

Universidade de São Paulo

Escola de Engenharia de Lorena

Departamento de Engenharia de Materiais

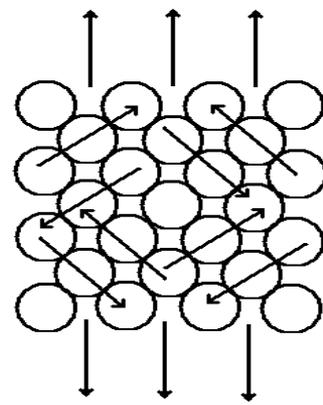
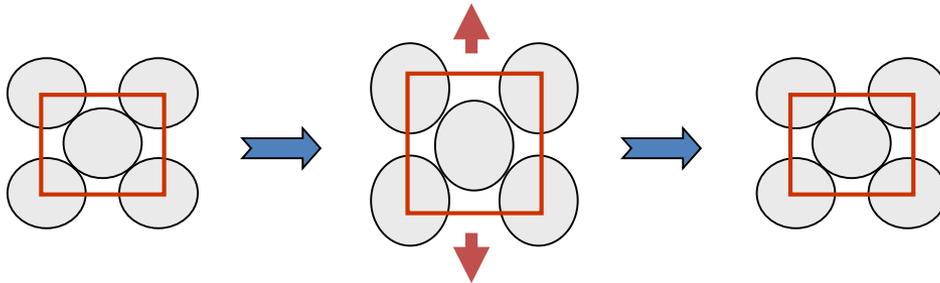
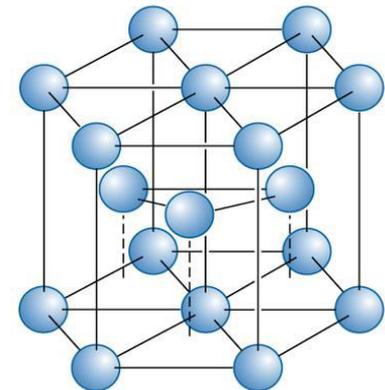


Diagrama de equilíbrio Fe-C



Introdução à Ciência dos Materiais

Prof. Dr. Cassius O.F.T. Ruchert, Professor Associado



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

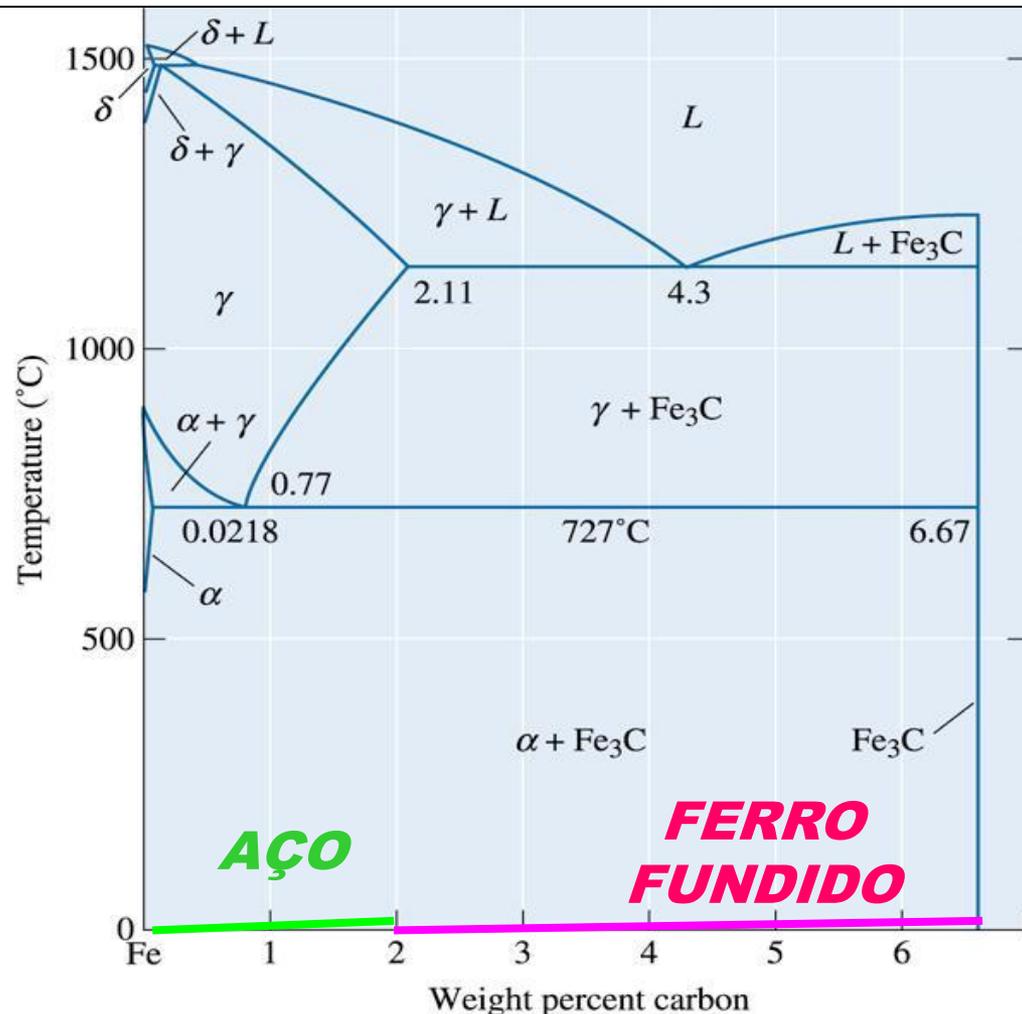


TABLE 11-1 ■ The effect of carbon on the strength of steels**Slow Cooling (Coarse Pearlite)****Fast Cooling (Fine Pearlite)**

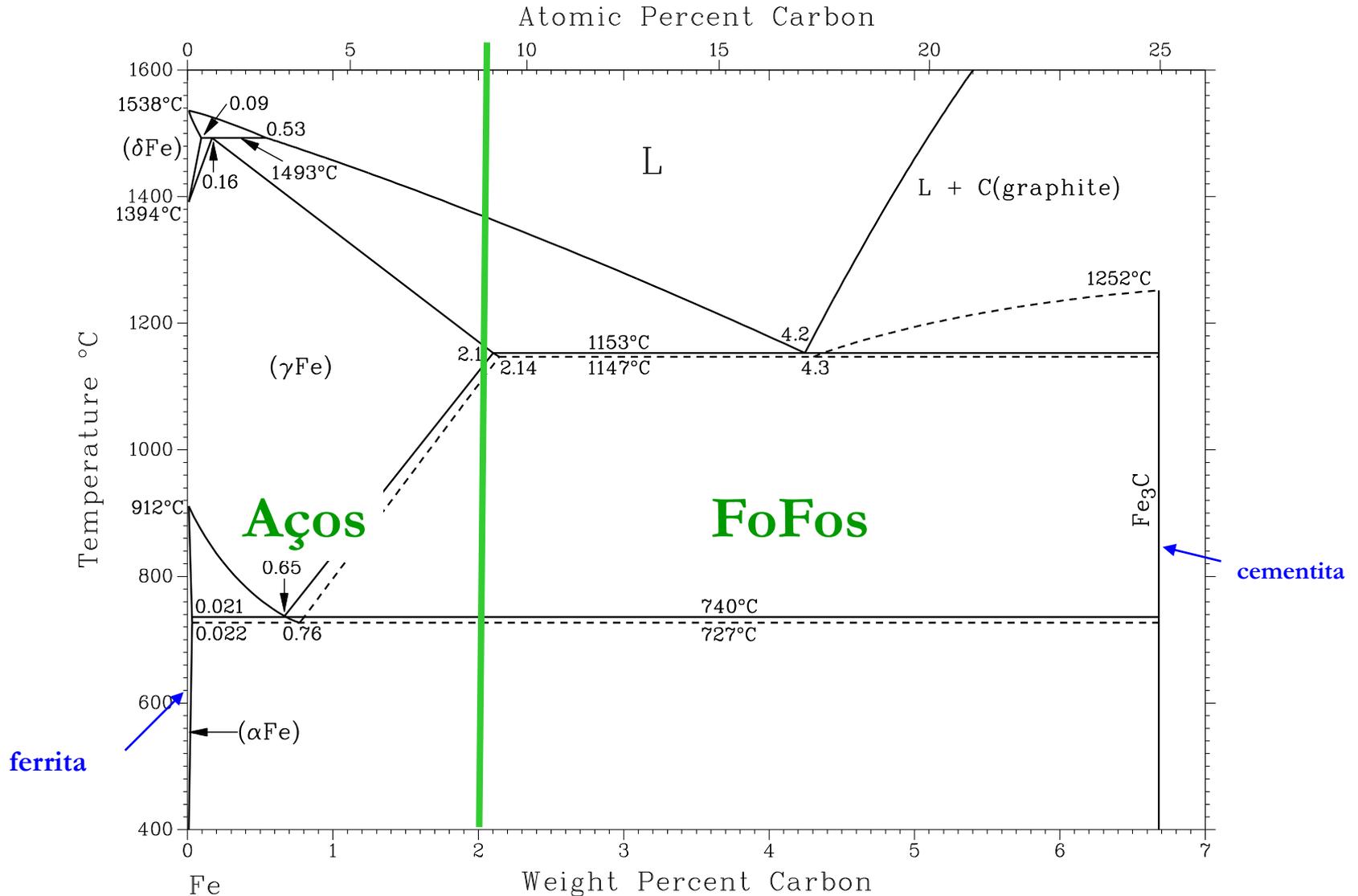
Carbon %	Yield Strength (psi)	Tensile Strength (psi)	% Elongation	Yield Strength (psi)	Tensile Strength (psi)	% Elongation
0.20	42,750	57,200	36.5	50,250	64,000	36.0
0.40	51,250	75,250	30.0	54,250	85,500	28.0
0.60	54,000	90,750	23.0	61,000	112,500	18.0
0.80	54,500	89,250	25.0	76,000	146,500	11.0
0.95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

