

Universidade de São Paulo

Escola de Engenharia de São Carlos

Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e
Automobilística

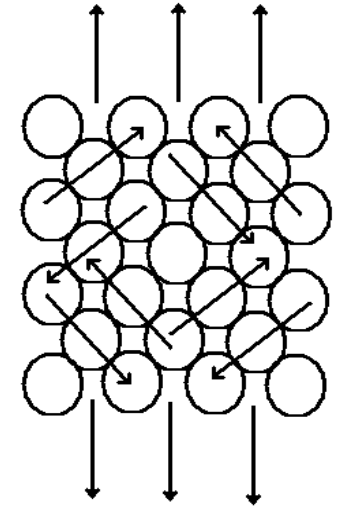
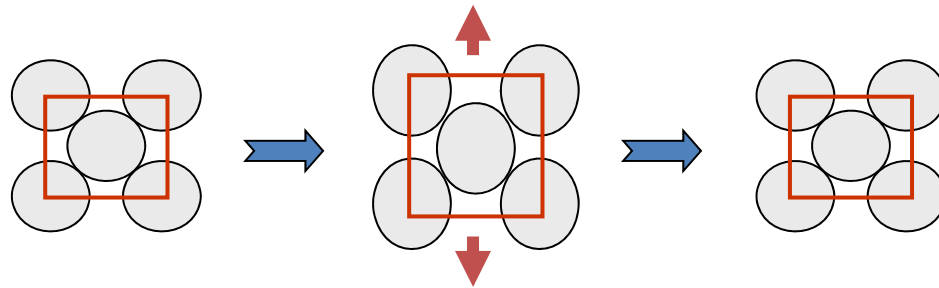


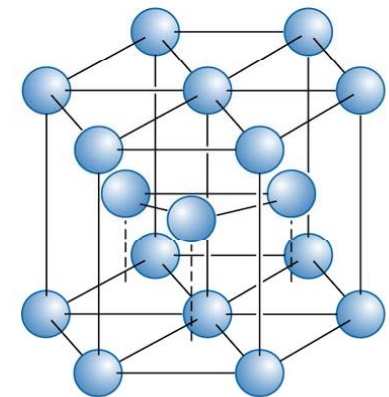
Diagrama de equilíbrio Fe-C

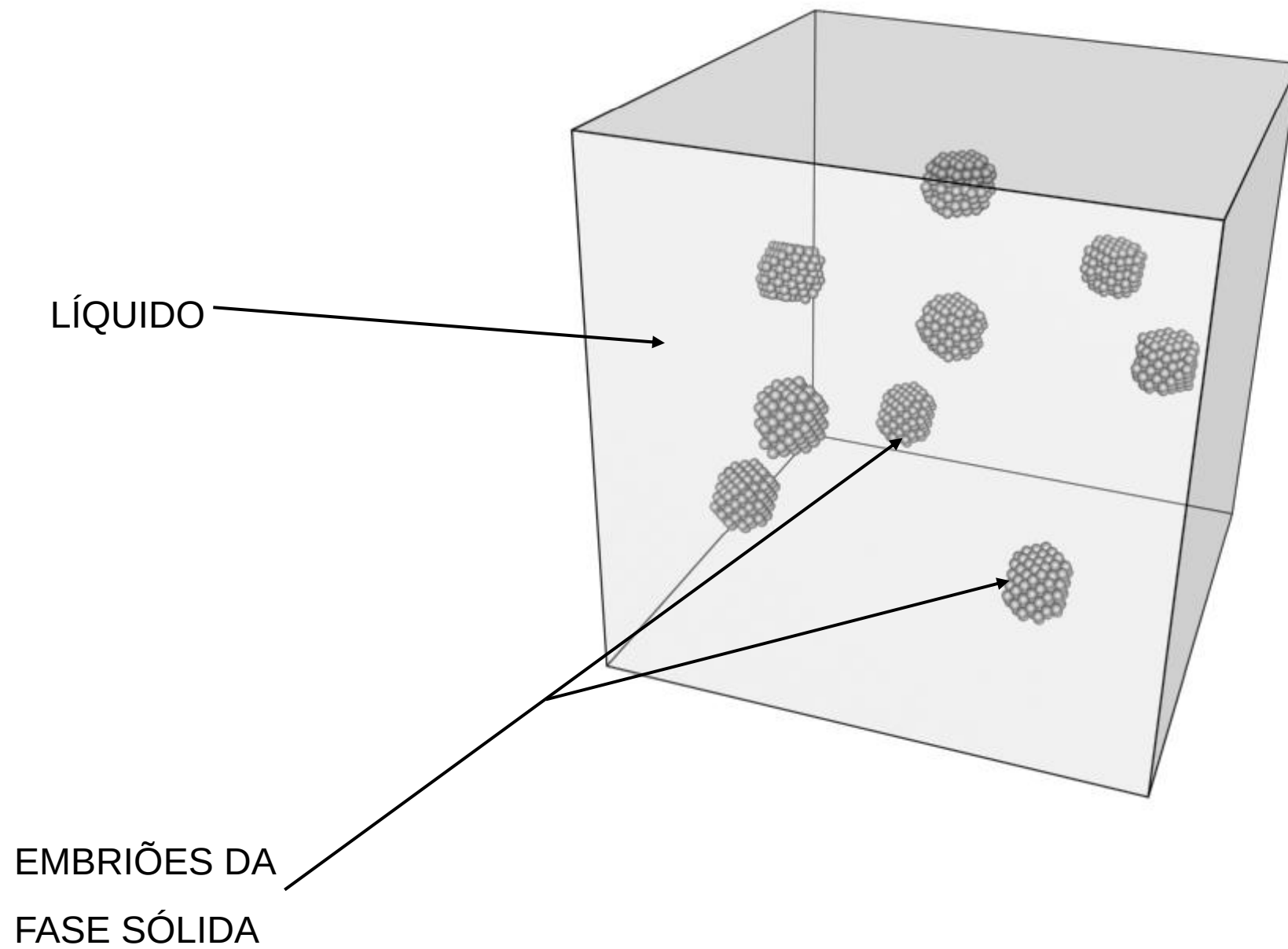


Engenharia e Ciência dos Materiais I

Prof. Dr. Cassius Olivio Figueiredo Terra Ruchert

www.eesc.usp.br/smm/materiais





Esses embriões, com a evolução da transformação, são transformados em núcleos da nova fase, como mostra a figura ao lado.

Na etapa de nucleação, os núcleos surgem de forma aleatória, cada um com orientação cristalográfica própria, porém, em um mesmo núcleo, seus átomos têm a mesma orientação cristalográfica e assim se define tal região como grão cristalino.

Na fase seguinte à nucleação, denominada de crescimento, esses núcleos crescem e entram em contato com seus núcleos vizinhos, formando nesses pontos de contato uma região conhecida como “contorno de grão”.
Devidos ao caráter tridimensional da estrutura atômica, o contato dos vários grãos com diferentes orientações gera superfícies de contornos de grão.

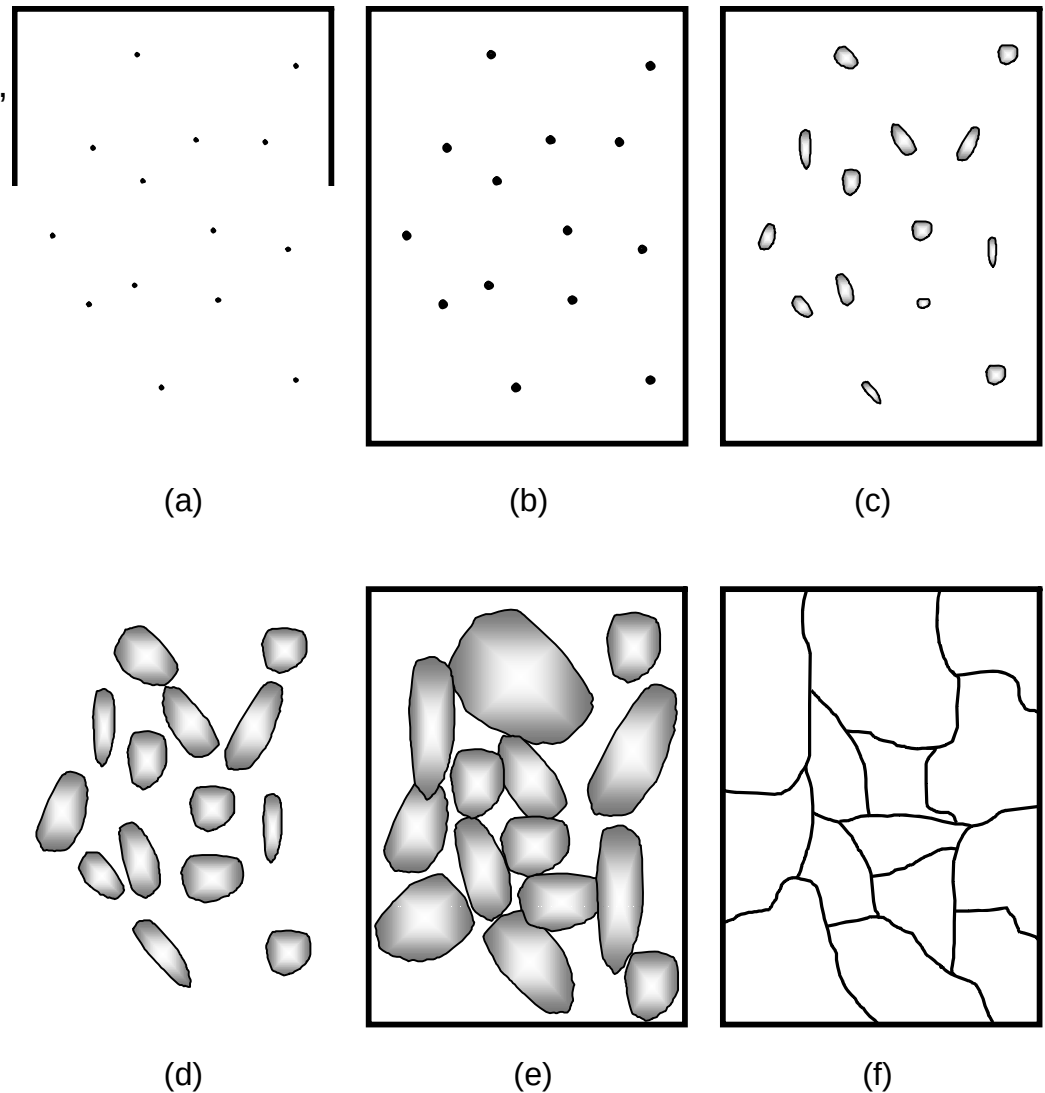
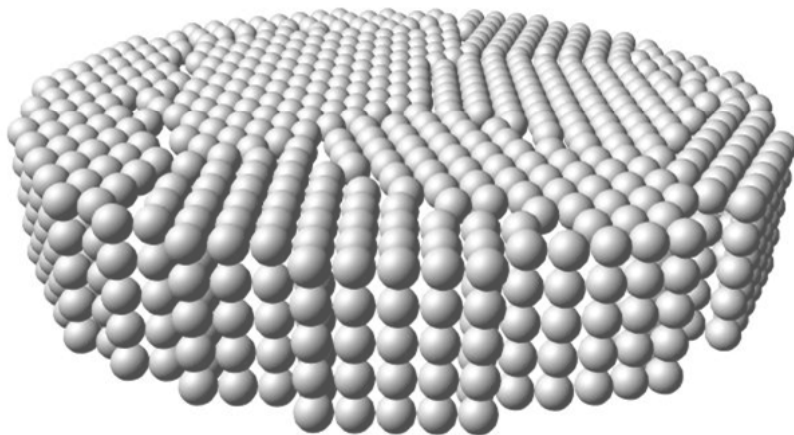


Figura : Formação de um material policristalino:

- (a) Presença de embriões;
- (b) Embriões transformam-se em núcleos;
- (c) Crescimento dos núcleos;
- (d) Núcleos dão origem aos grãos cristalinos;
- (e) Encontro dos grãos cristalinos com seus vizinhos e
- (f) Contornos dos grãos cristalinos.

LIGAS FERRO-CARBONO

- De todos os sistemas de ligas binárias, o que é possivelmente o mais importante é aquele formado pelo ferro e o carbono. Tanto os aços como os ferros fundidos, que são os principais materiais estruturais em toda e qualquer cultura tecnologicamente avançada são essencialmente ligas ferro-carbono.

- As ligas com até 2,0% de carbono são chamadas aços e acima deste teor, ferros fundidos.
- Durante o processo de solidificação dos aços, é possível verificar no aço o aparecimento de microconstituintes como ferrita, cementita, perlita e austenita

