



# Complementos de Fabricação Mecânica

## PMR 3301

Profa. Izabel Machado

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



# Tratamentos Térmicos

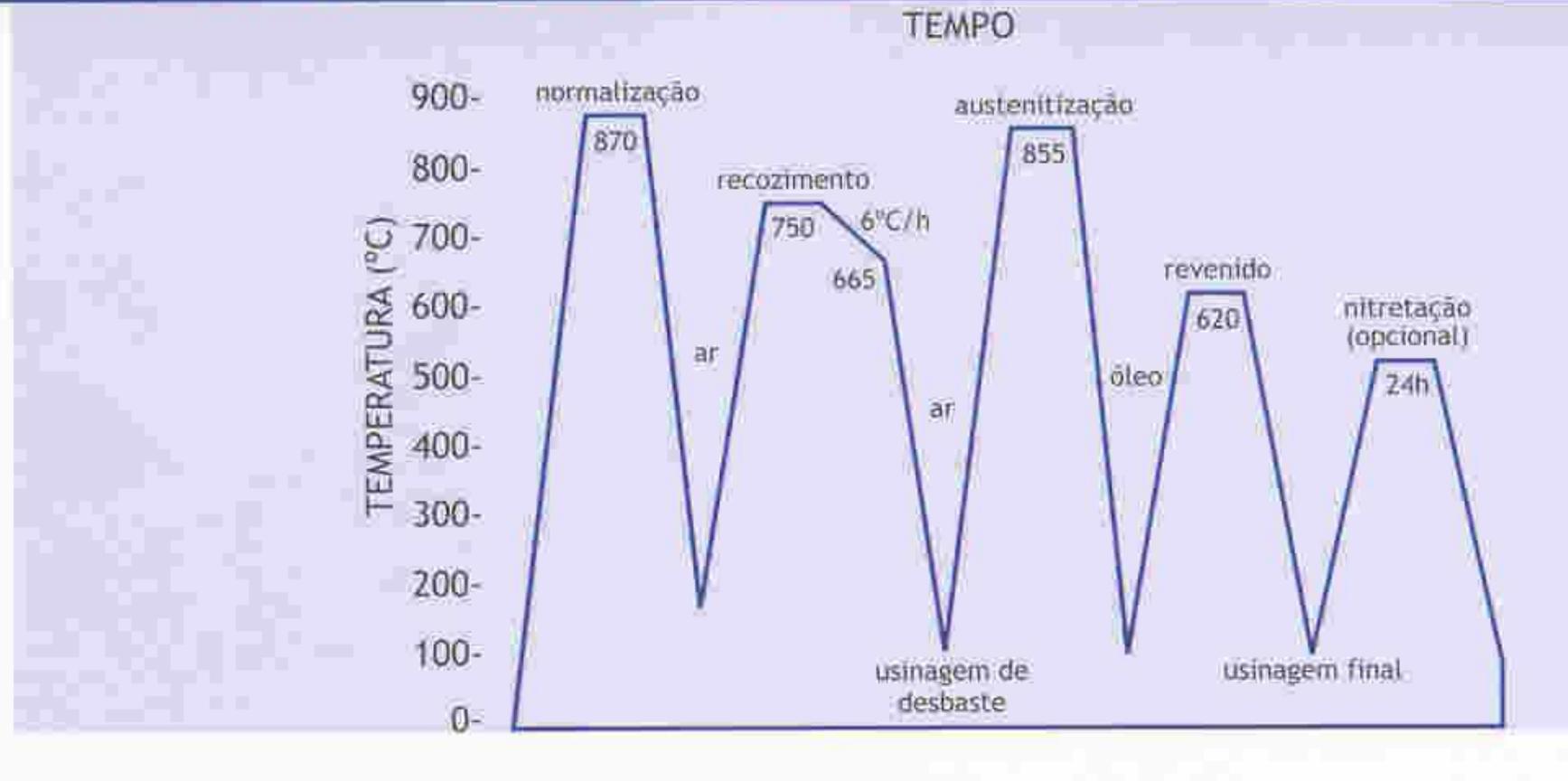
As propriedades mecânicas, bem como o desempenho em serviço, de um metal e em especial das ligas dependem da sua composição química, da estrutura cristalina, do histórico de processamento mecânico e termomecânico e dos **tratamentos térmicos** realizados.

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.

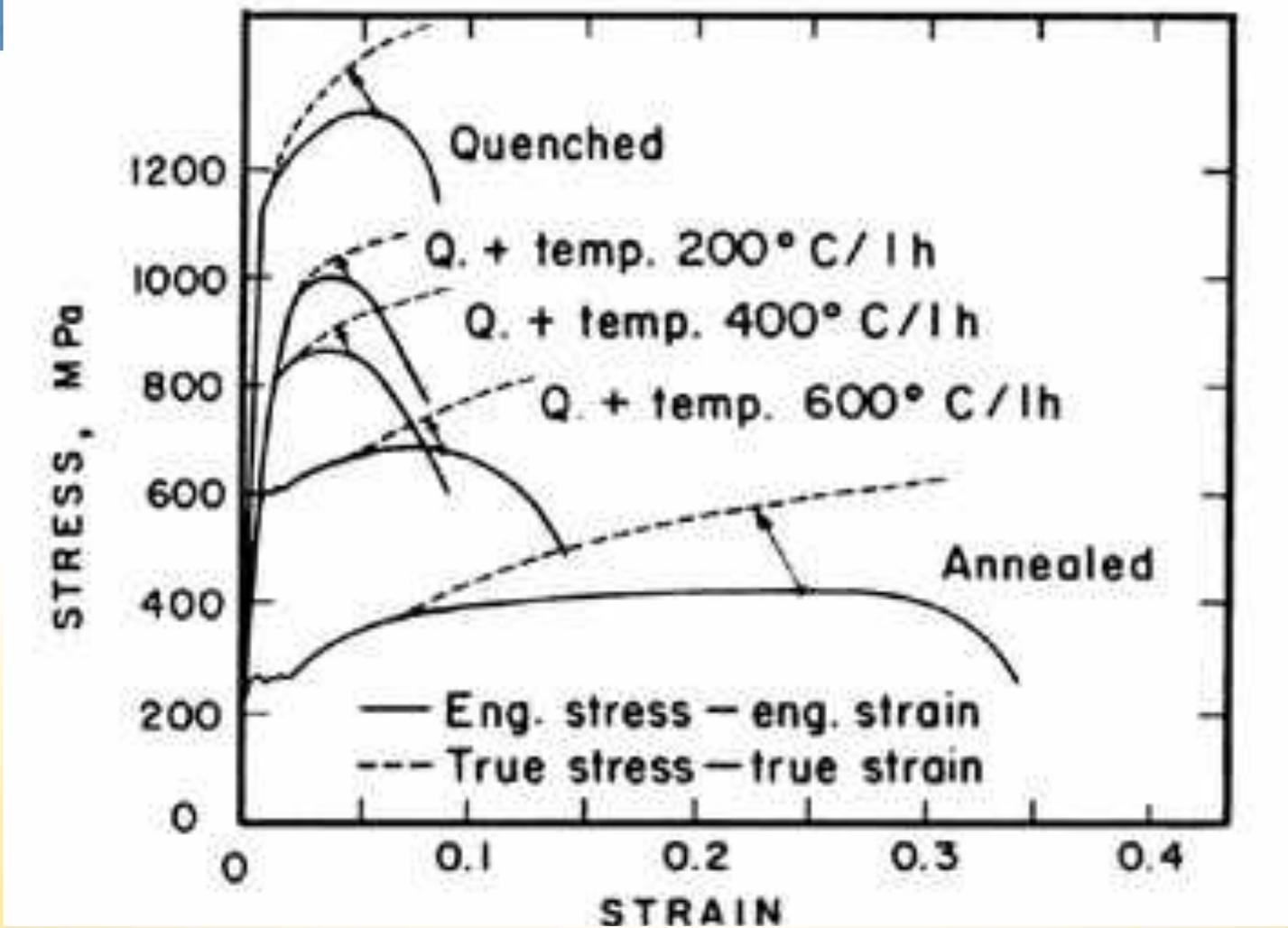


# Tratamentos Térmicos

## SEQÜÊNCIA DE PROCESSAMENTO RECOMENDADA:



Representação esquemática de ciclos de tratamentos térmicos para o aço 4140.



