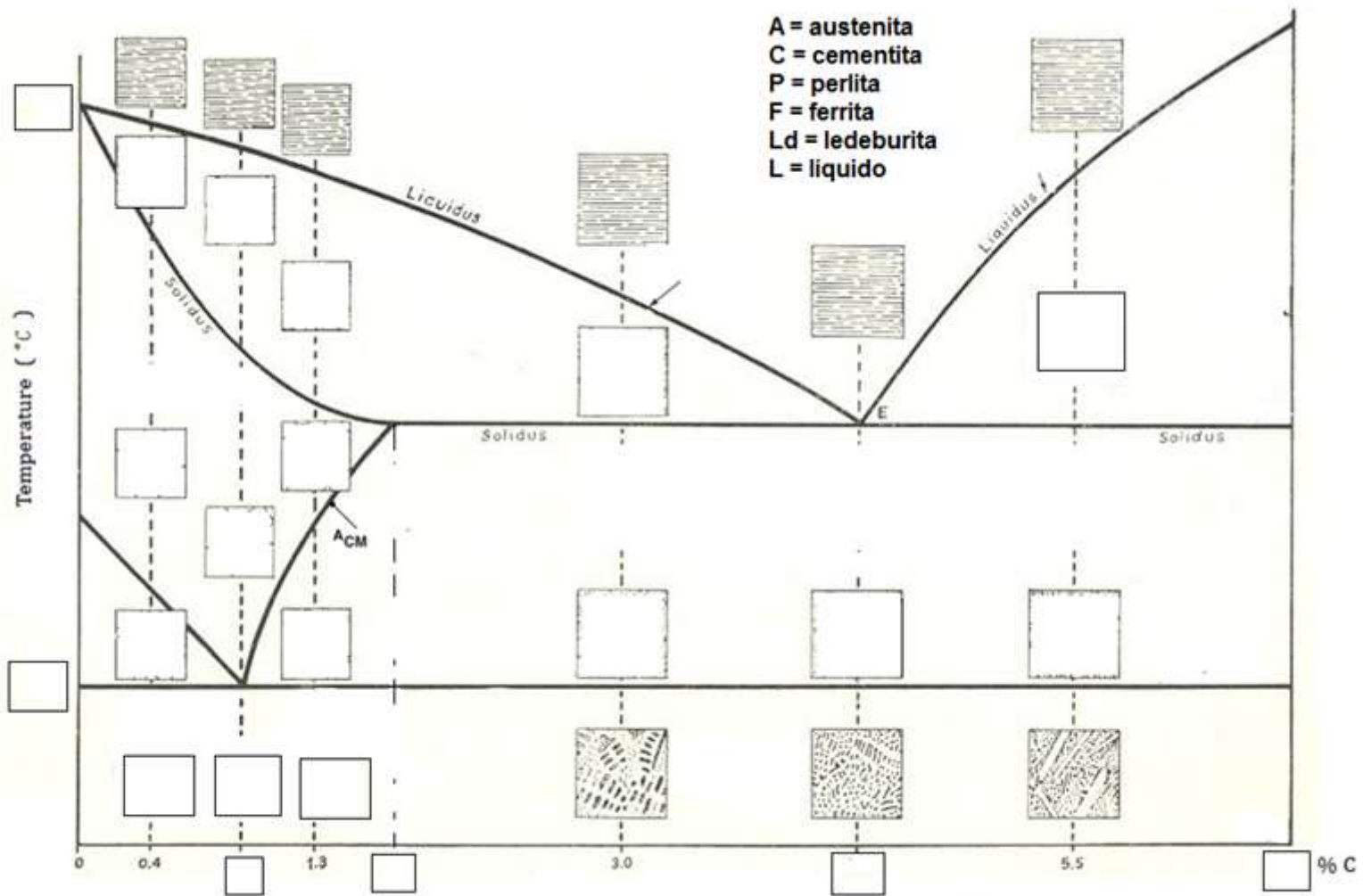
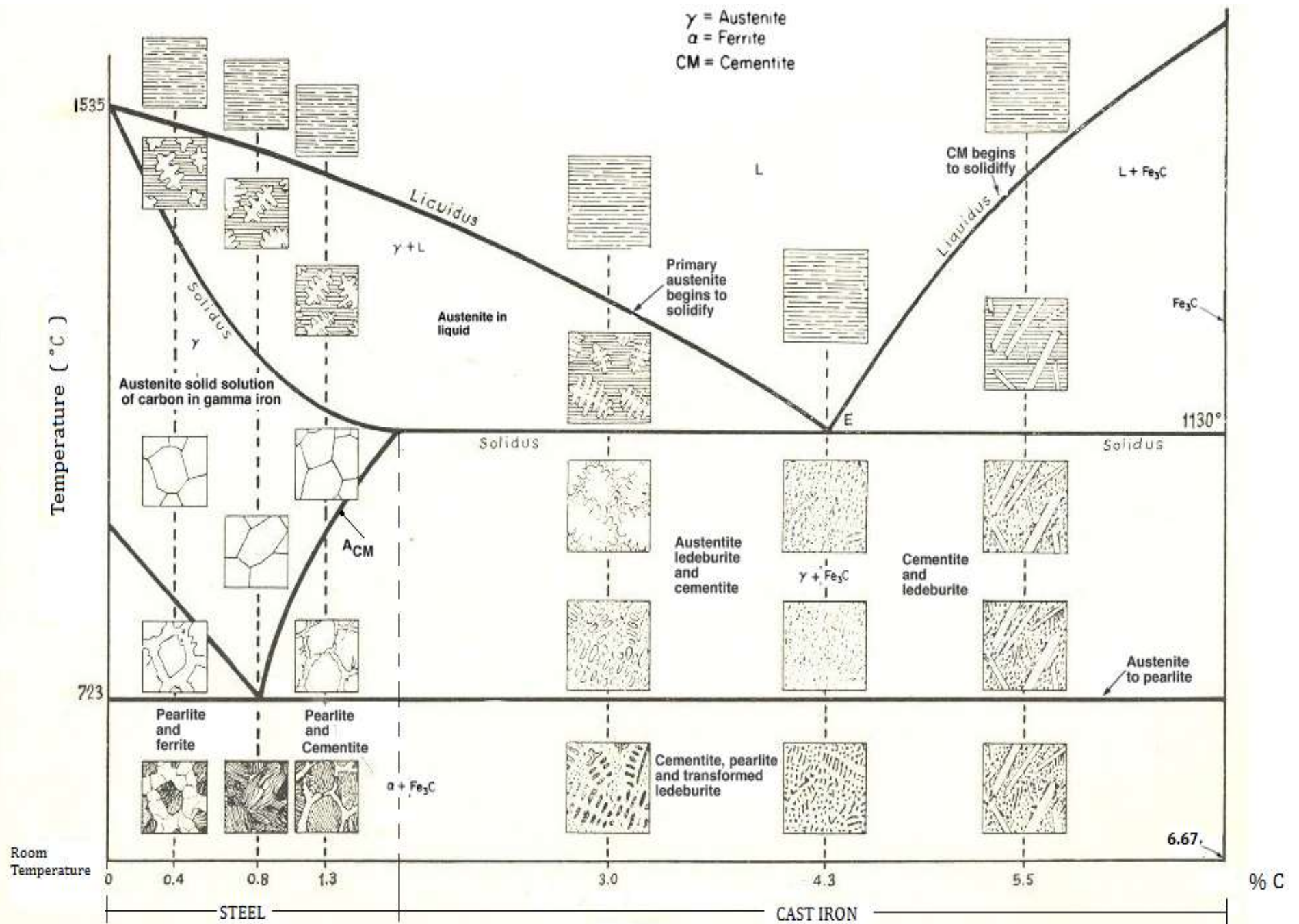
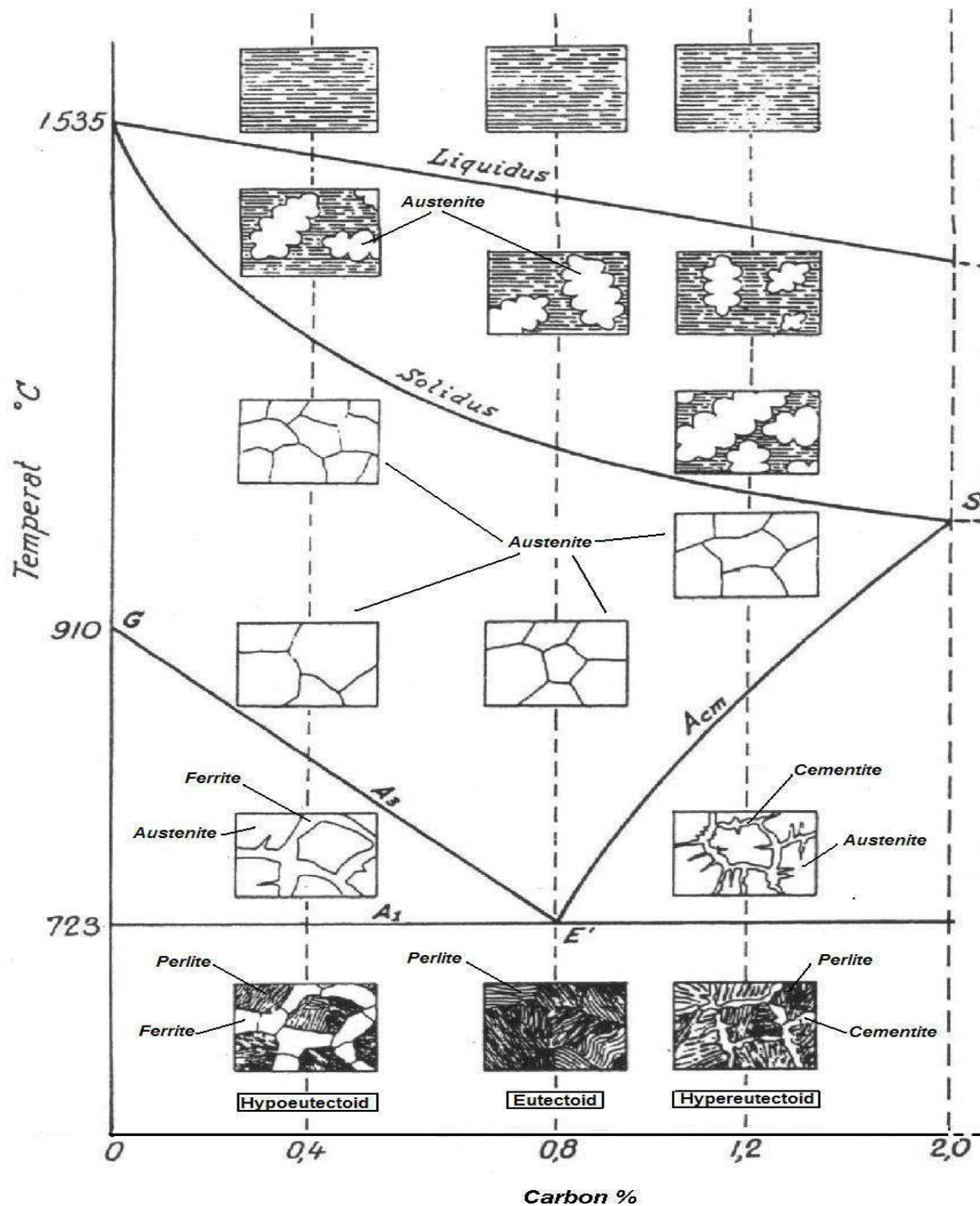


