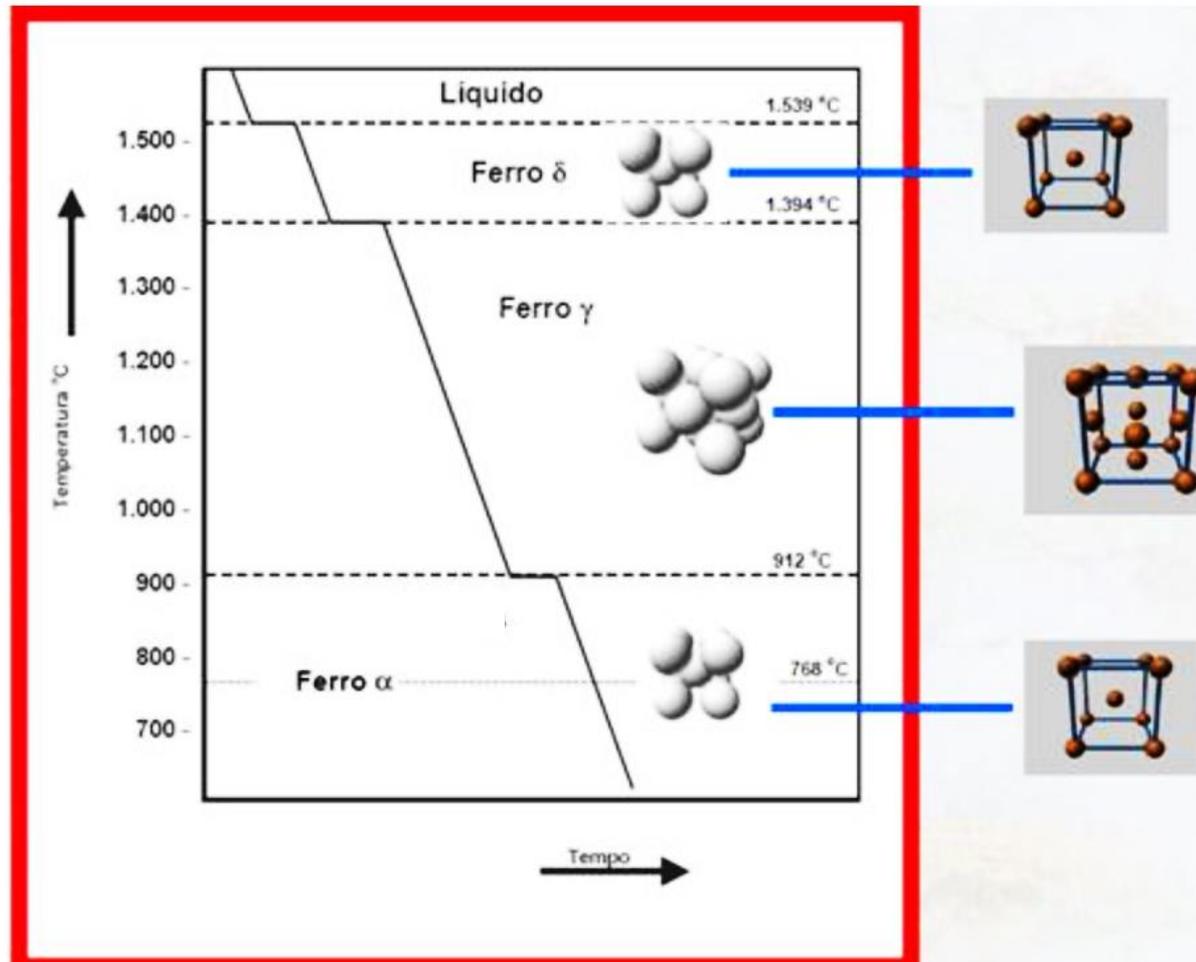


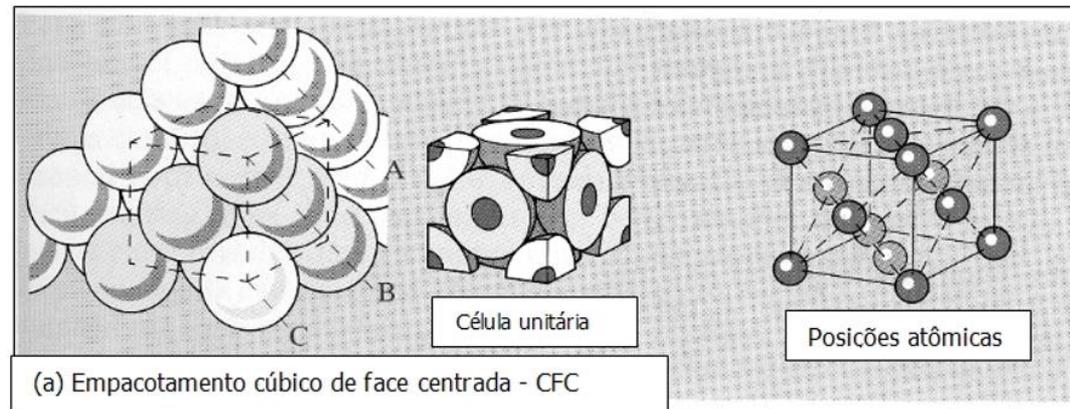
# Transformações dos aços próximo do equilíbrio – Aços recozidos

## Formas alotrópicas do ferro



## Estrutura cristalina CFC - Austenita

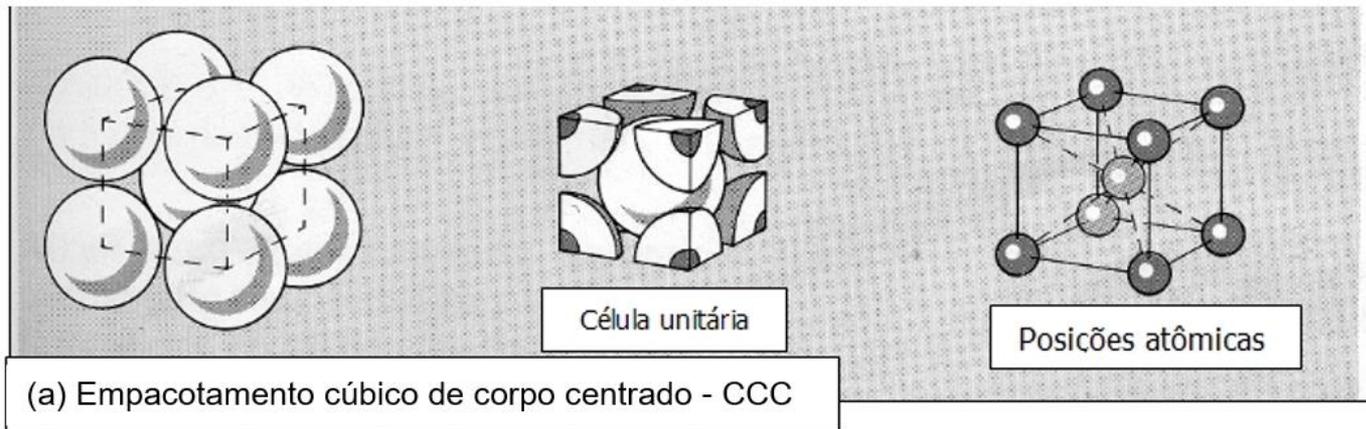
- ✓ Em temperaturas elevadas o aço apresenta uma estrutura, denominada cúbica de face centrada – CFC, mostrada na parte superior da figura abaixo.
  - o formada por 8 átomos de ferro, situados nos vértices de uma célula unitária cúbica e por 6 átomos de ferro, situados nas faces do cubo.
  - o somente 1/8 de cada átomo situado nos vértices do cubo faz parte da célula unitária.
  - o somente 1/2 de cada átomo situado no centro das faces fica no interior da célula unitária.



- ✓ A estrutura CFC – denominada austenita ou fase  $\gamma$  - é estável desde temperaturas muito altas, logo após a solidificação do aço, passando pelas temperaturas de laminação ou forjamento (1000 a 1200°C), até a temperatura de 912°C.

## Estrutura cristalina CCC - Ferrita

- ✓ A 912 °C ocorre a transformação do ferro CFC para a estrutura CCC – denominada ferrita ou fase  $\alpha$ - estável até a temperatura ambiente.
  - o 8 átomos nos vértices da célula unitária cúbica
  - o um único átomo no centro do cubo



# Transformação $Fe^{\alpha}_{CCC} \Leftrightarrow Fe^{\gamma}_{CFC}$

- ✓ A austenita, nos aços de baixa liga, não é uma fase estável na temperatura ambiente.
- ✓ A ferrita é estável e apresenta propriedades mecânicas de dureza e resistência muito baixas. Em compensação é uma fase que apresenta alta ductilidade e alta conformabilidade.
- ✓ Todos os tratamentos térmicos realizados em aços se baseiam na transformação  $Fe^{\alpha}_{CCC} \Leftrightarrow Fe^{\gamma}_{CFC}$  .
- ✓ Se essa transformação não existisse não haveria a possibilidade de endurecer os aços e obter materiais tão duros e tão resistentes ao desgaste e à fadiga.

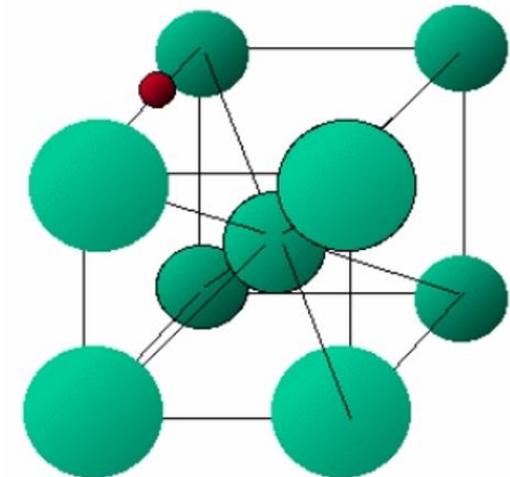
## O carbono

- ✓ O carbono é um átomo muito pequeno (raio atômico 70 pm), quando comparado com o átomo de ferro.
- ✓ Ocupa as posições vazias existentes no reticulado cristalino do ferro, chamadas posições intersticiais.
- ✓ Apesar do raio atômico 70 pm a presença de átomos de carbono nos interstícios causa distorções elásticas nos reticulados.

