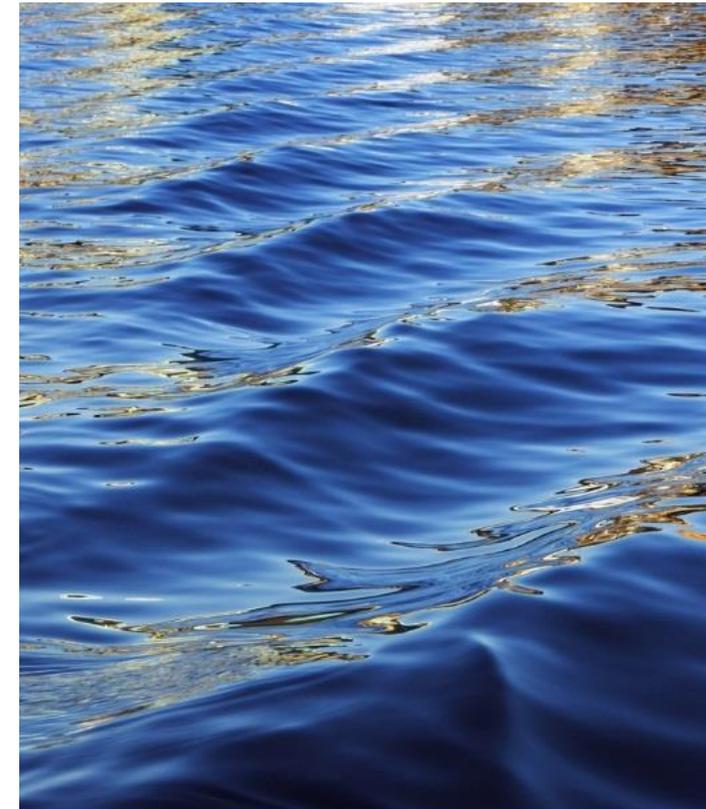




# Aula 6 – Parte 1 Mecanismos de Endurecimento

Kelly Benini



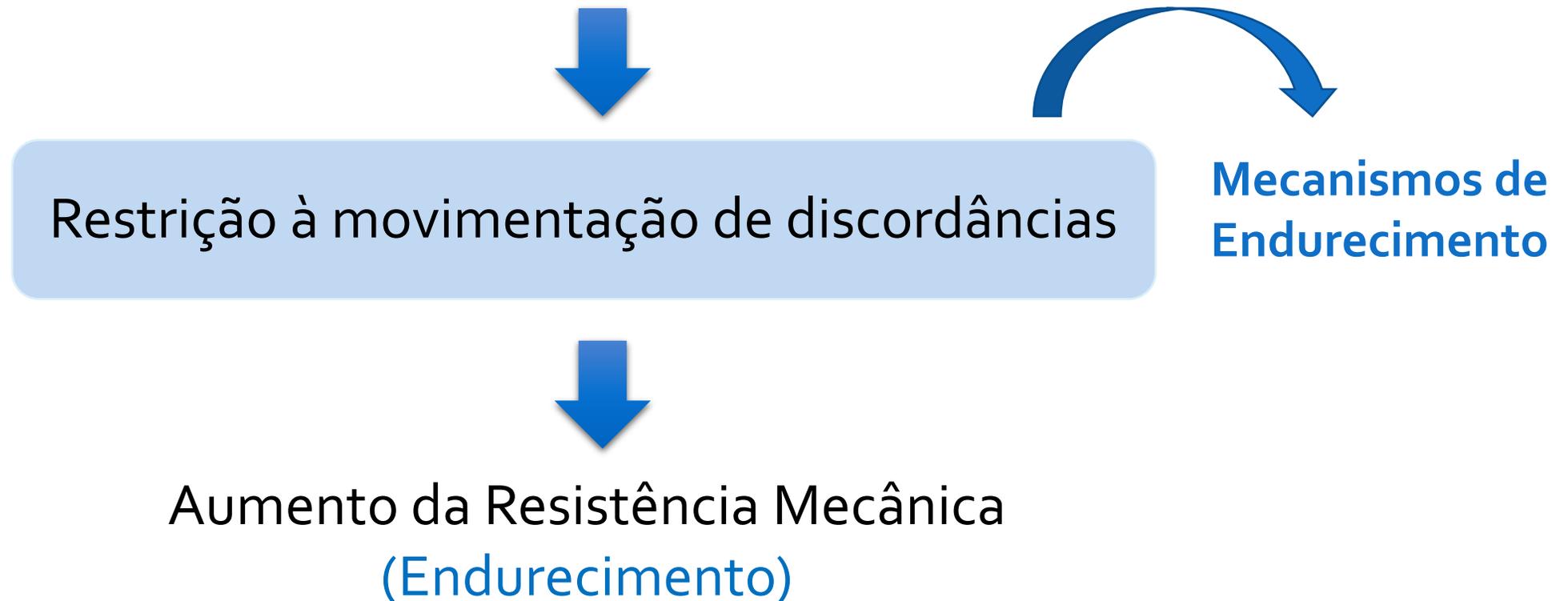
# O que veremos nessa aula?