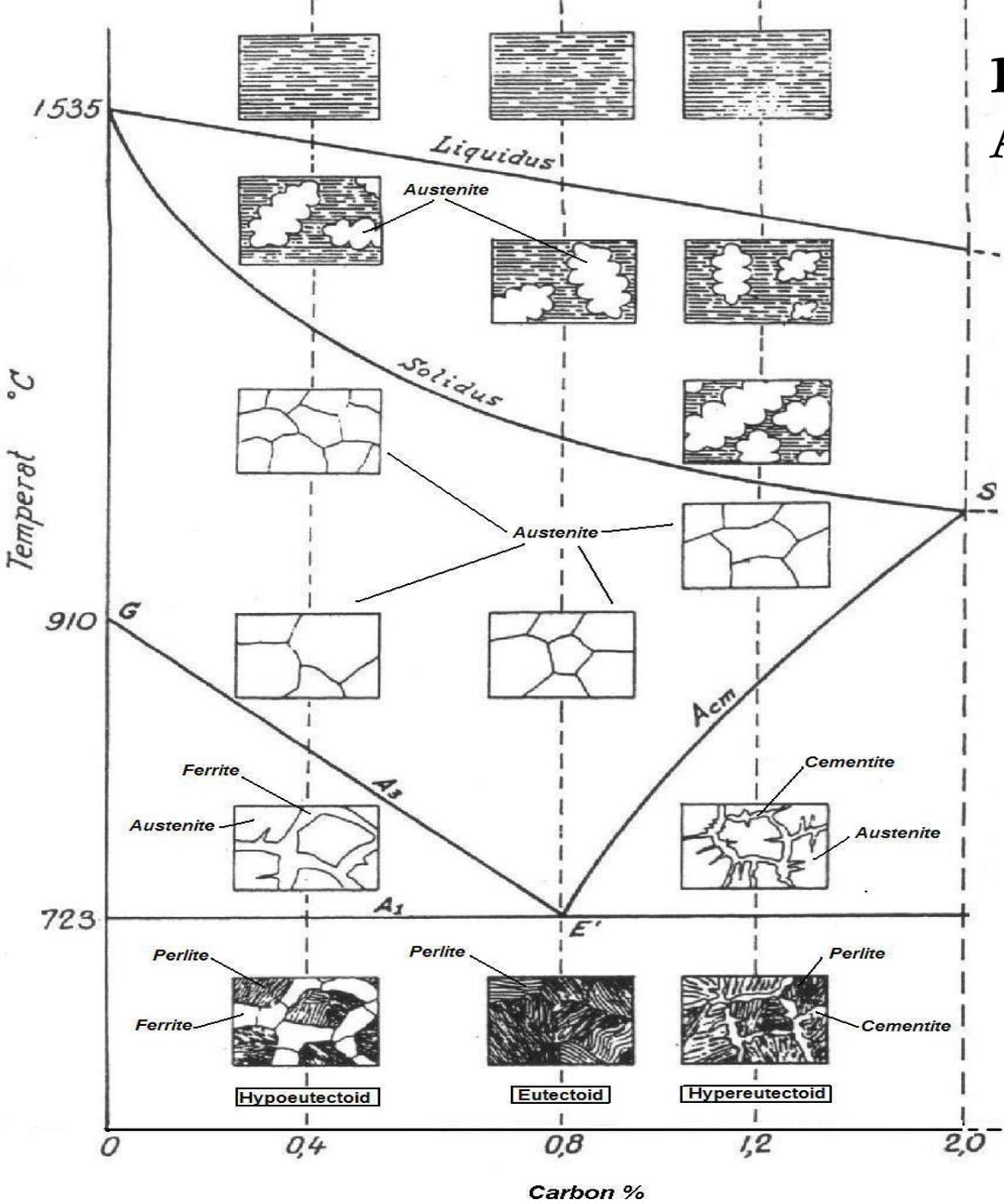
Diagrama Fe-C



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

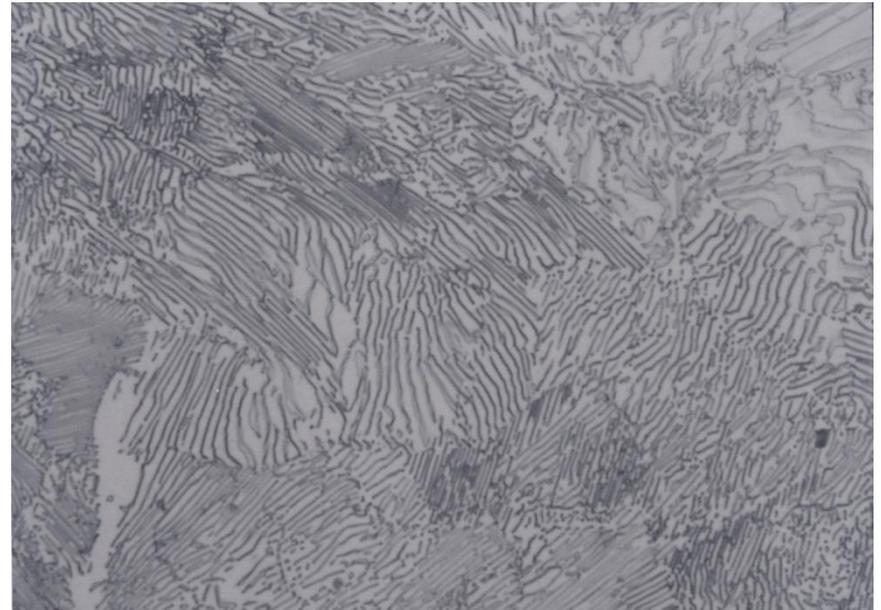
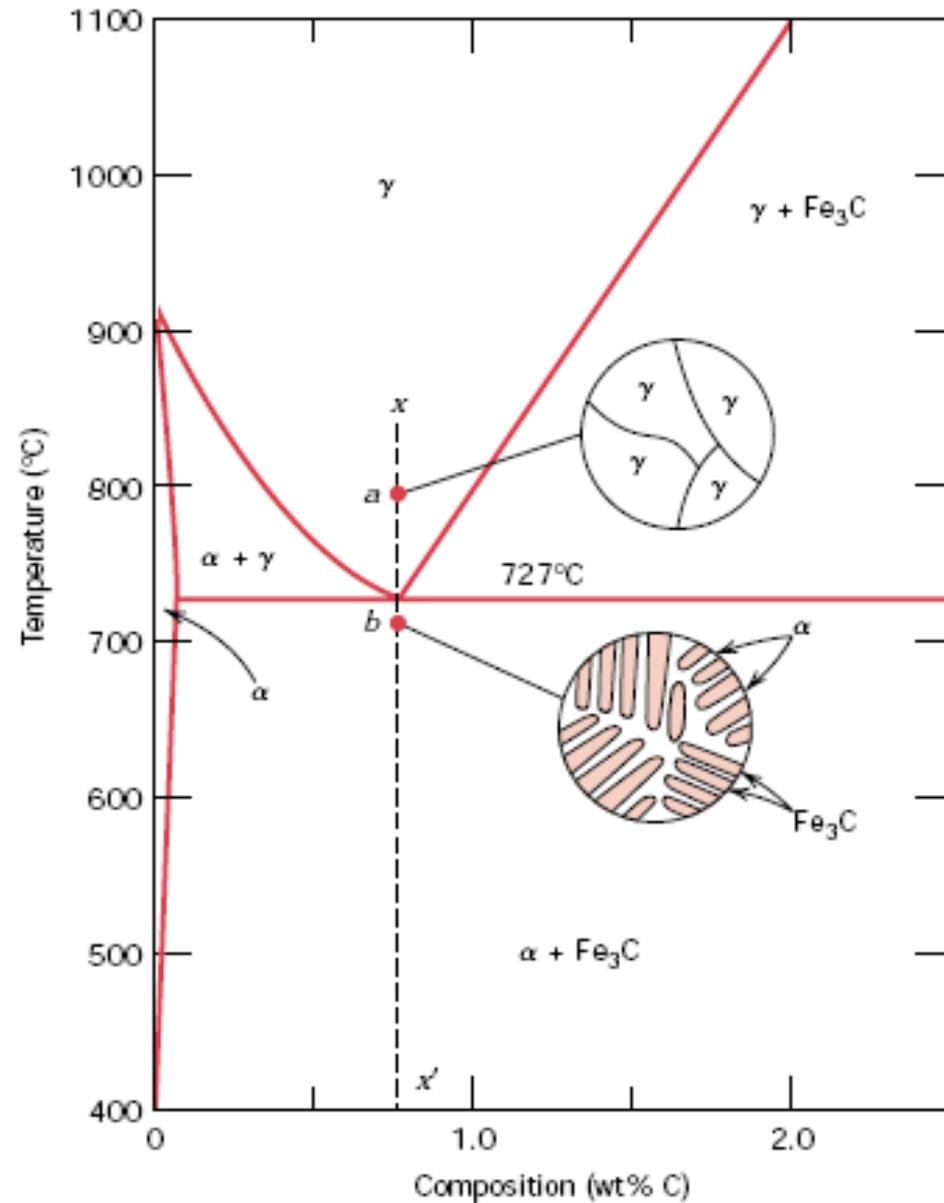
- Essa microestrutura formada nos aços eutetóides abaixo da temperatura do eutetóide composta por camadas alternadas de lamelas de ferrita e cementita é conhecida por perlita, pois quando vista ao microscópio possui uma aparência que lembra madrepérola

Aço eutetóide

~ 0,76% C

Microestrutura: perlita

P/ resfriamento lento

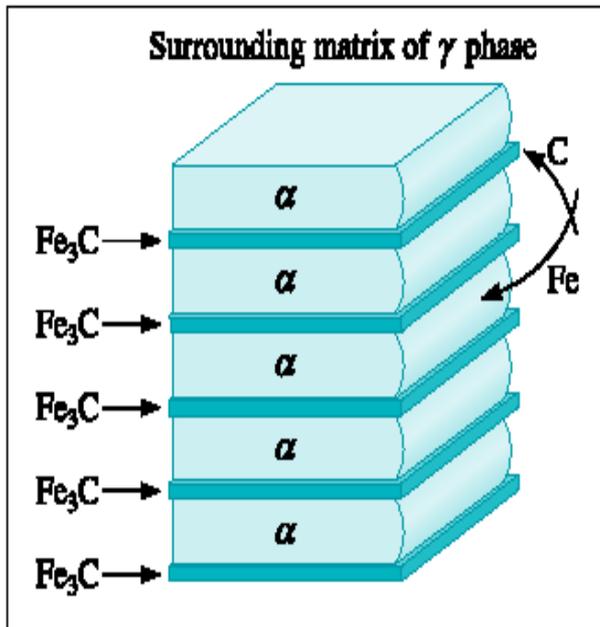


Representação esquemática das microestruturas da liga Fe-FeC para composição eutetoide (0,76 wt% C) acima e abaixo da temperatura eutetóide

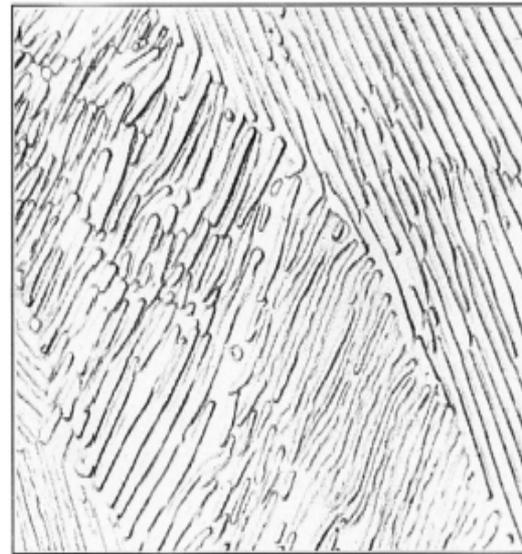
Perlita

- NÃO É FASE
- É um MICROCONSTITUINTE

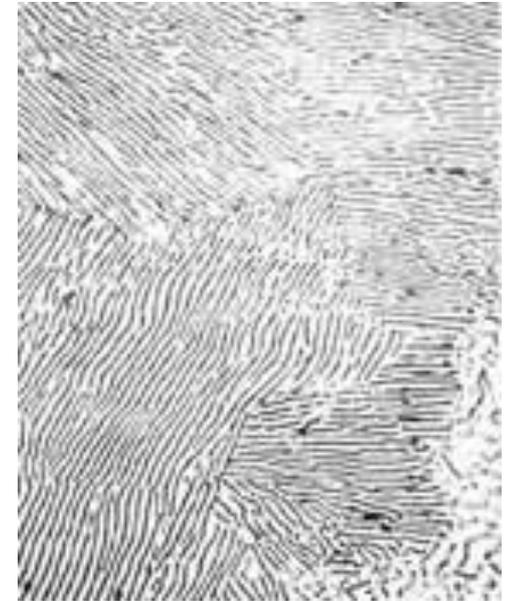
Lamelas de Ferrita e Cementita



(a)



(b)

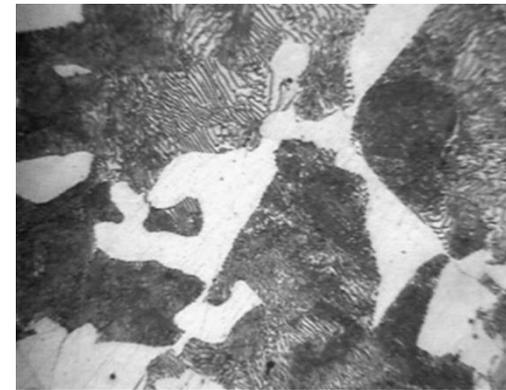
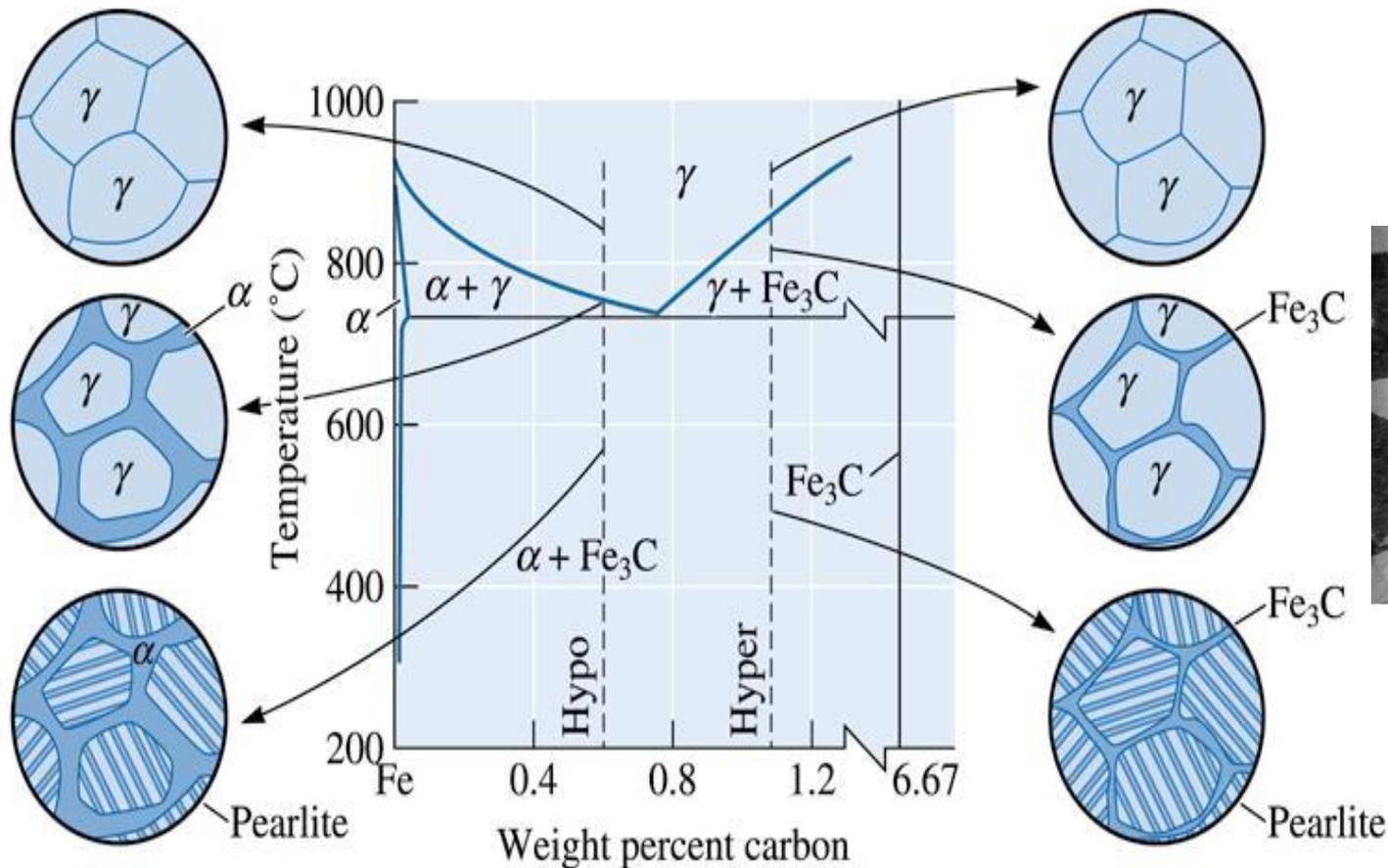