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



# 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



500X

Temperado



500X



# 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



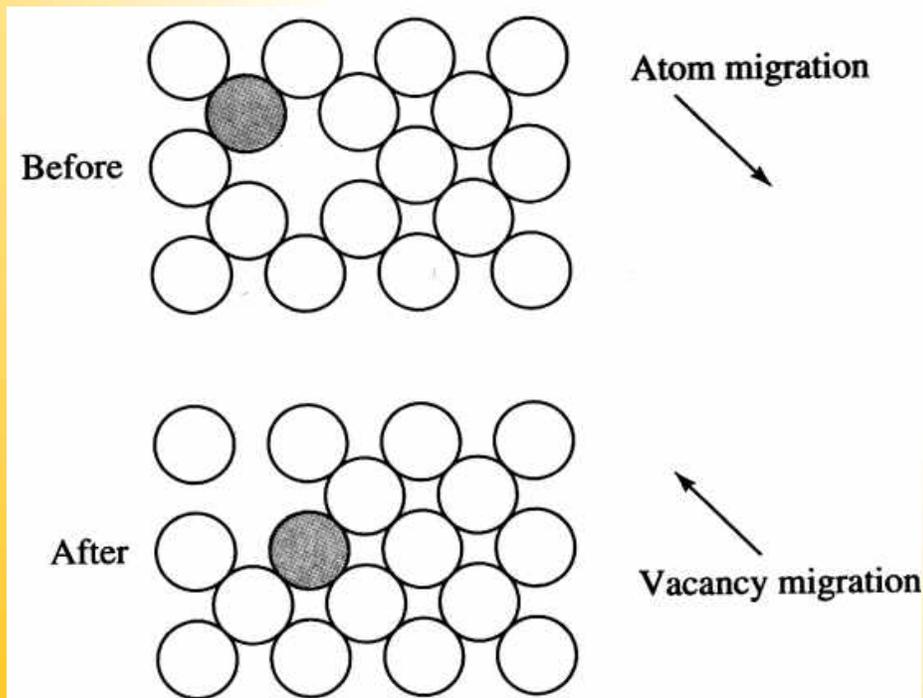
Temperado



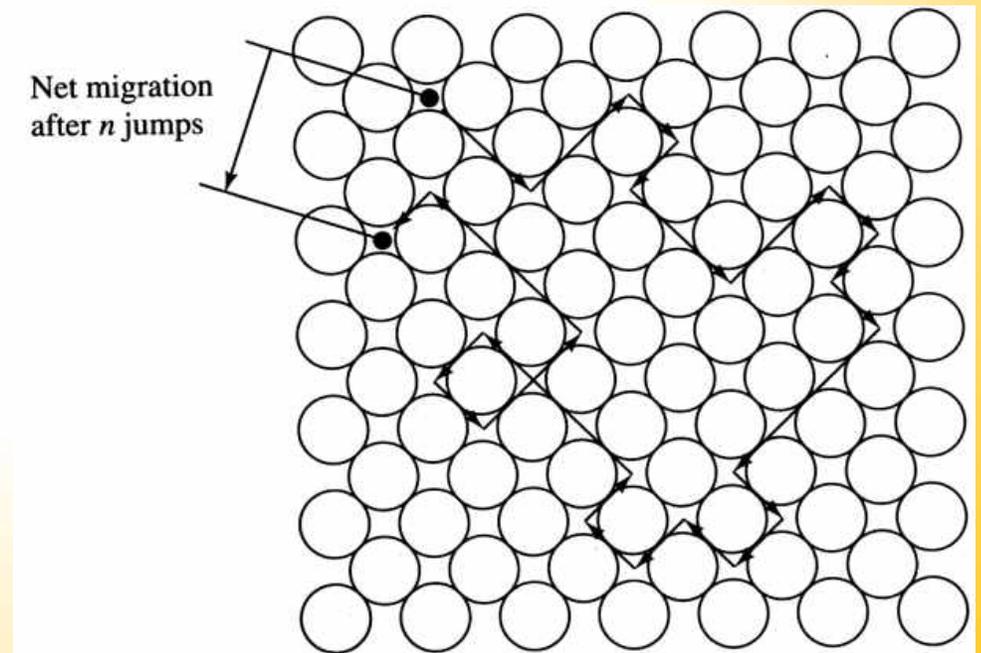
# Transformações de fase

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, por interstícios e por troca com lacunas.

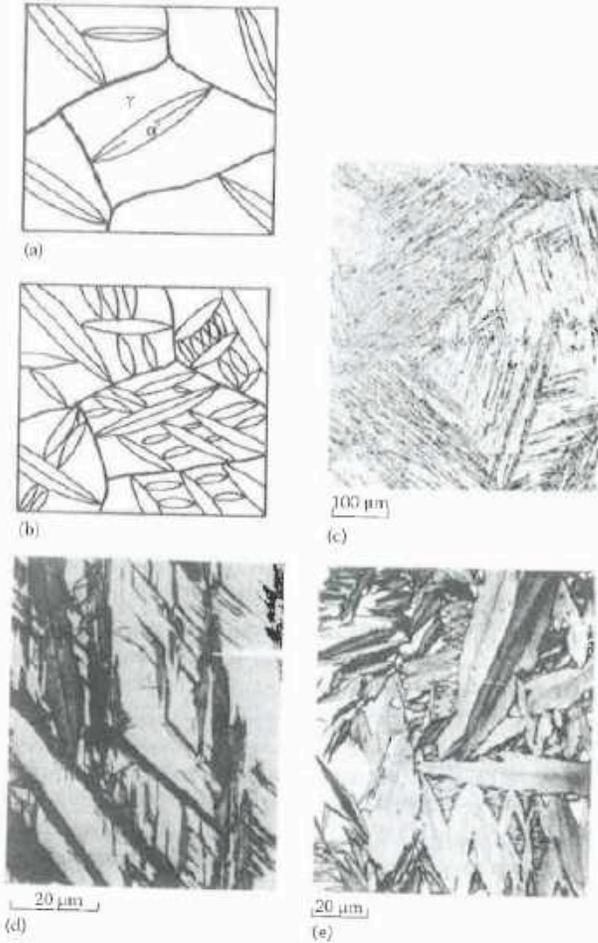
## Átomos Substitucionais



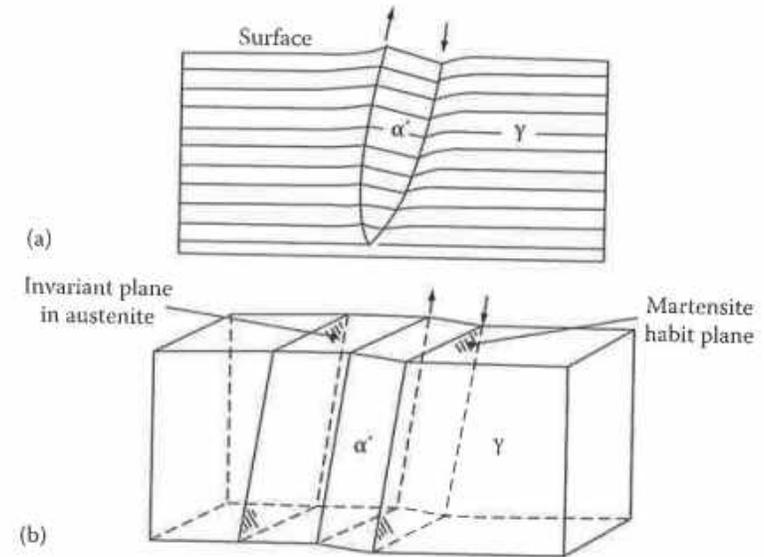
## Átomos intersticiais



# Transformações de fase 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).

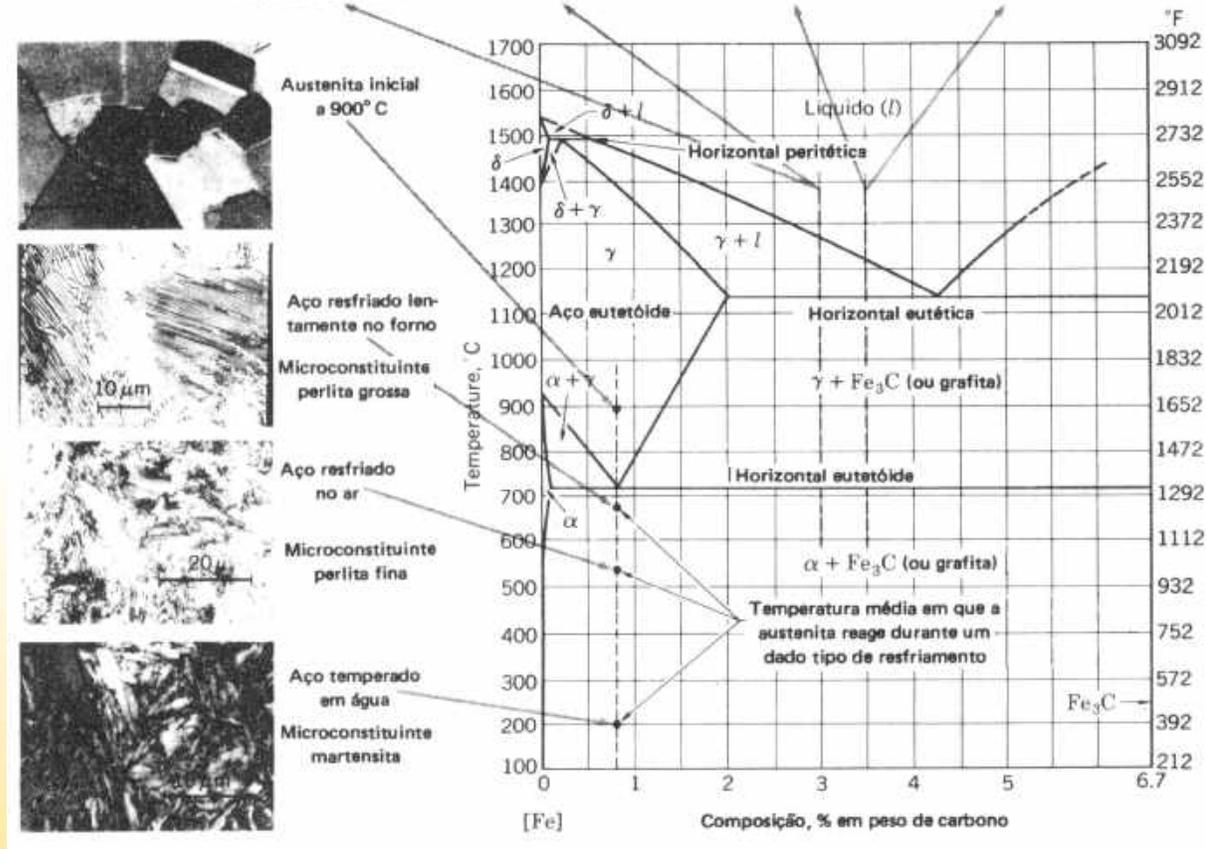
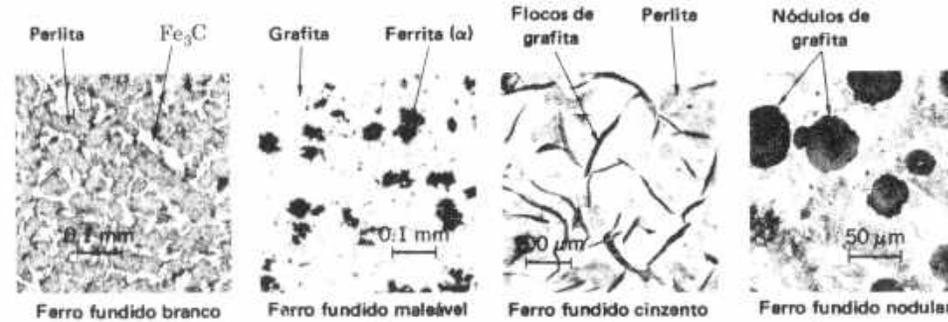


# Principais Tratamentos Térmicos

## Ferrosos

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.

