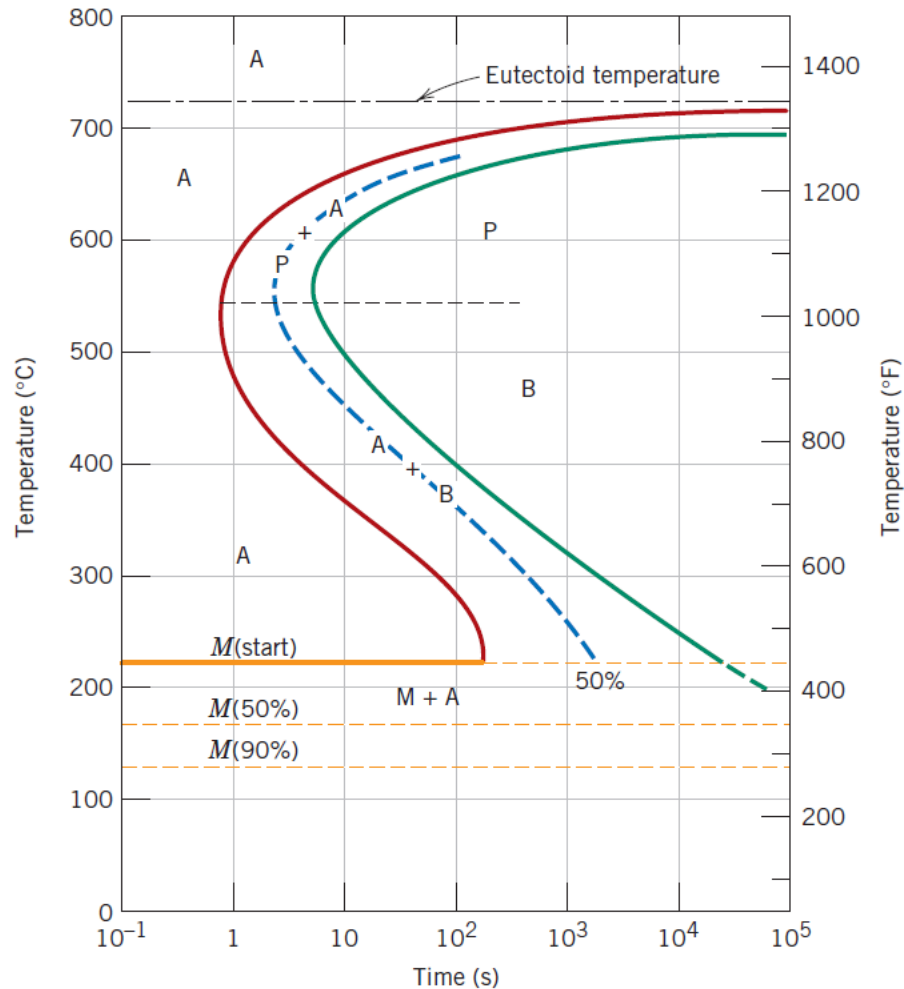


## MARTENSITA

**Transformações martensíticas** ocorrem por mecanismos de cisalhamento, quando uma fase mãe, chamada de austenita, é resfriada rapidamente **não ocorrendo difusão**.

Quando um aço em uma temperatura dentro do campo austenítico (**Fe- $\gamma$ , CFC**) é **resfriado rapidamente (têmpera)**, a estrutura cristalina CFC do Fe transforma-se em uma fase **denominada martensita (estrutura TCC)**, aumentando muito a resistência mecânica do aço, material

# Aços-C - Influência taxa de resfriamento



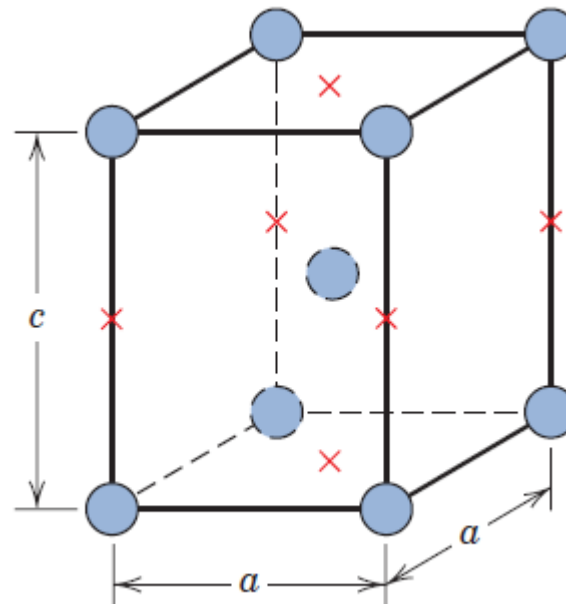
Martensita:

No caso do aço eutetóide, taxas de resfriamento muito elevadas precisam ser aplicadas para que não haja formação de perlita ou bainita.