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;

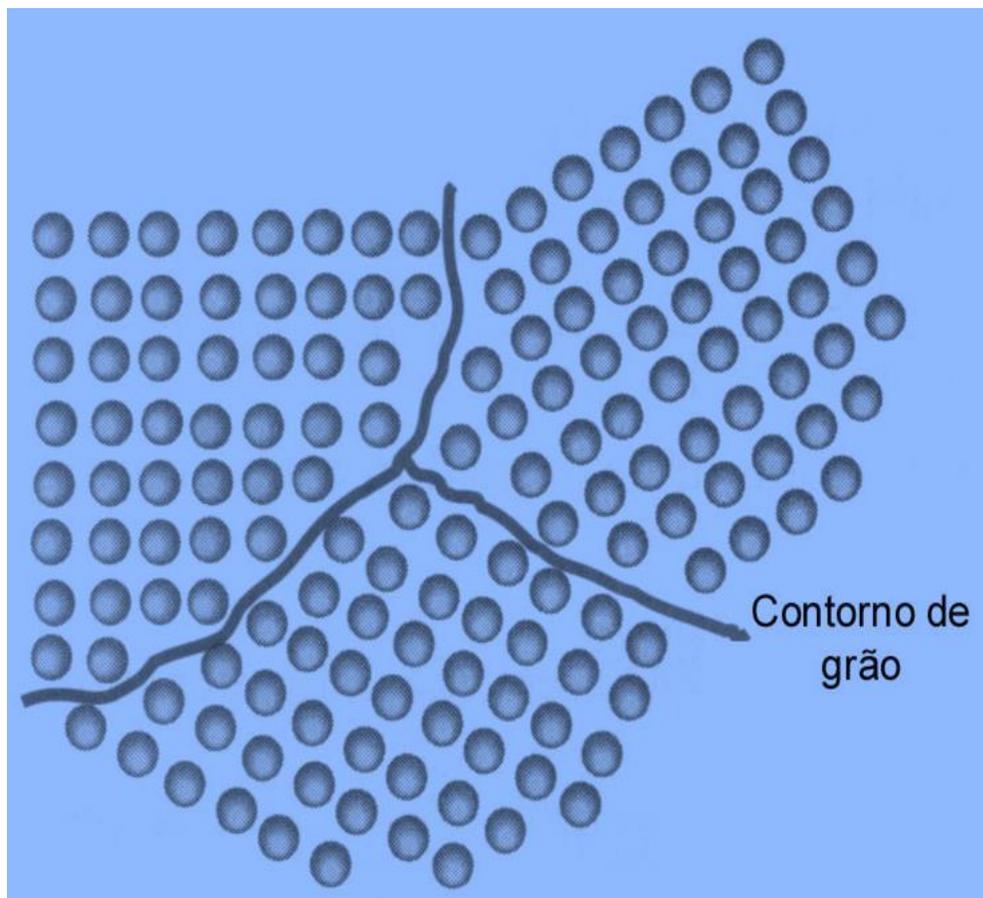
Adição de  
elemento  
de liga

✓ Transformação de fases;

