



Aula 6 – Parte 1

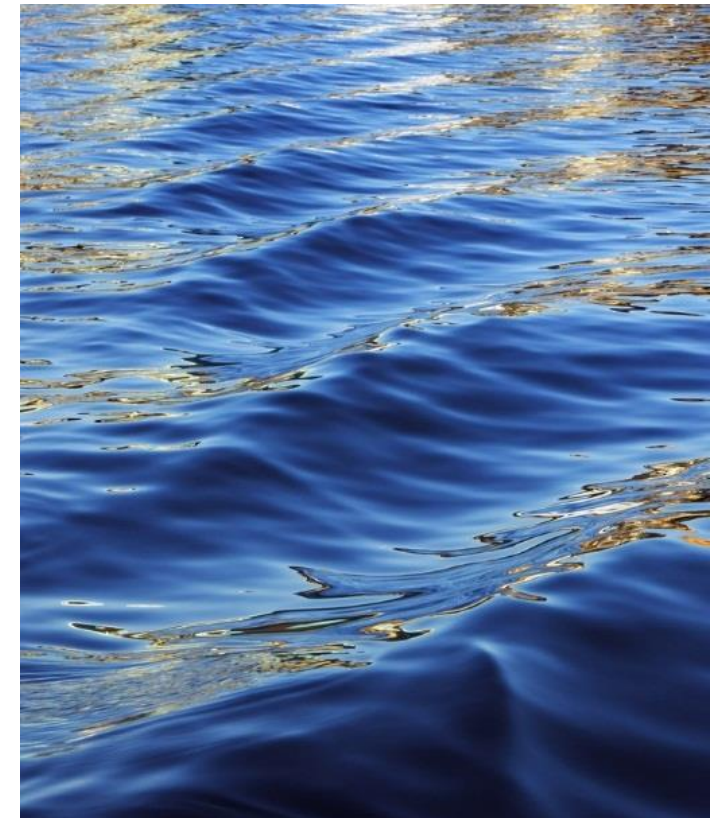
Mecanismos de

Endurecimento

Kelly Benini



Escola de Engenharia de Lorena



O que veremos nessa aula?



Os principais mecanismos que são utilizados para aumentar a resistência mecânica dos materiais metálicos com base **na restrição à movimentação de discordâncias.**

Discordância x Deformação Plástica

A capacidade de um material se deformar está relacionado com a **habilidade das discordâncias de se movimentarem**.



Mecanismos de Endurecimento

✓ Redução do tamanho de grão;

✓ Formação de soluções sólidas;

✓ Solubilização e Precipitação;

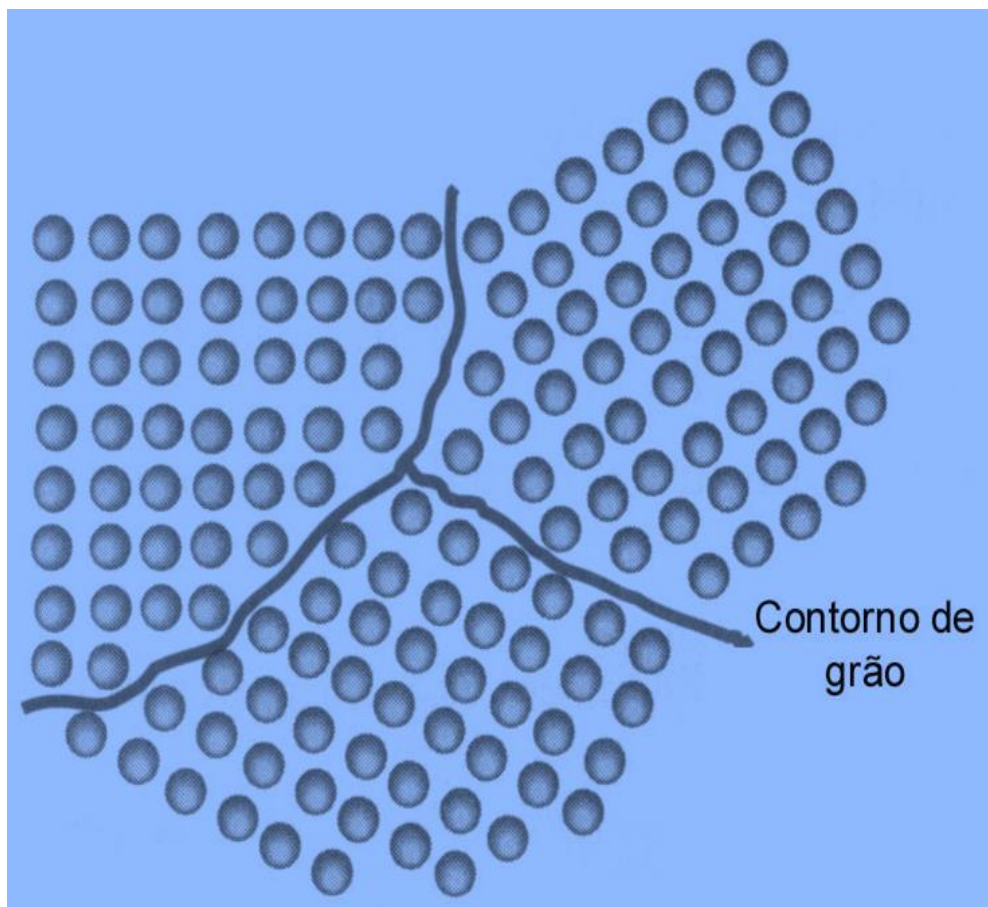
Adição de
elemento
de liga

✓ Transformação de fases;

✓ Encruamento

Redução do Tamanho de Grão

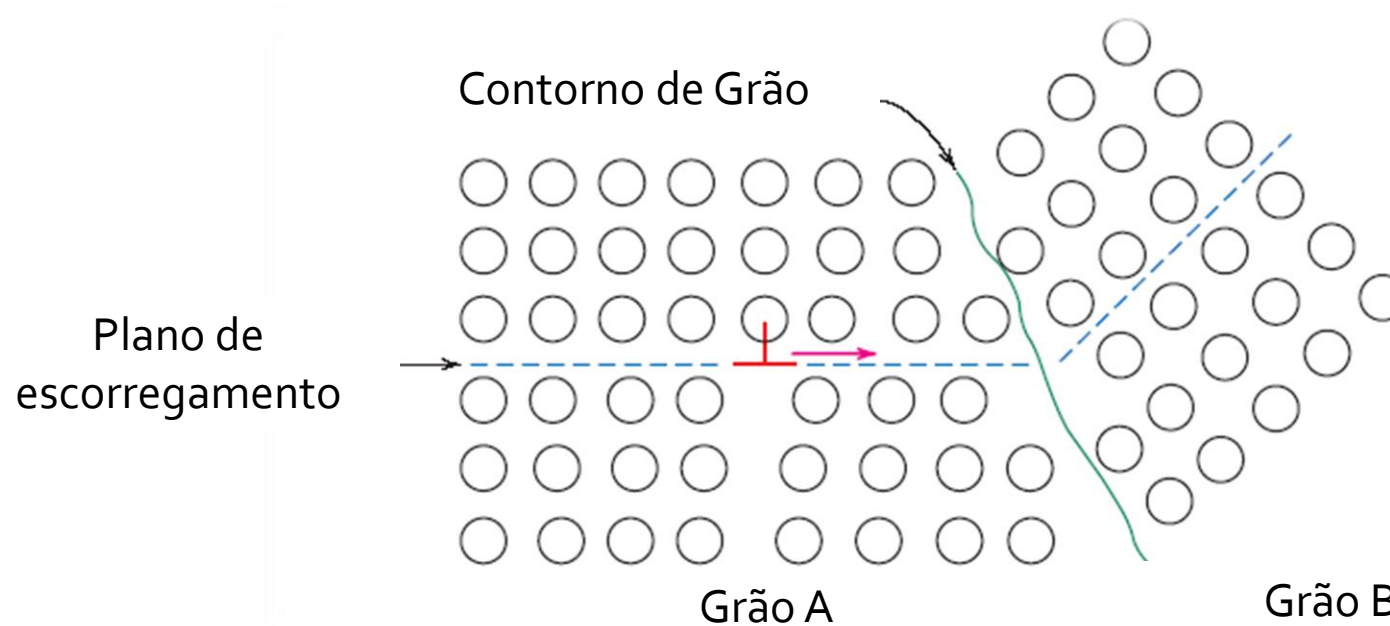
Os **contornos de grão** atuam como uma barreira à movimentação de discordâncias:



- ✓ Reações do estado sólido;
- ✓ Transformações de fases;
- ✓ Reações de precipitação;
- ✓ Concentração de átomos de solutos.

Redução do Tamanho de Grão

Na deformação, a discordância deve passar de um grão para outro

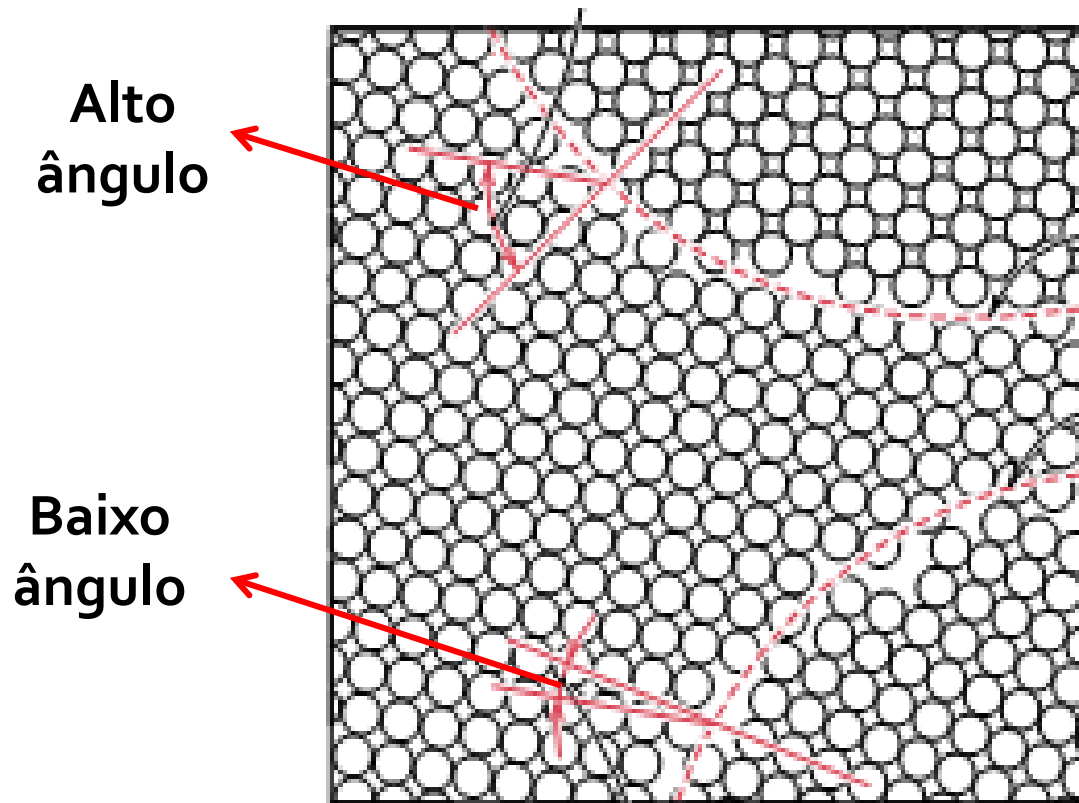


Adaptado de Callister, W.D. Materials Science and Engineering: An Introduction. 7th Ed. Wiley.

As discordâncias ao atingir o contorno de grão terão que mudar a direção do deslocamento.