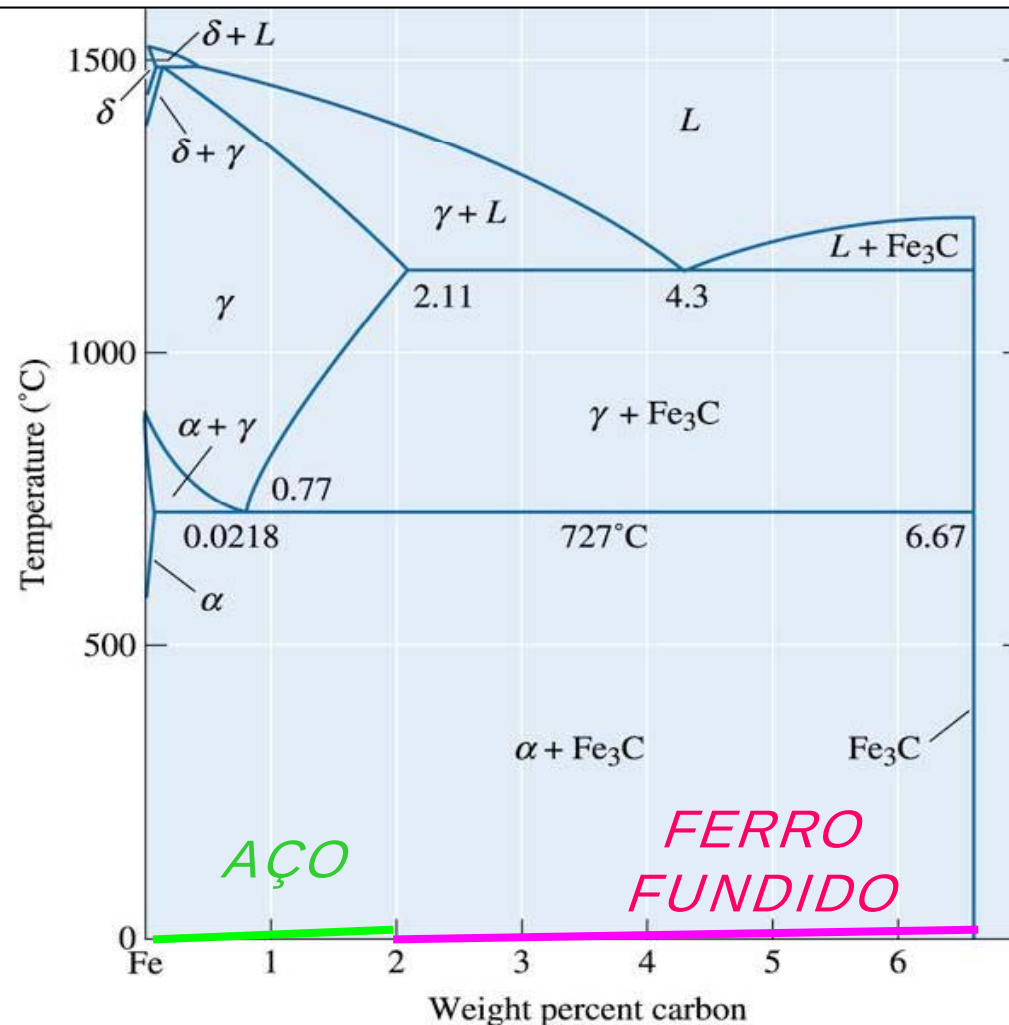


TABLE 11-1 ■ *The effect of carbon on the strength of steels*

Slow Cooling (Coarse Pearlite)**Fast Cooling (Fine Pearlite)**

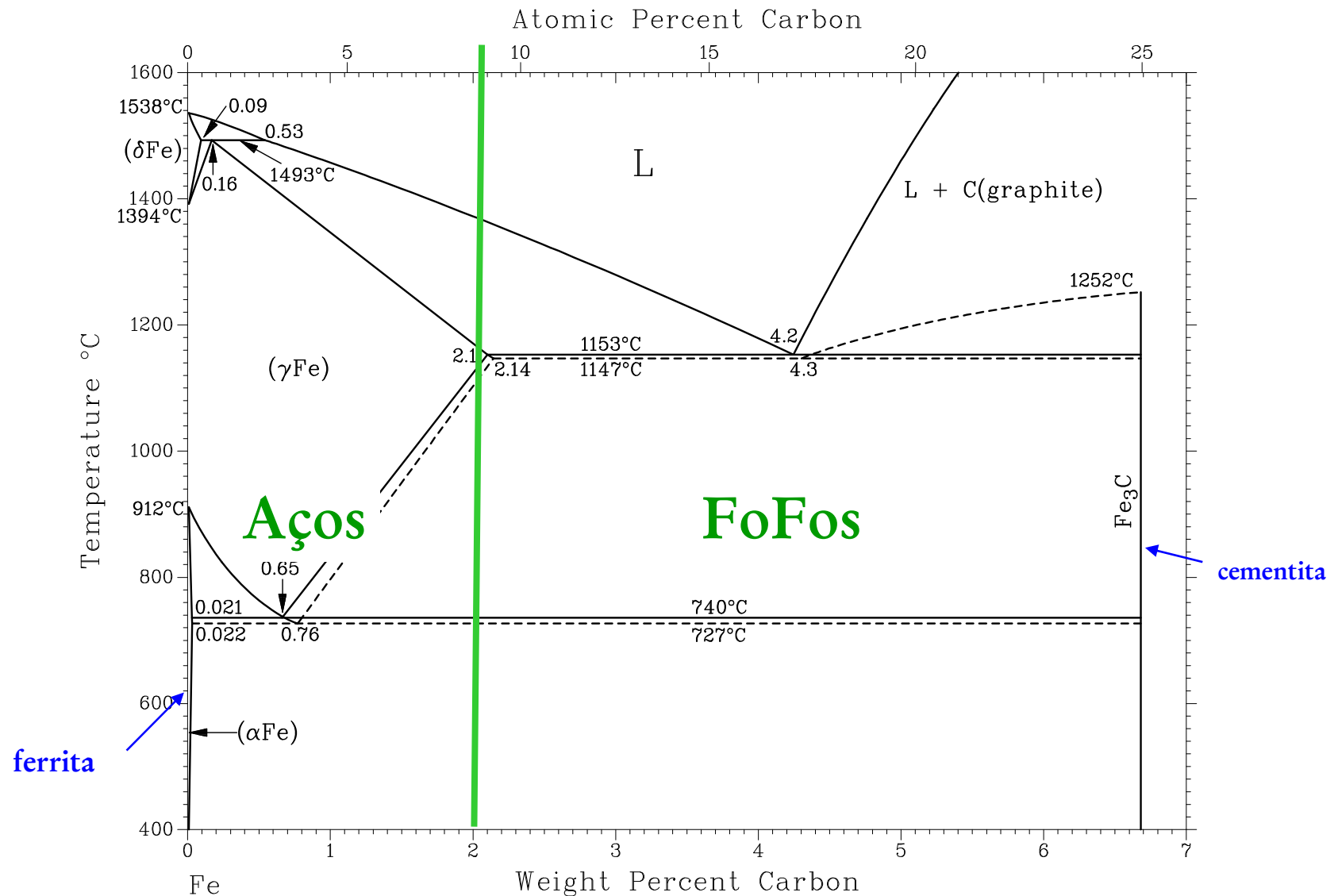
Carbon %	Yield Strength (psi)	Tensile Strength (psi)	% Elongation	Yield Strength (psi)	Tensile Strength (psi)	% Elongation
0.20	42,750	57,200	36.5	50,250	64,000	36.0
0.40	51,250	75,250	30.0	54,250	85,500	28.0
0.60	54,000	90,750	23.0	61,000	112,500	18.0
0.80	54,500	89,250	25.0	76,000	146,500	11.0
0.95	55,000	95,250	13.0	72,500	147,000	9.5

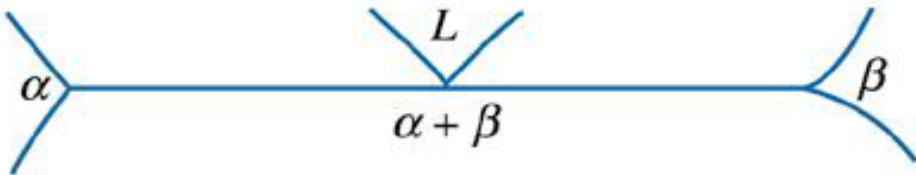
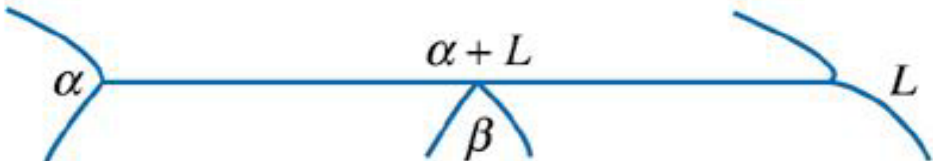
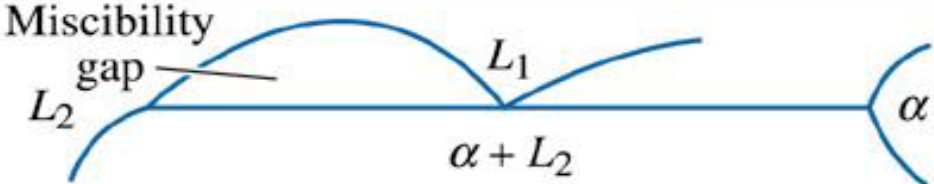
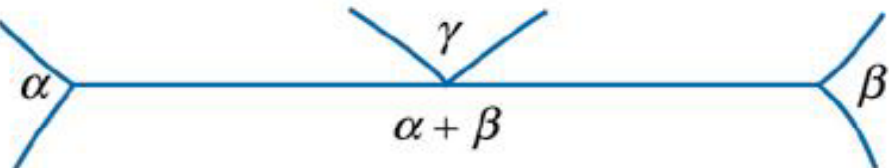
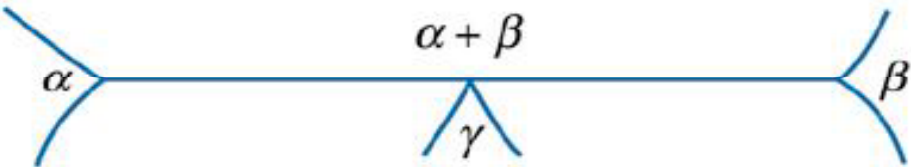
After Metals Progress Materials and Processing Databook, 1981.

CEMENTITA

- Forma-se quando o limite de solubilidade do carbono é ultrapassado (6,7% de C)
- É dura e frágil
- Abaixa a tenacidade metal (menor energia de impacto) e aumenta a resistência a tração
- Cristaliza no sistema ortorrômbico (com 12 átomos de Fe e 4 de C por célula unitária)
- É um composto intermetálico metaestável, embora a velocidade de decomposição em ferro α e C seja muito lenta

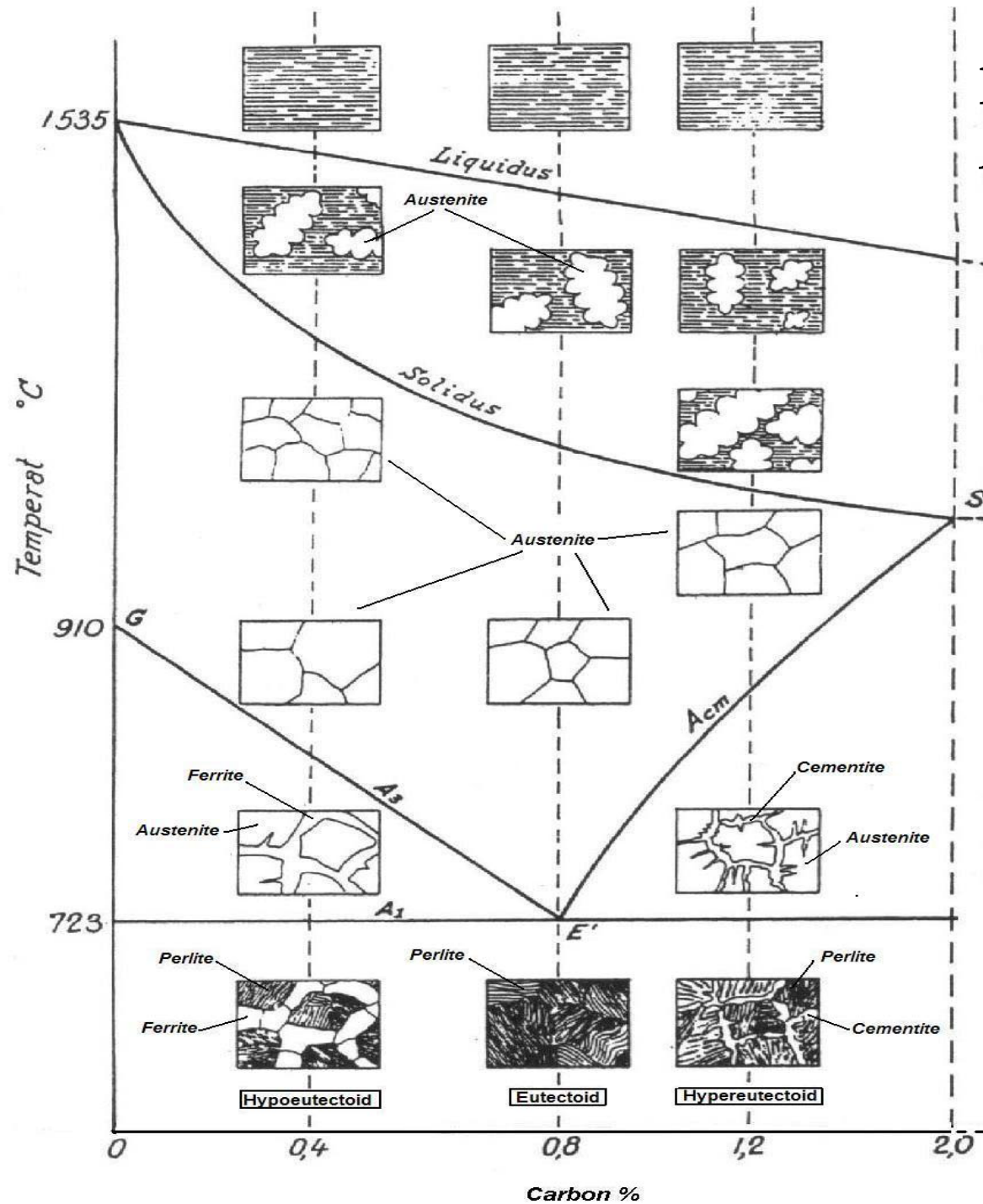
Diagrama Fe-C



Eutectic	$L \rightarrow \alpha + \beta$	
Peritectic	$\alpha + L \rightarrow \beta$	
Monotectic	$L_1 \rightarrow L_2 + \alpha$	
Eutectoid	$\gamma \rightarrow \alpha + \beta$	
Peritectoid	$\alpha + \beta \rightarrow \gamma$	

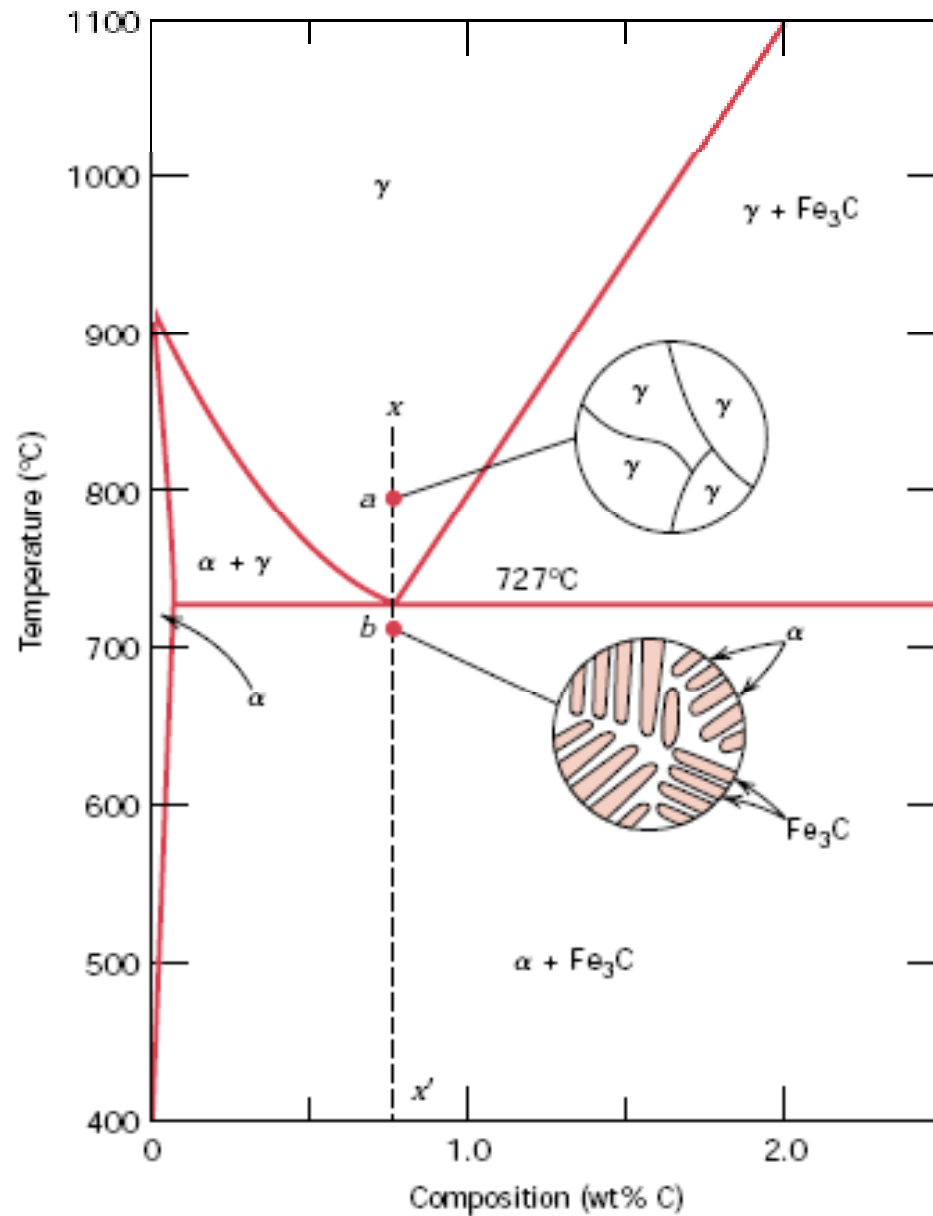
As cinco mais importantes reações contendo três fases de um diagrama de fase binário

Diagrama Fe-Fe₃C: AÇOS



PERLITA

- Essa microestrutura formada nos aços eutetóides abaixo da temperatura do eutetóide composta por camadas alternadas de lamelas de ferrita e cementita é conhecida por perlita, pois quando vista ao microscópio possui uma aparência que lembra madrepérola

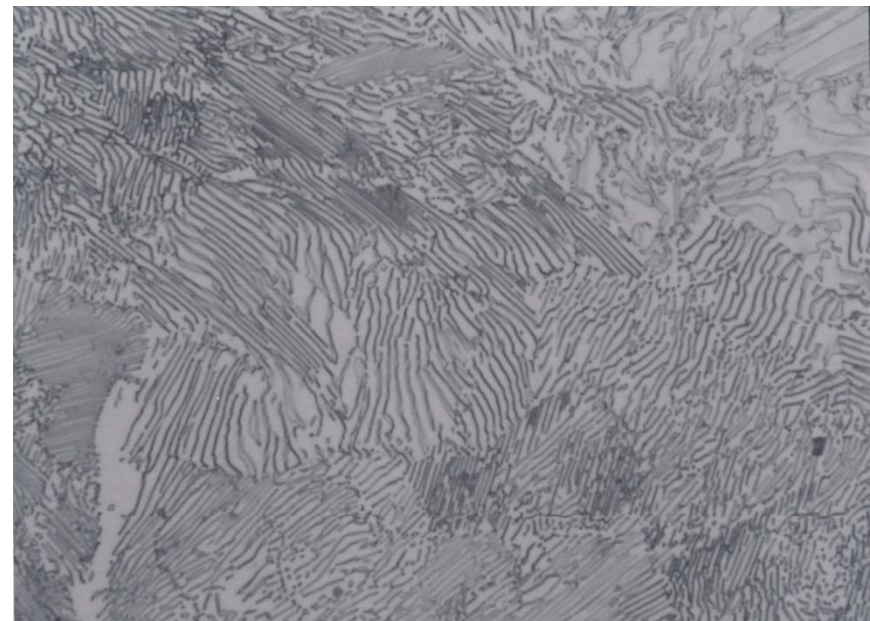


Aço eutetóide

~ 0,76% C

Microestrutura: perlita

P/ resfriamento lento

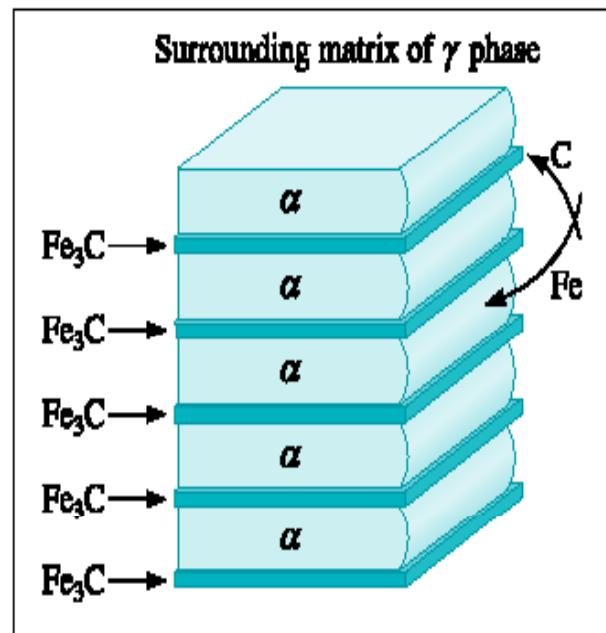


Representação esquemática das microestruturas da liga Fe-FeC para composição eutetoide (0,76 wt% C) acima e abaixo da temperatura eutetóide