RECOZIMENTO E NORMALIZAÇÃO

Profa. Dra. Lauralice Canale

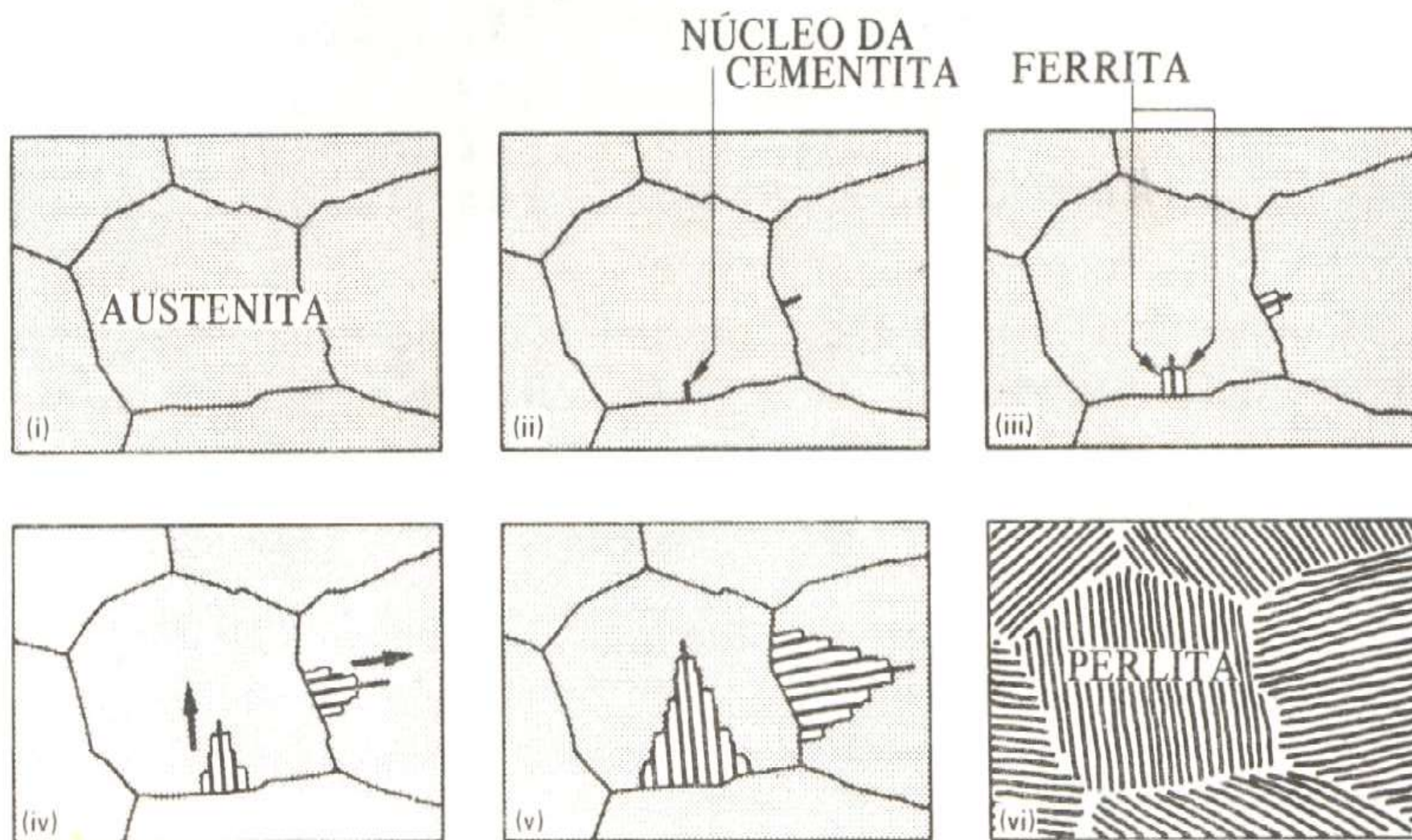




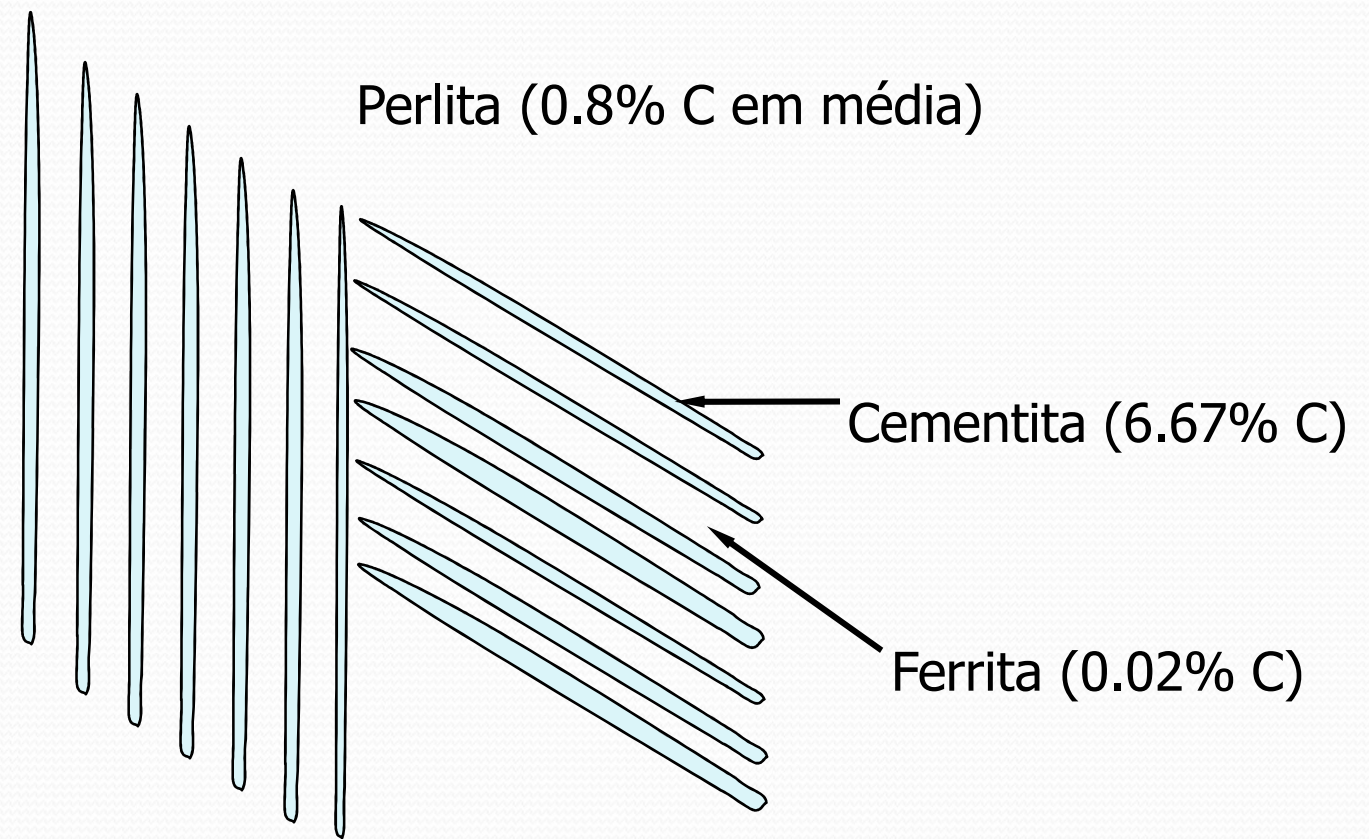


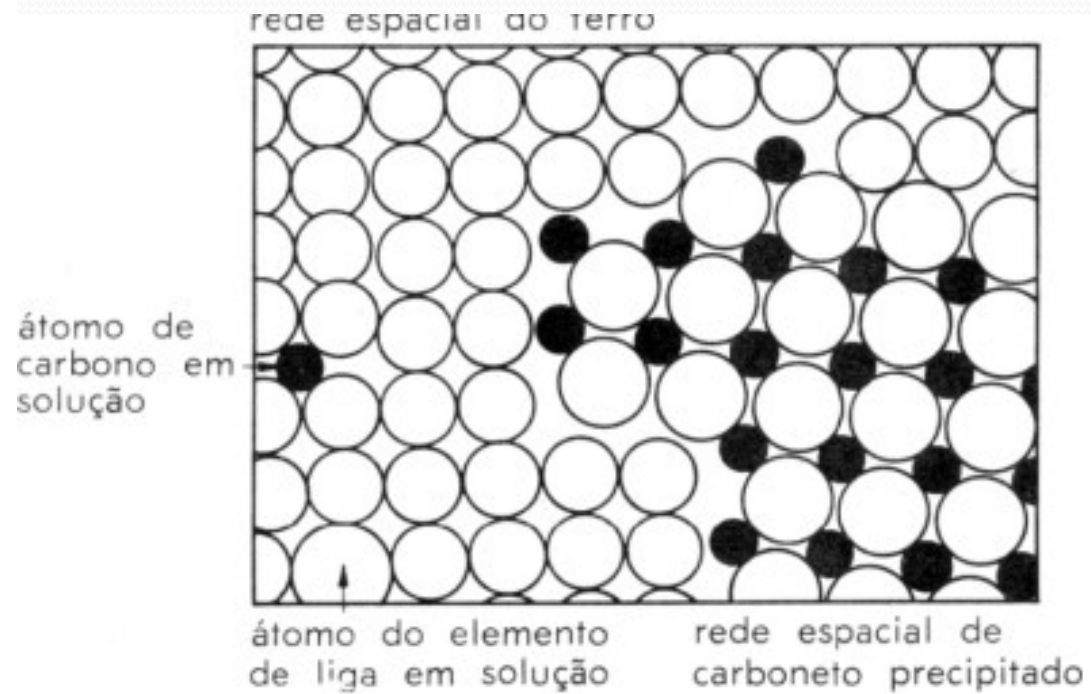
A1:
Temperatura de
equilíbrio de início de
austenitização

A3: Temperatura de
equilíbrio de fim de
austenitização

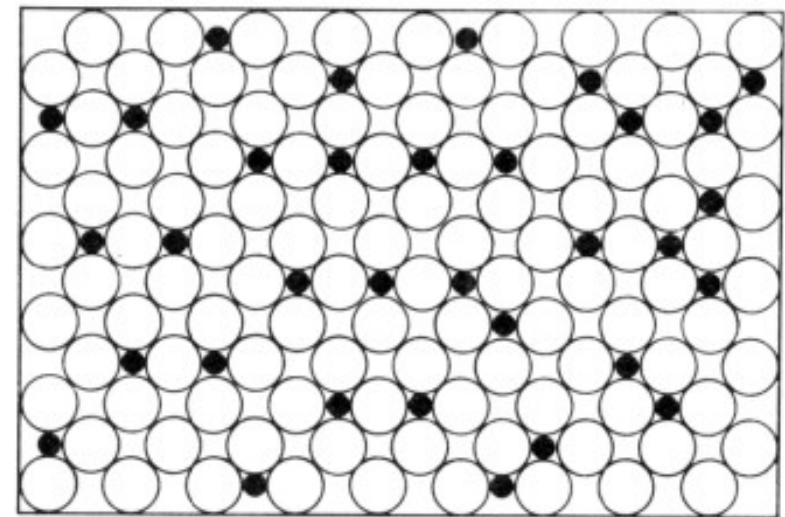


Estrutura da perlita





Solução sólida intersticial do carbono na ferrita e precipitação de carbonetos.



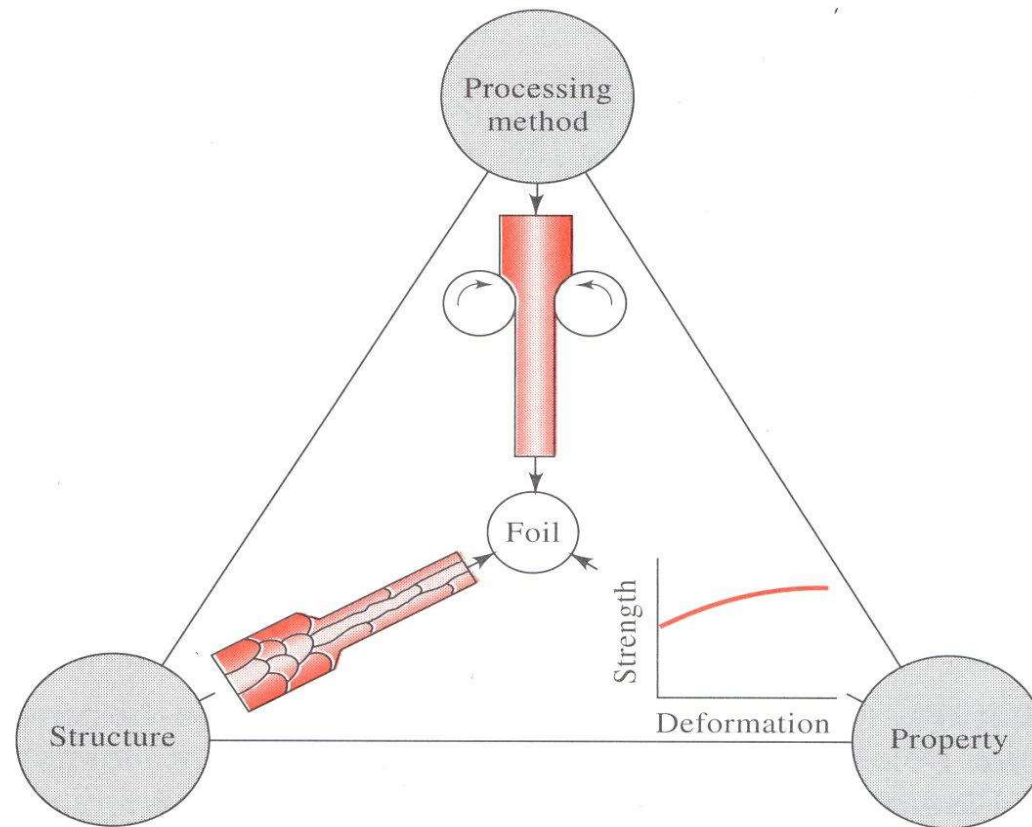
Solução sólida intersticial do carbono na austenita

Tratamentos Térmicos

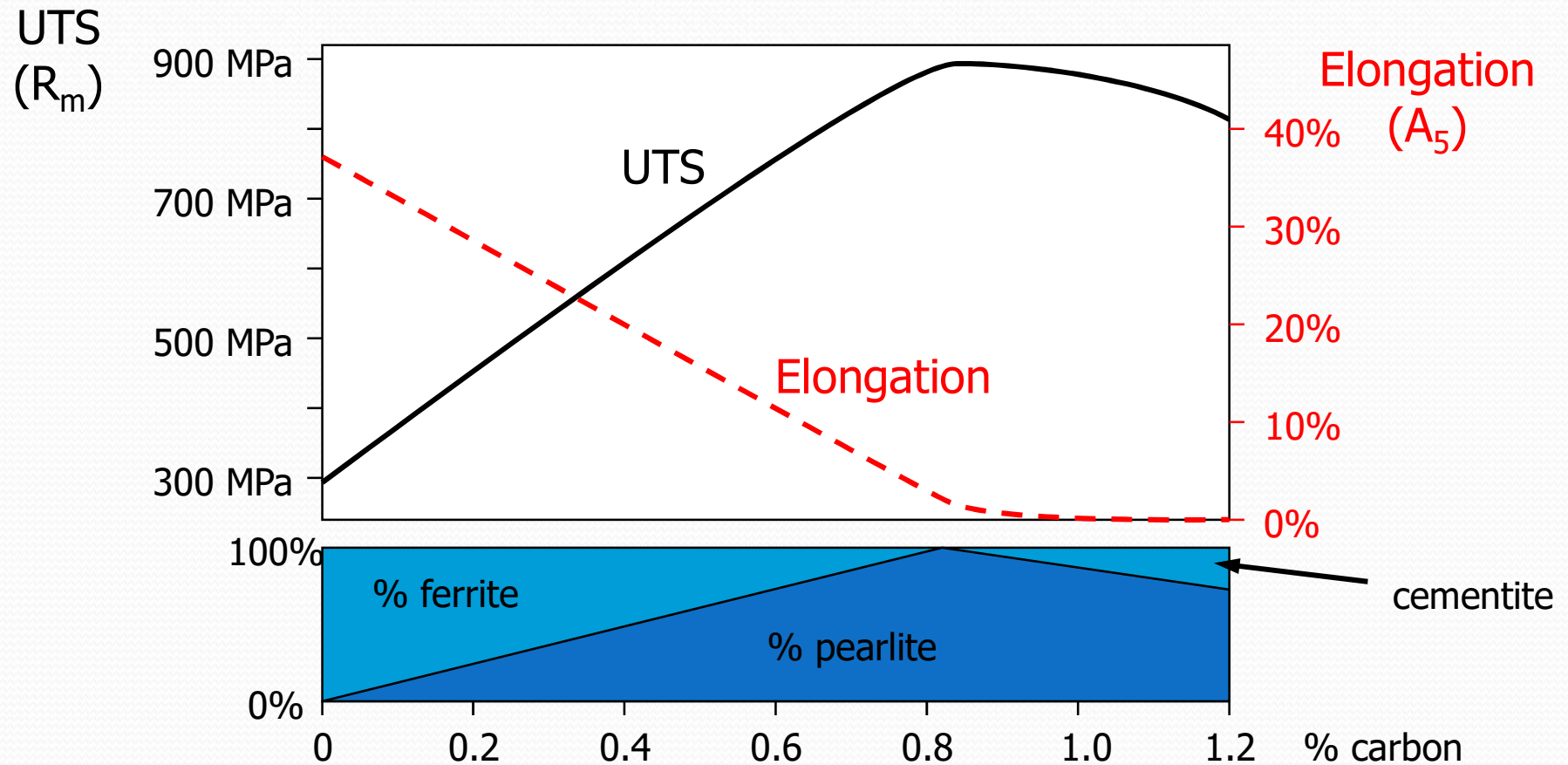
- Finalidade:

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

Tratamientos Térmicos



Efeito da perlita



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

Fatores de Influência nos Tratamentos Térmicos

- Temperatura
- Tempo
- Velocidade de resfriamento

Fatores de Influência nos Tratamentos Térmicos

□ Tempo:

O tempo de tratamento 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

Fatores de Influência nos Tratamentos Térmicos

- Temperatura:

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

Fatores de Influência nos Tratamentos Térmicos

□ Velocidade de Resfriamento:

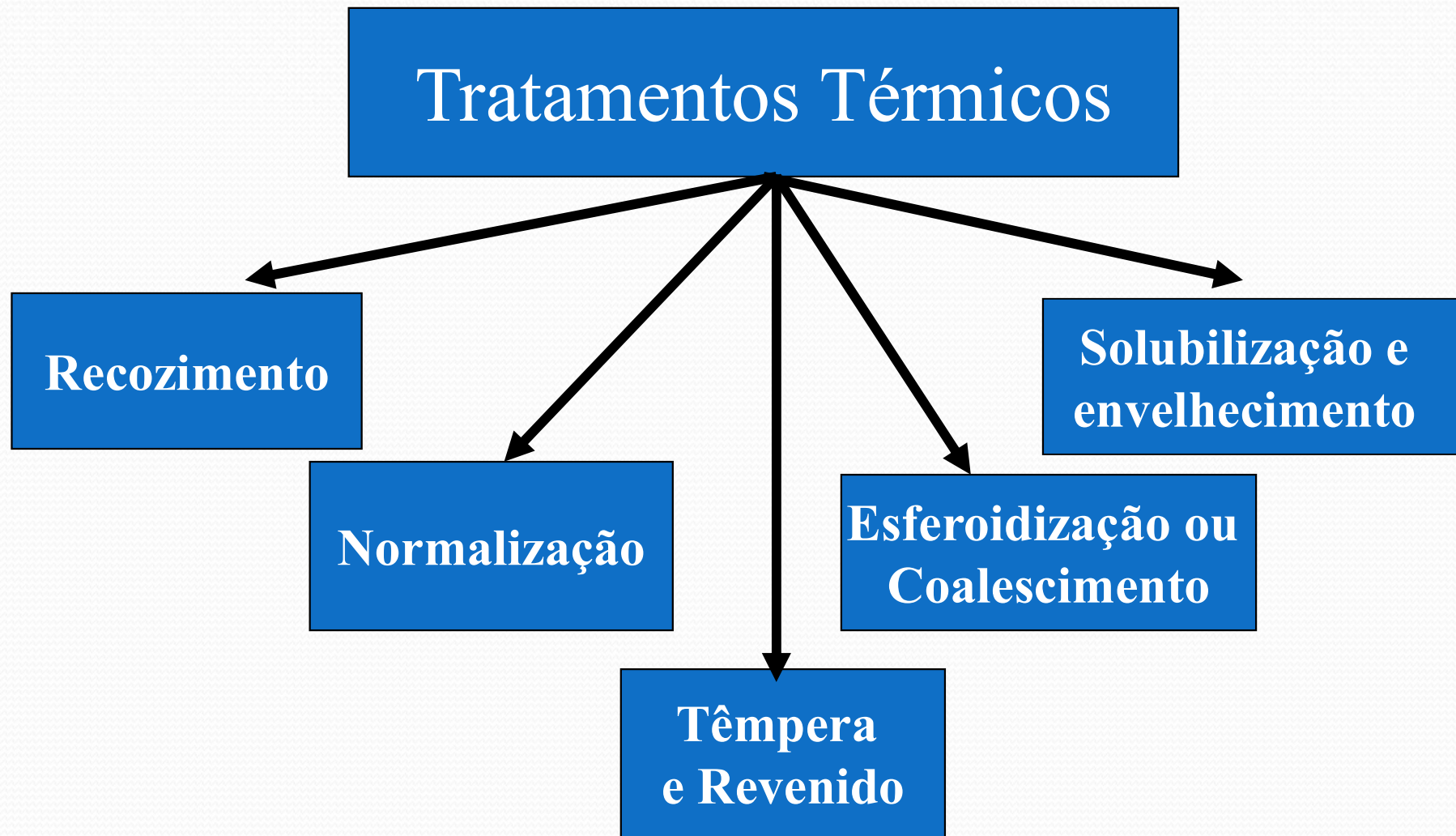
- Depende do tipo de material e da transformação de fase ou microestrutura desejada

Normalmente quanto mais rápido o resfriamento maior a dureza e resistência

Principais Meios de Resfriamento

- Ambiente do forno (+ brando)
- Ar
- Banho de sais ou metal fundido (Pb)
- Óleo
- Água
- Soluções aquosas de sais (+ 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

TIPOS DE RECOZIMENTO

- Recozimento para alívio de tensões (qualquer liga metálica)
- Recozimento para recristalização (qualquer liga metálica)
- Recozimento para homogeneização (para peças fundidas)
- Recozimento total ou pleno (aços)
- Recozimento para esferoidização

Recozimento

➤ APLICAÇÃO

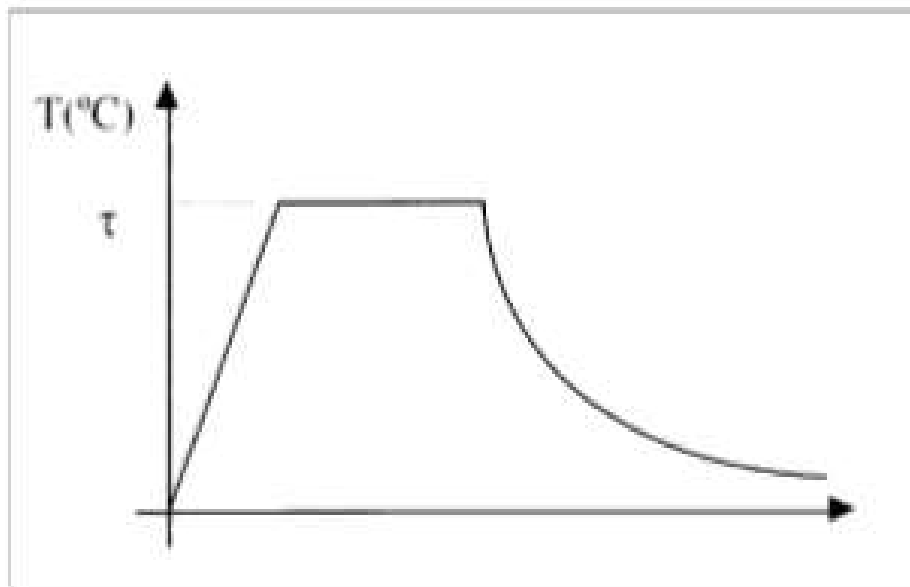
- Peças que necessitem ser retemperadas por um motivo qualquer;
- Recuperação da usinabilidade em peças que sofreram têmpera ou deformação a frio;
- Recuperação da deformabilidade em peças que sofreram diversas etapas de conformação a frio
- Recozimento para recristalização.
- Homogeneização de estruturas brutas de fundição ou mal homogeneizadas;
Homogeneização de estruturas soldadas;
- Preparação para conformação a frio;
- Recuperação e homogeneização de componentes forjados a quente.