Redução do Tamanho de Grão

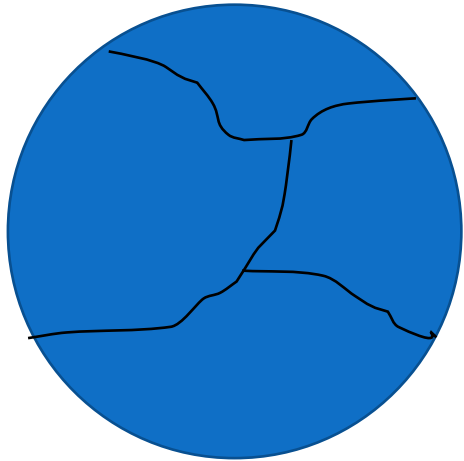
Contorno de grão atua como barreira por duas razões:



- ✓ Ao passar de um grão para outro a discordância deve mudar sua direção de movimentação (quanto maior a diferença de orientação mais difícil);
- ✓ A desordenação atômica no interior de uma região de contorno de grão irá resultar em uma descontinuidade de planos de escorregamento de um grão para dentro do outro.

Redução do Tamanho de Grão

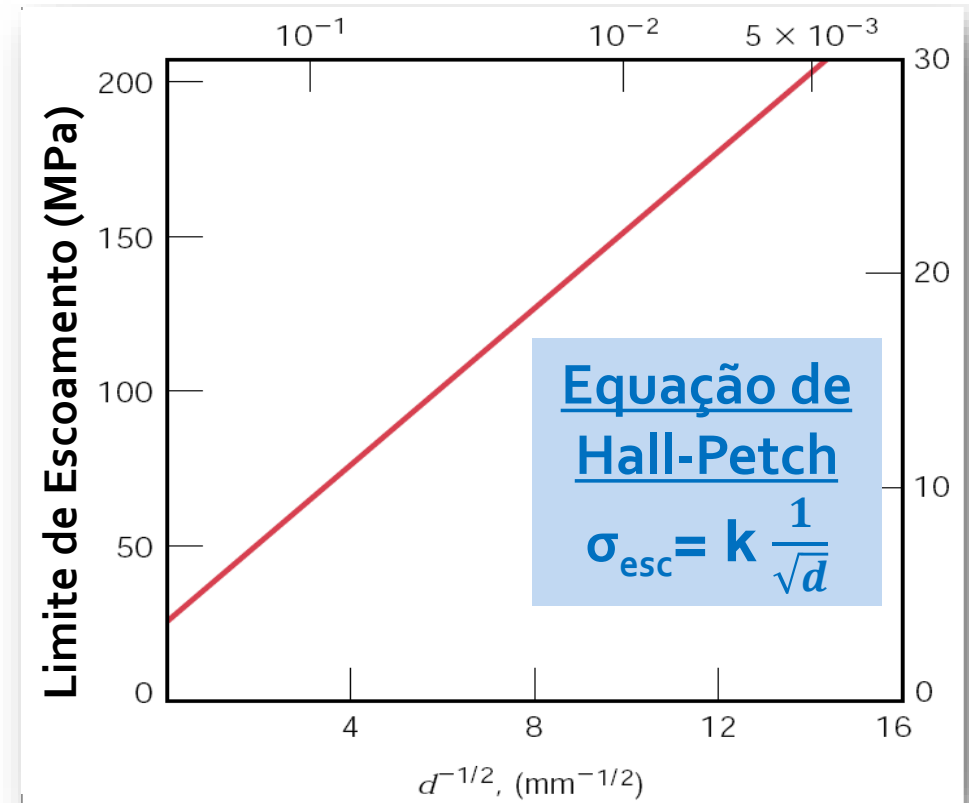
Adaptado de Callister, W.D. Materials Science and Engineering: An Introduction. 7th Ed. Wiley.



Quanto menor o tamanho de grão maior é a área total de contornos de grão e maior é a barreira à movimentação de discordância



Tamanho de grão, d (mm)



Influência do tamanho de grão no limite de escoamento de uma liga de latão (70Cu-30Zn)

Mecanismos de Endurecimento

✓ Redução do tamanho de grão;

✓ Formação de soluções sólidas;

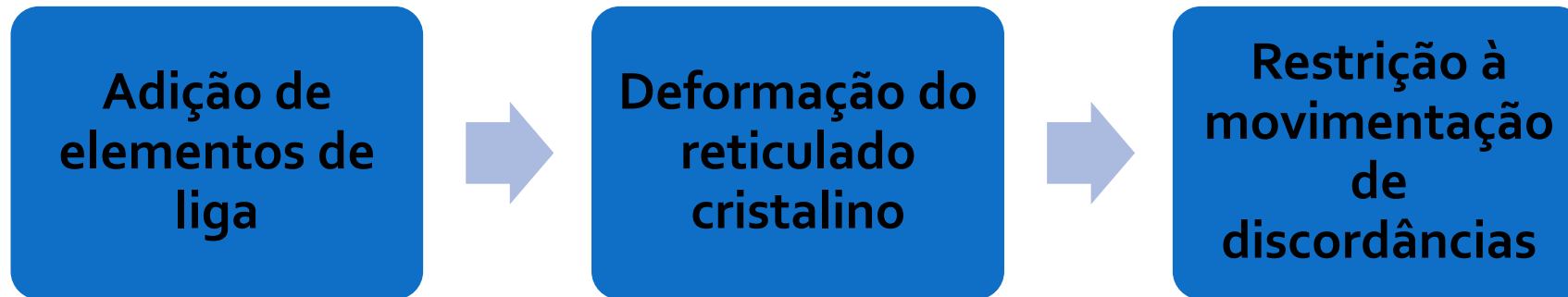
✓ Solubilização e Precipitação;

✓ Transformação de fases;

✓ Encruamento

Formação de Solução Sólida

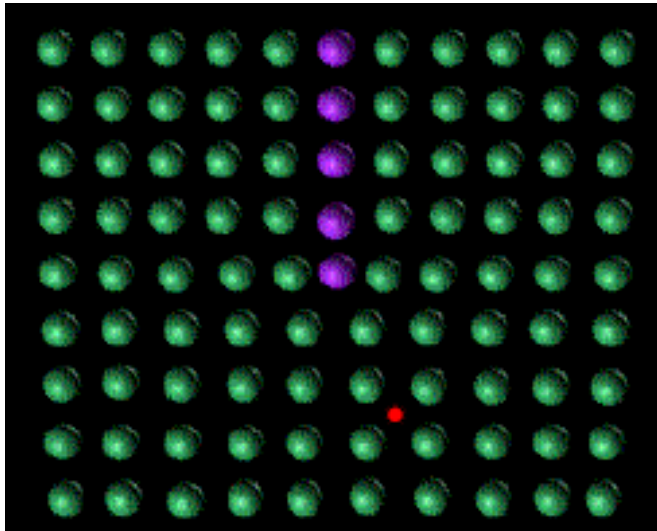
Introdução de átomos de impureza que ocupam posições **intersticiais e substitucionais** e que causam perturbações na estrutura cristalina



Metais puros apresentam menor dureza, são mais deformáveis e menos resistentes que suas ligas

Formação de Solução Sólida

Introdução de átomos de impureza que ocupam posições **intersticiais**



Os solutos intersticiais tendem a se segregar junto às discordâncias;

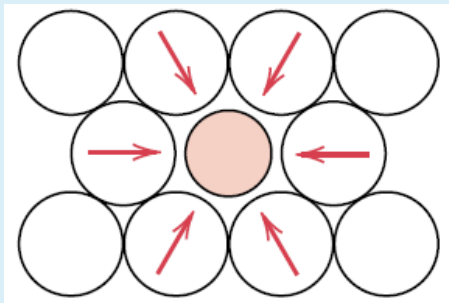
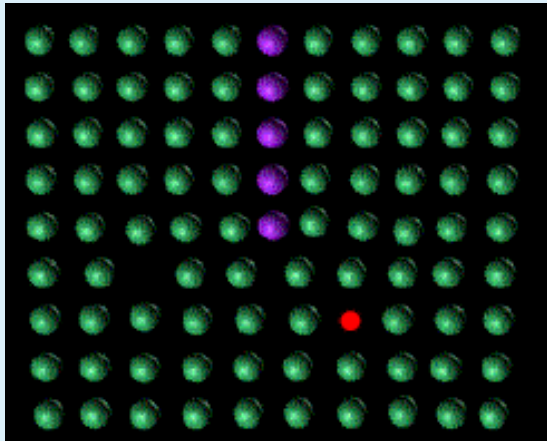
O efeito endurecedor é aumentado pela forte interação com as discordâncias;

Apresentam efeito endurecedor mais intenso que solutos substitucionais.

Formação de Solução Sólida

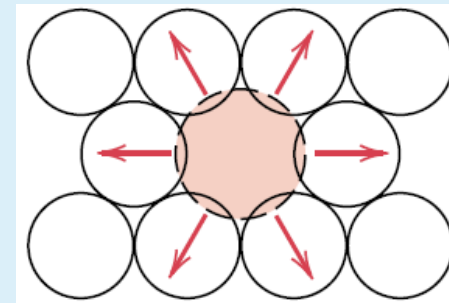
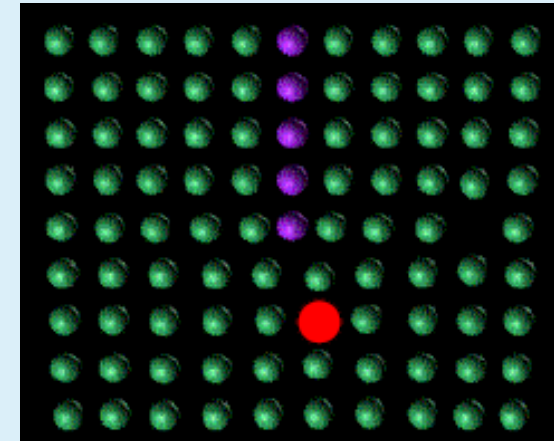
Introdução de átomos de impureza que ocupam posições **substitucionais**

Soluto Substitucional (átomo menor)



Deformações
de
tração

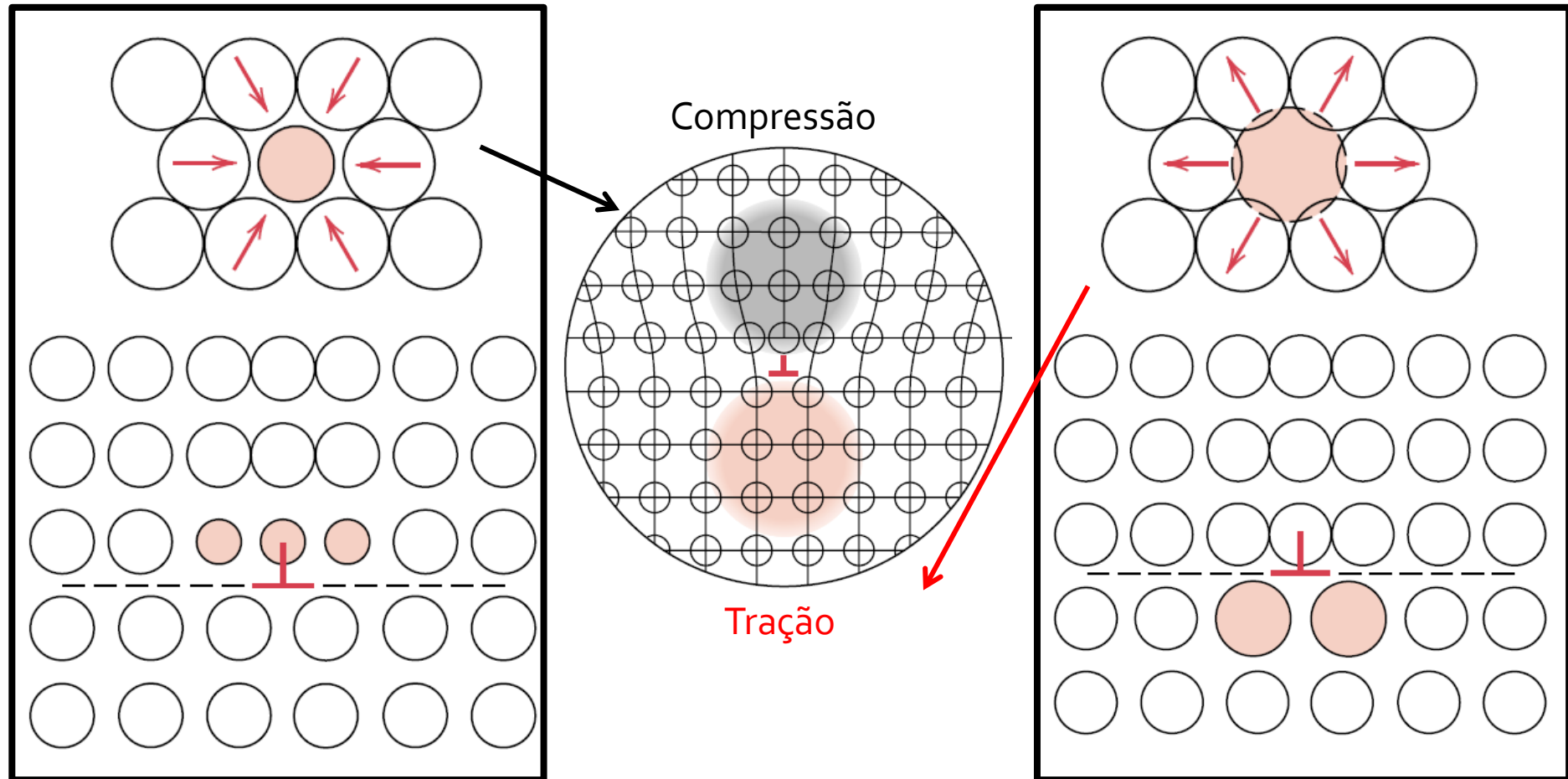
Soluto Substitucional (átomo maior)



