

# PMR 3303

- Tratamentos Térmicos e Recobrimentos

<https://www.youtube.com/watch?v=qW0aUbTWtVM>

# Tratamentos Térmicos e Superficiais

- As propriedades mecânicas, bem como o desempenho em serviço, de um metal e em especial das ligas dependem da sua composição química, da estrutura cristalina, do histórico de processamento mecânico e termomecânico e dos **tratamentos térmicos** realizados

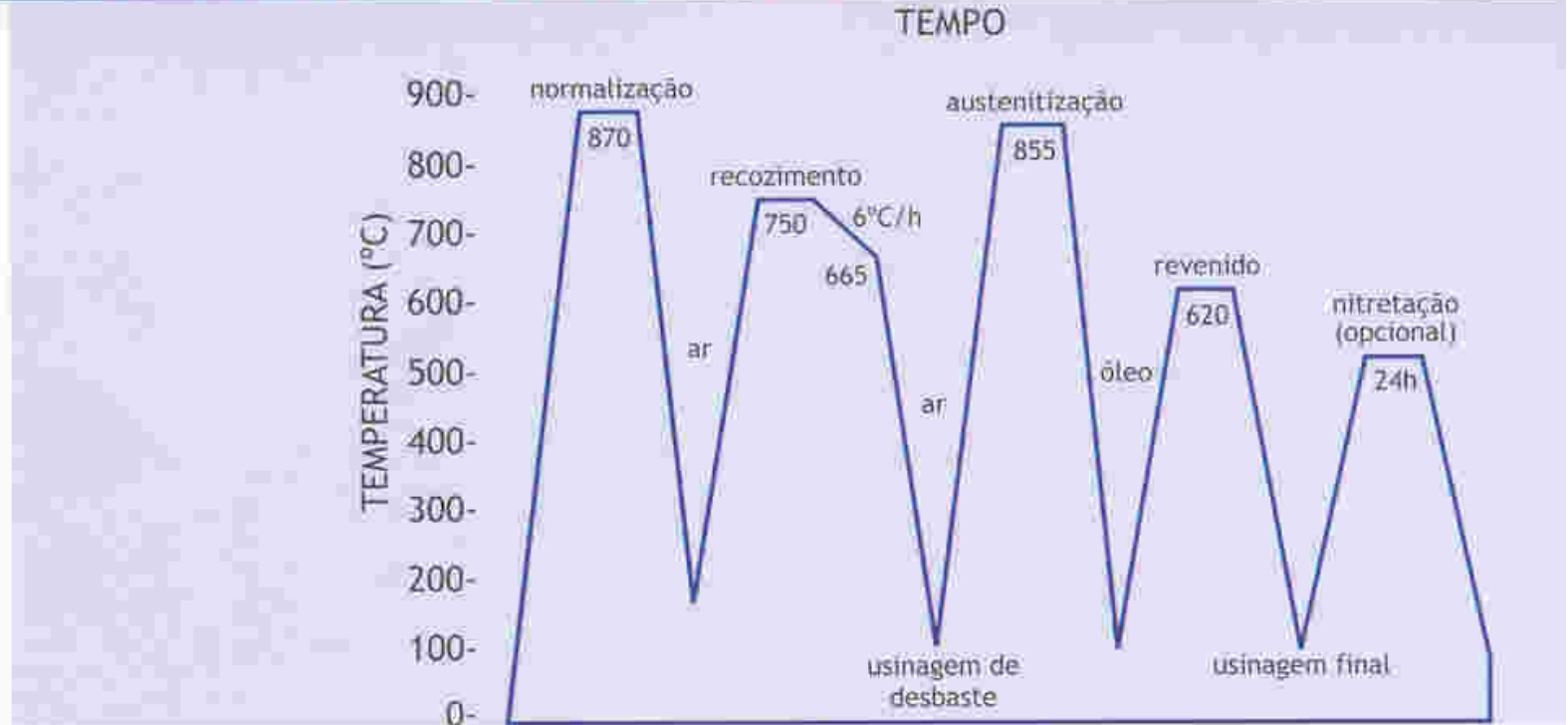


# Tratamentos Térmicos e Superficiais

- os tratamentos térmicos podem ser descritos por são ciclos de aquecimento e resfriamento controlados no material puro ou liga, que causam modificações na microestrutura dos mesmos

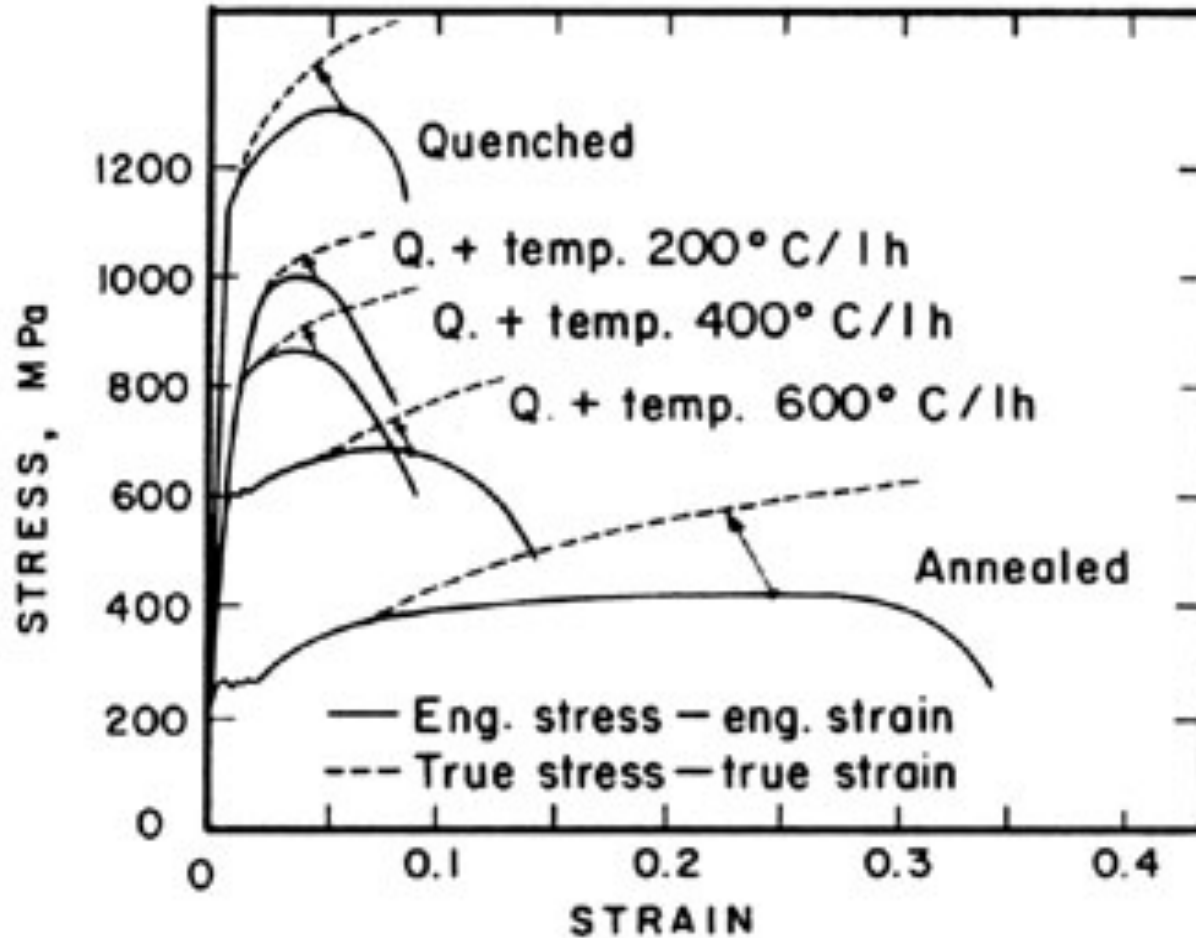
# Introdução

## SEQÜÊNCIA DE PROCESSAMENTO RECOMENDADA:



**Figura 1.** Representação esquemática de ciclos de tratamentos térmicos para o aço 4140.

# Introdução



**Figura 2.** Aço 1040 submetido a diferentes tratamentos térmicos. Tratamentos térmicos: Quenched (têmpera), tempered (revenimento), annealed (recozimento).

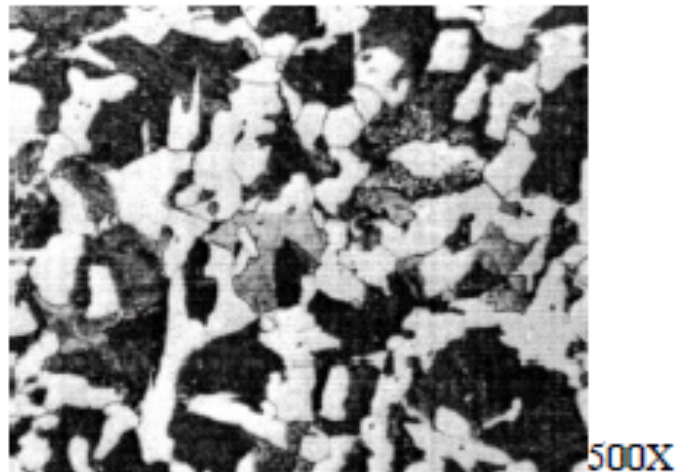
# Introdução

## Microestrutura e Tratamento Térmico

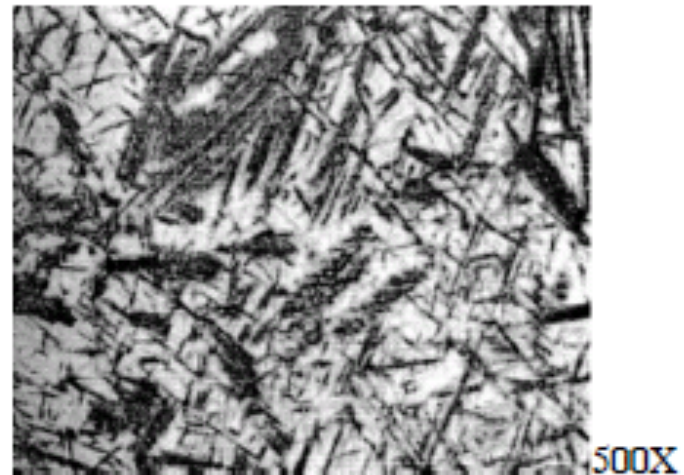
Composição química (porcentagem em peso) Aço 1045

C	Mn	P, max	S, max	Si	Ni	Cr	Mo	Outros elementos
0,43-0,50	0,60-0,90	0,040	0,050	-	-	-	-	-

Normalizado



Temperado



# Introdução

Composição química (porcentagem em peso) Aço 4140

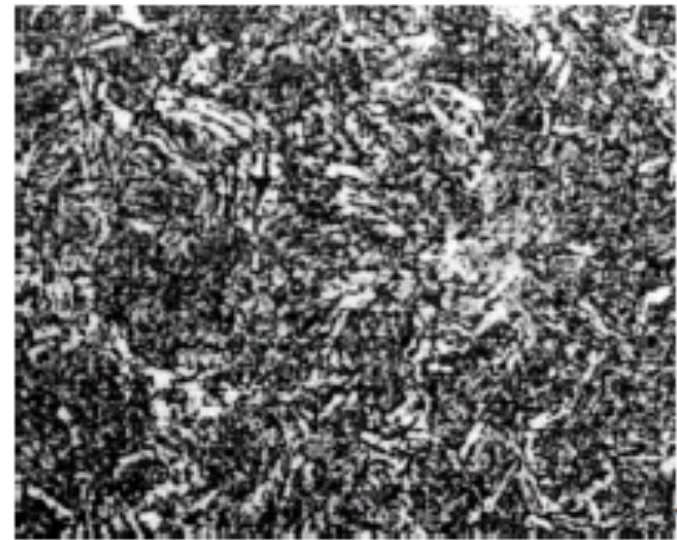
C	Mn	P, max	S, max	Si	Ni	Cr	Mo	Outros elementos
0,38-0,43	0,75-1,00	0,035	0,040	0,20-0,35	-	0,80-1,10	0,15-0,25	-

Normalizado



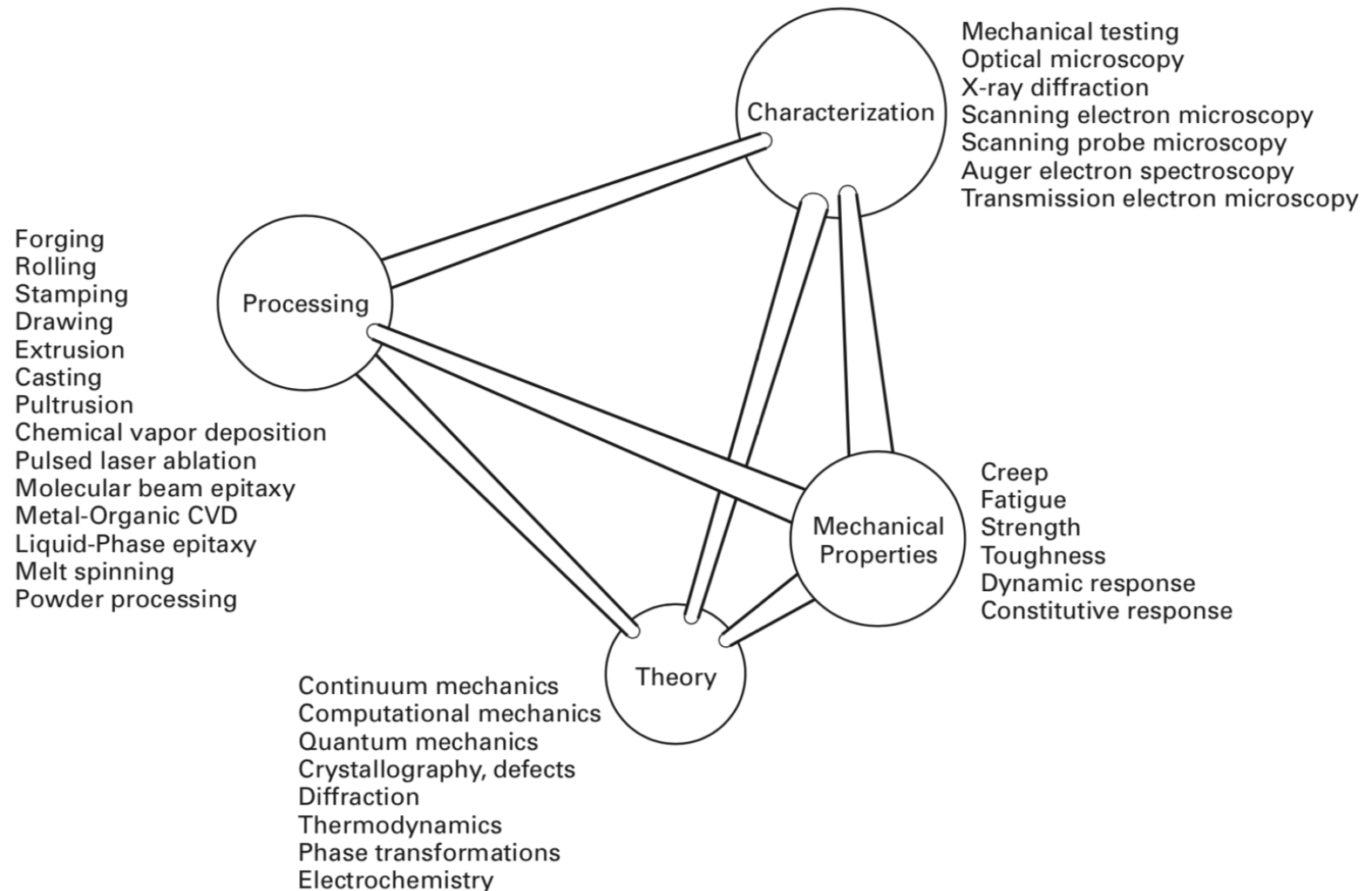
500X

Temperado



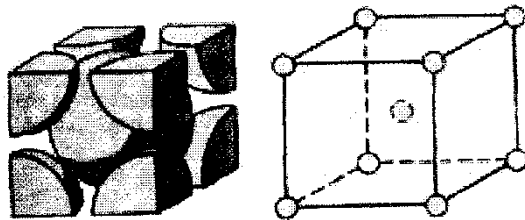
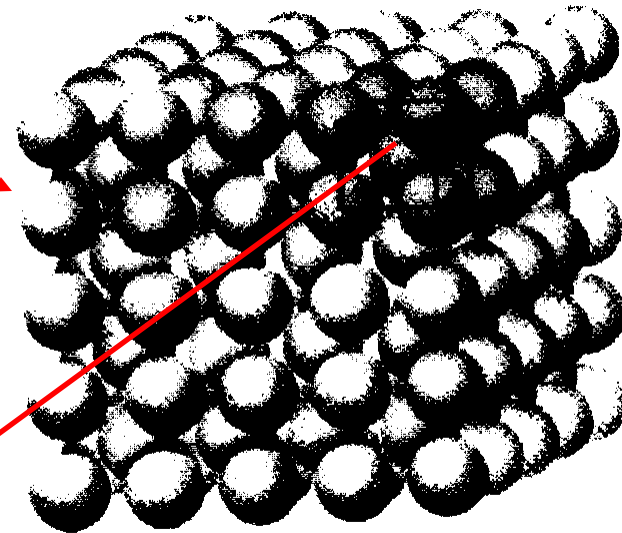
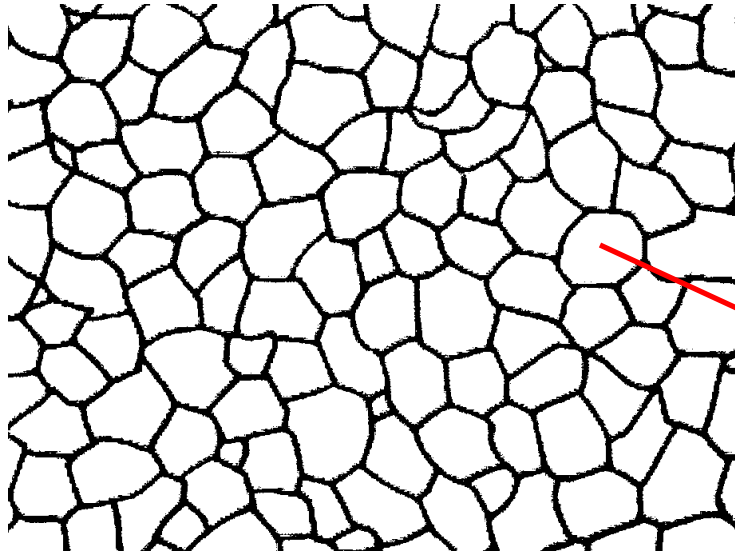
750X

# Paradigama da Ciência dos Materiais



# Introdução

# Estrutura cristalina e defeitos

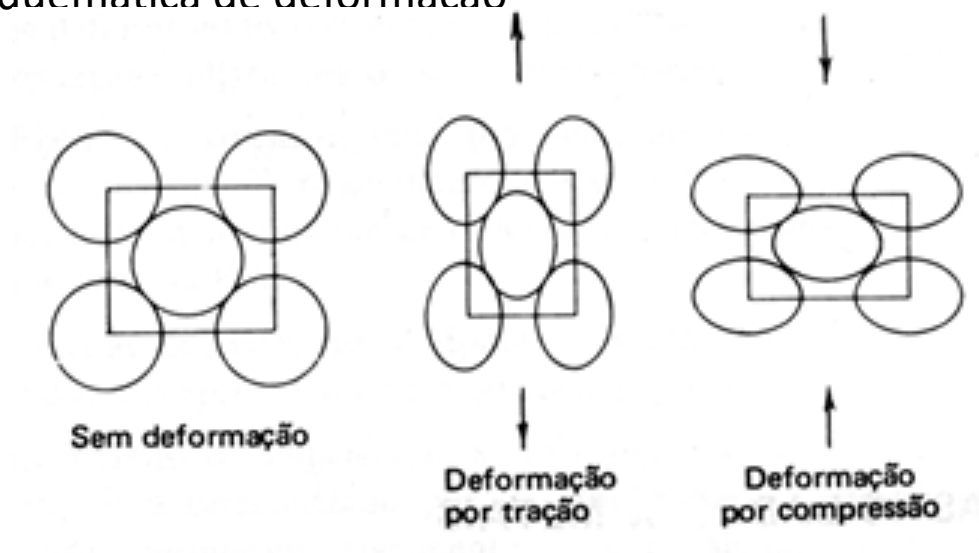


# Introdução

## Estrutura cristalina e defeitos

As deformações elásticas correspondem às deformações que são reversíveis no material, podendo ser comparadas ao efeito de uma pequena força aplicada em uma mola. A figura 48 mostra uma representação esquemática do efeito da deformação elástica em uma célula unitária.

Representação esquemática de deformação elástica.