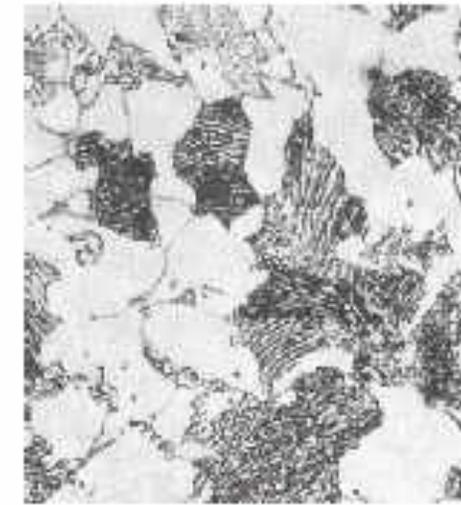




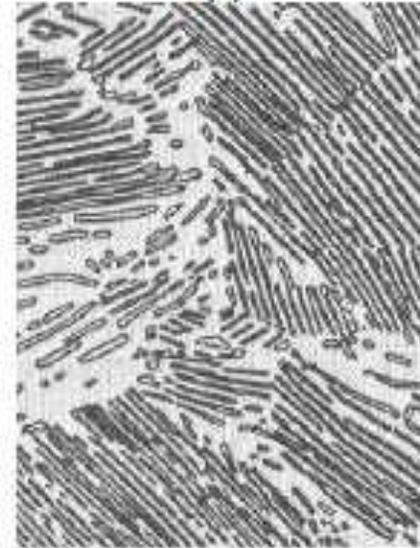
Microestruturas características de aços para construção mecânica. (a) aço doce, (b) aço 1020, (c) aço 1080 (composição eutetóide) e (d) ilustração esquemática de reação eutetóide, formação da perlita.



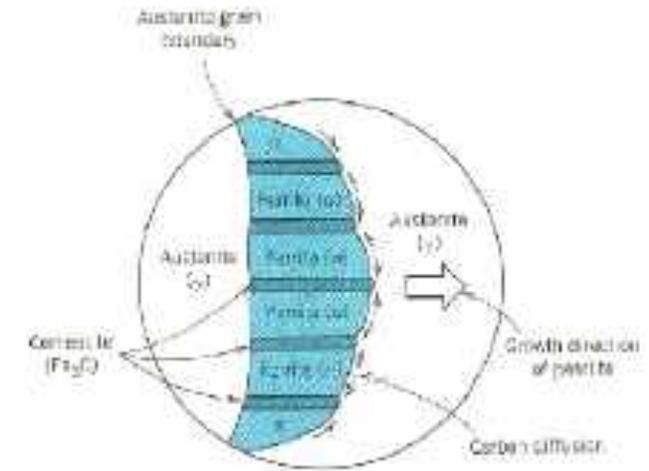
(a)



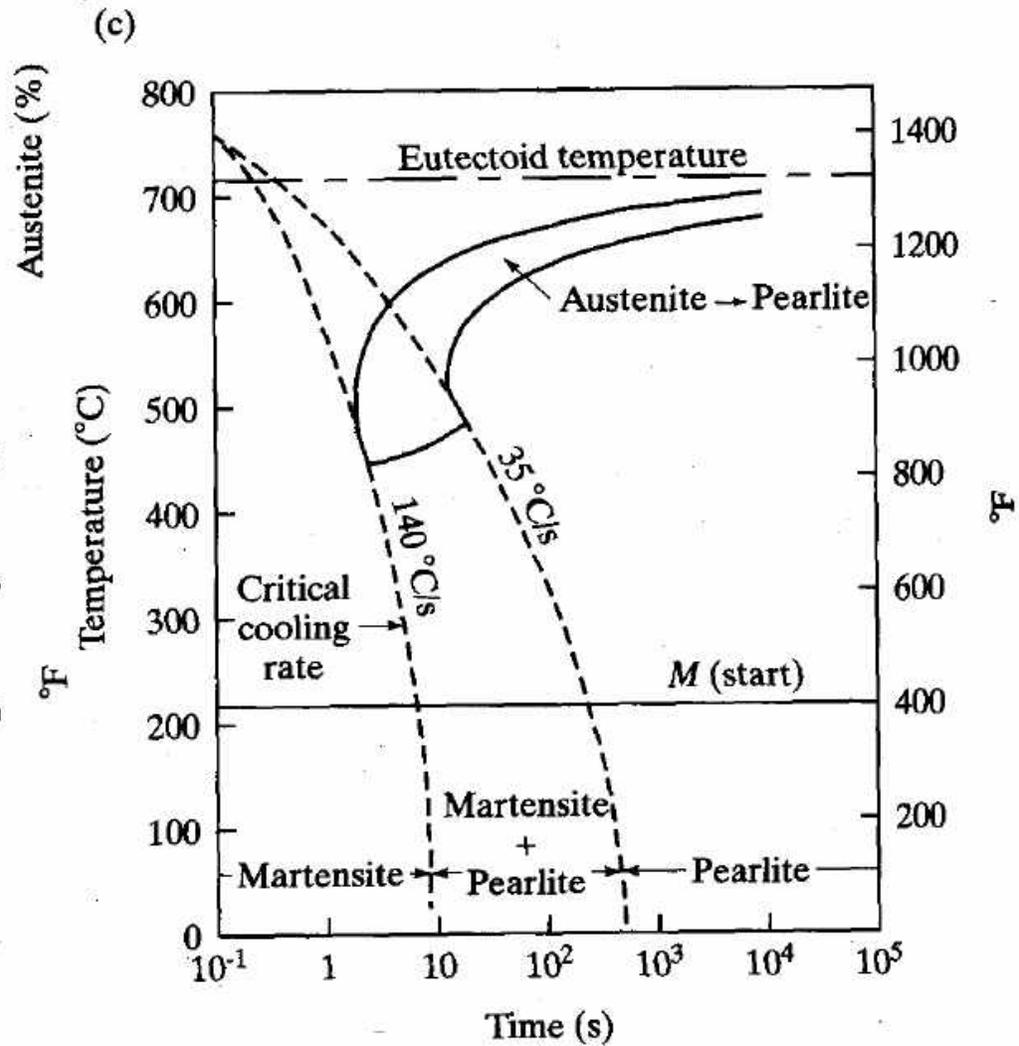
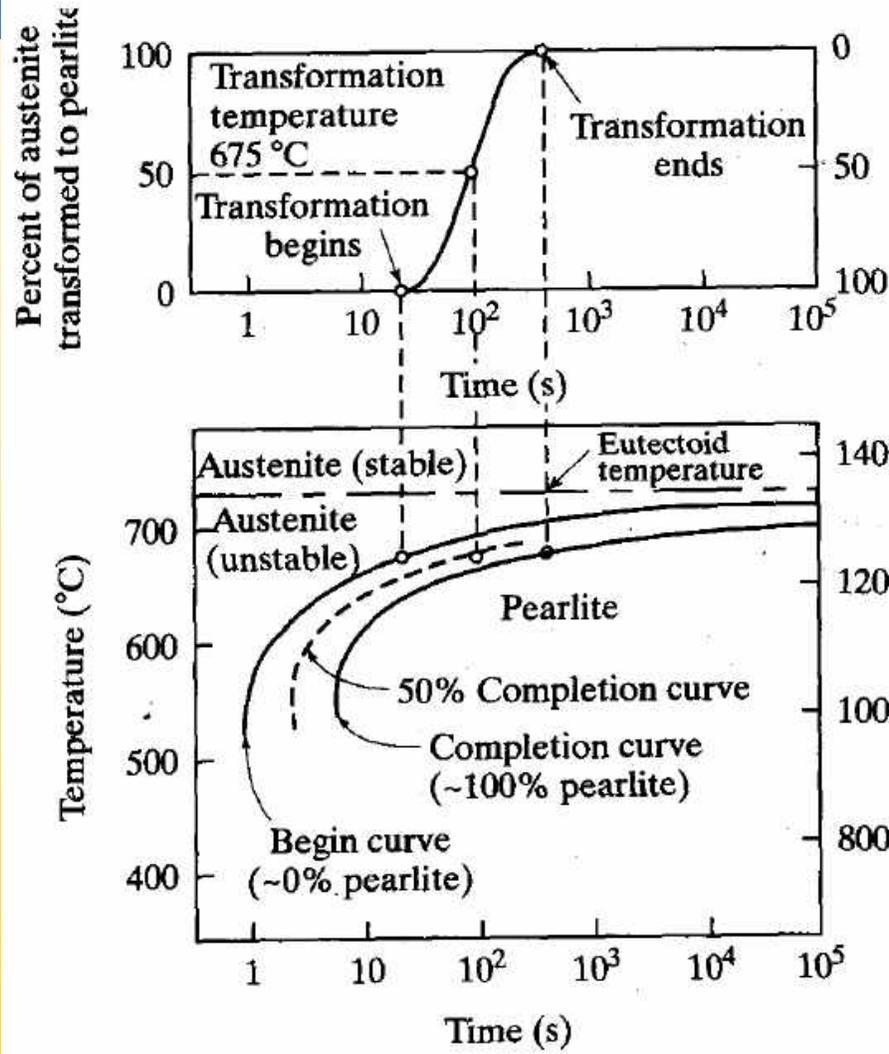
(b)



(c)