Deformações
de
compressão

Formação de Solução Sólida

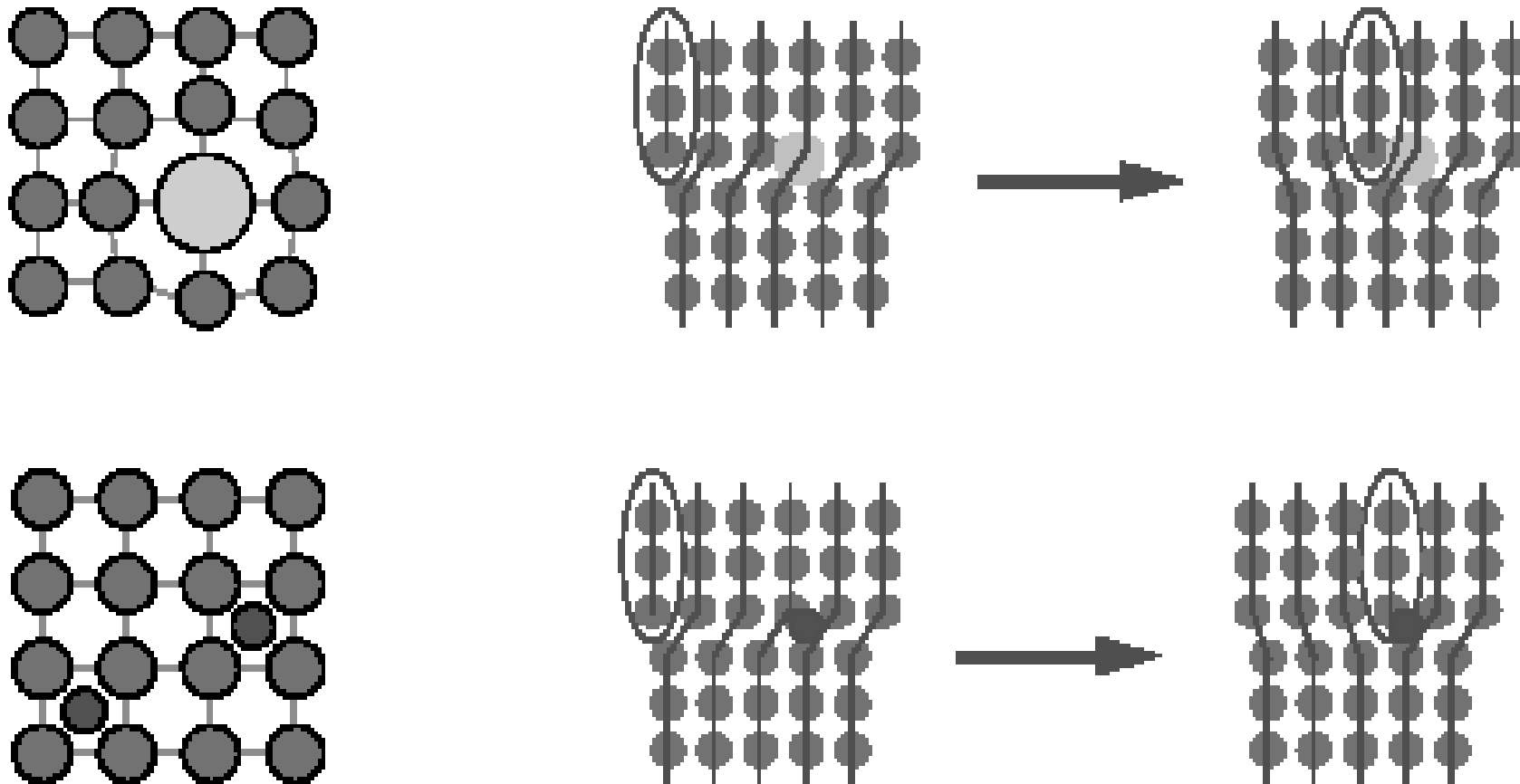
Solutos Substitucionais: tendem a se difundir e a se segregar ao redor das discordâncias de maneira a reduzir a energia total



Adaptado de Callister,
W.D. Materials Science
and Engineering: An
Introduction. 7 th Ed.
Wiley.

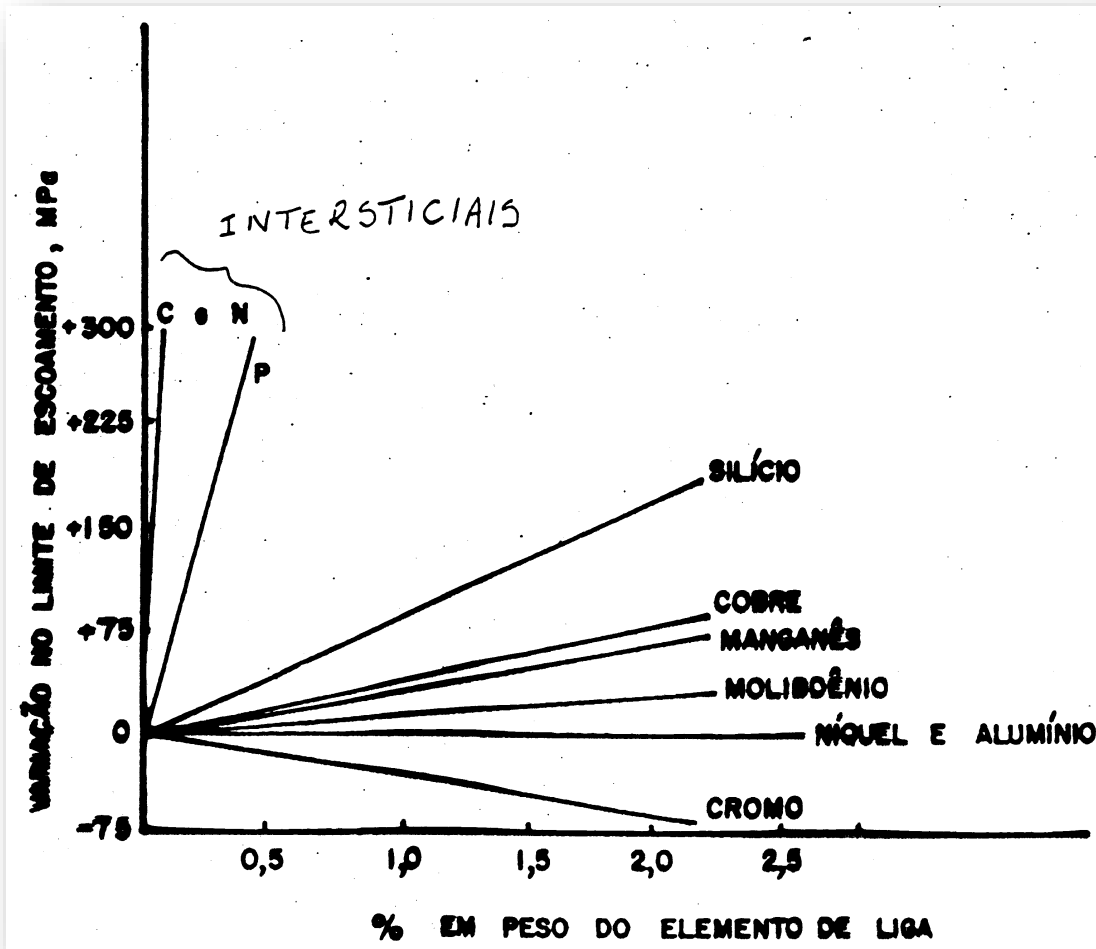
Formação de Solução Sólida

Interação dos átomos de soluto com as discordâncias:

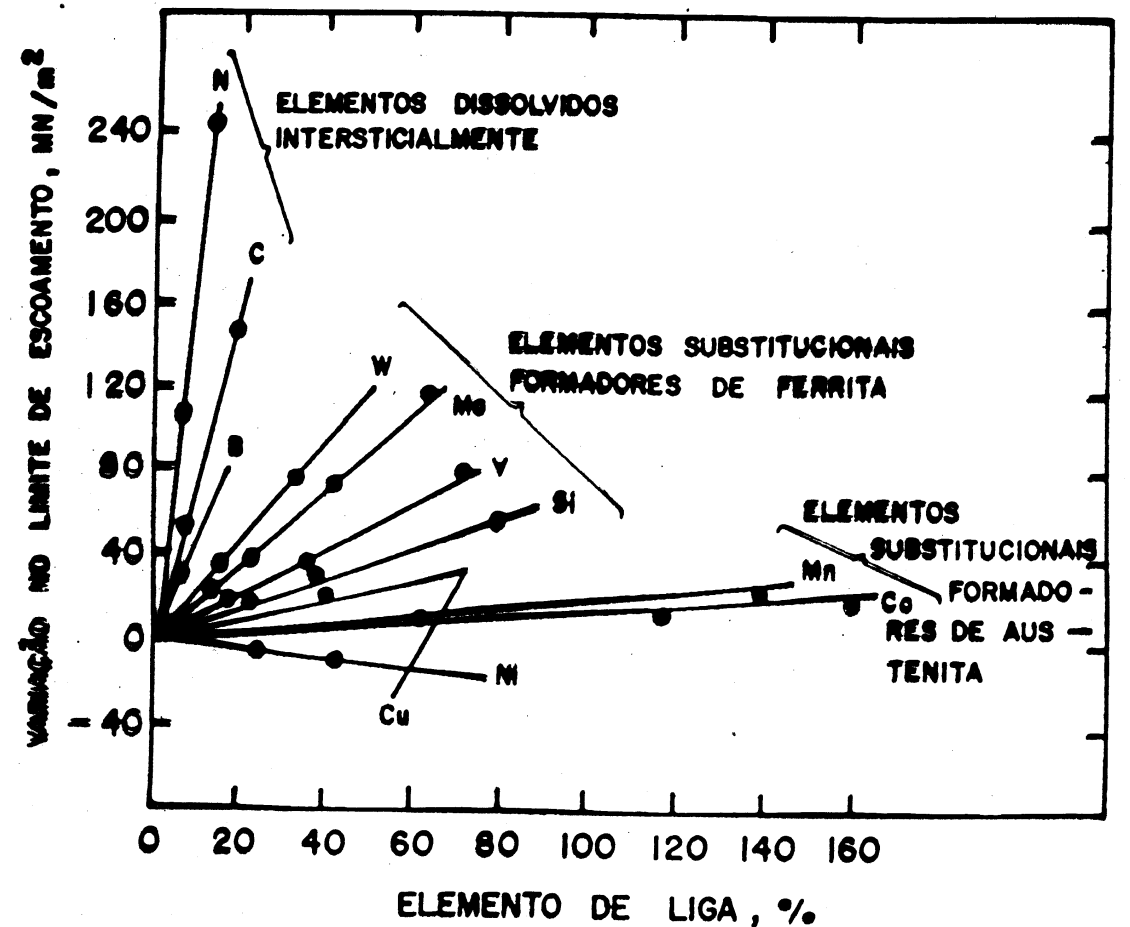


Formação de Solução Sólida

Efeito de solutos intersticiais no limite de escoamento de aços-carbono ferríticos (de baixo carbono)



Efeito de solutos substitucionais e intersticiais no limite de escoamento de aços inoxidáveis austeníticos



Mecanismos de Endurecimento

✓ Redução do tamanho de grão;

✓ Formação de soluções sólidas;

✓ Solubilização e Precipitação;

✓ Transformação de fases;

✓ Encruamento

Solubilização e Precipitação

A adição de átomos de impureza irá resultar na formação de **solução sólida** ou uma **segunda fase**;

Partículas de segunda fase podem ser introduzidas no metal ou liga **através de mecanismos de solubilização**;

Segunda fase é uma região com composição e características distintas, dispersa na matriz;

A presença de **segunda fase** provoca **distorção na rede**;

As **discordâncias** vão ter dificuldade em se movimentar através destas partículas (ex: carbonetos).