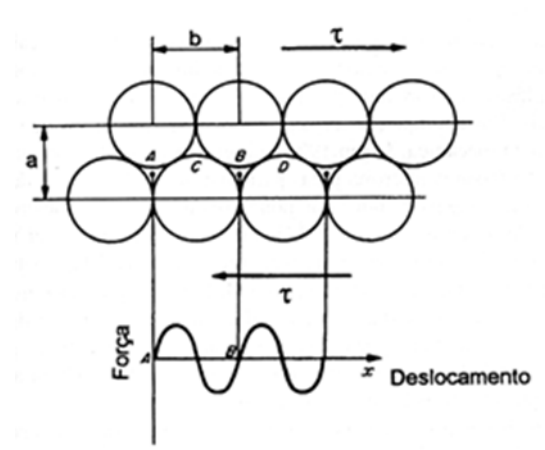
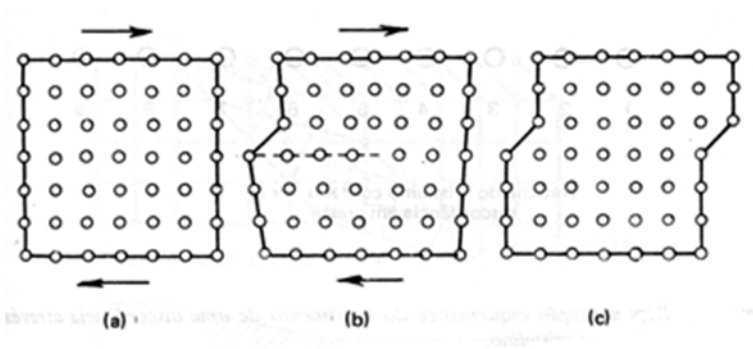




# Introdução

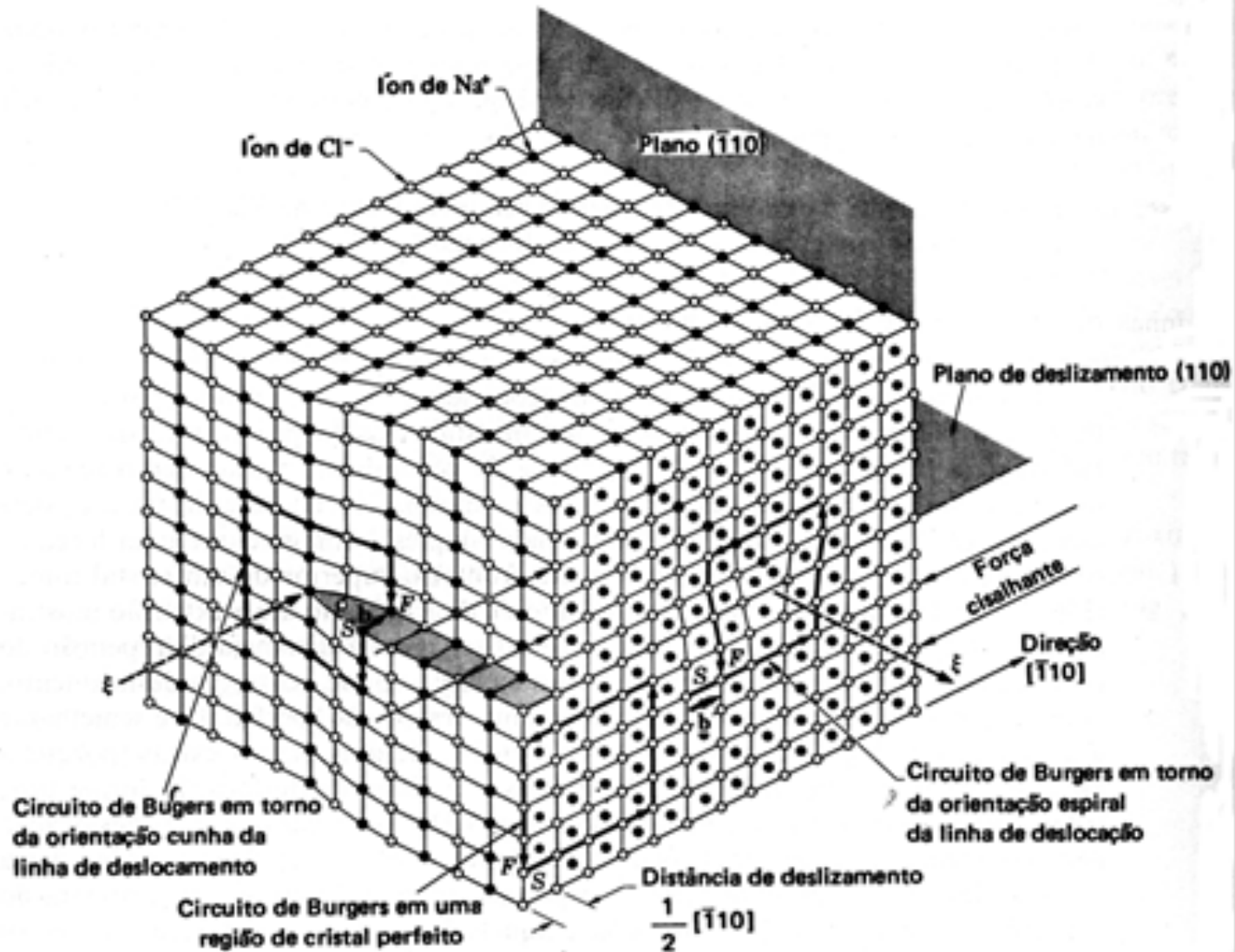
## Estrutura cristalina e defeitos

**Plasticidade dos materiais metálicos.** As deformações plásticas correspondem às deformações irreversíveis que ocorrem no metal durante o processo de deformação, isto é, após um processo de conformação mecânica a deformação permanente que fica no material corresponde à deformação plástica. A importância da deformação plástica nos materiais metálicos está ligada principalmente com os processos de conformação mecânica tais como, laminação, extrusão, forjamento, estampagem e etc.



# Introdução

# Estrutura cristalina e defeitos

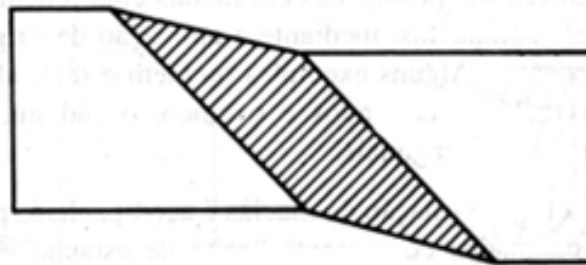
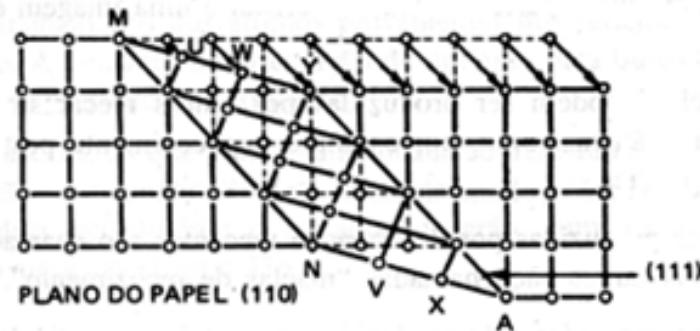


# Introdução

## Estrutura cristalina e defeitos

### *Plasticidade dos materiais metálicos.*

A deformação plástica ocorre devido ao deslizamento de planos cristalinos. Esse deslocamento é favorecido pela presença de discordâncias. A maclação também ocorre em alguns tipos de metais. Esse mecanismo leva a formação de regiões especulares dentro do cristal, como se fossem regiões gêmeas. Essas regiões gêmeas são chamadas de maclas.

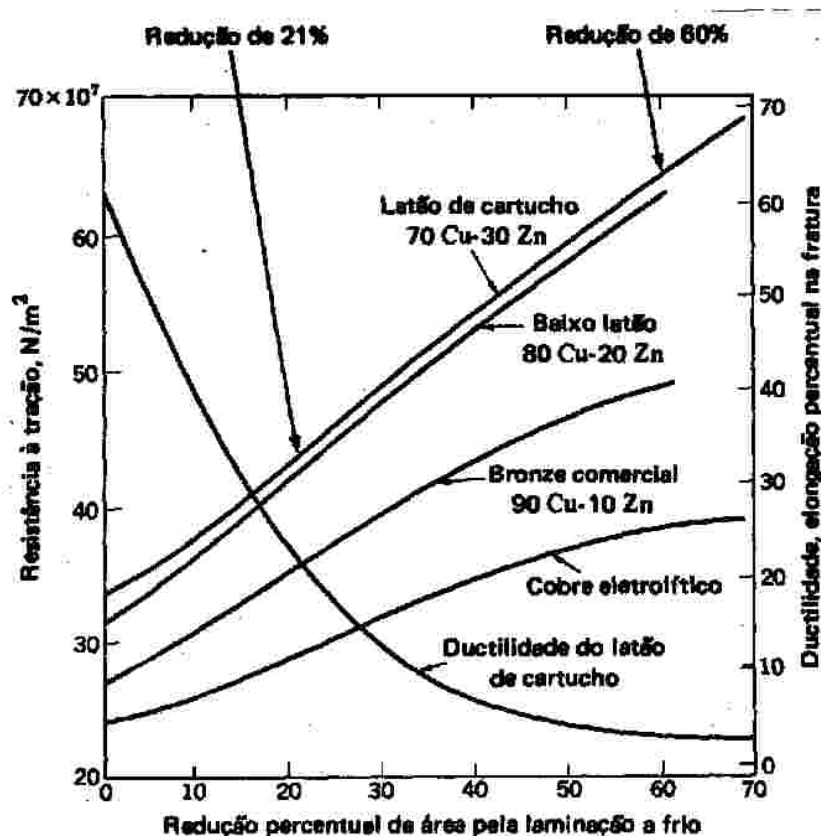


# Introdução

# Estrutura cristalina e defeitos

## ENCRUAMENTO

Fenômeno de aumento de dureza e resistência mecânica com o processo de deformação plástica é dado o nome de encruamento. A **figura 4** mostra os efeitos do encruamento (deformação plástica) na resistência mecânica de algumas ligas. A **figura 5 (b)** ilustra a microestrutura de um material encruado.



**Figura 4.** Aumento da resistência à tração e diminuição de ductilidade de chapas de cobre e ligas de cobre após encruamento.

## Deformação de uma barra de cobre



[https://www.youtube.com/watch?v=Bau\\_opy5du4](https://www.youtube.com/watch?v=Bau_opy5du4)

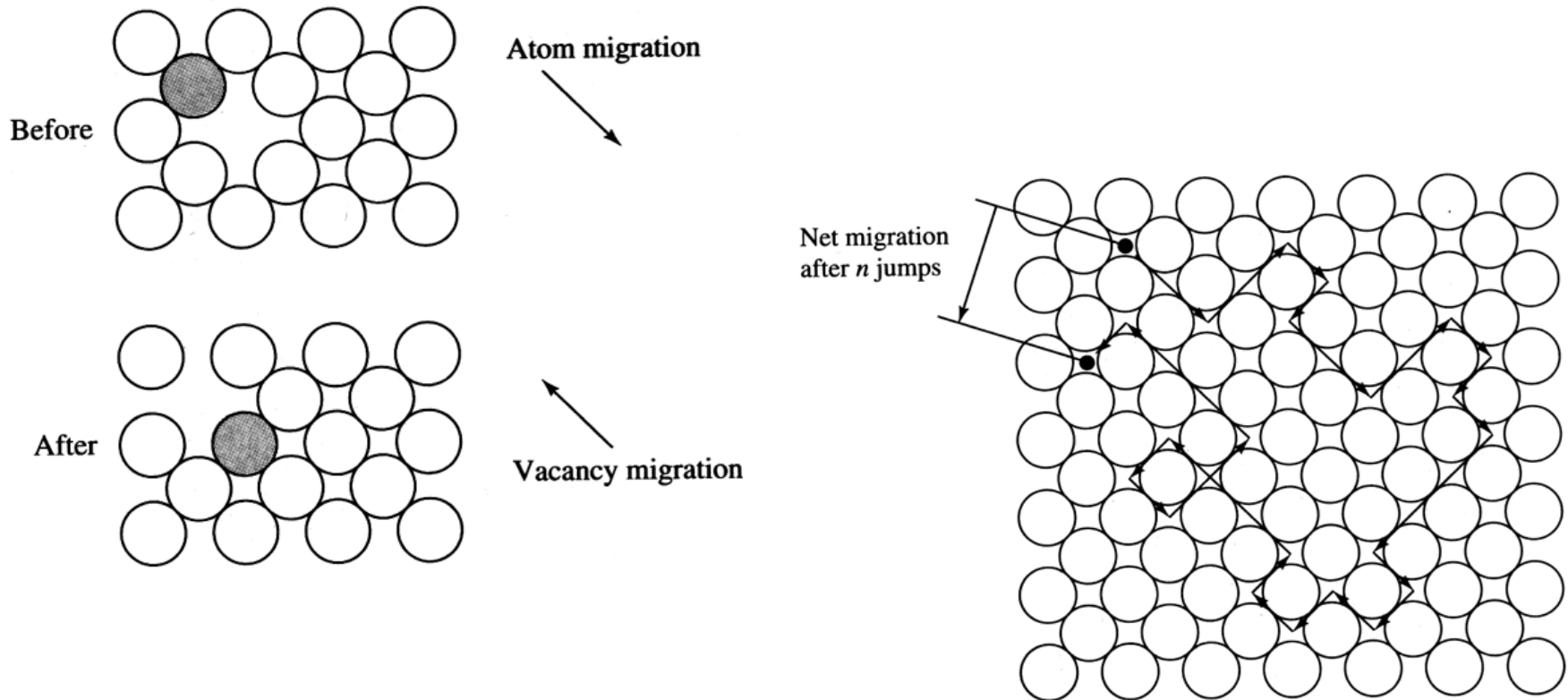


[https://www.youtube.com/watch?v=Kc0Gkqm3\\_VY](https://www.youtube.com/watch?v=Kc0Gkqm3_VY)

# Introdução

## Transformações de Fase

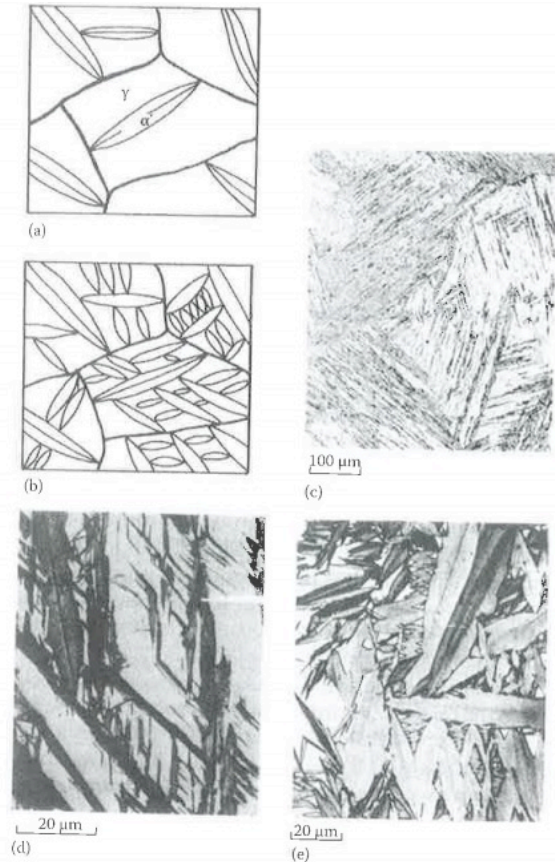
Difusão é um fenômeno de movimentação de átomos. No estado líquido os átomos movimentam-se ao acaso. No estado sólido os átomos dos materiais metálicos podem movimentar-se principalmente de duas formas de duas formas. Essas formas são por interstícios e por troca com lacunas.



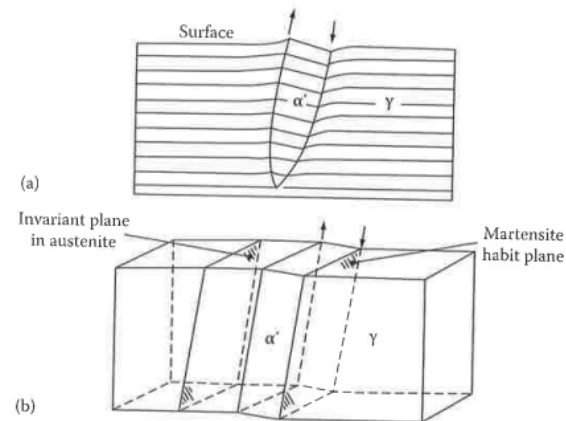


# Introdução Transformações de Fase

## Transformações sem difusão – Transformações martensíticas



**FIGURE 6.1**  
 (a), (b) Growth of martensite with increasing cooling below  $M_s$ , (c)-(e) Different martensite morphologies in iron alloys: (c) low C (lath), (d) medium C (plate), (e) Fe-Ni (plate).

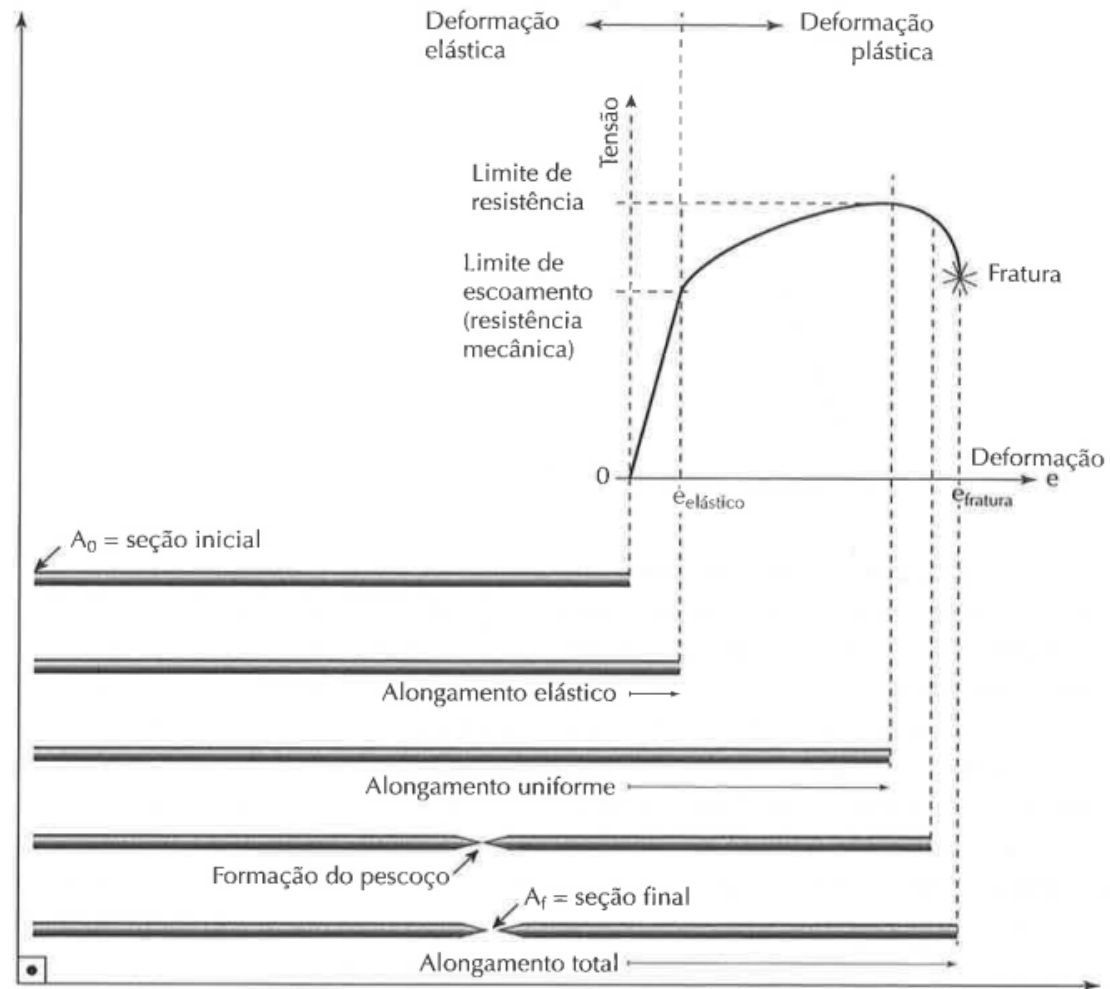


**FIGURE 6.2**  
 Illustrating how a martensite plate remains (macroscopically coherent with the surrounding austenite and even the surface it intersects).

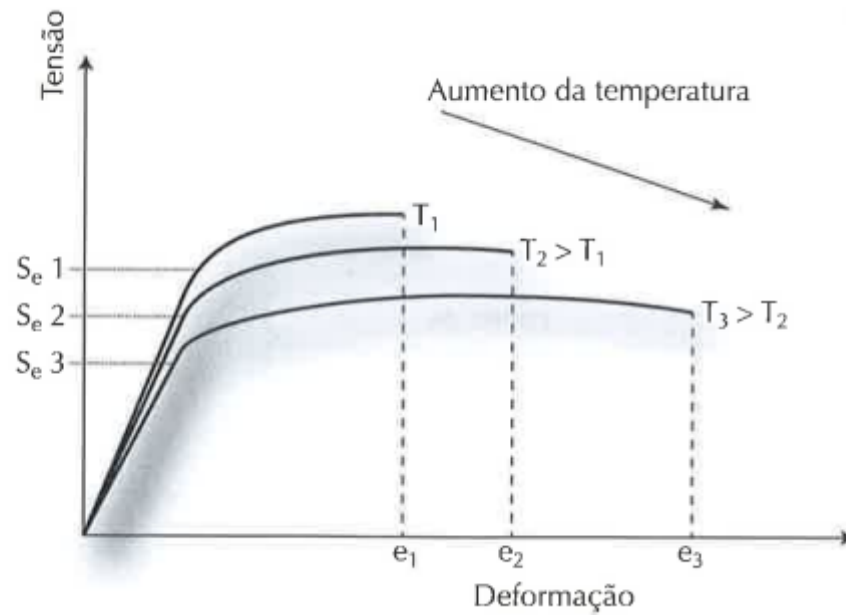


# Introdução

**Figura 3.3**  
Estágios de um ensaio de tração de uma liga metálica dútil.



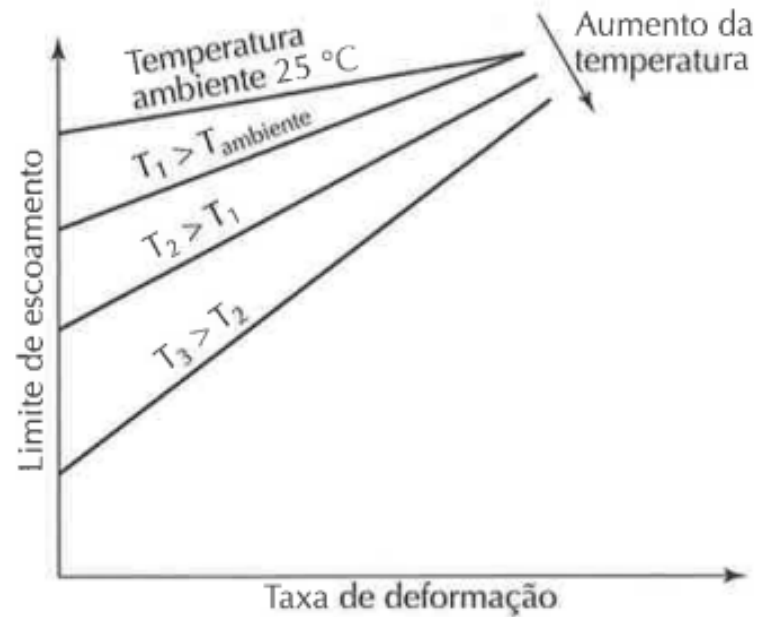
# Introdução



**Figura 3.4**  
Influência do aumento da temperatura no limite de escoamento e ductilidade da liga metálica.  
( $T$  = temperatura;  
 $e$  = alongamento;  
 $S_e$  = limite de escoamento.)

# Introdução

**Figura 3.5**  
Influência do aumento da taxa de deformação no limite de escoamento de um metal dútil.



## PRINCIPAIS TRATAMENTOS TÉRMICOS

### Tratamento térmico de recozimento

A eliminação e o rearranjo de defeitos cristalinos são processos termicamente ativados (**difusão**). Portanto, se for conveniente eliminar ou diminuir o encruamento de um material deformado a frio pode ser realizado um tratamento térmico, levando a uma diminuição de dureza.