**Table 1.1** Size of largest spheres fitting interstices in bcc and fcc iron

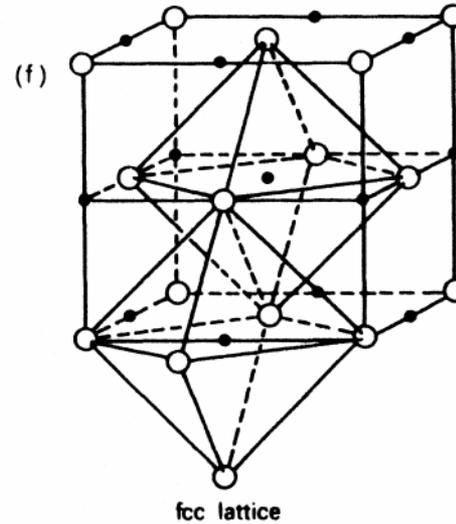
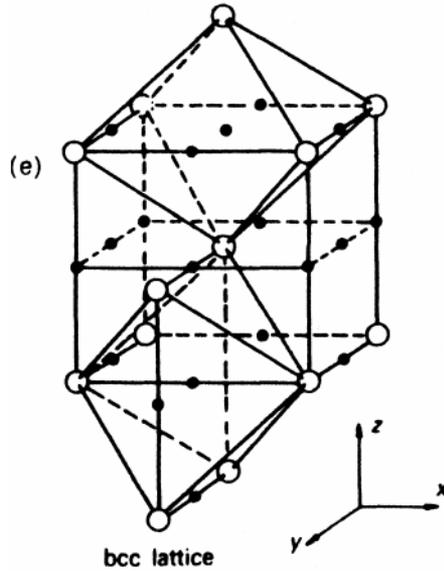
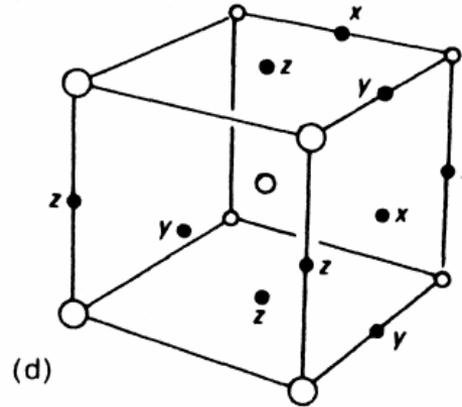
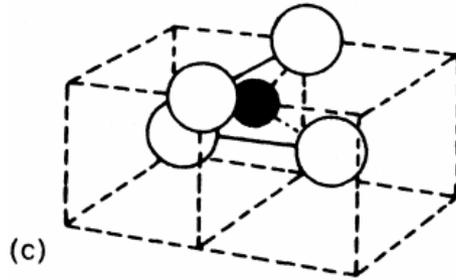
		Radius	Radius in iron (Å)	
bcc	Tetrahedral	$0.29r$	0.37	37 pm
	Octahedral	$0.15r$	0.19	19 pm
fcc	Tetrahedral	$0.23r$	0.28	28 pm
	Octahedral	$0.41r$	0.51	51 pm

$r$  = atomic radius of iron.



Interessante observar que, embora a estrutura CFC seja mais compacta, apresenta interstícios maiores que a estrutura CCC.

# Interstícios tetraédricos e interstícios octaédricos



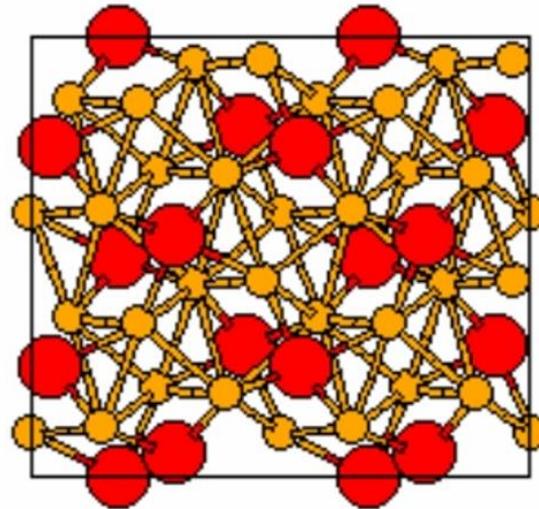
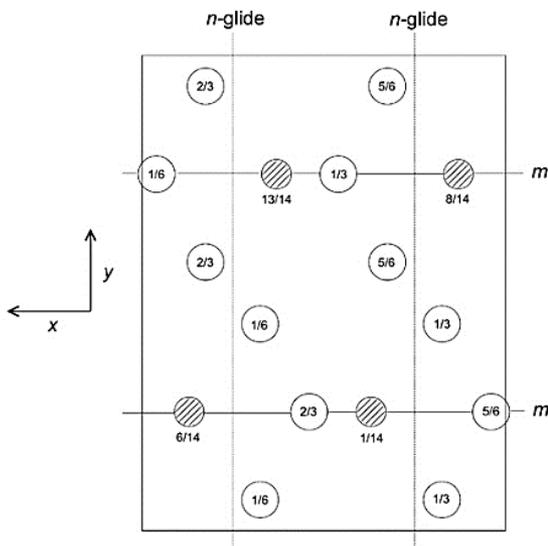
○ Fe atoms



METMAT

# A cementita

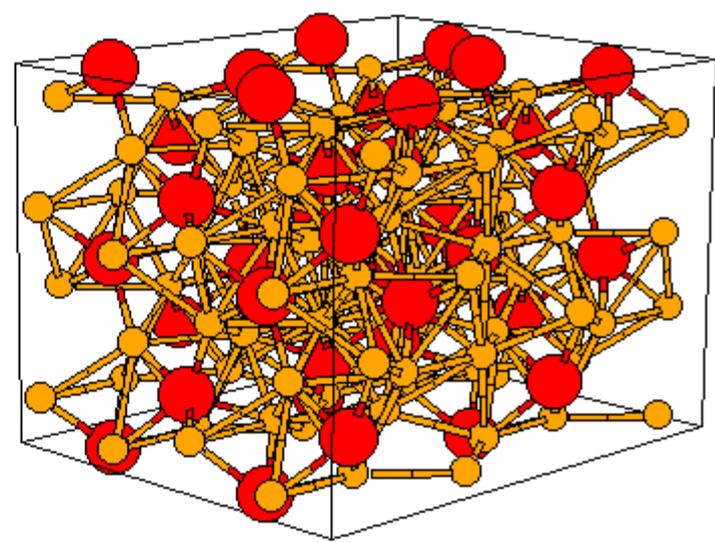
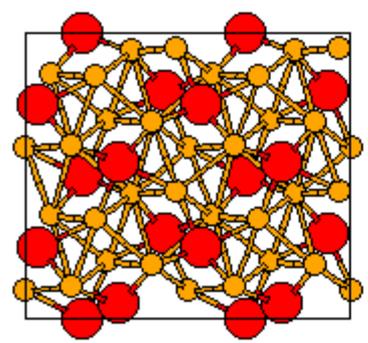
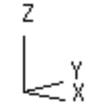
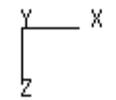
- ✓ Quando o teor de carbono é mais alto o carbono se combina com o ferro formando um fase cerâmica - carboneto de ferro  $\text{Fe}_3\text{C}$ , denominada cementita.
- ✓ A estrutura cristalina da cementita é complexa, com 16 átomos por célula unitária, 12 de ferro e 4 de carbono.
- ✓ É uma fase muito dura (1050 HV) e frágil e suas propriedades mecânicas são parecidas com as do vidro.



- Fe - átomos cor de laranja
- C - átomos vermelhos

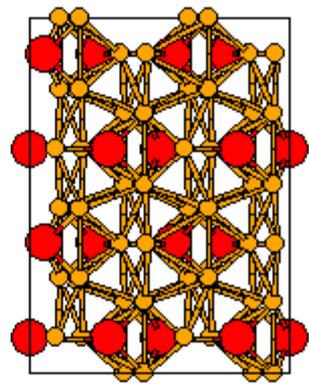
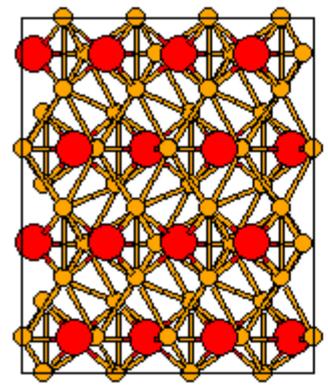
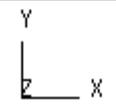
Top