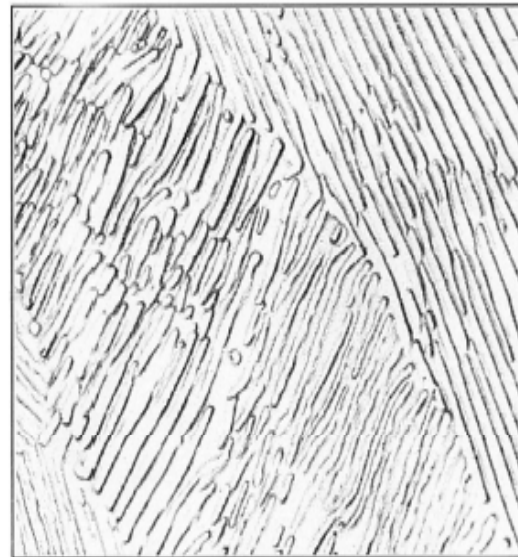
Perlita

- NÃO É FASE
- É um **MICROCONSTITUINTE**

Lamelas de Ferrita e Cementita



(a)

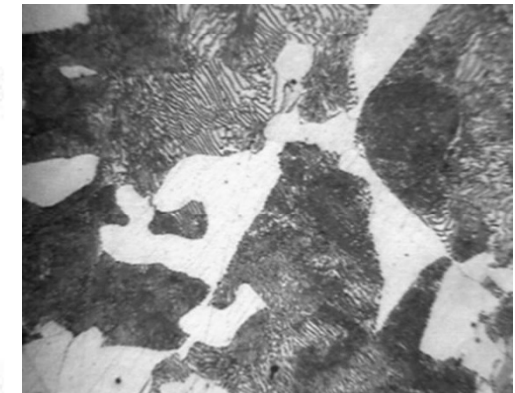
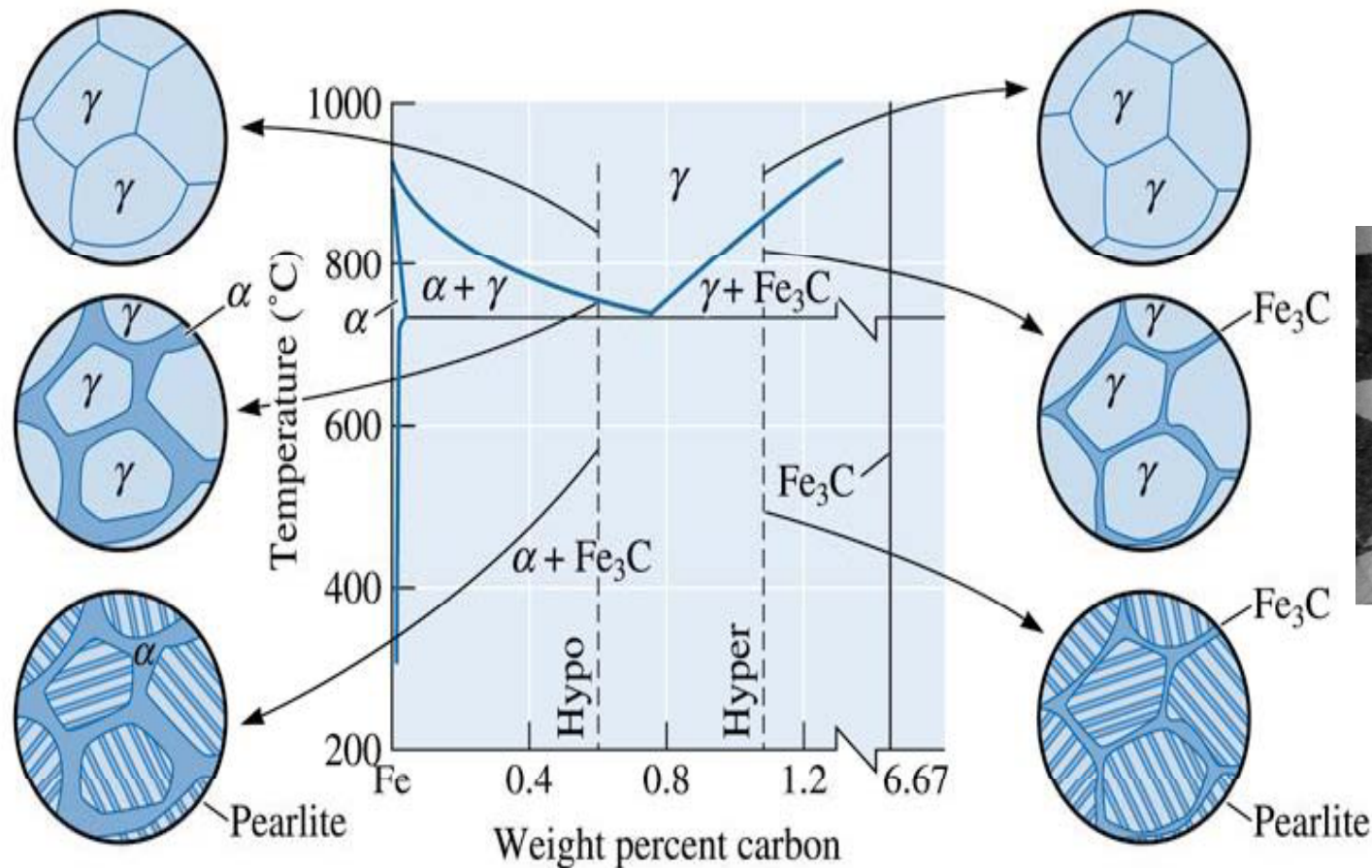


(b)

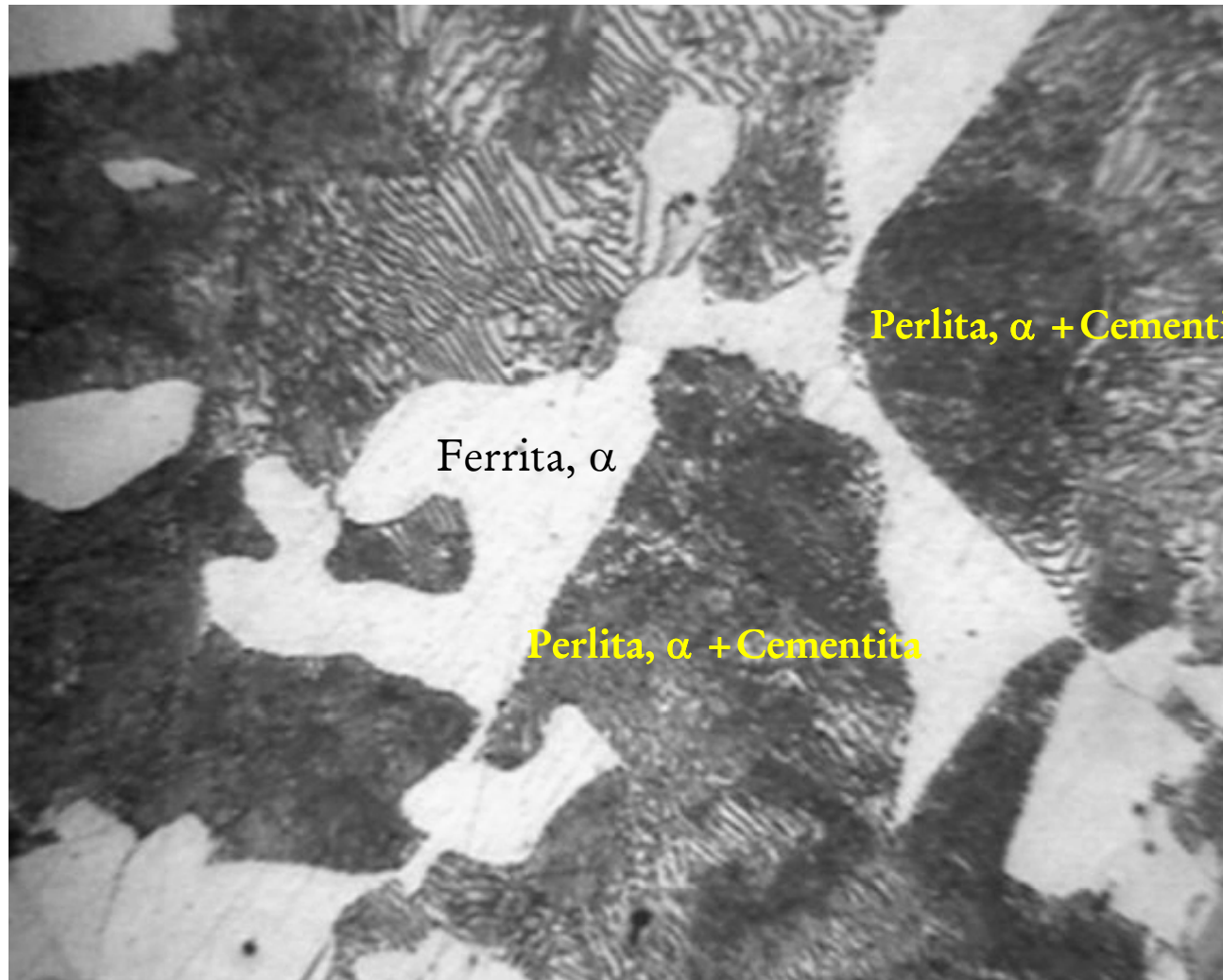


Crescimento da estrutura de perlita: (a) redistribuição de C e Fe e (b) Fotomicrografia da perlita lamelar

Aços hipoeutetóides : $< 0,76\% \text{ C}$
Microestrutura: ferrita + perlita
Resfriamento lento



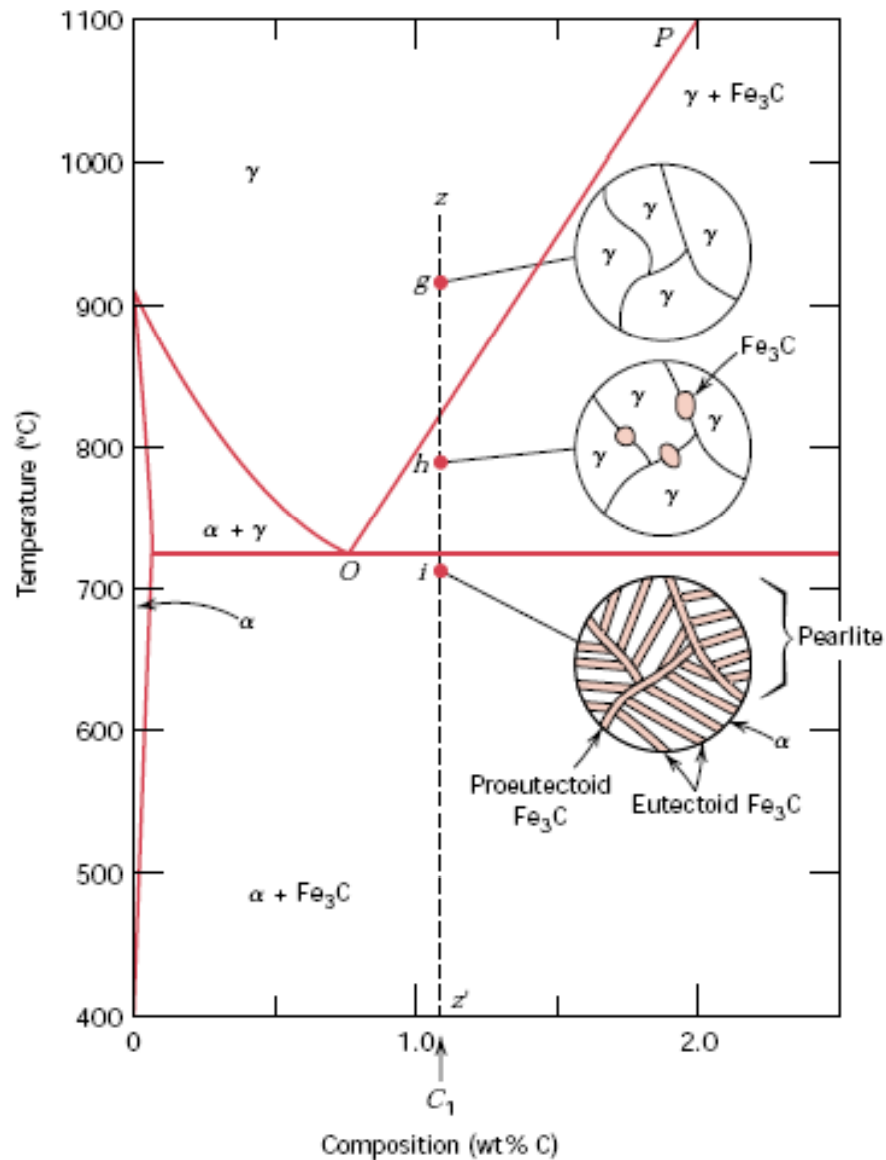
Representação esquemática das microestruturas da liga Fe-C para composição hipoeutetoide Co(contem menos que $0,76 \text{ wt}\% \text{ C}$) resfriado da região da austenita até abaixo da temperatura eutetoide.



Ferrita, α

Perlita, α + Cementita

Perlita, α + Cementita



Aços hipereutetóides

> 0,76% C

Microestrutura: perlita + cementita
p/ resfriamento lento

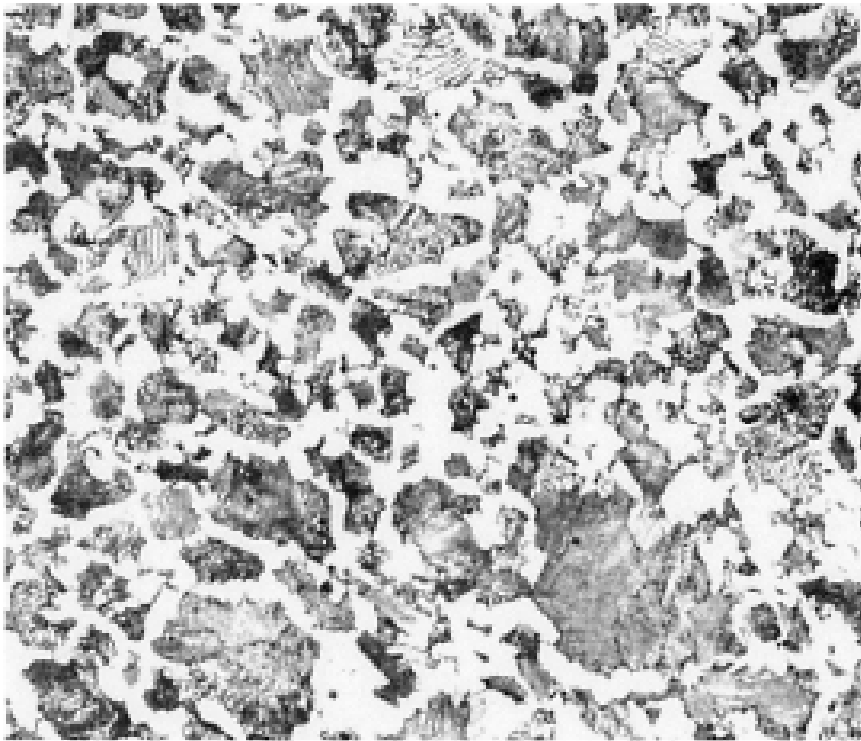


Grãos de Perlita
+
Cementita
intergranular

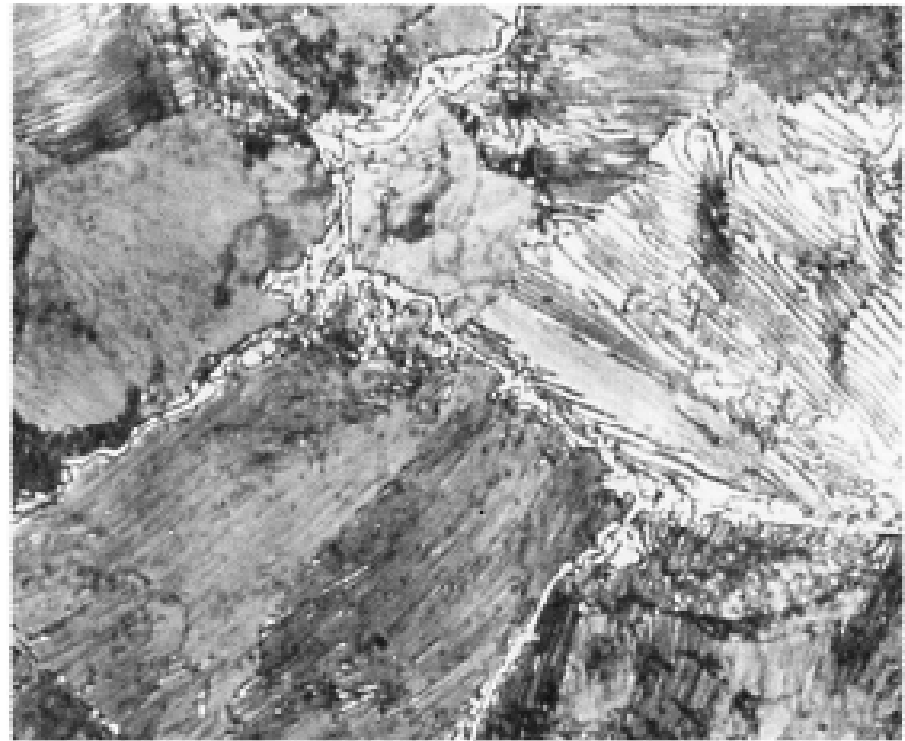
Representação esquemática das microestruturas da liga Fe-C para composição hipereutetoide C_1 (contem entre 0,76 e 2,14 wt% C) resfriado a partir da região do campo da austenita até abaixo da temperatura eutetoide.