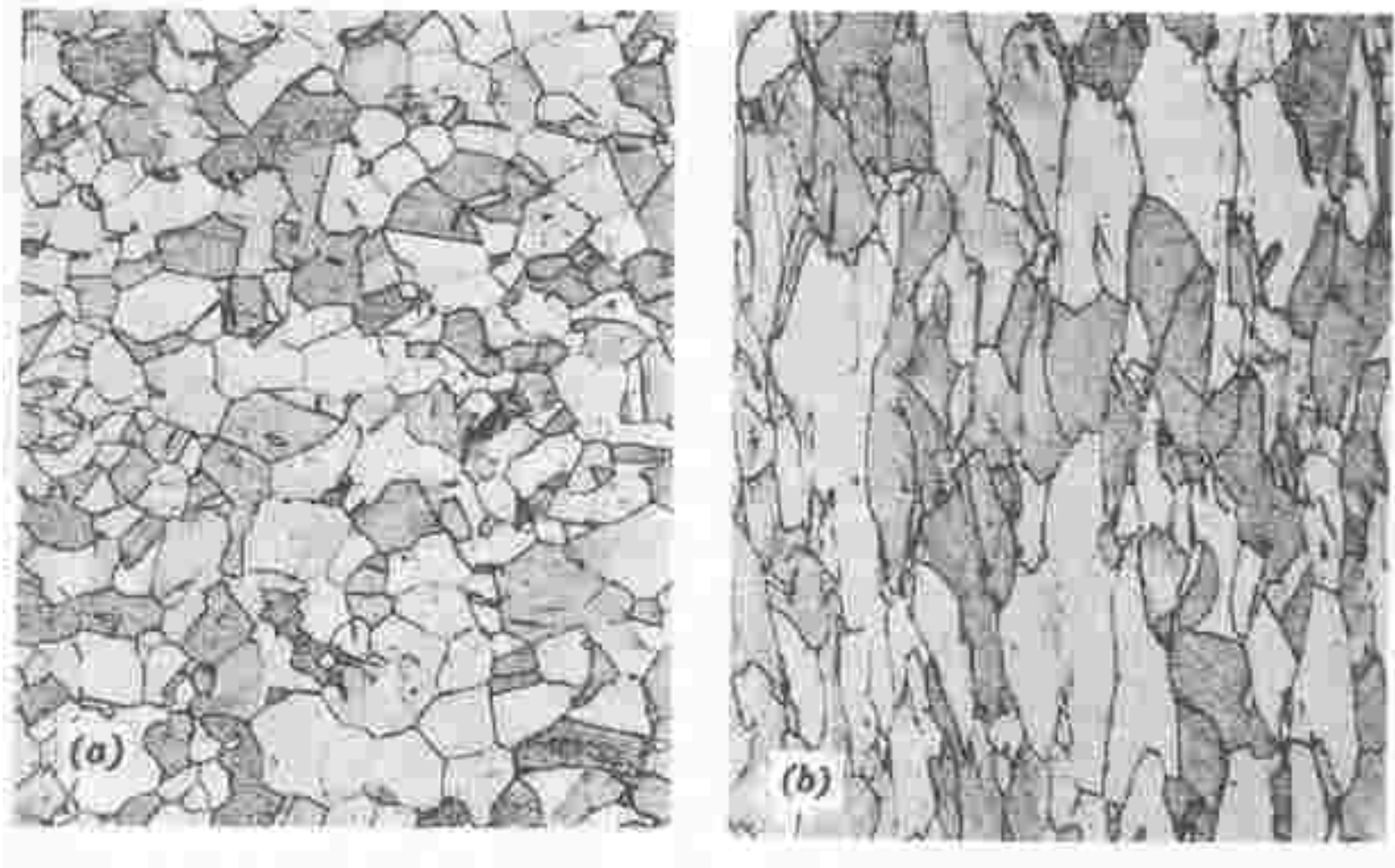
Esse tratamento térmico é conhecido como **recozimento**. O recozimento consiste em colocar o material em uma temperatura acima da temperatura de recristalização por períodos de tempo que vão de minutos a poucas horas.

Durante o processo de deformação a quente uma microestrutura semelhante à microestrutura do material que não sofreu deformação plástica. A deformação a quente é caracterizada por ser realizada acima da **temperatura de recristalização**. Portanto, a temperatura de recristalização separa a deformação plástica a quente da deformação a frio.

A temperatura de recristalização, citada anteriormente, caracteriza-se por ser a temperatura na qual é necessária 1 hora para que o processo de recristalização se inicie e termine em um material metálico. As temperaturas típicas de recristalização para metais e ligas estão entre  $1/3$  e  $1/2$  do ponto de fusão dos mesmos.

## PRINCIPAIS TRATAMENTOS TÉRMICOS

### Tratamento térmico de recozimento



**Figura 5.** (a) Microestrutura de um material policristalino antes da deformação plástica (encruamento). (b) Microestrutura de material policristalino encruado, observa-se um alongamento dos grãos na direção de deformação.

# PRINCIPAIS TRATAMENTOS TÉRMICOS

## Tratamento térmico de recozimento

### Competição entre a recuperação e a recristalização

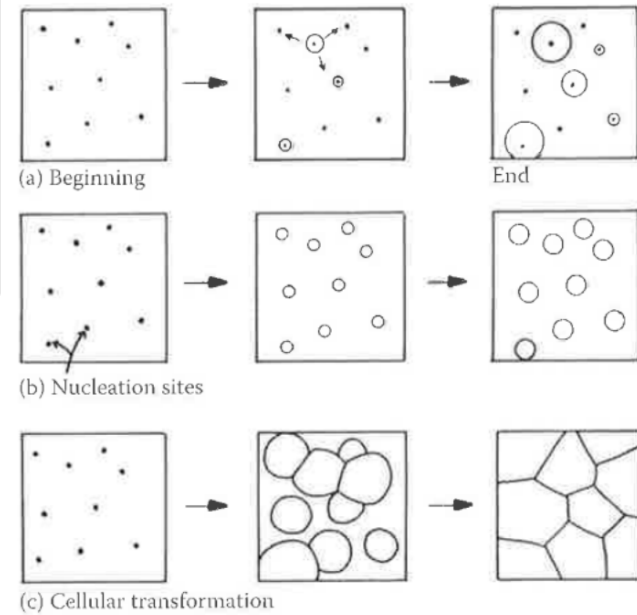
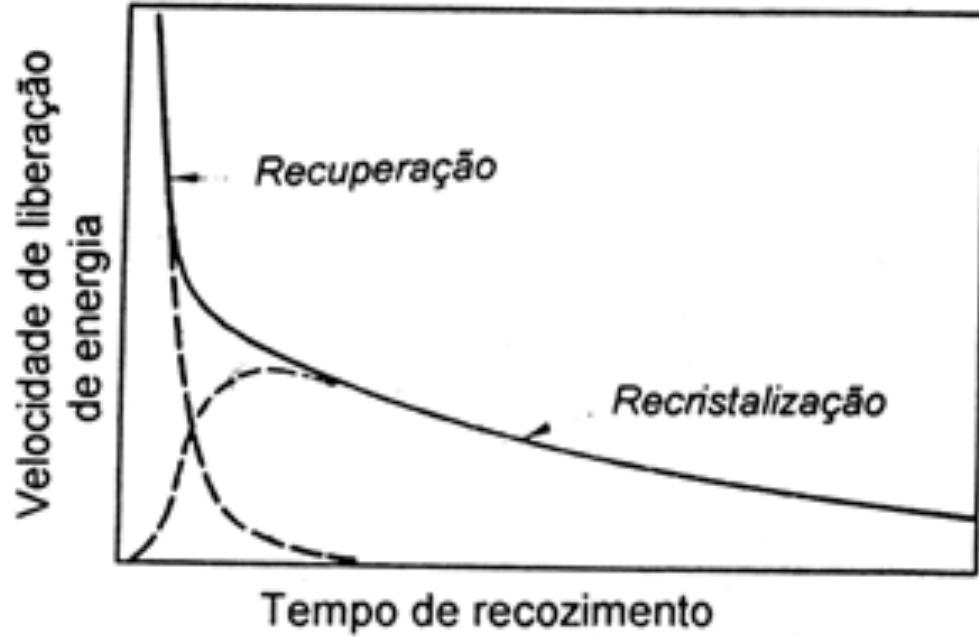
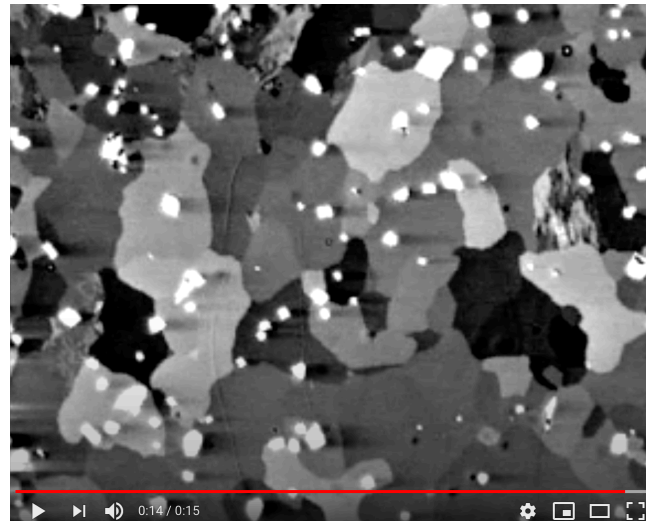
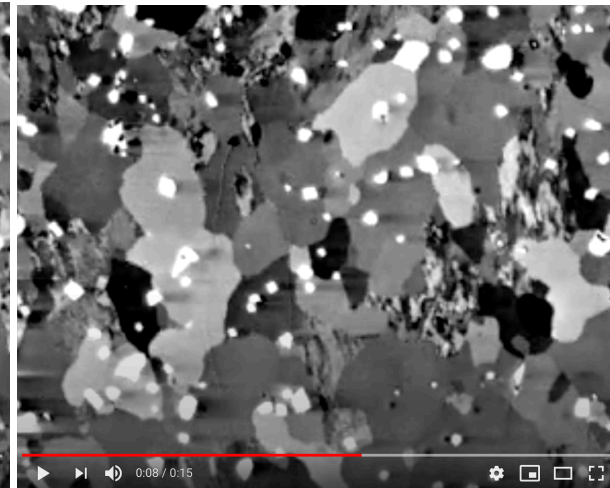
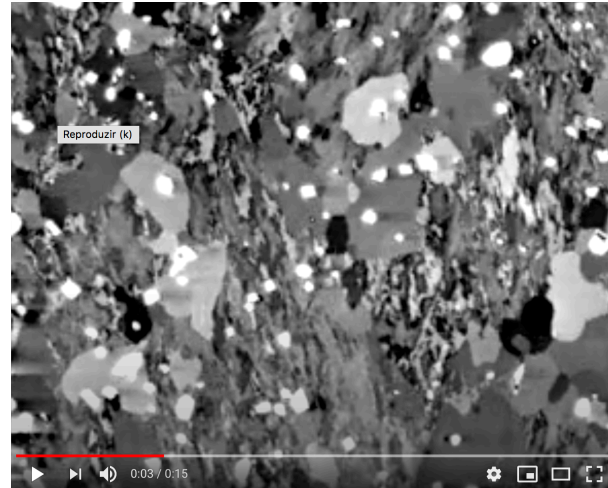
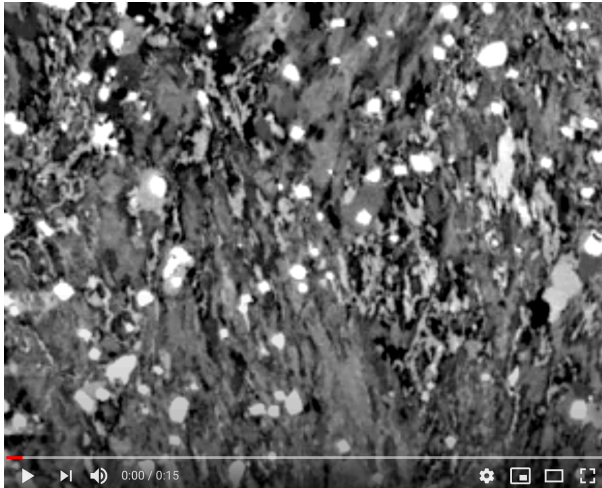


FIGURE 5.24

(a) Nucleation at a constant rate during the whole transformation, (b) Site saturation—all nucleation occurs at the beginning of transformation, (c) A cellular transformation.

# PRINCIPAIS TRATAMENTOS TÉRMICOS

## Tratamento térmico de recozimento

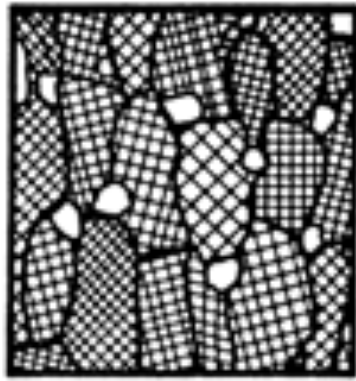


<https://www.youtube.com/watch?v=54OvJK8x9-4>

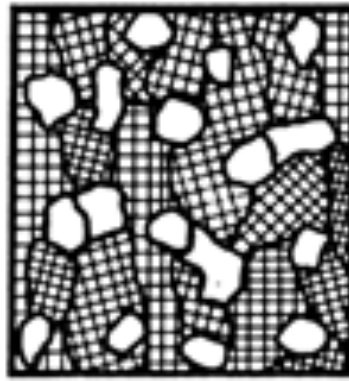
# PRINCIPAIS TRATAMENTOS TÉRMICOS

## Tratamento térmico de recozimento

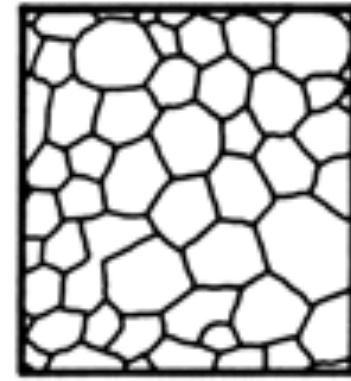
### Recuperação e a recristalização - Estático



a

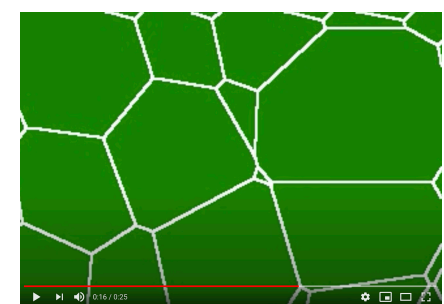
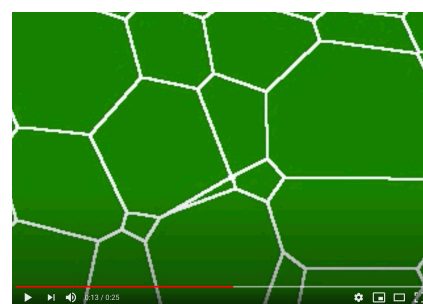
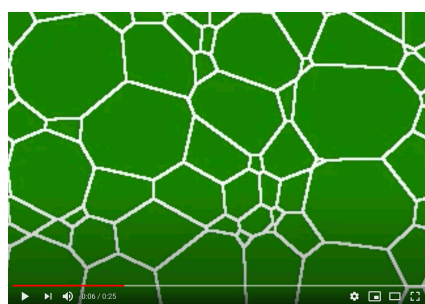
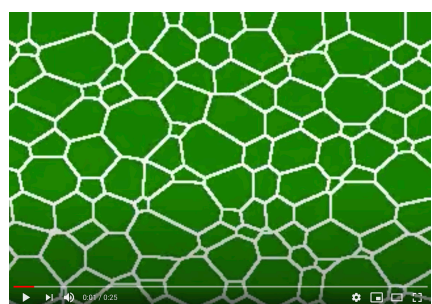


b



c

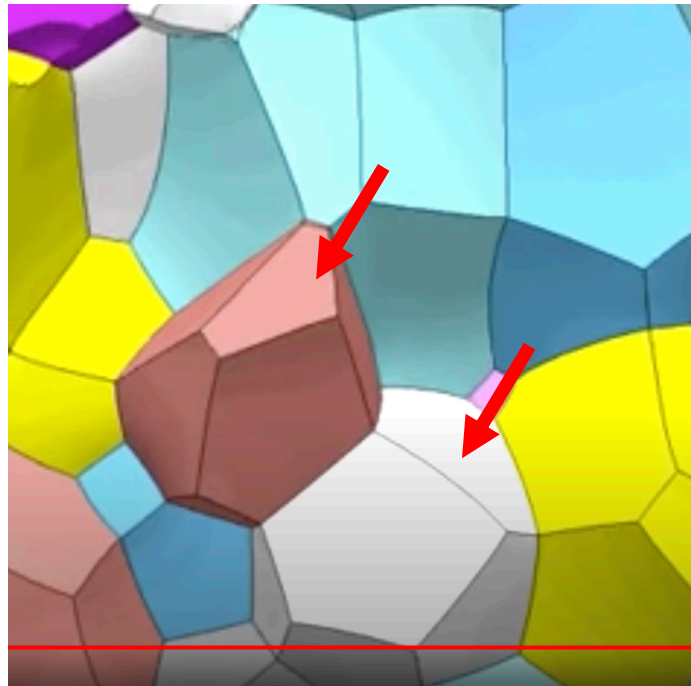
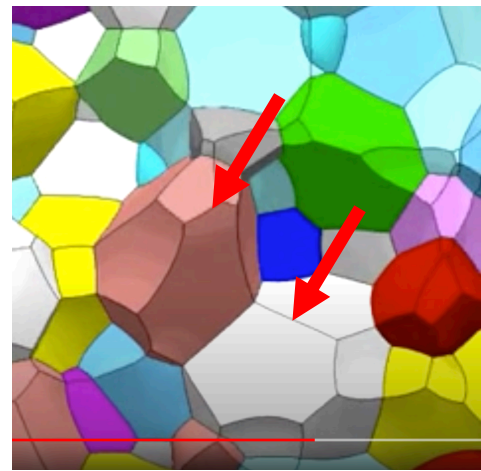
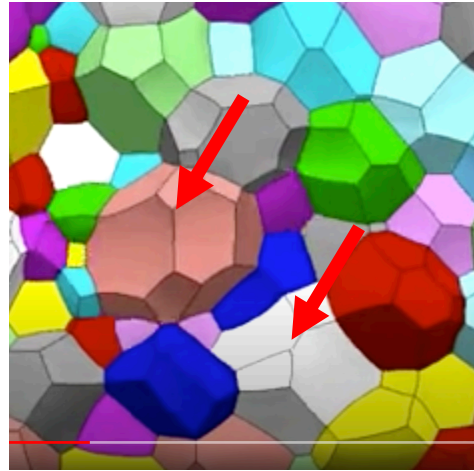
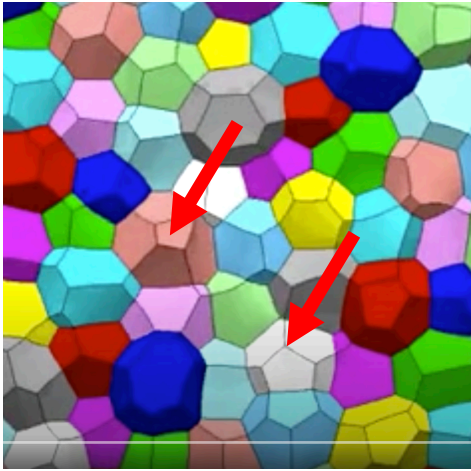
### Crescimento de Grão - Estático



<https://www.youtube.com/watch?v=HsVnswfHGXM>

<https://www.youtube.com/watch?v=xmuiMdSaGHk>



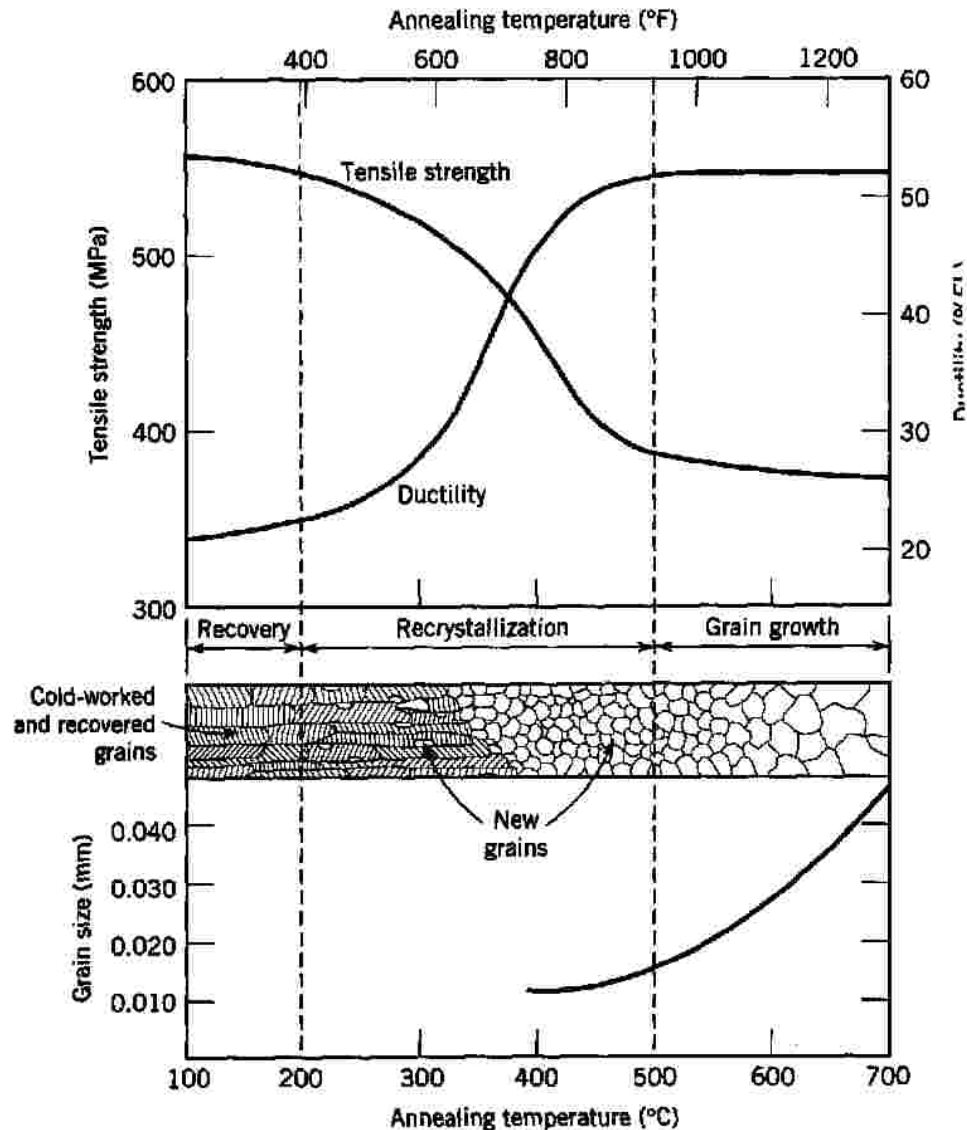


[https://www.youtube.com/watch?v=Ac\\_ca\\_NeRnw](https://www.youtube.com/watch?v=Ac_ca_NeRnw)

# PRINCIPAIS TRATAMENTOS TÉRMICOS

## Tratamento térmico de recozimento

### Recuperação e a recristalização - Dinâmico

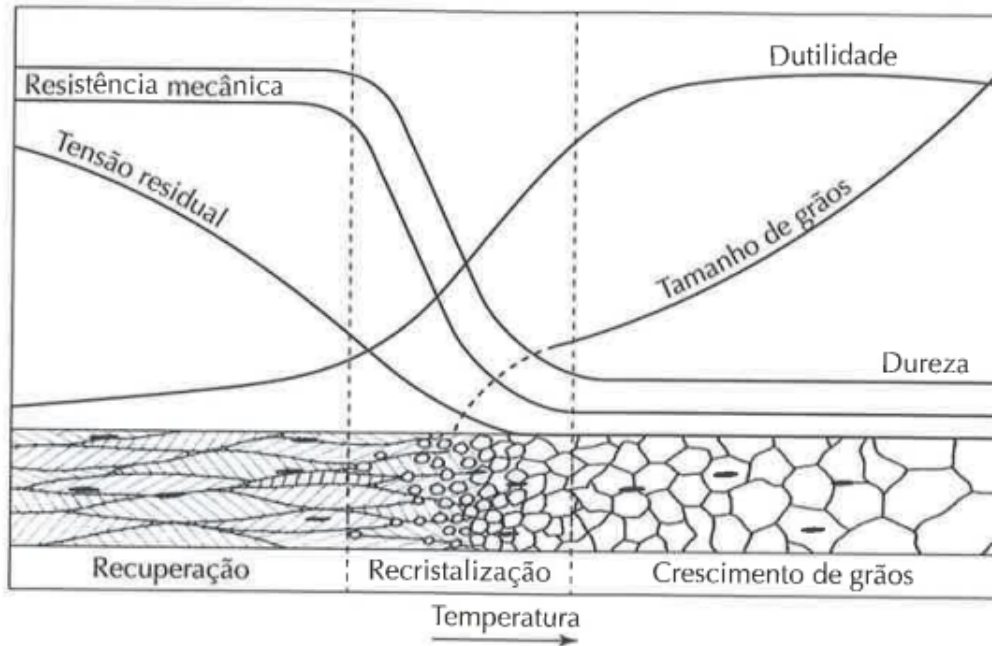


Influencia da temperatura do tratamento térmico na resistência na ductilidade de um latão. Recovery (recuperação)=rearranjo e eliminação de defeitos cristalinos sem alteração da microestrutura, mas com diminuição da dureza, Recrystallization (recristalização)=ocorre eliminação de defeitos cristalinos pela migração de contornos de grão e grain growth (crescimento de grão).