Active



Front

Right



- Fe - átomos cor de laranja
- C - átomos vermelhos

# Transformações nas ligas de Fe-C

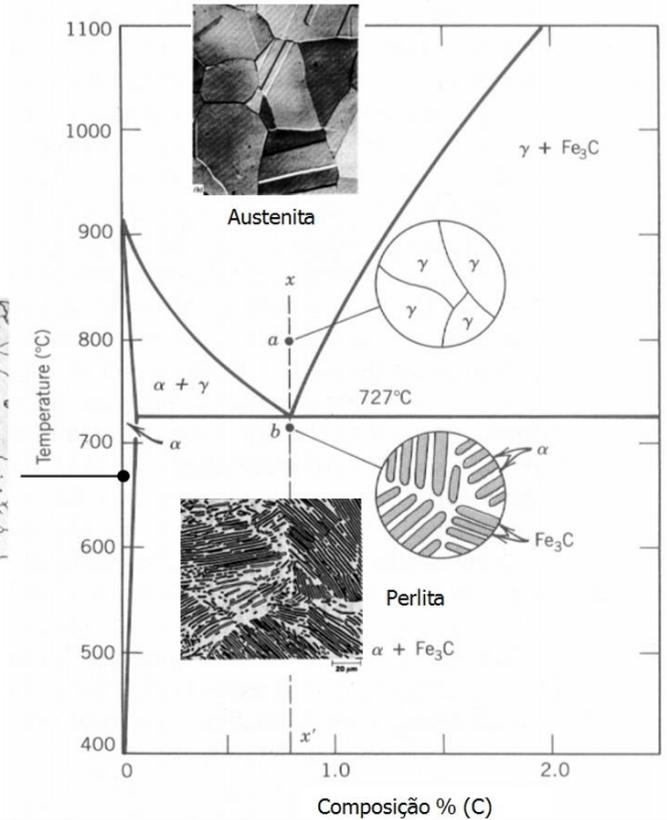
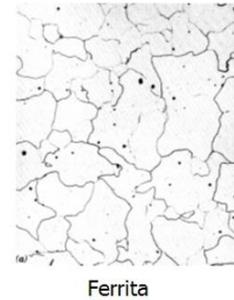
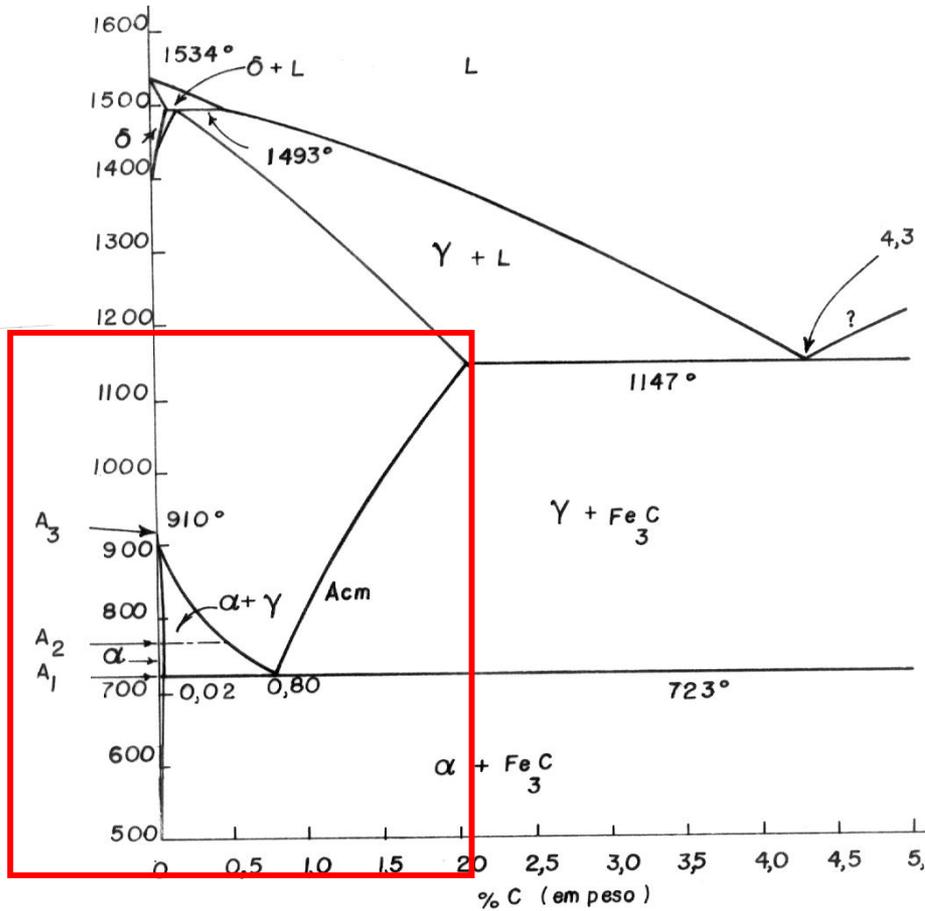
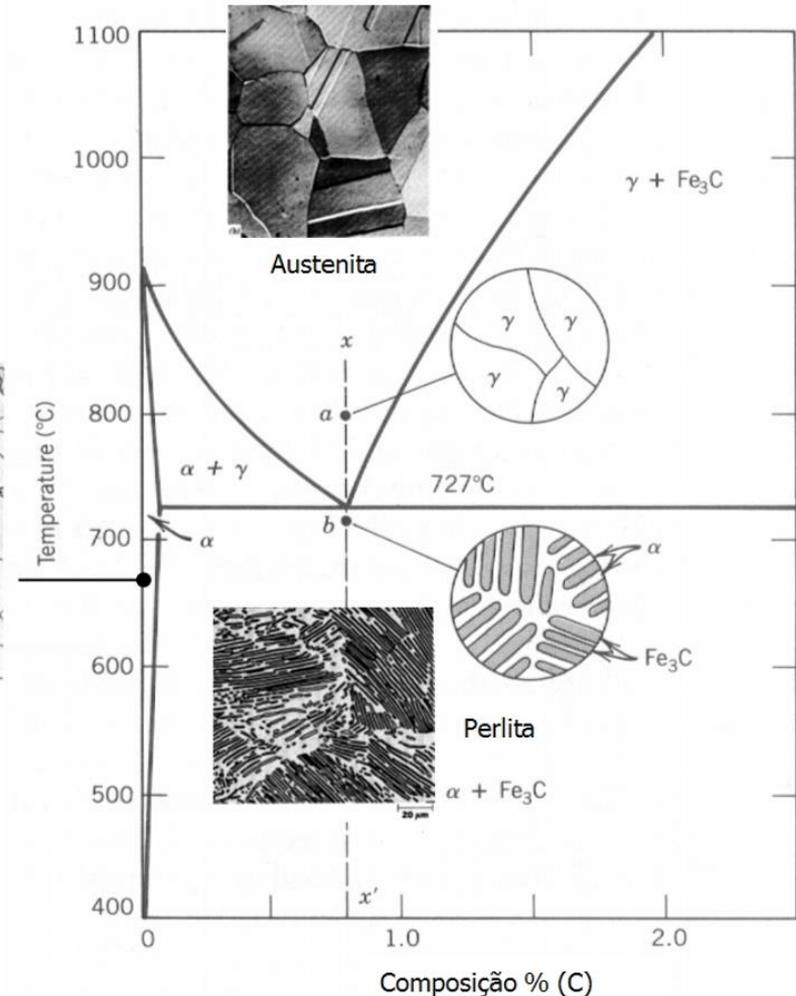


Figura 4.1 - Diagrama de equilíbrio Fe-C.

# Transformações nas ligas de Fe-C

- ✓ Existem diagramas que descrevem, para as ligas Fe-C, as faixas de temperaturas em que as fases ferrita, austenita e cementita são estáveis e as temperaturas em que ocorrem as transformações. Esses diagramas são chamados diagramas de equilíbrio.

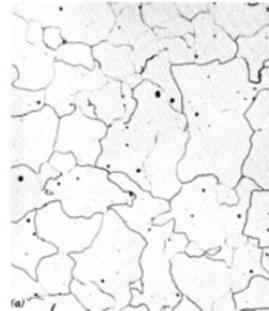




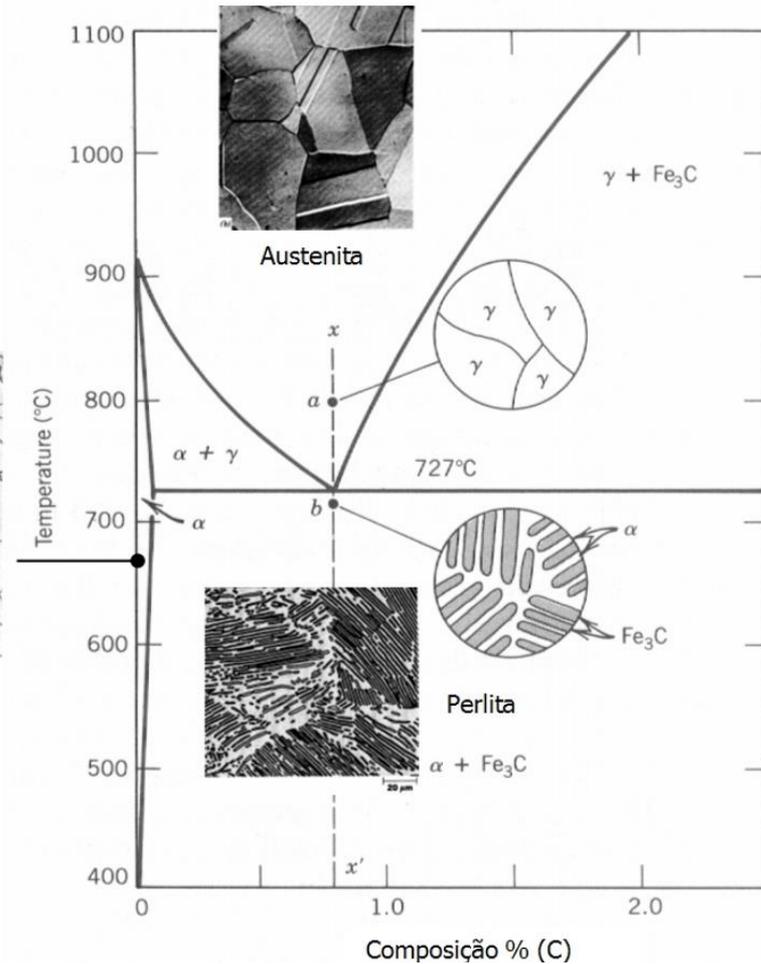
METMAT

# Transformações nas ligas de Fe-C

- ✓ É possível prever quais fases se formam quando o aço é resfriado lentamente (no equilíbrio).
- ✓ O diagrama de equilíbrio Fe-C mostra que a ferrita é uma fase que aparece isolada somente para teores muito baixos de carbono  $< 0,02\%$  C.
- ✓ Nos aços em que o teor de carbono é maior que  $0,02\%$ , precipita a cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ).
- ✓ A precipitação de cementita ocorre de forma alternada com a ferrita formando uma estrutura lamelar denominada perlita.

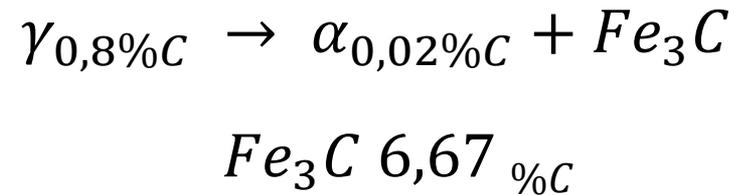
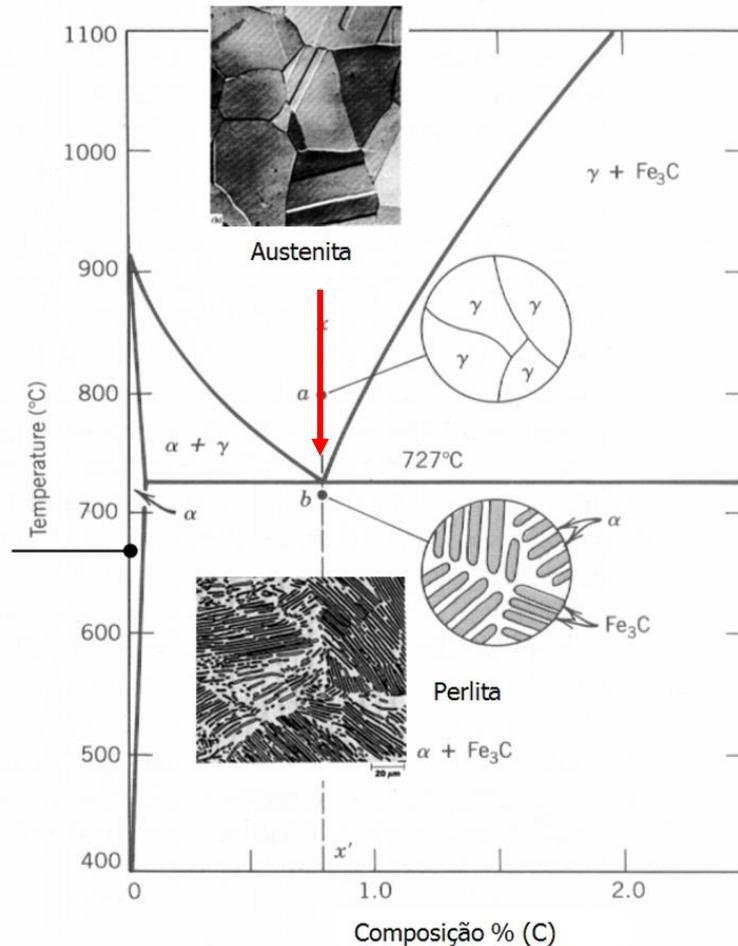


Ferrita



# Transformação eutetóide nas ligas de Fe-C

## Perlita



- ✓ Austenita CFC 0,8%C se decompõe em estrutural lamelar formada por ferrita CCC 0,02%C e cementita com 6,67%C
- ✓ Formação de microconstituente lamelar denominado perlita.
- ✓ Origem do nome: "mother of pearl" pois quando atacada apresenta coloração iridescente semelhante à madrepérola