Crescimento da estrutura de perlita: (a) redistribuição de C e Fe e (b) Fotomicrografia da perlita lamelar

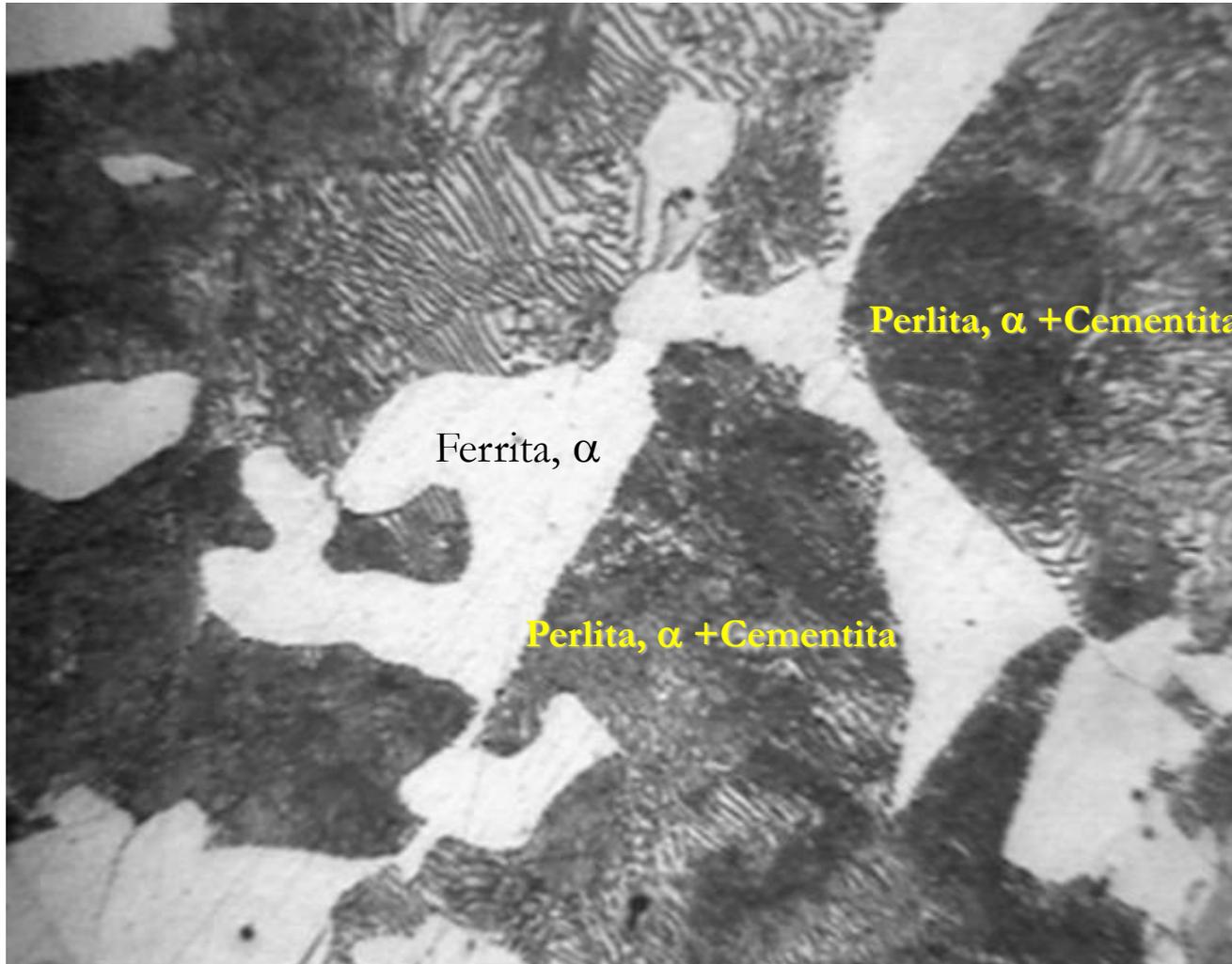
Aços hipoeutetóides : < 0,76% C

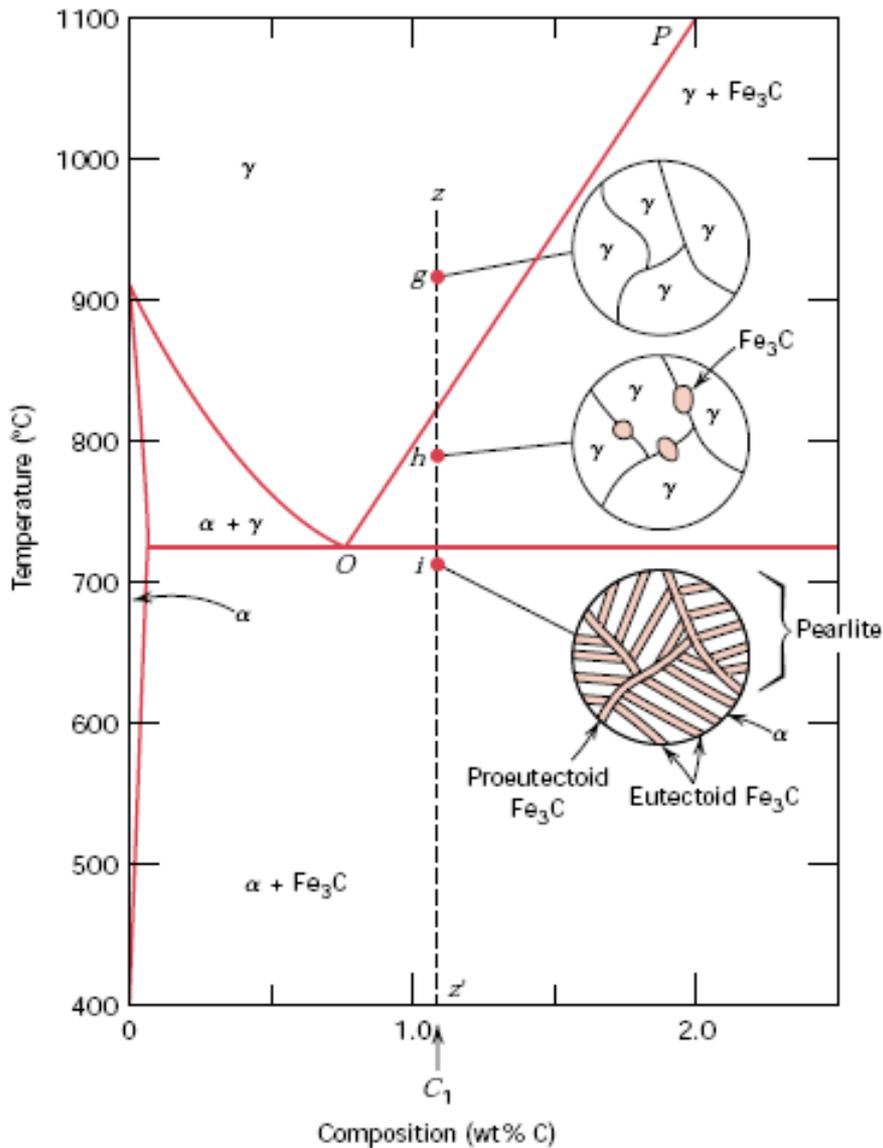
Microestrutura: ferrita + perlita

Resfriamento lento



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





Aços hipereutetóides

> 0,76% C

Microestrutura: perlita + cementita
p/ resfriamento lento

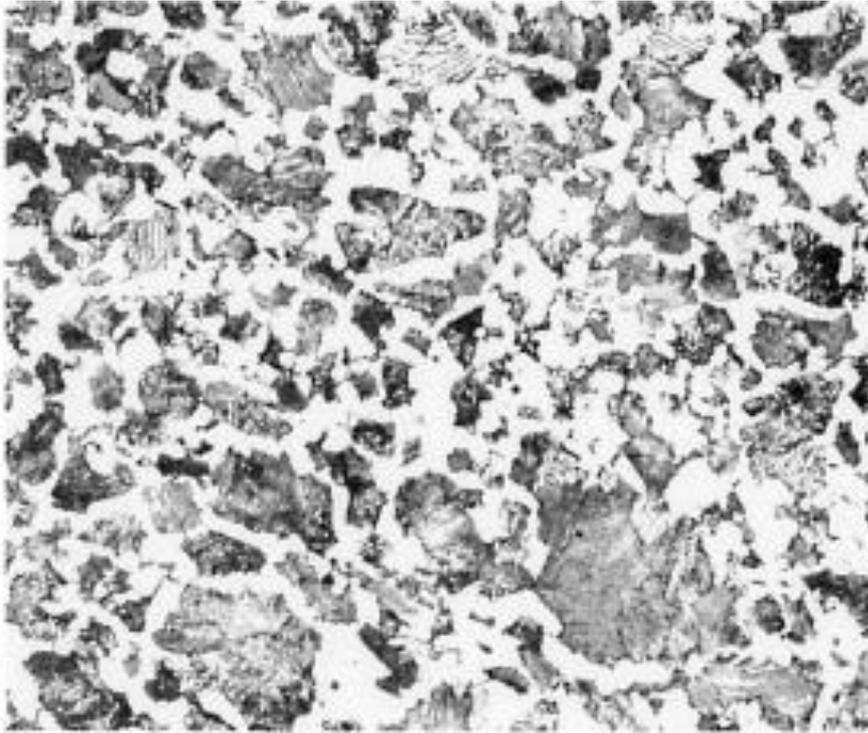


Grãos de Perlita +
Cementita
intergranular

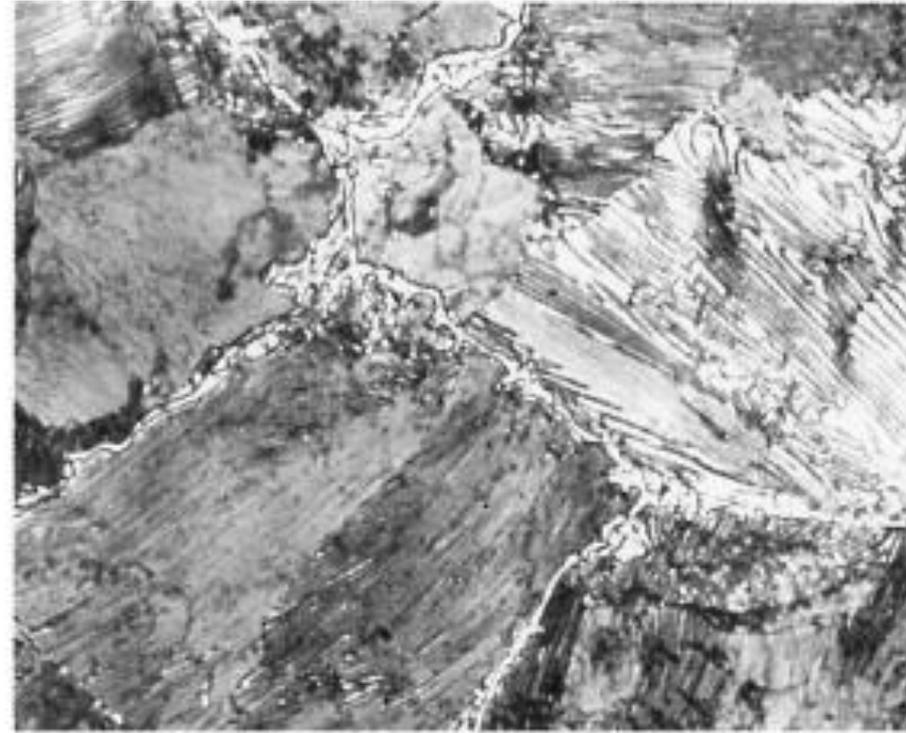
Representação esquemática das microestruturas da liga Fe-C para composição hipereutetoide C_1 (contem entre 0,76 e 2,14 wt% C) resfriado a partir da região do campo da austenita até abaixo da temperatura eutetoide.