Designação		TIPO DE AÇO
SAE	AISI	
10XX	C10XX	Aços carbono comuns
11XX	C11XX	Aços de usinagem (ou corte) fácil, com alto S
13XX	13XX	Aço manganês com 1,75% de Mn
23XX	23XX	Aços Níquel com 3,5% de Ni
25XX	25XX	Aços Níquel com 5,0% de Ni
31XX	31XX	Aços Níquel Cromo com 1,25% de Ni e 0,65% de Cr
33XX	E33XX	Aços Níquel Cromo com 3,5 % de Ni e 1,55 Cr
40XX	40XX	Aços Molibdênio com 0,25% de Mo
41XX	41XX	Aços Cromo Molibdênio com 0,50% ou 0,90% de Cr e 0,12% ou 0,20% de Mo
43XX	43XX	Aços Níquel cromo com molibdênio com 1,80% de Ni e 0,20% ou 0,25% de Mo
46XX	46XX	Aços Níquel Molibdênio com 1,55% ou 1,80% de Ni e 0,20% ou 0,25% de Mo
47XX	47XX	Aços Níquel Cromo Molibdênio com 1,05%de Ni, 0,45% de Cr e 0,20 de Mo
48XX	48XX	Aços Níquel Molibdênio com 3,5 % de Ni e 0,25% de Mo
50XX	50XX	Aços cromo com 0,28% ou 0,65% de Cr
50BXX	50BXX	Aços cromo boro com baixo teor de Cr e no mínimo 0,0005% de B
51XX	51XX	Aços cromo com 0,80 a 1,05% de Cr
61XX	61XX	Aço cromo vanádio com 0,8 ou 0,95% de Cr a 0,1% ou 0,15% de v
86XX	86XX	Aços níquel molibdênio com baixos teores de Ni, Cr e Mo
87XX	87XX	Idem
92XX	92XX	Aço silício manganês com 0,85% de Mn e 2,0% de Si
93XX	93XX	Aços silício manganês com 3,25% de Ni, 1,20% de Cr e 0,12% de Mo
94BXX	94BXX	Aço níquel cromo molibdênio com baixos teores de Ni, Mo e no mínimo 0,0005% de B
98XX	98XX	Aço níquel cromo molibdênio com 1,0% de Ni,0,80 de Cr e 0,25% de Mo

Hipoeutetóide X Hipereutetóide

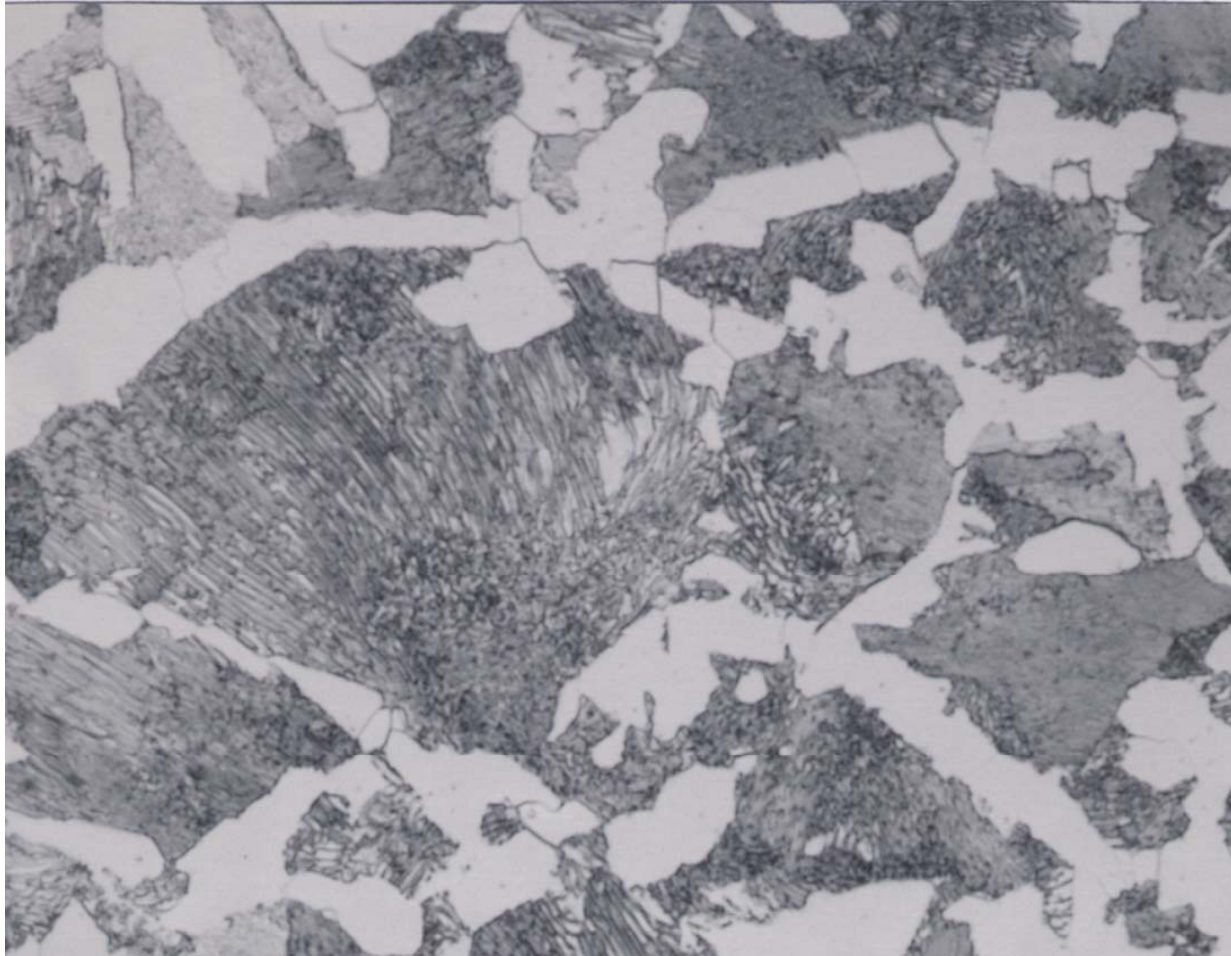


(a)



(b)

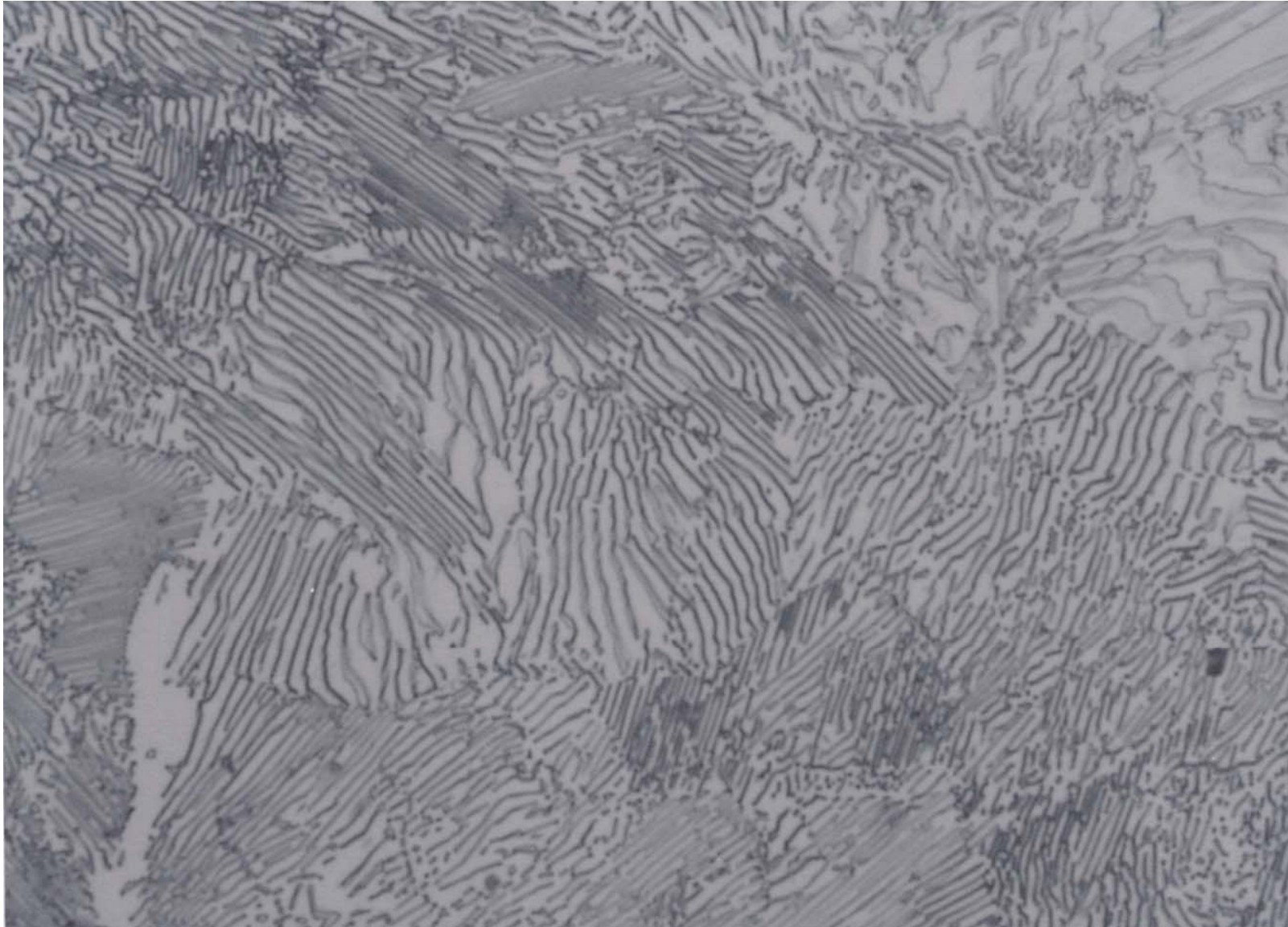
Figura (a) Aço hipoeutetóide mostrando a fase primária α (branca) e perlita ($\times 400$).
(b) Aço hipereutetóide mostrando o primário Fe_3C circundado por perlita ($\times 800$).
(From ASM Handbook, Vol. 7, (1972), ASM International, Materials Park, OH 44073.)



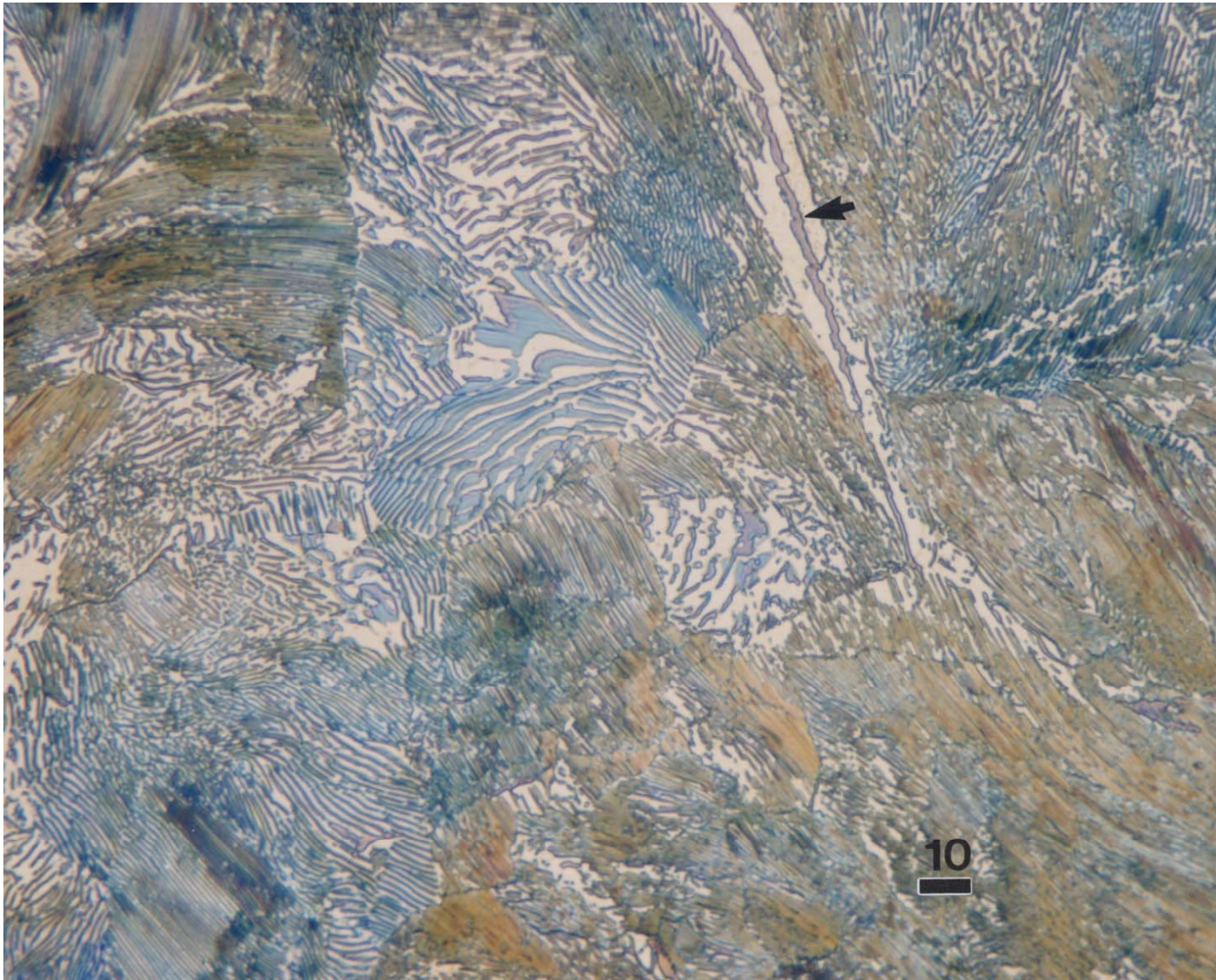
Microestrutura de um aço carbono SAE1040 recozido (0.40% C – 0.68% Mn – 0.12% Si) revelando a ferrita e perlita. Aumento original de 1000X



Microestrutura de um aço laminado a quente (Fe – 0.68% C – 0.84% Mn – 0.33% Si) revelando uma estrutura constituída quase totalmente de perlita. Aumento original de 1000X.



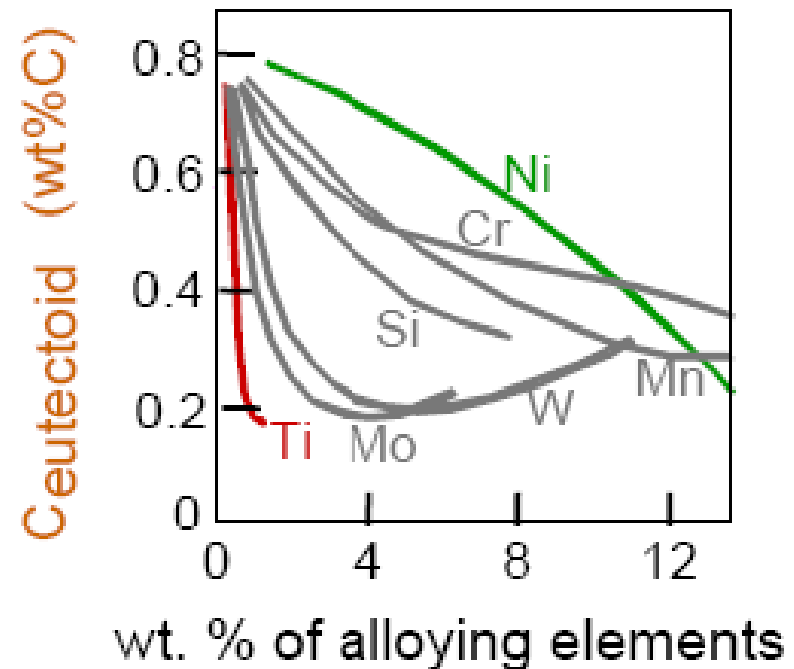
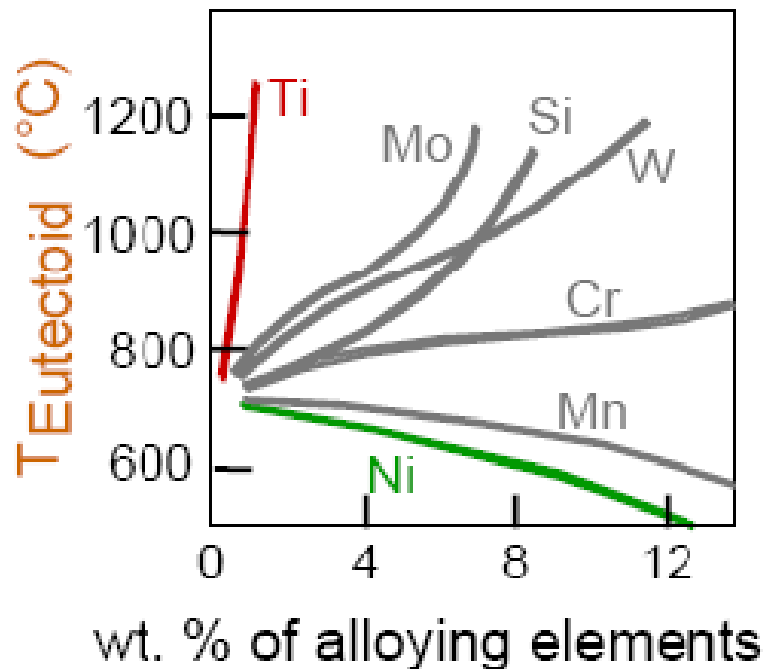
Microestrutura constituída de perlita grosseira de um aço SAE 1080 isotermicamente recozido (780 °C, 1 h, transformado isotermicamente) (Fe – 0.8% C – 0.75% Mn) atacado com 4% de reagente picral. Aumento original de 1000X.