# Transformação eutetóide próximo do equilíbrio

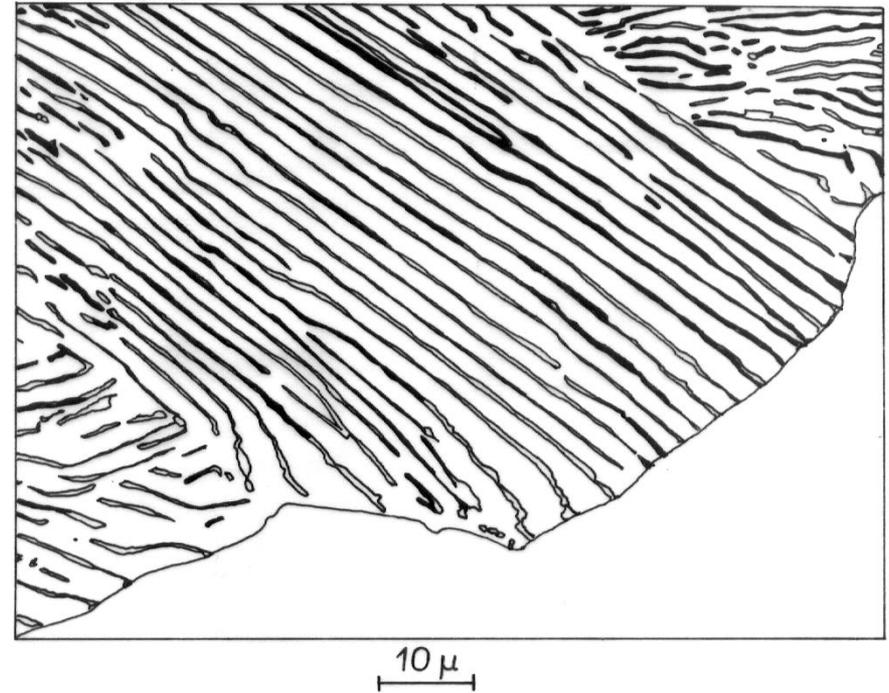
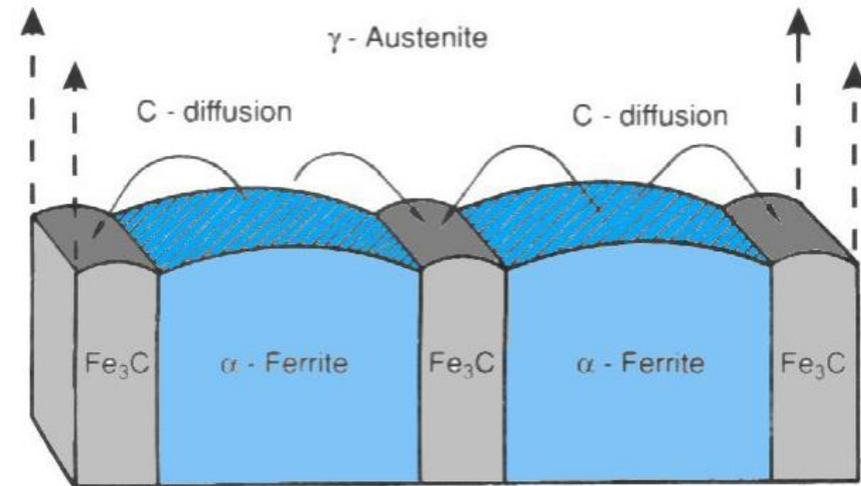
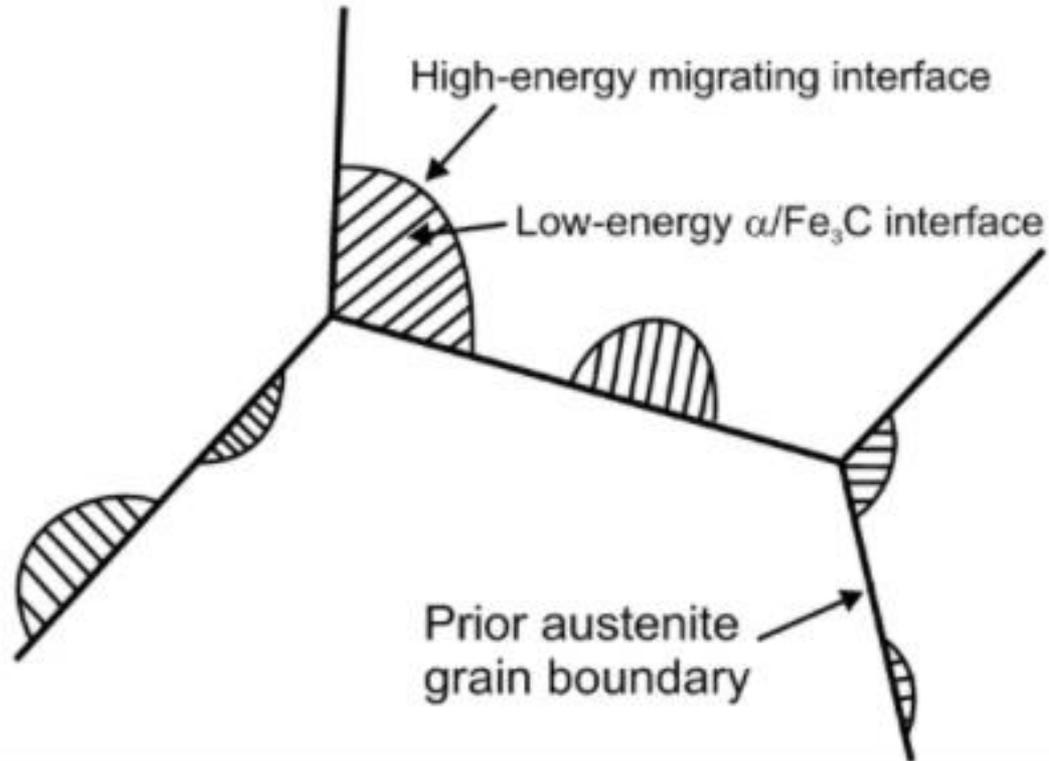


Fig.4.2 - Colônia de perlita em crescimento sobre austenita 1000 X.

## Nucleação de perlita em contornos de grão de $\gamma$



# Crescimento da perlita por ramificação

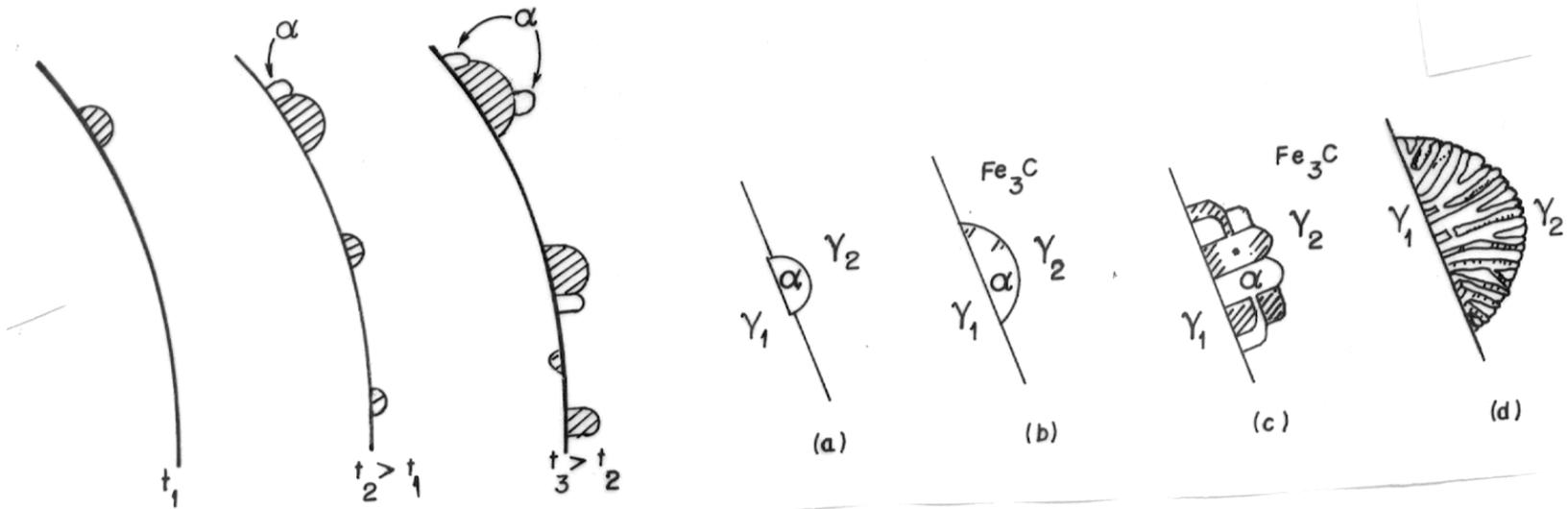


Fig. 4.4 - (a) Esquema que ilustra a sequência de nucleação da perlita nos contornos de grão da austenita.  
 (b) Esquema que ilustra o processo de crescimento da perlita por ramificação, a partir dos contornos de grão da austenita.