✓ Encruamento

## Redução do Tamanho de Grão

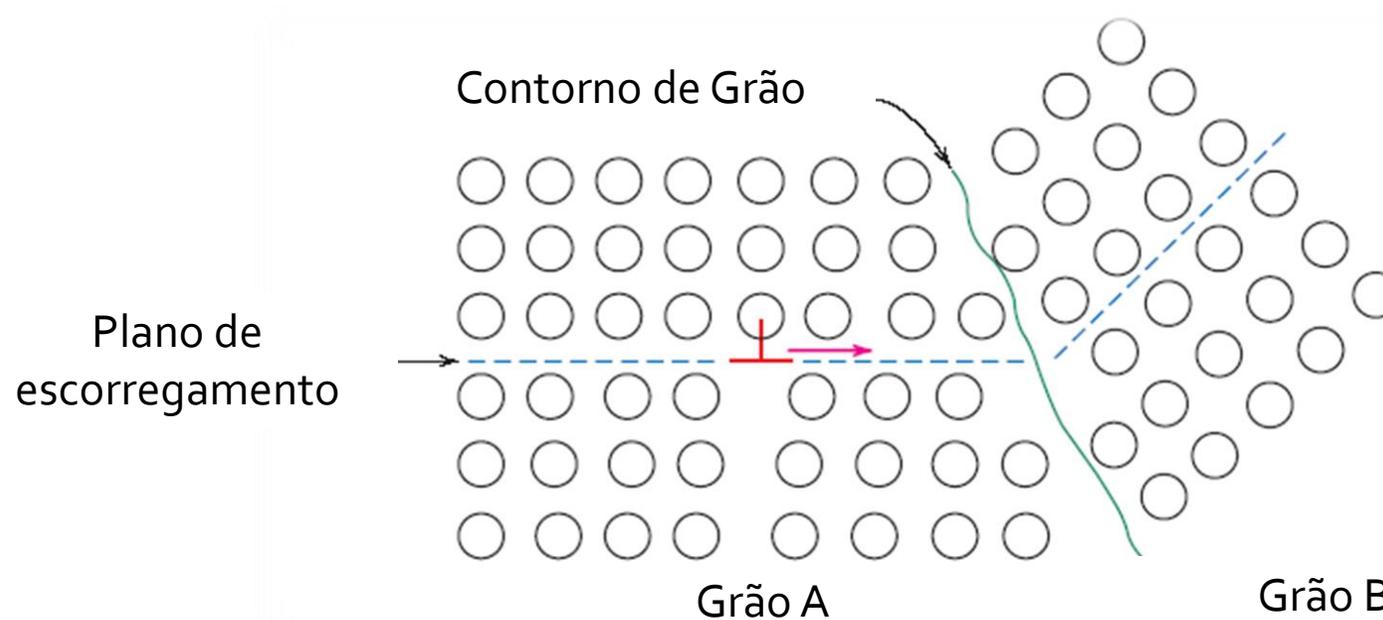
Os **contornos de grão** atuam como uma barreira à movimentação de discordâncias:



- ✓ 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

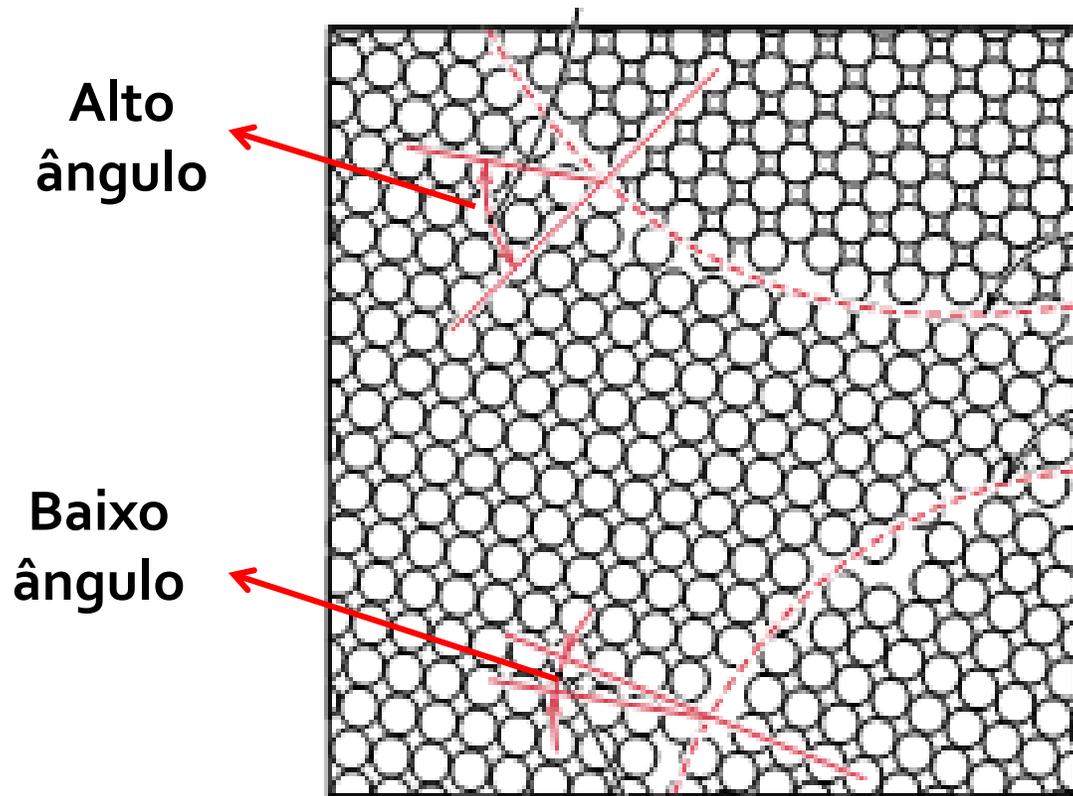


Adaptado de Callister, W.D. Materials Science and Engineering: An Introduction. 7th Ed. Wiley.

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

# Redução do Tamanho de Grão

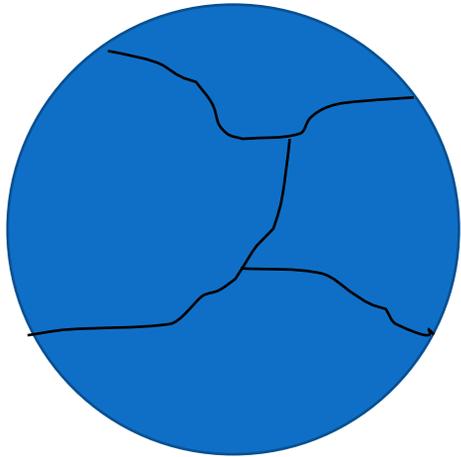
Contorno de grão atua como barreira por duas razões:



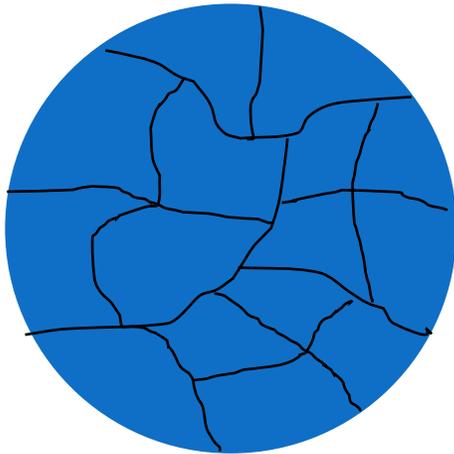
- ✓ Ao passar de um grão para outro a discordância deve mudar sua direção de movimentação (quanto maior a diferença de orientação mais difícil);
- ✓ A desordenação atômica no interior de uma região de contorno de grão irá resultar em uma descontinuidade de planos de escorregamento de um grão para dentro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