Solubilização e Precipitação

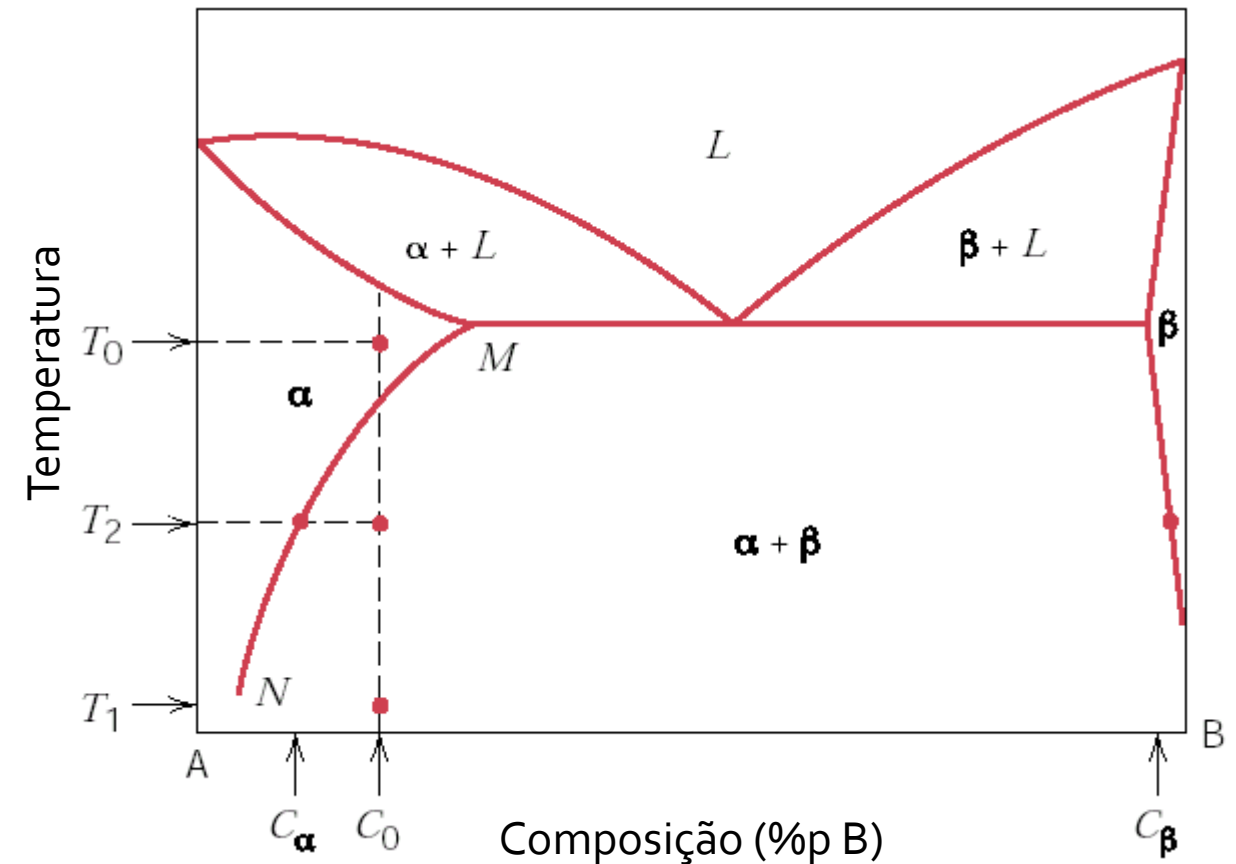
- ✓ O endurecimento por Precipitação é obtido por dois tratamentos térmicos diferentes: **Solubilização e Precipitação**
- ✓ Endurecimento por precipitação é comumente empregado para ligas de alumínio de alta resistência;
 - ✓ Mais extensivamente utilizado para ligas de Al-Cu;
- ✓ Superligas de níquel e ligas de Titânio também podem ser endurecidas por precipitação;

Solubilização e Precipitação

Características obrigatórias para que ocorra o Endurecimento por Precipitação

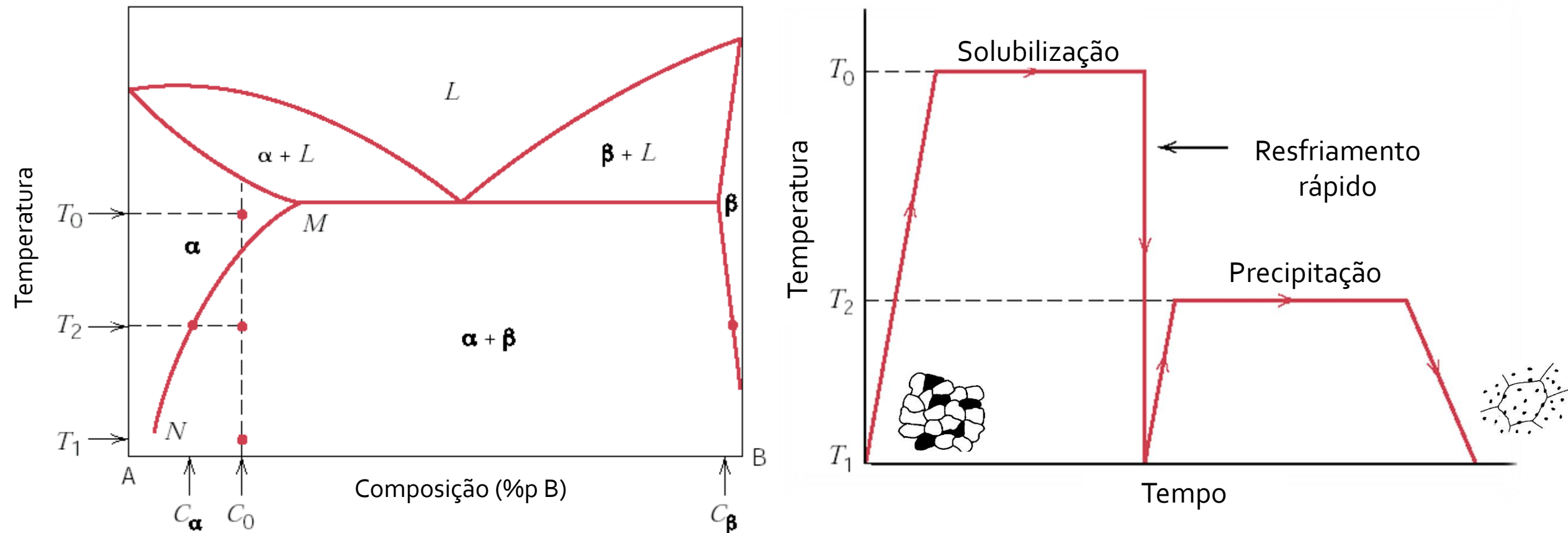
Adaptado de Callister, W.D. Materials Science and Engineering: An Introduction. 7th Ed. Wiley.

- ✓ Solubilidade máxima apreciável de um solvente no outro;
- ✓ Limite de solubilidade que diminui com a redução de temperatura;
- ✓ Composição da liga endurecível por precipitação deve ser menor que a solubilidade máxima.



Solubilização e Precipitação

O endurecimento por **solubilização e precipitação** ou **envelhecimento** consiste em uma sequência de transformação de fases que resulta em uma dispersão uniforme de precipitados.

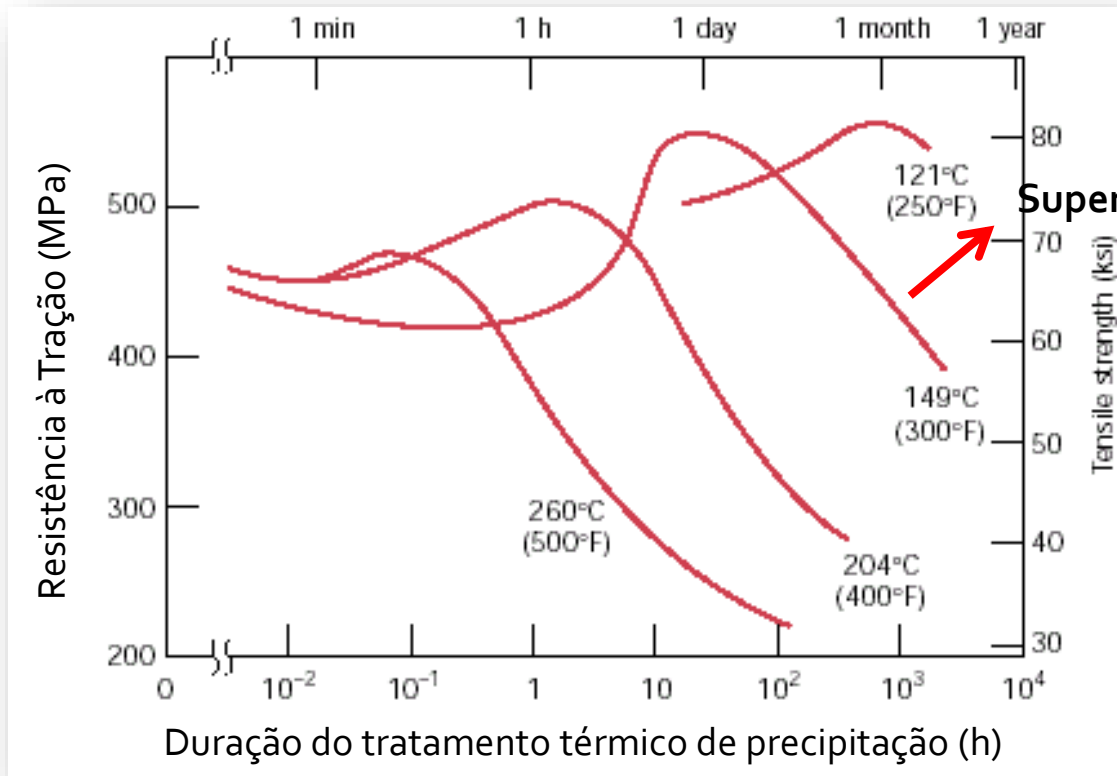


Adaptado de Callister, W.D. Materials Science and Engineering: An Introduction. 7th Ed. Wiley.