## Perlita – crescimento cooperativo

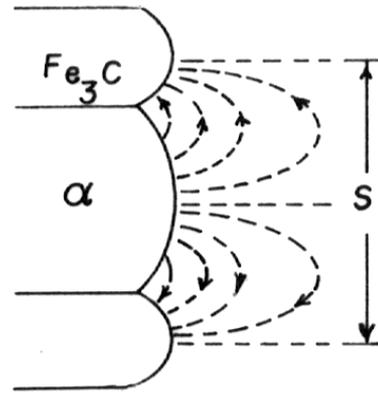
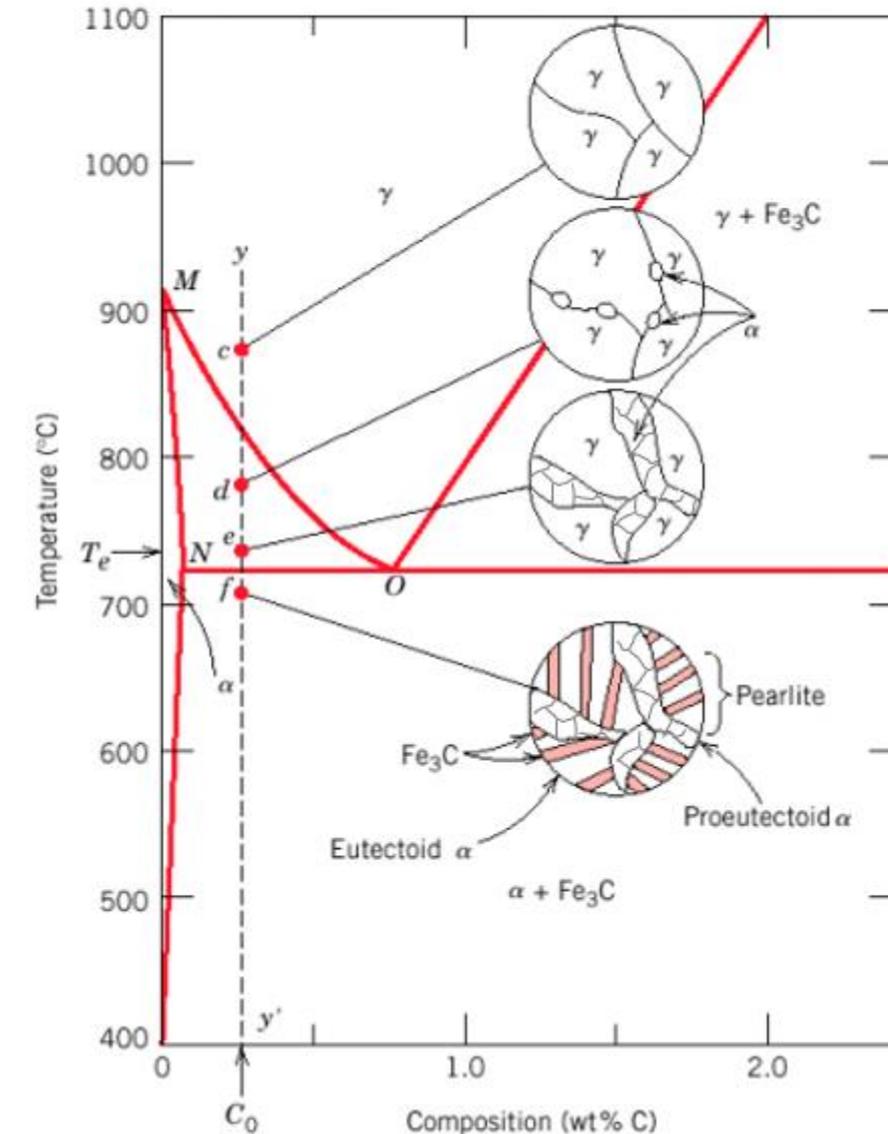
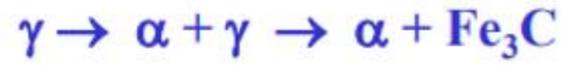
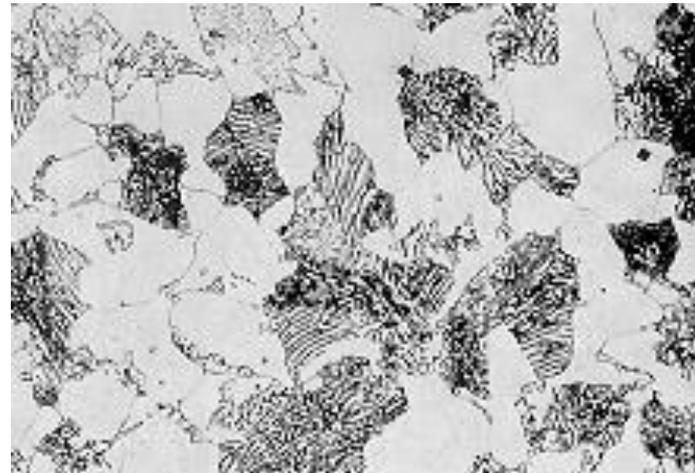
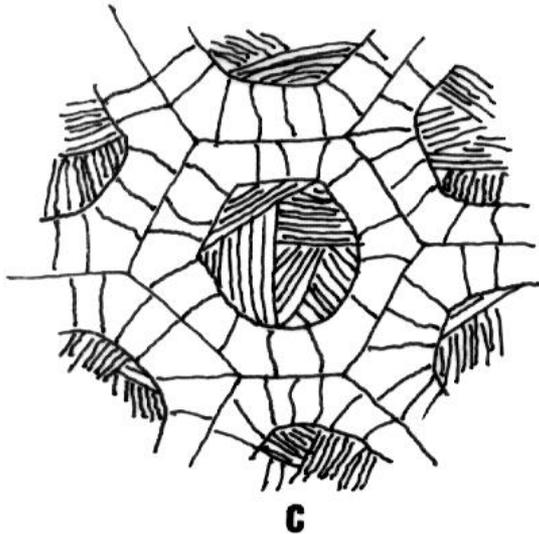
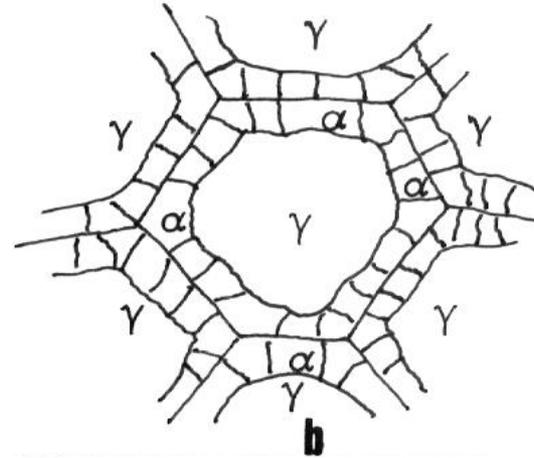
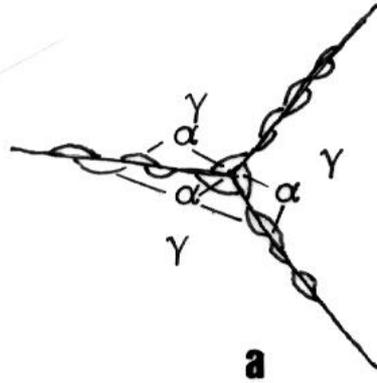


Figura 4.5 - Esquema ilustrativo da redistribuição de carbono durante o crescimento da perlita.



# Nucleação e crescimento de ferrita pró-eutetóide nos contornos da austenita.



- a) Nucleação e crescimento de ferrita nos contornos de grão de austenita
- b) Crescimento de ferrita nos contornos de grão
- c) Formação de perlita a partir da austenita residual com 0,8% C
- d) Microestrutura de um aço carbono com 0,4% C resfriado lentamente

## Microestrutura de aços hipoeutetóides

- ✓ Quando o teor de carbono é menor que 0,02% o aço contém somente ferrita sendo muito mole e dútil.
- ✓ Os aços com 0,8% C apresentam na microestrutura 100 % de perlita.
- ✓ Se aumentarmos o teor de carbono dos aços entre 0,1 e 0,8%, teremos um aumento da quantidade de perlita e uma diminuição da quantidade de ferrita.
- ✓ Um aço com 0,4% C tem aproximadamente 50% de ferrita e 50% de perlita.



Microestrutura de um aço com 0,4% C



METMAT

## Microestrutura dos aços recozidos

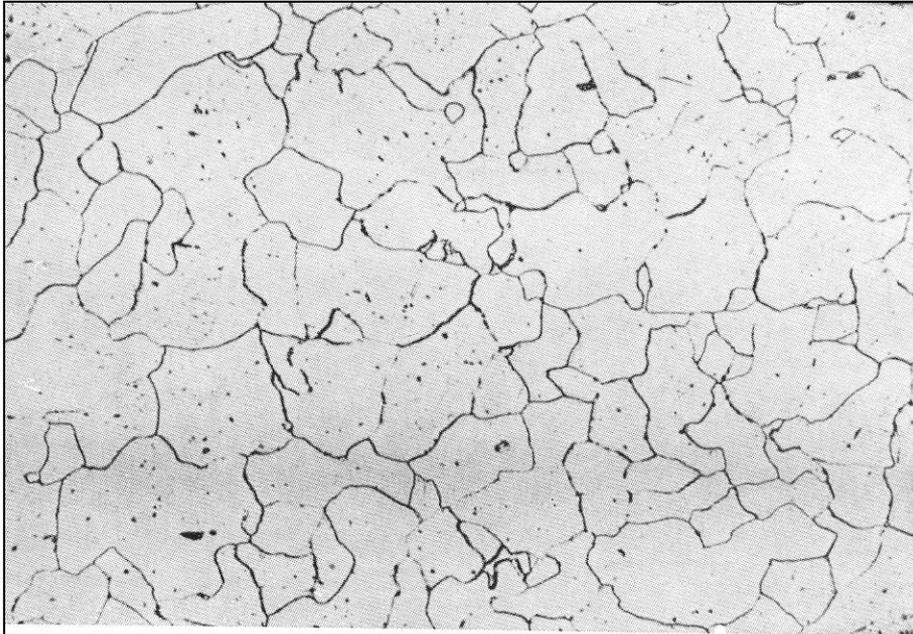


Fig. 280 — Aço extra-doce (no caso, Ferro Armco). Grãos de ferrita e pequenas inclusões. Ataque: água régia. 200 x.



Fig. 281 — Aço com aproximadamente 0,1% de carbono esfriado lentamente. Grãos escuros de perlita e grãos claros de ferrita com numerosas pequenas inclusões. Ataque: pícrico. 160 x.

# Microestrutura dos aços recozidos

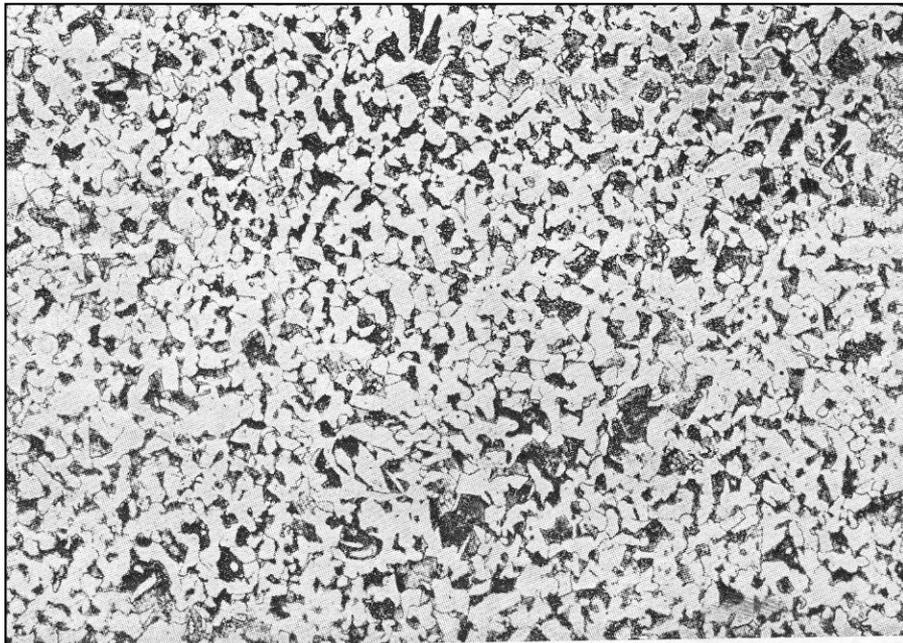


Fig. 282 — Aço com cerca de 0,3% de carbono esfriado lentamente. Grãos de ferrita e de perlita  
Ataque: nítrico. 150 x.

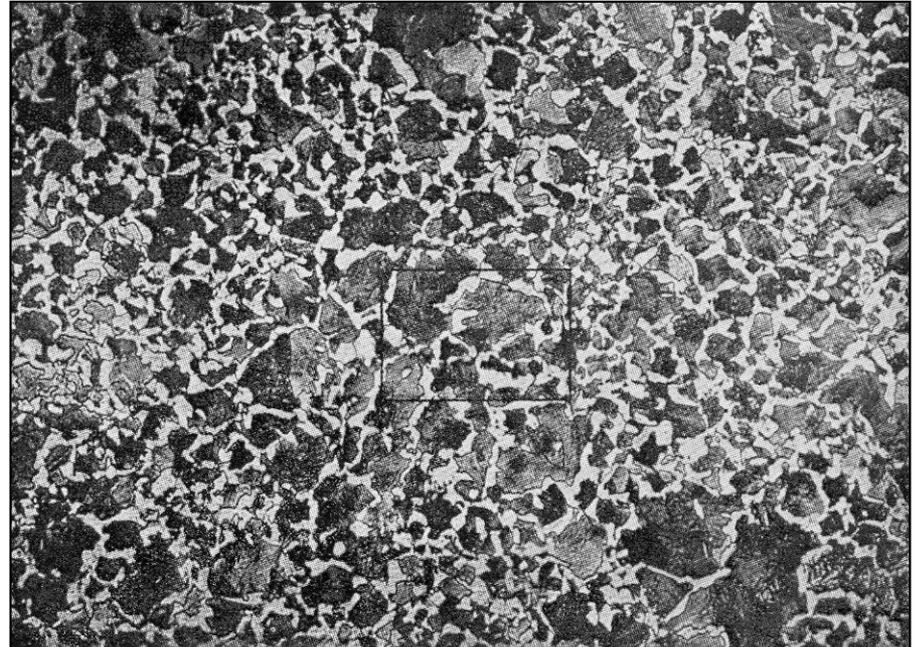


Fig. 283 — Aço com cerca de 0,5% de carbono esfriado lentamente. Grãos de perlita e  
rede de grãos de ferrita. Ataque: nítrico. 160 x.