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

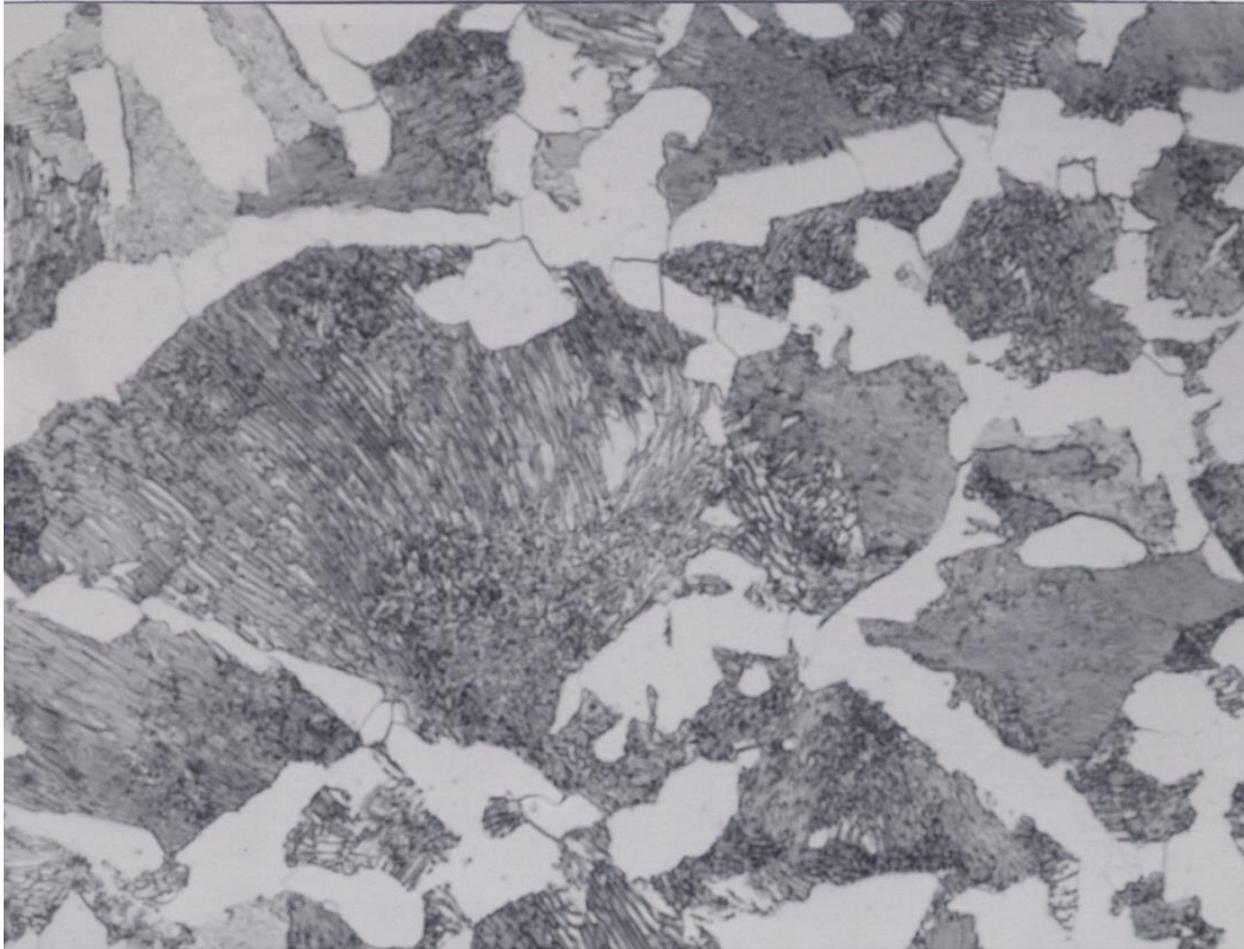


(a)



(b)

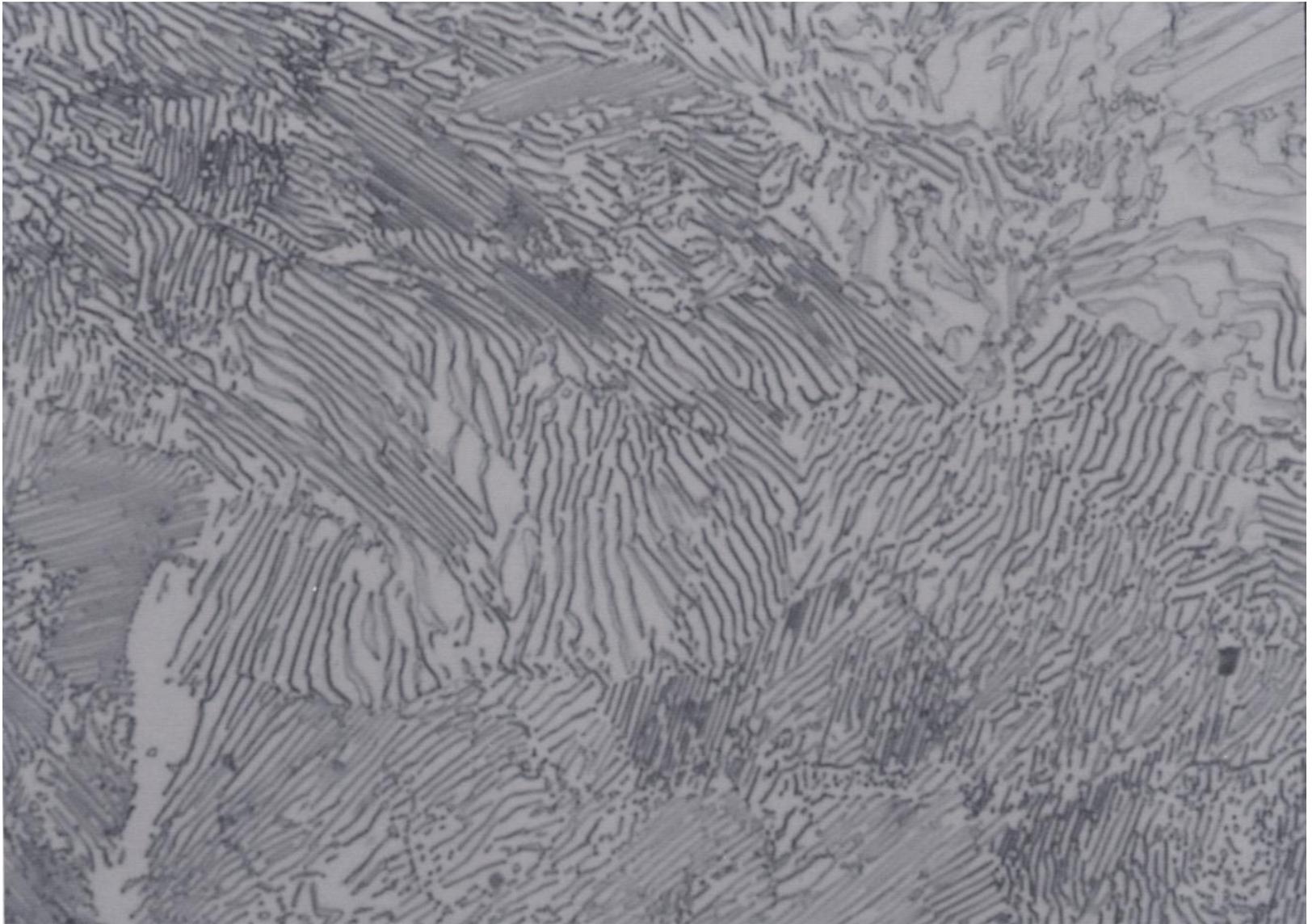
Figura (a) Aço hipoeutetóide mostrando a fase primária α (branca) e perlita ($\times 400$). (b) Aço hipereutetóide mostrando o primário Fe_3C circundado por perlita ($\times 800$). (From ASM Handbook, Vol. 7, (1972), ASM International, Materials Park, OH 44073.)



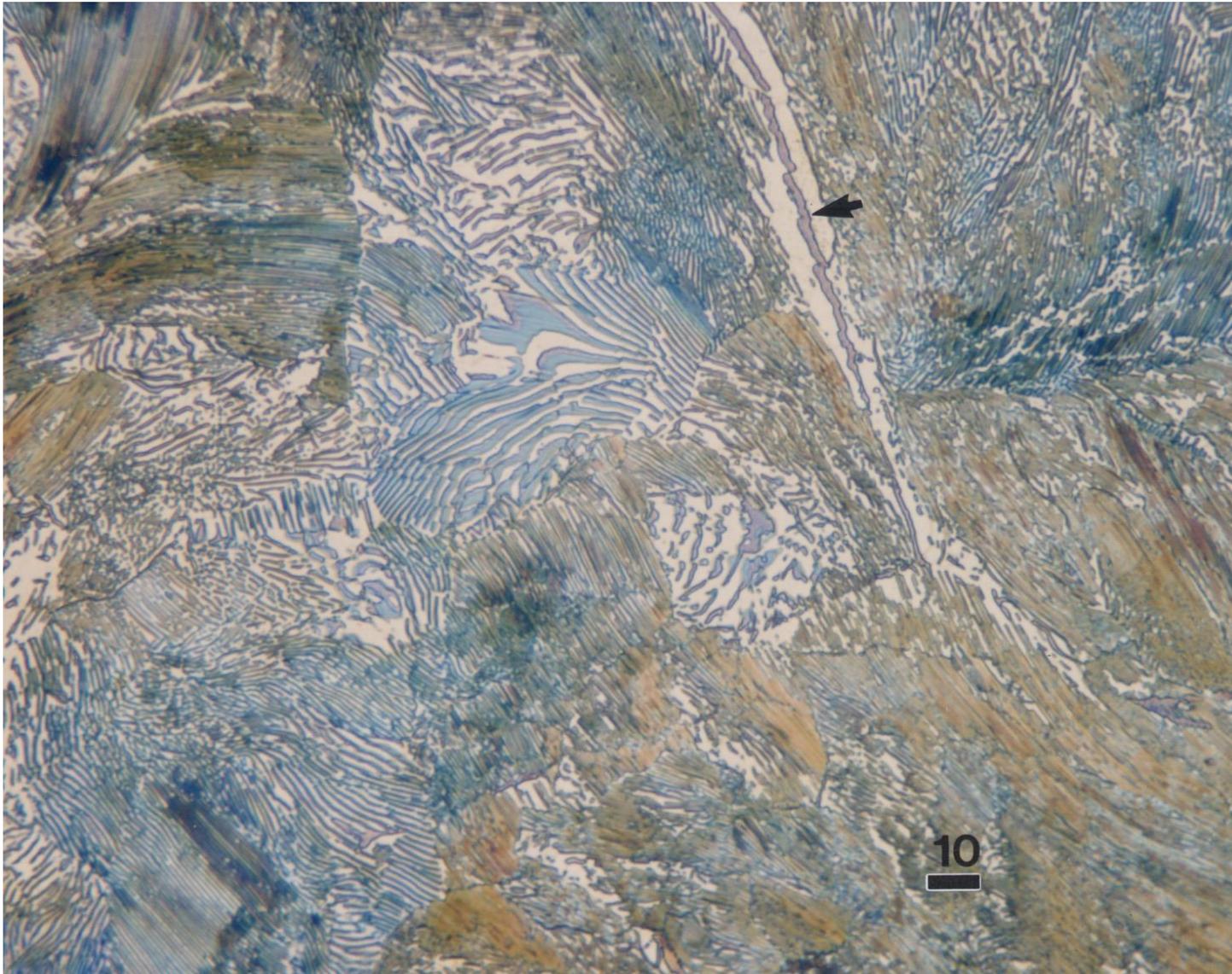
Microestrutura de um aço carbono SAE1040 recozido (0.40% C – 0.68% Mn – 0.12% Si) revelando a ferrita e perlita. Aumento original de 1000X



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.



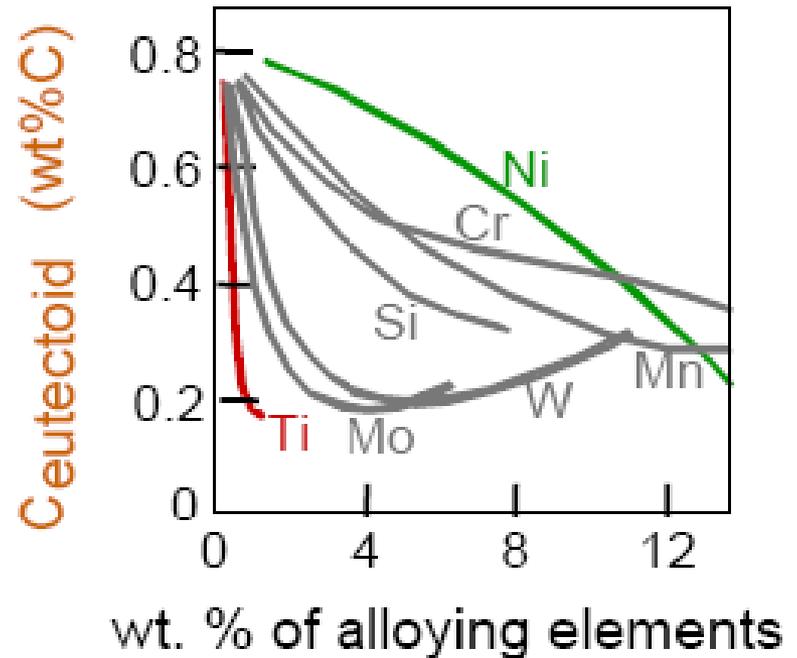
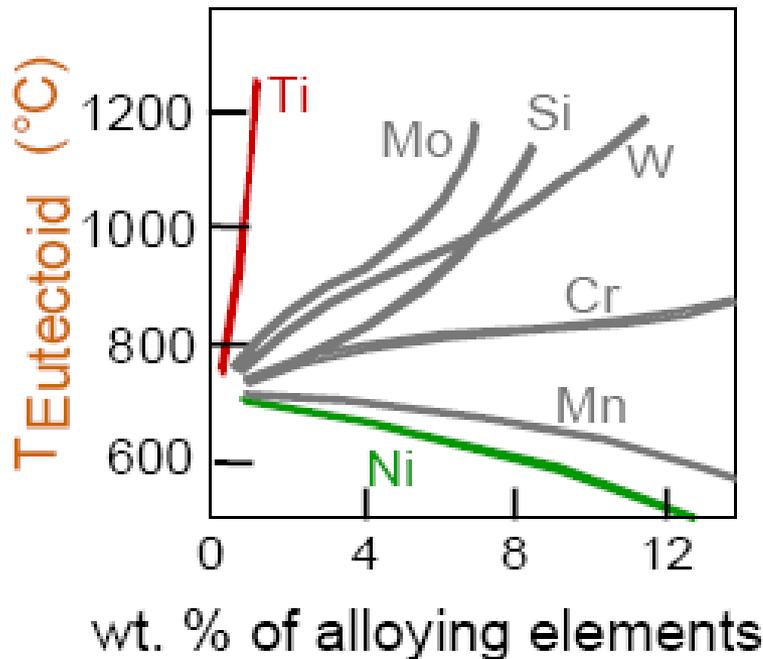
Microestrutura constituída de perlita grosseira de um aço SAE 1080 isotermicamente recozido (780 °C, 1 h, transformado isotermicamente) (Fe – 0.8% C – 0.75% Mn) atacado com 4% de reagente picral. Aumento original de 1000X.