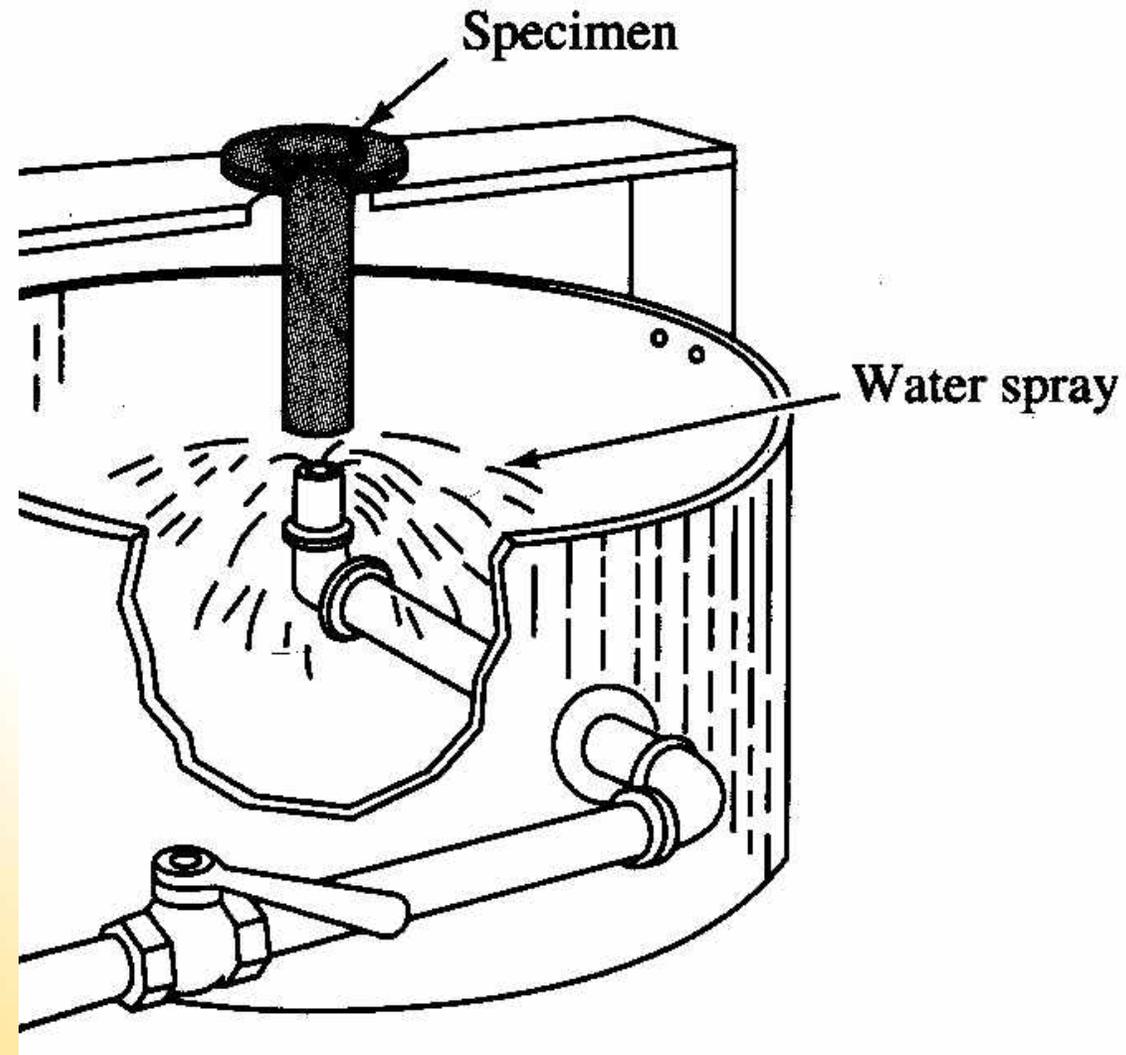
(d)

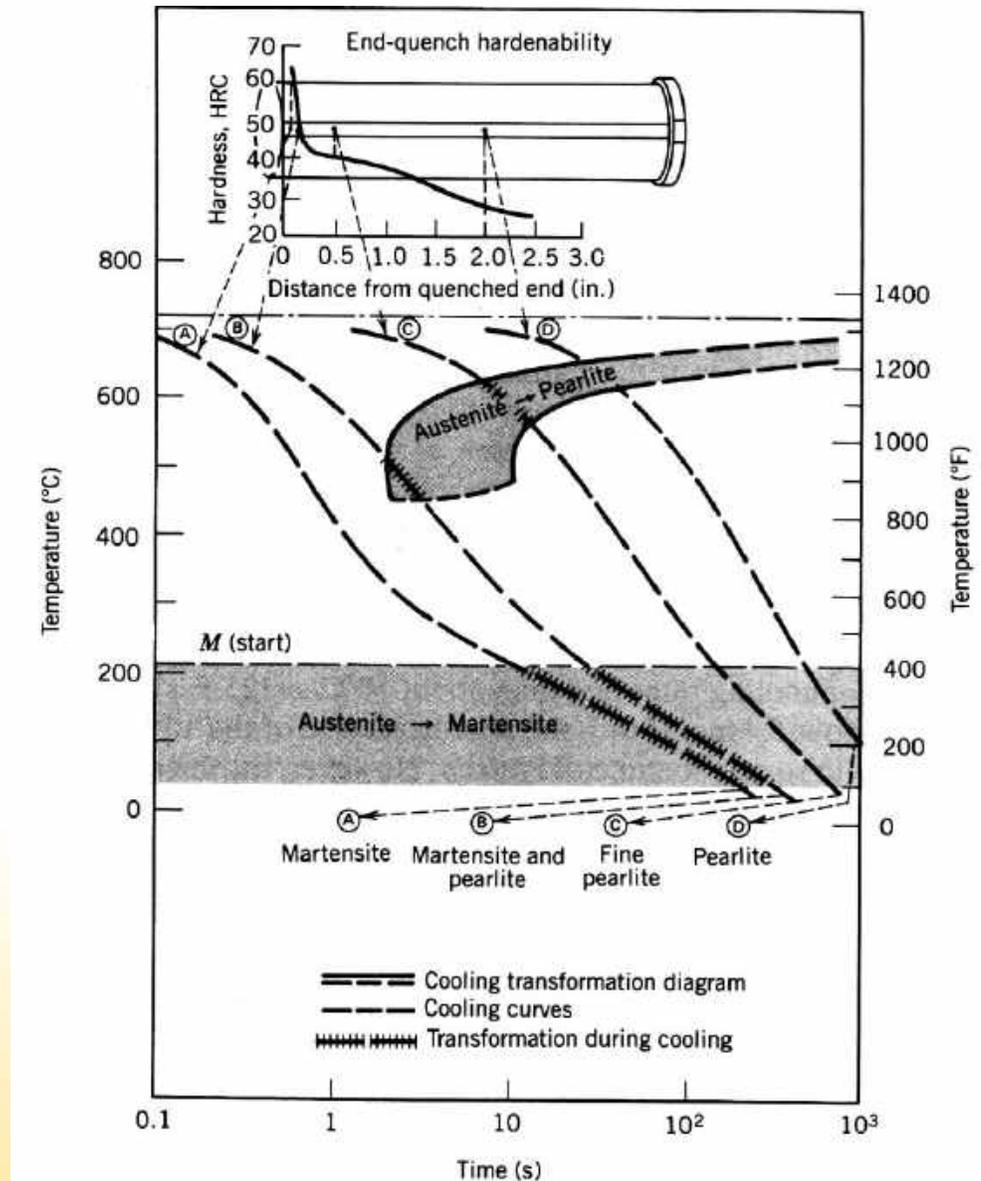




## Ferrosos

Dispositivo para produzir um corpo de prova de ensaio Jominy







**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.



### Recozimento Pleno.

Os tratamentos térmicos de recozimento podem objetivar a diminuição do encruamento e causar uma diminuição de dureza do material metálico. 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.



## 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  $300^{\circ}\text{C}$  e de  $550^{\circ}\text{C}$ . 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

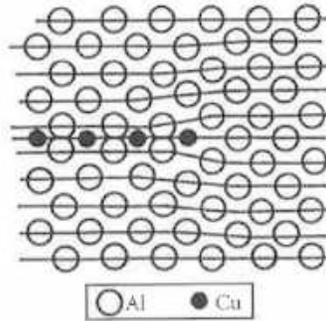
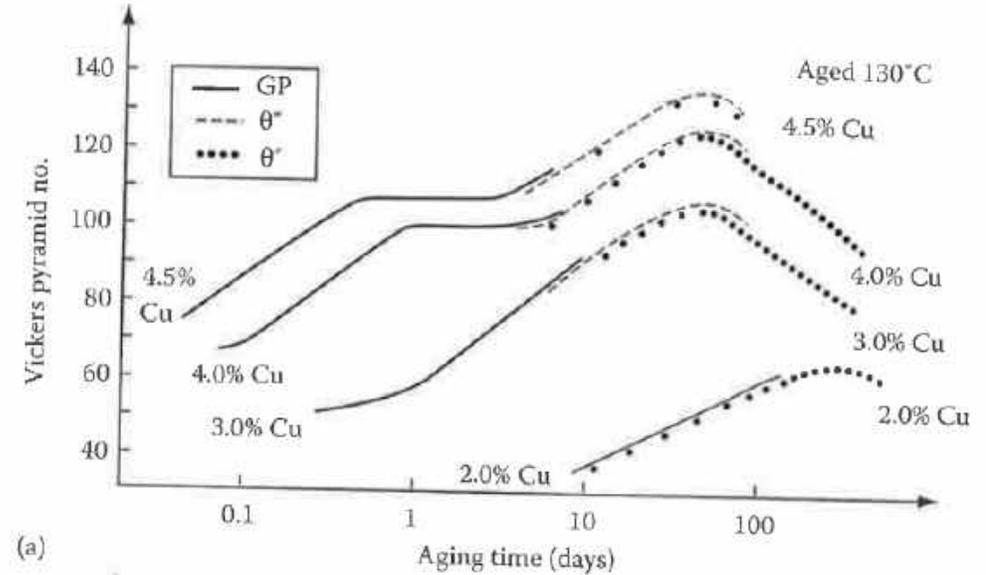
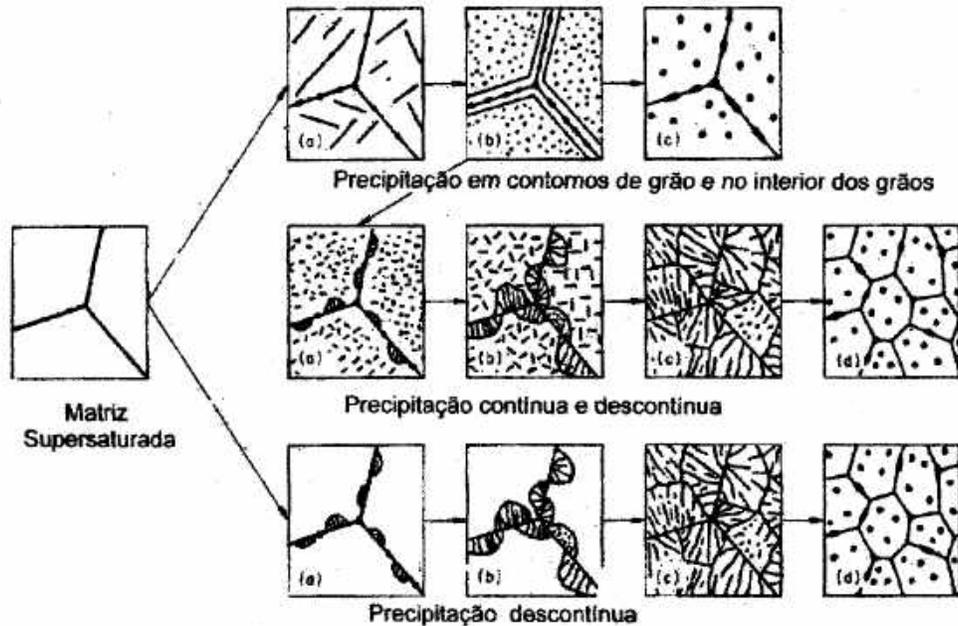
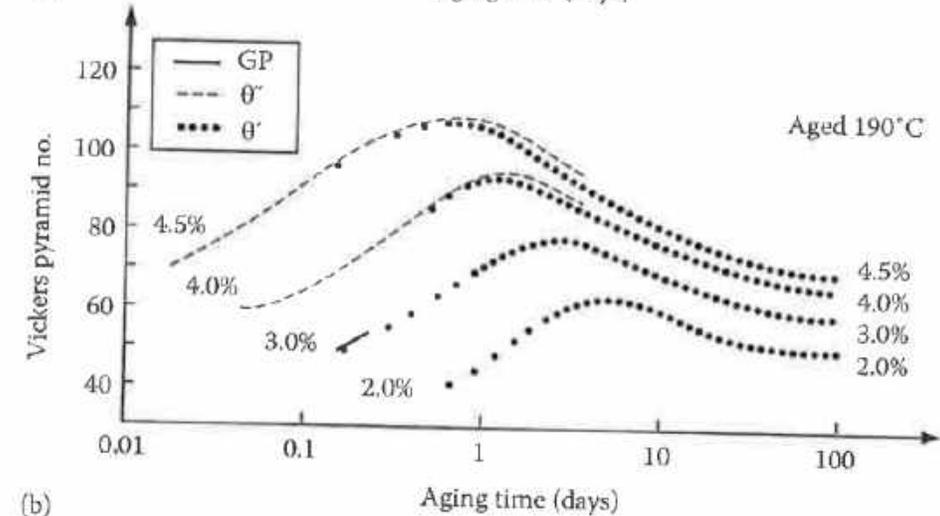