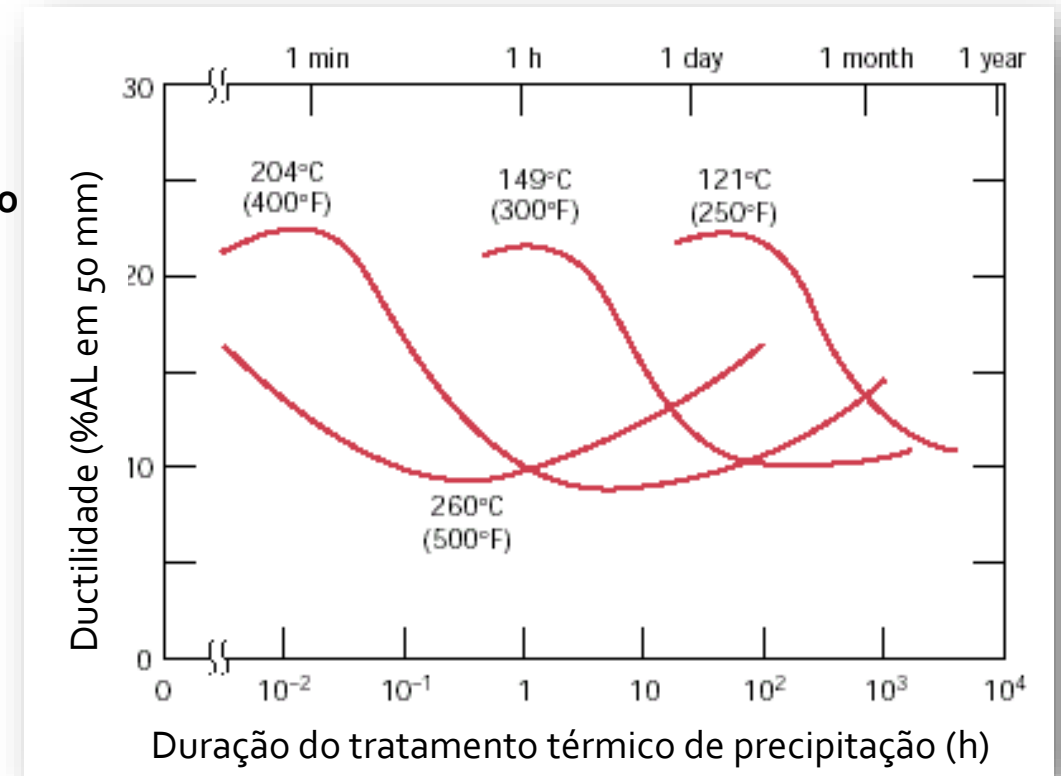
Solubilização e Precipitação

Características do endurecimento por precipitação de uma liga de alumínio 2014 (0,9%p Si; 4,4%p Cu; 0,8%p Mn; 0,5%p Mg)

Adaptado de Callister, W.D. Materials Science and Engineering: An Introduction. 7 th Ed. Wiley.



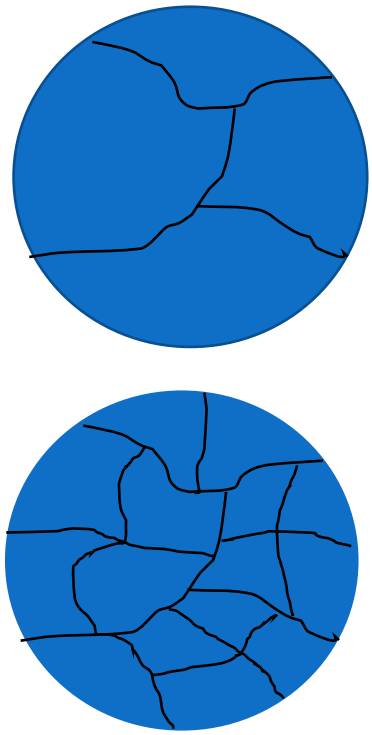
Limite de Resistência à Tração



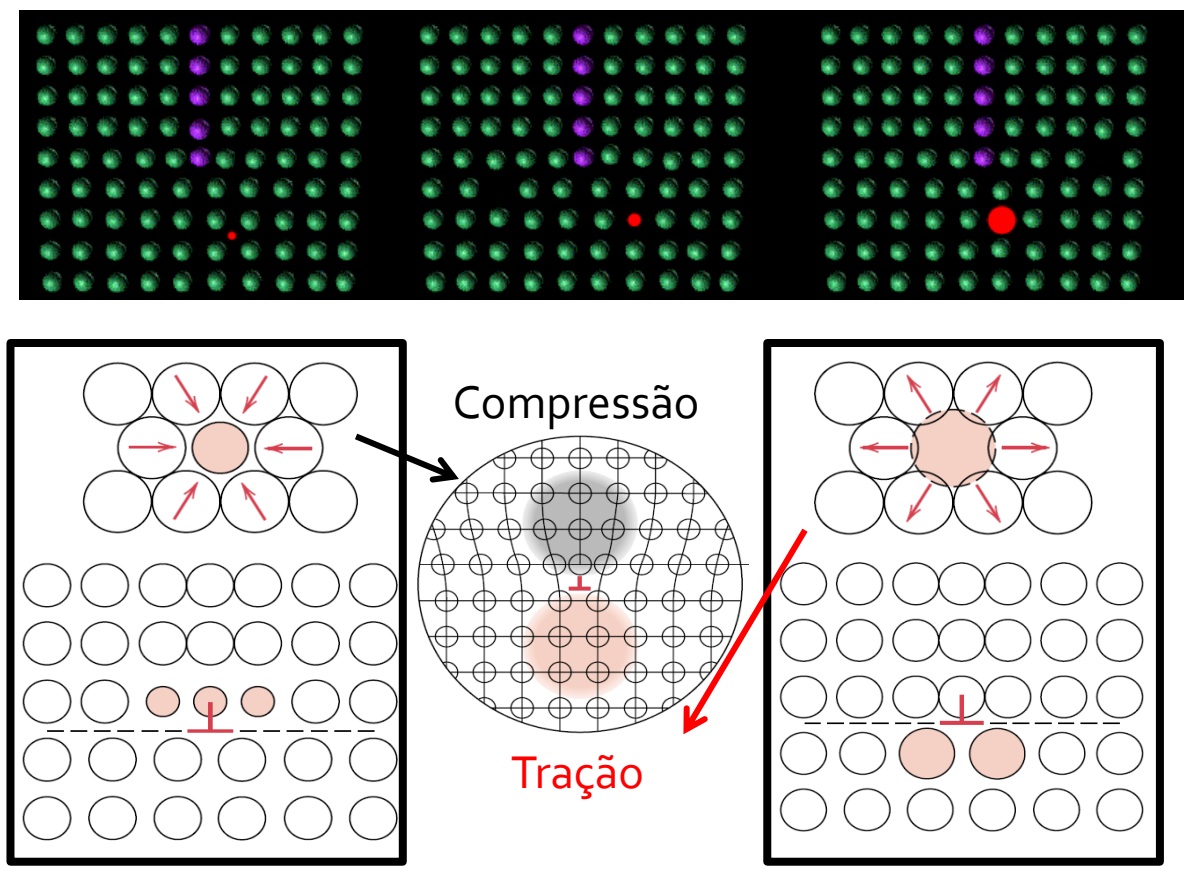
Ductilidade (%AL)

Resumo da Aula

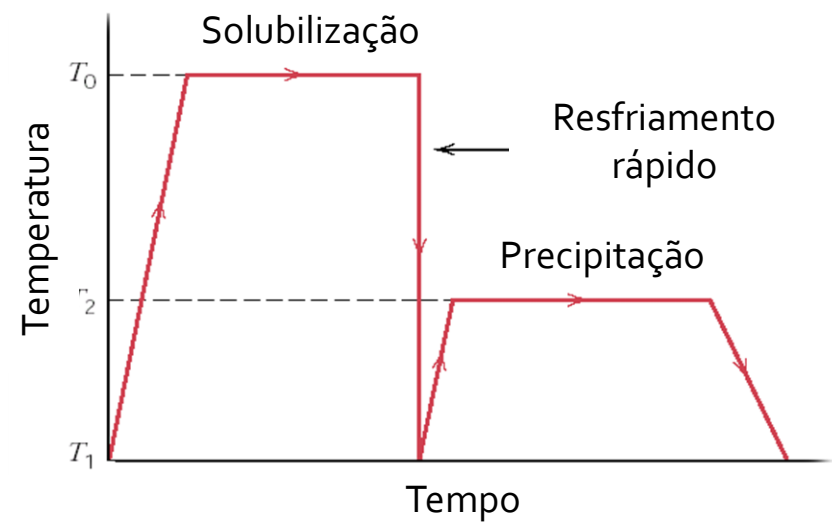
Redução do Tamanho de Grão



Solução Sólida (Intersticial e Substitucional)



Solubilização e Precipitação




REFERÊNCIAS E BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- CALLISTER JR., W. D. **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais: Uma abordagem integrada**, 2ª ed, Rio de Janeiro: LTC, 2006.
- CALLISTER JR, W.D. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 7 th Ed. Wiley.
- VAN VLACK, H. L. **Princípios de Ciência dos Materiais**, São Paulo: Cengage Learning, 2008.
- ASKELAND, D. R. e PHULÉ, P. P. **Ciência e Engenharia dos Materiais**, São Paulo: Edgar Blucher, 1970.
- Notas de aula Prof. Valdir Guimarães- Departamento de Materiais – Feg- Unesp.

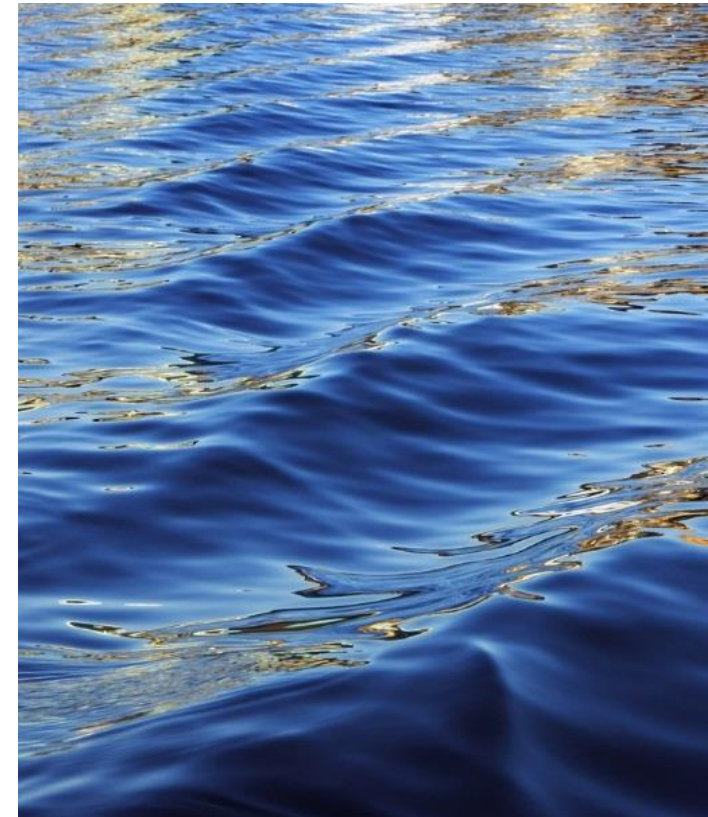


***Muito
obrigada!***



Aula 6 – Parte 2 Mecanismos de Endurecimento

Kelly Benini

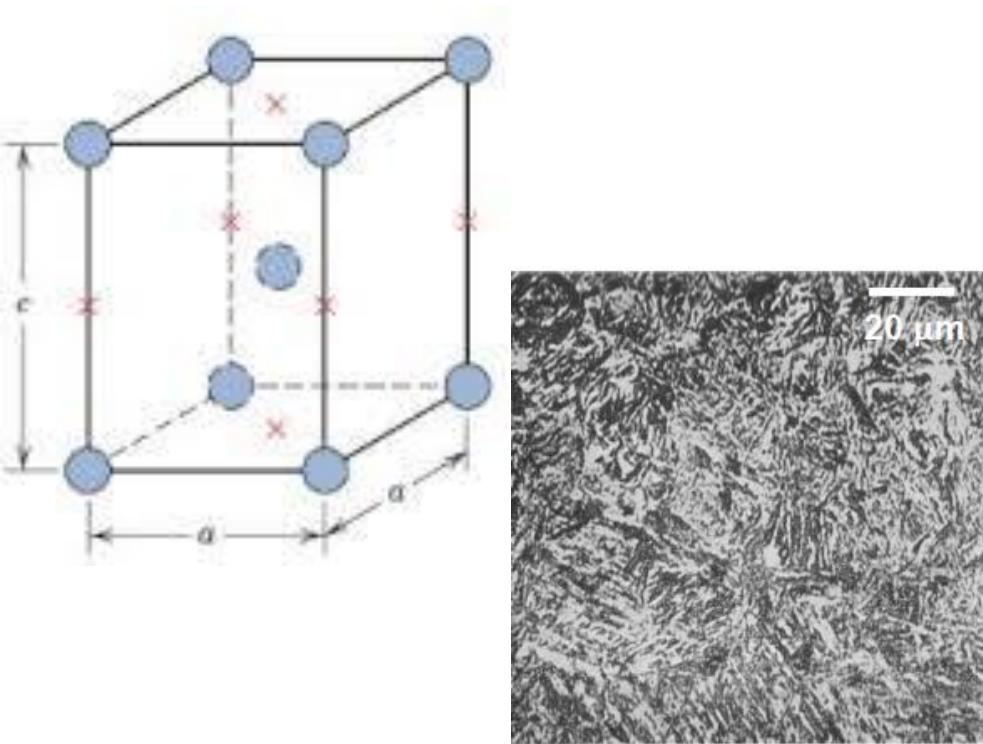


Mecanismos de Endurecimento

- ✓ Redução do tamanho de grão;
- ✓ Formação de soluções sólidas;
- ✓ Precipitação de partículas;
- ✓ Transformação de fases;
- ✓ Encruamento

Transformação de Fases - Têmpera

Têmpera: Consiste no aquecimento do aço (com quantidade de carbono igual ou superior a 0,4%;) até sua transformação austenítica, seguido de um resfriamento rápido, visando a obtenção do constituinte estrutural chamado **martensita**.