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 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

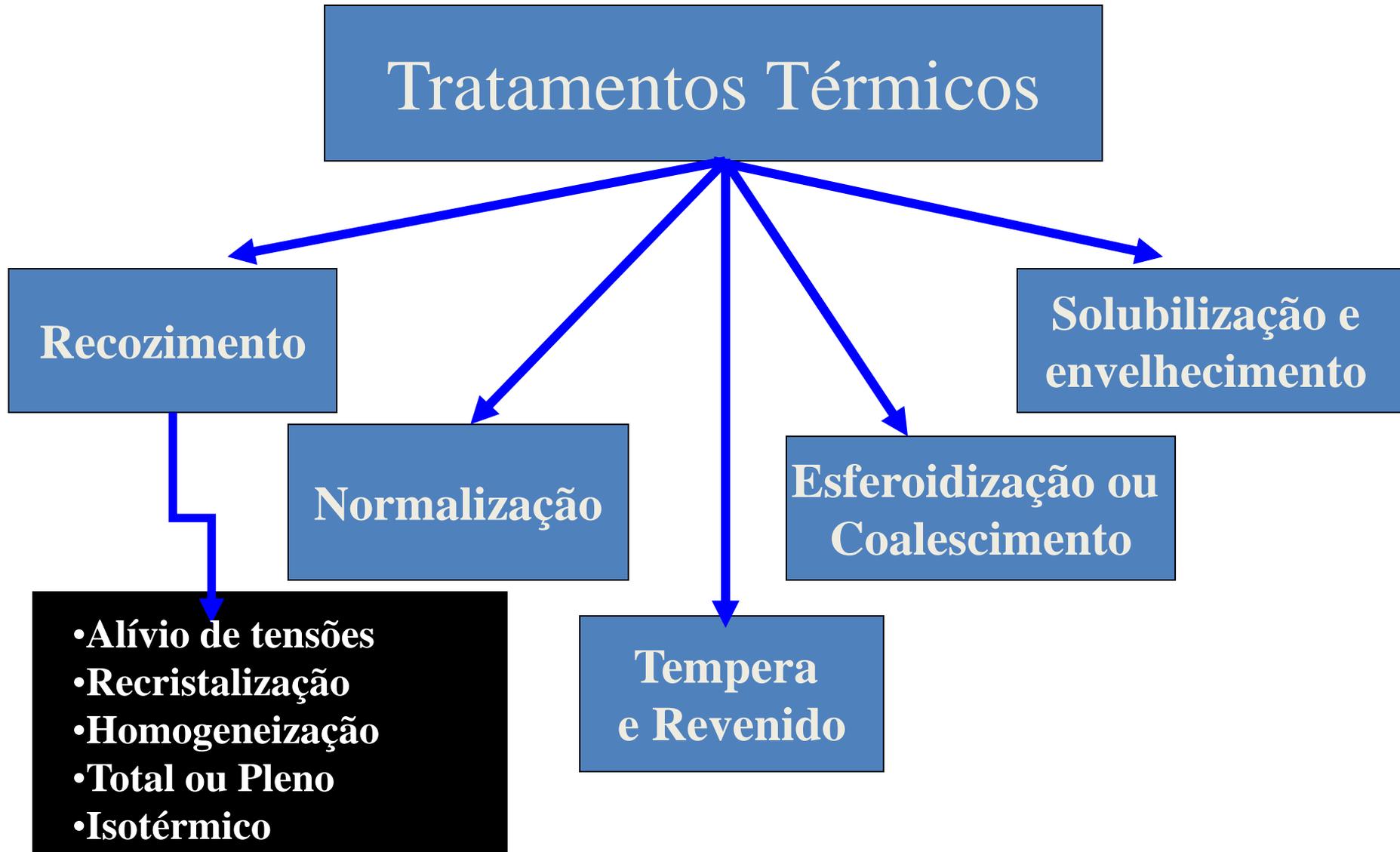
- Formação de carbonetos: alguns elementos quando adicionados aos aços, formam carbonetos muito estáveis os quais geralmente são mais duros que a cementita. Por isso esses elementos elevam a dureza do aço e são utilizados geralmente em aços ferramenta de qualidade superior. Entre os elementos estão o 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

- **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

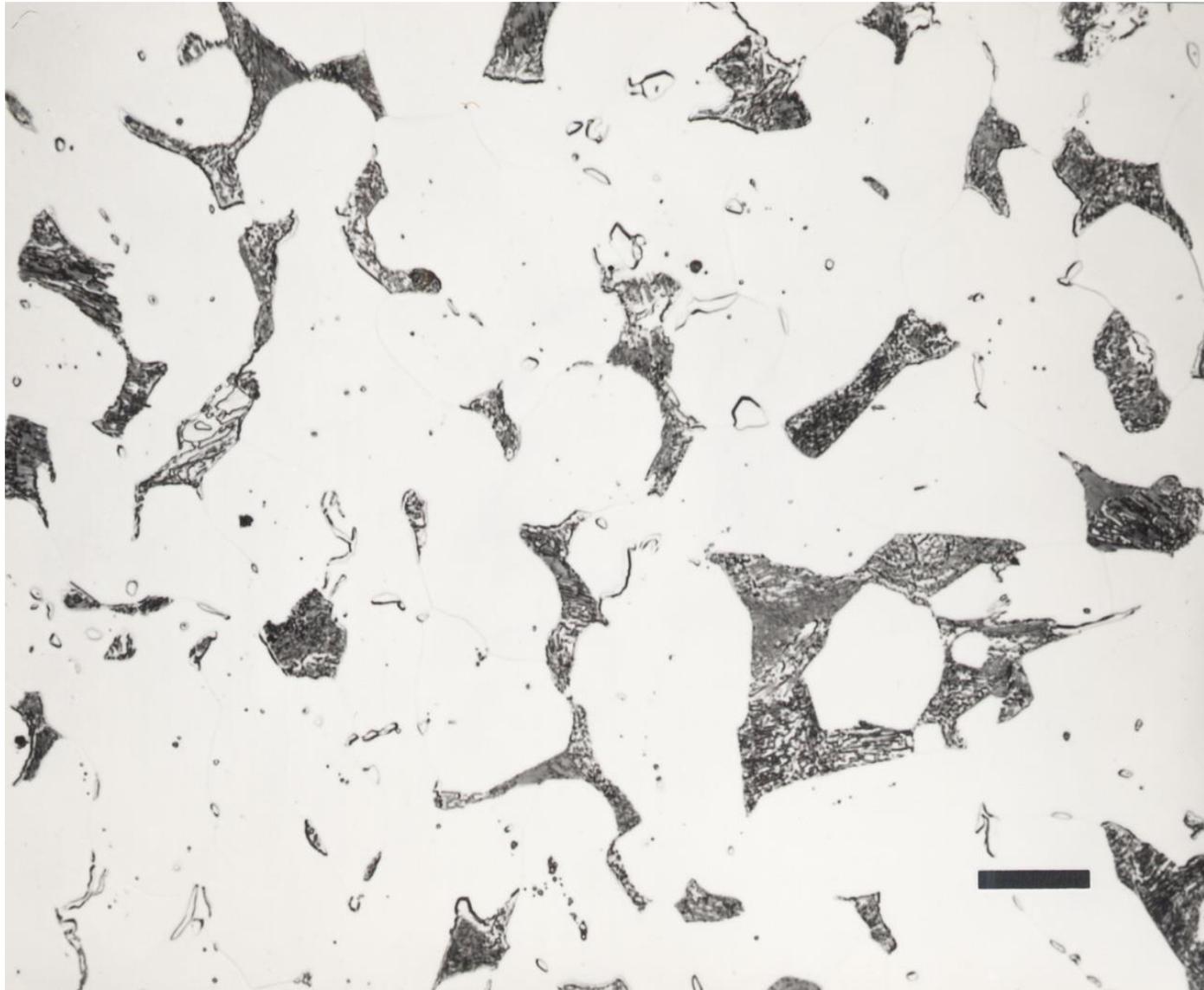
Principais Tratamentos Térmicos



1- RECOZIMENTO

□ Objetivos:

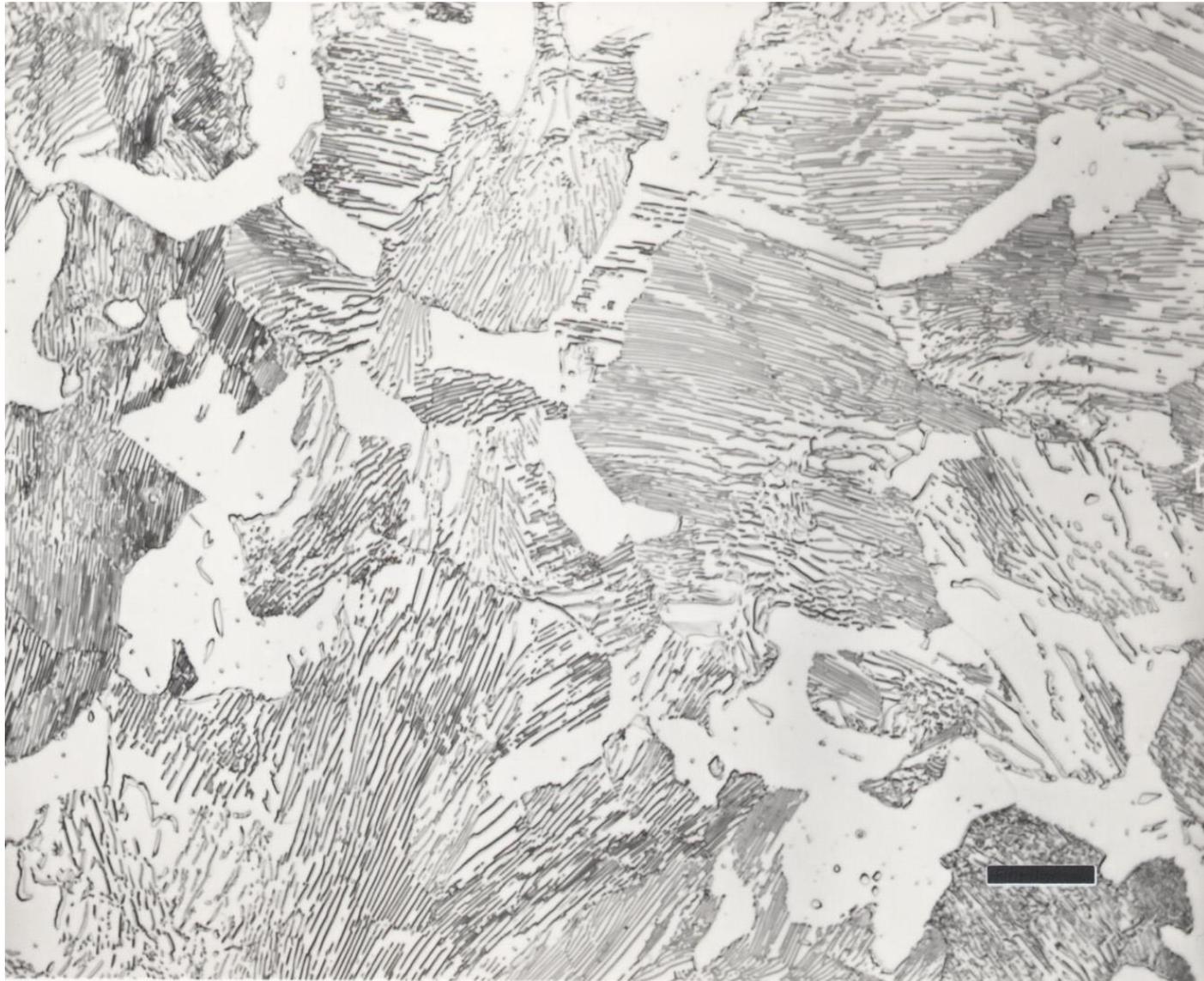
- Remoção de tensões internas devido aos tratamentos mecânicos
- Diminuir a dureza para melhorar a usinabilidade
- Alterar as propriedades mecânicas como a resistência e ductilidade
- Ajustar o tamanho de grão
- Melhorar as propriedades elétricas e magnéticas
- Produzir uma microestrutura definida