# PRINCIPAIS TRATAMENTOS TÉRMICOS

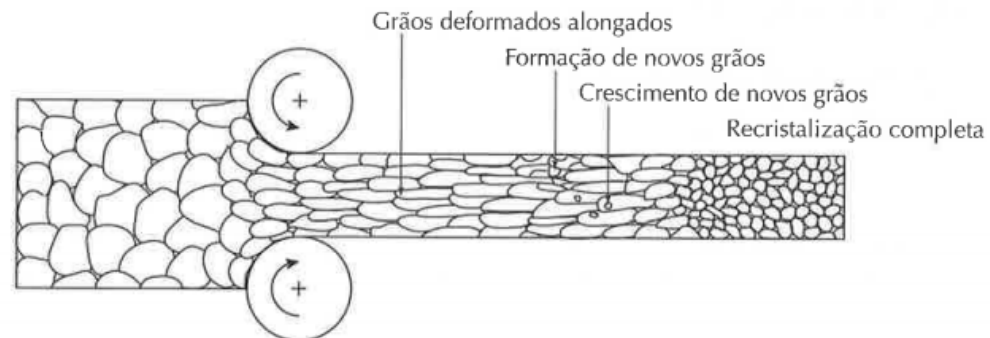
## Tratamento térmico de recozimento

### Recuperação e a recristalização - Dinâmico



**Figura 3.6**  
Ilustração esquemática do efeito da recuperação, recristalização e crescimento de grão nas propriedades mecânicas e na forma e tamanho dos grãos.

**Figura 3.7**  
Ilustração esquemática das mudanças na morfologia e no tamanho dos grãos do metal durante a laminação a quente.



Existem vários tipos de aços. Dentre eles estão os:

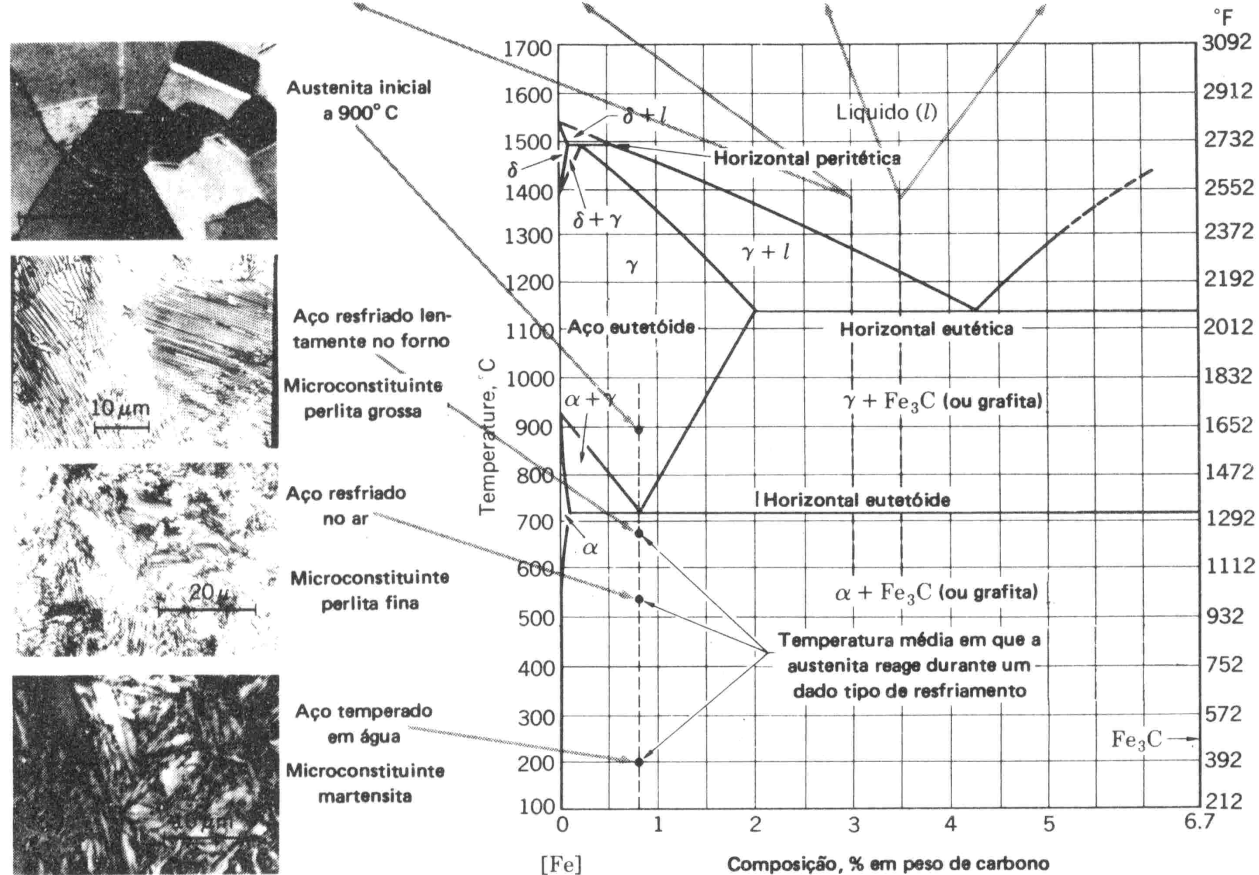
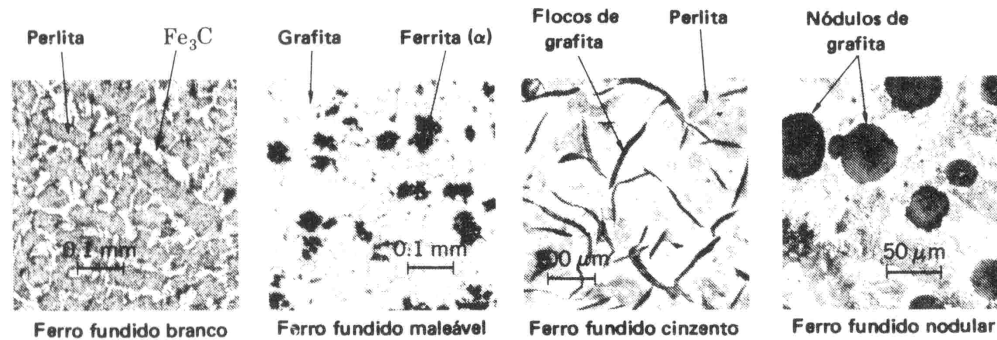
1. Aços carbono (não possuem elementos de liga, além do carbono).

2. Aços baixa liga (possuem elementos de liga para melhorar a temperabilidade ou propriedades mecânicas).

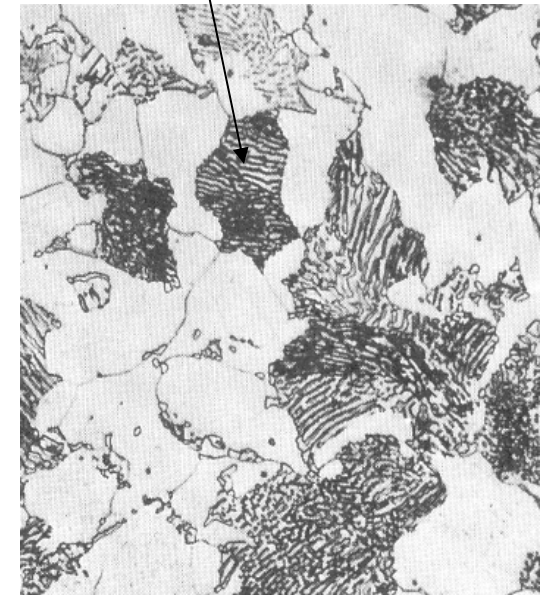
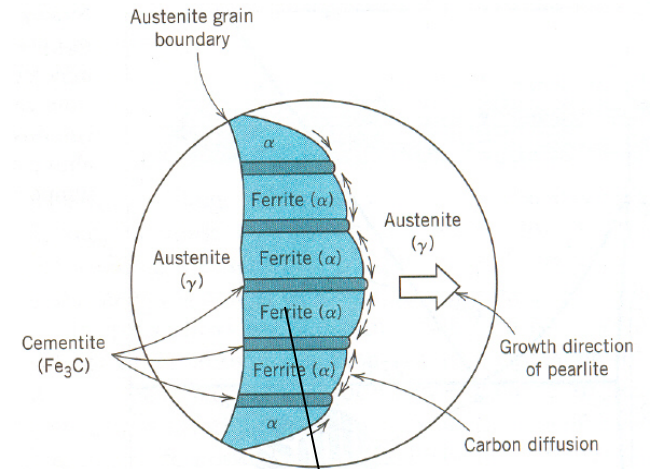
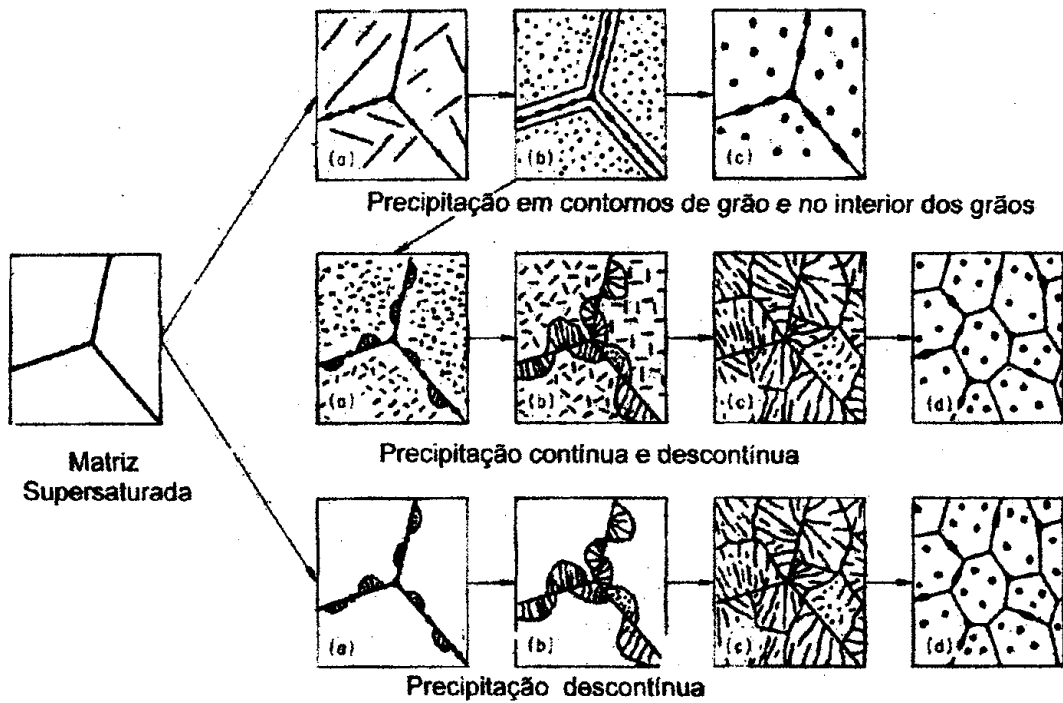
3. Aços ferramenta (são aços que possuem elevados teores de elementos de liga, principalmente formadores de carbonetos e nitretos).

4. Aços inoxidáveis (apresentam elevados teores de elementos de liga, sua principal propriedade é a resistência à corrosão. O principal elemento de liga dos aços inoxidáveis é o cromo. A resistência à corrosão desses aços é promovida pela formação de óxidos de cromo na superfície do metal. Esses óxidos formam uma película aderente e contínua, semelhante à formada no alumínio).

# Diagrama Fe-C



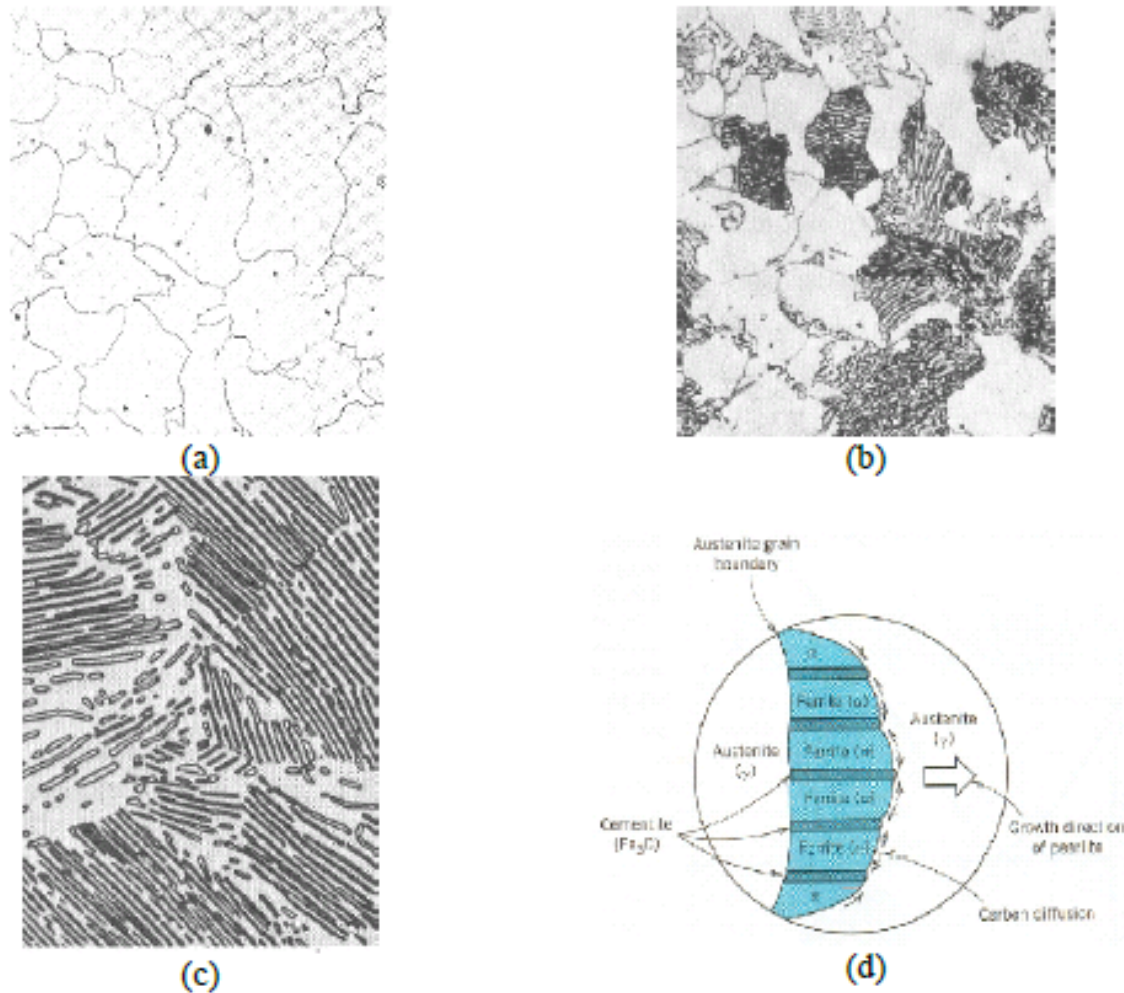
# Precipitação e reação eutetóide





# PRINCIPAIS TRATAMENTOS TÉRMICOS

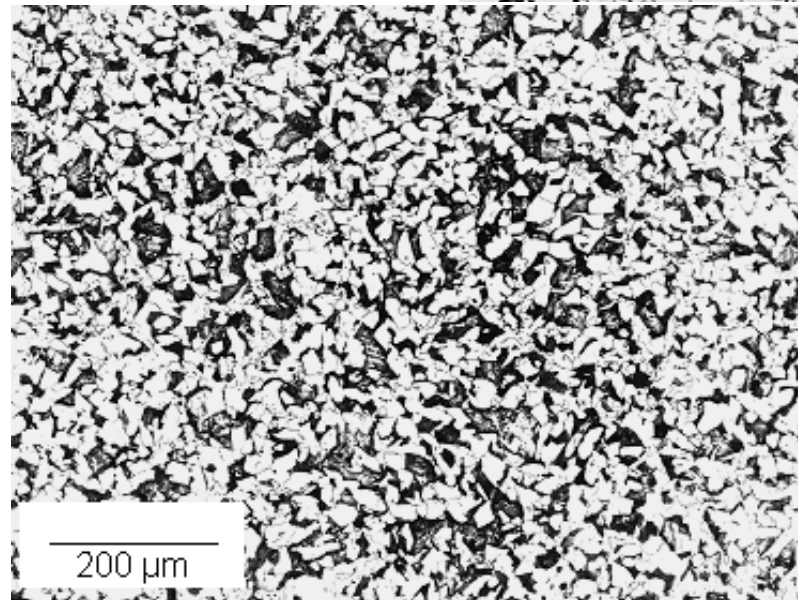
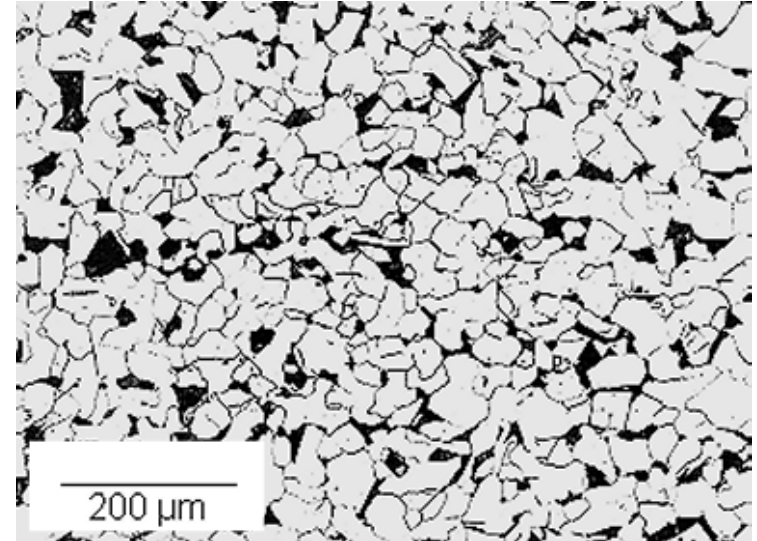
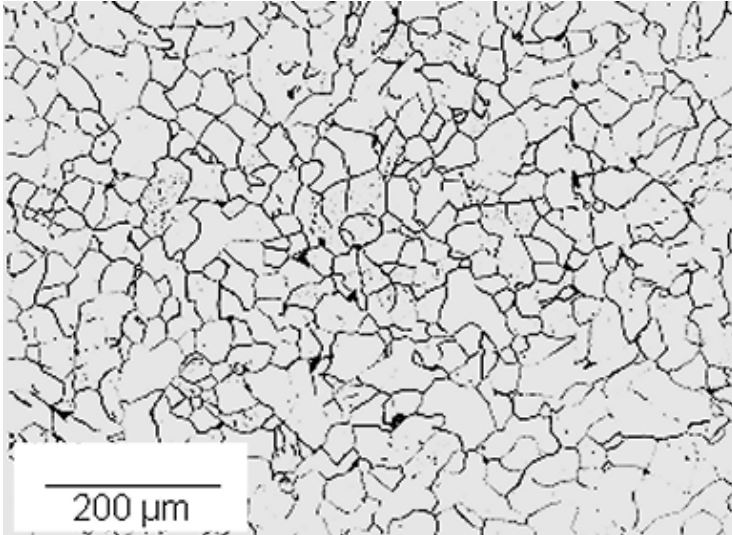
## Ferrosos



**Figura 8.** Microestruturas características de aços para construção mecânica. (a) aço doce, (b) aço 1020, (c) aço 1080 (composição eutetóide) e (d) ilustração esquemática de reação eutetóide, formação da perlita.

Ferrosos

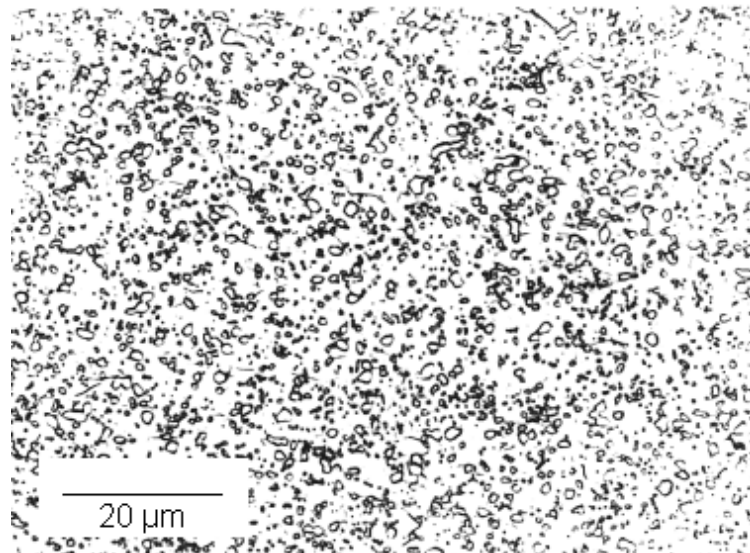
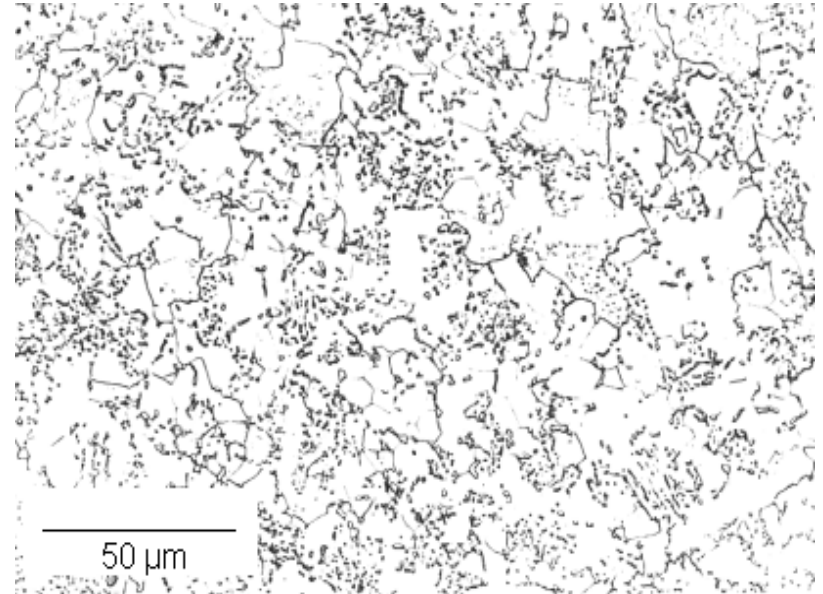
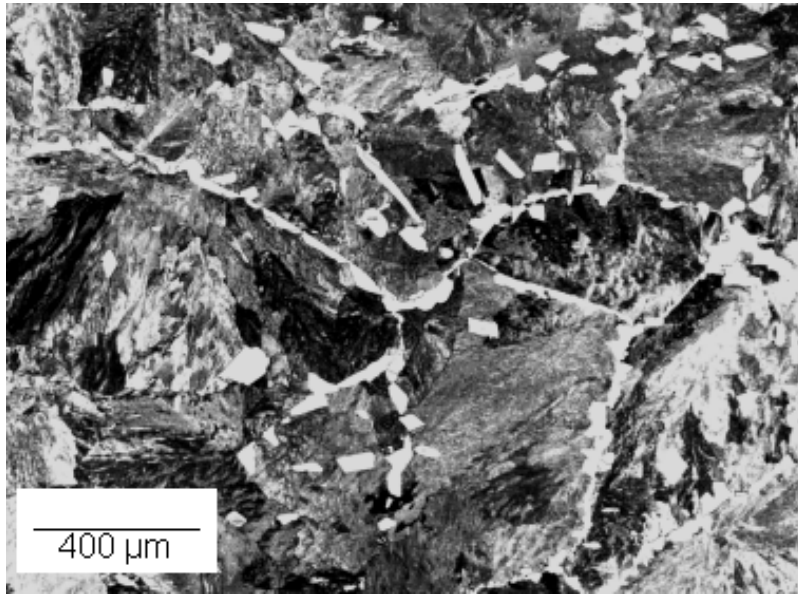
# Microestruturas





Ferrosos

# Microestruturas



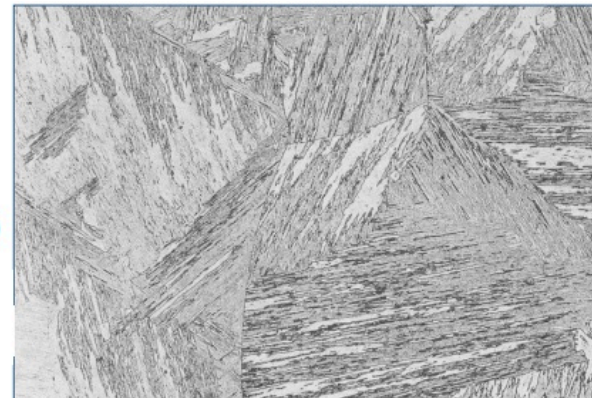
# Transformações de Fase

Transformações sem difusão – Transformações martensíticas

MARTENSITA DE BAIXO CARBONO

Martensita em ripas

Martensita escorregada



2% nital 100×  
3276 Lath martensite in a low-carbon alloy steel (0.03 C, 2 Mn). See also 3278 (below), which is a thin-foil electron micrograph of this same specimen.