- A máxima trabalhabilidade do aço é obtida com o Recozimento para Esferoidização

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

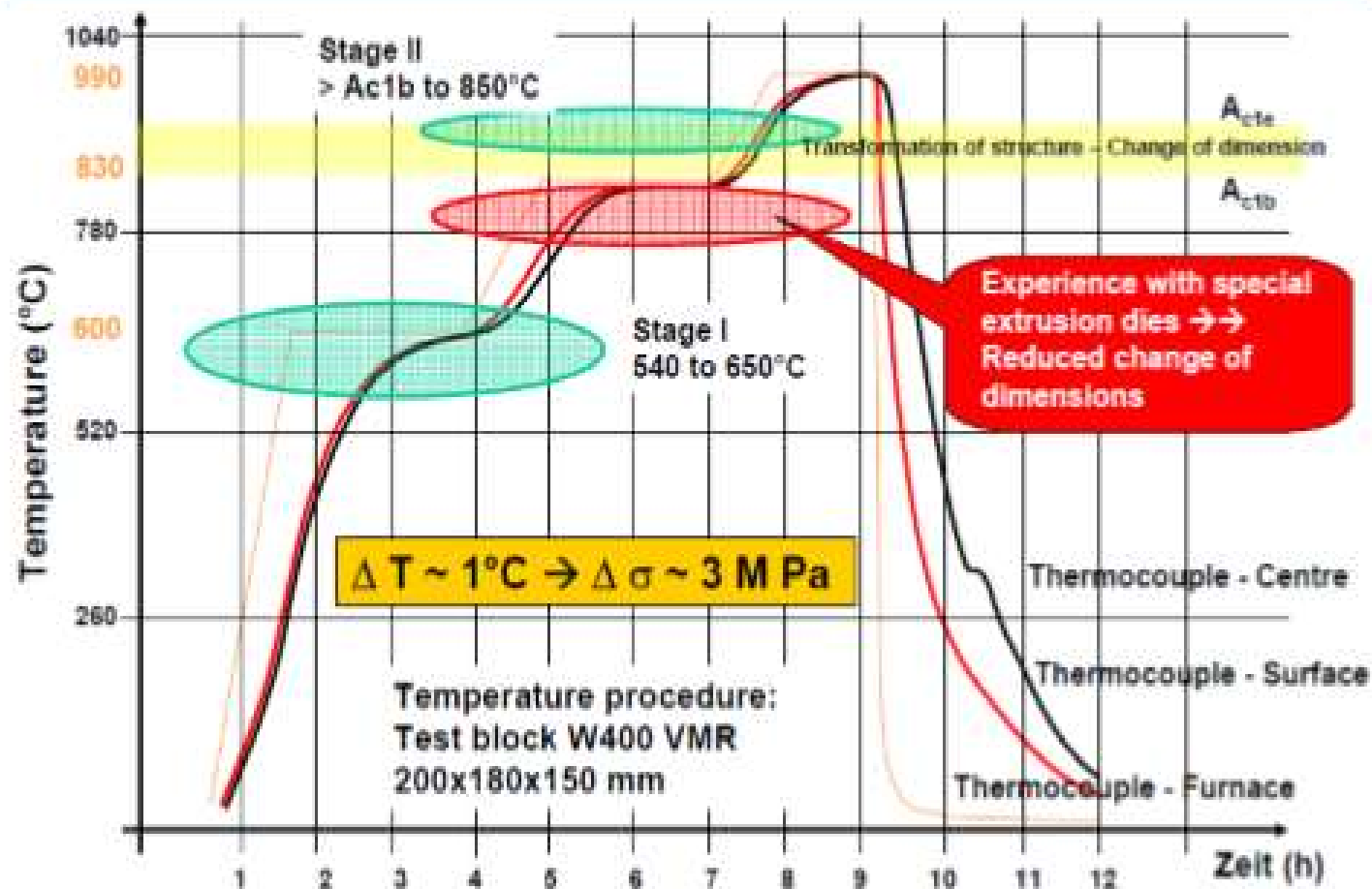
Alívio de Tensões



➤ **Função:** Redução das tensões mecânicas causadas por solda, usinagem, conformação a frio e fundição.

- **Aquecimento:** lento, para impedir que novas tensões sejam geradas
- **Temperatura:** 500 a 650°C
- **Resfriamento:** Deve-se evitar velocidades muito elevadas (distorções) ou muito lentas (fragilização ao revenido).

Alívio de Tensões no pré-aquecimento



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)

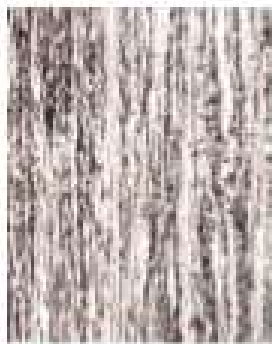
□ Resfriamento

Lento (ao ar ou ao forno)

Recozimento

A recristalização é iniciada a uma temperatura mais baixa e completada numa faixa mais estreita de temperatura quando:

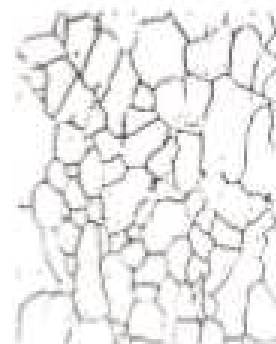
- O encruamento prévio tiver sido mais intenso
- Tamanho de grão original for menor
- O metal for mais puro
- O tempo de recozimento for mais longo



(1)



(2)

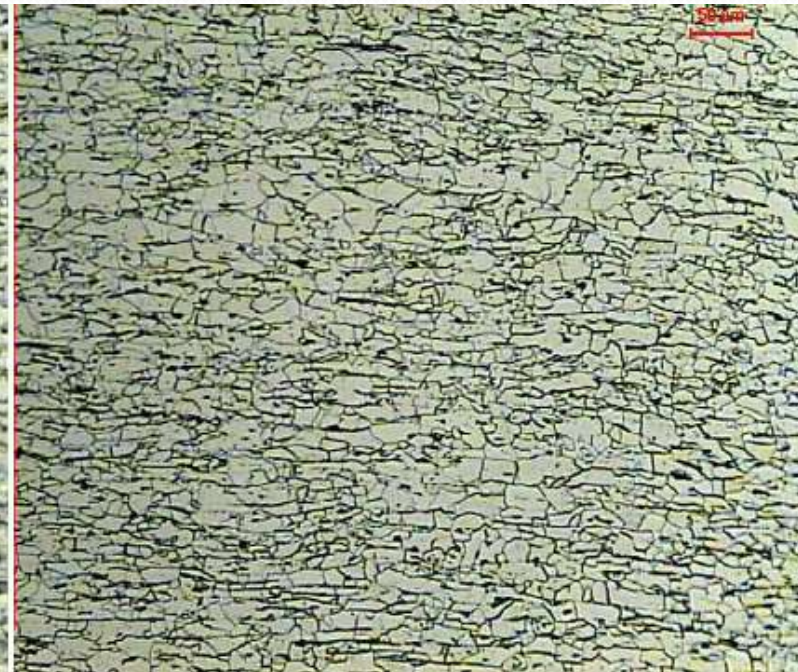
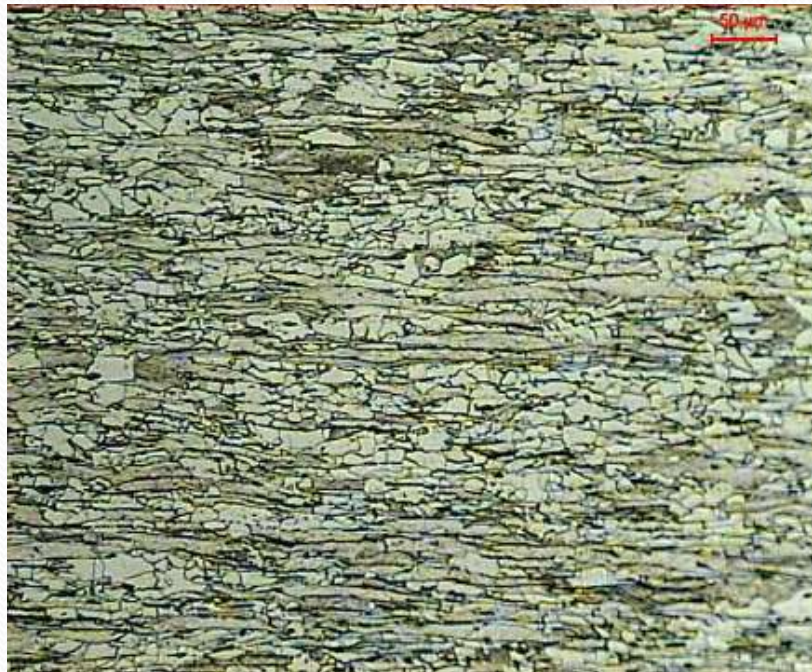
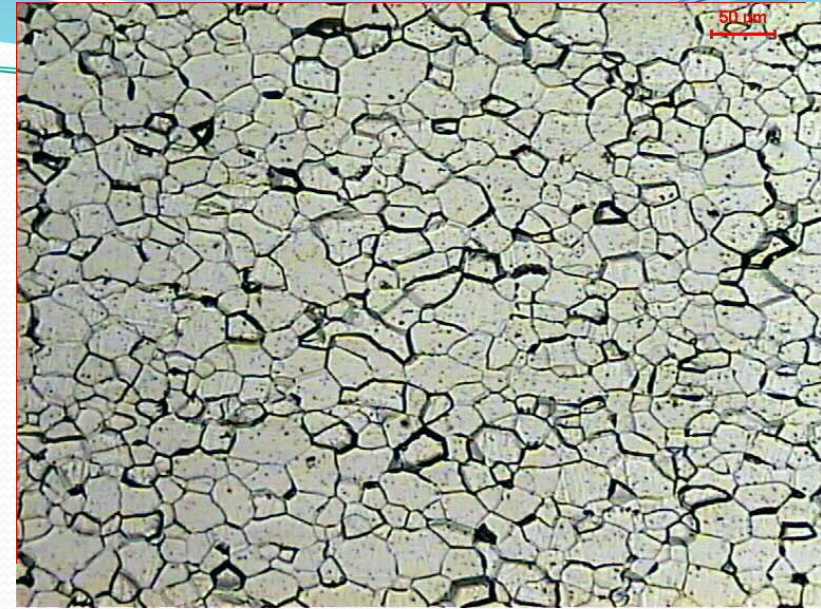
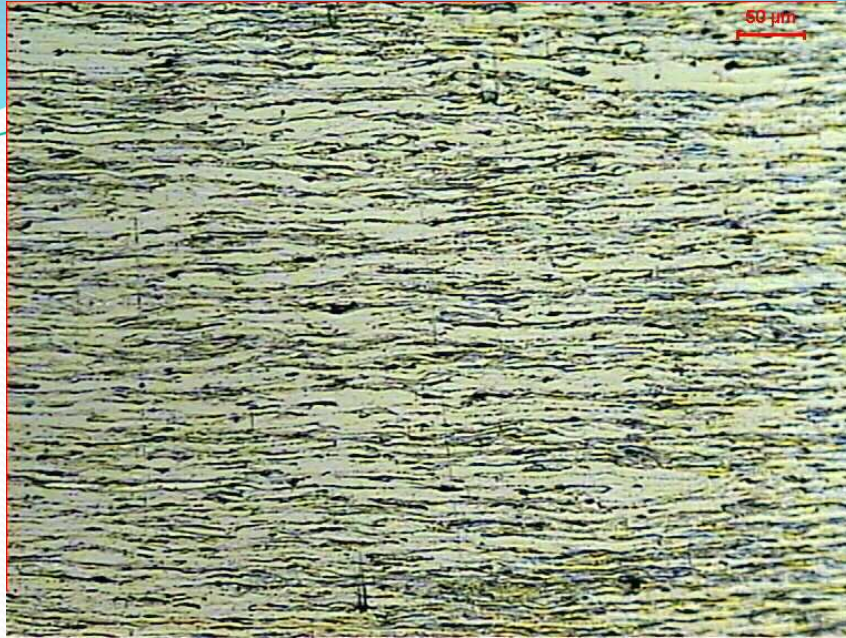


(3)

Micrografias de um mesmo
aço baixo carbono

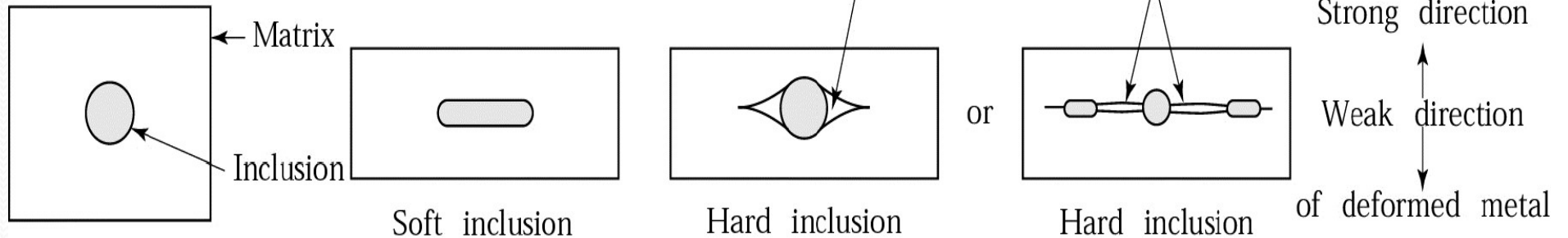
- Bruto de laminação
- Parcialmente recozido
- Completamente recozido

Ataque de Marshall-1000x



Deformação de inclusões duras e moles

(a) Before deformation (b) After deformation



Recozimento

■ Fatores que afetam o recozimento

- Encruamento prévio
- Tamanho de grão inicial
- Pureza do metal

■ O tamanho de grão recristalizado é menor quando:

- Menor a temperatura
- Mais curto o tempo em temperatura
- Mais intenso o encruamento prévio
- Maior quantidade e melhor distribuição de partículas insolúveis



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)

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)