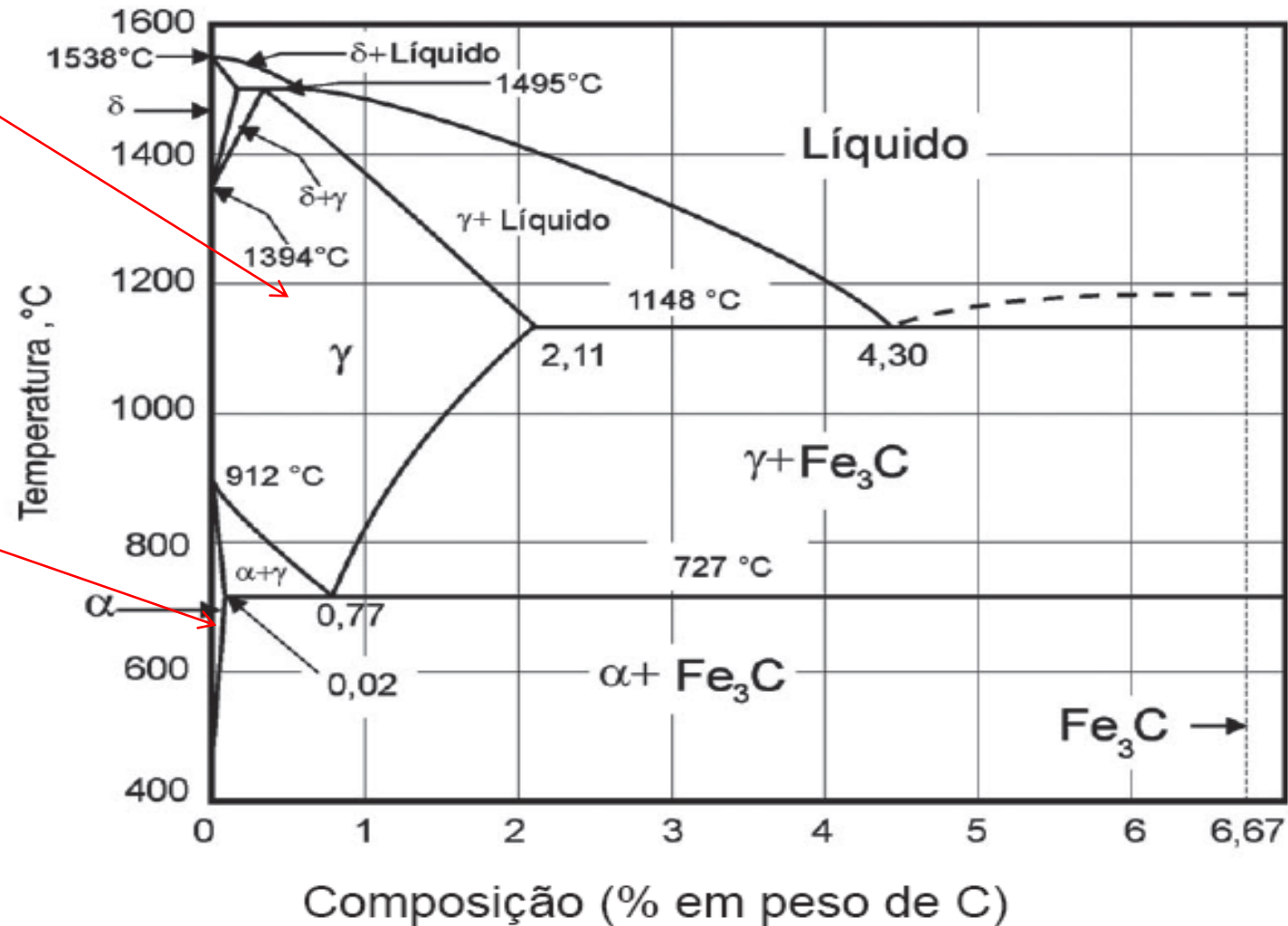
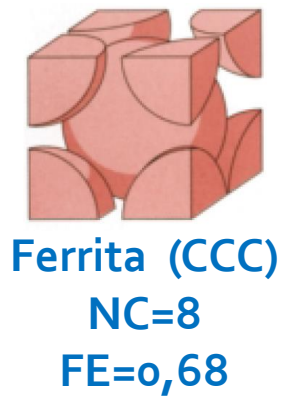
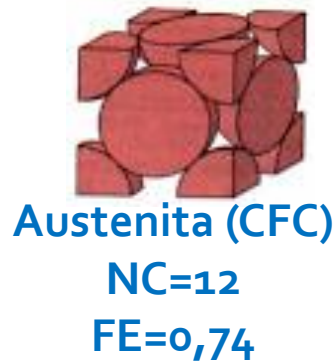
martensita

O que é martensita?

Martensita é uma estrutura monifásica, tetragonal de corpo centrado (TCC), composta por ferro que está supersaturada com carbono e que é o produto de uma transformação **sem difusão** da austenita (CFC).

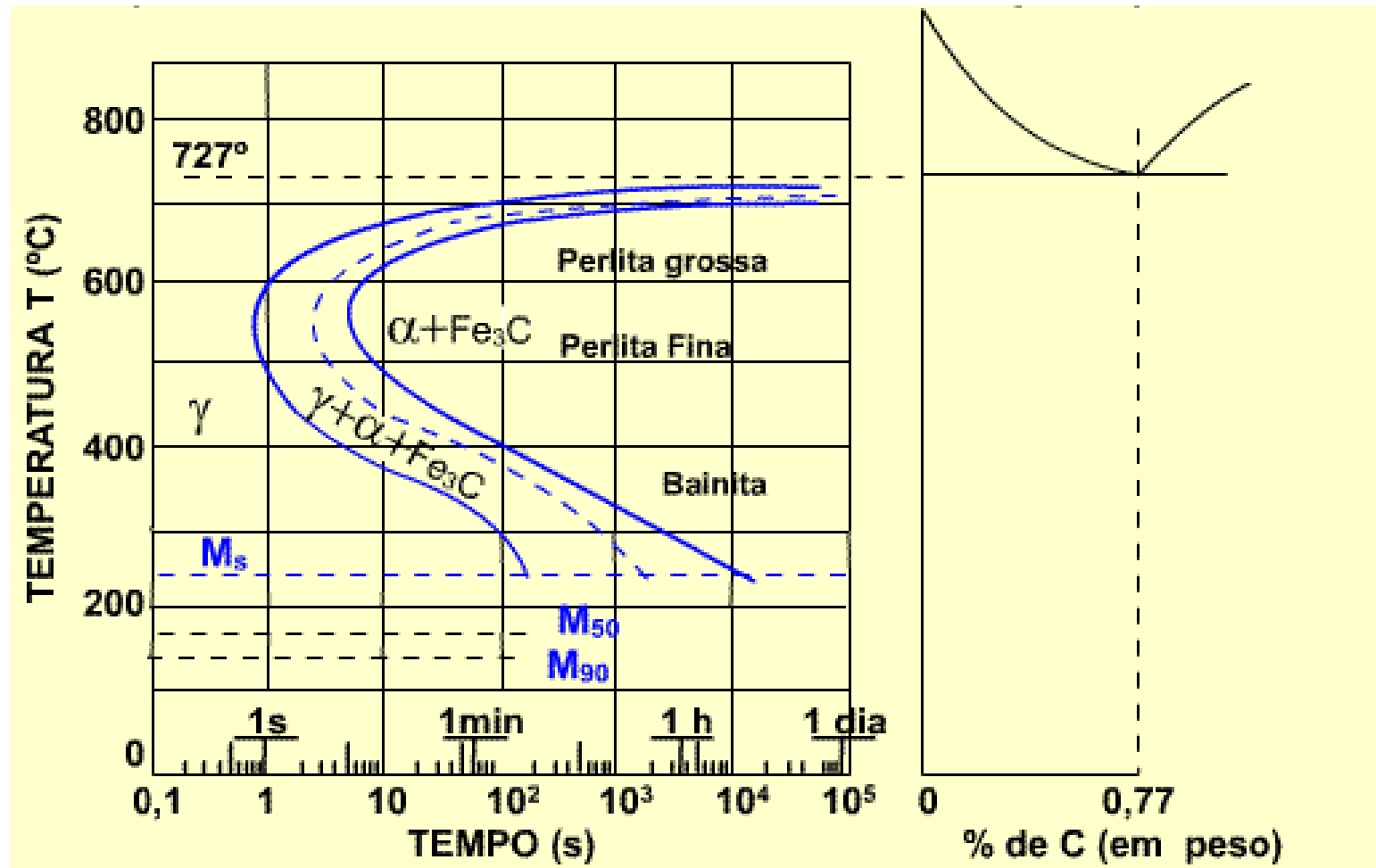
Transformação de Fases - Têmpera

Diagrama de fases ferro-carbeto de ferro (Fe_3C)



Transformação de Fases - Têmpera

Diagrama de transformação isotérmica (TTT)



Transformação de Fases - Têmpera

Objetivos da Têmpera

Obter uma estrutura martensítica que promove:

- ✓ Aumento da dureza – Martensita (65/67 HRC)
- ✓ Aumento da resistência à tração.

Desvantagens da Têmpera:

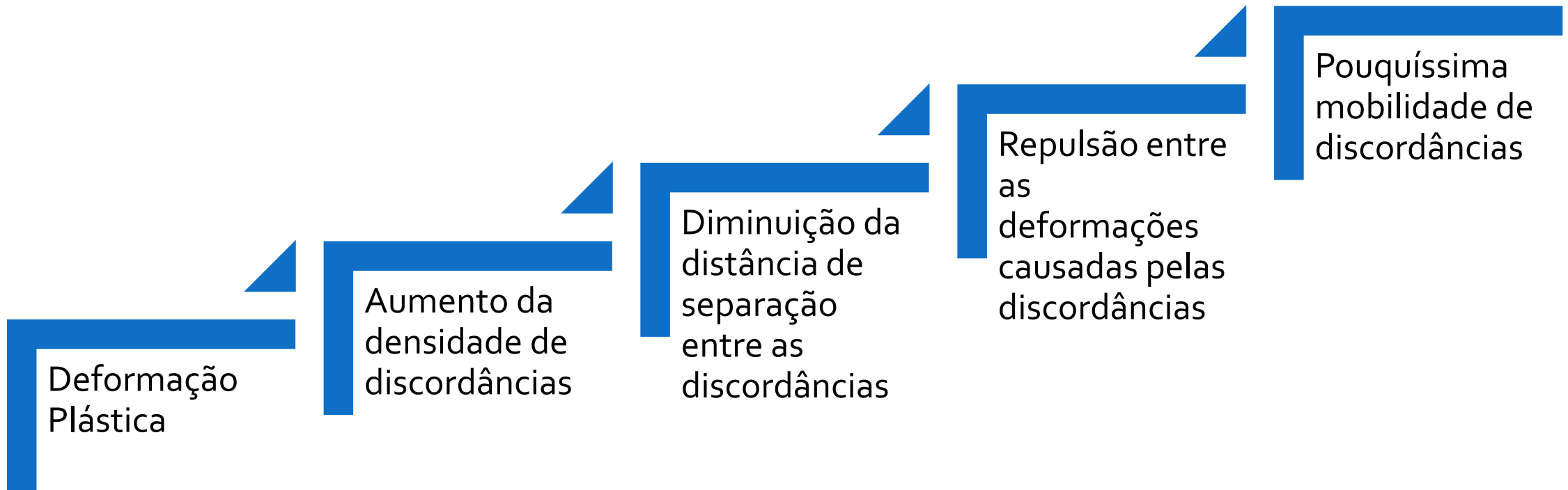
- ✓ Redução de ductilidade;
- ✓ Redução da tenacidade;
- ✓ Aparecimento de tensões internas;
 - ✓ Formação de trincas.