Thin-foil specimen 26,000×  
3278 Thin-foil electron micrograph of the 0.03 C, 2 Mn alloy steel specimen in micrograph 3276, showing dislocation substructure in four of the martensite laths (marked  $L_1$  to  $L_4$ ).

# Transformações de Fase

Transformações sem difusão – Transformações martensíticas

## MARTENSITA DE ALTO CARBONO

### Plaquetas de martensita maclada

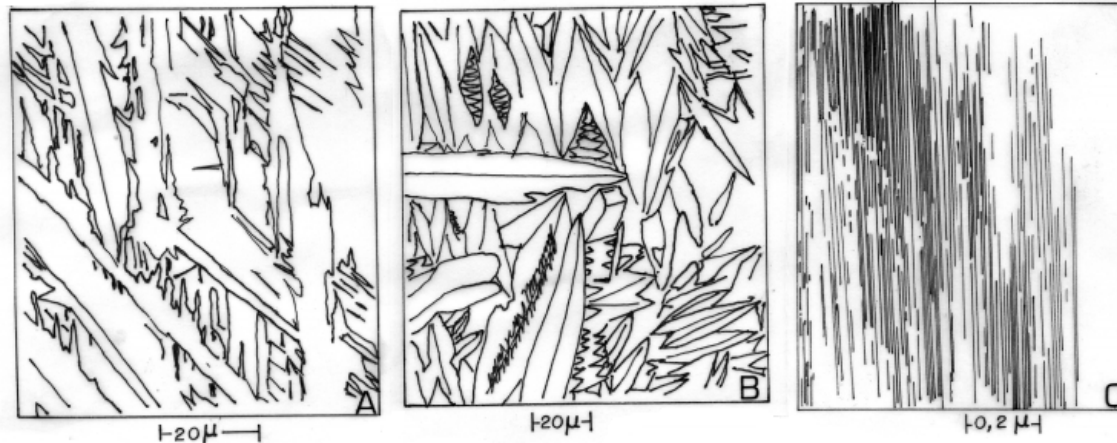
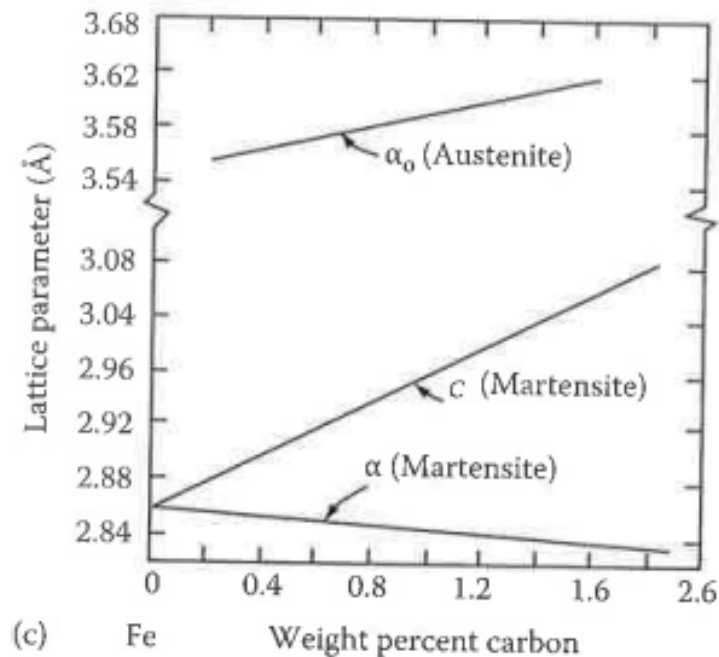


Fig. 6.10 - Estrutura das plaquetas de martensita. (a) Aço com 1,2%C, microscopia ótica; (b) Liga Fe-30%Ni, microscopia ótica; (c) Liga Fe-30%Ni MET - as linhas verticais são maclas minúsculas, correspondentes à subestrutura de uma plaqueta.

# Transformações de Fase

Transformações sem difusão – Transformações martensíticas



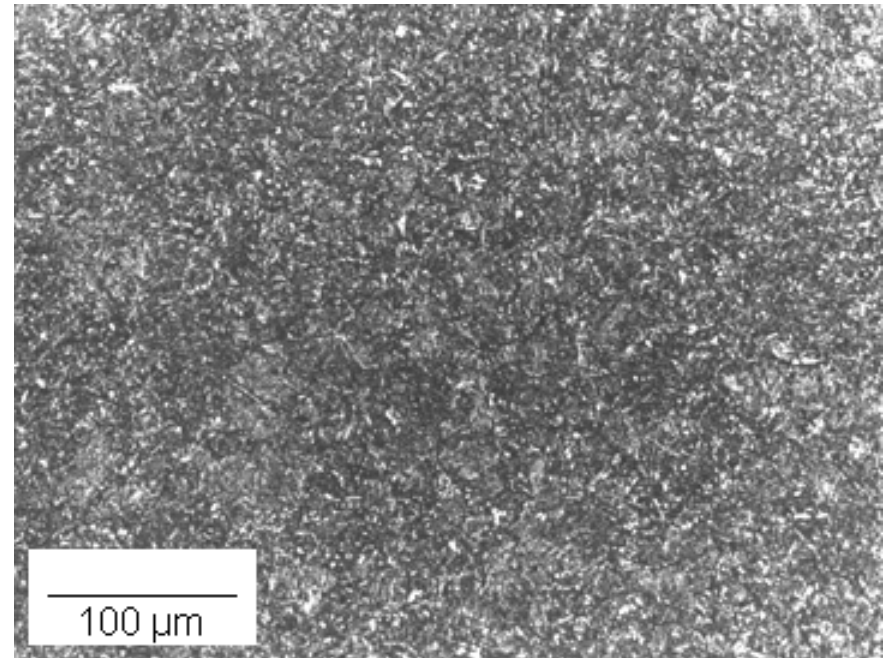
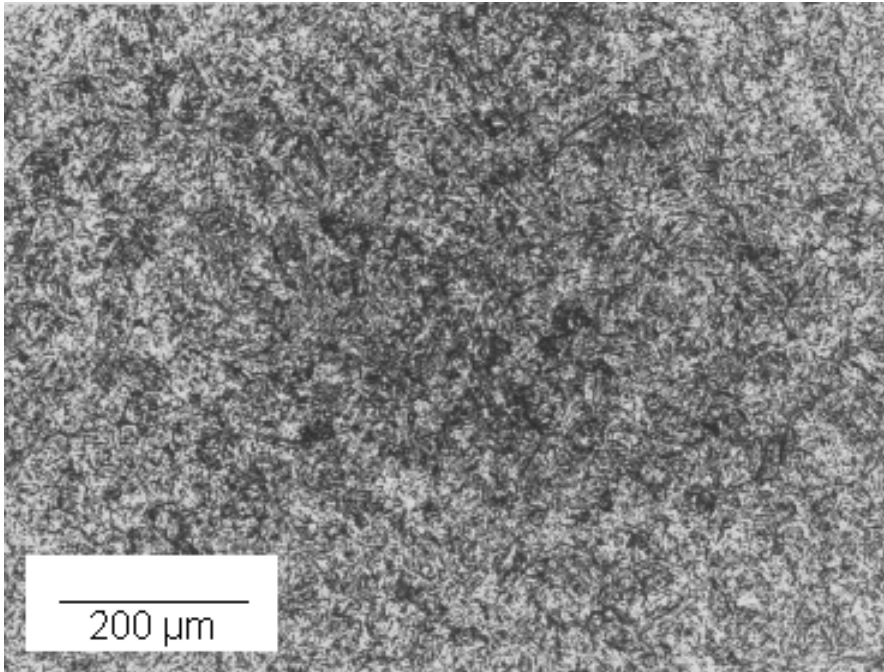
**FIGURE 6.5**

Illustrating (a) possible sites for interstitial atoms in bcc lattice, and (b) the large distortion necessary to accommodate a carbon atom (1.54 Å diameter) compared with the space available (0.346 Å), (c) Variation of  $a$  and  $c$  as a function of carbon content. (After C.S. Roberts, *Transactions AIME* 191 (1953) 203.)

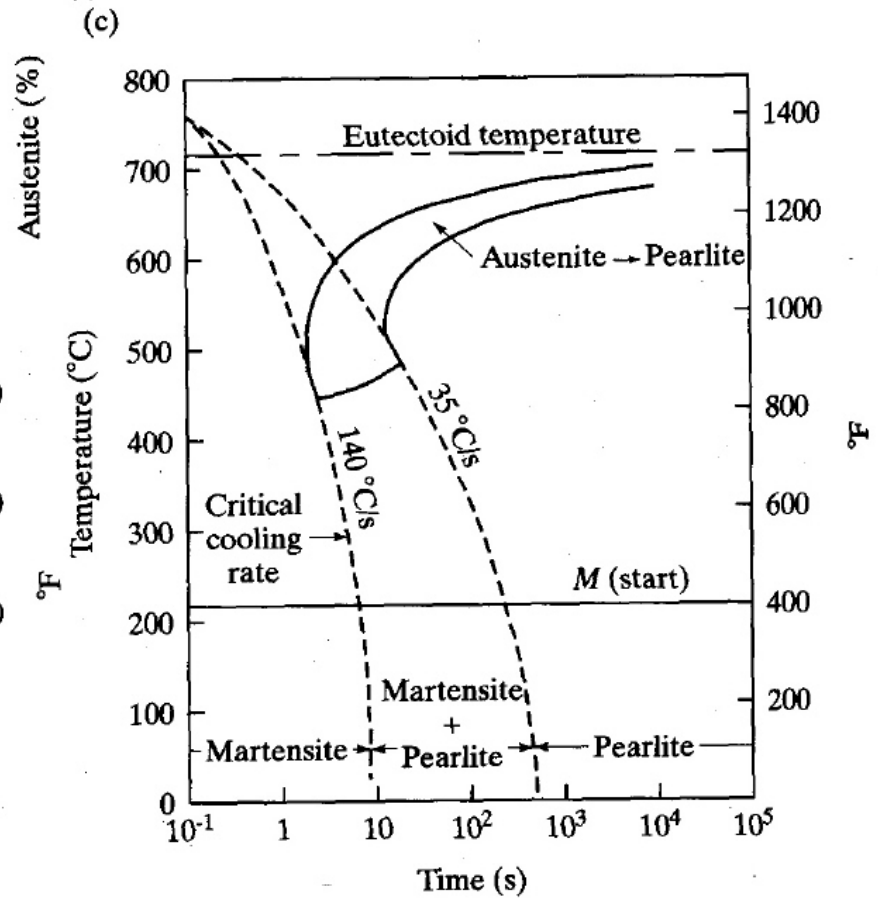
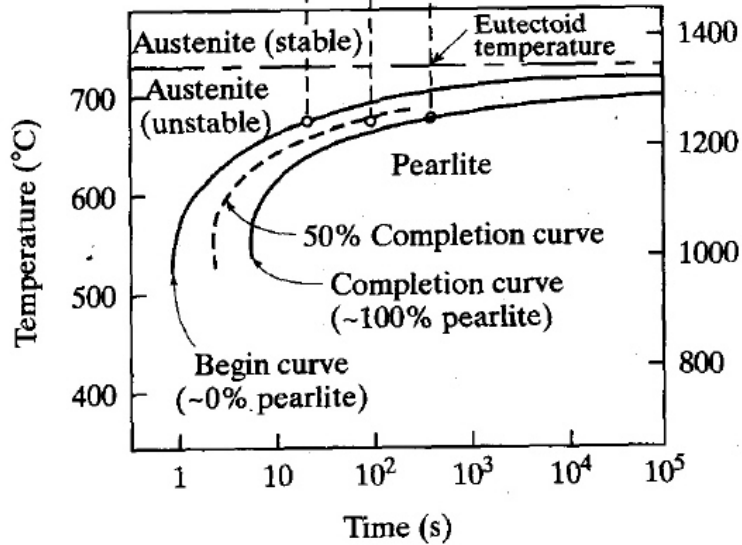
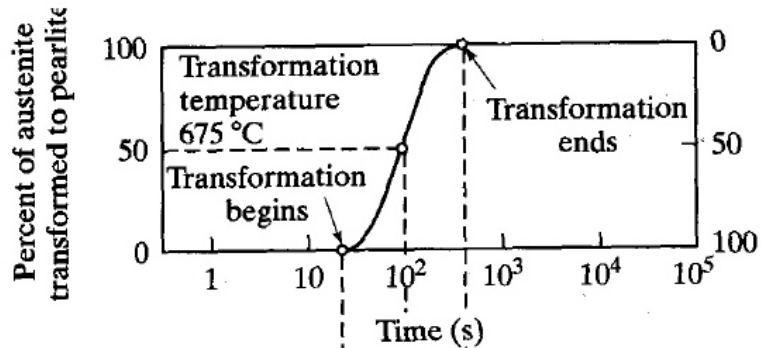


Ferrosos

# Microestruturas

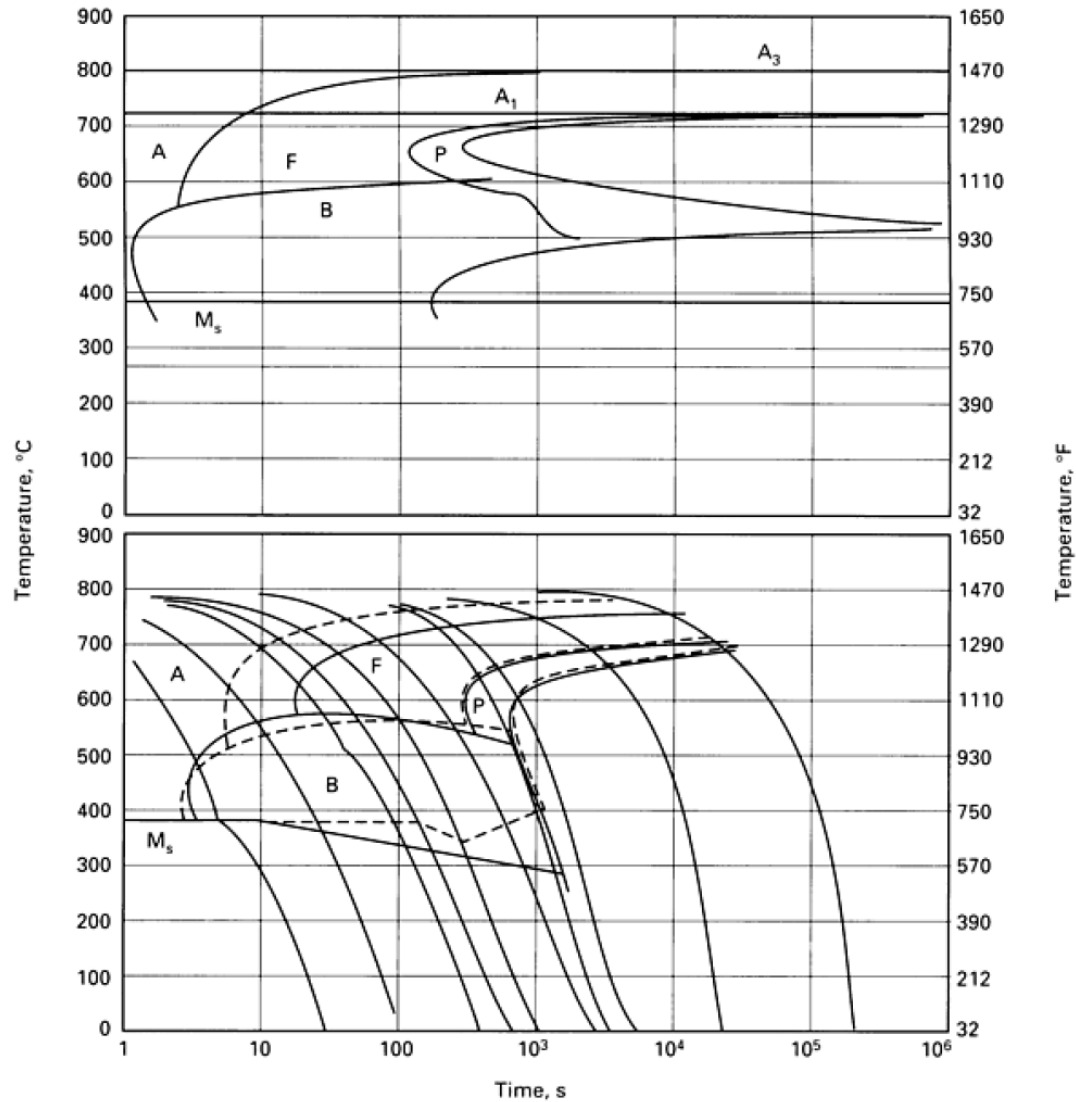


# Diagrama Fe-C



# PRINCIPAIS TRATAMENTOS TÉRMICOS

## Ferrosos

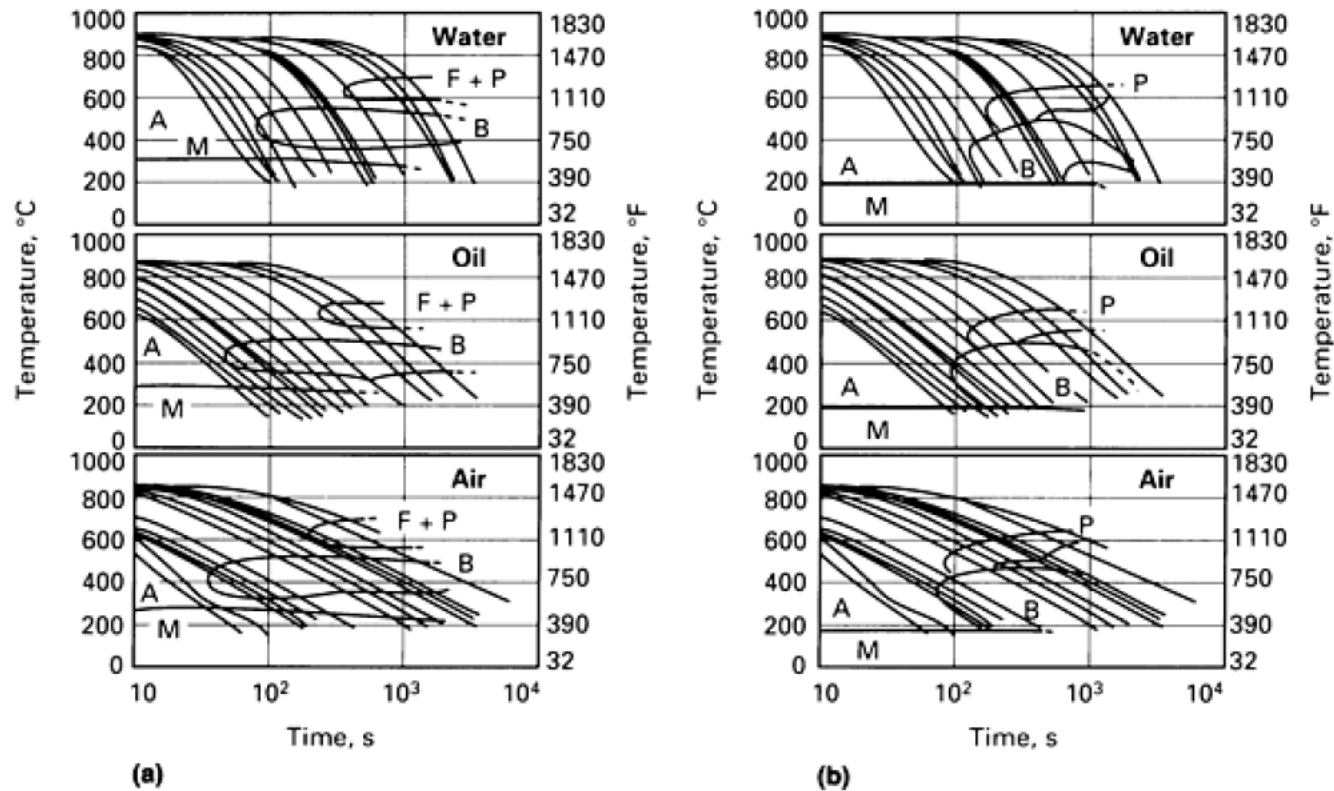


**Fig. 9** Isothermal transformation (upper) and CCT (lower) diagrams for AISI 4130 steel containing 0.30% C, 0.64% Mn, 1.0% Cr, and 0.24% Mo. The IT diagram illustrates the input data representation for calculations described in the text. The CCT diagrams are computed (dashed lines) and experimentally determined (solid lines). Source: Ref 10, 11



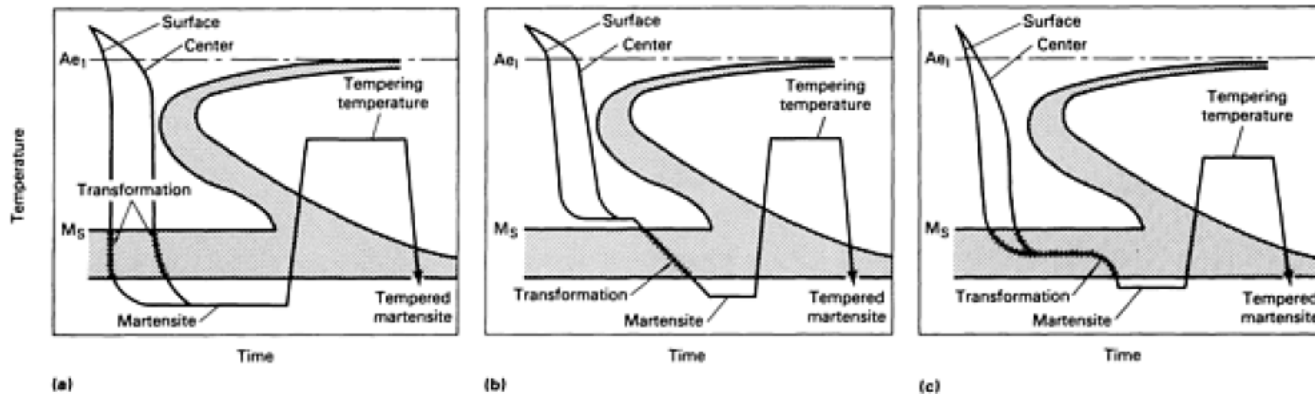
# PRINCIPAIS TRATAMENTOS TÉRMICOS

## Ferrosos



**Fig. 10** Examples of CCT diagrams for low-alloy steels. (a) CCT diagrams of a chromium-molybdenum steel using simulated cooling curves for water, oil, and air. Source: Ref 16. (b) Computer-calculated CCT diagrams of a nickel-chromium steel containing 0.77 wt% C based on the cooling curves for water, oil, and air given in (a). Source: Ref 17

# TTT – Aços

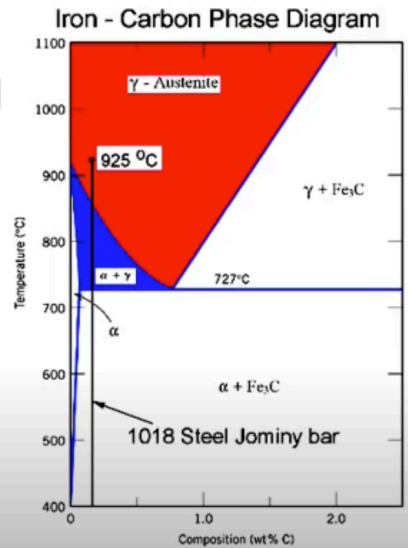


**Fig. 1** Time temperature transformation diagrams with superimposed cooling curves showing quenching and tempering. (a) Conventional process. (b) Martempering. (c) Modified martempering

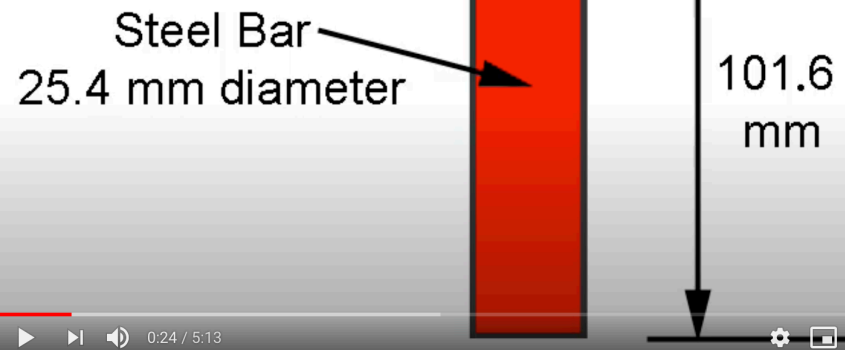
# Jominy

<https://www.youtube.com/watch?v=qW0aUbTWtVM>

First step - heat the 1018 steel bar to fully austenitize the structure (925 °C).