FIGURE 5.26  
Section through a GP zone parallel to the (200) plane. (Based on the work of V. Gerold: *Zeitschrift für Metallkunde* 45 (1954) 599.)



(a)



(b)

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.)

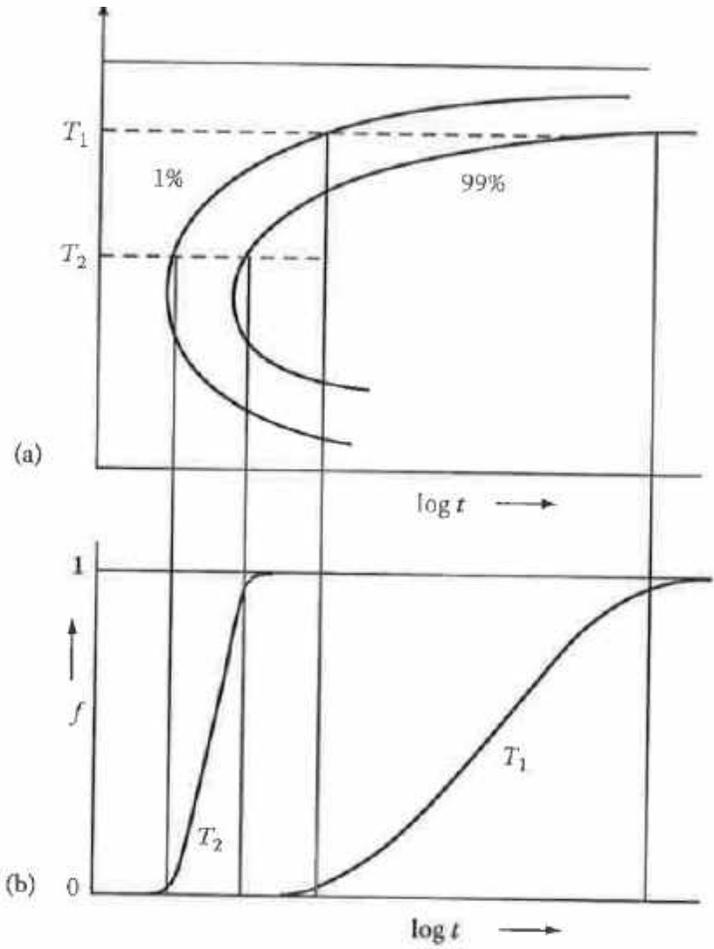


FIGURE 5.23  
The percentage transformation versus time for different transformation temperatures.

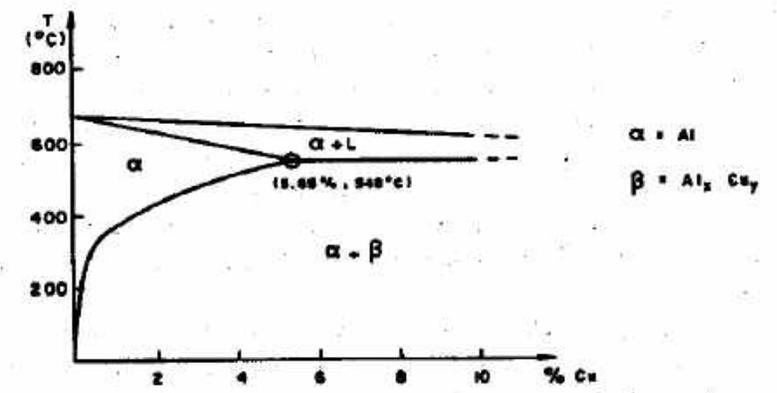
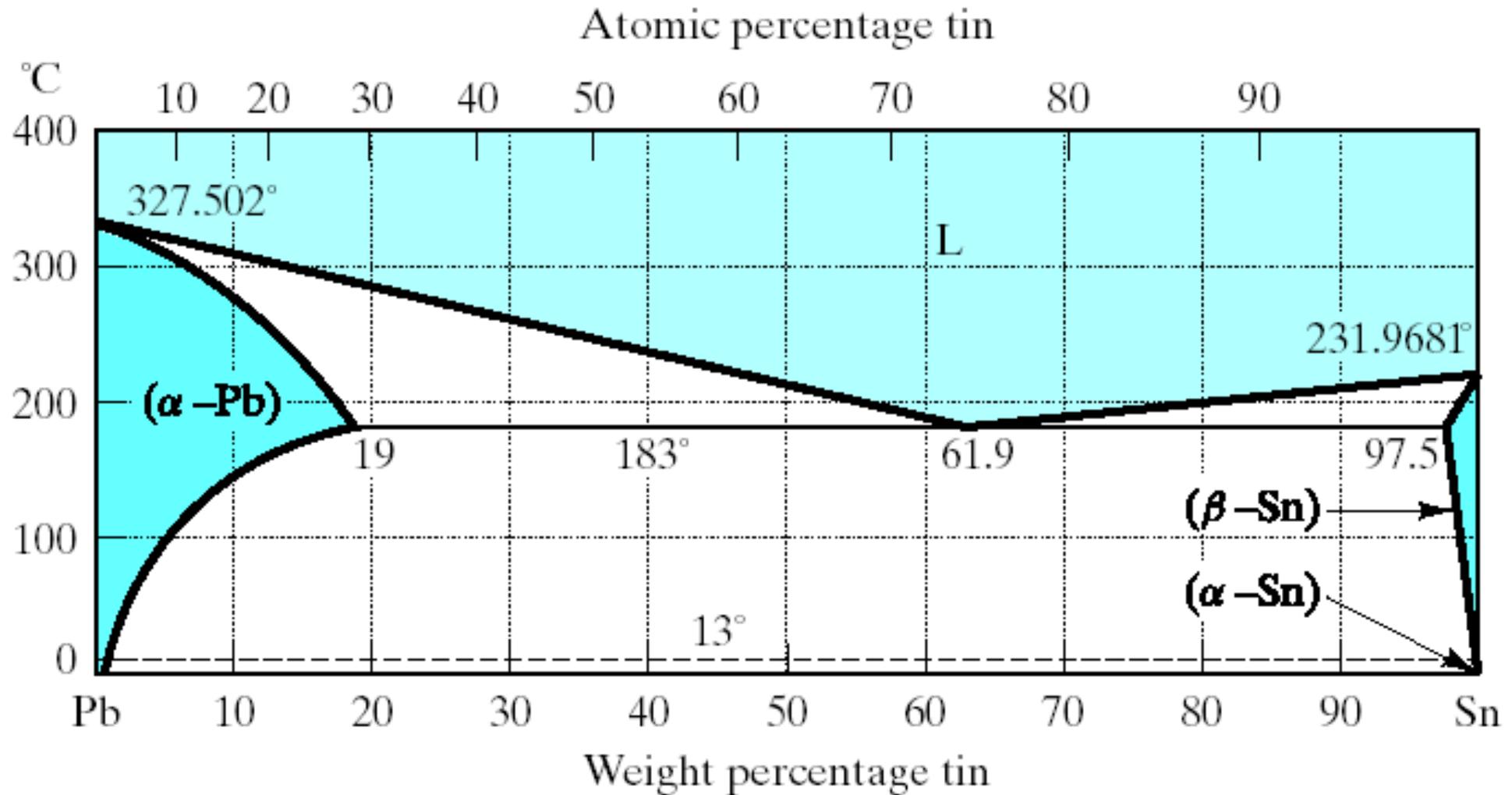


Figura 1 - Parte do diagrama de equilíbrio Al-Cu.