Mecanismos de Endurecimento

- ✓ Redução do tamanho de grão;
- ✓ Formação de soluções sólidas;
- ✓ Precipitação de partículas;
- ✓ Transformação de fases;
- ✓ Encruamento

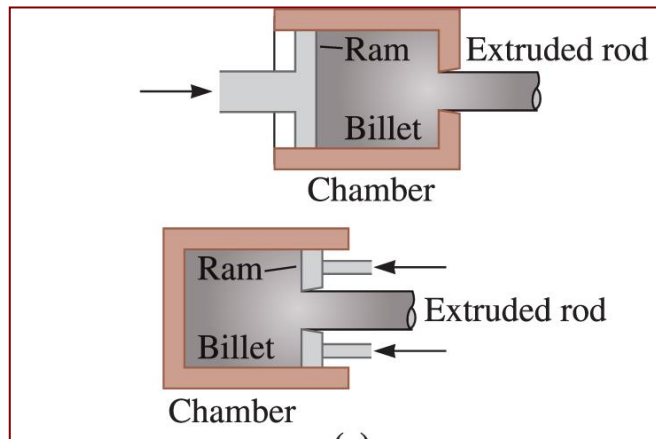
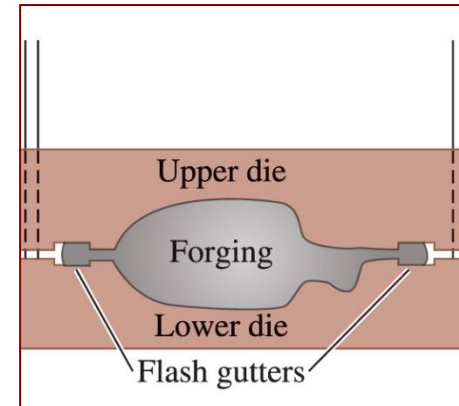
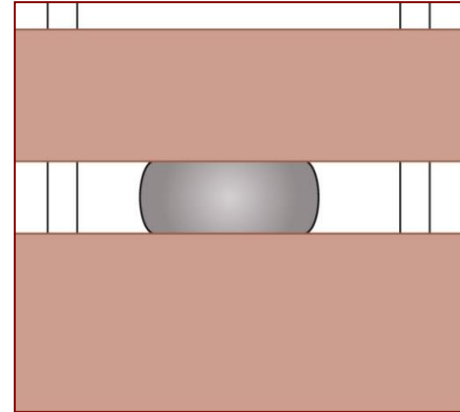
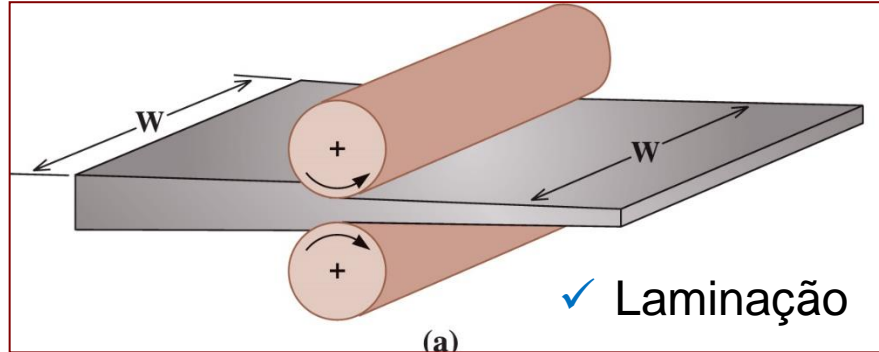
Encruamento

"Fenômeno pelo qual um metal dúctil se torna duro e resistente devido a deformação plástica". (Callister Jr., 2005)

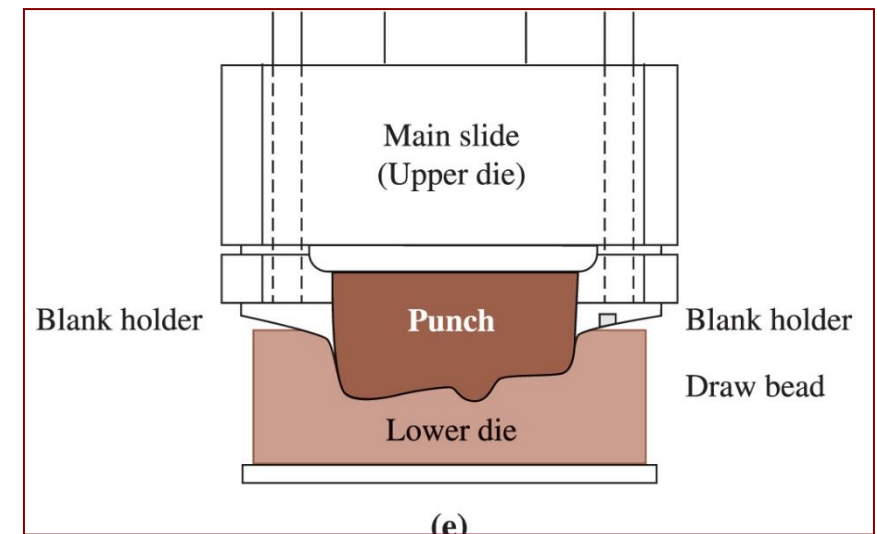
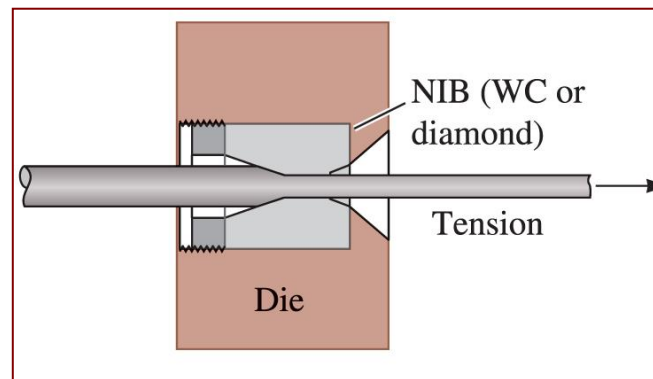


Encruamento

O encruamento é utilizado comercialmente para aumentar as propriedades mecânicas por processos de conformação tais como:

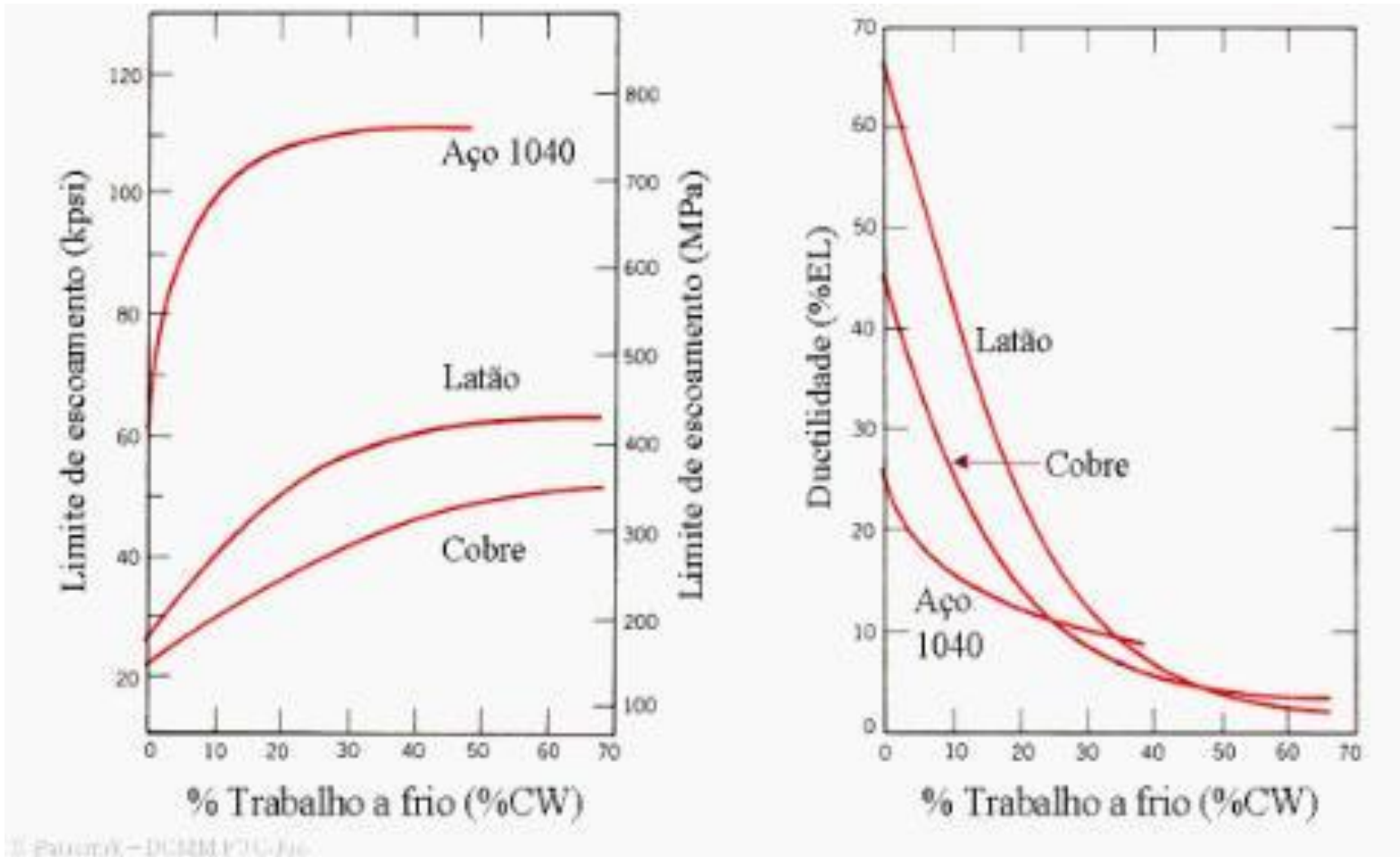


✓ Extrusão Direta ou inversa - perfis



Propriedade x Trabalho a Frio

- ✓ Encruamento pode ser também chamado de Endurecimento ou Trabalho a frio



Há uma quantidade máxima de trabalho a frio que pode ser aplicada antes que o material se torne muito frágil e se rompa.

$$(\%TF) \equiv \left[\frac{A_0 - A_f}{A_0} \right] \times 100$$

Tratamento Térmico após o Encruamento

Os efeitos do encruamento podem ser removidos por tratamentos térmicos

Processo de Reozimento para Recristalização

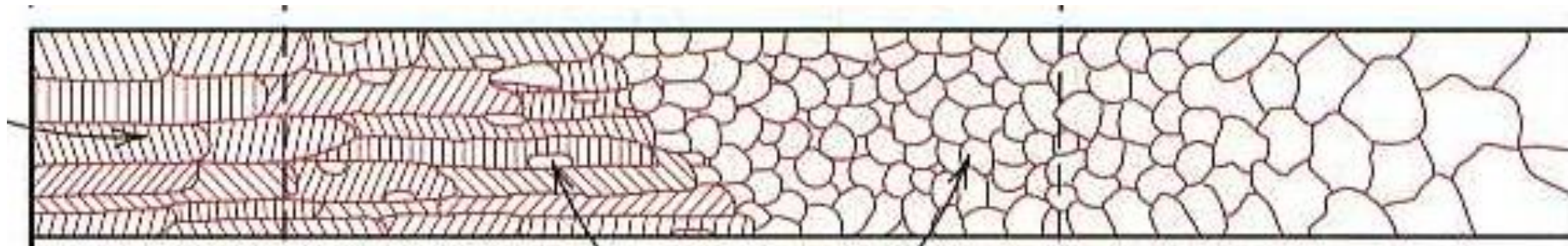
Se os metais deformados plasticamente forem submetidos a um aquecimento controlado, este aquecimento fará com que haja um rearranjo dos cristais deformados plasticamente, diminuindo a dureza dos mesmos.