# Microestrutura dos aços recozidos

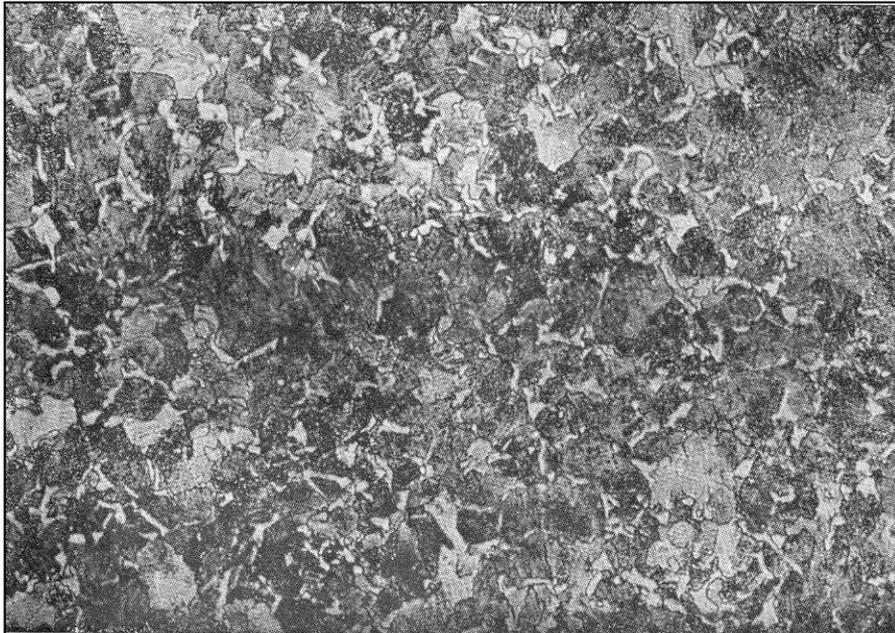


Fig. 286 — Aço com 0,7% de carbono, esfriado lentamente. Grãos de perlita e poucas áreas de ferrita. Ataque: nítrico. 150 x.



Fig. 287 — Aço eutetóide. Grãos de perlita. Ataque: nítrico. As áreas que aparecem confusas neste material apresentam-se, entretanto, nitidamente lamelares ao microscópio, girando o corpo de prova de  $90^{\circ}$  1000 x.

# Microestrutura dos aços recozidos

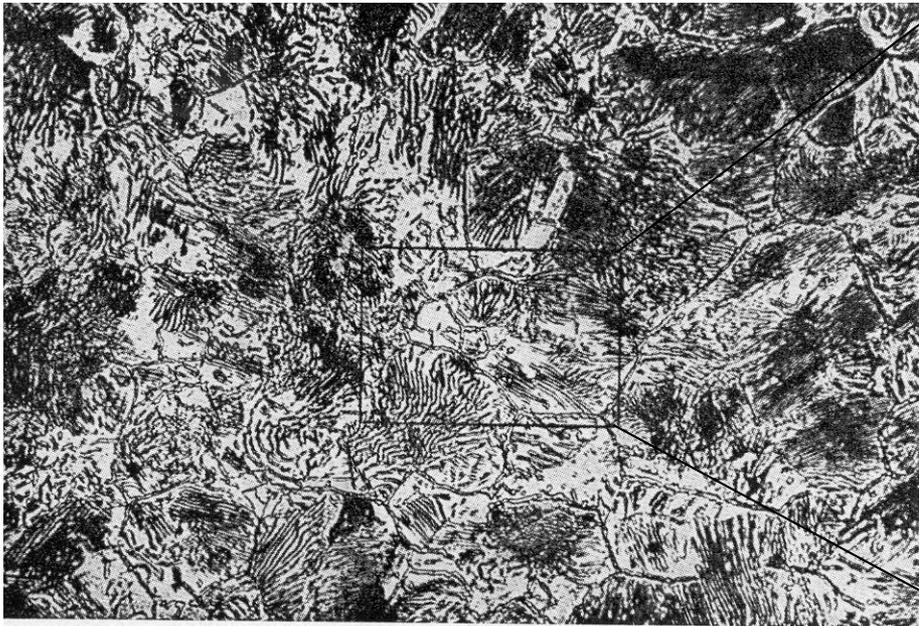


Fig. 289 — Aço hipereutetóide. Grãos de perlita envolvidos por uma rede de cementita. Ataque: picrico. 200 x.

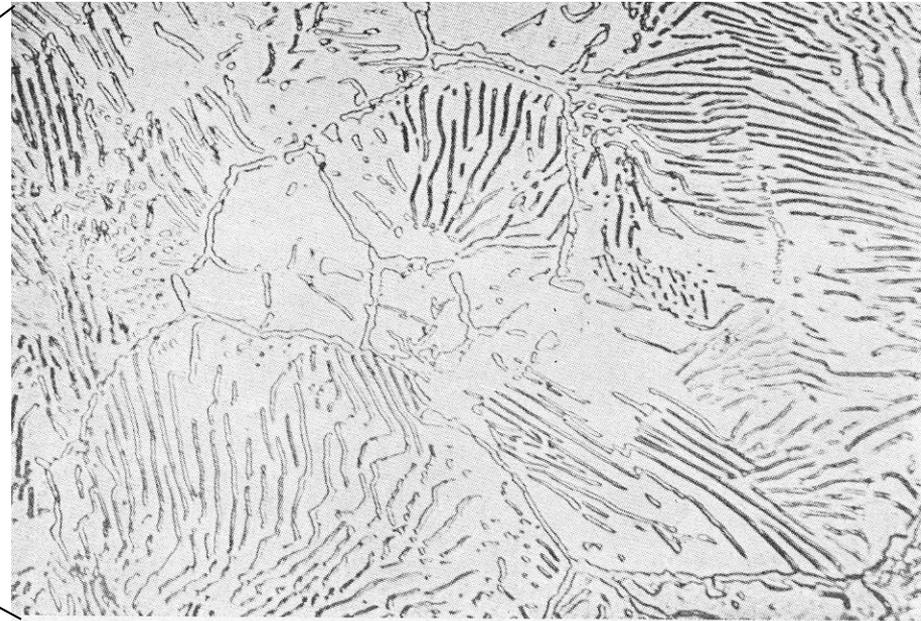


Fig. 290 — Aspecto com maior aumento da região demarcada na fig. 289. Ataque: picrico. 730 x.

## Aço hipereutetóide

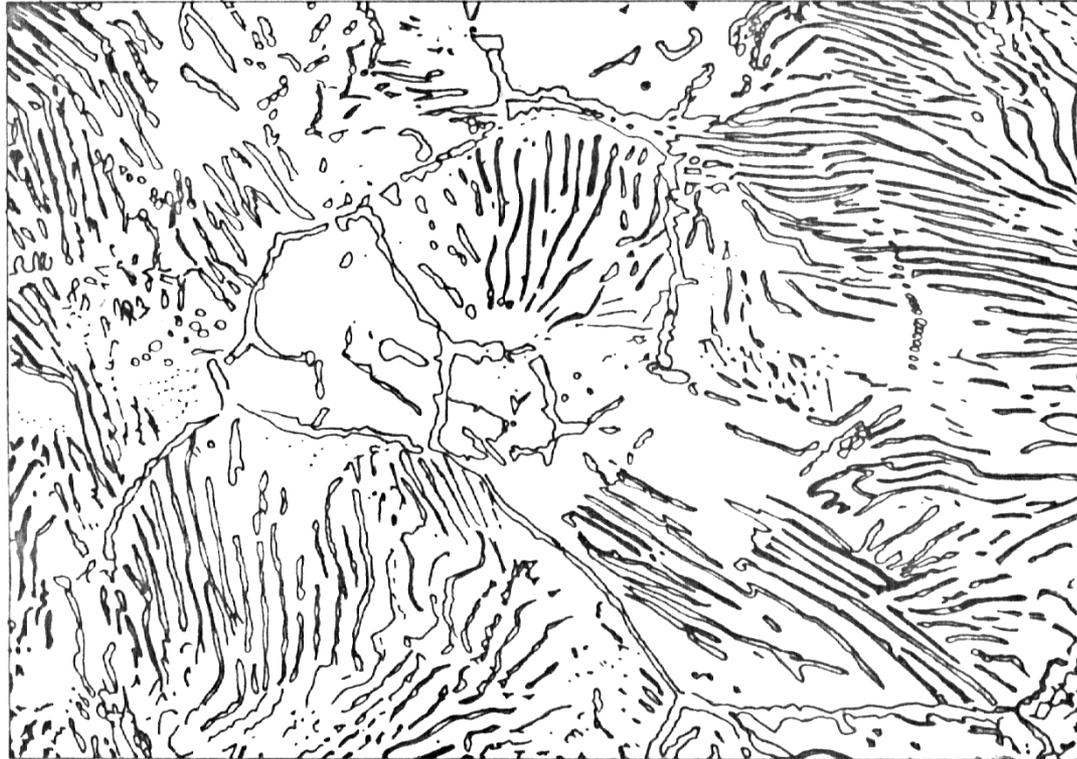


Figura 4.8 - Aço hipereutetóide, com cementita nos contornos de grão. Nital. 750X.