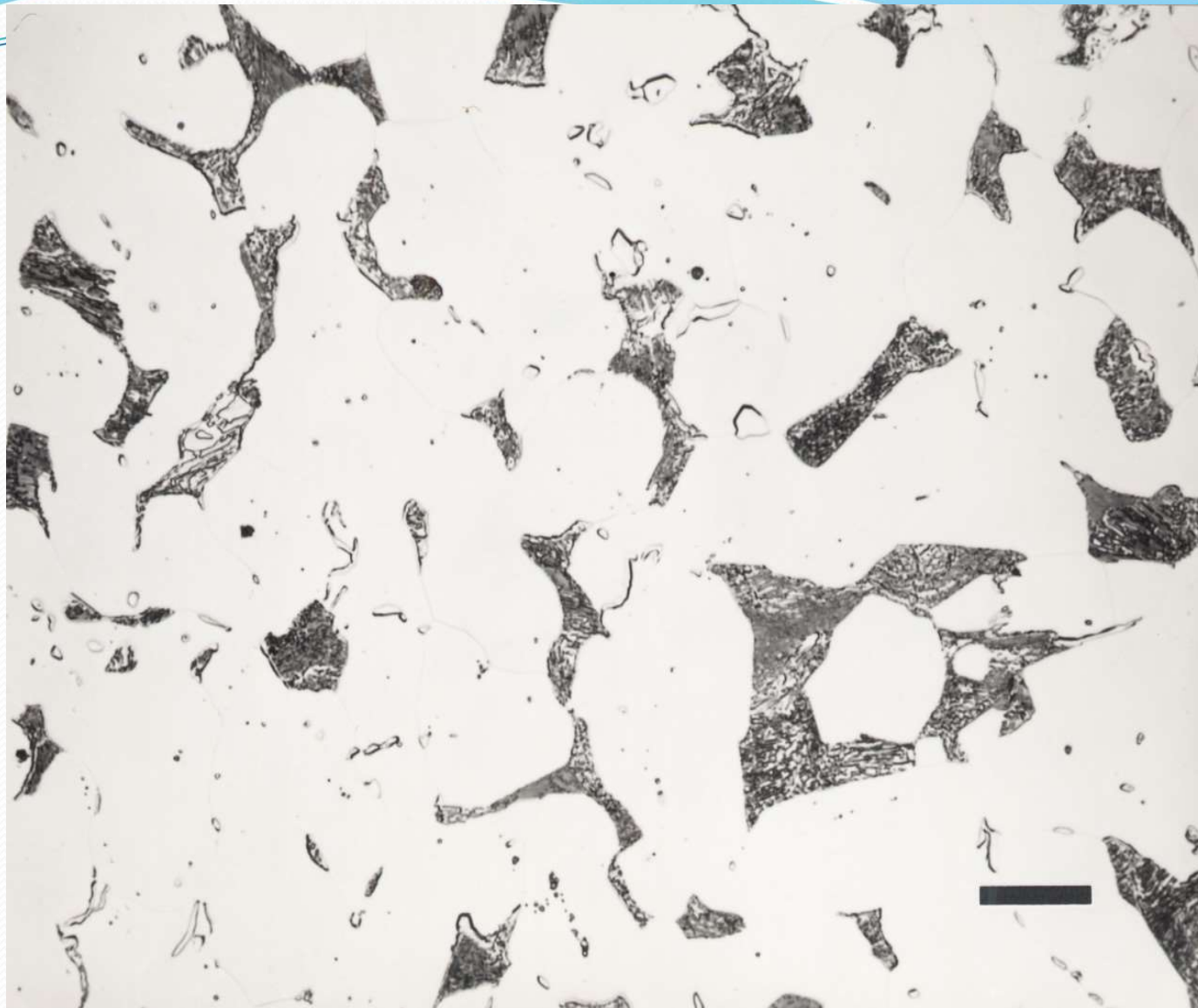
RECOZIMENTO TOTAL OU PLENO

□ Constituintes estruturais resultantes

Hipoeutetóide → ferrita + perlita
grosseira

Eutetóide → perlita grosseira

Hipereutetóide → cementita + perlita
grosseira



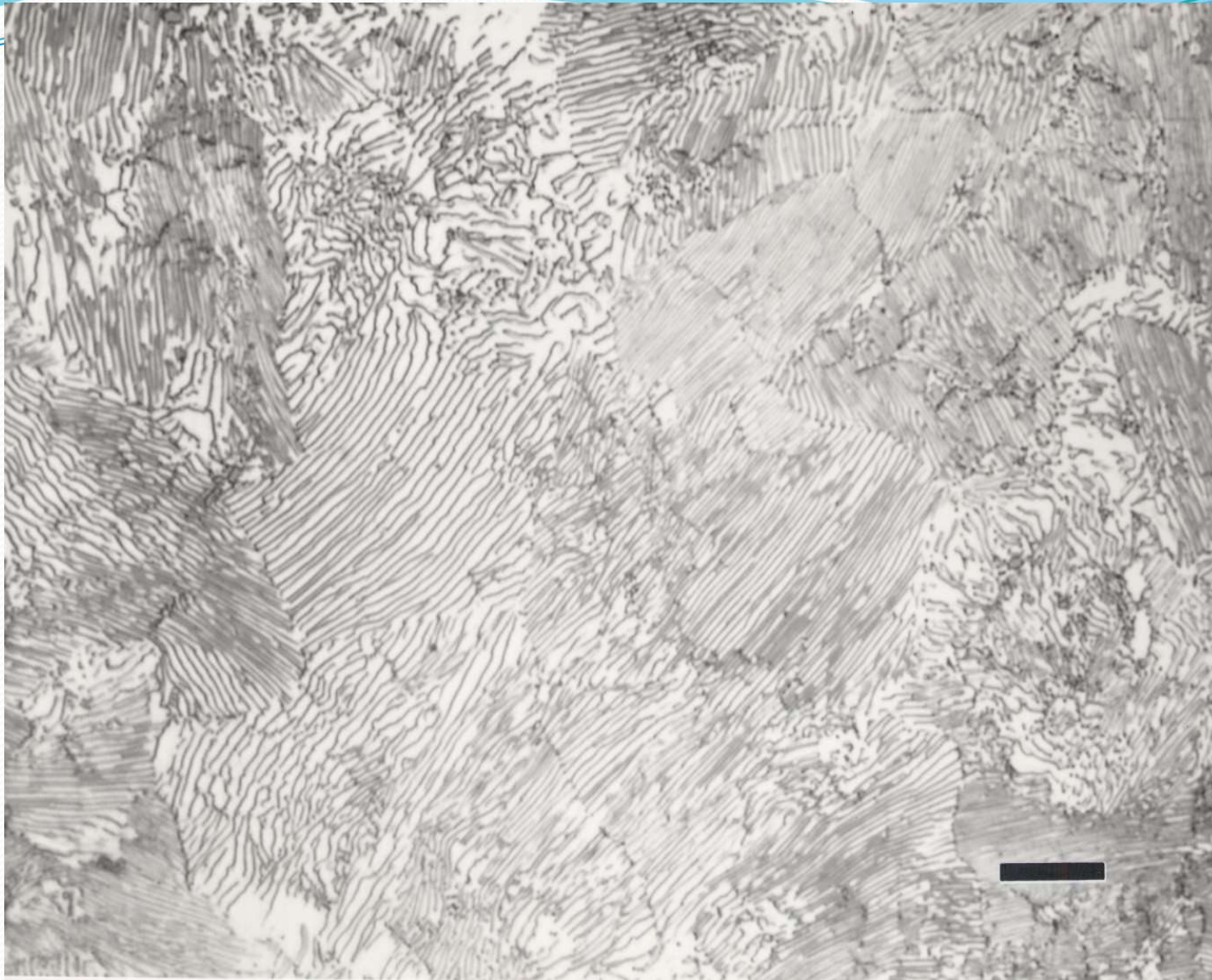
Ferrite (white) and pearlite in a hot-rolled Fe – 0.2% C binary alloy. Picral etch. Magnification bar is 20 μm in length.



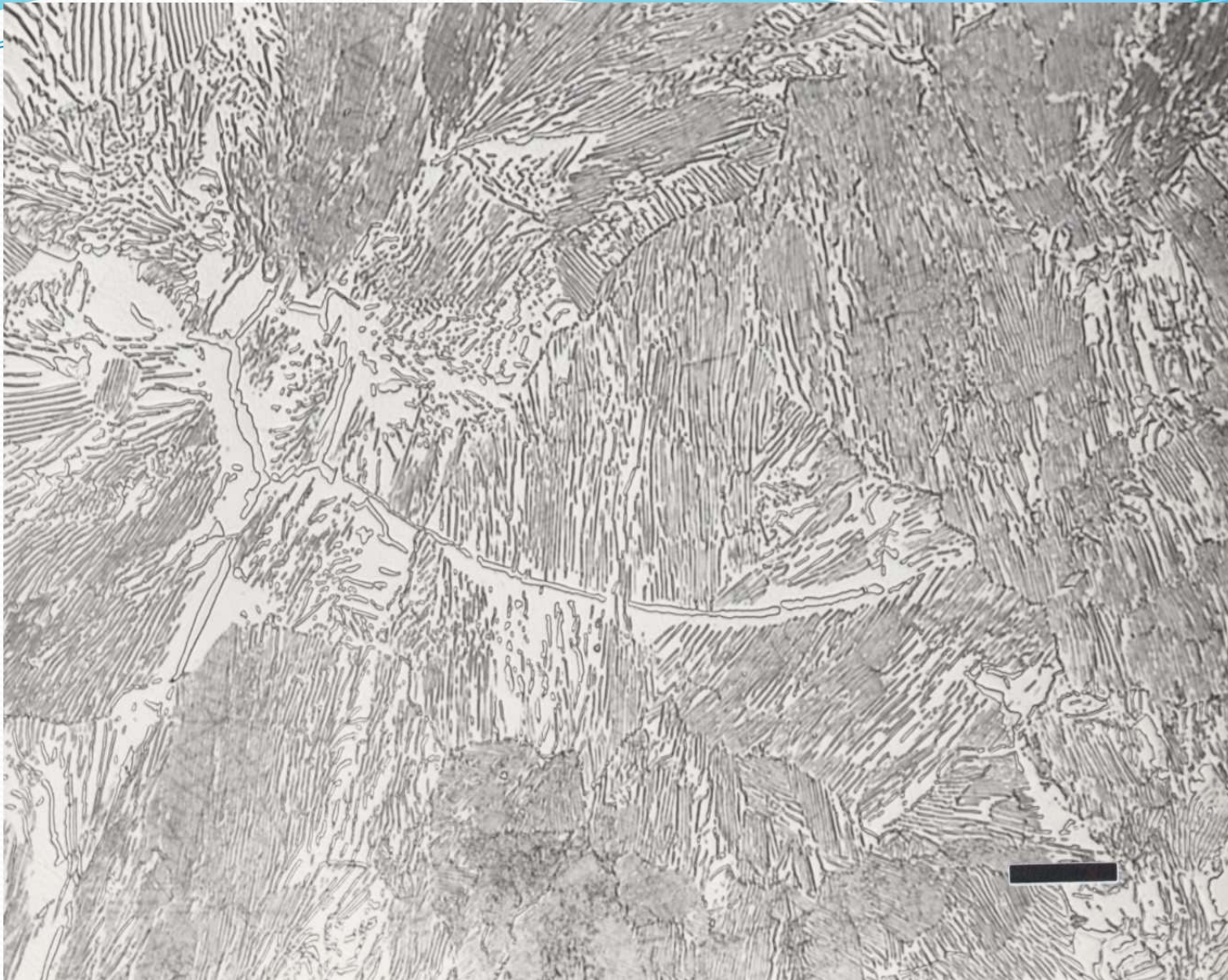
Ferrite (white) and pearlite in a hot-rolled Fe – 0.4% C binary alloy. Picral etch. Magnification bar is 20 μm in length.



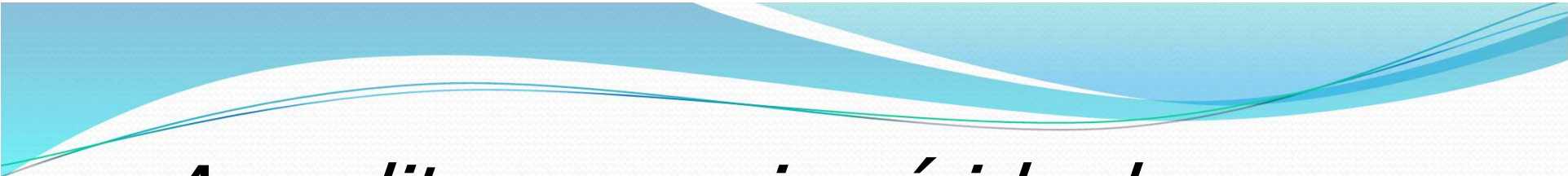
Ferrite (white) and pearlite in a hot-rolled Fe – 0.6% C binary alloy. Picral etch. Magnification bar is 20 μm in length.



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.**

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

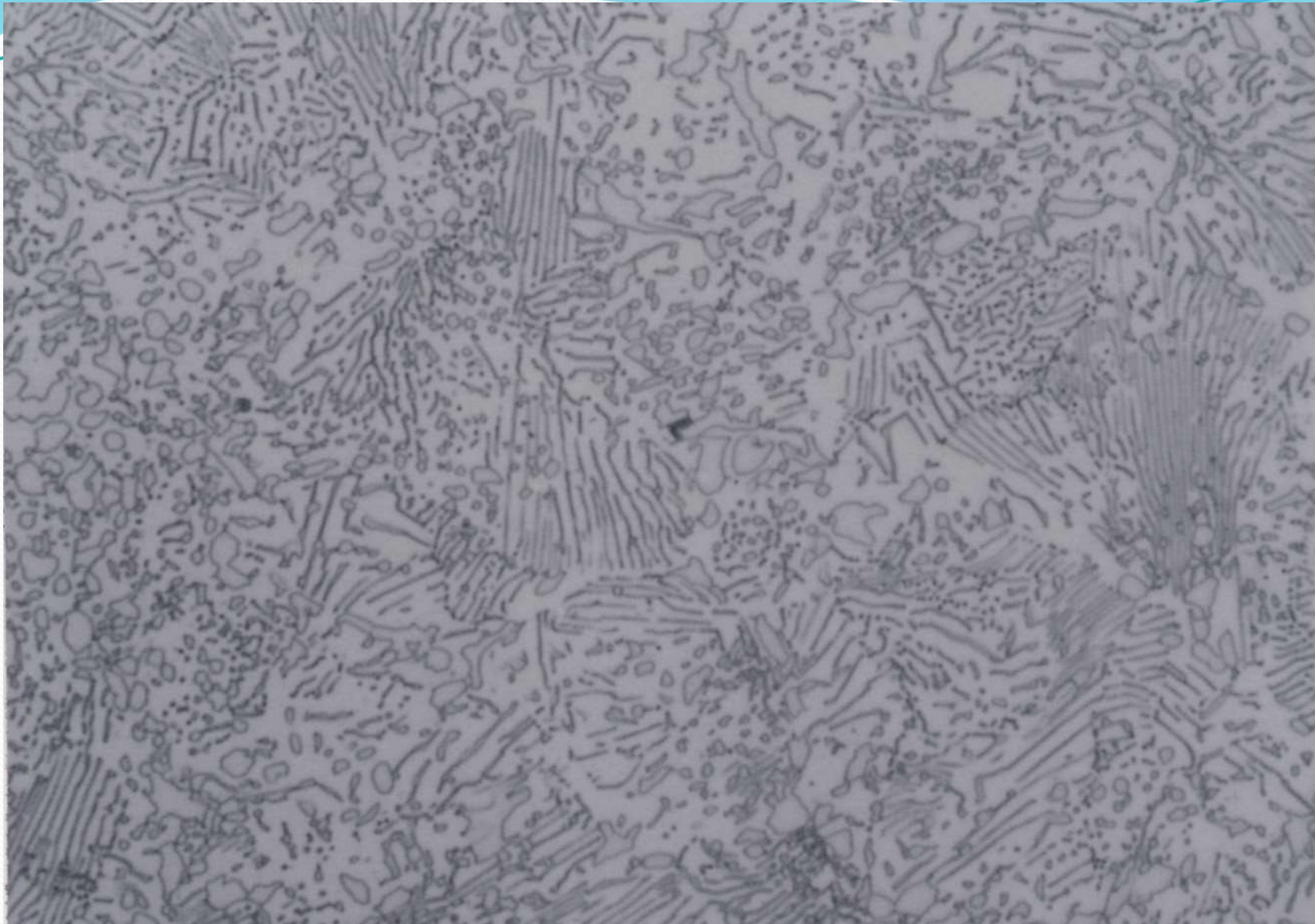
** Para melhorar a usinabilidade dos aços alto carbono recomenda-se a esferoidização*

ESFEROIDIZAÇÃO OU COALESCIMENTO

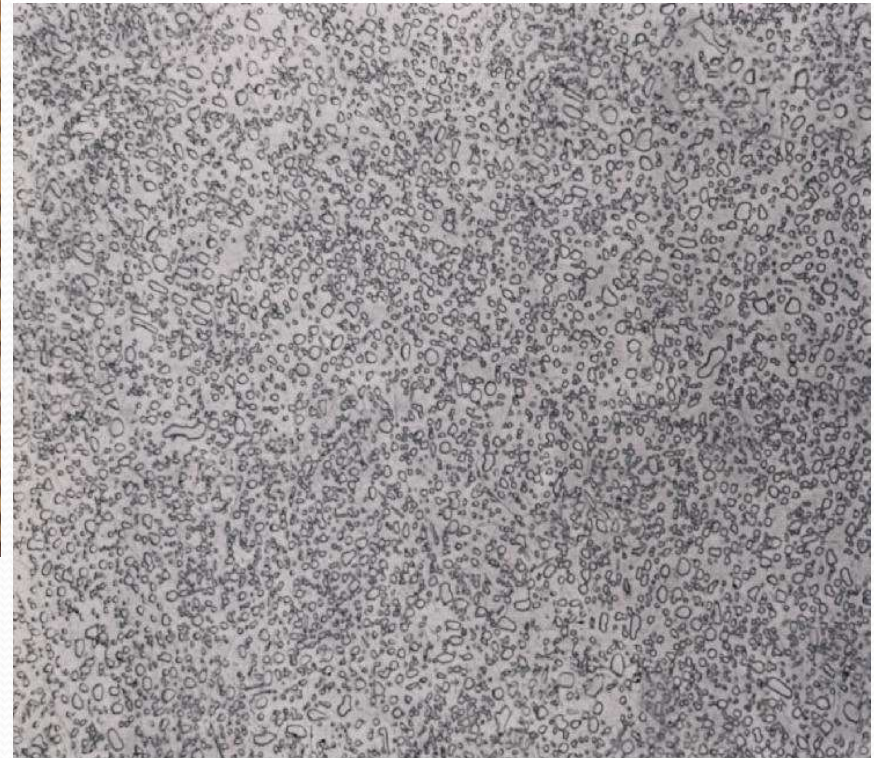
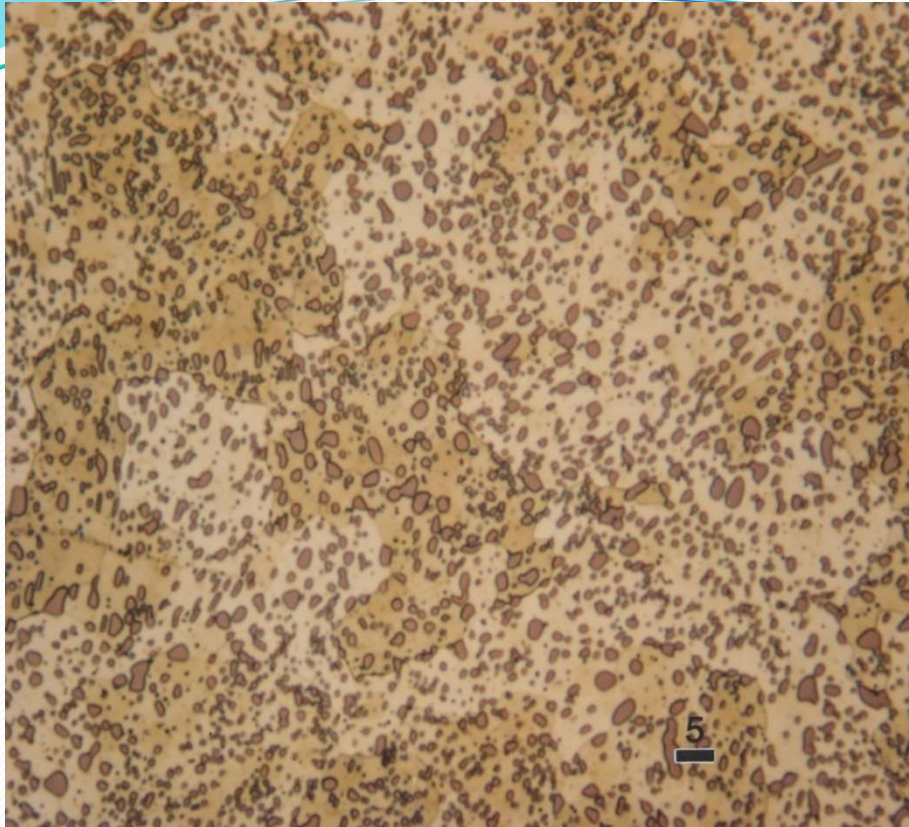
Objetivo

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.