Jominy Bar Geometry  
Temporary washer



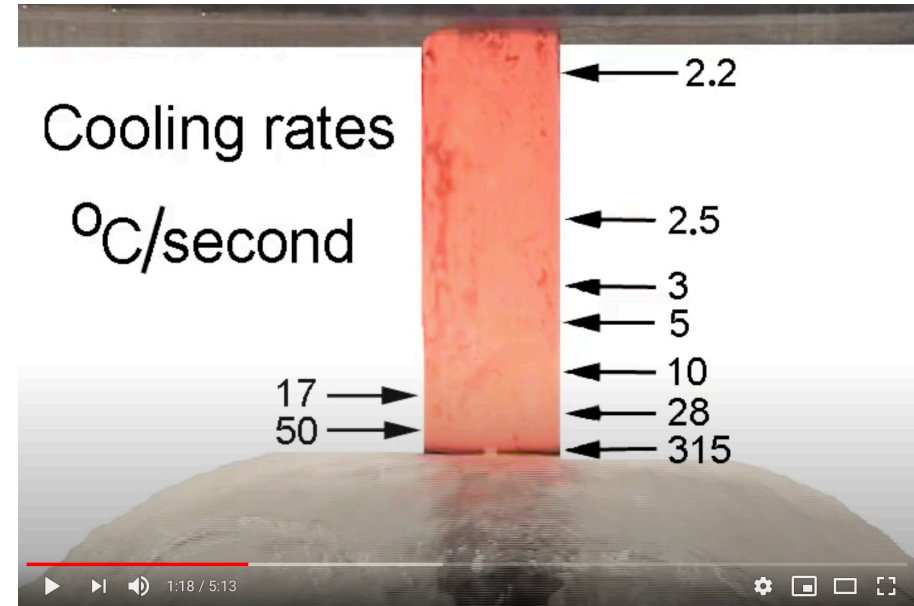
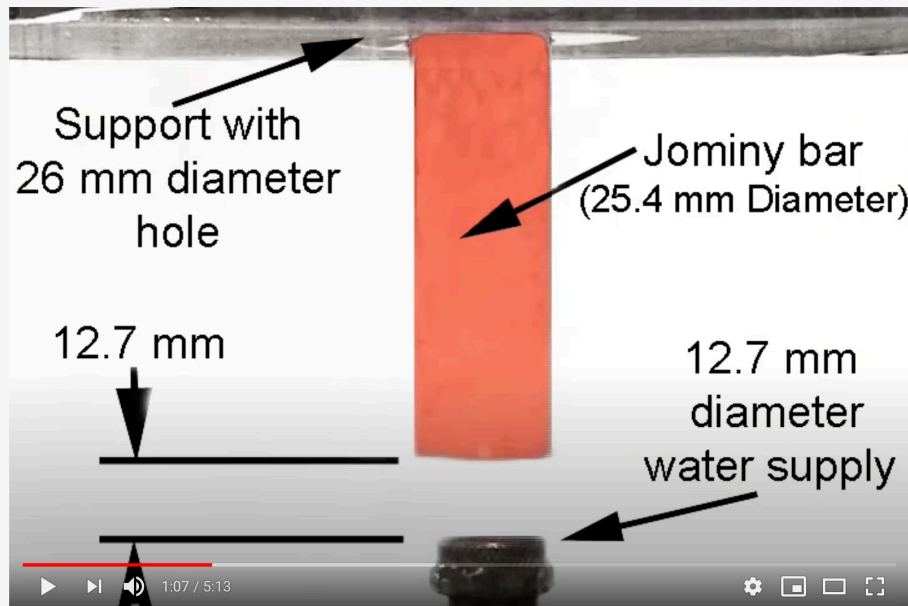
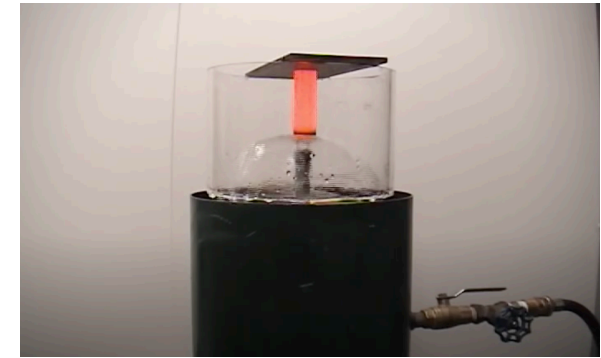
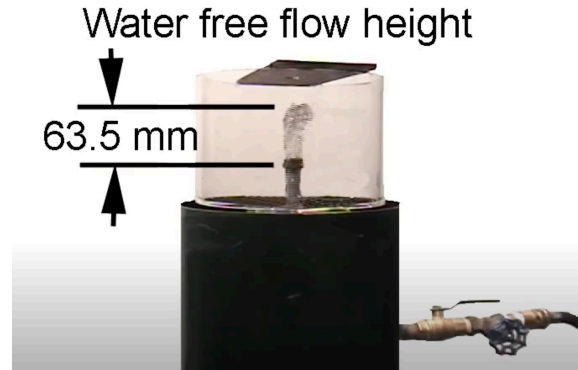
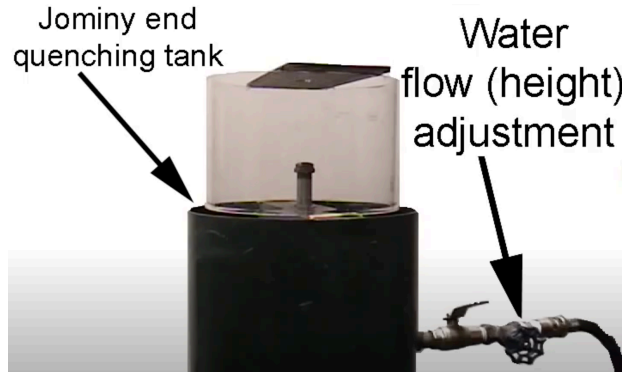
## Jominy bar test set up

A 12.7 mm diameter water jet orifice is set 12.7 mm from the bottom of the Jominy bar.

The free flowing water jet will rise 63.5 mm above the orifice without the specimen in position.

# Jominy

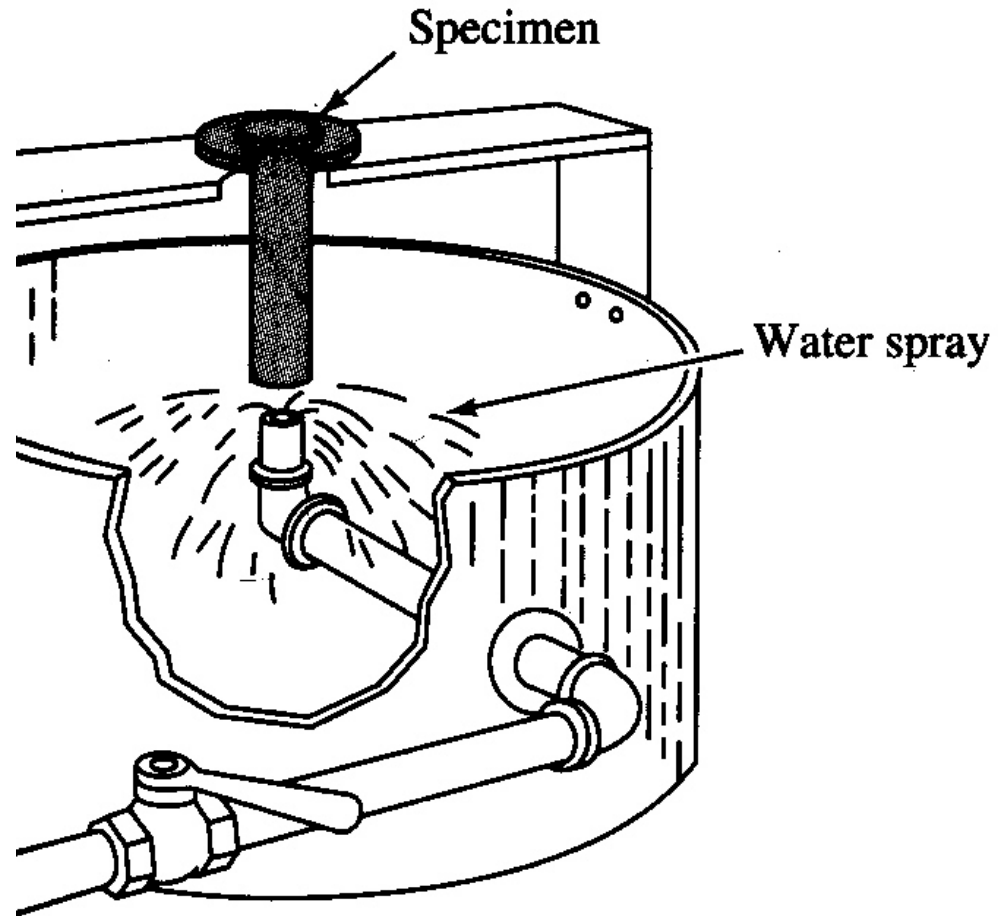
<https://www.youtube.com/watch?v=qW0aUbTWtVM>



# PRINCIPAIS TRATAMENTOS TÉRMICOS

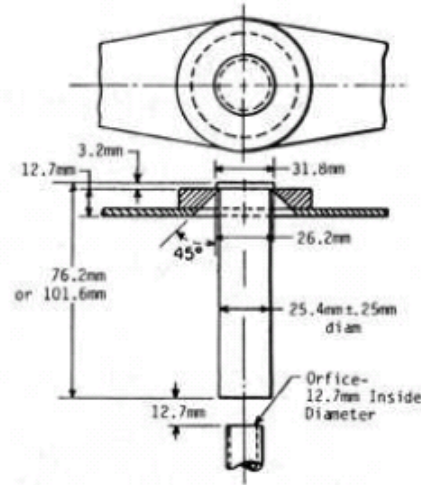
## Ferrosos

Dispositivo para produzir um corpo de prova de ensaio Jominy

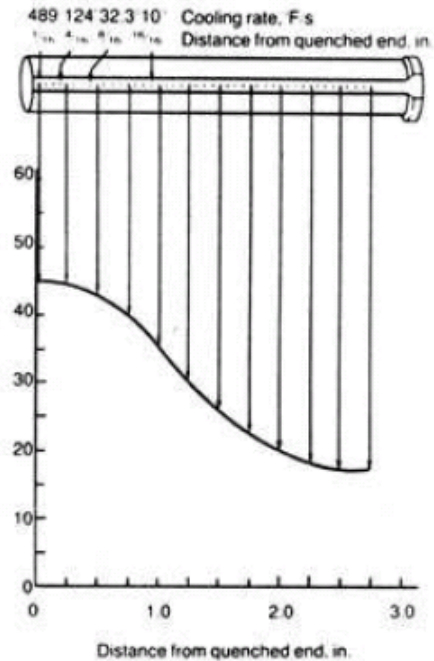


# PRINCIPAIS TRATAMENTOS TÉRMICOS

## Ferrosos



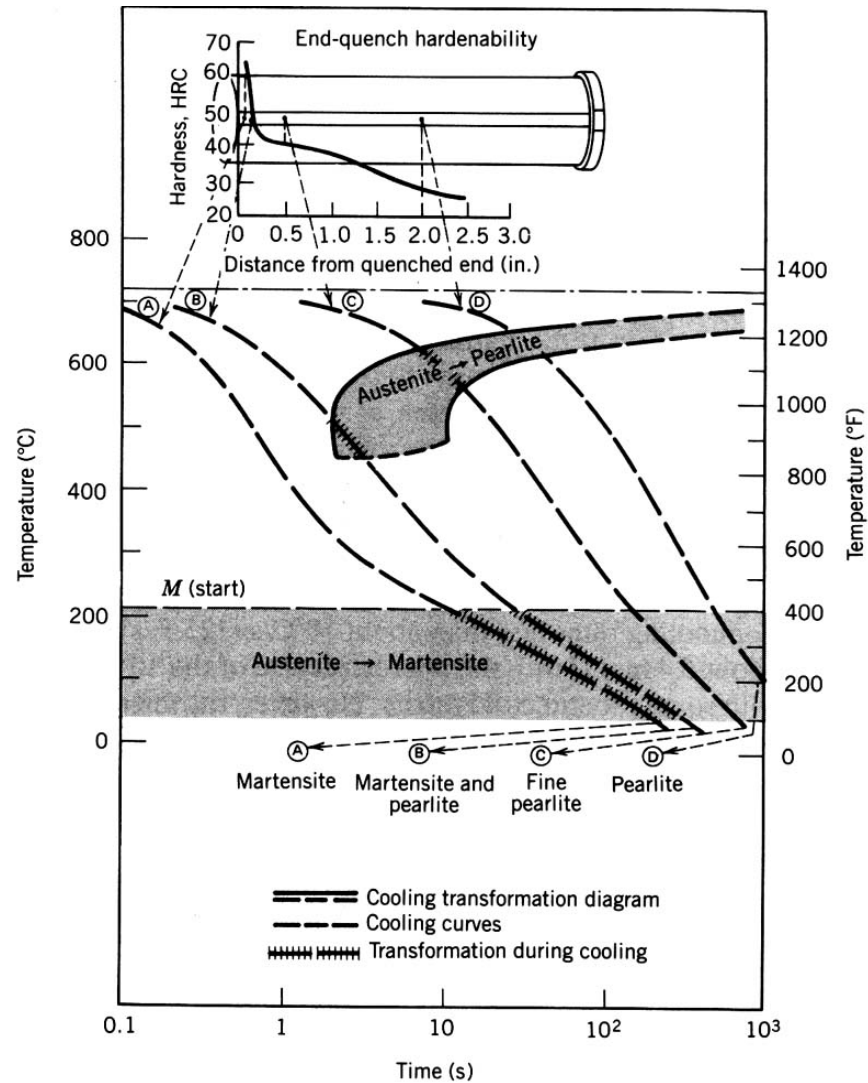
**Figura 6.** Esquema do dispositivo para realização do ensaio Jominy.



**Figura 7.** Medidas de dureza ao longo do corpo de prova.

Os resultados do ensaio permitem comparar a temperabilidade de diferentes aços e também servem como uma maneira de avaliar o material recebido (controle de qualidade).

# Diagrama Fe-C





### %C e fração de martensita/propriedades mecânicas

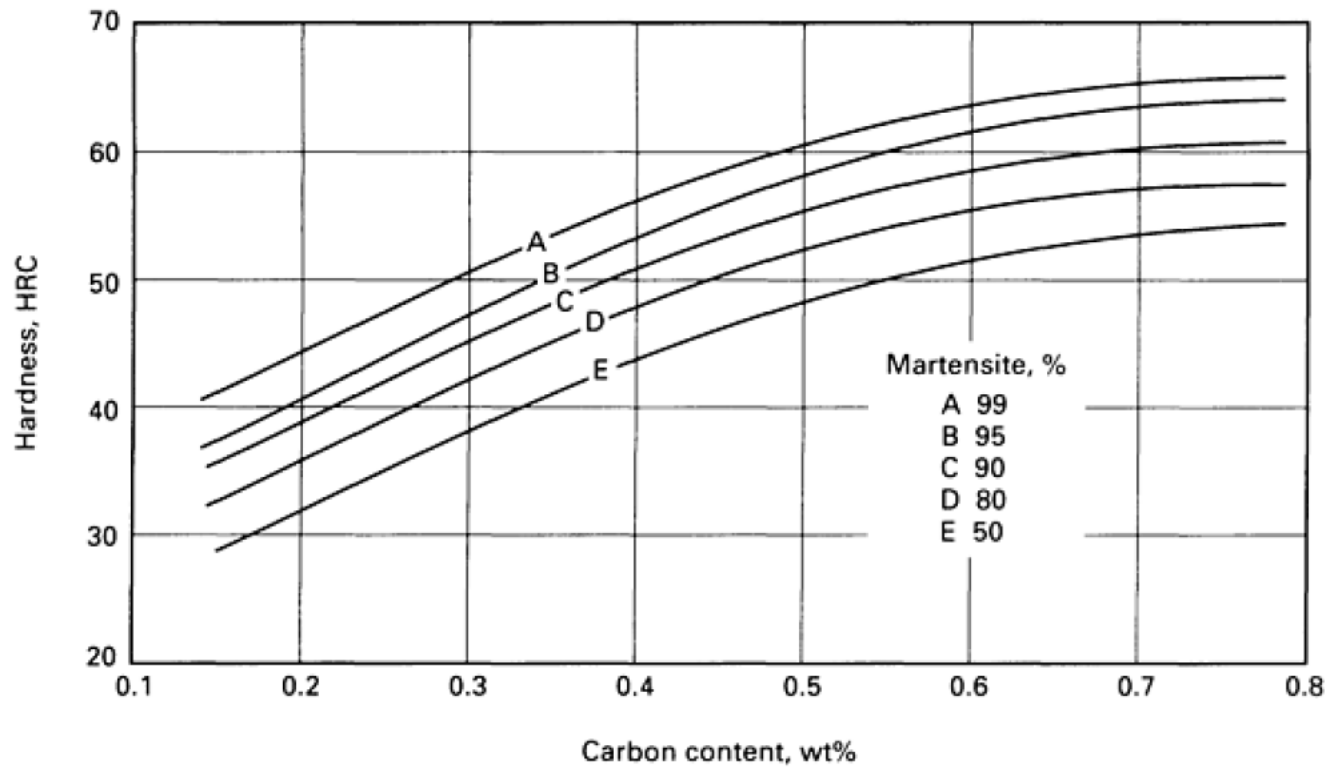


Fig. 13 Relationship between hardness, carbon content, and amount of martensite

## Tratamentos térmicos em aços

**Recozimento.** Os tratamentos térmicos de recozimento podem objetivar a diminuição do encruamento e causar uma diminuição de dureza do material metálico, como descrito anteriormente. No caso específico dos aços, o recozimento também caracteriza-se por um resfriamento lento (algumas horas, dependendo do tamanho da peça) a partir de uma temperatura onde exista 100% de austenita. Essa temperatura dependerá da composição do aço. O produto dessa reação é a formação de ferrita e de perlita. Existe também uma outra forma de tratamento térmico de recozimento, que na verdade é a chamada esferoidização da perlita. Esse tratamento consiste em tratar termicamente o aço em uma temperatura em torno da temperatura eutetóide (723°C) por várias horas, com isso a perlita tem sua morfologia lamelar alterada, tornando-se arredondada.

# Tratamentos térmicos em aços

## Recozimento.

Em função das propriedades mecânicas da ferrita e da perlita a tensão de resistência de um material recozido (em kgf/mm<sup>2</sup>) pode ser calculada de maneira aproximada pela seguinte relação:

$$\text{Tensão de resistência} = \frac{28,1\% \text{ ferrita} + 84,4\% \text{ perlita}}{100}$$

**Normalização.** O tratamento térmico de normalização é realizado de forma semelhante ao tratamento térmico de recozimento. A normalização caracteriza-se por um resfriamento do aço feito ao ar a partir de uma temperatura onde exista 100% de austenita, essa temperatura dependerá da composição do aço. O produto dessa reação é a formação de ferrita e de perlita. As porcentagens de ferrita e de perlita dependerão da composição do aço. Do ponto de vista da microestrutura, a diferença entre os tratamentos térmicos de recozimento e de normalização está na distância entre as lamelas de ferrita e cementita na perlita. A taxa de resfriamento é mais elevada no tratamento térmico de normalização do que no de recozimento, com isso a distância entre as lamelas é menor no aço normalizado e, conseqüentemente, a dureza também é um pouco maior do que no aço recozido.

## **Têmpera.**

A têmpera, de forma diferente do recozimento e da normalização, objetiva a formação de uma fase chamada martensita, que é dura e frágil. A têmpera caracteriza-se por um resfriamento rápido (alguns segundos) a partir de uma temperatura onde exista 100% de austenita, essa temperatura dependerá da composição do aço, usualmente até a temperatura ambiente. A têmpera é habitualmente realizada utilizando água, salmoura ou óleo. Isso também dependerá da composição do aço.

## Revenimento.

O revenimento é um tratamento térmico realizado logo após a têmpera. Esse tratamento térmico causa alívio de tensões na peça temperada, que tem por consequência um aumento na ductilidade e na tenacidade, embora isso cause uma diminuição de resistência de mecânica do aço. As temperaturas nas quais são realizados os tratamentos térmicos de revenimento estão sempre abaixo da temperatura crítica (temperatura onde se inicia a formação de austenita). Essas temperaturas estão em torno de 300°C e de 550°C. No entanto, existem algumas faixas de temperatura “proibidas” em função da fragilização de alguns tipos de aços.