## Aço hipereutetóide

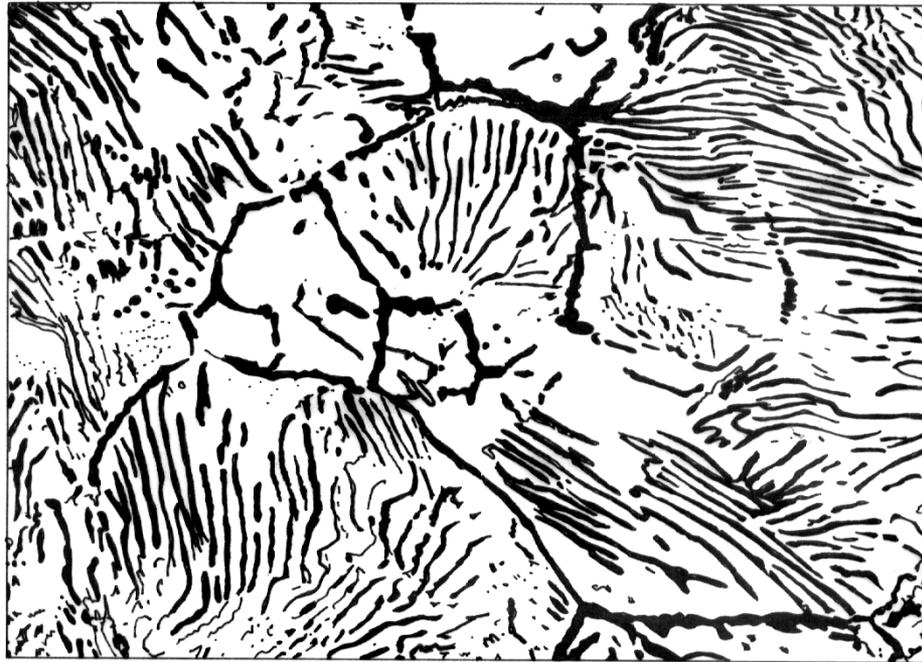
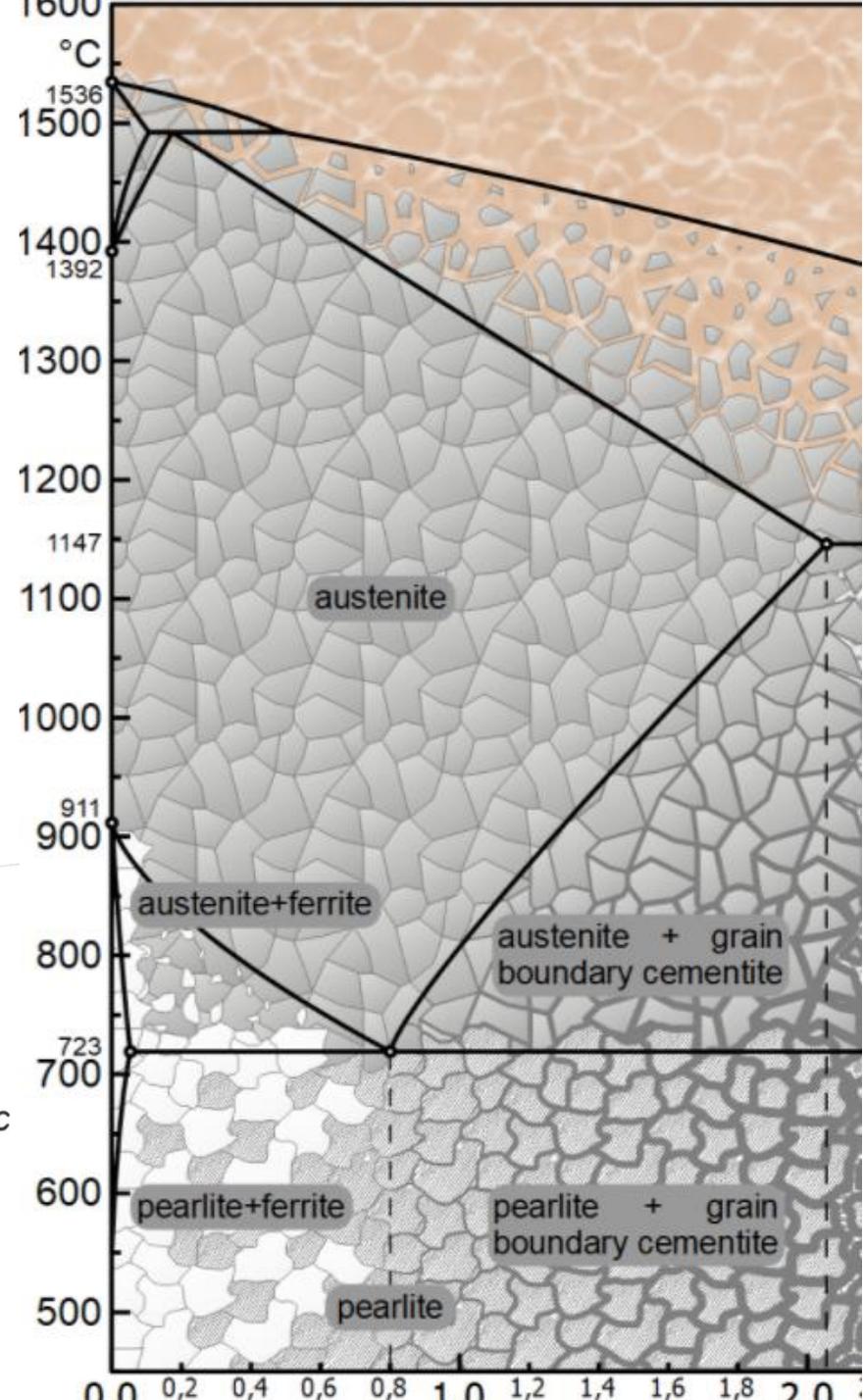
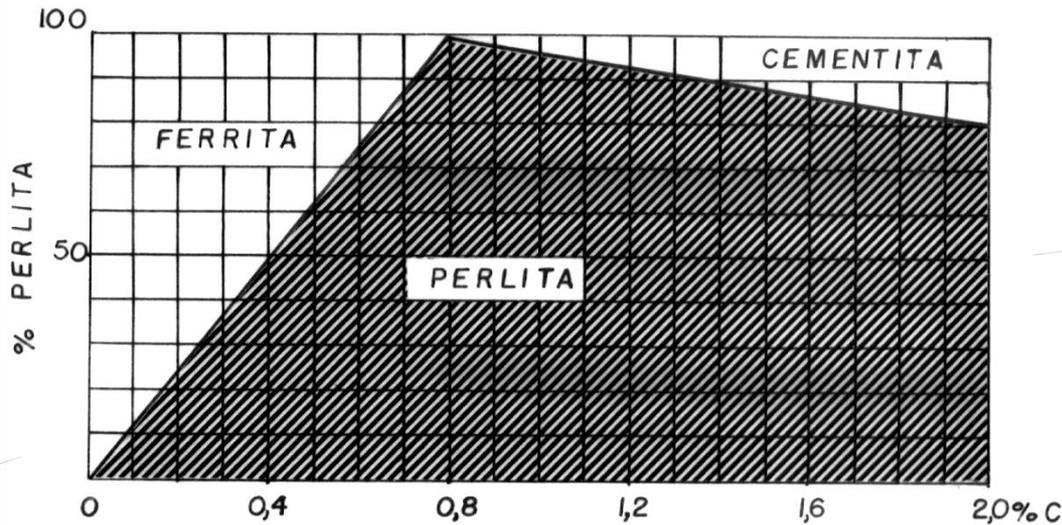


Figura 4.9 - Aço hipereutetóide, com cementita nos contornos de grão. Picrato de sódio a quente. 750X.

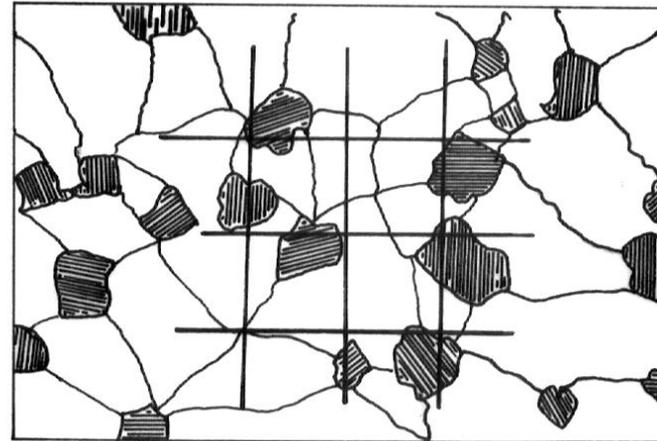
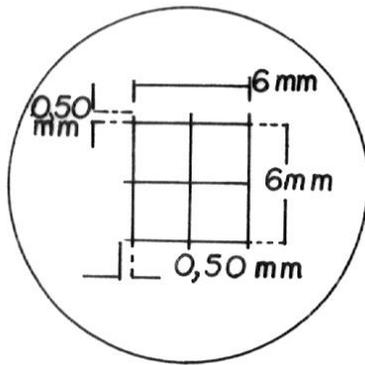


METMAT

## Avaliação do teor de carbono pela microestrutura



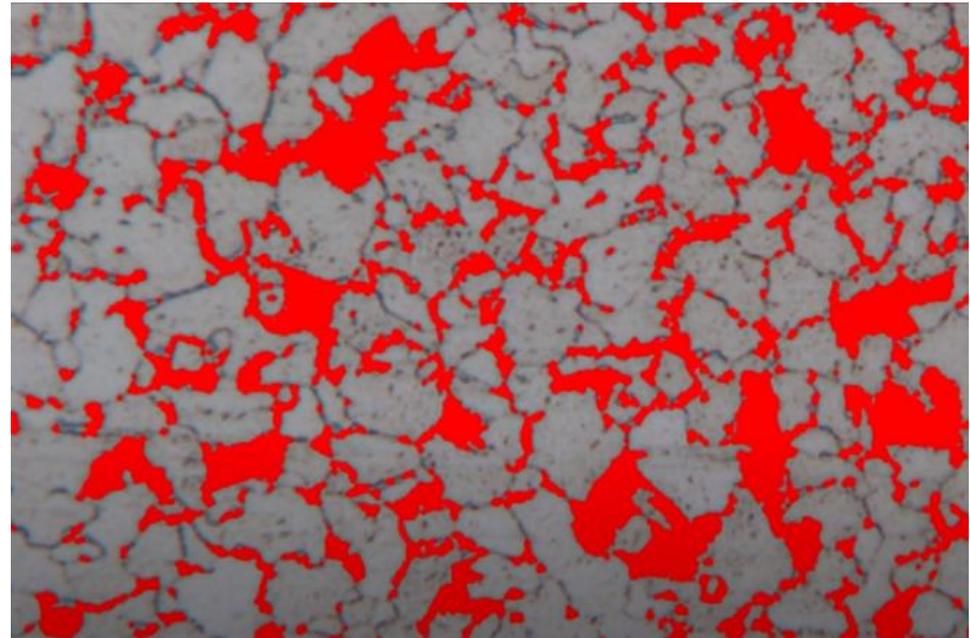
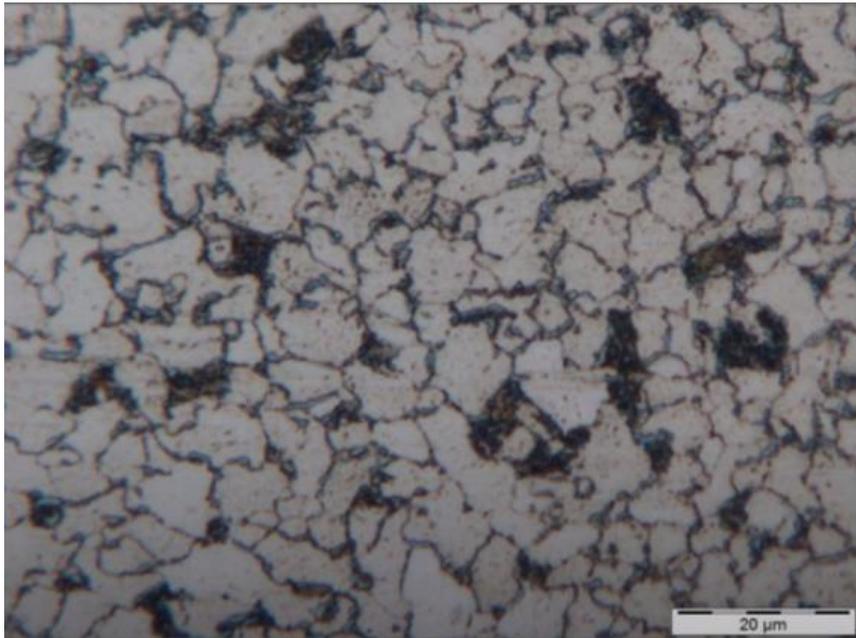
# Avaliação quantitativa das frações volumétricas de microconstituintes



Uso de retículas para contagem de fração volumétrica

# Avaliação quantitativa das frações volumétricas de microconstituintes

Uso de processamento de imagens e aplicação de filtros para discriminação de fases e microconstituintes, que permite fazer avaliações quantitativas de parâmetros microestruturais.