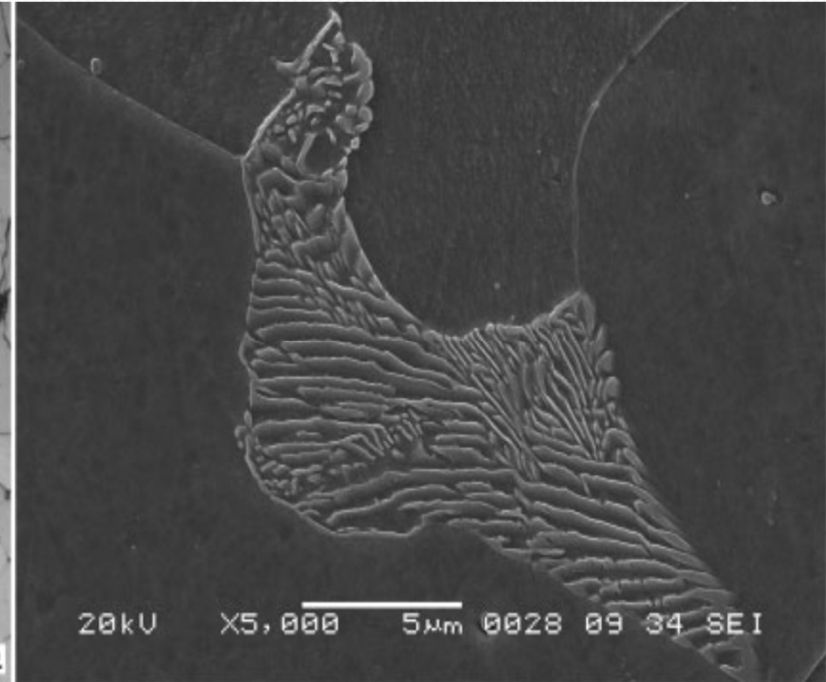
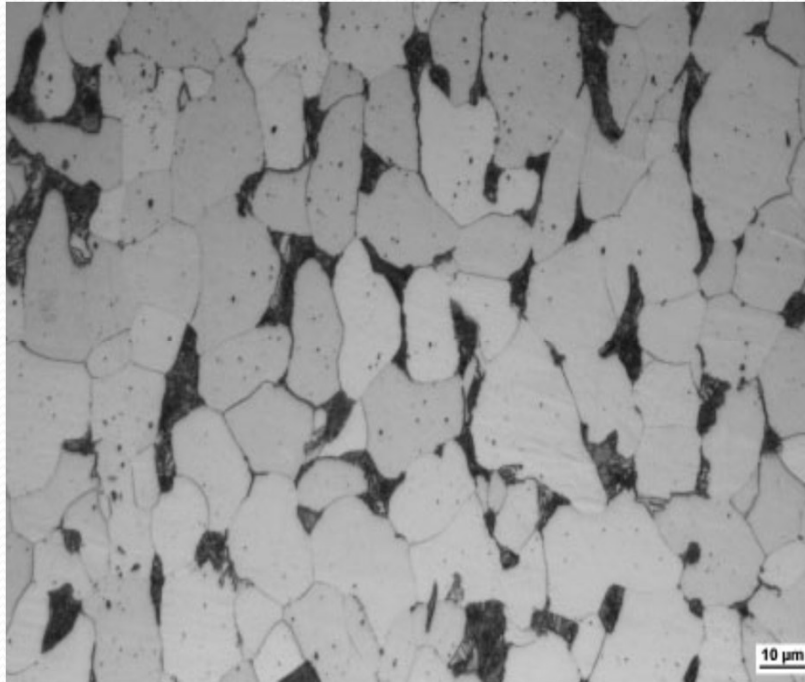


ESFEROIDIZAÇÃO OU COALESCIMENTO

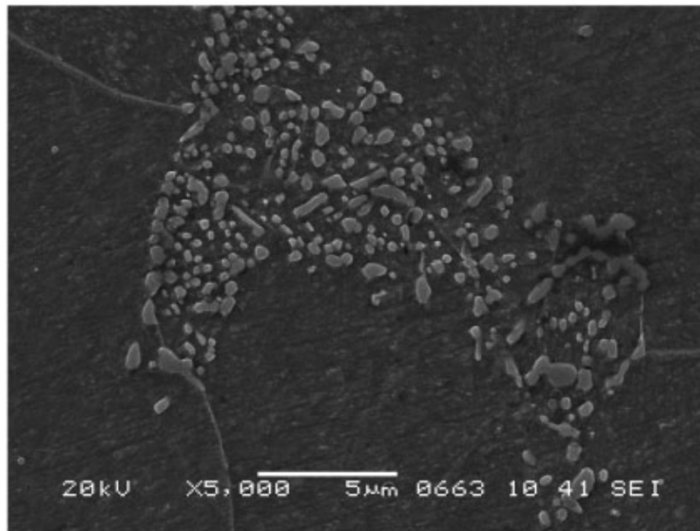
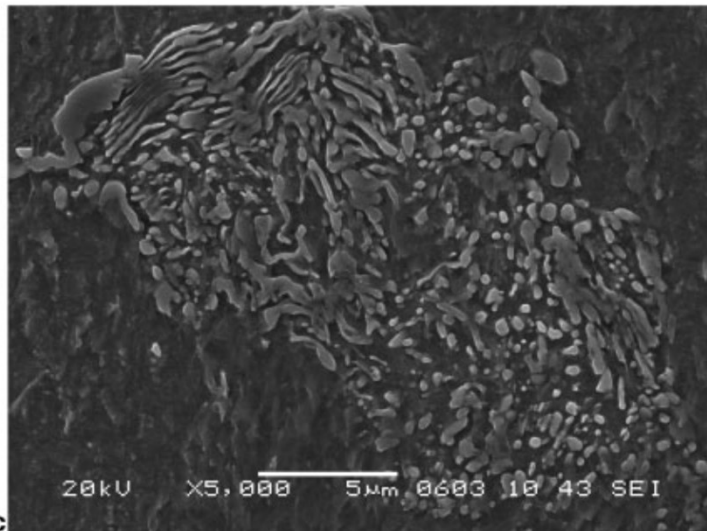
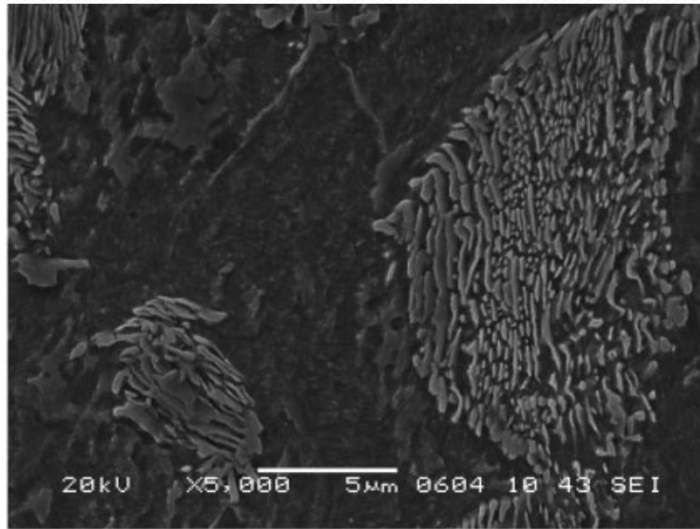
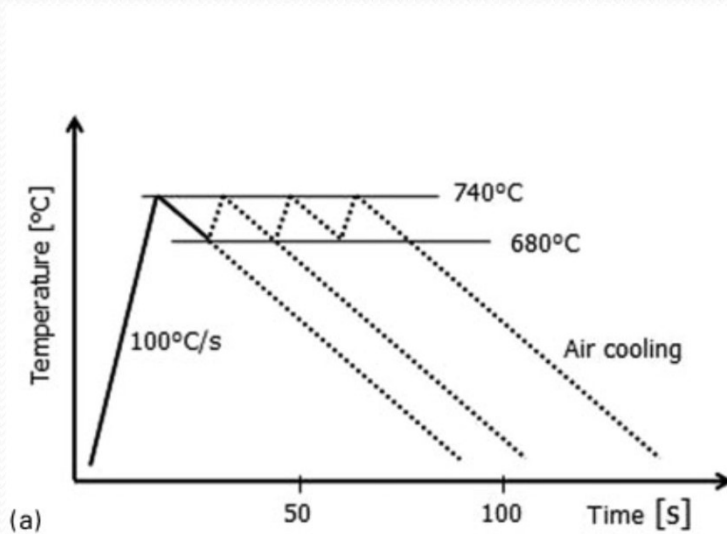
Aquecimento por tempo prolongado a uma temperatura logo abaixo da linha inferior da zona crítica,

Aquecimento e resfriamentos alternados entre temperaturas que estão logo acima e logo abaixo da linha inferior da zona crítica.

Esferoidização



Esferoidização



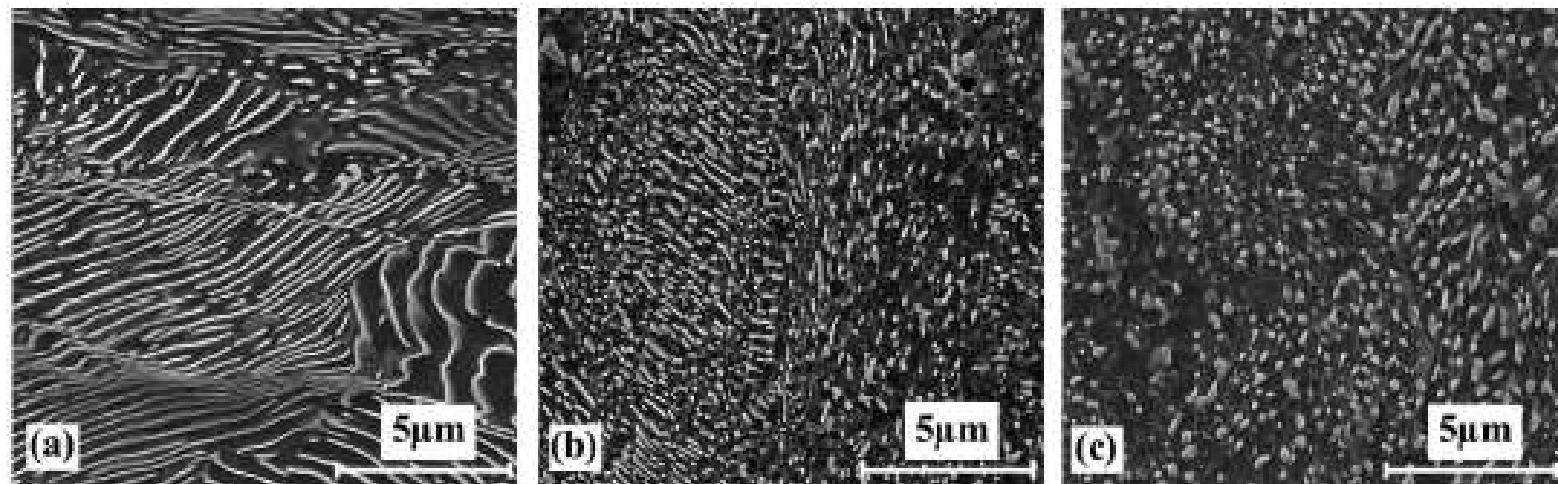


Fig. 1. Electron micrographs of the samples IS (a), I5 (b) and I10 (c) showing typical microstructure observed during spheroidization step. Secondary electron mode pictures, magnification: 1500 $\times$. These pictures represent around 4% of the area of the original images.

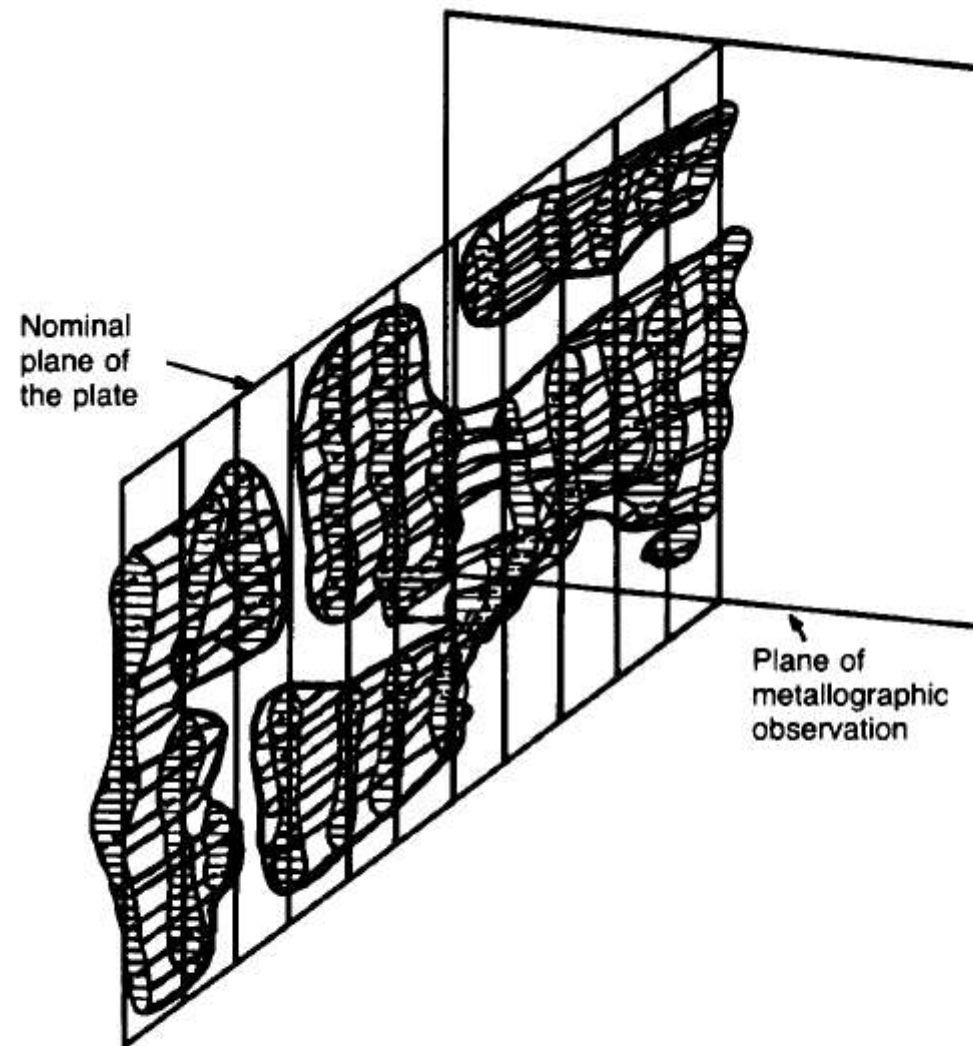
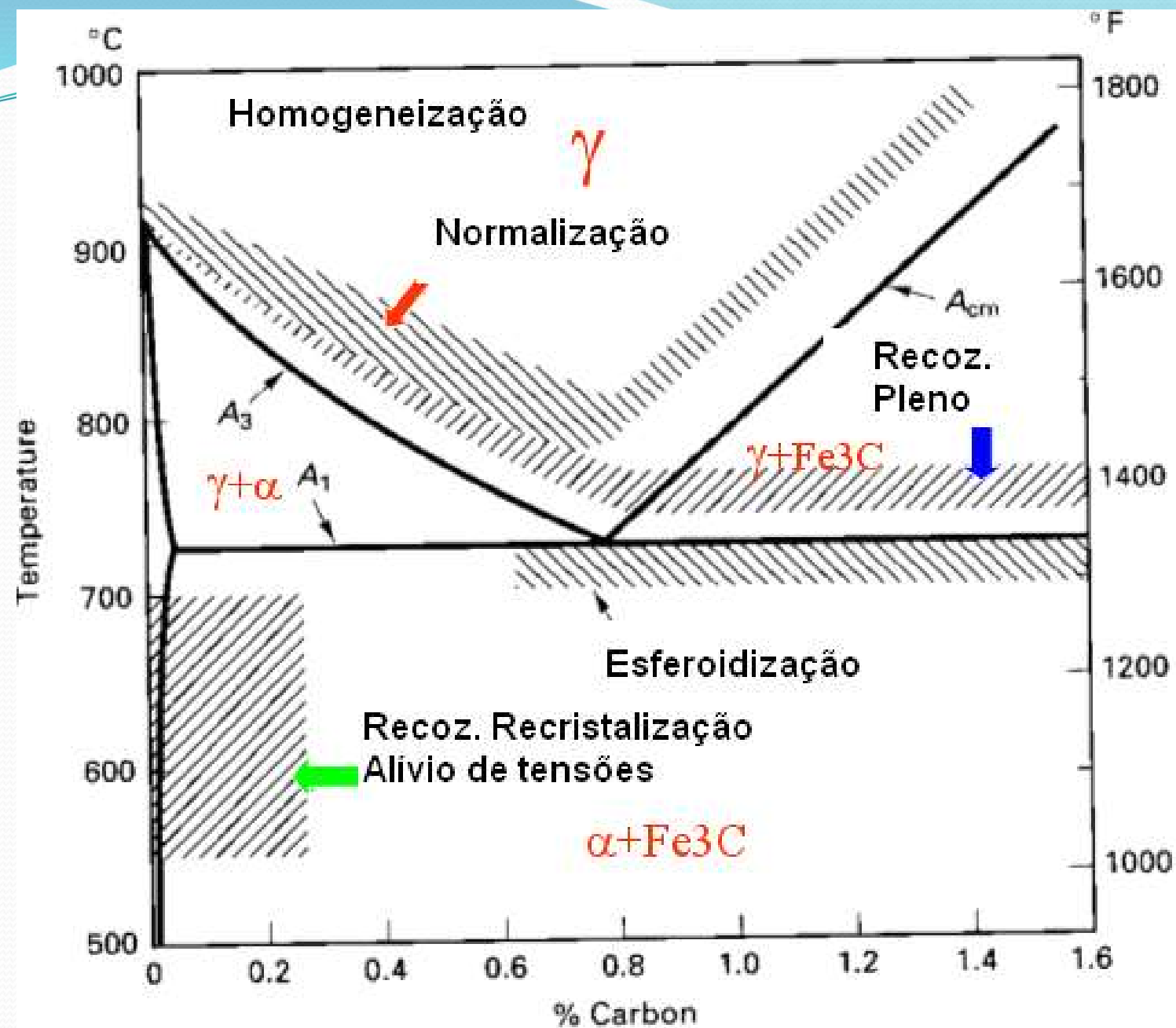