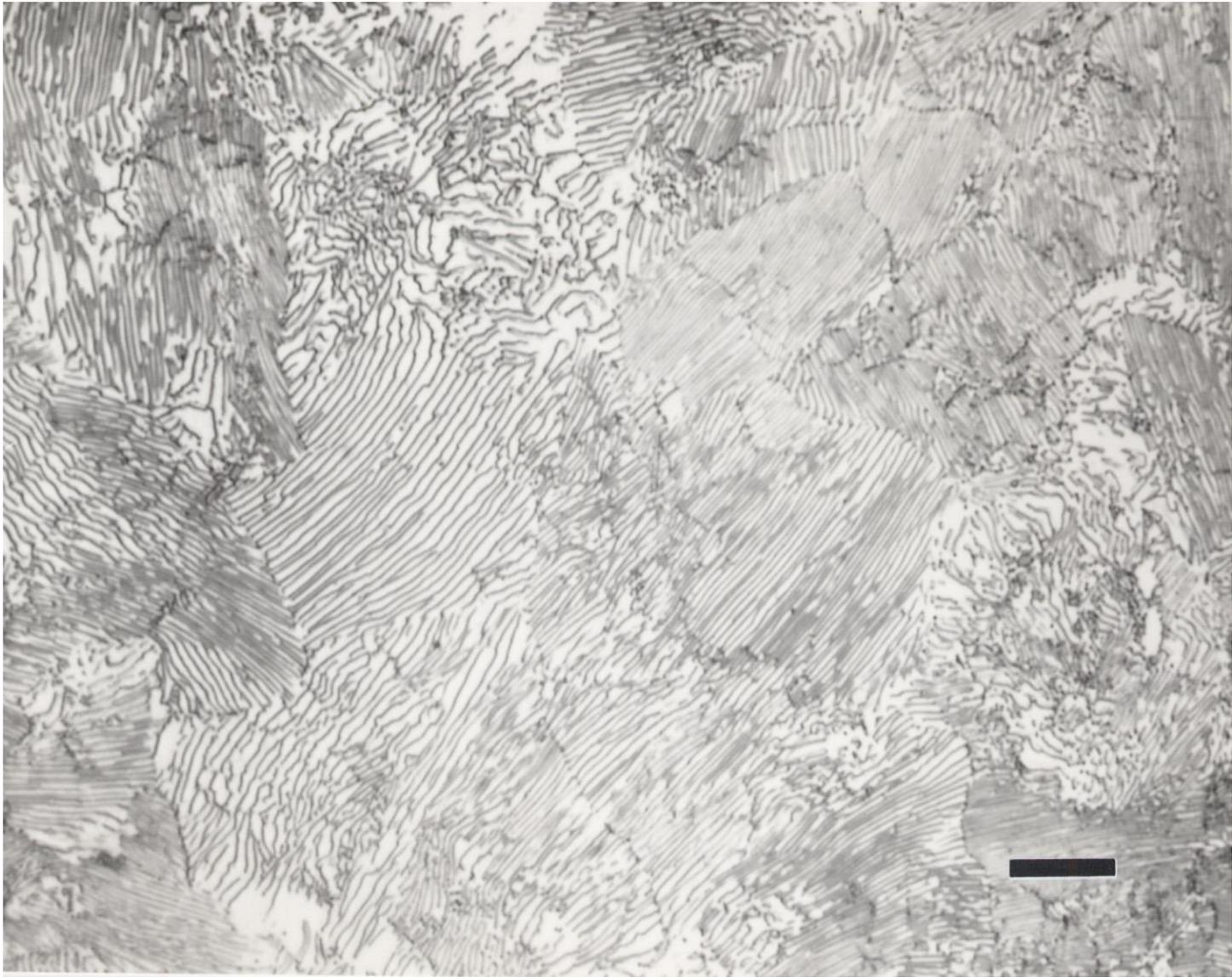
Ferrite (white) and pearlite in a hot-rolled Fe – 0.2% C binary alloy. Picral etch. Magnification bar is 20 μm in length.



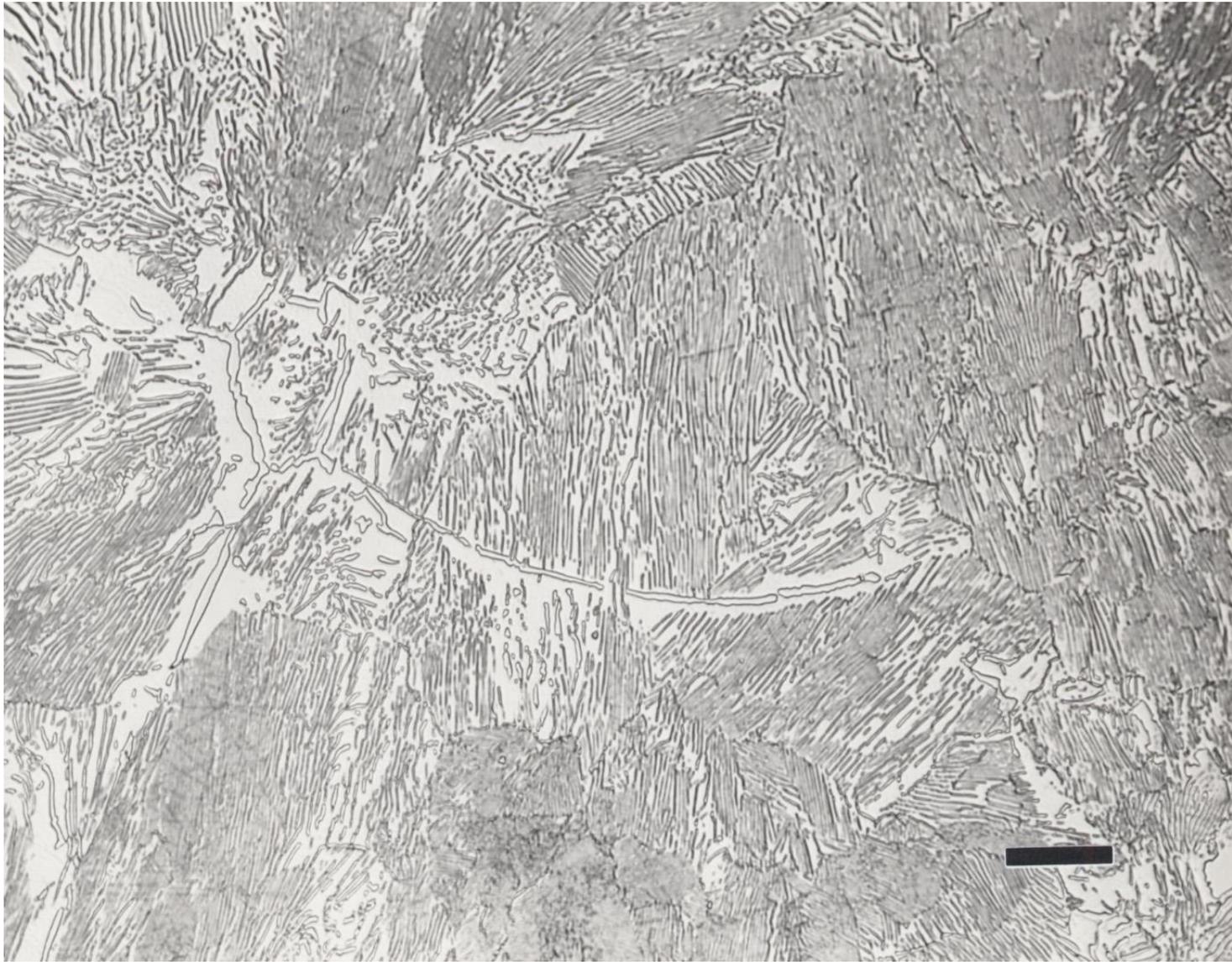
Ferrite (white) and pearlite in a hot-rolled Fe – 0.4% C binary alloy. Picral etch. Magnification bar is 20 μm in length.



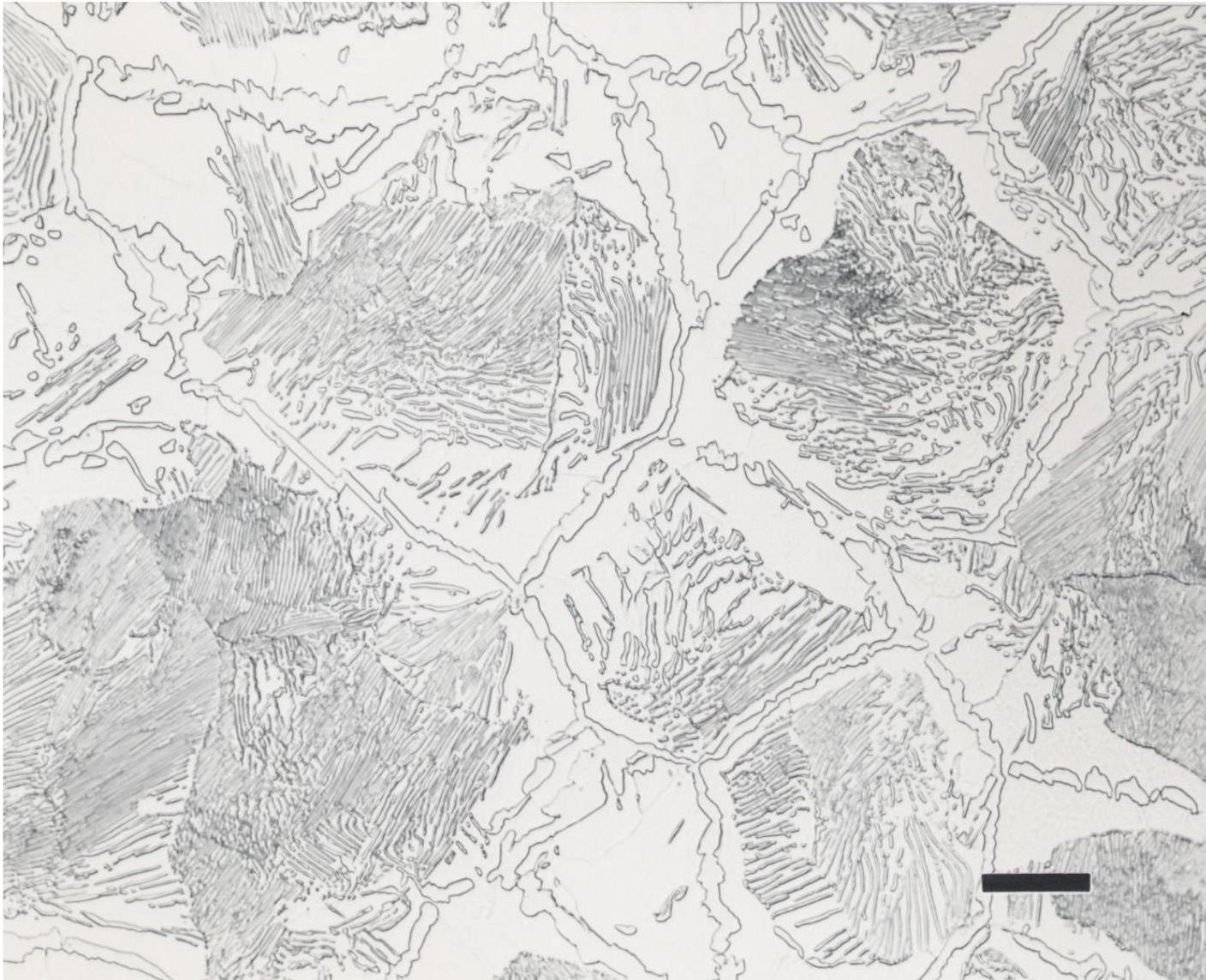
Ferrite (white) and pearlite in a hot-rolled Fe – 0.6% C binary alloy. Picral etch. Magnification bar is 20 μm in length.



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.



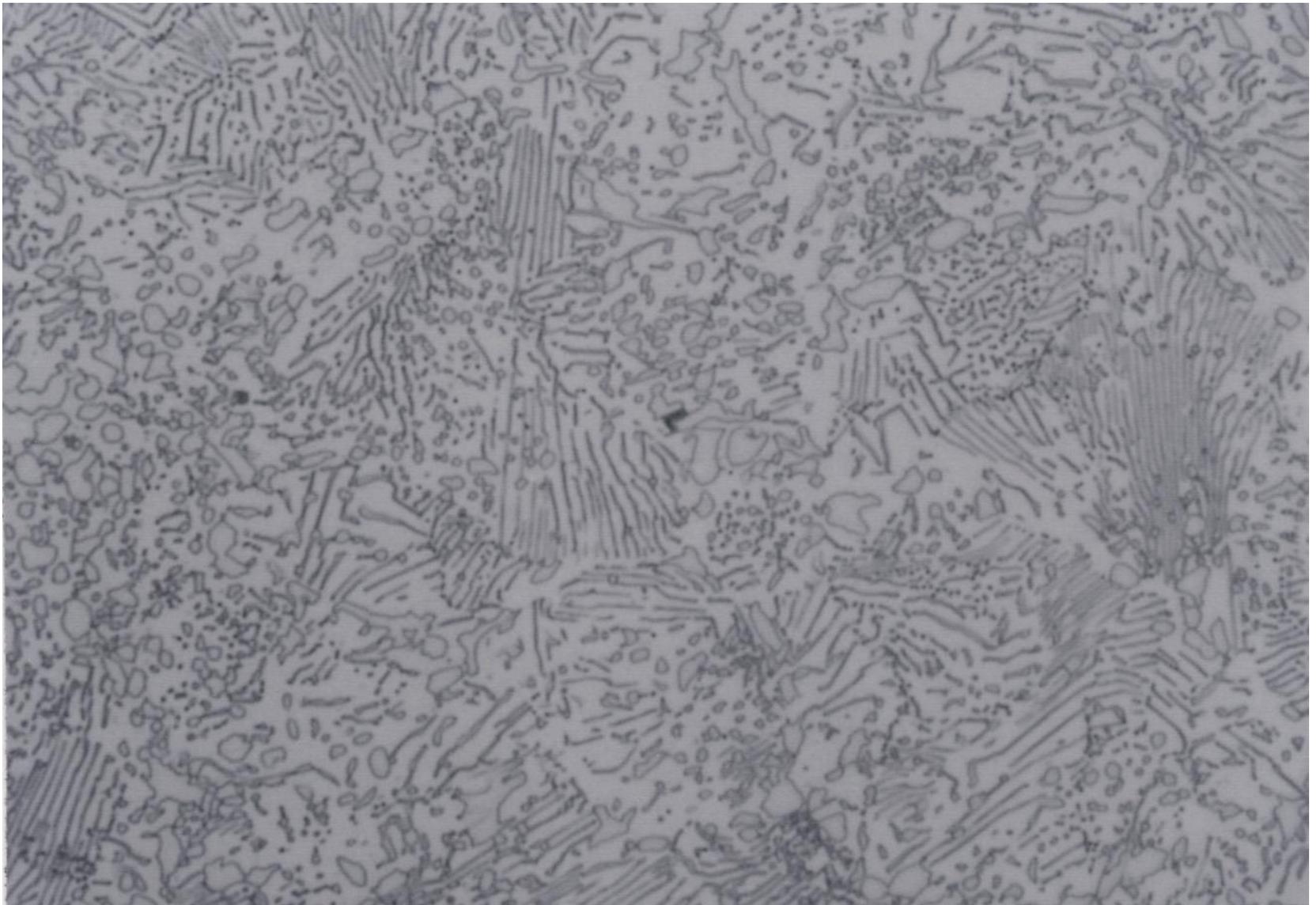
Coarse intergranular proeutectoid cementite (white, outlined) and pearlite in a hot-rolled Fe – 1.2% C binary alloy. Picral etch. Magnification bar is 20 μm in length.