A transformação martensítica ocorre quando a taxa de resfriamento é rápida o suficiente para impedir difusão de carbono para fora da austenita e assim, impedir a formação de  $Fe_3C$ .

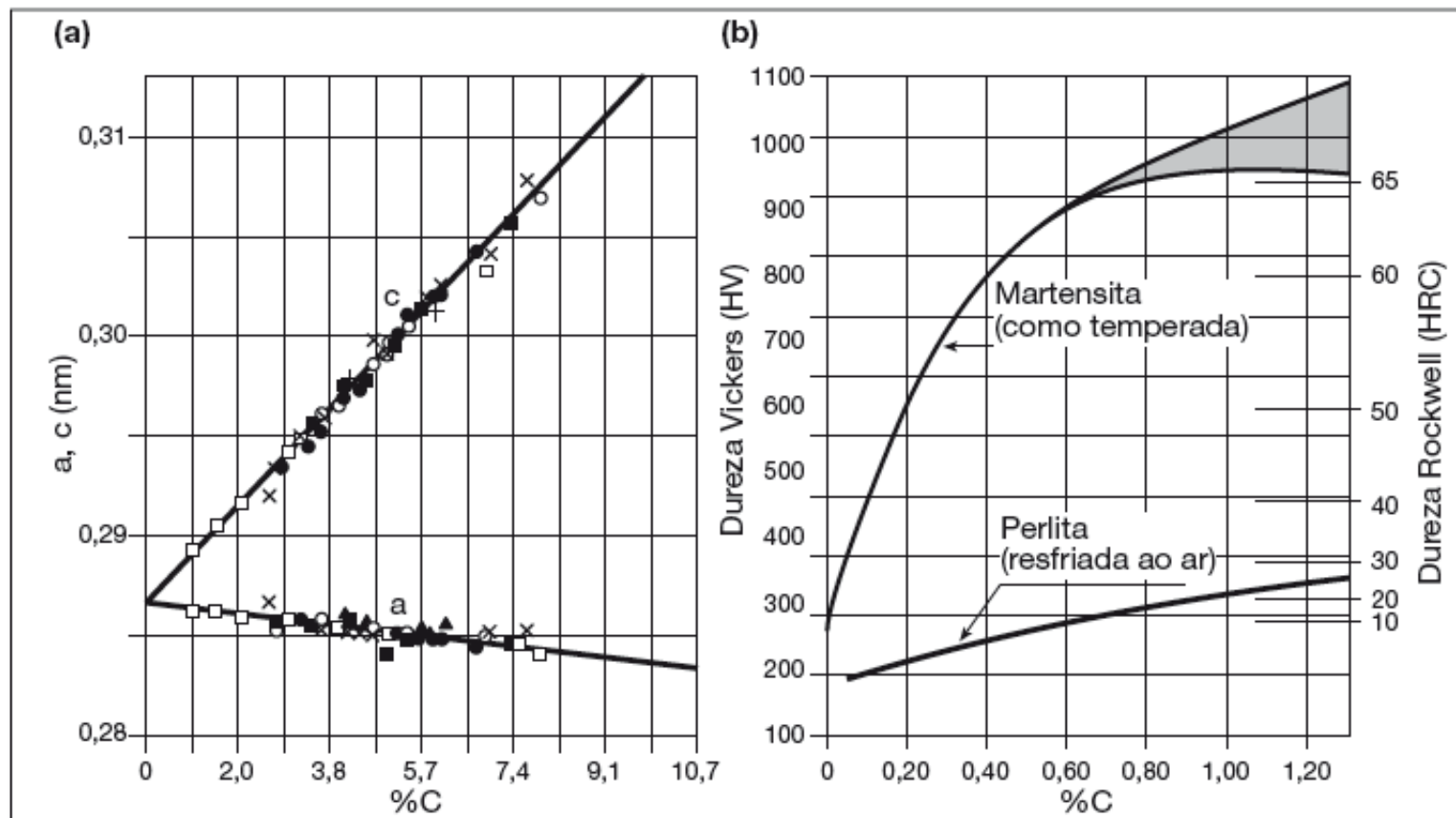
# Aços-C - Influência taxa de resfriamento

- Durante a transformação de austenita para martensita, a célula unitária CFC da austenita se transforma em tetragonal de corpo centrado. Essa transformação ocorre por um mecanismo de cisalhamento.