Fig. 13.6 Representation of partial spheroidization of a cementite plate or lamella in coarse pearlite in a high Si steel annealed for 150 h at 700 °C (1290 °F). Source: Ref 13.10



NORMALIZAÇÃO

- **Temperatura**

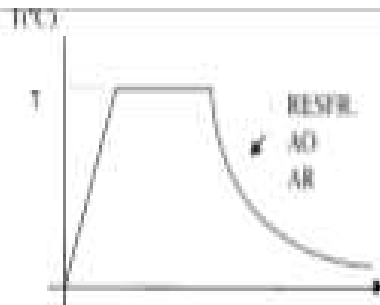
Hipoeutetóide e eutetóide → 30° C acima do recozimento pleno

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

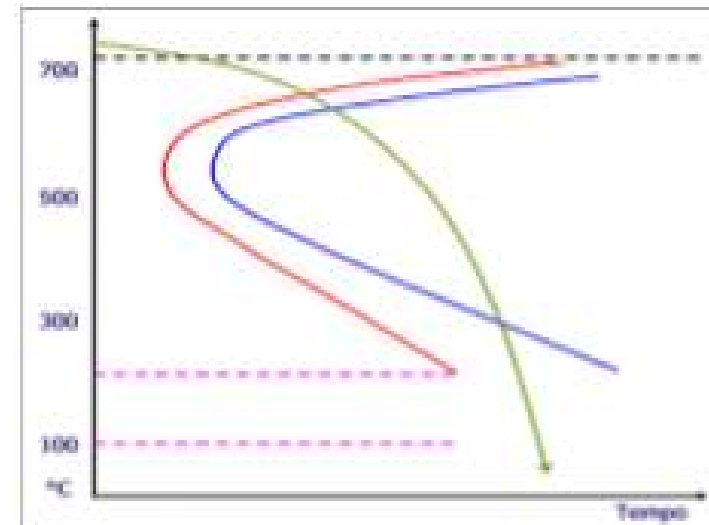
- **Resfriamento**

Ao ar (calmo ou forçado)

Normalização



AÇO (AISI)	TEMPERATURA t (°C)	DUREZA MÉDIA (HB)
1020	870	111
1040	900	178
1060	900	229
4140	870	102
4340	870	161
5140	870	229
5160	860	265
6750	870	265



DEFINIÇÃO

- É o tratamento térmico através do qual um aço, após austenitização e homogeneização química, é resfriado ao ar calmo.



FUNÇÃO

- Homogeneizar quimicamente o aço.
- Refinar e homogeneizar a estrutura de aços forjados, soldados ou fundidos.
- Fornecer a estrutura ideal para a têmpera.

Normalização

➤ APLICAÇÃO

- Melhorar as condições de usinagem;
- Modificar e refinar estruturas dendríticas fundidas, fornecendo melhores condições para a têmpera;
- Eixos flangeados forjados, onde a flange conformada apresenta granulação diferente do restante do eixo;
- Componentes que necessitem de estabilidade estrutural;
- Incremento de dureza (formação de perlita fina), sem os inconvenientes da têmpera. É limitado à durezas relativamente baixas.

NORMALIZAÇÃO

- **Constituintes estruturais resultantes**

Hipoeutetóide → ferrita + perlita fina

Eutetóide → perlita fina

Hipereutetóide → cementita + perlita fina

* Em relação ao recozimento a microestrutura é mais fina, apresenta menor quantidade da fase pro-eutetóide e melhor distribuição de carbonetos

Aço SAE 4340 (Ni – Cr – Mo)

Tratamento térmico	Limite Resist. Tração MPa	Tensão Escoam. MPa	Alongam. %	Redução Área %	Dureza HB
Recoz.					
Normalizado					

1448

972

22

35

217

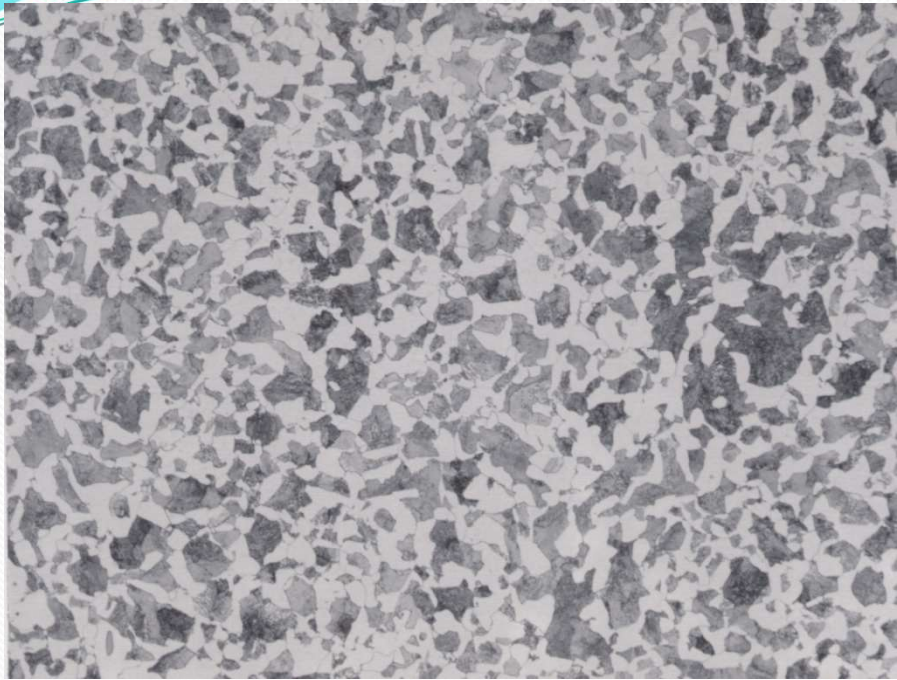
745

470

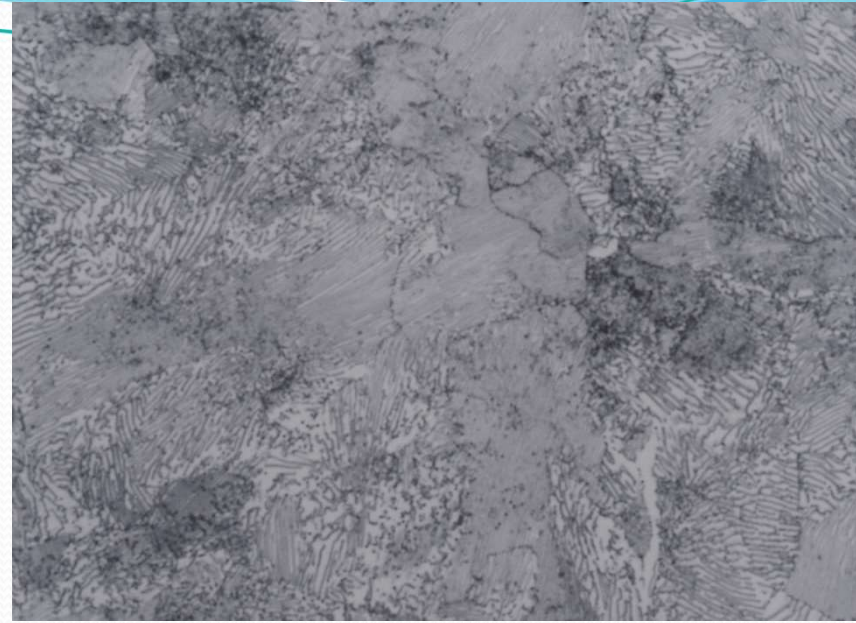
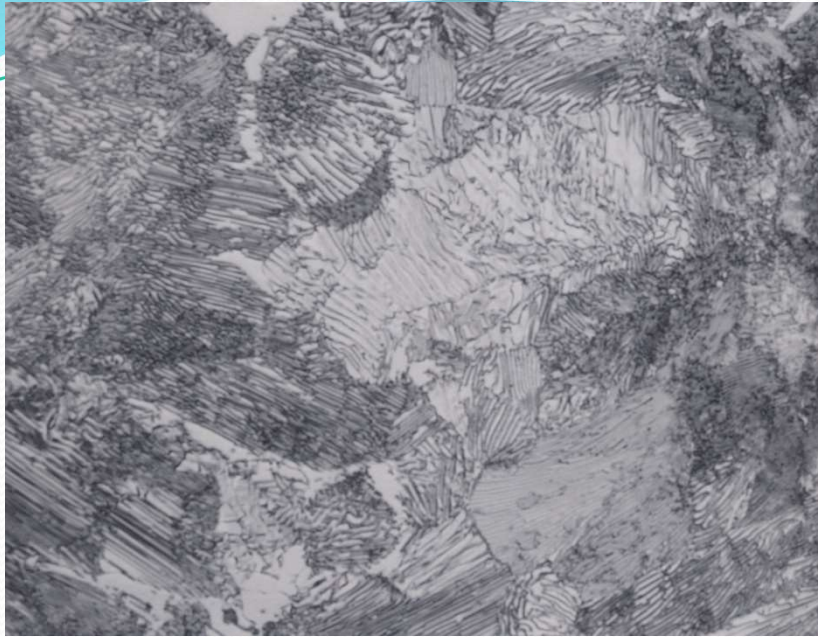
12

50

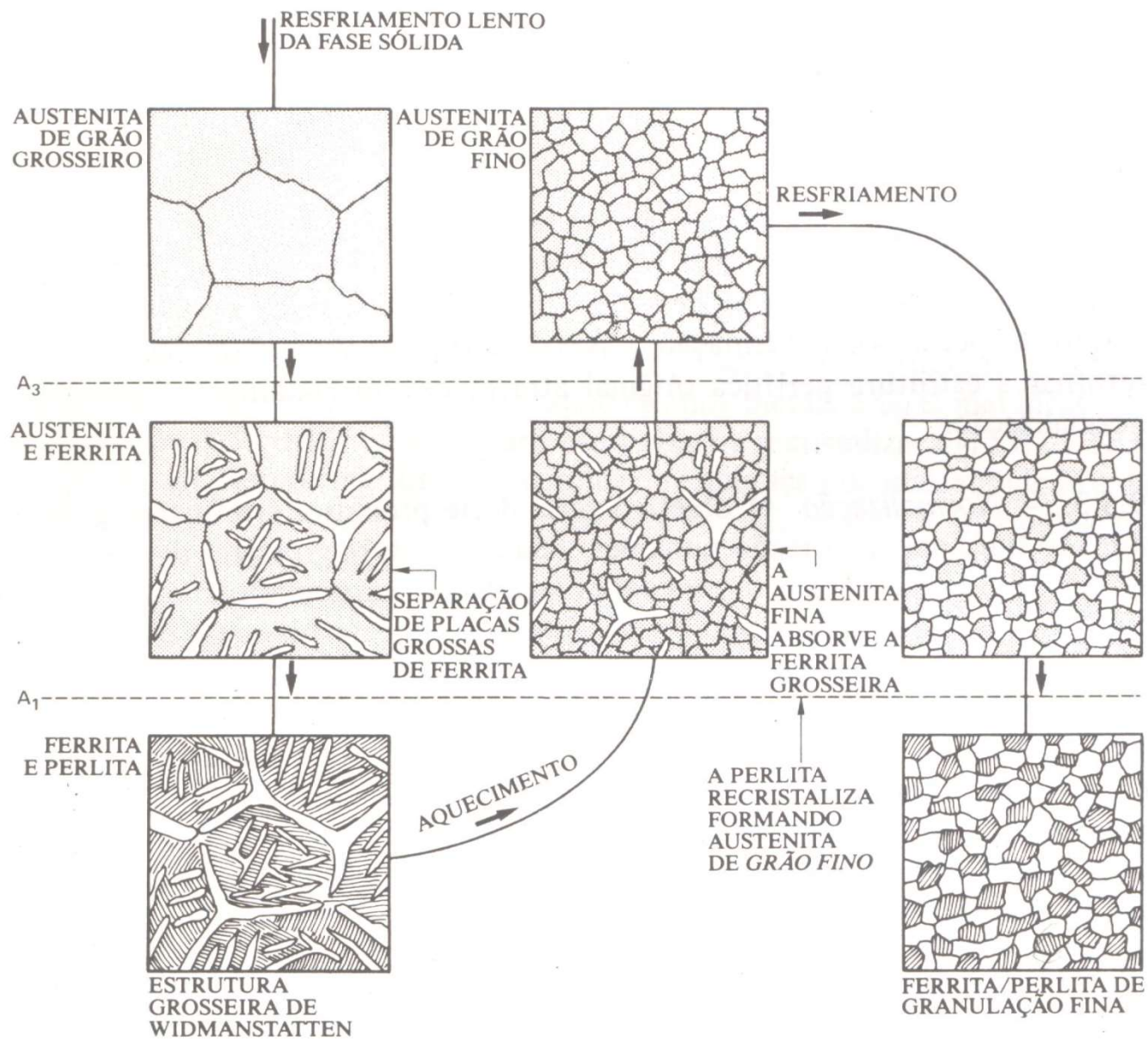
388



Fe – 0.4% C – 0.75% Mn – 0.20%Si



Fe – 0.80% C – 0.21% Mn – 0.22% Si





kaltverformtes
Gefüge



grobkörniges
Gefüge



Perlit Ferrit

Widmannstätten-
sches Gefüge

Normalglühen



normalisiertes Gefüge



O espaçamento interlamelar na perlita depende da velocidade de resfriamento.

Para aumentar a difusão, o espaçamento entre as lamelas diminui, pois se reduz distância que o C percorre para se distribuir entre a ferrita e a cementita.

Em resumo:

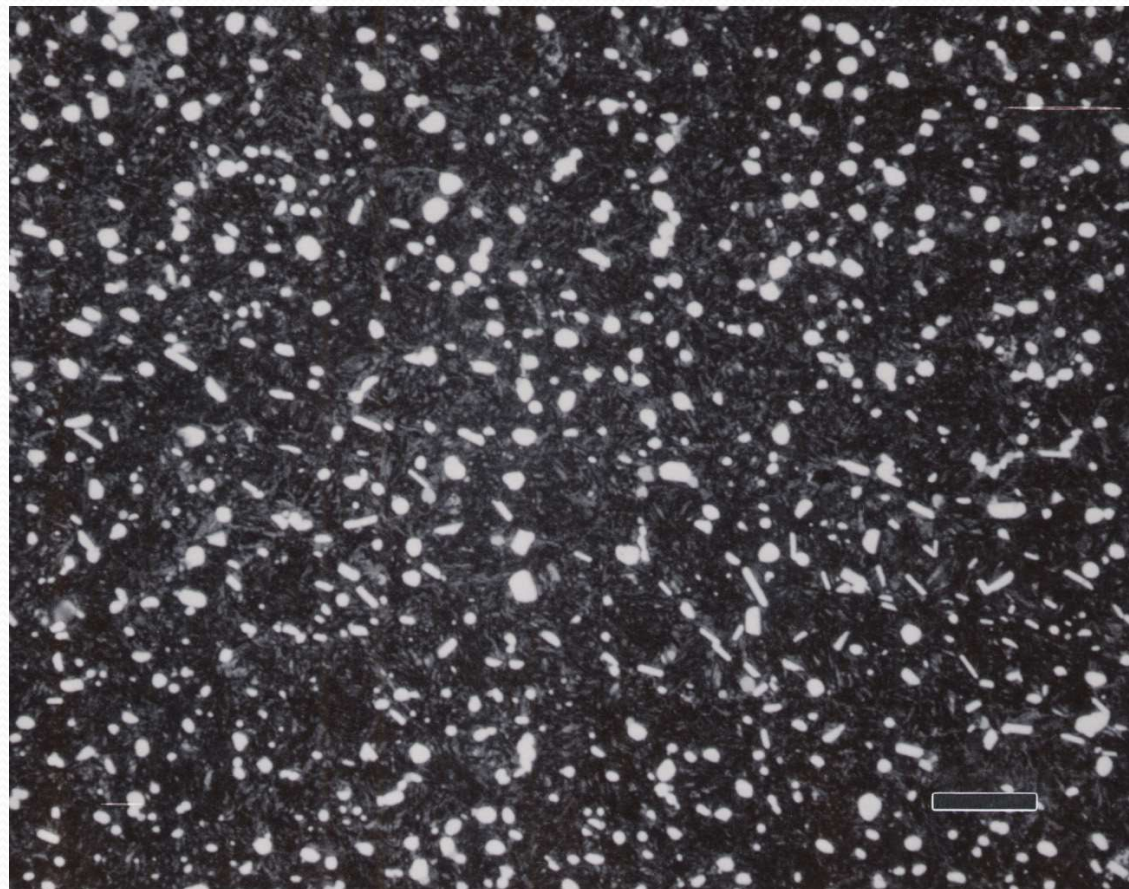
O aumento da velocidade de resfriamento conduz a estruturas com mais perlita (hipo) e cada vez mais finas, tanto dos grãos ferríticos como da perlita .

Assim o controle da velocidade de resfriamento é então um meio de controlar a microestrutura dos aços.

Influência dos elementos de liga

- Alguns deles formam carbonetos bastante duros na microestrutura, como por ex.: Cr_7C_3 , W_2C , Mo_2C e VC .
- Outros formam carbonetos complexos contendo Fe e outros metais. Por exemplo, M_6C é um carboneto complexo e pode representar por exemplo $\text{Fe}_4\text{W}_2\text{C}$ e $\text{Fe}_4\text{Mo}_2\text{C}$ (M representa o total de átomos metálicos).