Microestrutura de um aço laminado (Fe – 1% C) atacado com o reagente Beraha que colore a cementita. A seta indica a cementita pro-eutetóide que precipitou no contorno de grão da austenita anterior antes da reação eutetóide (austenite forms ferrite and cementite in the form of lamellar pearlite). Magnification bar is 10 μm long.

ELEMENTOS DE LIGA NOS AÇOS

- As adições de elementos de ligas (Cr, Ni, Ti, etc.) trazem alterações no diagrama de fases binário para o sistema ferro-cementita. Uma das importantes alterações é o deslocamento da posição eutetóide em relação à temperatura e à concentração de carbono. Esses efeitos são ilustrados nas figuras a seguir:



ELEMENTOS DE LIGA NOS AÇOS

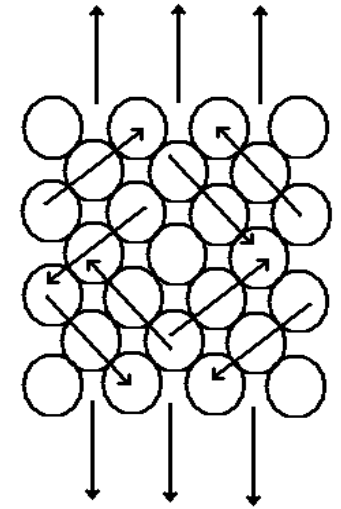
Além do deslocamento do ponto eutetóide os elementos de liga provocam mais alguns efeitos:

- Resistência à tração: a maioria dos elementos adicionados provocam endurecimento por solução sólida, ocasionando, com isto, aumento da resistência à tração.
- Variação na temperatura de transformação: alguns elementos tendem a deslocar as temperaturas de transformação, atuando no sentido de aumentar o campo austenítico (elementos austenitizantes ou gamagênicos) ou restringindo-o (elementos ferritizantes ou alfa gênicos) e desta maneira estabilizando a ferrita. Entre os elementos gamagênicos estão o Ni, C, Mn, N e , entre os alfa gênicos o Cr, W, V, Al, Nb, etc.

- Influência no crescimento do grão: o crescimento do grão austenítico durante o tratamento térmico é um efeito indesejado. Felizmente o crescimento de grão é mais lento na presença de alguns elementos como, por exemplo, o Nb, o V e o Ni. Estes elementos são chamados “refinadores de grão” e são adicionados no aço, muitas vezes, com esta finalidade.

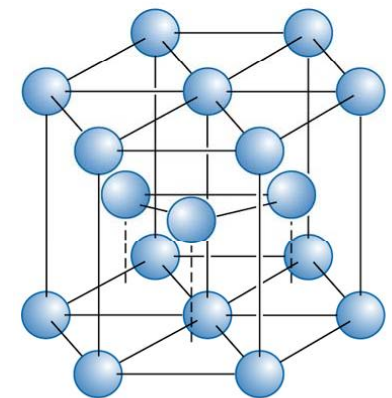
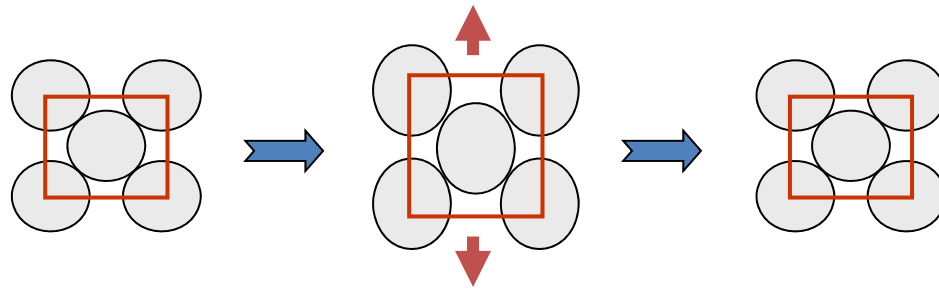
ELEMENTOS DE LIGA NOS AÇOS

- Formação de carbonetos: alguns elementos quando adicionados aos aços, formam carbonetos muito estáveis os quais geralmente são mais duros que a cementita. Por isso esses elementos elevam a dureza do aço e são utilizados geralmente em aços ferramenta de qualidade superior. Entre os elementos estão o Cr, Mo, W, V, Nb e Ti.
- Melhoria na temperabilidade: à exceção do Co todos os elementos tendem a reduzir a velocidade crítica de resfriamento (mínima velocidade para se obter uma estrutura inteiramente martensítica). Isto é indicado pelo deslocamento das curvas TTT para a direita.
- Melhoria na resistência à corrosão: adições de cromo da ordem de 13% proporcionam a formação de um filme óxido denso e aderente à superfície do aço protegendo-o efetivamente contra a corrosão.



TRATAMENTOS TÉRMICOS

RECOZIMENTO E NORMALIZAÇÃO



Tratamentos Térmicos

- Finalidade:

Alterar as microestruturas e como
consequência as propriedades
mecânicas das ligas metálicas

Tratamentos Térmicos

- **Objetivos:**

- Remoção de tensões internas
- Aumento ou diminuição da dureza
- Aumento da resistência mecânica
- Melhora da ductilidade
- Melhora da usinabilidade
- Melhora da resistência ao desgaste
- Melhora da resistência à corrosão
- Melhora da resistência ao calor
- Melhora das propriedades elétricas e magnéticas

Fatores de Influência nos Tratamentos Térmicos

- Temperatura
- Tempo
- Velocidade de resfriamento
- Atmosfera*

* *para evitar a oxidação ou perda de algum elemento químico (ex: descarbonetação dos aços)*

- Temperatura:

depende do tipo de material e da transformação de fase ou microestrutura desejada

■ Tempo:

O tempo de trat. térmico depende muito das dimensões da peça e da microestrutura desejada.

Quanto maior o tempo:

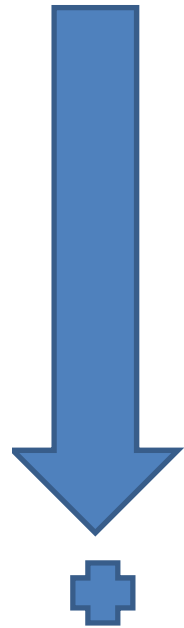
- maior a segurança da completa dissolução das fases para posterior transformação
- maior será o tamanho de grão

Tempos longos facilitam a oxidação

■ Velocidade de Resfriamento:

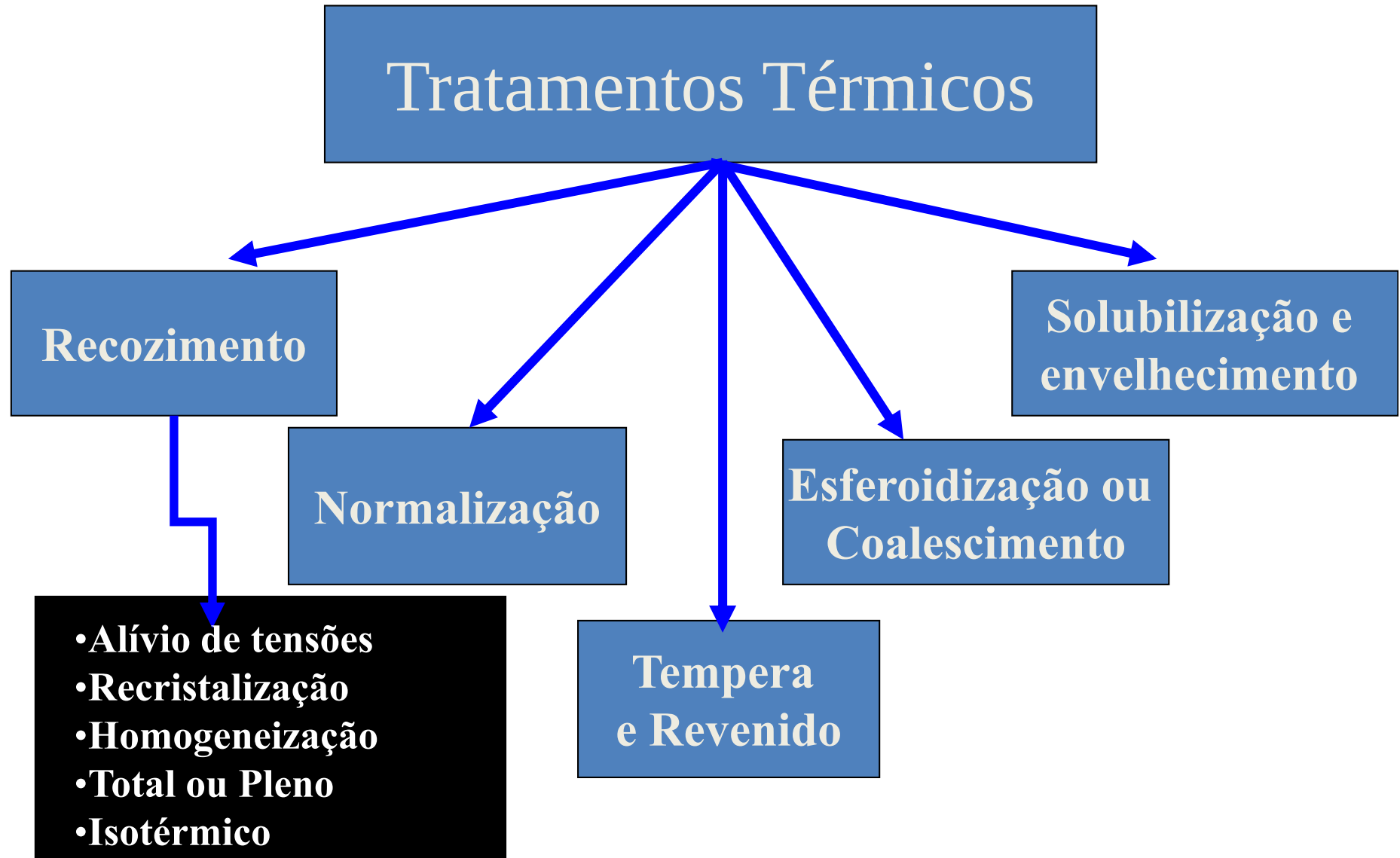
- Depende do tipo de material e da transformação de fase ou microestrutura desejada
- É o mais importante porque é ele que efetivamente determinará a microestrutura, além da composição química do material

Principais Meios de Resfriamento



- Ambiente do forno (+ brando)
- Ar
- Banho de sais ou metal fundido (+ comum é o de Pb)
- Óleo
- Água
- Soluções aquosas de NaOH, Na_2CO_3 ou NaCl (+ severos)

Principais Tratamentos Térmicos



1- RECOZIMENTO

■ Objetivos:

- Remoção de tensões internas devido aos tratamentos mecânicos
- Diminuir a dureza para melhorar a usinabilidade
- Alterar as propriedades mecânicas como a resistência e ductilidade
- Ajustar o tamanho de grão
- Melhorar as propriedades elétricas e magnéticas
- Produzir uma microestrutura definida

TIPOS DE RECOZIMENTO

- Recozimento para *alívio de tensões* (qualquer liga metálica) – não atinge a temp. recristalização.
- Recozimento para *recristalização* (qualquer liga metálica)
- Recozimento para *homogeneização* (para peças fundidas)
- Recozimento *total* ou pleno (ligas ferrosas e não ferrosas)
- Recozimento para *esferoidização* (aços de médio e alto teor de carbono)

1.1- RECOZIMENTO PARA ALÍVIO DE TENSÕES

■ Objetivo

Remoção de tensões internas originadas de processos (tratamentos mecânicos, soldagem, corte, ...)

■ Temperatura

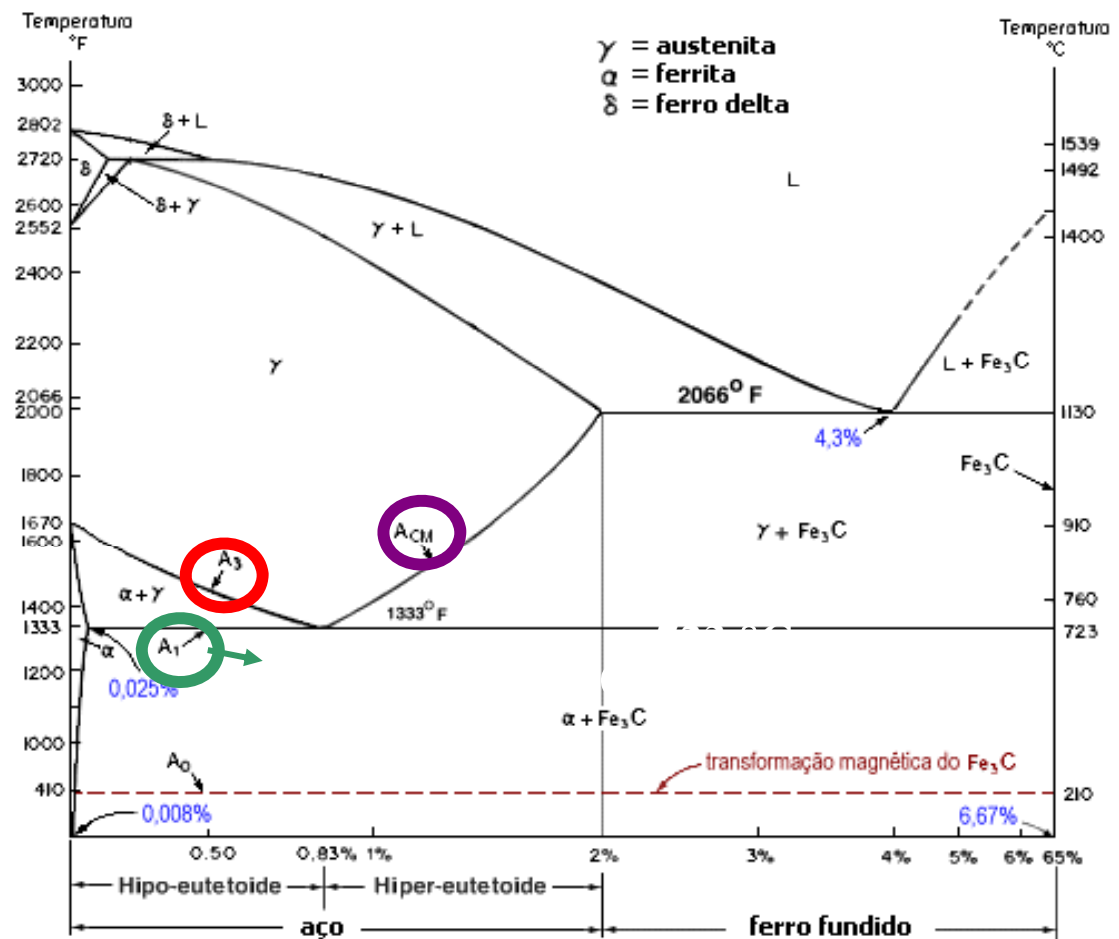
- Abaixo da zona crítica (500°C a 650°C)

■ Resfriamento

Deve-se evitar velocidades muito altas devido ao risco de distorções

Ex: RECOZIMENTO PARA ALÍVIO DE TENSÕES DOS AÇOS

■ Temperatura
Abaixo da linha A1 →
em que
ocorre nenhuma
transformação
(500°C a 650°C)



1.2- RECOZIMENTO PARA RECRISTALIZAÇÃO

■ Objetivo

- Elimina o encruamento gerado pela deformação à frio (amolecer e aumentar a ductilidade de um metal)
- Utilizado durante procedimentos de fabricação que exigem extensa deformação plástica

■ Temperatura

➔ Abaixo da zona crítica (550°C a 700°C)

■ Resfriamento

- Lento (ao ar ou ao forno)

1.3- RECOZIMENTO HOMOGENEIZAÇÃO

■ Objetivo

- Melhorar a homogeneidade da microestrutura de peças fundidas através da difusão dos elementos
- Utilizado em aços em lingotes que são difíceis de trabalhar a quente

■ Temperatura

- ➔ Não deve ocorrer nenhuma transformação de fase
- Temperaturas entre 1050°C e 1200°C (acima da linha crítica)

■ Resfriamento

- Lento (ao ar ou ao forno)

1.4- RECOZIMENTO TOTAL OU PLENO

■ Objetivo

- Amolecer o aço
- Regenerar sua microestrutura apagando tratamentos térmicos anteriores

■ Temperatura

- ➔ Hipoeutetóides e eutetóides : 50° C acima do limite superior da zona crítica
- ➔ Hipereutetóides: 50° C acima do limite inferior da zona crítica

■ Resfriamento

- Lento (ao ar ou ao forno)