# Redução do Tamanho de Grão

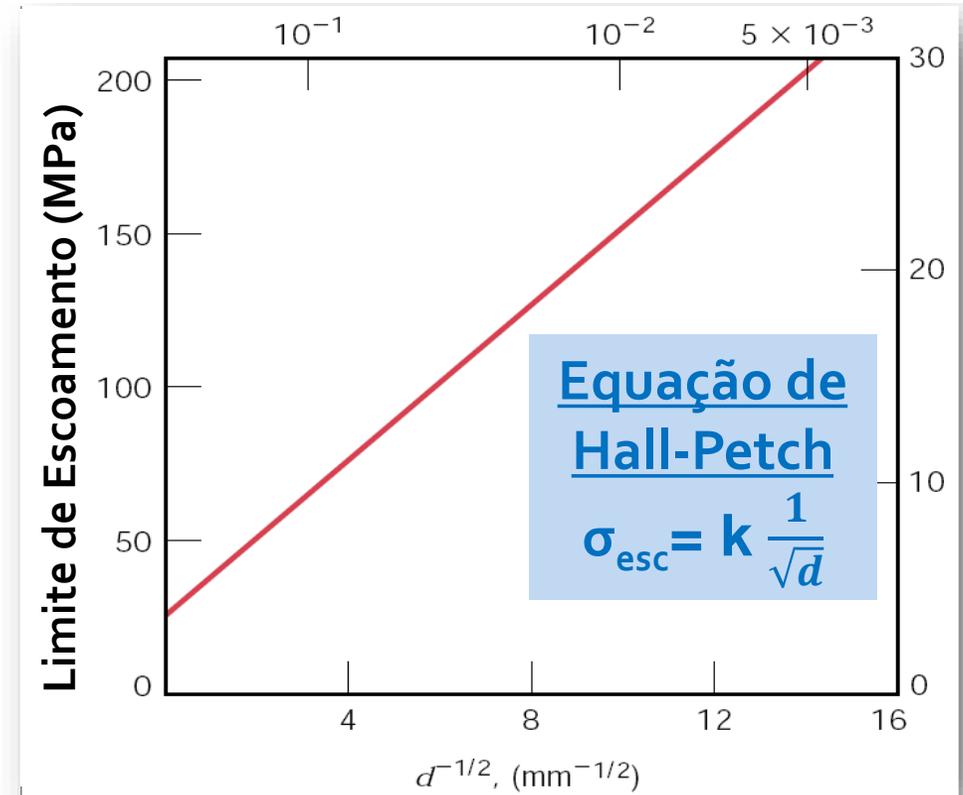
Adaptado de Callister, W.D. Materials Science and Engineering: An Introduction. 7th Ed. Wiley.



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;

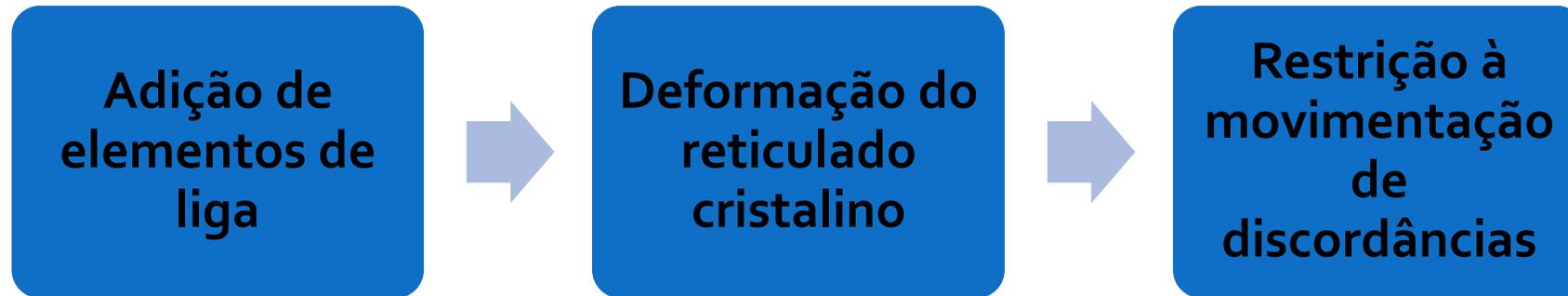
✓ Solubilização e Precipitação;

✓ Transformação de fases;