**Tabela 1.** Dureza de aços recozidos, normalizados e temperados.

Aço %Carbono	Dureza Brinell Aço Recozido	Dureza Brinell Aço Normalizado	Dureza Brinell Aço Temperado
0,01	90	90	90
0,20	115	120	229
0,40	145	165	429
0,60	190	220	555
0,80	220	260	682
1,00	195	295	Acima de 682 + formação de trincas
1,20	200	315	Acima de 682 + formação de trincas
1,40	215	300	Acima de 682 + formação de trincas



**Temperabilidade** é “capacidade” que um aço tem de formar martensita, que é uma fase dura e frágil. O ensaio Jominy é um dos ensaios que é utilizado para avaliar a temperabilidade do aço. Quanto maior a fração volumétrica de martensita, mais duro será o aço. Quanto maior o teor de carbono também será maior a temperabilidade do aço (a adição de elementos de liga também pode favorecer um aumento da temperabilidade do aço, acentuando o efeito do carbono). A norma **ASTM A 255** descreve todo o procedimento para a realização do ensaio Jominy.

**Solubilização.** Esse tratamento térmico visa a eliminação de precipitados no material. É freqüentemente realizado em aços inoxidáveis, embora seja uma liga ferrosa. As temperaturas utilizadas nos tratamentos térmicos de solubilização são elevadas e mais próximas do ponto de fusão das ligas, em regiões onde existe apenas uma fase (diagramas de equilíbrio).

**Envelhecimento.** Esse tratamento visa o oposto da solubilização. O tratamento térmico de envelhecimento (ou recozimento isotérmico) visa a formação de precipitados que aumentam a resistência do material. Esses tratamentos são realizados em temperaturas onde o diagrama de equilíbrio mostra a presença de pelo menos duas fases.

**Homogeneização.** Esse tratamento térmico visa homogeneizar a composição química do material. Esse tratamento é comumente realizado em peças fundidas e seu tempo de duração é bastante longo, podendo chegar a dias. As temperaturas dos tratamentos térmicos de homogeneização são próximas das temperaturas utilizadas nos tratamentos térmicos de solubilização.

**Recozimento.** Os tratamentos térmicos de recozimento levam a diminuição do encruamento e causam uma diminuição de dureza do material. Esse tratamento também é conhecido como alívio de tensões e visa eliminar tensões residuais, causadas por diferentes motivos (soldagem, conformação mecânica) e é comum aos materiais ferrosos e não-ferrosos.

## TRATAMENTOS SUPERFICIAIS

Os tratamentos térmicos superficiais envolvem alterações microestruturais, e por consequência nas propriedades mecânicas apenas de parte superficial da peça ou componente. Exemplos de aplicação desses tratamentos: dentes de engrenagens, eixos, mancais, fixadores, ferramentas e matrizes. Muitos dos tratamentos térmicos superficiais consistem em aquecer o componente ou peça em atmosfera rica em elementos tais como carbono, nitrogênio ou boro. Estes processos aumentam a dureza superficial, resistência à fadiga e desgaste sem perda de tenacidade da peça ou componente. A seguir são apresentados alguns desses tratamentos.

# Transformações de Fase

O movimento dos átomos é termicamente ativado, isto é, quanto maior a temperatura maior é a movimentação dos átomos. A relação matemática que descreve essa movimentação é dada pelo coeficiente de difusão de um átomo em uma liga ou nele mesmo ( $D$ ). Essa relação é dada a seguir.

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (\text{m}^2/\text{s})$$

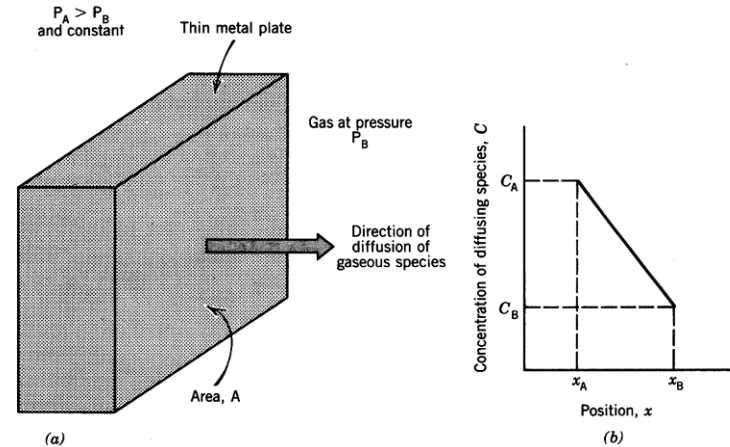
Onde  $D$  é o coeficiente de difusão de um elemento na liga ou no próprio metal.  $D_0$  é uma constante independente da temperatura,  $Q$  é uma energia de ativação para a difusão (J/mol, cal/mol ou eV/átomo),  $R$  é constante dos gases (8,31 J/mol K, 1,987 cal/mol K ou  $8,62 \times 10^{-5}$  eV/ átomo K) e  $T$  é a temperatura em Kelvin (K).

# Transformações de Fase

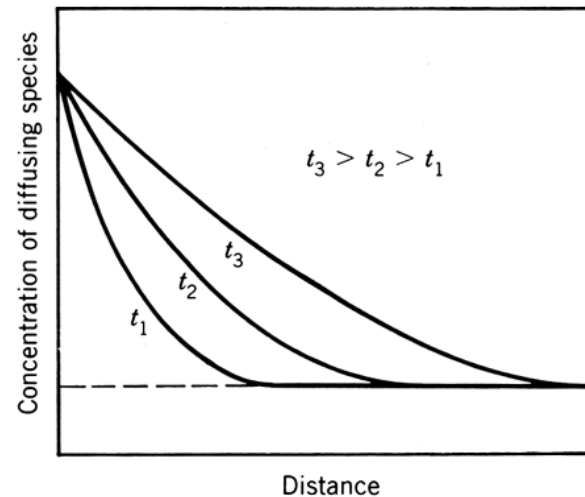
## Primeira lei de Fick

Elemento que se difunde	Reticulado base	$D_0$ cm <sup>2</sup> /s	$Q$ kJ/mol	$D = D_0 \cdot \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right)$	
				20 °C cm <sup>2</sup> /s	800 °C cm <sup>2</sup> /s
H	α-Fe	0,002	12,14	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-3</sup>
H	γ-Fe	0,0067		10 <sup>-10</sup>	10 <sup>-4</sup>
C	α-Fe	0,0079	75,78	10 <sup>-17</sup>	10 <sup>-5</sup>
C	γ-Fe	0,21	141,52	10 <sup>-27</sup>	10 <sup>-8</sup>
Fe	α-Fe	5,8	250,0	10 <sup>-46</sup>	10 <sup>-12</sup>
Fe	γ-Fe	0,58	284,30	10 <sup>-53</sup>	10 <sup>-14</sup>
Ni	Cu	0,001	148,64	—	—
Cu	Ni	65 · 10 <sup>-6</sup>	124,77	—	—
W	W		594,55		

$$\frac{Cx - C_o}{C_s - C_o} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$



## Segunda lei de Fick



# Difusão

Determine o tempo necessário para que um aço contendo 0,2% em peso de carbono tenha, numa posição 2 mm abaixo da superfície, um teor de carbono de 0,45%. Durante o tratamento de cementação realizado a 1000 °C, o teor de carbono na superfície foi mantido em 1,3%. O coeficiente de difusão do carbono neste aço é dado pela expressão:

$$D = 10^{-5} \exp\left(\frac{-32400}{1,987T}\right); (\text{m}^2/\text{s}).$$

Na temperatura de 1000 °C,  $D=2,74 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Temos enriquecimento da superfície em carbono, logo  $\frac{Cx - Co}{Cs - Co} = 1 - \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$ ,

substituindo os valores tem-se  $\frac{0,45 - 0,2}{1,3 - 0,2} = 1 - \text{erf}\left(\frac{2 \times 10^{-3}}{2\sqrt{2,74 \times 10^{-11} t}}\right)$ ,

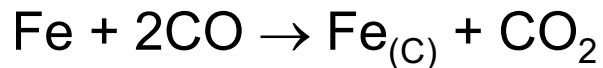
$$\text{erf}\left(\frac{2 \times 10^{-3}}{2\sqrt{2,74 \times 10^{-11} t}}\right) = 0,7222 \quad \text{Para esse valor } z = \frac{x}{2\sqrt{Dt}} = 0,7678$$

$$\frac{2 \times 10^{-3}}{2\sqrt{2,74 \times 10^{-11} t}} = 0,7678 \quad t = 13,2 \text{ horas}$$



## Cementação

É utilizada em aços carbono ou ligados com teores de carbono até 0,2%. O aço é aquecido entre 870-950°C em atmosfera rica em carbono. O processo de cementação segue a seguinte reação:



A atmosfera rica em carbono pode ser fornecida basicamente por gás, ou por um banho (líquido) de sais. A superfície rica em carbono produzida tem dureza entre 55 e 60 HRC. A profundidade da camada cementada varia normalmente de 0,5 a 1,5 mm.

## Nitretação.

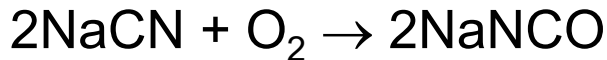
É utilizada em aços carbono ou ligados (Cr, Mo), aços ferramenta e aços inoxidáveis. O aço é aquecido entre 500-600°C em atmosfera rica em nitrogênio. Quando a atmosfera é gasosa, o gás utilizado contém amônia, que dissociada gera o nitrogênio. Outra forma de se obter o nitrogênio dissociado, a partir do  $N_2$ , pela formação de um plasma. Esse processo consiste em colocar uma mistura de gases em um recipiente onde foi existe vácuo. Nesse recipiente é estabelecida uma diferença de potencial, produzindo ionização do gás nitrogênio. Esse processo tem como vantagens menores problemas ambientais, melhor estabilidade dimensional e melhor controle da camada nitretada, além da utilização de menores temperaturas.

As durezas alcançadas na superfície atingem um valor maior do que 1100 HV. A profundidade da camada nitretada varia de 0,1 a 0,6 mm. No caso dos aços rápidos essa camada varia de 0,02 a 0,07 mm.

## **Carbonitreção.**

É um processo realizado em aços baixo carbono, onde ocorre um enriquecimento na superfície tanto em carbono como em nitrogênio.

Nesse caso a reação é dada por:



Neste processo o aço é aquecido entre 700 e 800°C em uma atmosfera rica em carbono e em amônia. A peça é resfriada em óleo.

## **Banhos de sal (Cianetos).**

É um processo realizado em aços baixo carbono (0,2%C), e aços ligados (0,08 a 0,2%C). Neste processo ocorre enriquecimento na superfície da peça tanto em carbono como em nitrogênio. O aço é colocado em um banho de sal (cianetos) em temperaturas entre 760 e 845°C. A dureza alcançada na superfície chega a 65 HRC. A profundidade da camada modificada fica entre 0,025 e 0,25 mm.

10. Determine o tempo necessário para que um aço contendo 0,2% em peso de carbono tenha, numa posição 2 mm abaixo da superfície, um teor de carbono de 0,45%. Durante o tratamento de cementação realizado a 1000 °C, o teor de carbono na superfície foi mantido em 1,3%. O coeficiente de difusão do carbono neste aço é dado pela expressão:  $D = 10^{-5} \exp\left(\frac{-32400}{1,987T}\right)$ ; (m<sup>2</sup>/s).

Na temperatura de 1000 °C,  $D=2,74 \times 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s.

Temos enriquecimento da superfície em carbono, logo  $\frac{C_x - C_o}{C_s - C_o} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$ , substituindo

os valores tem-se  $\frac{0,45 - 0,2}{1,3 - 0,2} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{2 \times 10^{-3}}{2\sqrt{2,74 \times 10^{-11} t}}\right)$ ,

$\operatorname{erf}\left(\frac{2 \times 10^{-3}}{2\sqrt{2,74 \times 10^{-11} t}}\right) = 0,7222$  Para esse valor  $z = \frac{x}{2\sqrt{Dt}} = 0,7678$

$\frac{2 \times 10^{-3}}{2\sqrt{2,74 \times 10^{-11} t}} = 0,7678$        $t = 13,2$  horas

## Têmpera superficial

**Chama.** É utilizada em aços médio-carbono e ferros fundidos, a dureza da superfície varia de 50 a 60 HRC. A camada temperada varia de 0,7 a 6 mm, podendo ocorrer pequenas distorções por causa das transformações de fase. Esse tratamento térmico superficial consiste no aquecimento localizado utilizando uma tocha oxiacetilênica e resfriamento com água ou outro meio (salmoura ou óleo).

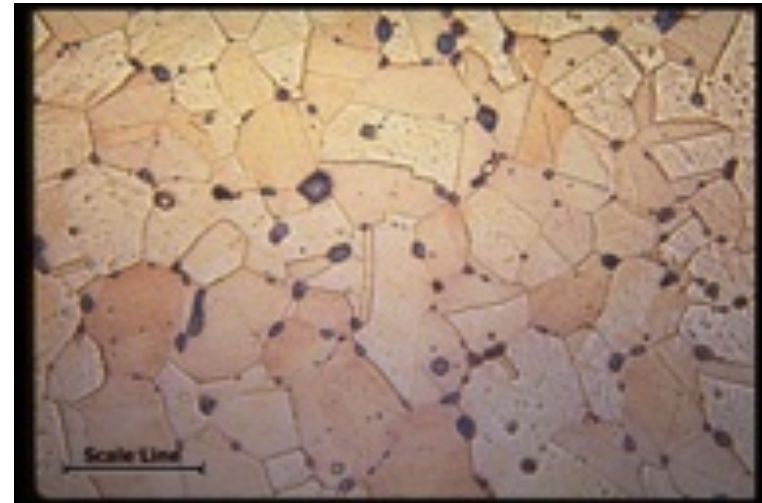
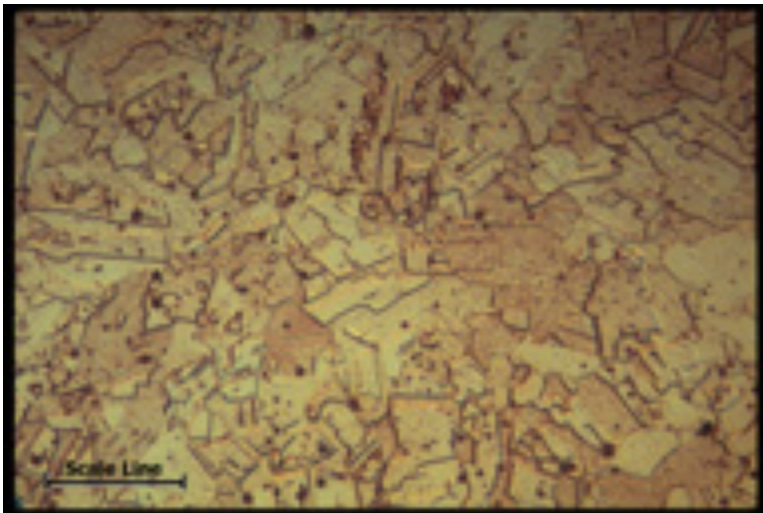
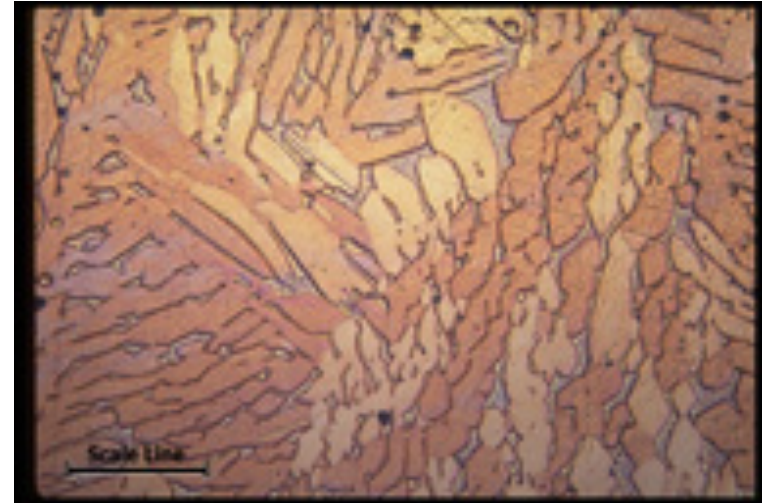
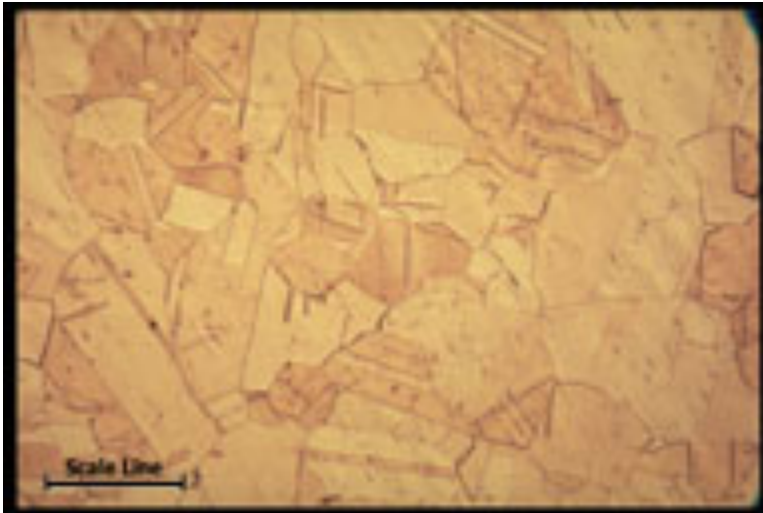
**Indução.** É utilizada em aços médio-carbono e ferros fundidos, a dureza da superfície varia de 50 a 60 HRC. A camada temperada varia de 0,7 a 6 mm, podendo ocorrer pequenas distorções por causa das transformações de fase. Esse tratamento térmico superficial consiste no aquecimento localizado utilizando espiras de cobre onde passa uma corrente com alta frequência. O resfriamento é feito com água ou outro meio (salmoura ou óleo).

## **Jateamento com Granalhas**

O jateamento com granalhas é um processo de trabalho a frio, que consiste em projetar granalhas com alta velocidade (entre 20 e 100 m/s) contra uma superfície de um material metálico. A granalha atua como se fosse um pequeno martelo sobre a superfície metálica causando deformação plástica. Esse processo de deformação superficial é largamente utilizado para introduzir tensões residuais de compressão na superfície, as quais melhoram as propriedades mecânicas dos componentes em serviço, em especial, aumentam a vida em fadiga.

Tratamentos térmicos não ferrosos

# Microestruturas



# Tratamentos Térmicos

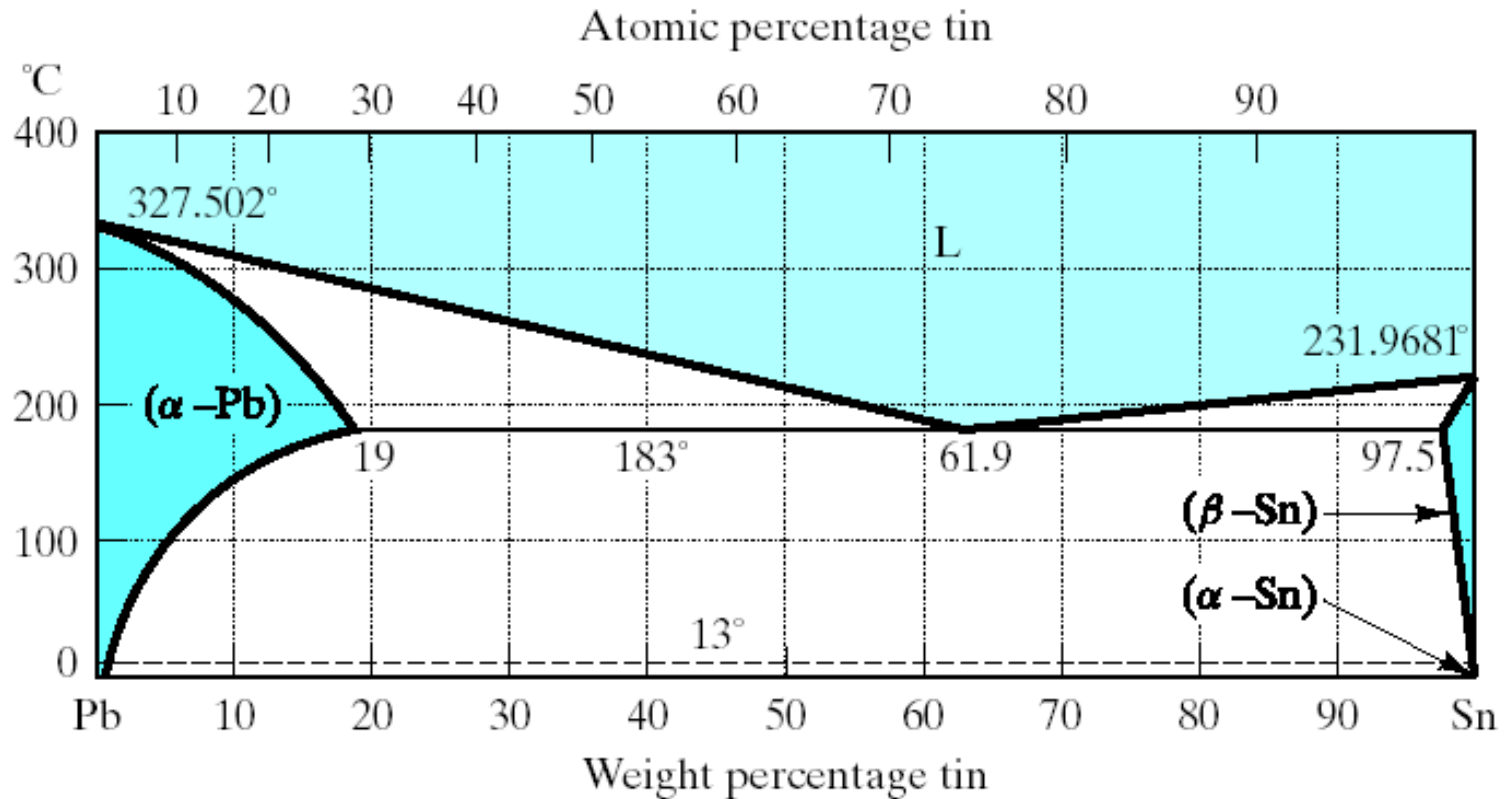
- As propriedades mecânicas, bem como o desempenho em serviço, de um metal e em especial das ligas dependem da sua composição química, da estrutura cristalina, do histórico de processamento mecânico e termomecânico e dos **tratamentos térmicos** realizados



# Tratamentos Térmicos

- os tratamentos térmicos podem ser descritos por são ciclos de aquecimento e resfriamento controlados no material puro ou liga, que causam modificações na microestrutura dos mesmos

# Diagrama não-ferroso



# Tratamentos Térmicos de Materiais Não-Ferrosos

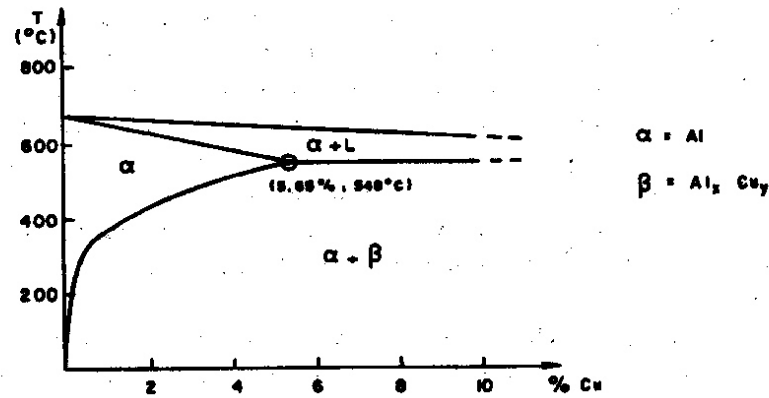
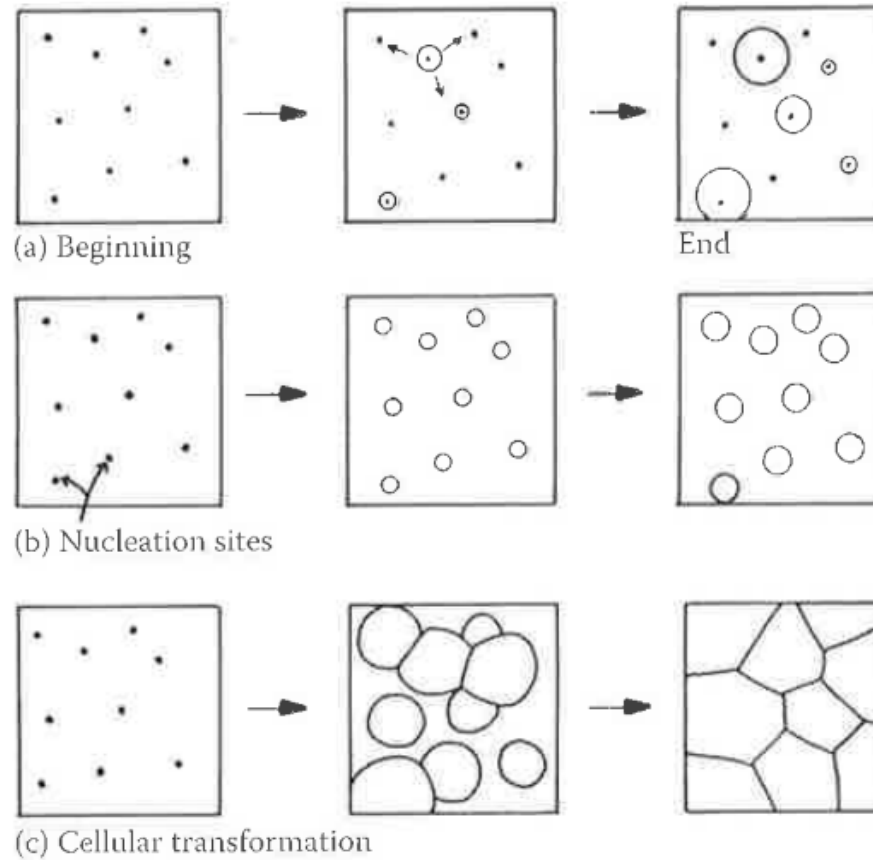


Figura 1 - Parte do diagrama de equilíbrio Al-Cu.