1.4- RECOZIMENTO TOTAL OU PLENO

■ Constituintes Estruturais resultantes

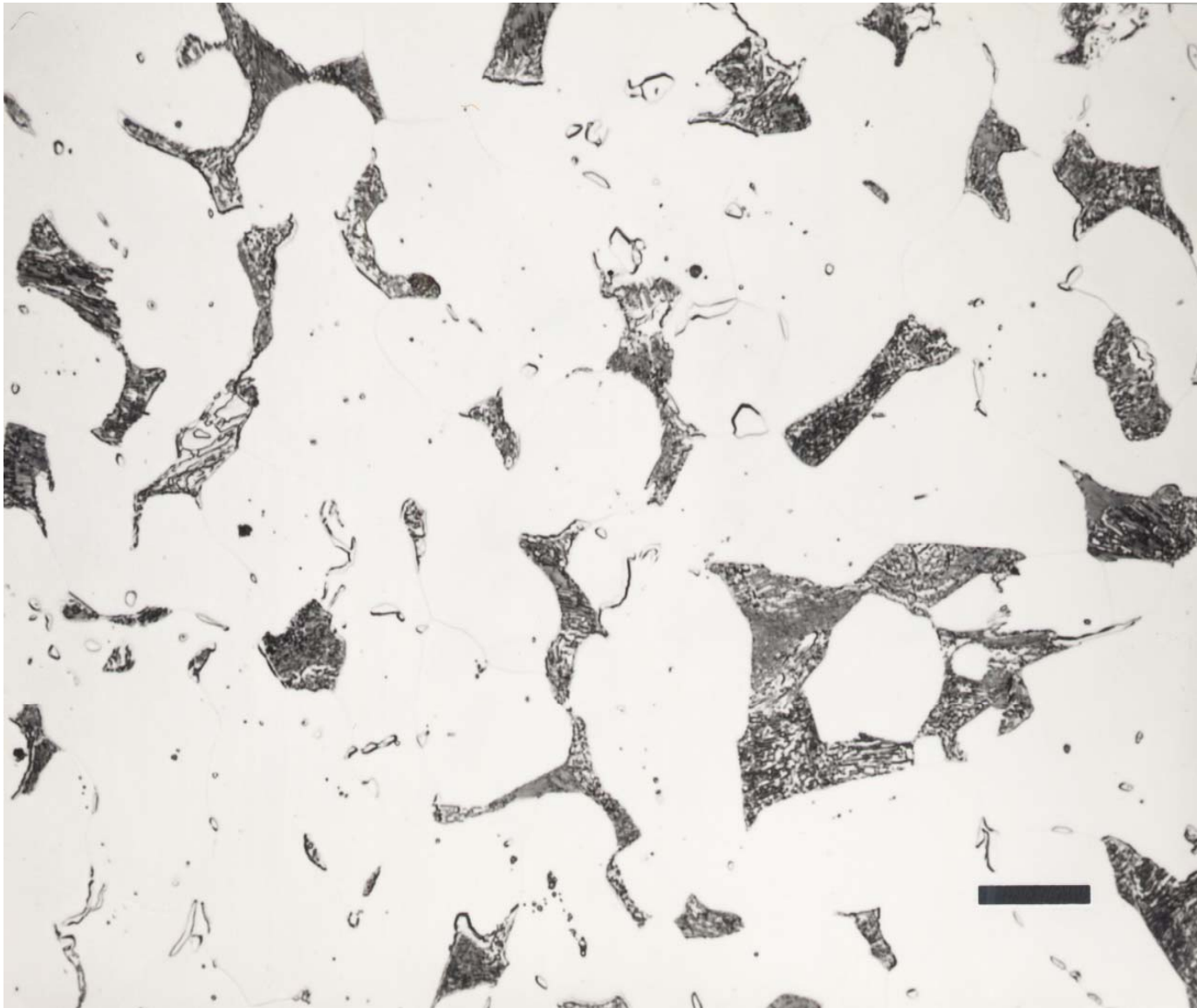
Hipoeutetóide → ferrita + perlita grosseira

Eutetóide → perlita grosseira

Hipereutetóide → cementita + perlita grosseira

* *A perlita grosseira é ideal para melhorar a usinabilidade dos aços baixo e médio carbono*

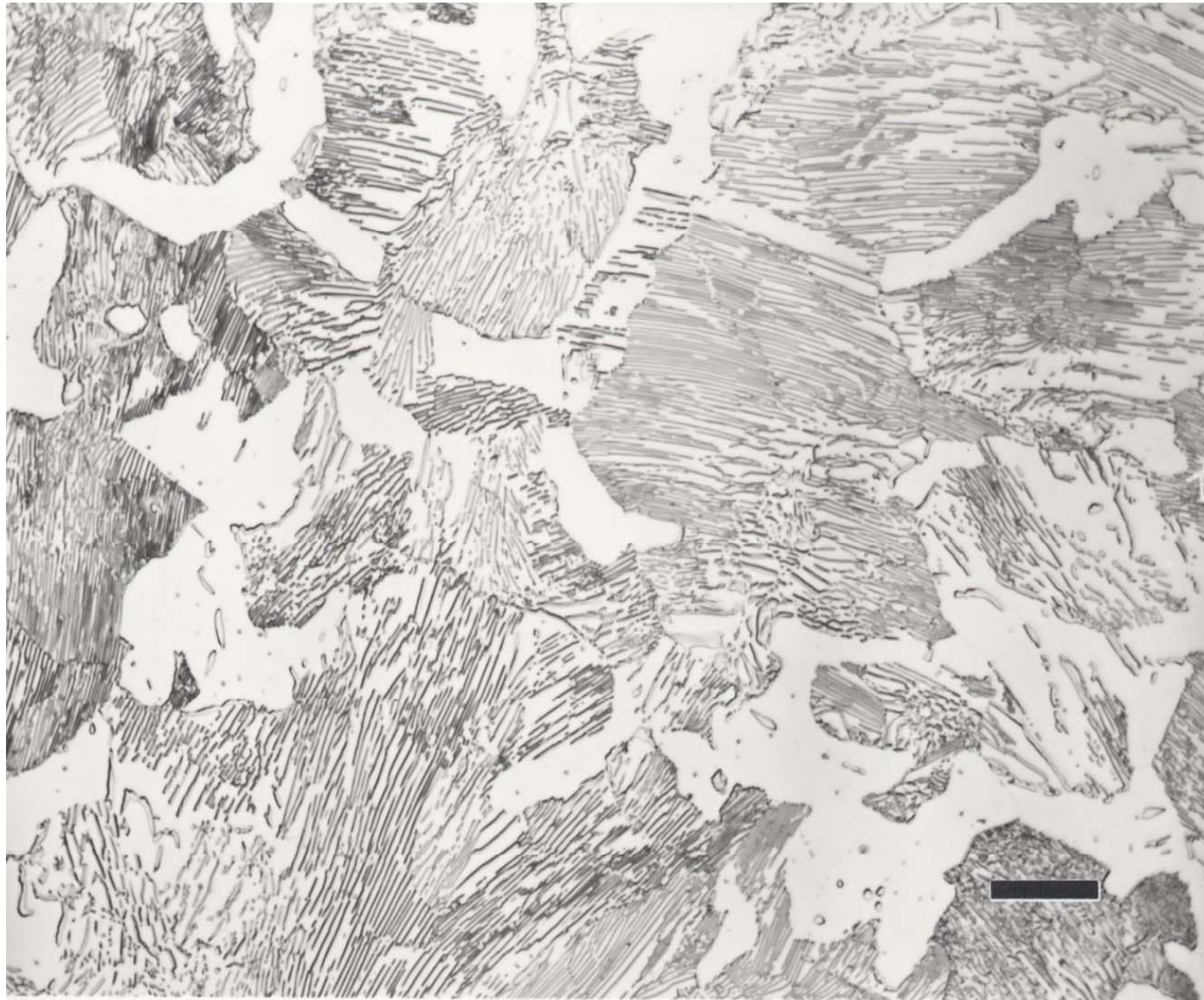
* *Para melhorar a usinabilidade dos aços alto carbono recomenda-se a esferoidização*



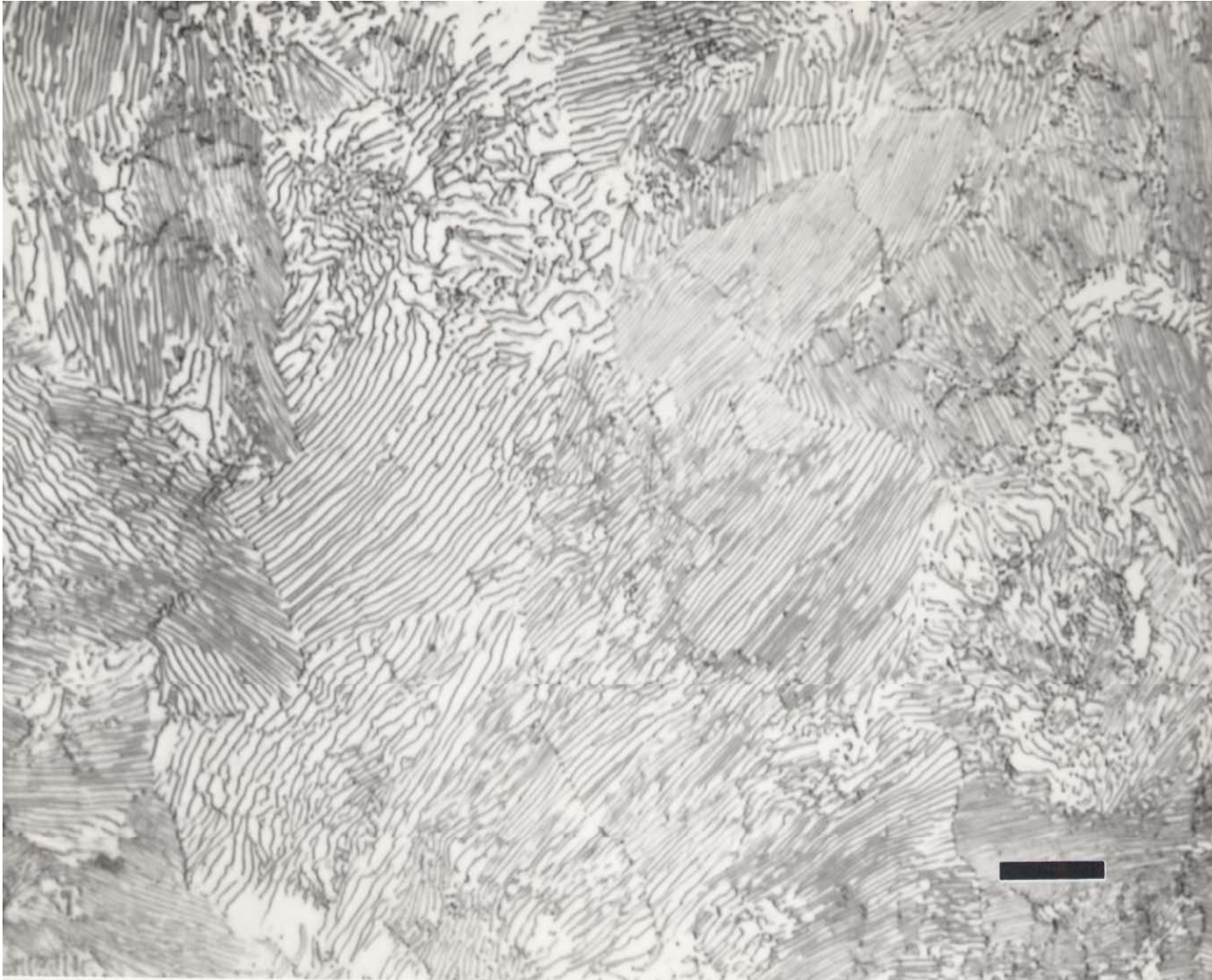
Ferrite (white) and pearlite in a hot-rolled Fe – 0.2% C binary alloy. Picral etch. Magnification bar is 20 μm in length.



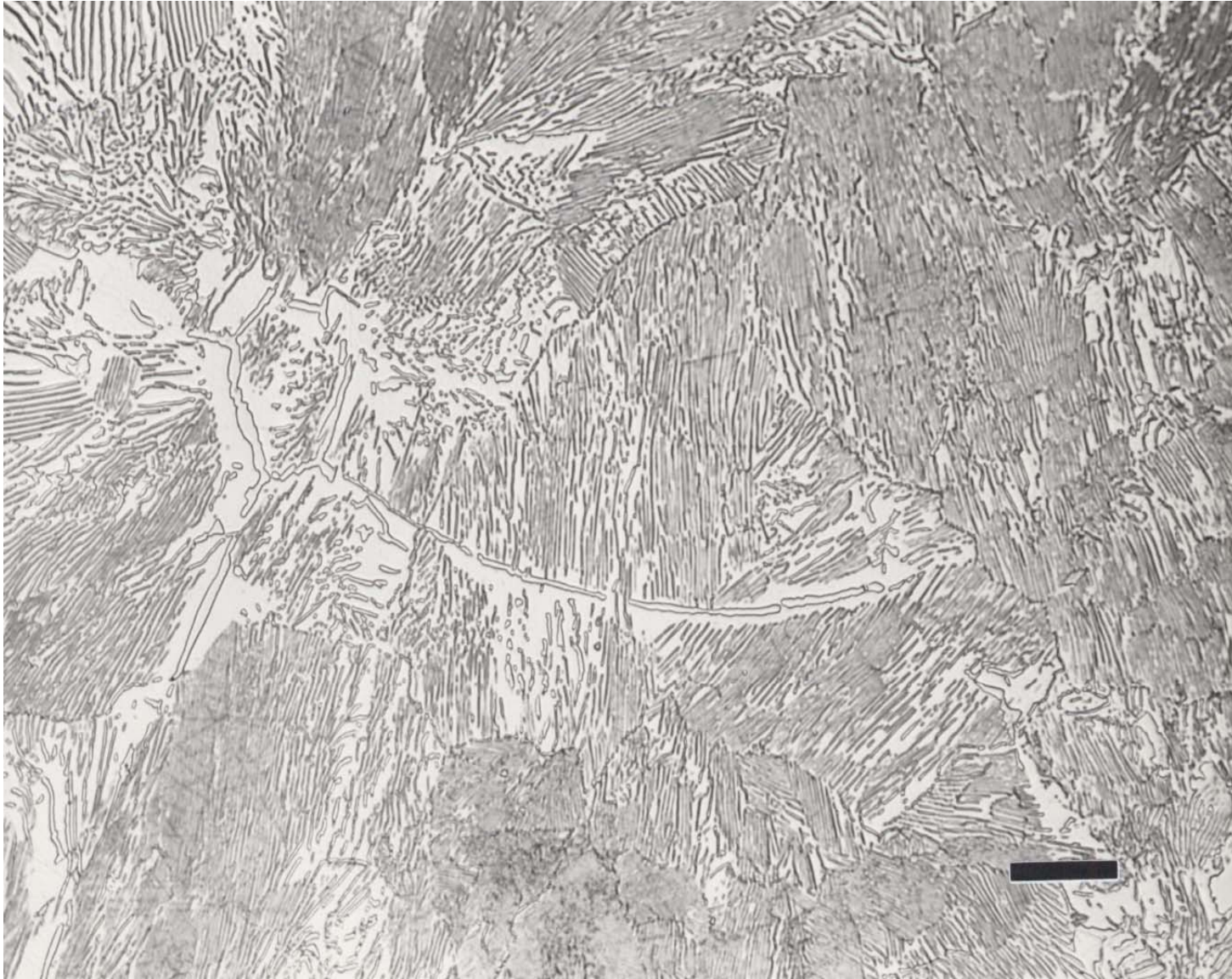
Ferrite (white) and pearlite in a hot-rolled Fe – 0.4% C binary alloy. Picral etch. Magnification bar is 20 μm in length.



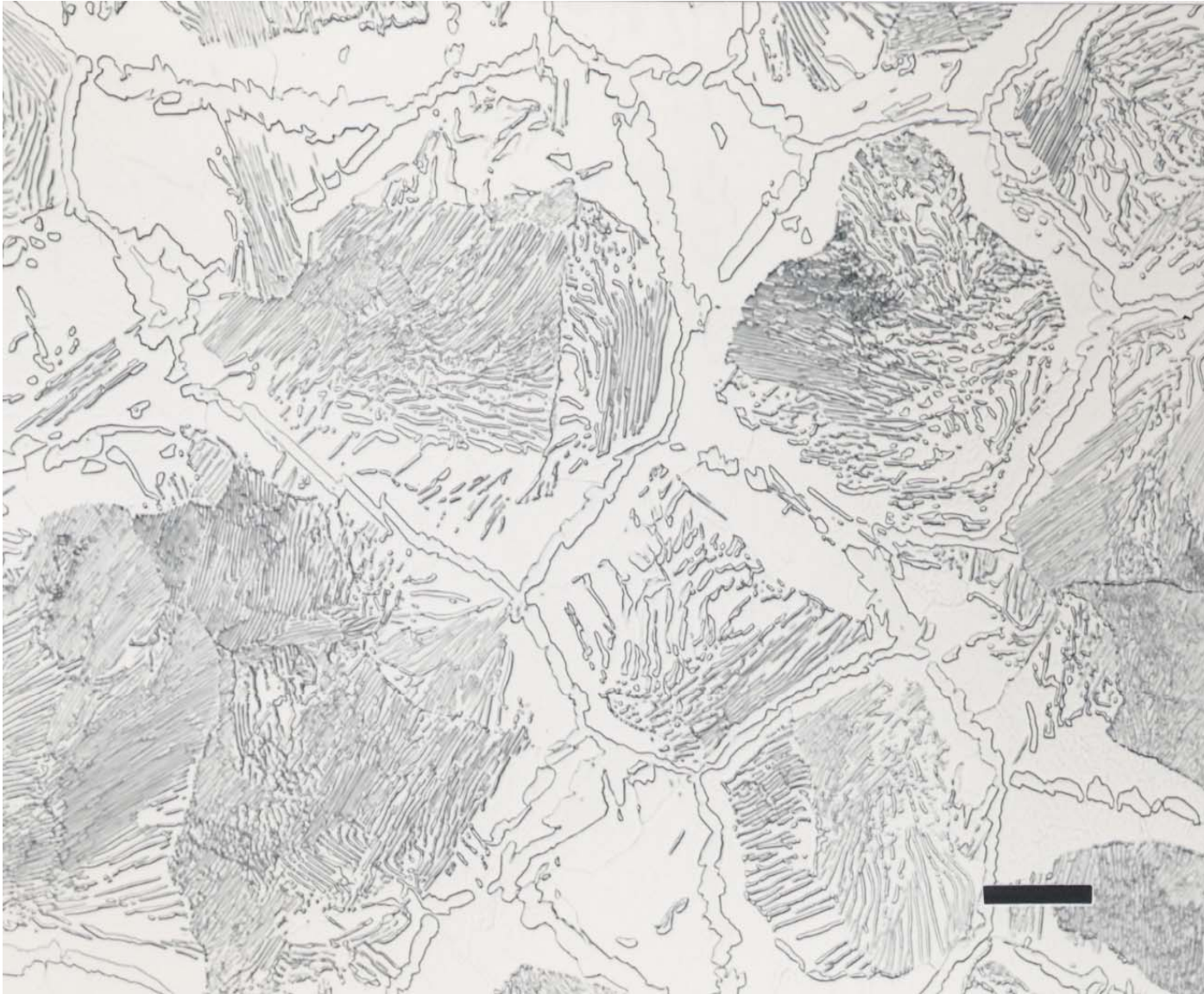
Ferrite (white) and pearlite in a hot-rolled Fe – 0.6% C binary alloy. Picral etch. Magnification bar is 20 μm in length.