# Aços-C - Influência taxa de resfriamento

- Quanto maior o teor de carbono, maior a diferença entre os parâmetros de rede “c” e “a” da célula tetragonal. Isso leva também a um aumento da dureza.



# Aços-C - Influência taxa de resfriamento

- A fase martensítica se forma como agulhas ou ripas.

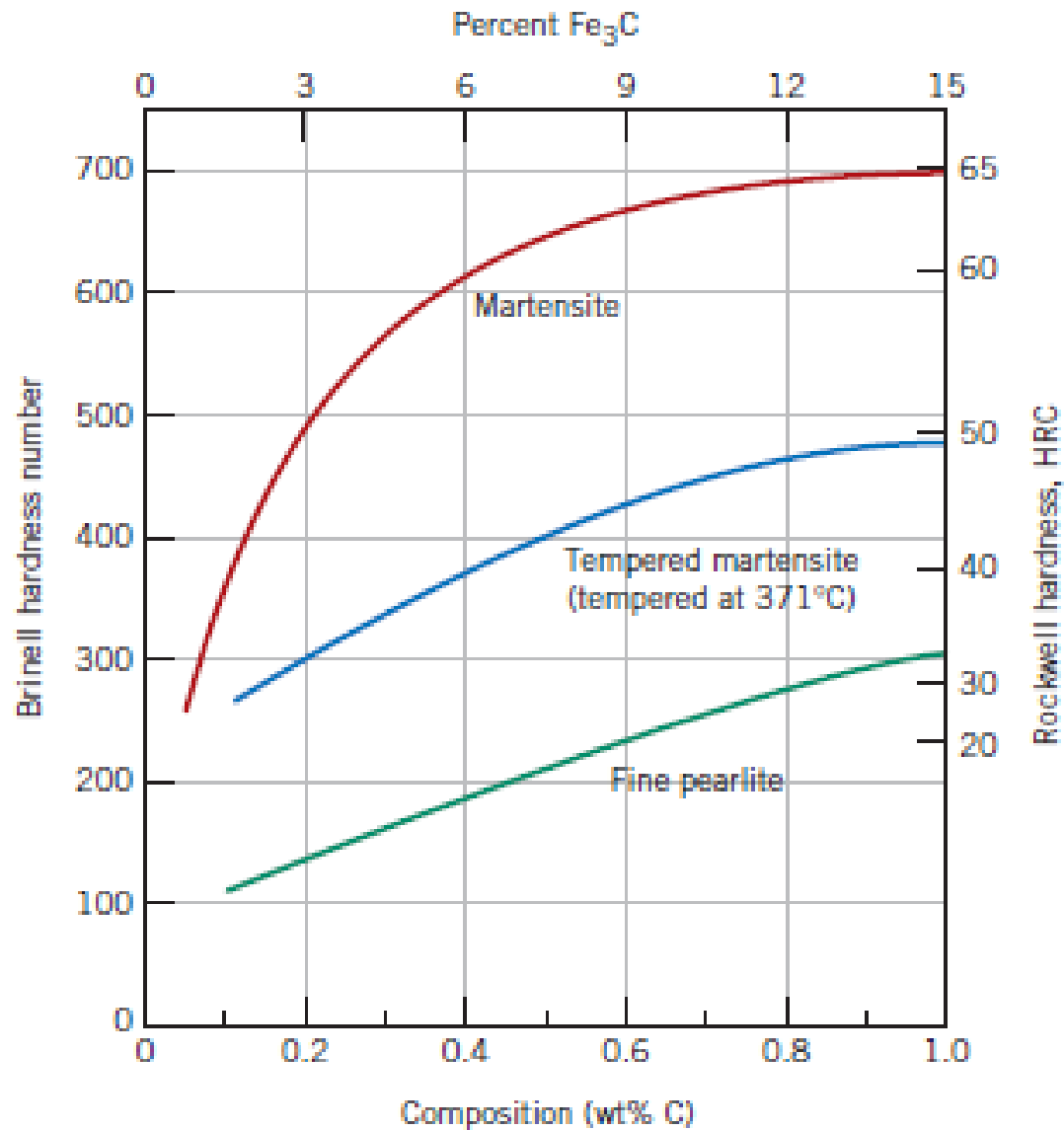
**Martensita em ripas**



**Martensita em placas**

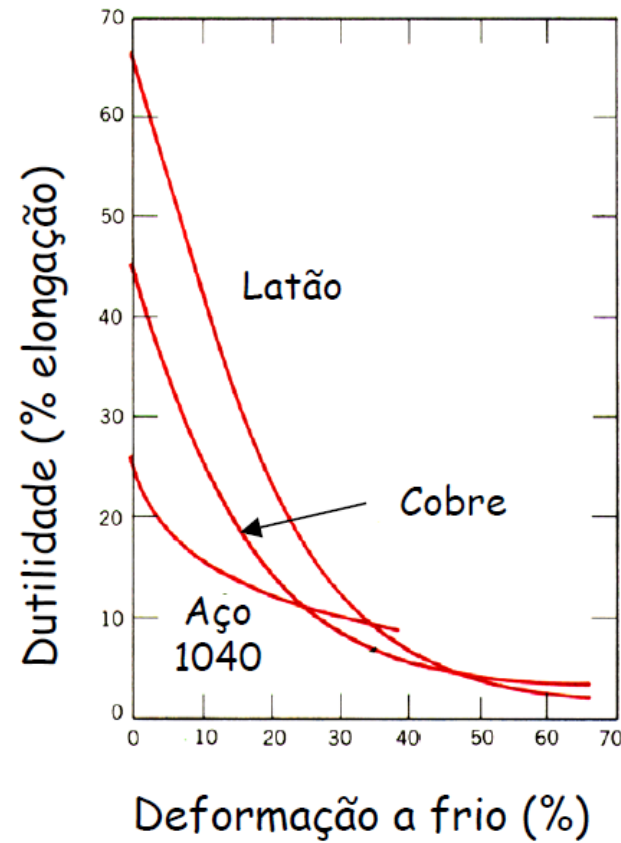
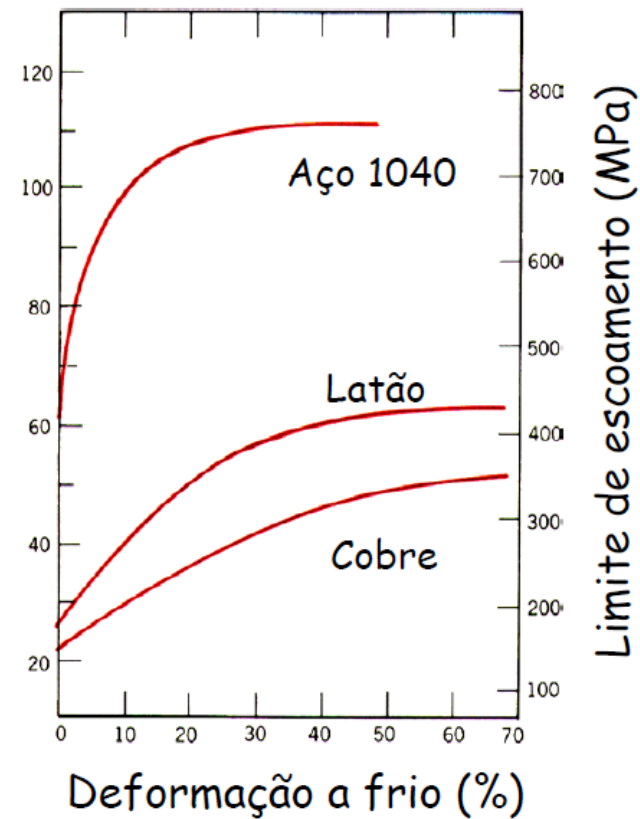