ESFEROIDIZAÇÃO OU COALESCIMENTO

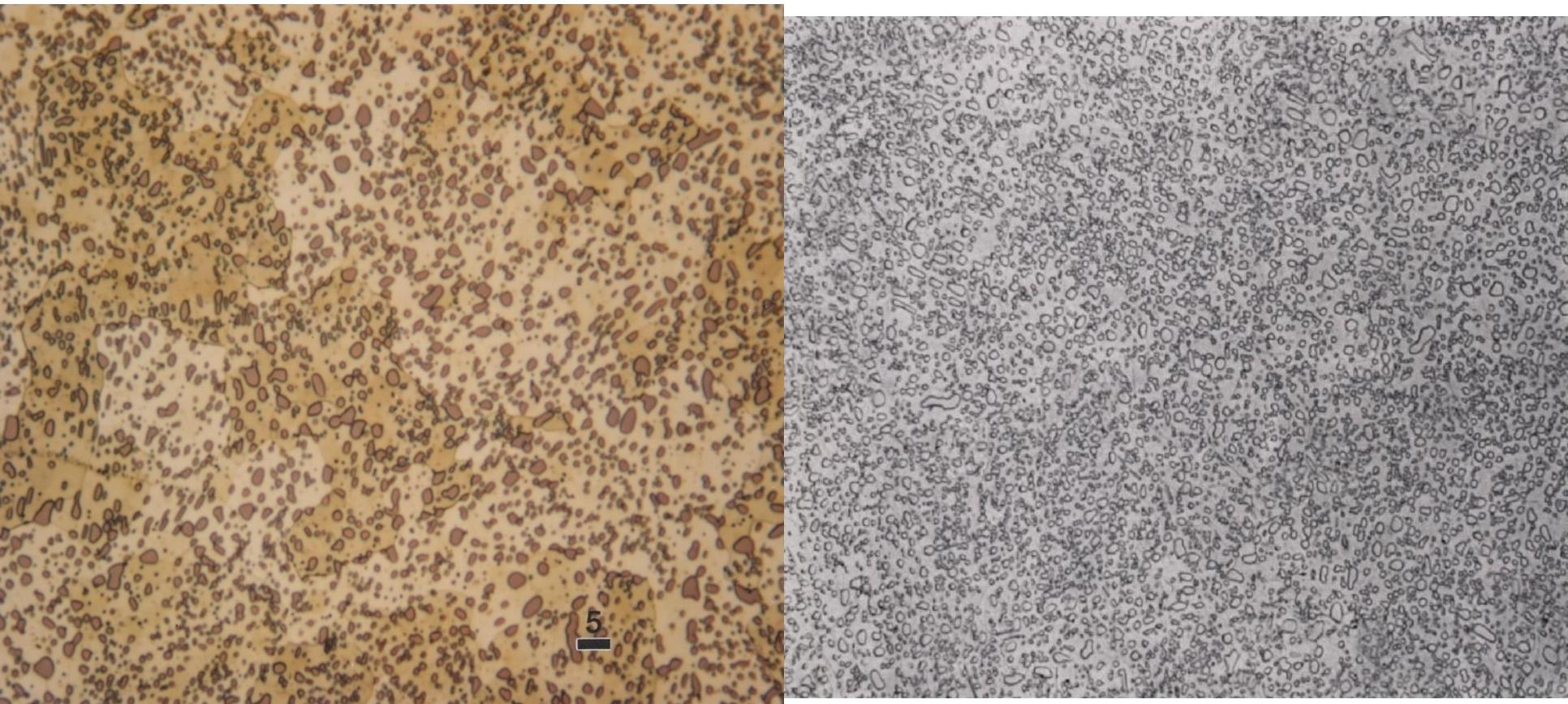
Objetivo

Produção de uma estrutura globular ou esferoidal de carbonetos no aço

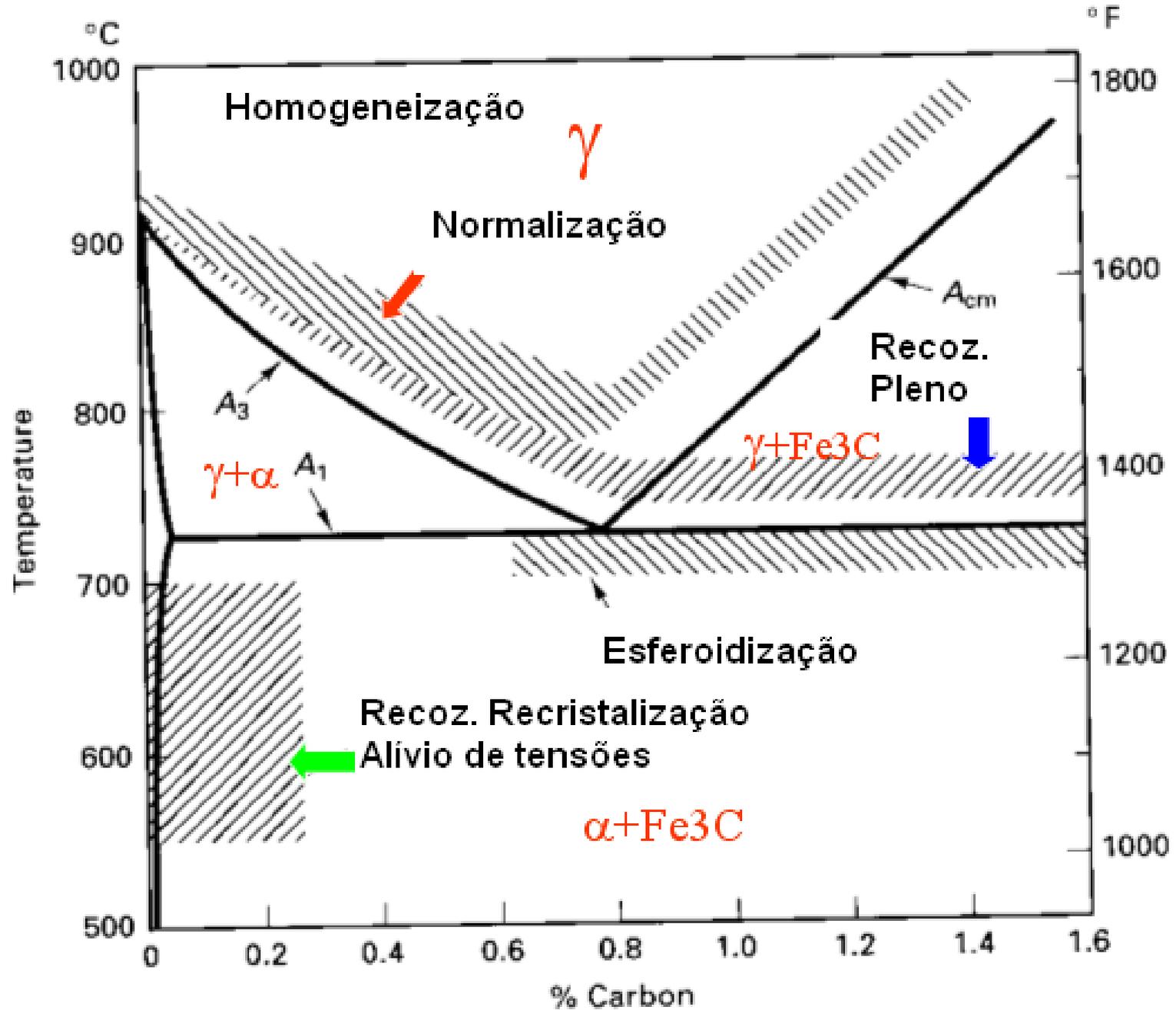
- melhora a usinabilidade, especialmente dos aços alto carbono
- facilita a deformação a frio



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.



3- NORMALIZAÇÃO

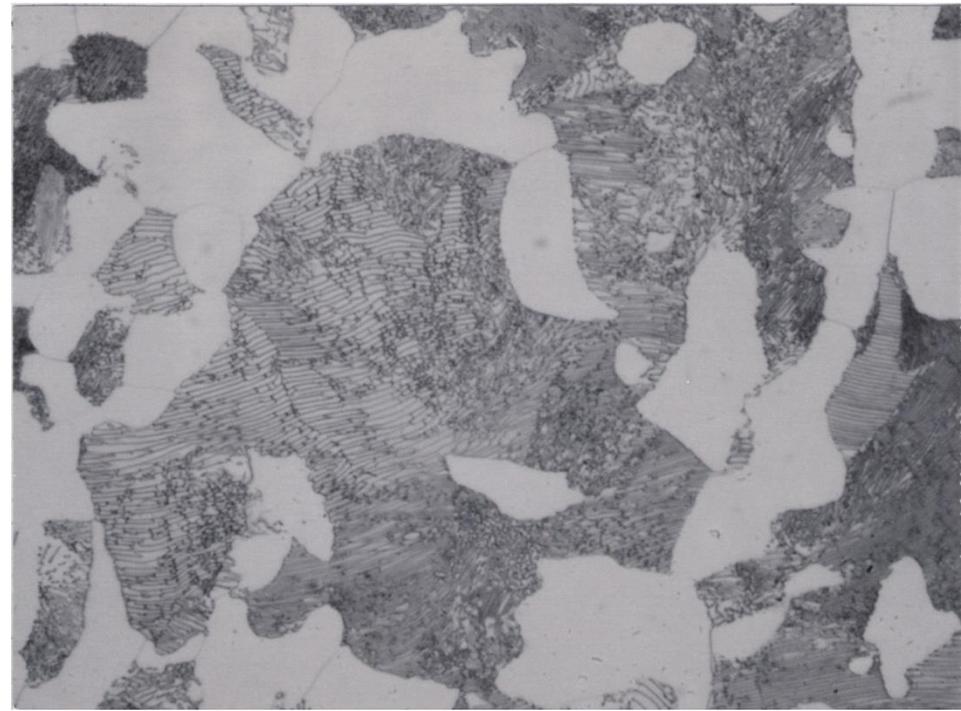
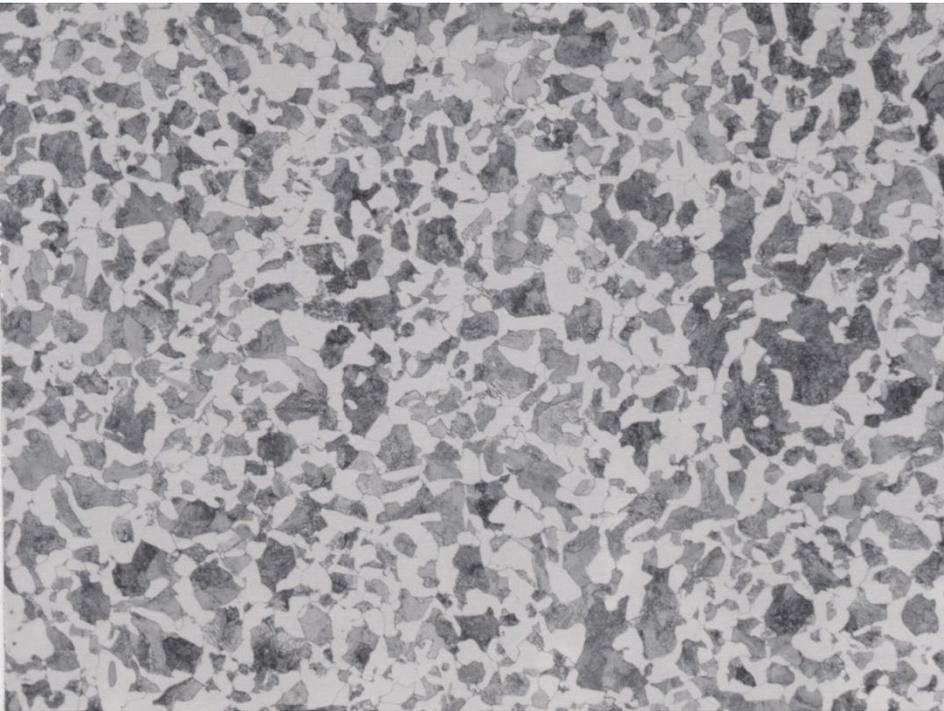
- **Constituintes Estruturais resultantes**