Coarse lamellar pearlite in a hot-rolled Fe – 0.8% C binary alloy. Picral etch. Magnification bar is 20 μm in length.



Intergranular proeutectoid cementite and pearlite in a hot-rolled Fe – 1.0% C binary alloy. Picral etch. Magnification bar is 20 μm in length.



Coarse intergranular proeutectoid cementite (white, outlined) and pearlite in a hot-rolled Fe – 1.2% C binary alloy. Picral etch. Magnification bar is 20 μm in length.



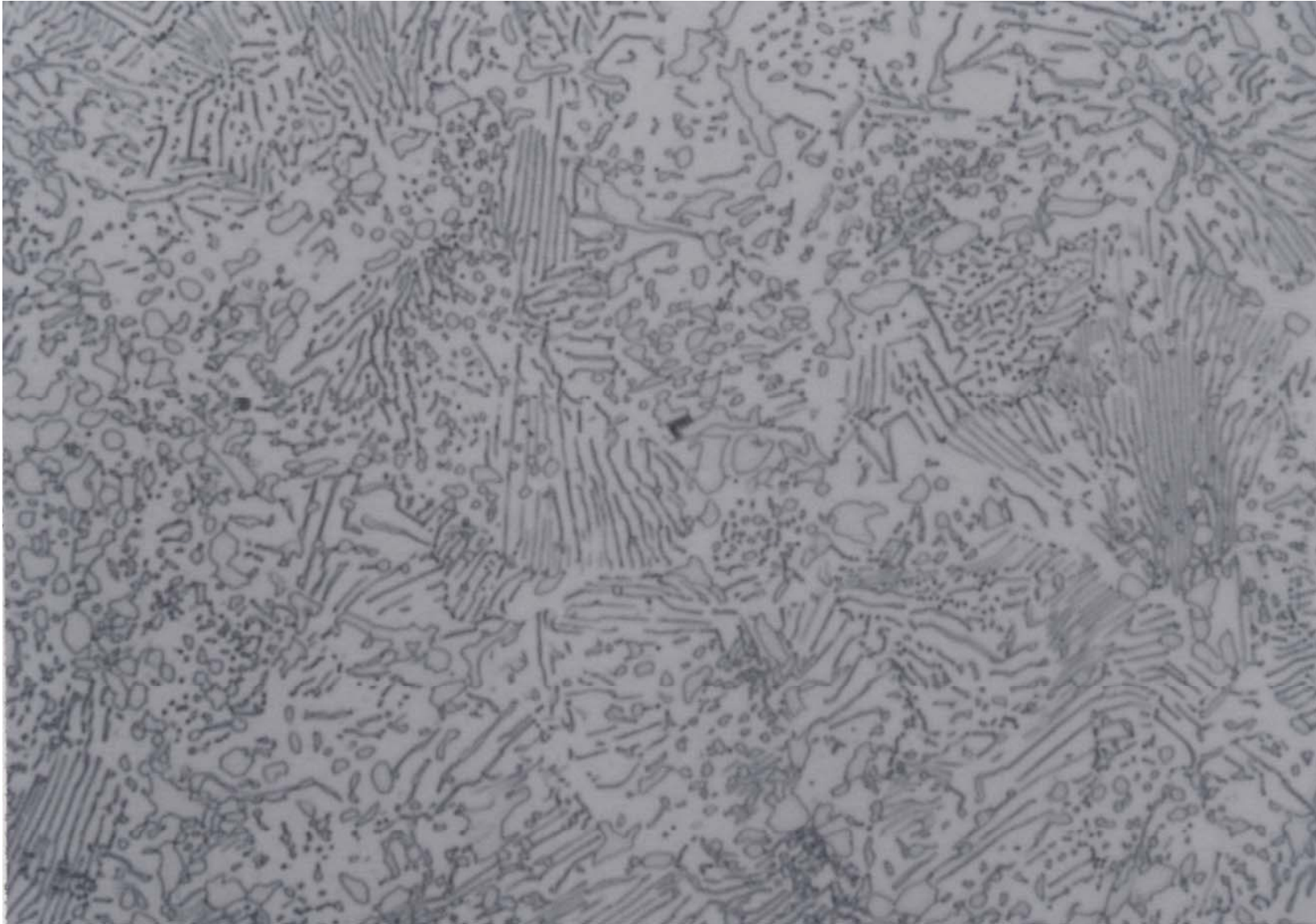
Microstructure of the as-rolled Fe – 1.31% C – 0.35% Mn – 0.25% Si specimen with the intergranular carbide network clearly visible after etching with alkaline sodium picrate, 90 °C – 60 s. Original at 500X magnification. Note also some intragranular Widmanstätten cementite.

1.5- ESFEROIDIZAÇÃO OU COALESCIMENTO

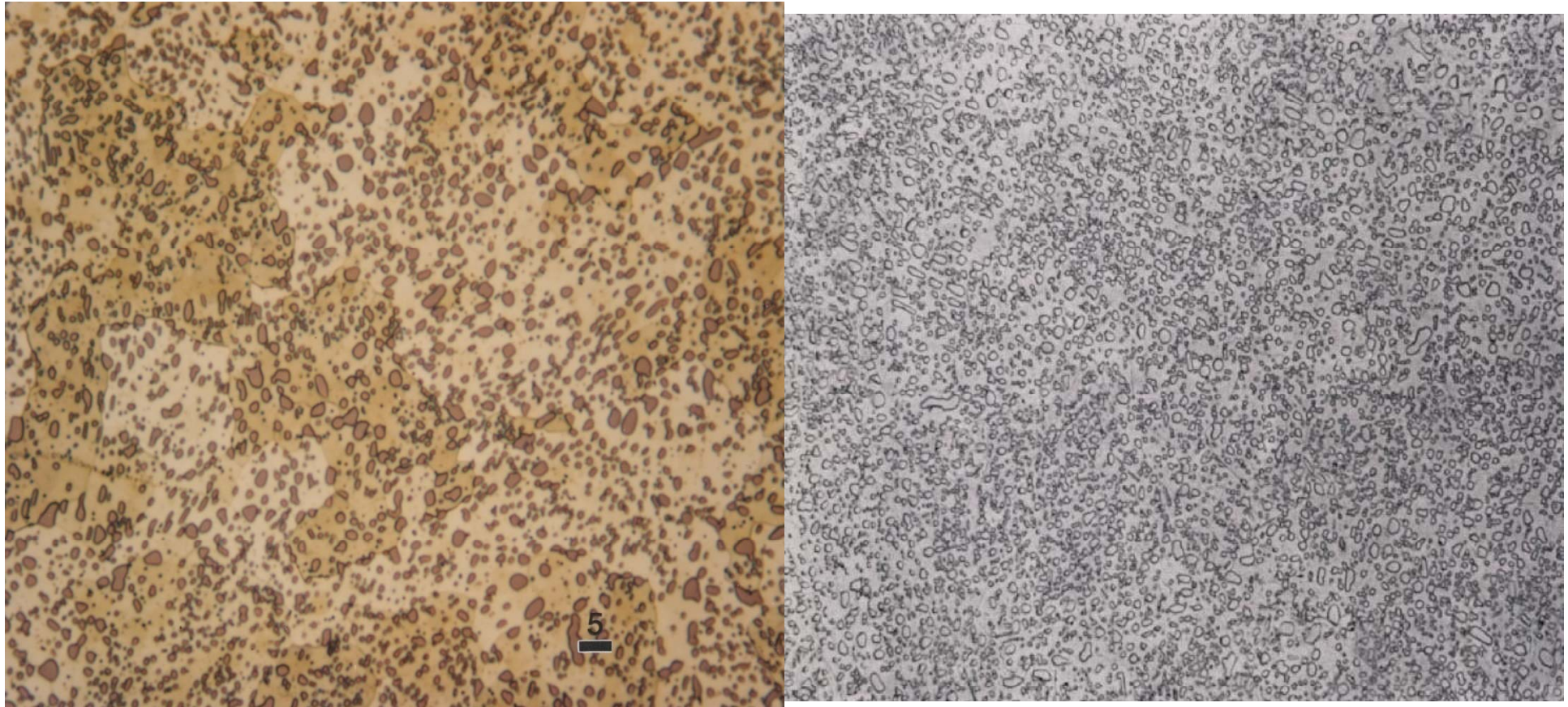
Objetivo

Produção de uma estrutura globular ou esferoidal de carbonetos no aço

- ➔ melhora a usinabilidade, especialmente dos aços alto carbono
- ➔ facilita a deformação a frio



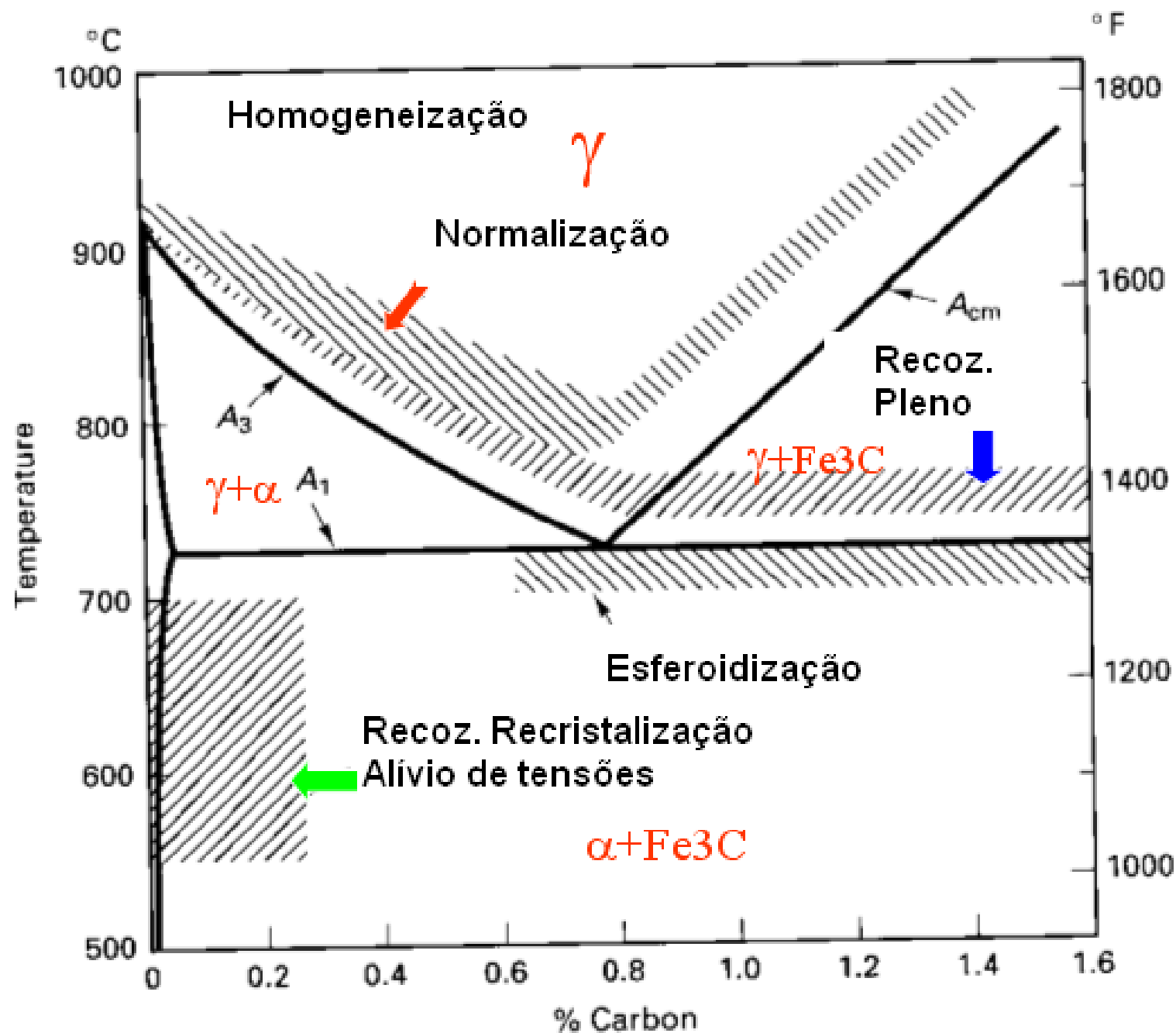
Annealed Fe – 1.15% C steel with a coarse lamellar pearlite microstructure and some large globular cementite particles. Heat treatment was: 800 °C (1472 °F) – 1 h, furnace cool. Etched with 4% picral. Original at 1000X. Black spots are inclusions.

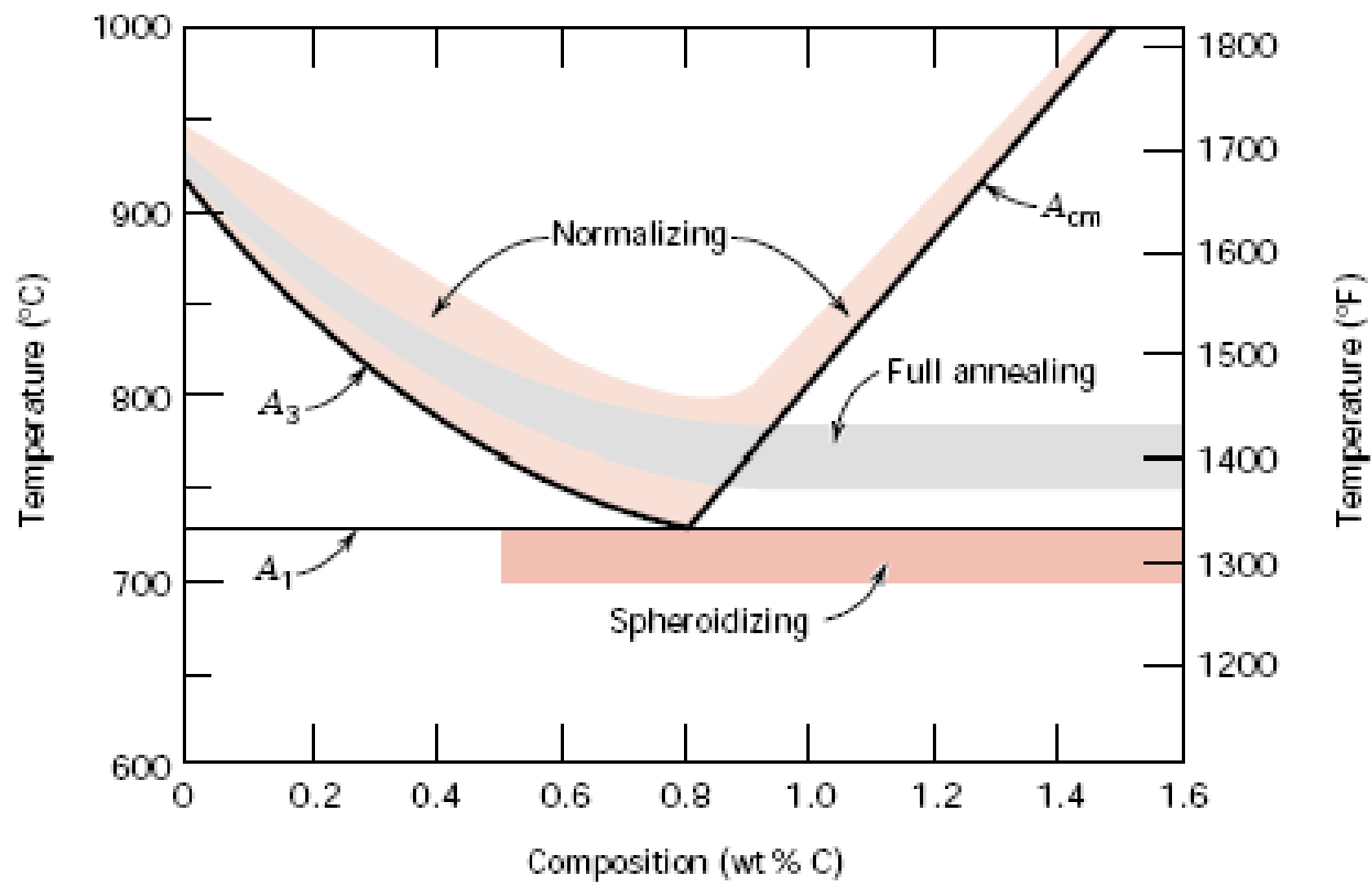


Spheroidize annealed microstructure of type W1 carbon tool steel (Fe - 1.05% C – 0.25% Mn – 0.2% Si) etched with Beraha's sodium molybdate reagent which colored both the cementite particles (brownish red) and the ferrite matrix. Original at 1000X.