Residual alloy carbide (white particles) and a tempered martensite matrix in P/M M42 high speed steel (Fe – 1.1% C – 8.25% Co – 9.5% Mo – 1.5% W – 3.75% Cr – 1.15% V) at 68 HRC. Etched with Vilella's reagent. Magnification bar is 10 μm in length

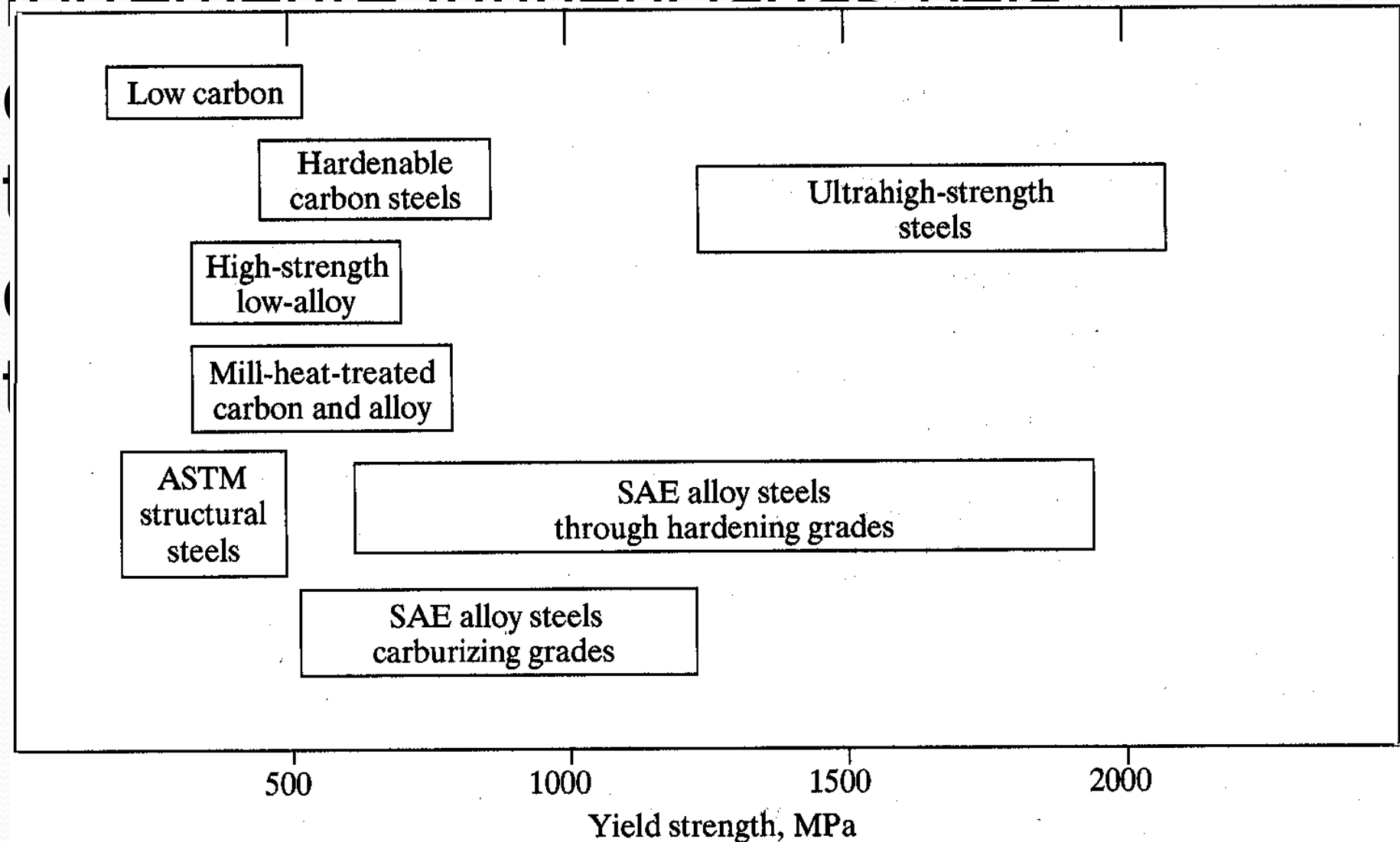


Tendência de formação de carbonetos

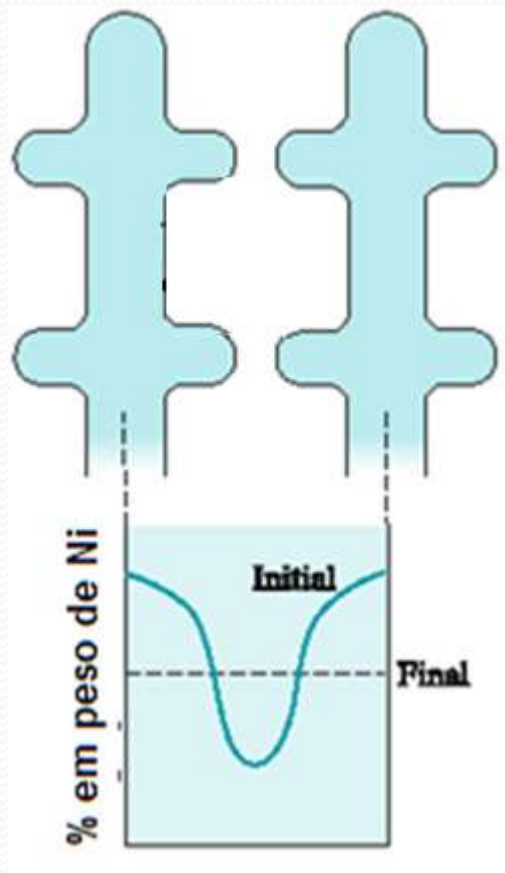
ELEMENT	PROPORTION DISSOLVED IN FERRITE ←	PROPORTION PRESENT AS CARBIDE →	ALSO PRESENT IN STEEL AS
NICKEL			Ni Al ₃
SILICON			—
ALUMINIUM			NITRIDES
MANGANESE			MnS INCLUSIONS
CHROMIUM			—
TUNGSTEN			—
MOLYBDENUM			—
VANADIUM			NITRIDES
TITANIUM			—
NIOBIUM			—
COPPER	SOL. 0.3% MAX		Cu GLOBULES IF > 0.3%
LEAD			Pb GLOBULES

Use characteristics	Alloying element										
	Cr	Ni	Al	W	V	Co	Mo	Si	Mn	S	P
Tensile strength	+	+		+	+	+	+	+	+		+
Yield stress	+	+		+	+	+	+	+	+		+
Notched impact strength	-		-		+	-	+	-		-	-
Wear resistance	+	-		+	+	+	+	-	-		
Heat resistance	+	+		+	+	+	+	+			
Corrosion resistance	+				+					-	
Hardness temperature	+		+	+	+	+	+	+	-		
Hardenability, ability to temper	+	+		+	+	+	+	+	+		
Ability to nitrate	+		+	+	+		+	-	+		

As propriedades mecânicas finais são fortemente influenciadas pela



Segregação



Microsegregação pode ser também conhecida como segregação interdendrítica, ocorrendo em pequenas distâncias entre pequenos braços dendríticos.



O centro das dendritas, que representam o primeiro sólido a se formar são ricos no elemento de mais alto ponto de fusão da liga.

As regiões entre as dendritas são mais ricas no elemento de menor ponto de fusão, uma vez que essas regiões representam o último líquido a se resfriar.

A composição e propriedades diferirão de uma região para outra, promovendo fundidos de menor qualidade.



Para reduzir a segregação pode ser feito um tratamento térmico de homogeneização.

O aquecimento é feito abaixo da linha solidus e os átomos de Ni e Cu se difundem.

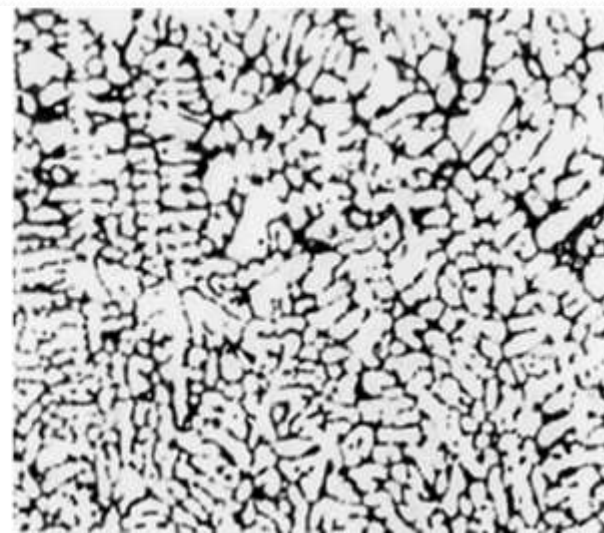
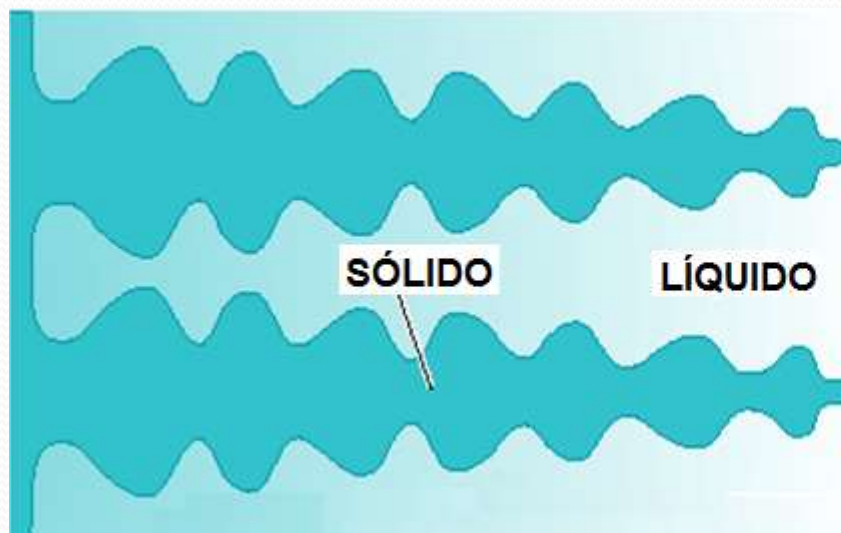
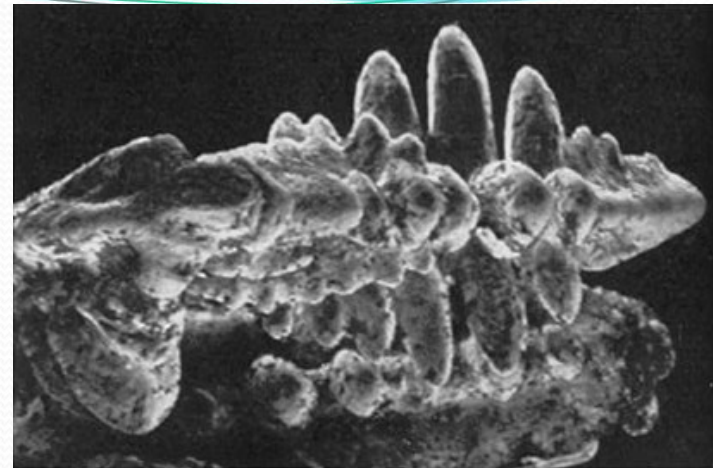
As distâncias de difusão são relativamente curtas e somente umas poucas horas são necessárias para eliminar diferenças em composição.



Macrosegregação ocorre em distâncias maiores, entre a superfície e o centro do lingote.

A macrosegregação não pode ser eliminada por tratamento térmico de homogeneização, pode ser somente reduzida por trabalho a quente.

→ Direção de crescimento



- **Bandeamento**

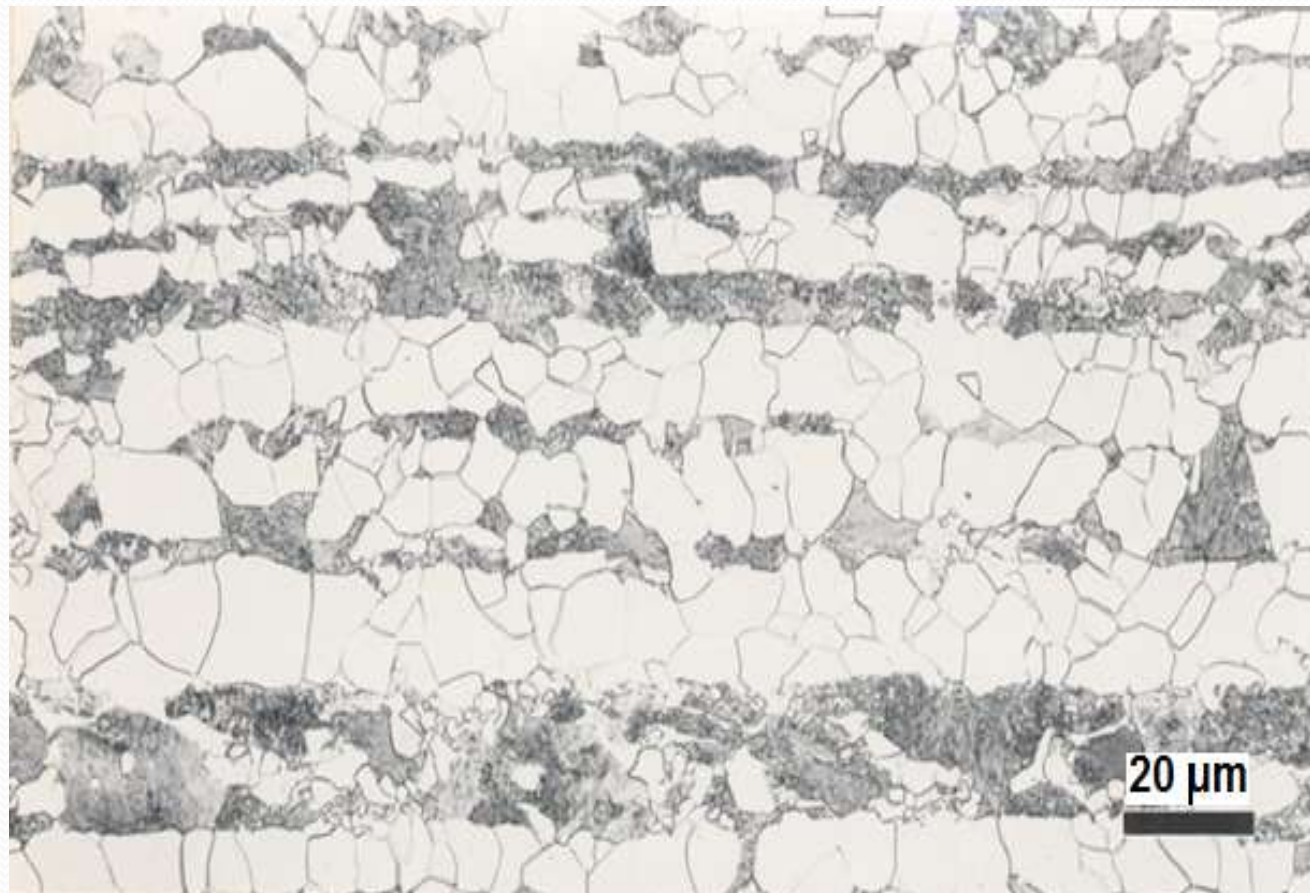
O processo de segregação inicia durante a solidificação da austenita quando o líquido entre as dendritas e os braços das dendritas se tornam mais ricos em termos dos teores de soluto.

Tal processo é chamado de microsegregação e porque acontece a nível do grão, é mais difícil de ser eliminado.

Essa segregação gera o fenômeno de bandeamento.

Alguns graus de segregação é achado em todos os tipos de aços.

- Microestrutura de aço laminado a quente Fe – 0.22% C – 0.99% Mn – 0.02% Si – 0.059% Al .
- Grãos de ferrita equiaxiais e perlita bandeada (plano longitudinal).



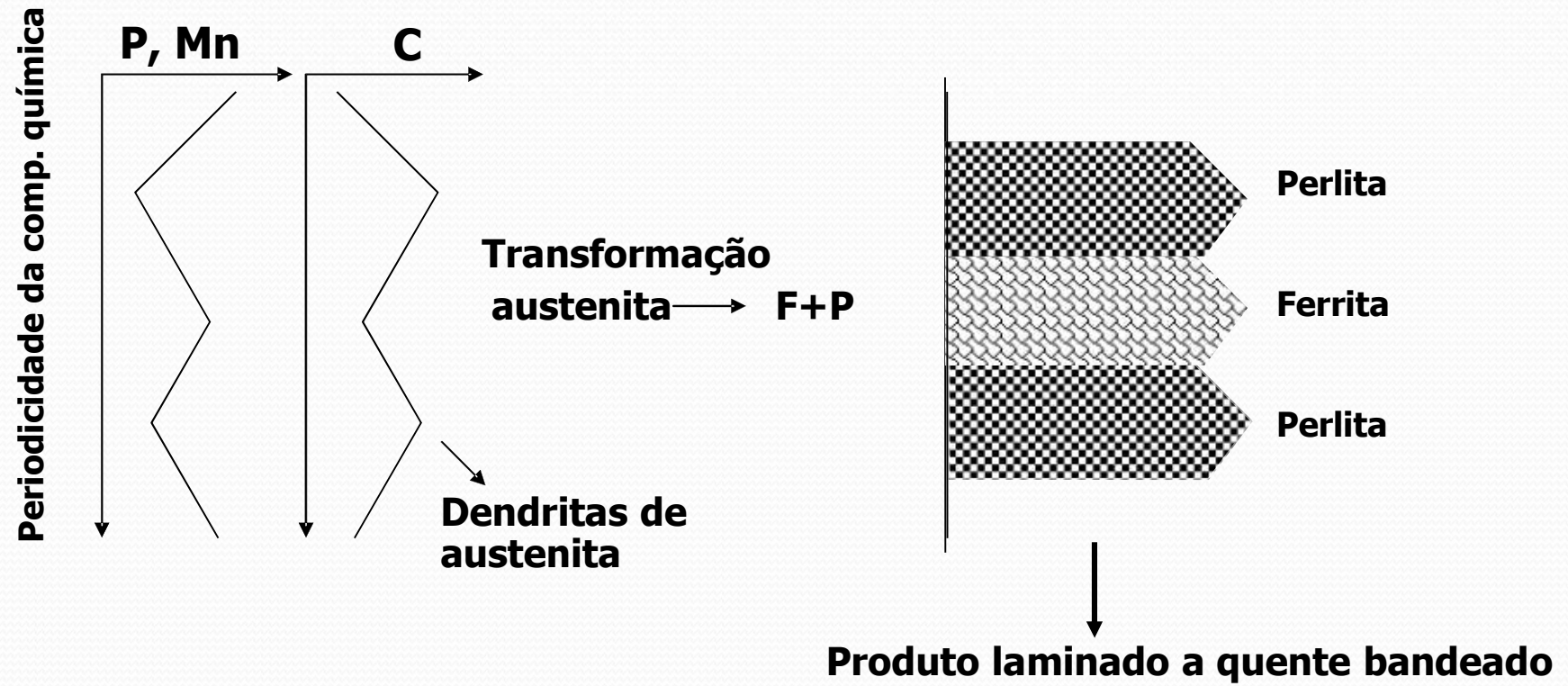


Embora a causa primária do bandeamento seja a microsegregação interdendrítica, a taxa de resfriamento, tamanho de grão austenítico e temperatura de austenitização também influenciam na severidade do bandeamento.