Tratamento	Microestrutura	Propriedade	Diagrama
Solubilização $T_a \rightarrow T_t \rightarrow T_s$	$\alpha + \beta \rightarrow \alpha$	$\sigma_t, \delta \uparrow$	
Resfriamento brusco $T_t \rightarrow T_a$	$\alpha \rightarrow \alpha$ super-saturado	$\sigma_t, \delta$ depende da velocidade de resfriamento	
Precipitação (envelhecimento natural) $T_t = T_a$ (envelhecimento artificial) $T_s > T_t > T_a$	$\alpha \rightarrow \alpha + \beta$ precipitado	$\sigma \uparrow, \delta \uparrow$	

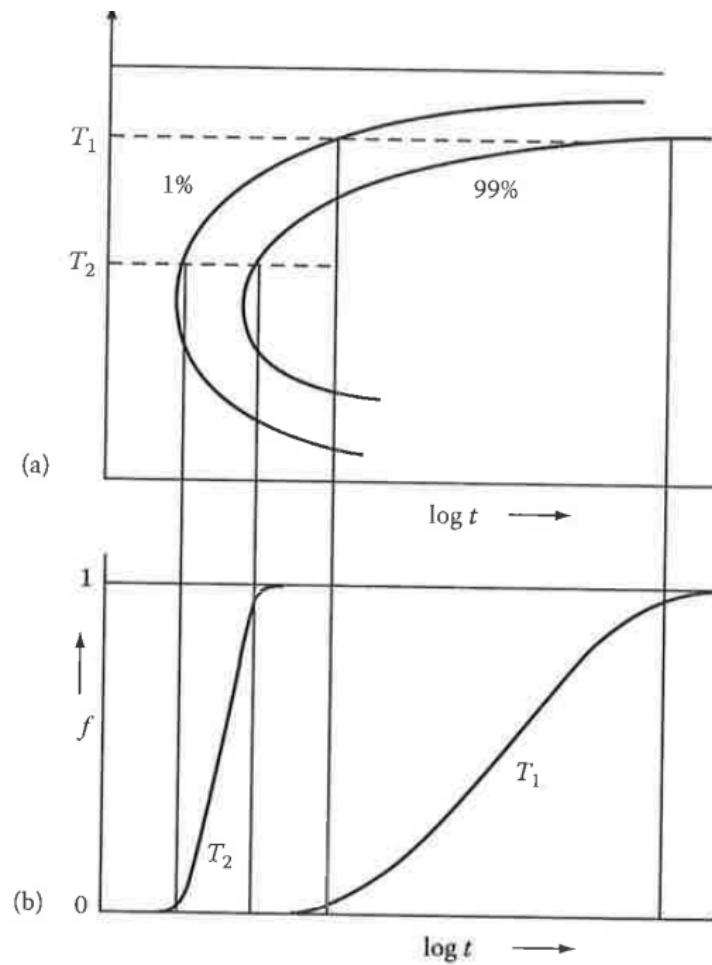
## Tratamentos Térmicos de Materiais Não-Ferrosos



**FIGURE 5.24**

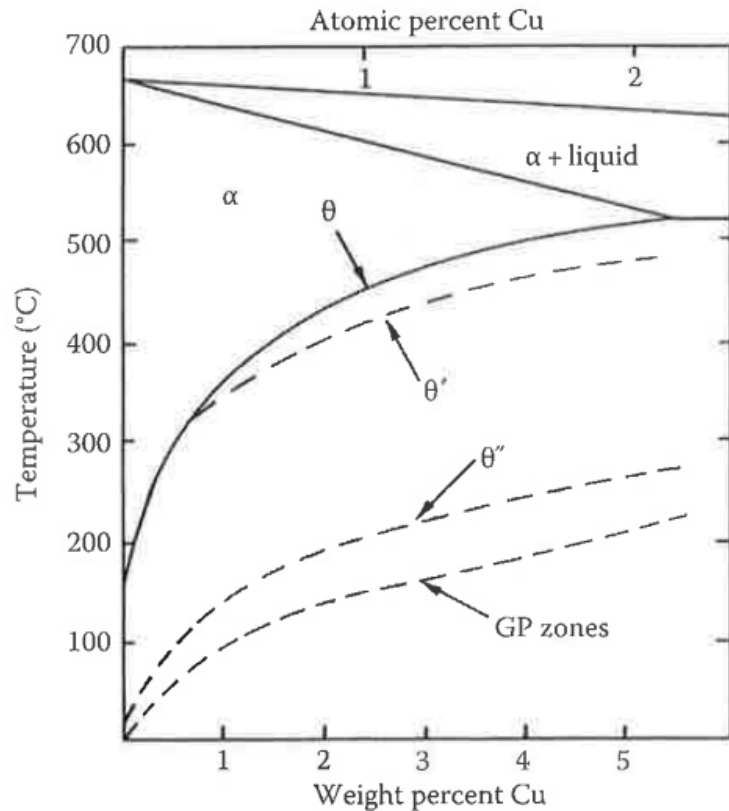
(a) Nucleation at a constant rate during the whole transformation, (b) Site saturation—all nucleation occurs at the beginning of transformation, (c) A cellular transformation.

# Tratamentos Térmicos de Materiais Não-Ferrosos



**FIGURE 5.23**  
The percentage transformation versus time for different transformation temperatures.

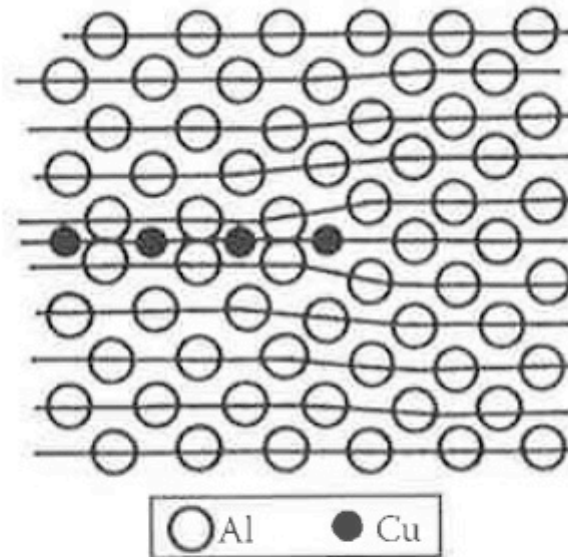
# Precipitação



**FIGURE 5.25**

Al-Cu phase diagram showing the metastable GP zone,  $\theta''$  and  $\theta'$  solvuses. (Reproduced from G. Lorimer, *Precipitation Processes in Solids*, K.C. Russell and H.I. Aaronson (Eds.), The Metallurgical Society of AMIE, 1978, p. 87.)

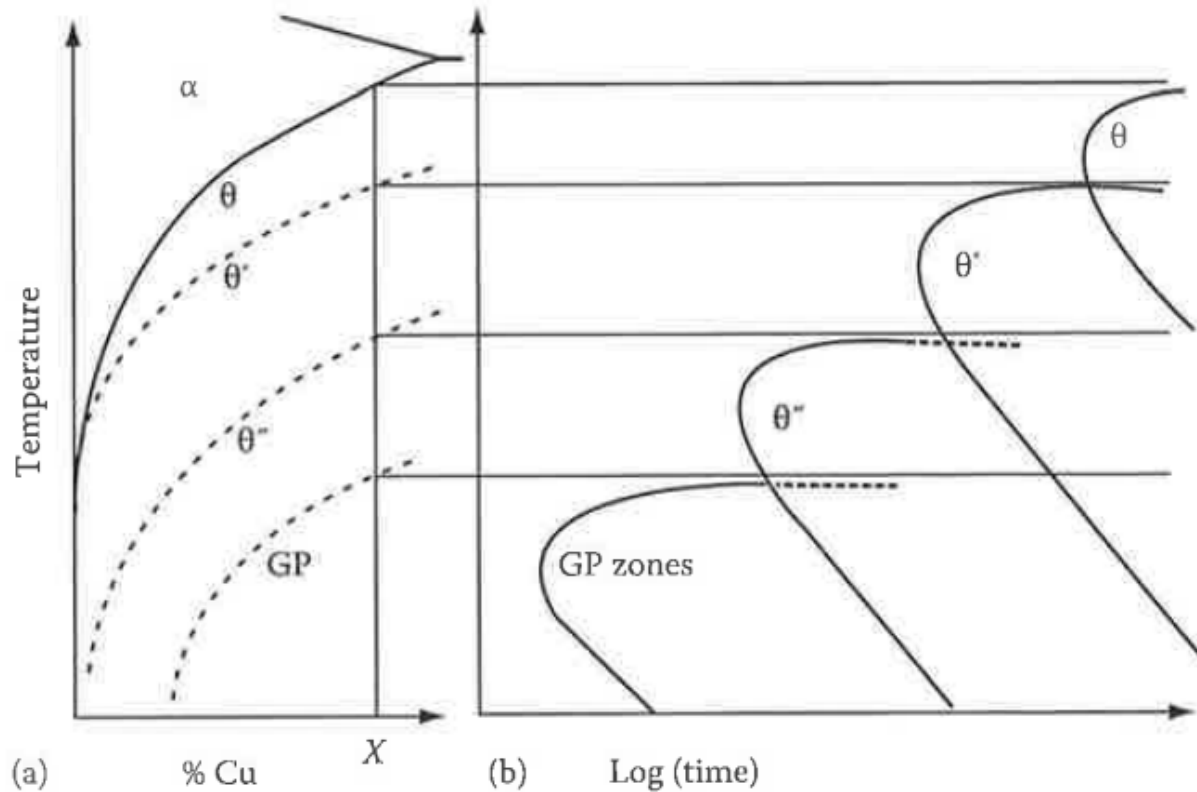
# Precipitação



**FIGURE 5.26**

Section through a GP zone parallel to the (200) plane. (Based on the work of V. Gerold: *Zeitschrift für Metallkunde* 45 (1954) 599.)

# Precipitação

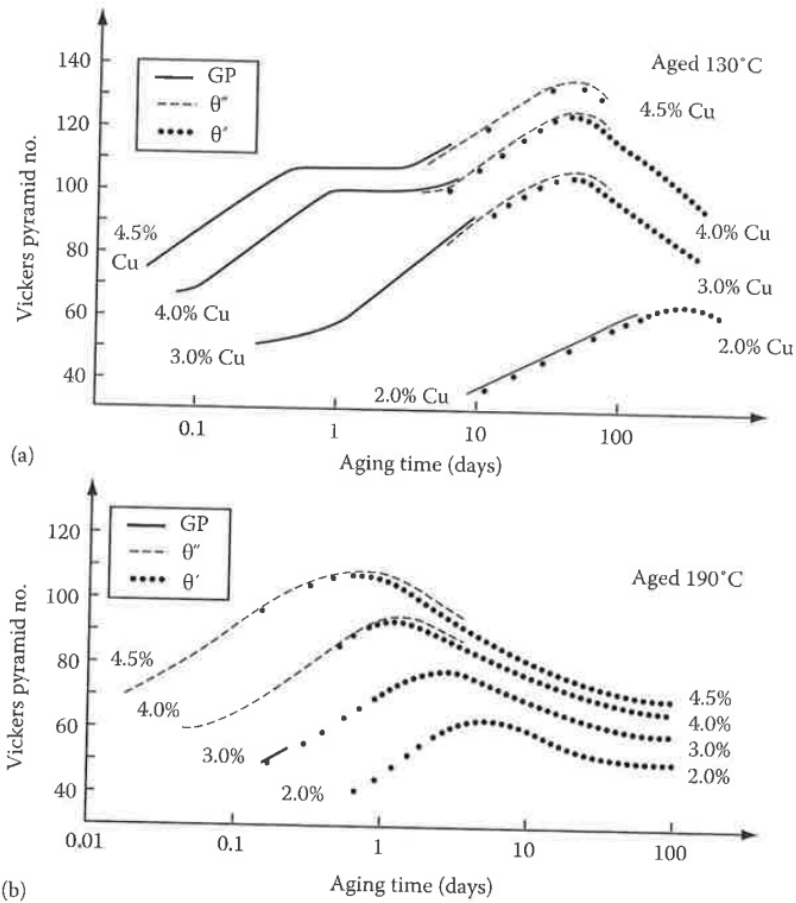


**FIGURE 5.32**

(a) Metastable solvus lines in Al-Cu (schematic), (b) Time for start of precipitation at different temperatures for alloy  $X$  in (a).

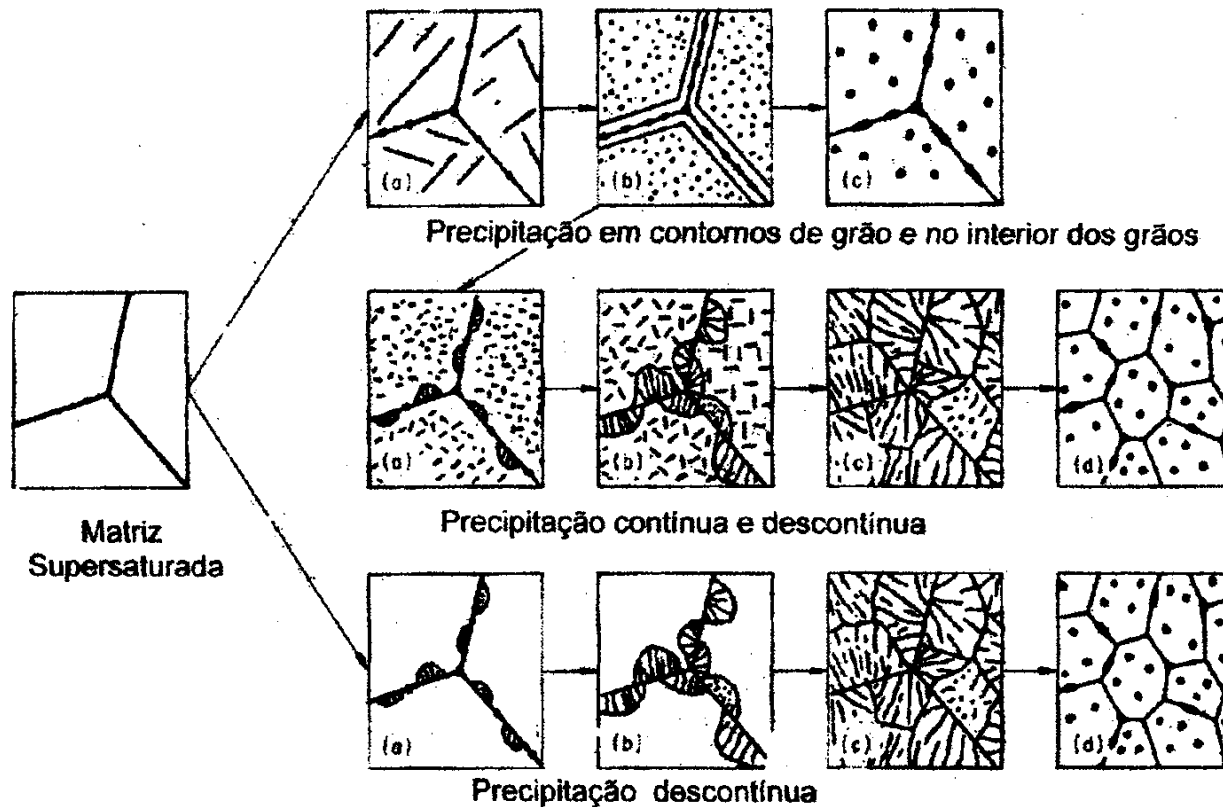


# Precipitação

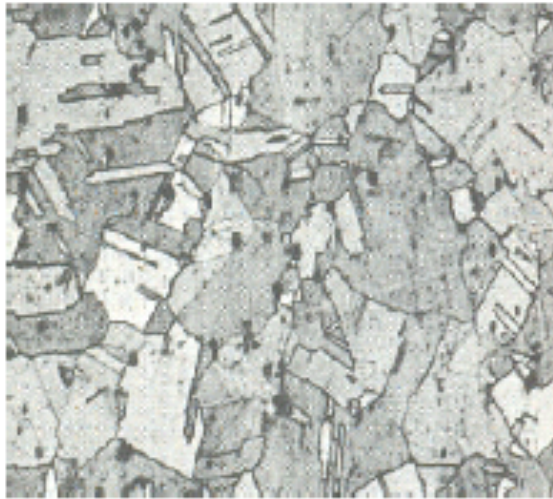


**FIGURE 5.37** Hardness v. time for various Al-Cu alloys at (a) 130°C (b) 190°C. (After J.M. Silcock, T.J. Heal and H.K. Hardy, *Journal of the Institute of Metals* 82 (1953-1954) 239.)

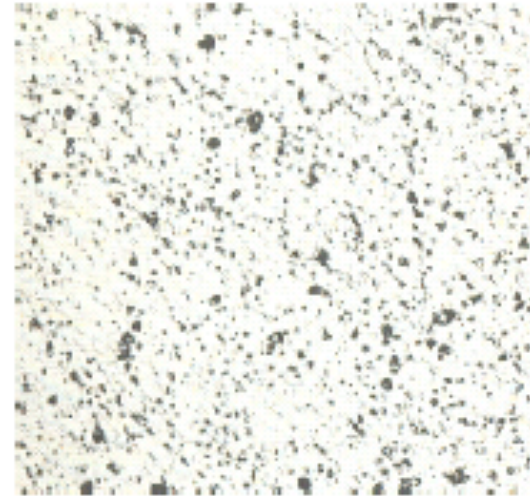
# Precipitação



## Tratamentos Térmicos de Materiais Não-Ferrosos



(a)



(b)

**Figura 13.** (a) Cobre, laminado e recozido contendo impurezas. (b) Alumínio laminado e recozido com resíduos de Fe, Mg, Si e Cu (precipitados  $\text{FeAl}_3$ ,  $\text{AlFeSi}$ ,  $\text{Mg}_2\text{Al}_3$  entre outros).

**Homogeneização.** Esse tratamento térmico visa homogeneizar a composição química do material. Esse tratamento é comumente realizado em peças fundidas e seu tempo de duração é bastante longo, podendo chegar a dias. As temperaturas dos tratamentos térmicos de homogeneização são próximas das temperaturas utilizadas nos tratamentos térmicos de solubilização.

**Recozimento.** Os tratamentos térmicos de recozimento levam a diminuição do encruamento e causam uma diminuição de dureza do material. Esse tratamento também é conhecido como alívio de tensões e visa eliminar tensões residuais, causadas por diferentes motivos (soldagem, conformação mecânica) e é comum aos materiais ferrosos e não-ferrosos.

**Solubilização.** Esse tratamento térmico visa a eliminação de precipitados no material. É freqüentemente realizado em aços inoxidáveis, embora seja uma liga ferrosa. As temperaturas utilizadas nos tratamentos térmicos de solubilização são elevadas e mais próximas do ponto de fusão das ligas, em regiões onde existe apenas uma fase (diagramas de equilíbrio).

**Envelhecimento.** Esse tratamento visa o oposto da solubilização. O tratamento térmico de envelhecimento (ou recozimento isotérmico) visa a formação de precipitados que aumentam resistência do material. Esses tratamentos são realizados em temperaturas onde o diagrama de equilíbrio mostra a presença de pelo menos duas fases.

Para ilustrar melhor a sequência de tratamentos térmicos dos materiais não-ferrosos são apresentadas designações de tratamentos para o alumínio e suas ligas:

H1 = somente encruado;

H2 = encruado e parcialmente recozido;

T1 = trabalhado a quente + envelhecimento natural (temperatura ambiente);

T2 = trabalhado a quente + encruamento + envelhecimento natural;

T3 = solubilizado + encruamento + envelhecimento natural;

T4 = solubilizado + envelhecimento natural;

T5 = trabalhado a quente + envelhecimento artificial (forno);

T6 = solubilizado + envelhecimento artificial;

T7 = solubilização + estabilização (super-envelhecimento);

T8 = solubilização + encruamento + envelhecimento artificial;

T9 = solubilização + envelhecimento artificial + encruamento;

T10 = trabalhado a quente + encruamento + envelhecimento artificial.

# Referências

Principles of Heat Treatment of Steel  
George Krauss

ASM Metals Handbook vol 4  
Heat treatment

# Atividades

1. Filmar experimento com crescimento de bolhas de sabão montar um power point com a descrição do observado.
2. Montar uma tabela com propriedades mecânicas de um aço ABNT 1020 e ABNT 1040 (limite de escoamento e resistência) com diferentes tratamentos térmicos. Pelos menos 5 fontes diferentes e referenciar.

Dúvidas: [machadoi@usp.br](mailto:machadoi@usp.br)

Colocar no assunto: aula toto PMR 3203