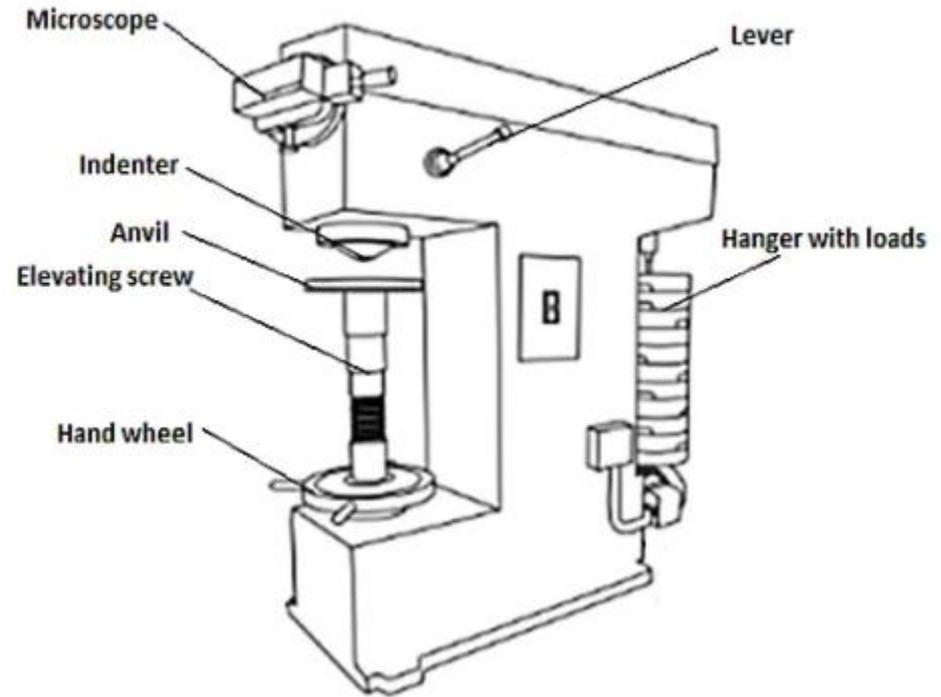
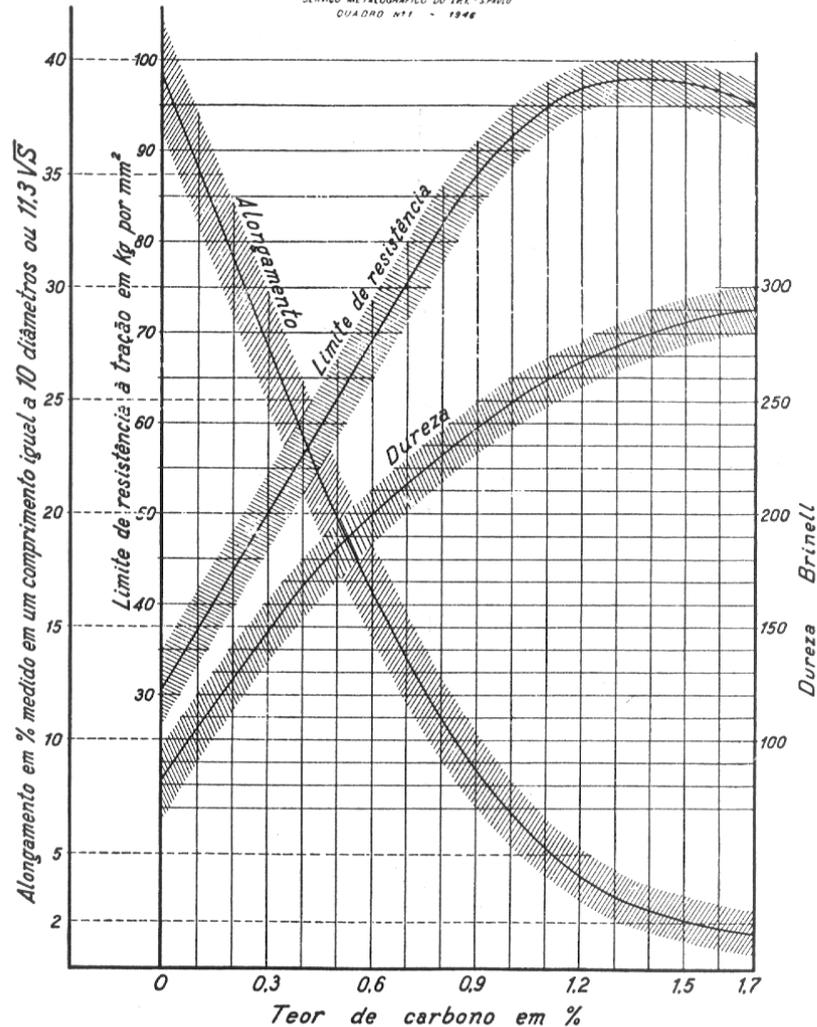


# Propriedades mecânicas dos aços carbono recozidos

GRÁFICO MOSTRANDO APROXIMADAMENTE A VARIÇÃO DE ALGUMAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS AÇOS COMUNS, ESFRIADOS LENTAMENTE, EM FUNÇÃO DO TEOR DE CARBONO

— AÇOS LAMINADOS OU FORJADOS —

SERVICÓ METALGRÁFICO DO IAT - SP/ULO  
QUADRO Nº 1 - 1946



<https://www.youtube.com/watch/RJXJpeH78iU>

Figura 4.12 - Variação das propriedades mecânicas dos aços recozidos com o teor de carbono (1).



METMAT

# Microestrutura dos extradoços (0,02%C)

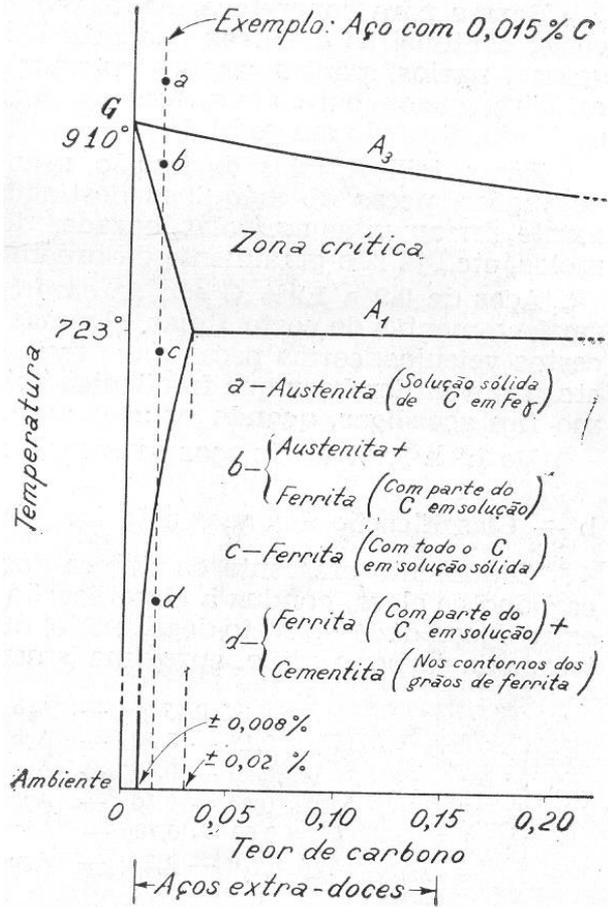


Fig. 344 — Detalhe do diagrama de equilíbrio

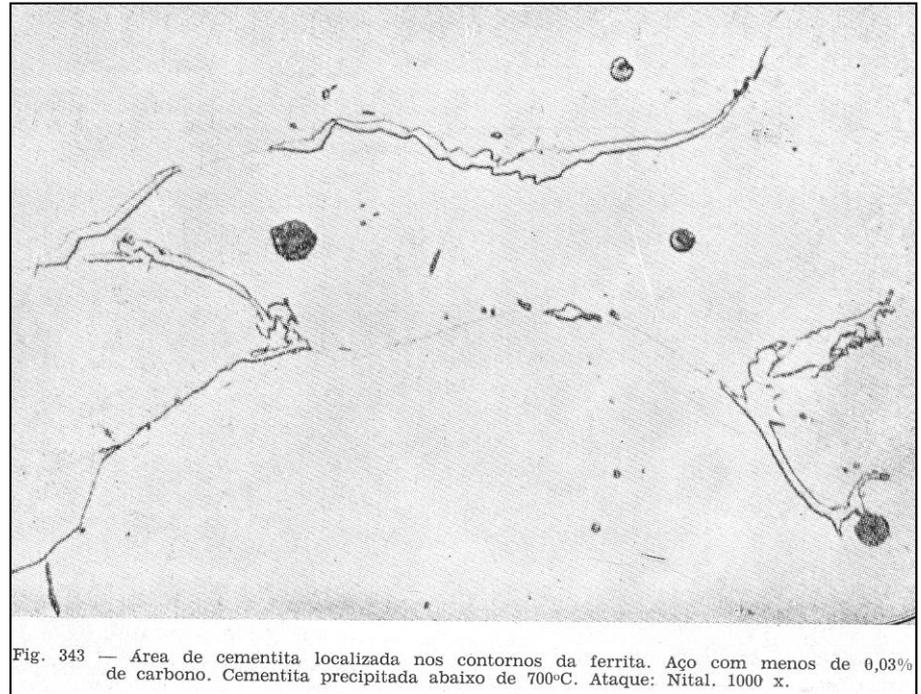


Fig. 343 — Área de cementita localizada nos contornos da ferrita. Aço com menos de 0,03% de carbono. Cementita precipitada abaixo de 700°C. Ataque: Nital. 1000 x.



## Importante nessa aula

- 1) O sistema Fe-C pode ser estudado e representado pelo diagrama de fase Fe-C
- 2) As fases presentes são a ferrita CCC a austenita CFC e a cementita de estrutura ortorrômbica.
- 3) A transformação de fase  $Fe^{\alpha}_{CCC} \Leftrightarrow Fe^{\gamma}_{CFC}$  é de grande importância pois possibilita a formação de fases e microconstituintes, durante o resfriamento dos aços, que condicionam propriedades mecânicas.
- 4) Austenita CFC com 0,8%C se transforma em perlita (arranjo de lamelas alternadas de ferrita CCC com 0,02%C e cementita ortorrômbica com 6,67%C).
- 5) Quanto maior o teor de carbono do aço maior a % de perlita e menor a % de ferrita, aumentando a dureza e a resistência e diminuindo o alongamento e a tenacidade.
- 6) É possível fazer medidas quantitativas de fases e microconstituintes (métodos manuais ou automáticos) e estabelecer correlações com propriedades mecânicas dos aços.