Recozimento para Recristalização

Mecanismo que ocorre no aquecimento de um material encruado

Estágios do Recozimento:

- ✓ Recuperação;
- ✓ Recristalização;
- ✓ Crescimento de grão.



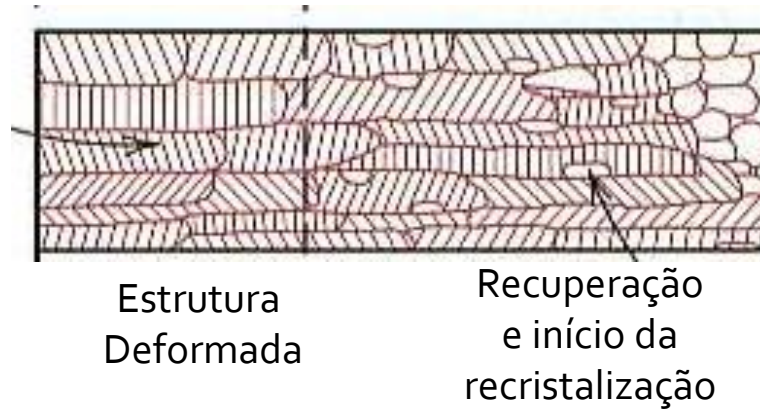
Estrutura
Deformada

Recuperação
e início da
recristalização

Estrutura
Recristalizada

Crescimento
de Grão

Estágios do Recozimento: Recuperação



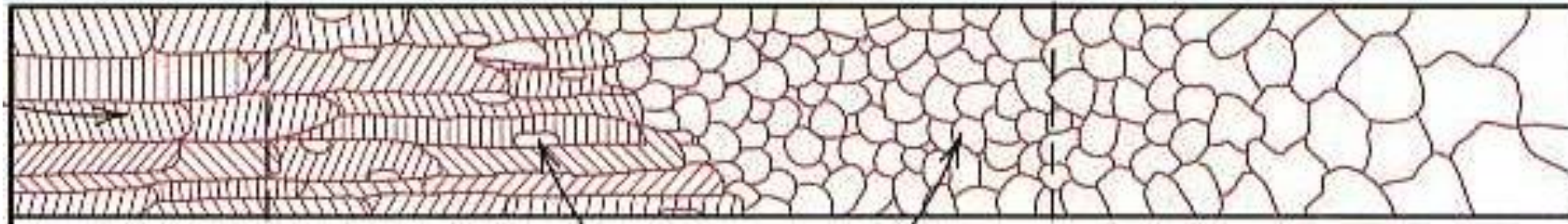
- ✓ Há um alívio das **tensões internas** armazenadas durante a deformação devido ao movimento das discordâncias resultante da difusão atômica;
- ✓ Redução do número de discordâncias e um rearranjo das mesmas;
- ✓ Propriedades físicas como condutividade térmica e elétrica voltam ao seu estado original (correspondente ao material não-deformado).

Estágios de Recozimento: Recristalização



- ✓ Depois da recuperação, os grãos ainda estão tensionados;
- ✓ Na recristalização os grãos se tornam novamente equiaxiais (dimensões iguais em todas as direções);
- ✓ O número de discordâncias reduz mais ainda e as propriedades mecânicas voltam ao seu estado original.

Estágios de Recozimento: Crescimento de Grão



Estrutura
Deformada

Recuperação
e início da
recristalização

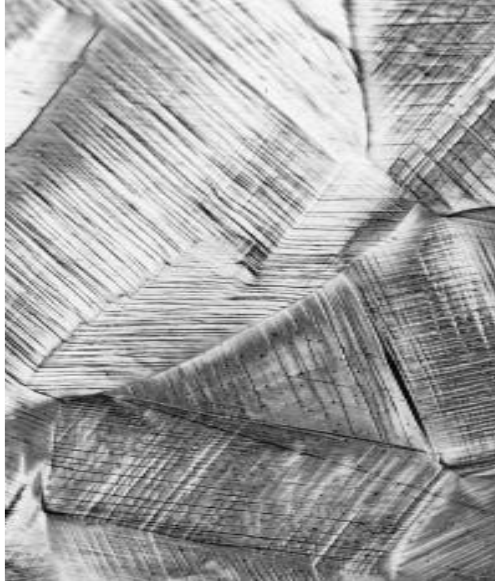
Estrutura
Recristalizada

Crescimento
de Grão

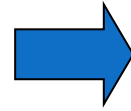
- ✓ Depois da recristalização se o material permanecer por mais tempo em temperaturas elevadas o grão continuará à crescer;
- ✓ Em geral, quanto maior o tamanho de grão mais mole é o material e menor é sua resistência.

Estágios de Recozimento: Crescimento de Grão

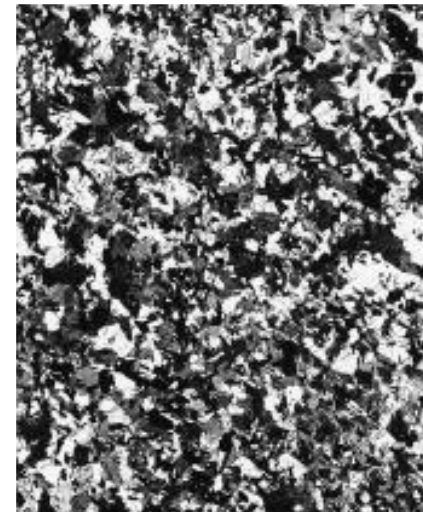
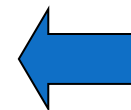
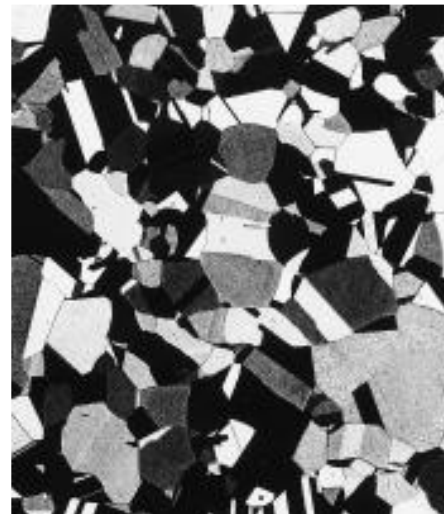
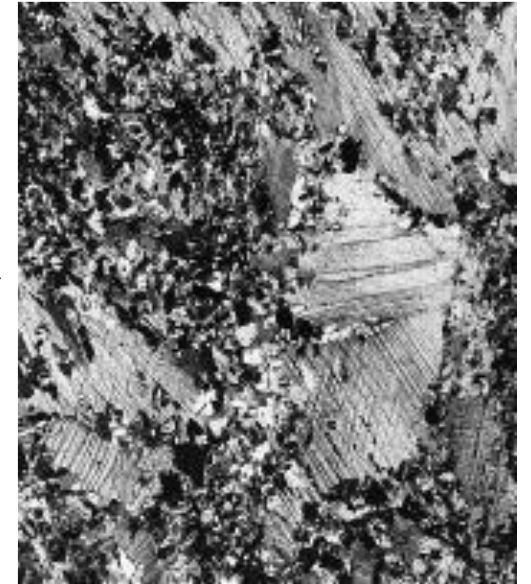
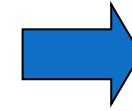
Microestrutura inicial



Após 33% de TF



Recuperação e início da recristalização



Fotomicrografias mostrando vários estágios da recristalização e do crescimento de grãos do latão

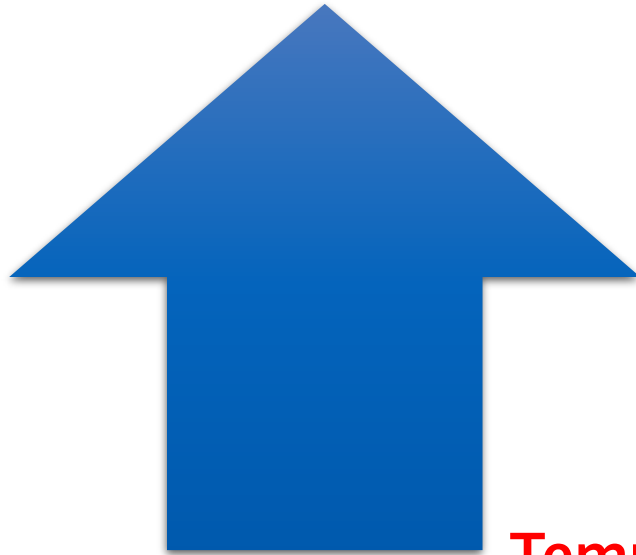
Temperatura de Recristalização

- ✓ A temperatura de recristalização é dependente do tempo e está entre $1/3$ e $1/2$ da temperatura de fusão.

Chumbo	-4°C
Estanho	-4°C
Zinco	10°C
Alumínio de alta pureza	80°C
Cobre de alta pureza	120°C
Latão 60-40	475°C
Níquel	370°C
Ferro	450°C
Tungstênio	1200°C

Temperatura de Recristalização:
temperatura na qual a recristalização termina em 1 hora.

Temperatura de Recristalização x Deformação




Deformação à Quente: quando a deformação ou trabalho mecânico é realizado acima da temperatura de recristalização do material

Temperatura de Recristalização



Deformação à Frio: quando a deformação ou trabalho mecânico é realizado abaixo da temperatura de recristalização do material (Encruamento)

Deformação à quente




Permite o emprego de menor esforço mecânico para a mesma deformação;

Promove o **refinamento da estrutura** do material, melhorando a **tenacidade**;

Elimina porosidades;

Deforma profundamente devido a **recristalização**.



Exige ferramental de boa resistência ao calor, o que implica em custo;

O material sofre maior oxidação, formando casca de óxidos;

Não permite a obtenção de dimensões dentro de tolerâncias estreitas.

Deformação à frio

Vantagens e Desvantagens

- ✓ Aumenta a dureza e a resistência dos materiais, mas a ductilidade diminui;
- ✓ Permite a obtenção de dimensões dentro de tolerâncias estreitas;
- ✓ Produz melhor acabamento superficial.

Mecanismos de Endurecimento

- ✓ Redução do tamanho de grão;
- ✓ Formação de soluções sólidas;
- ✓ Precipitação de partículas;
- ✓ Transformação de fases;
- ✓ Encruamento

Tarefa

Fazer uma resenha da Aula 6, escrevendo sucintamente sobre os principais mecanismos de aumentos de resistência dos materiais metálicos e explicando qual o princípio básico que norteia todos estes mecanismos.



REFERÊNCIAS E BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- CALLISTER JR., W. D. **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais: Uma abordagem integrada**, 2ª ed, Rio de Janeiro: LTC, 2006.
- CALLISTER JR, W.D. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 7 th Ed. Wiley.
- VAN VLACK, H. L. **Princípios de Ciência dos Materiais**, São Paulo: Cengage Learning, 2008.
- ASKELAND, D. R. e PHULÉ, P. P. **Ciência e Engenharia dos Materiais**, São Paulo: Edgar Blucher, 1970.
- Notas de aula Prof. Valdir Guimarães- Departamento de Materiais – Feg- Unesp.



***Muito
obrigada!***