Tratamento	Microestrutura	Propriedade	Diagrama
Solubilização $T_a > T_t > T_s$	$\alpha + \beta \rightarrow \alpha$	$\sigma_t + \delta \uparrow$	
Resfriamento brusco $T_t > T_a$	$\alpha \rightarrow \alpha$ 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	$\sigma + \delta \uparrow$	



# Diagrama não-ferroso





**Solubilização.** Esse tratamento térmico visa a eliminação de precipitados no material. É frequentemente 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.



**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.



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.



# Principais Tratamentos Térmicos

## 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.



# Principais Tratamentos Térmicos

## Recozimento

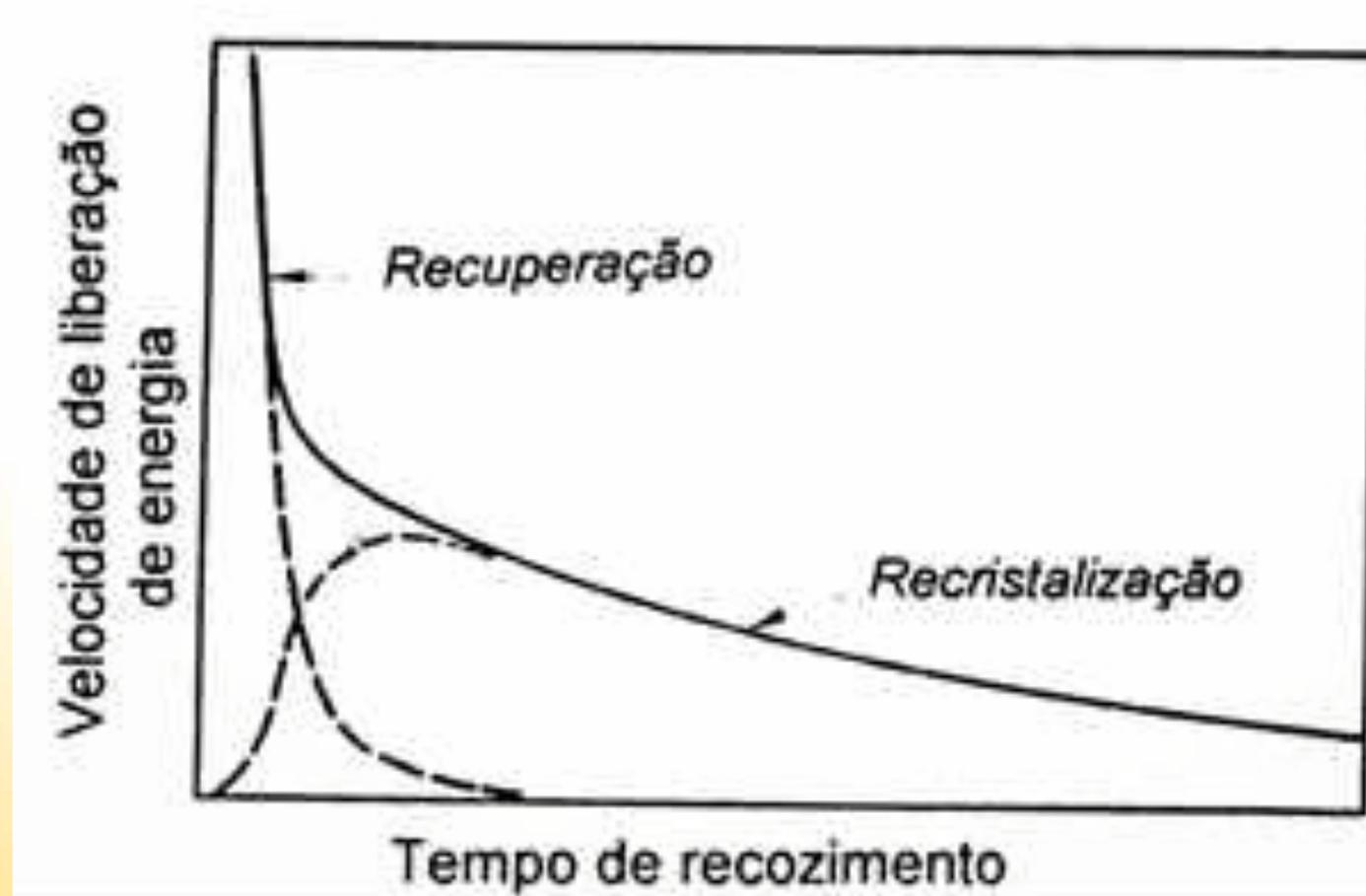
Durante o processo de deformação a quente uma microestrutura semelhante à microestrutura do material que não sofreu deformação plástica. A deformação a quente é caracterizada por ser realizada acima da **temperatura de recristalização**. Portanto, a temperatura de recristalização separa a deformação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

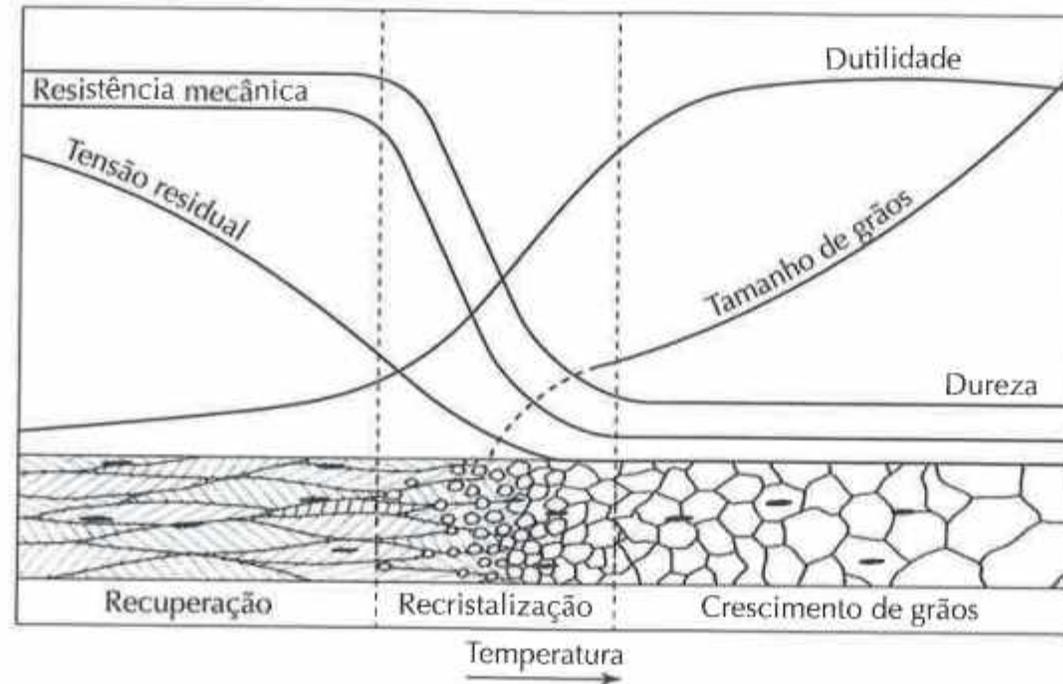
## Recozimento



Competição entre a recuperação e a recristalização

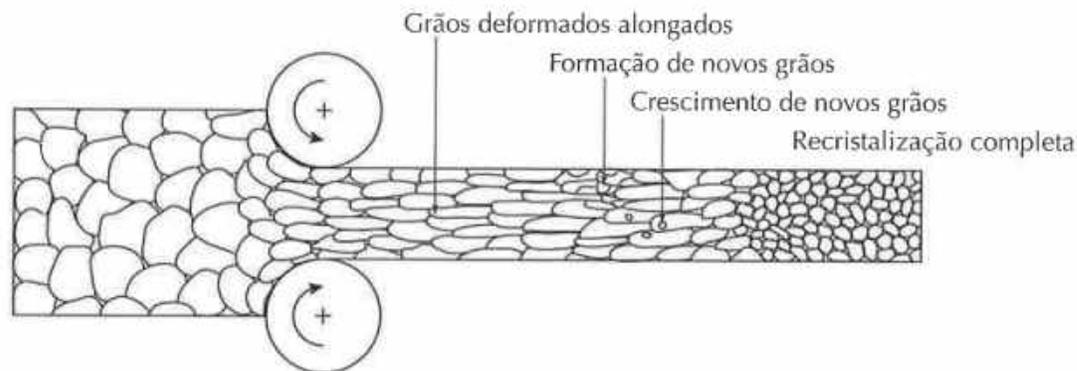


## Recuperação e a recristalização - Dinâmico



**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.





## Referências

Principles of Heat Treatment of Steel George Krauss

ASM Metals Handbook vol 4 Heat treatment



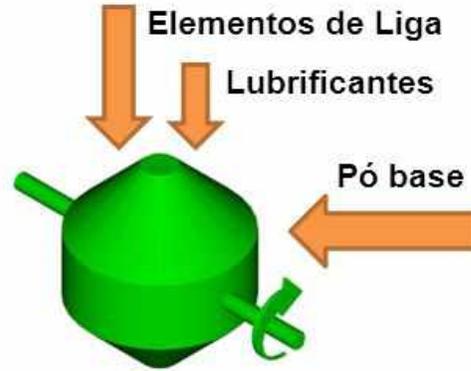
## Onde a Metalurgia do Pó é empregada





# Metalurgia do Pó

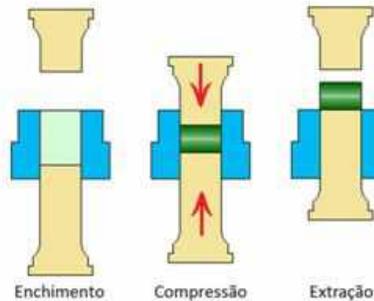
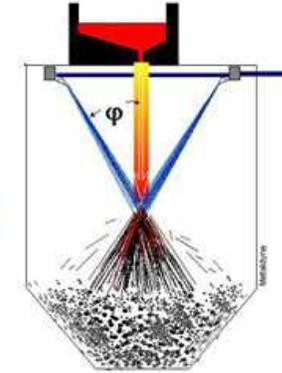
## 2-Mistura



## Processo Básico

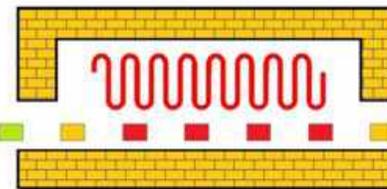


## 1-Atomização

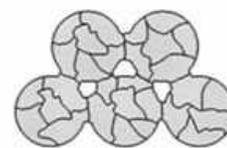


## 3-Compactação

## 4-Sinterização



Bronze: 780 - 840°C  
Aço: 1050 - 1150°C  
Ligação metalúrgica das partículas de pó



## 5- Produto acabado





- Mistura: pós metálicos elementares ou pré-ligados, misturados com lubrificantes e/ou aditivos para a produção de uma mistura homogênea;
- Compactação a verde com dimensões próximas às da peça acabada (temperatura ambiente e pressões podendo variar entre 130 e 830 N/mm<sup>2</sup>);
- Sinterização: aquecimento em atmosfera controlada e em temperaturas abaixo do ponto de fusão;
- Calibragem: correções dimensionais após a sinterização;
- Impregnação: uso de óleos para mancais auto lubrificantes, por exemplo.