MANEIRAS DE PRODUZIR ESFEROIDIZAÇÃO OU COALESCIMENTO

- ➔ Aquecimento por tempo prolongado a uma temperatura logo abaixo da linha inferior da zona crítica,
- ➔ Aquecimento e resfriamentos alternados entre temperaturas que estão logo acima e logo abaixo da linha inferior de transformação.





3- NORMALIZAÇÃO

- Temperatura

Hipoeutetóide e eutetóide → 30° C acima do recozimento pleno

Hipereutetóide → 50° C acima do limite superior da zona crítica

** Não há formação de um invólucro de carbonetos frágeis devido a velocidade de resfriamento ser maior*

- Resfriamento

Ao ar (calmo ou forçado)

3- NORMALIZAÇÃO

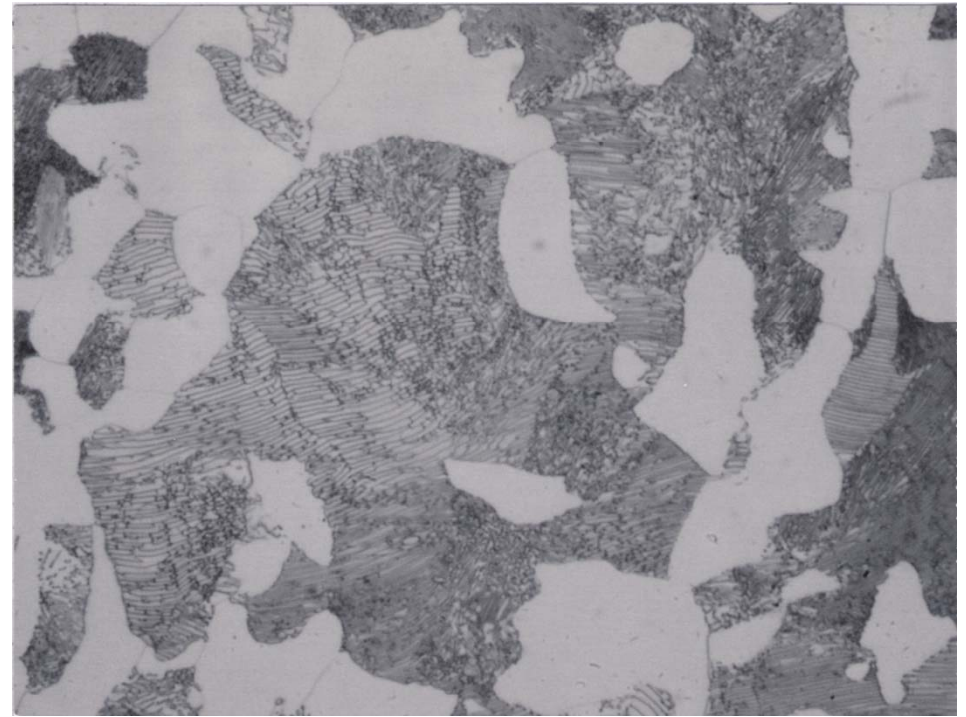
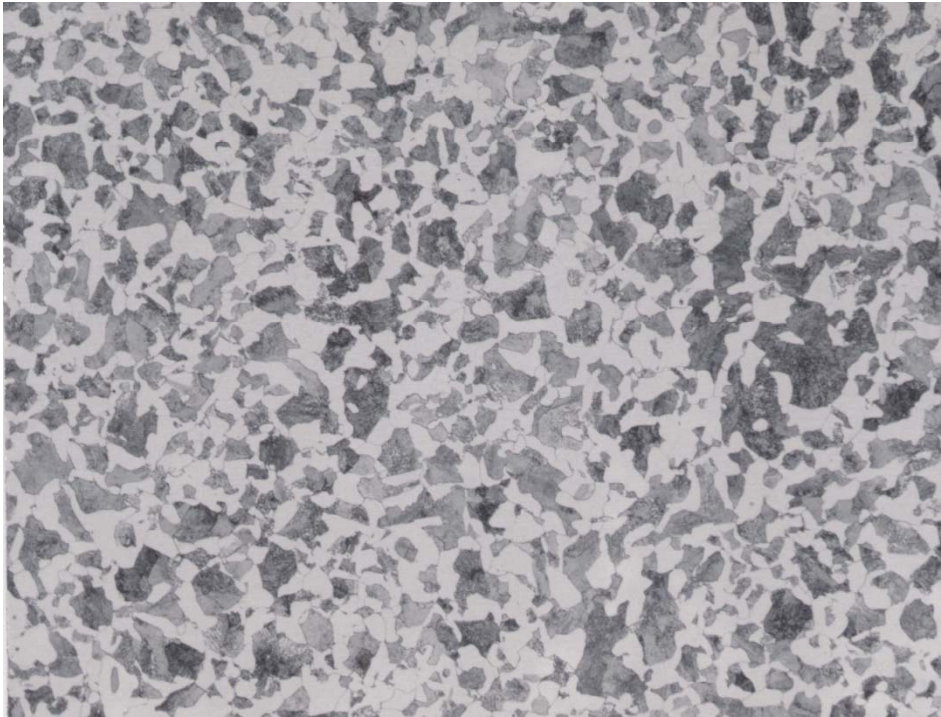
- Constituintes Estruturais resultantes

Hipoeutetóide → ferrita + perlita fina

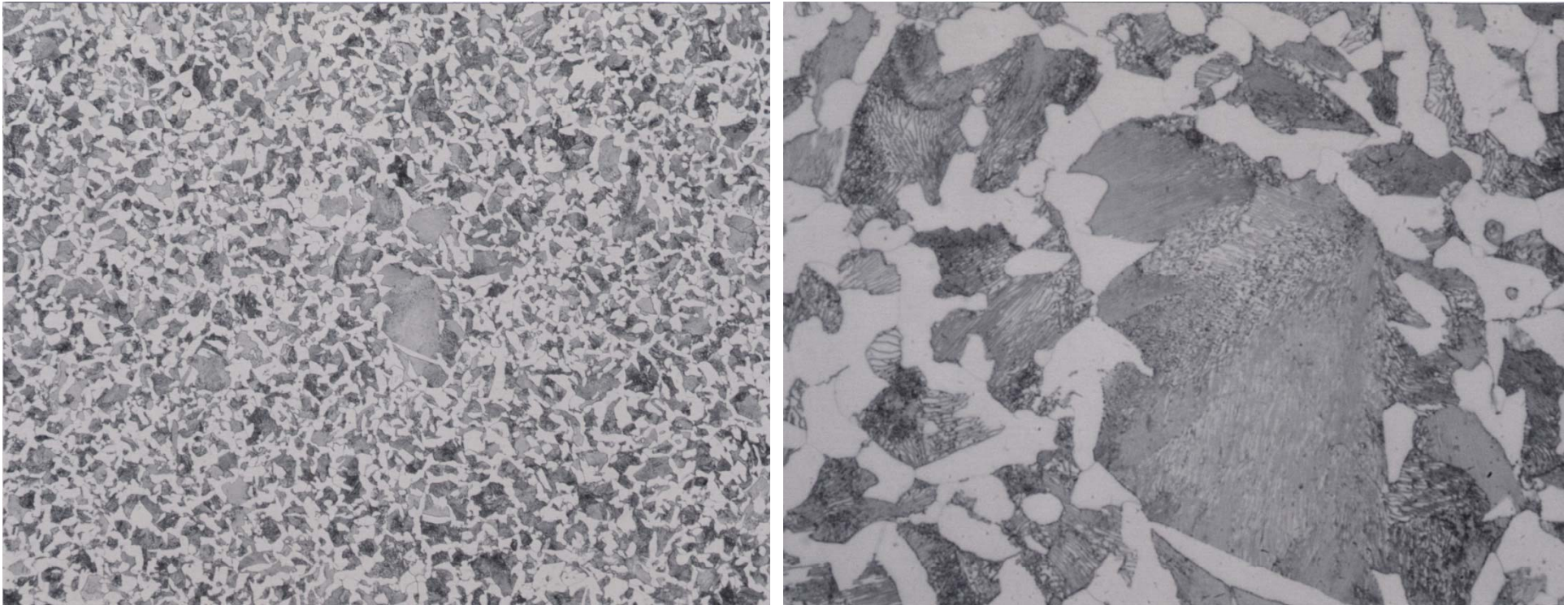
Eutetóide → perlita fina

Hipereutetóide → cementita + perlita fina

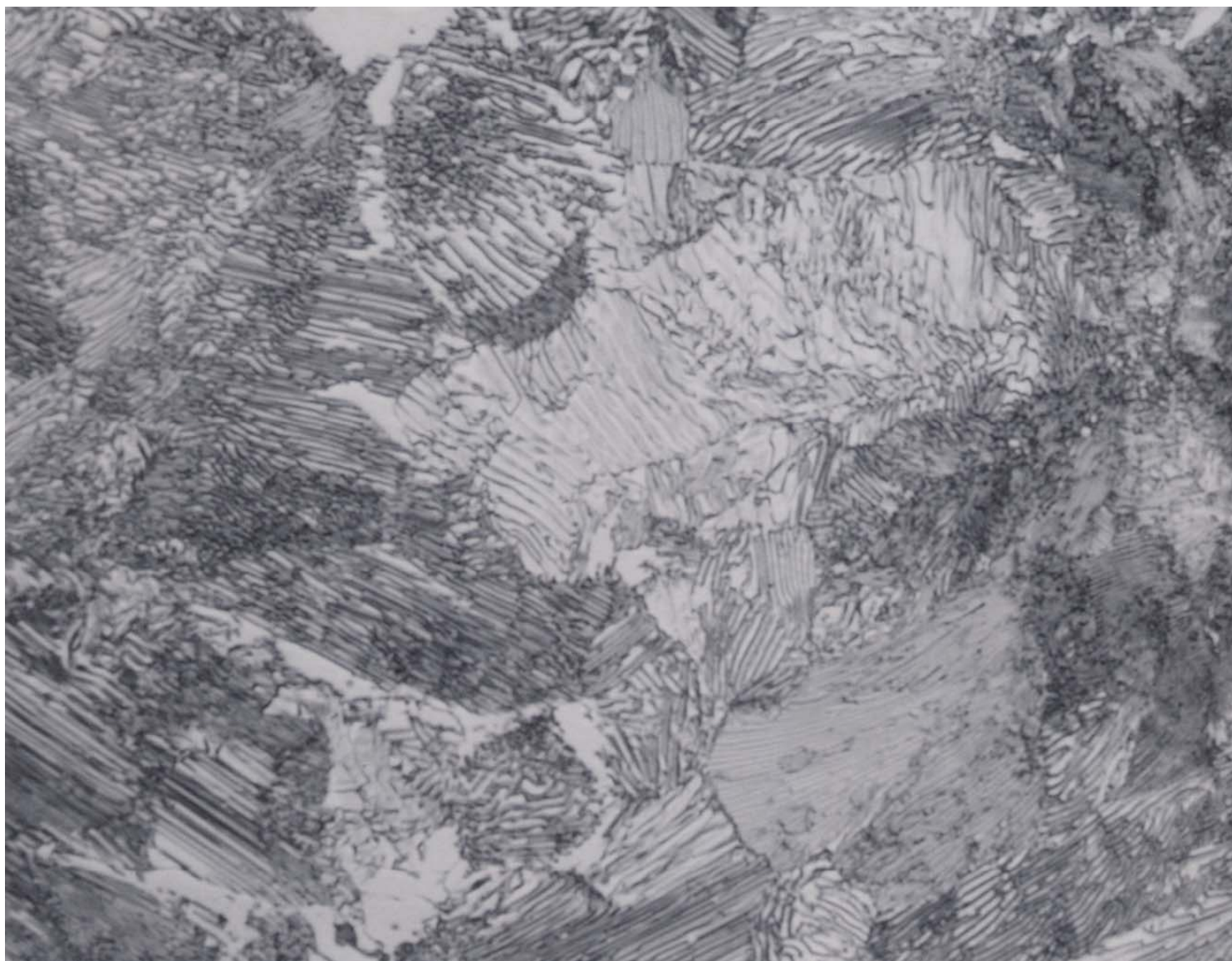
- Em relação ao recozimento a microestrutura é mais fina devido a velocidade de resfriamento ser mais lenta (comparado ao recozimento) e conseqüentemente prop. mecânicas ligeiramente superiores
- Apresenta menor quantidade e melhor distribuição de carbonetos



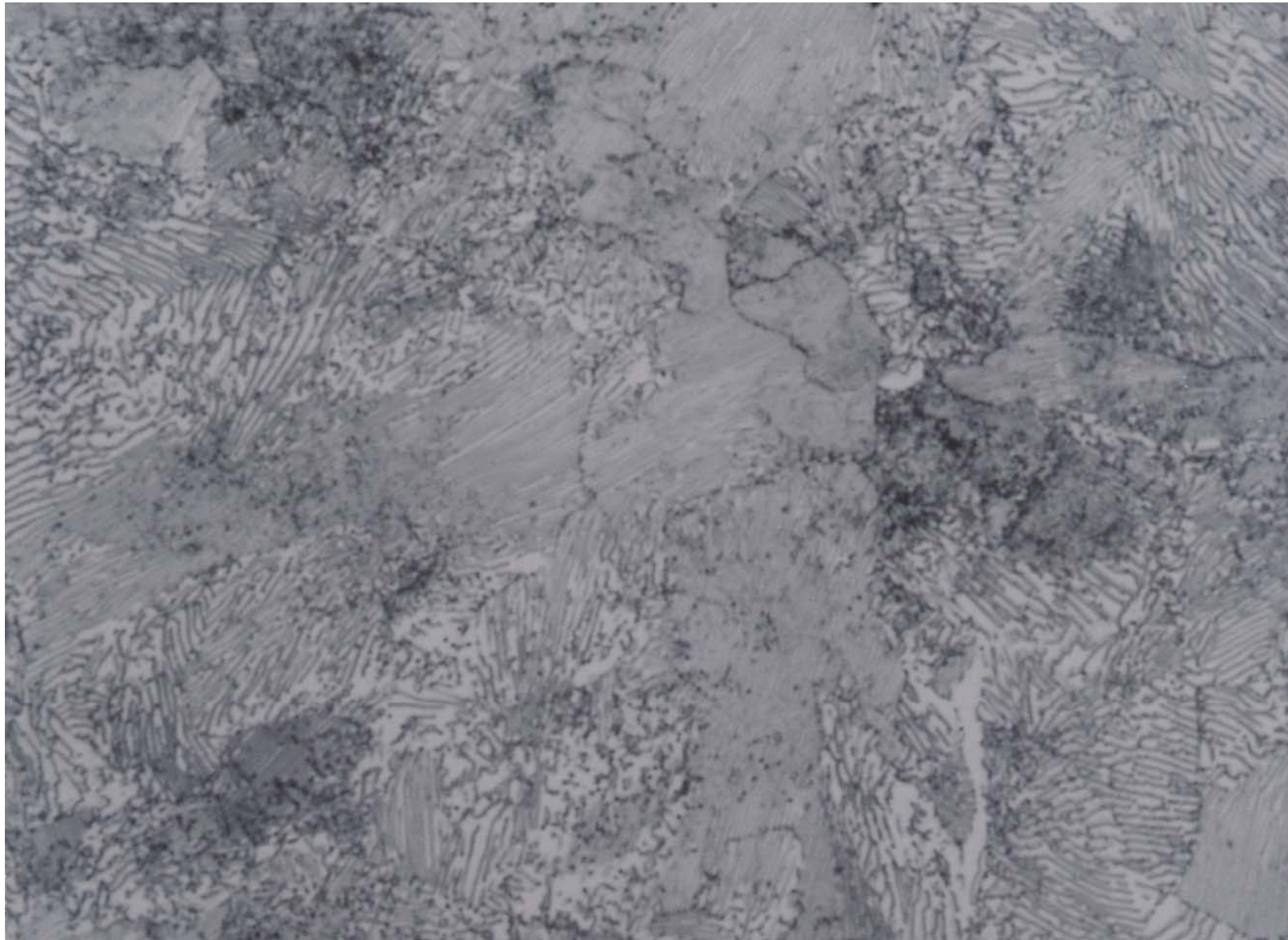
As-Rolled 1040 Carbon steel (Fe – 0.4% C – 0.75% Mn) etched sequentially with 4% picral and 2% nital revealing a fine structure of approximately half ferrite and half pearlite. Originals at 200X (left) and 500X (right). The fine grain size is due to proper control of the finishing temperature (temperature of bars at the last mill stand).



Normalized (871 °C, 1600 °F for 1 hour, air cool) 1040 carbon steel (Fe – 0.4% C – 0.75% Mn) etched sequentially with 4% picral and 2% nital revealing a fine structure of approximately half ferrite and half pearlite. Originals at 200X (left) and 500X (right). The structure is slightly finer than the as-rolled structure.



Microstructure of hot-rolled eutectoid Fe – 0.80% C – 0.21% Mn – 0.22% Si revealing a pearlitic structure where some of the lamellae are resolvable at the original magnification of 1000X. Etched with 2% nital.



Fine pearlitic structure in normalized (780 °C, 1436 °F – 1 h, air cool) 1080 steel (Fe – 0.8% C – 0.75% Mn) etched with 4% picral. Some of the lamellae are resolvable. Original at 1000X.