A intensidade do bandeamento microestrutural em aços hipoeutetóides aumenta conforme a taxa de resfriamento diminui. Assim o resfriamento no forno produz intensas bandas de perlita e ferrita.

- 
- Laminação a quente alinha a variação química interdendrítica em bandas paralelas à direção de laminação produzindo regiões alternadas de alta e baixa concentração de vários elementos solutos.

Microsegregação e Bandeamento

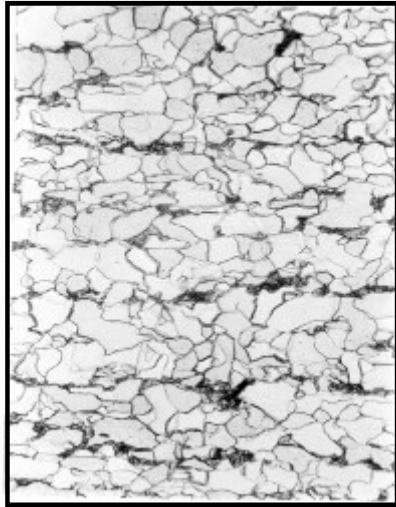




Com um razoável grau de trabalho a quente , cristais interdendríticos são quebrados e recristalizados. As inclusões não são removidas mas podem mudar de tamanho, morfologia e distribuição.

- 
- Para reduzir bandejamento, longos tempos e altas temperaturas de homogeneização são sugeridas, removendo gradientes composicionais.

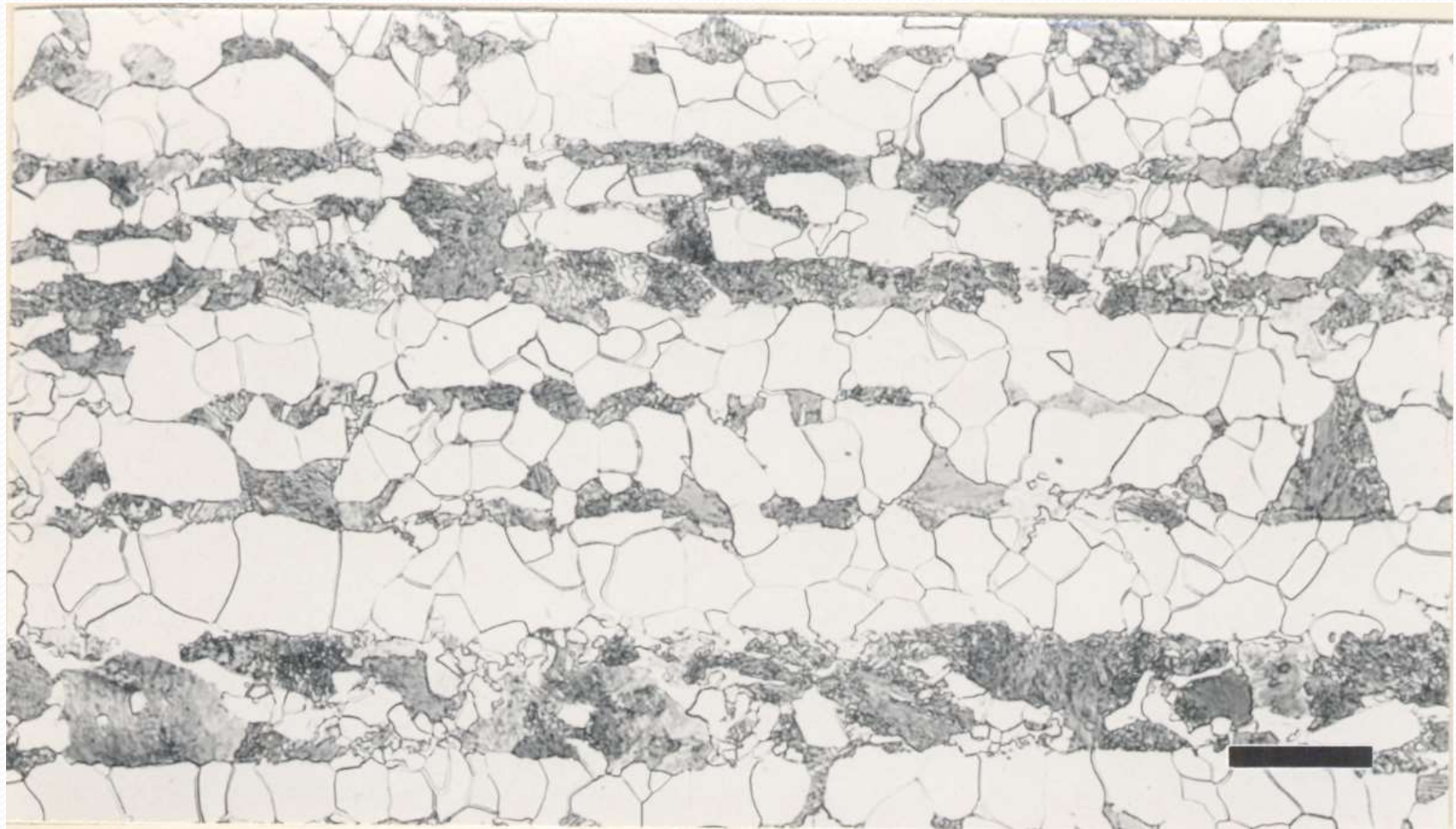
Microestrutura Bandeada



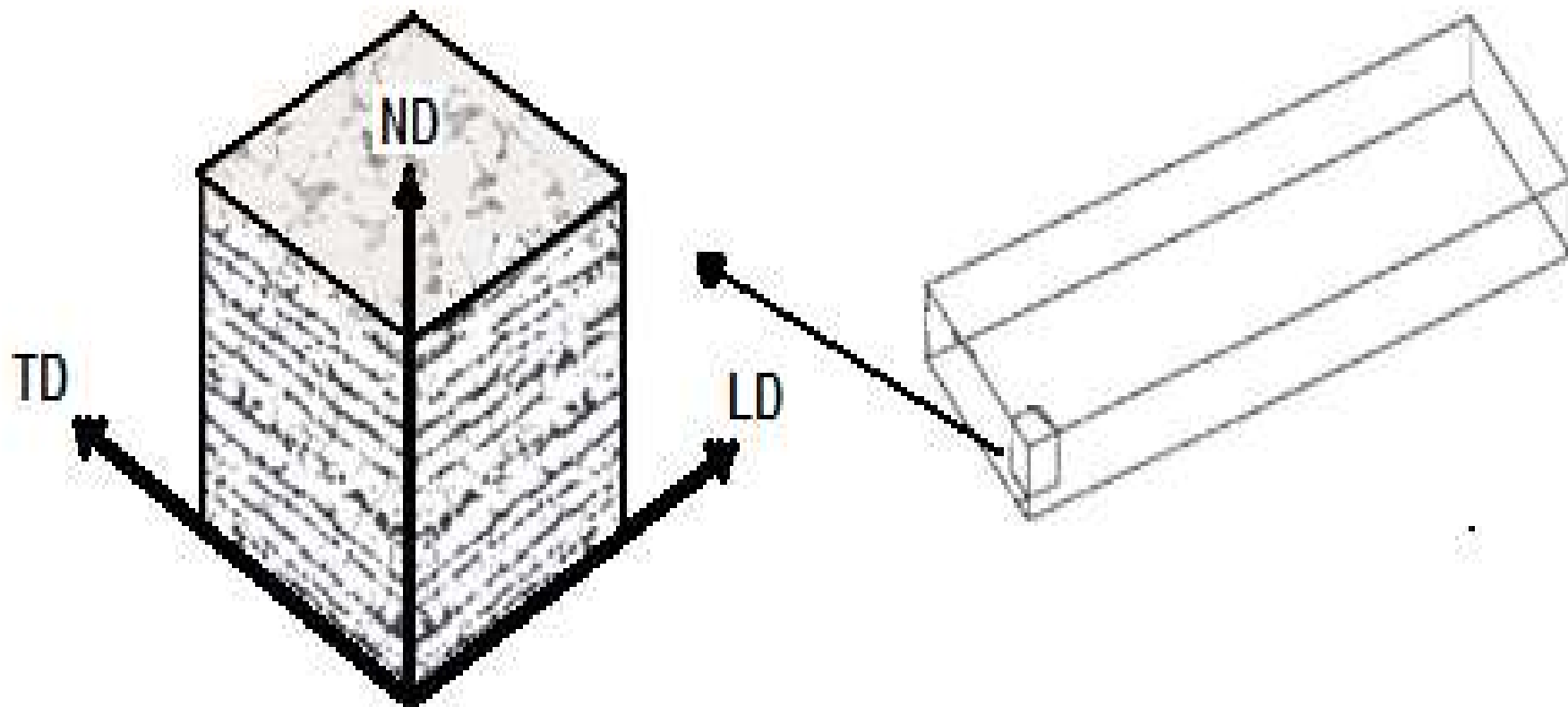
Ferrita-Perlita bandeada
API X 60, GMn-Nb-V-Ti

Minimização da Intensidade de Bandeamento

- Redução de teores de C, Mn, P
- Controle de parâmetros de Ling. Contínuo (superaquecimento, resfriamento secundário)
- Redistribuição de C com resfriamento acelerado após laminação



LD - Longitudinal direction
TD - Transversal direction
ND - Normal direction



Bandeamento

- É uma condição microestrutural em que bandas de diferentes microestruturas, paralelas à direção de laminação, se desenvolvem em aços C e aços baixa liga resfriados lentamente.

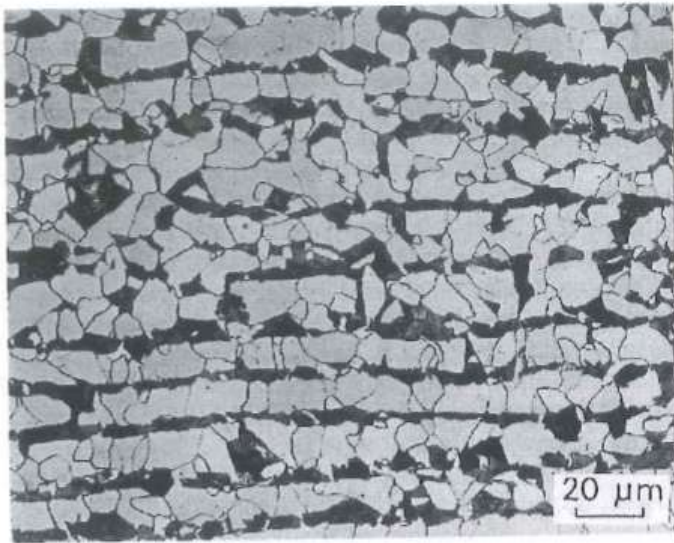


Fig. 13—Ferrite (light) and pearlite (dark) bands in 1020 steel hot-rolled plate. Nital etch, light micrograph.

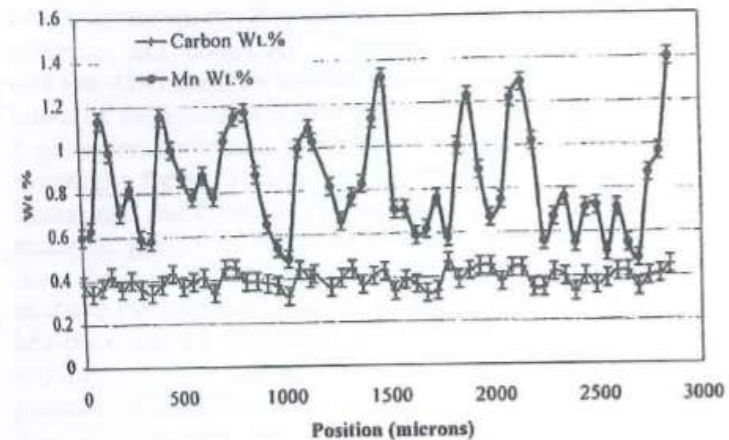
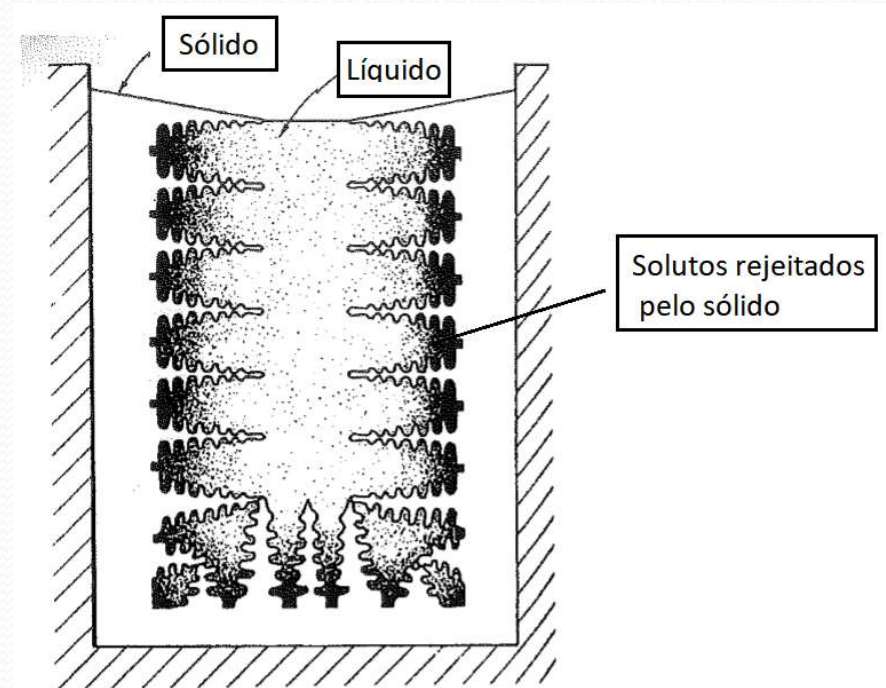


Fig. 11—Variations in Mn and C concentrations across a quench and tempered 4140 steel bar, 95.25 mm in diameter and containing by heat analysis 1.00 pct C.^[29] Electron microprobe analysis.

A causa principal é a microsegregação interdendrítica e embora elas estejam sempre presentes, as manifestações microestruturais do bandamento podem não estar presentes dependendo do tamanho de grão austenítico e condições de resfriamento que controlam a decomposição da austenita para outras fases.



Segregação interdendrítica é modificada mas muitas vezes não totalmente eliminada pelo processamento industrial a quente.

Estudos experimentais verificaram que longos tempos em altas temperaturas são necessários para reduzir ou “eliminar” a microsegregação.

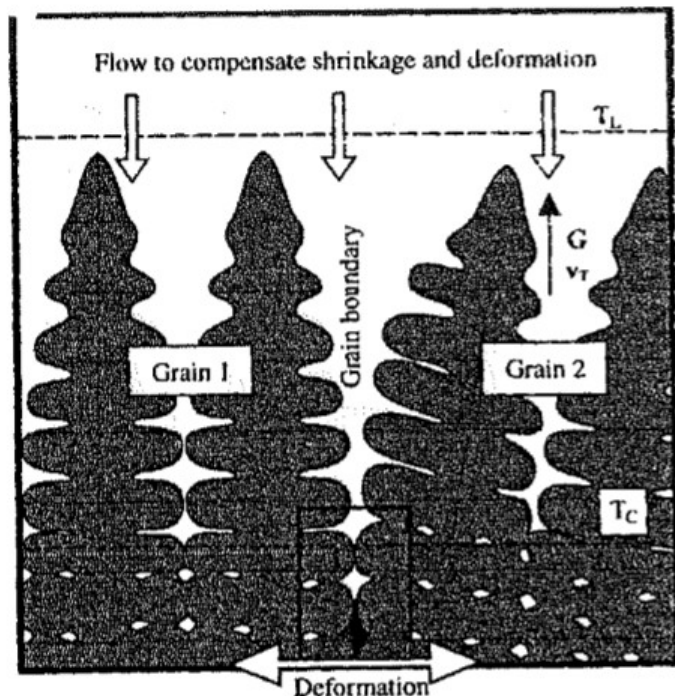


Fig. 3—Schematic of dendritic solidification.^[13] Illustrated are liquid convection, effects of deformation, and interdendritic shrinkage where dendrite arms have grown together.

Com razoável grau e trabalho a quente, vazios de contração são efetivamente eliminados e cristais dendríticos são quebrados e recristalizados.

Inclusões não podem ser removidas por trabalho a quente mas podem mudar em tamanho, morfologia e distribuição.