## Histórico

- Produção de metais refratários: W e Mo (ligas com elevado ponto de fusão);
- 1920 foram solucionados problemas de sinterização em vácuo;
- Materiais compostos: Metal-Carbono (alta condutividade e lubrificação sólida);
- Metal duro (ferramentas);
- Mancais autolubrificantes (buchas);
- A partir da década de 1960, a Metalurgia do Pó começou a ser mais efetiva;
- Massa de produto sinterizado em automóveis tem crescido;
- Desenvolvimento contínuo do processo : HIP, SPS.



➤ Materiais com elevado ponto de fusão e com limitações técnicas (cerâmicos, imãs, pastilhas de freio)

➤ Opção entre outras técnicas e avaliar a viabilidade com base:

Formato da peça, tamanho da peça, tolerâncias geométricas, composição do material, aplicação e ambiente de trabalho, propriedades mecânicas exigidas, tamanho do lote a ser fabricado.



## Critérios de Escolha: Metalurgia do Pó

*Com relação à outras tecnologias tem-se:*

- tolerâncias restritas e peças complexas;
- operações de acabamento é simplificada ou eliminada;
- a metalurgia do pó produz menos resíduos e consome menos energia no processo produtivo;
- comportamento autolubrificante;
- amortecimento de vibrações
- redução de processos de acabamento e usinagem;
- possibilidade de grandes produções de peças com reprodutibilidade e qualidade;
- pode-se trabalhar com composições químicas bem definidas em função da aplicação.



## Critérios de Escolha: Metalurgia do Pó

### Limitações de aplicação da MP

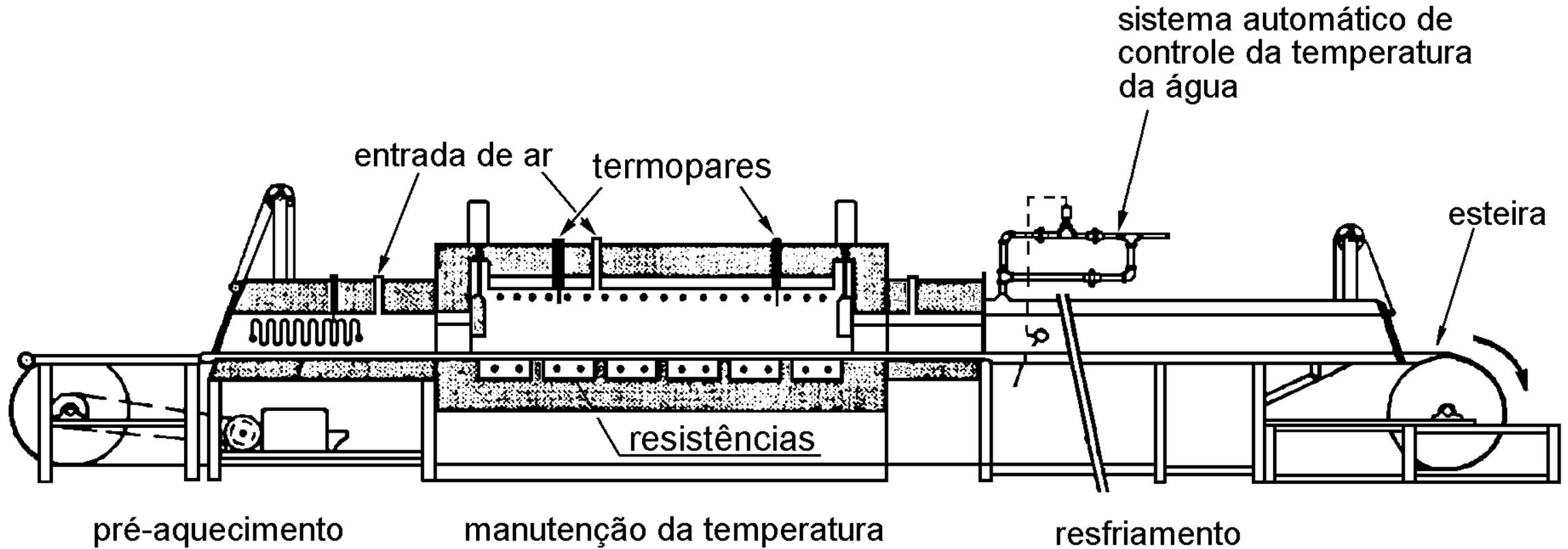
- Alto custo de equipamentos: mínimo 10.000 peças por série;
- Dispositivos que permitem retirar a peça do estampo.

### Fatores a serem avaliados em nível de projeto

- Dimensões: massa não superior a 3-4 kg;
- quantidade de peças de forma a justificar o preço do estampo/matriz;
- Especificação funcional e forma dentro das possibilidades da tecnologia;
- Propriedades físicas e mecânicas do componente a ser produzido;
- Confronto entre o custo utilizando diferentes tecnologias.

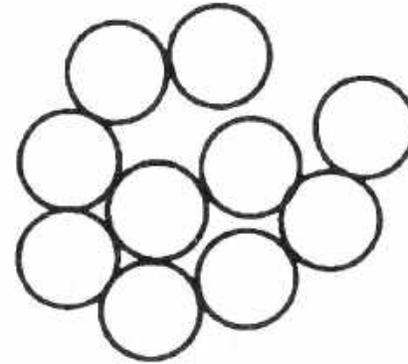
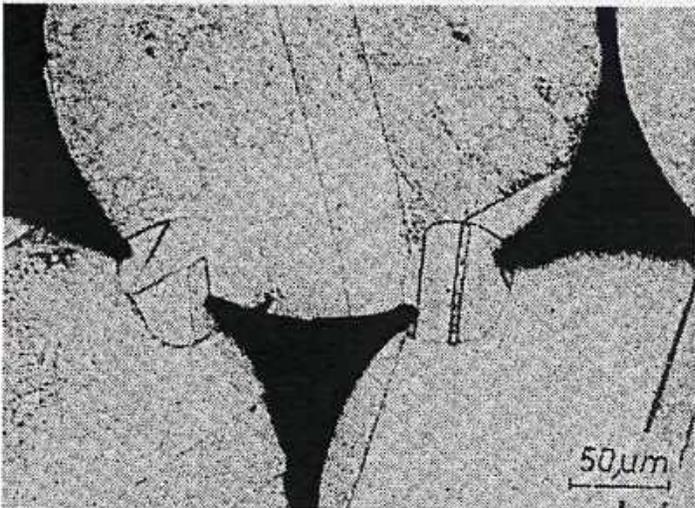
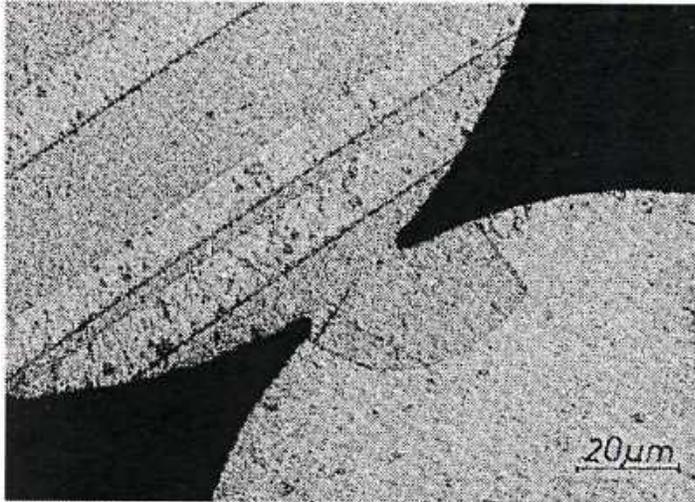


# PROCESSO DE SINTERIZAÇÃO

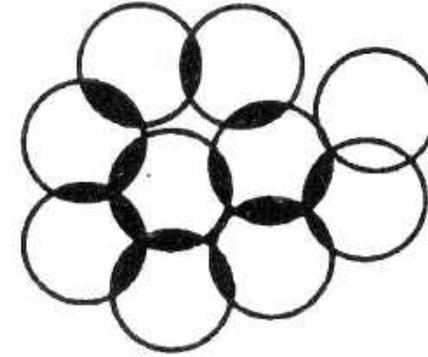




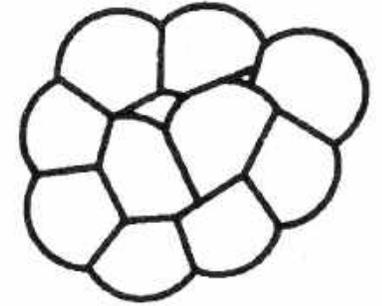
### Sinterização sem formação de fase líquida



a



b



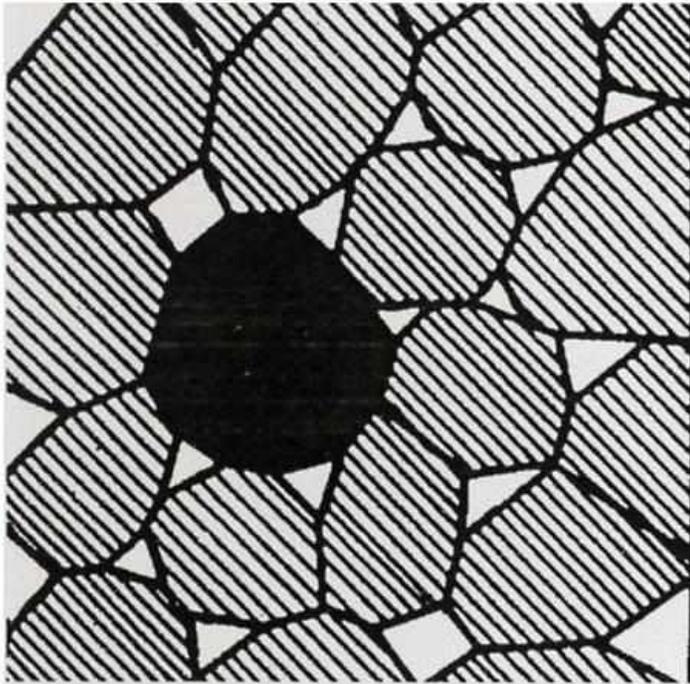
c

Força motriz → redução de energia livre associada com as superfícies:

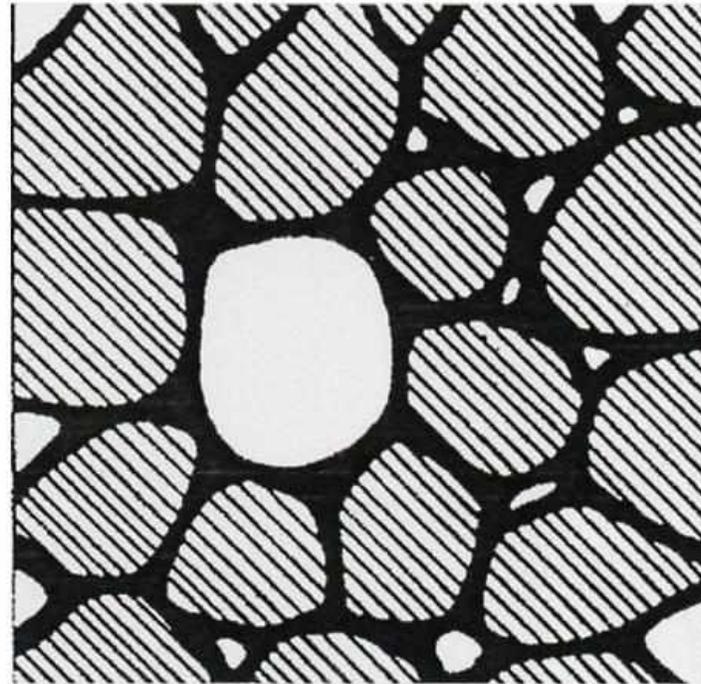
- Redução da área superficial total (Crescimento das partículas → mudança forma dos poros);
- Eliminação da interface sólido-vapor (crescimento de grão → densificação).



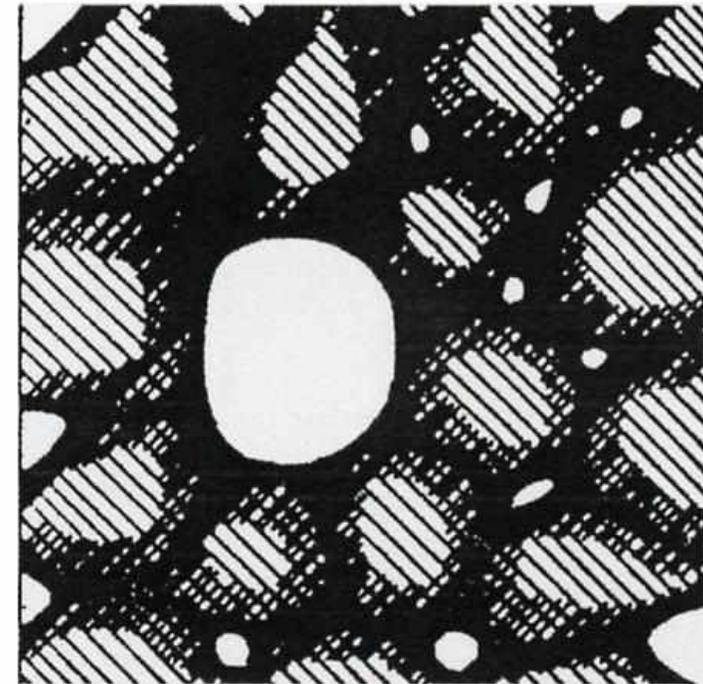
Sinterização com formação de fase líquida



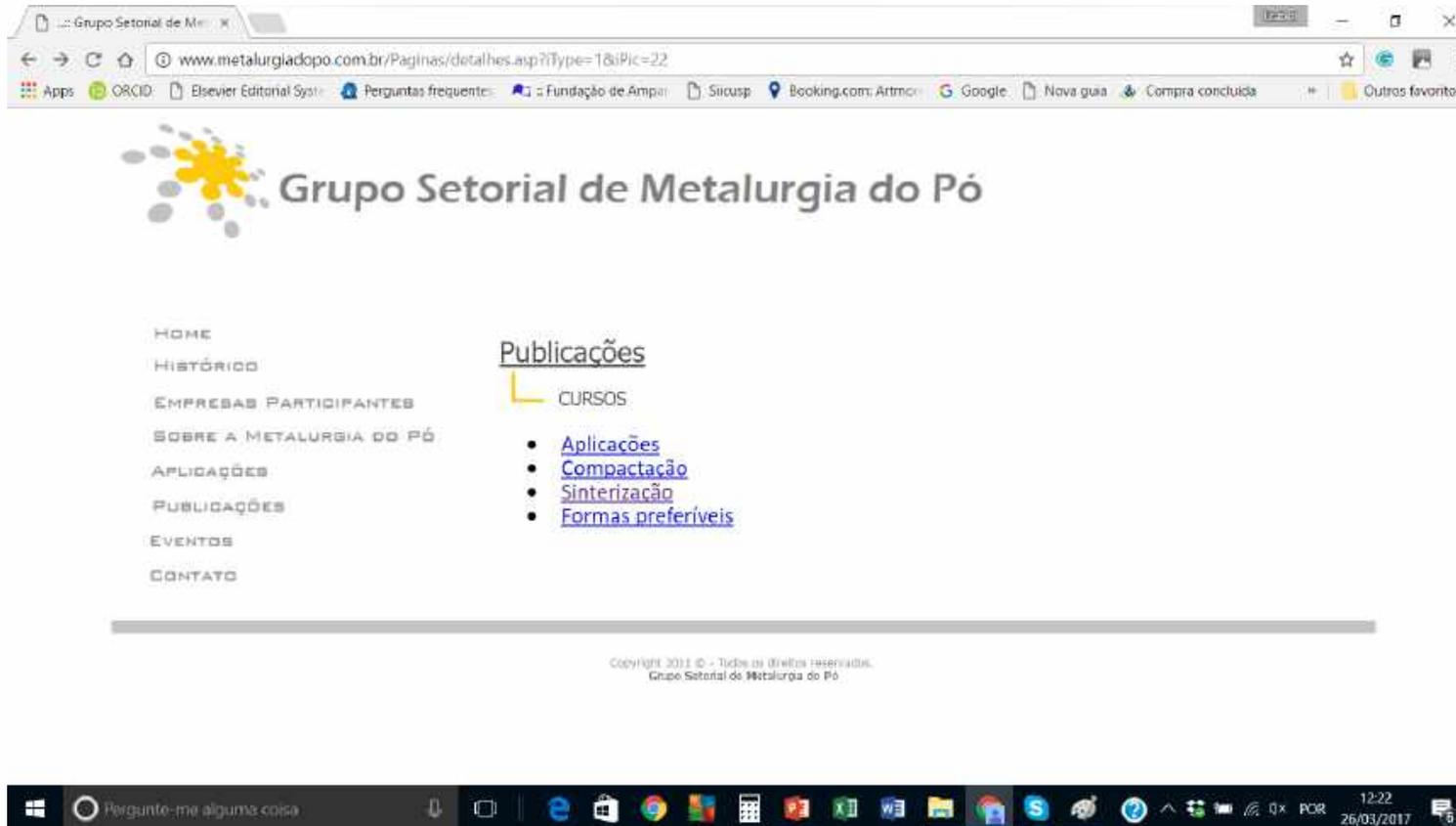
Material heterogêneo



Fusão do componente com  
mais baixo ponto de fusão



Ligação da fase sólida com a  
líquida



The screenshot shows a web browser window displaying the website 'Grupo Setorial de Metalurgia do Pó'. The browser's address bar shows the URL 'www.metalurgiadopo.com.br/Paginas/detalhes.asp?Type=1&Pic=22'. The website has a logo consisting of a cluster of yellow and grey dots. A navigation menu on the left lists: HOME, HISTÓRICO, EMPRESAS PARTICIPANTES, SOBRE A METALURGIA DO PÓ, APLICAÇÕES, PUBLICAÇÕES, EVENTOS, and CONTATO. The 'Publicações' section is highlighted, showing a sub-menu 'CURSOS' with a list of links: 'Aplicações', 'Compactação', 'Sinterização', and 'Formas preferíveis'. At the bottom of the page, there is a copyright notice: 'Copyright 2011 © - Todos os direitos reservados. Grupo Setorial de Metalurgia do Pó'. The Windows taskbar at the bottom shows the time as 12:22 on 26/03/2017.

## Bibliografia complementar

Introdução as processos de fabricação de produtos metálicos. C.S. Kiminami, W.B de Castro e M;F. De Oliveira . Blucher, 2013

A Metalurgia do Pó . Grupo Setorial de metalurgia do Pó. , 2009. ISBN 978-85-62404-00-9



## Sumário

- ❖ Tratamentos térmicos de ferrosos
- ❖ Tratamentos térmicos de não-ferrosos
- ❖ Reozimento
- ❖ Metalurgia do Pó



## Questões

Descreva os principais processos de produção de pós metálicos

Quais são as diferenças na sinterização com e sem fase líquida?

O que é tratamento térmico?

Quais são os principais tratamentos térmicos dos materiais ferrosos?

Como são feitos os principais tratamentos térmicos de ferrosos?

Descreva o ensaio Jominy e seu principal resultado

O que é recozimento e para que é utilizado