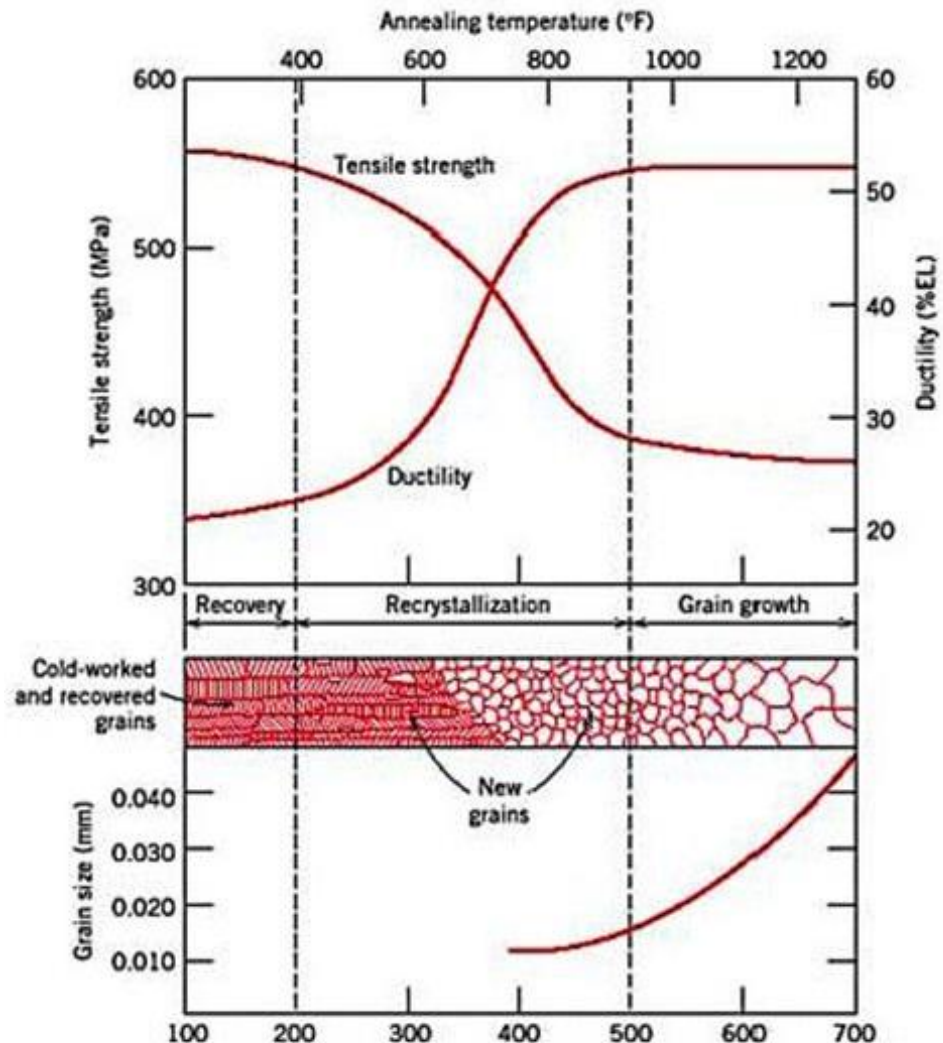
- Após a tempera, o material é frágil, segue-se um tratamento térmico em temperaturas baixas (de 300 a 500 graus) – **revenimento**, para aumentar a ductilidade
- Microestrutura final – grãos ferrita (**Fe- $\alpha$** , **CCC**) com carbeto fino – refino de grão + precipitação
- De grande importância tecnológica em aços para propiciar alta resistência em aços! Inúmeros produtos comerciais passam por têmpera e revenimento!
- É o constituinte mais duro dos aços temperados.
- OBS: cuidado com a tradução → “Tempered martensite” significa martensita revenida! (tempering = revenimento)

# Recuperação, Recristalização e Crescimento de Grão



- O endurecimento por **deformação a frio** de um metal, também denominado **encruamento** metal, ocorre como consequência da **deformação plástica a frio**.
- Uma vez deformado, existem mecanismos para se recuperar a condição inicial
- **Mecanismos de restauração:**
  - Recuperação
  - Recristalização
  - Crescimento de grão

# Recuperação, Recristalização e Crescimento de Grão



Para **reverter o encruamento** dos metais de forma a restaurar as suas propriedades originais, pode-se realizar os seguintes **tratamentos térmicos**:

- **Recuperação:** rearranjo das linhas de discordância em configurações mais estáveis – formação de subgrãos
- **Recristalização:** formação de novos grãos, equiaxiais (poligonais) e livre de deformação
- Após a recristalização estar completa, os grãos livres de deformação continuarão a crescer se o metal for deixada a uma temperatura elevada, **crescimento de grão**.

# Recuperação, recristalização e crescimento de grão

**Latão:** liga do sistema Cu-Zn