Hipoeutetóide → ferrita + perlita fina

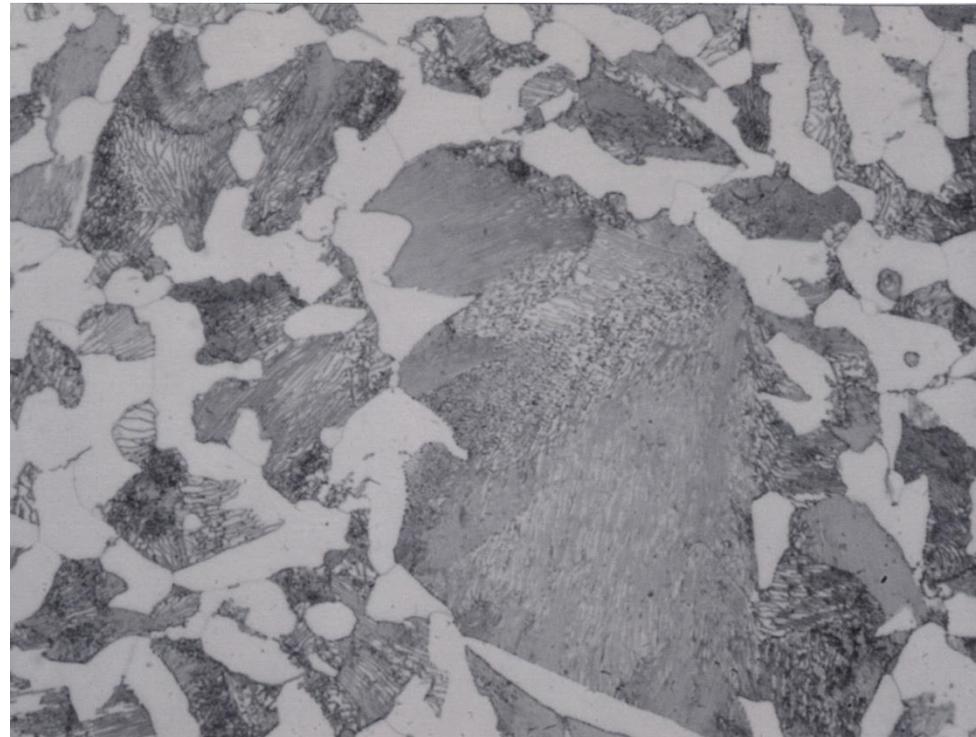
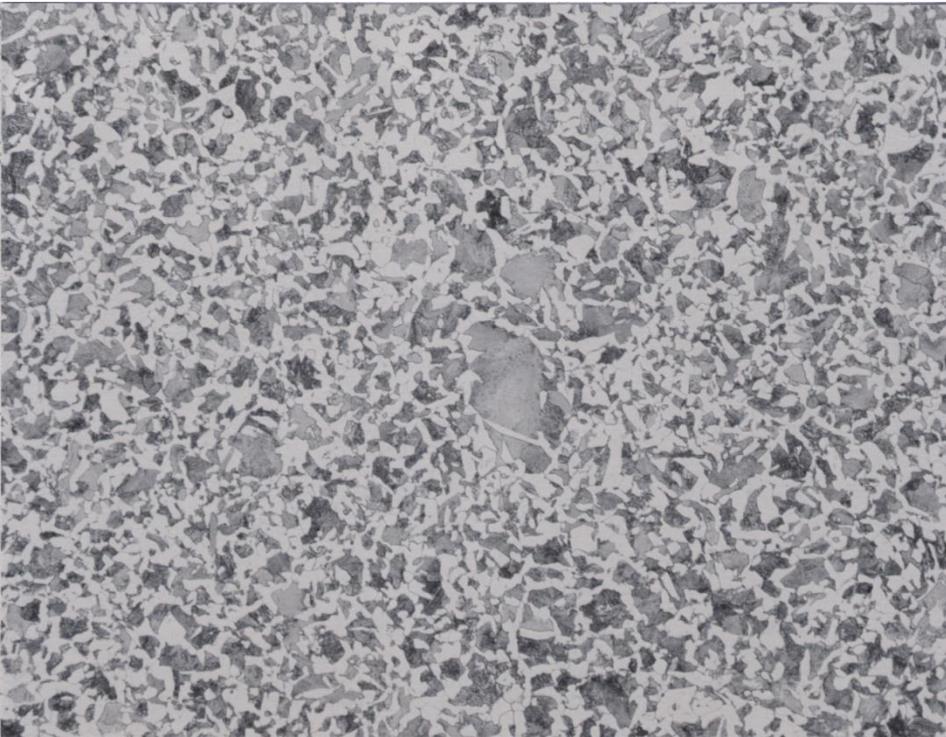
Eutetóide → perlita fina

Hipereutetóide → cementita + perlita fina

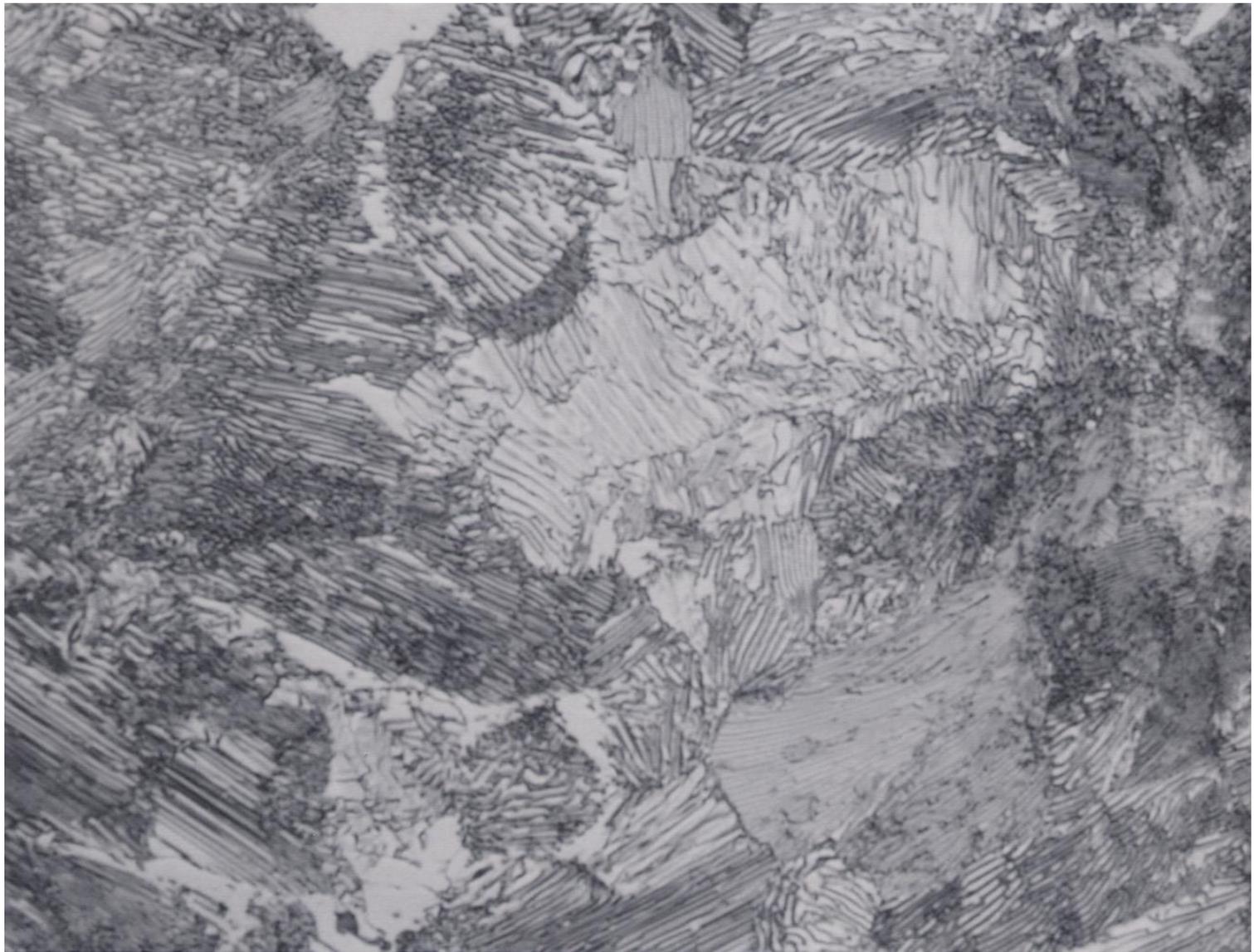
- Em relação ao recozimento a microestrutura é mais fina devido a velocidade de resfriamento ser mais lenta (comparado ao recozimento) e conseqüentemente prop. mecânicas ligeiramente superiores
- Apresenta menor quantidade e melhor distribuição de carbonetos



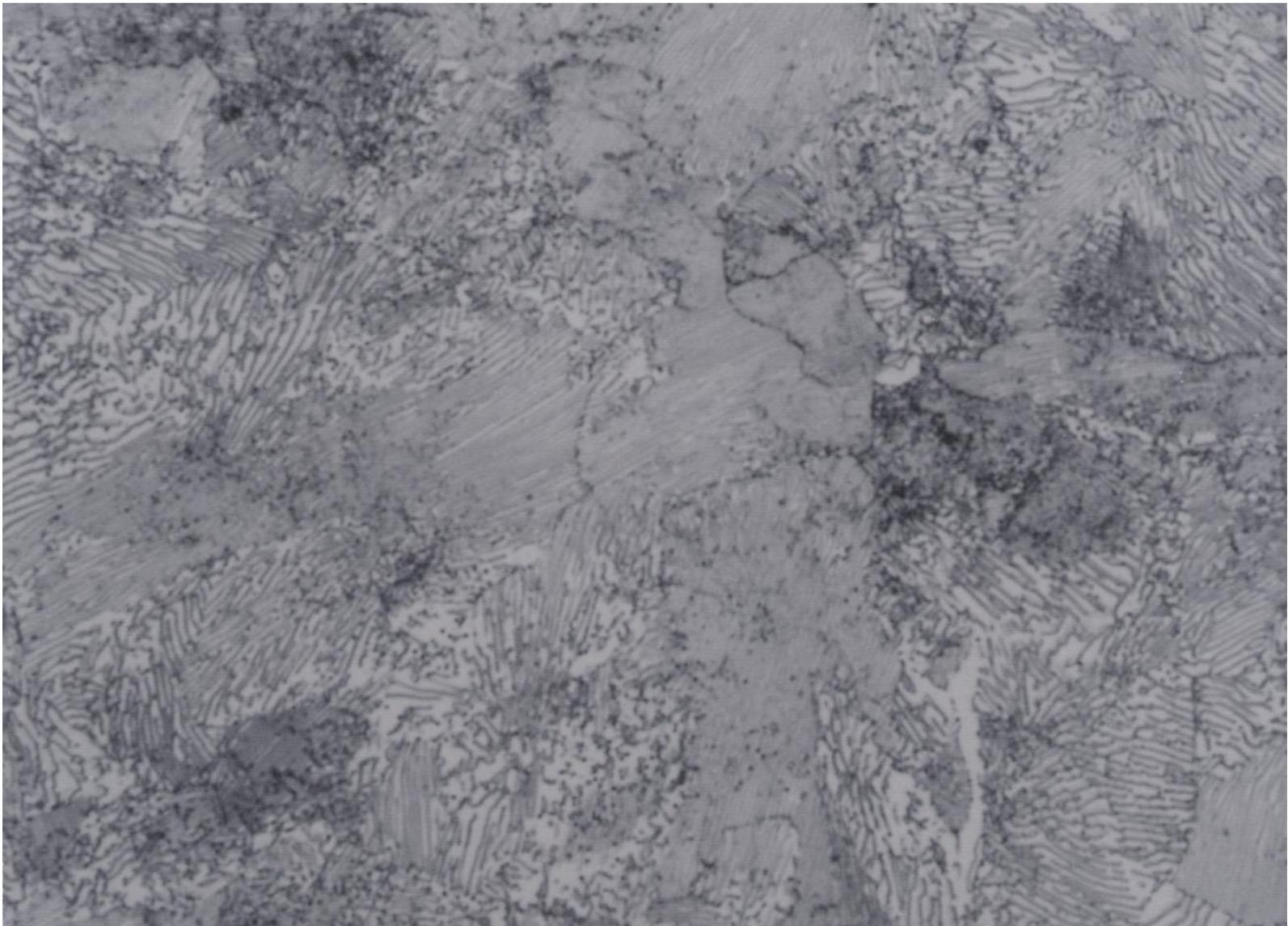
As-Rolled 1040 Carbon steel (Fe – 0.4% C – 0.75% Mn) etched sequentially with 4% picral and 2% nital revealing a fine structure of approximately half ferrite and half pearlite. Originals at 200X (left) and 500X (right). The fine grain size is due to proper control of the finishing temperature (temperature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