✓ Encruamento

# Formação de Solução Sólida

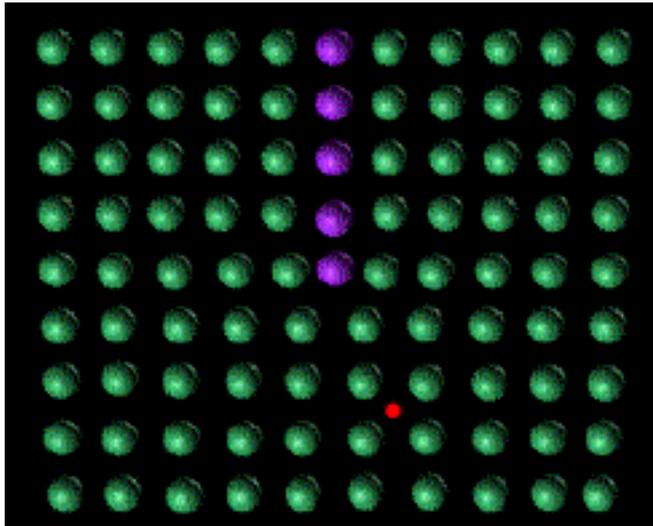
Introdução de átomos de impureza que ocupam posições **intersticiais e substitucionais** e que causam perturbações na estrutura cristalina



**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;

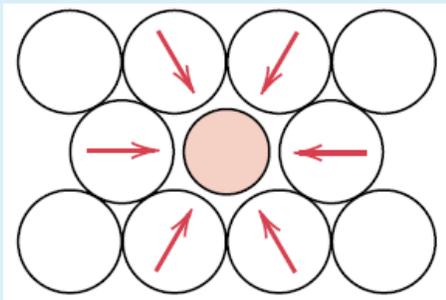
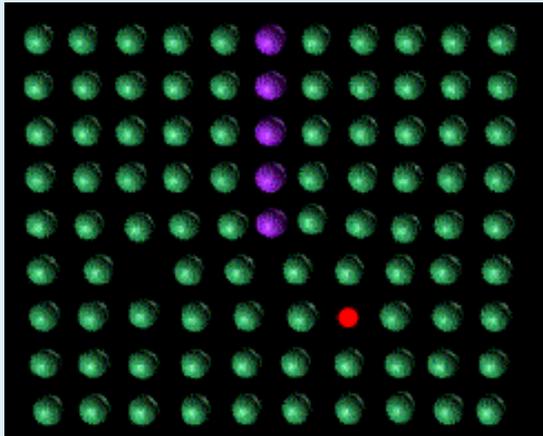
O efeito endurecedor é aumentado pela forte interação com as discordâncias;

Apresentam efeito endurecedor mais intenso que solutos substitucionais.

# Formação de Solução Sólida

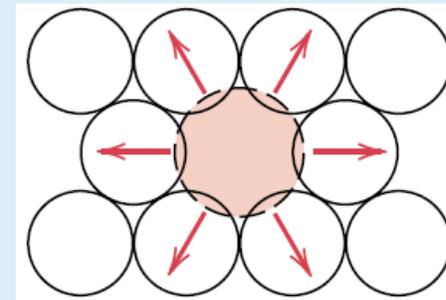
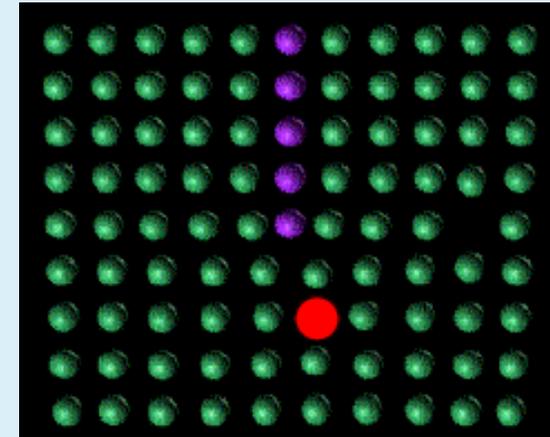
Introdução de átomos de impureza que ocupam posições **substitucionais**

## Soluto Substitucional (átomo menor)



**Deformações  
de  
tração**

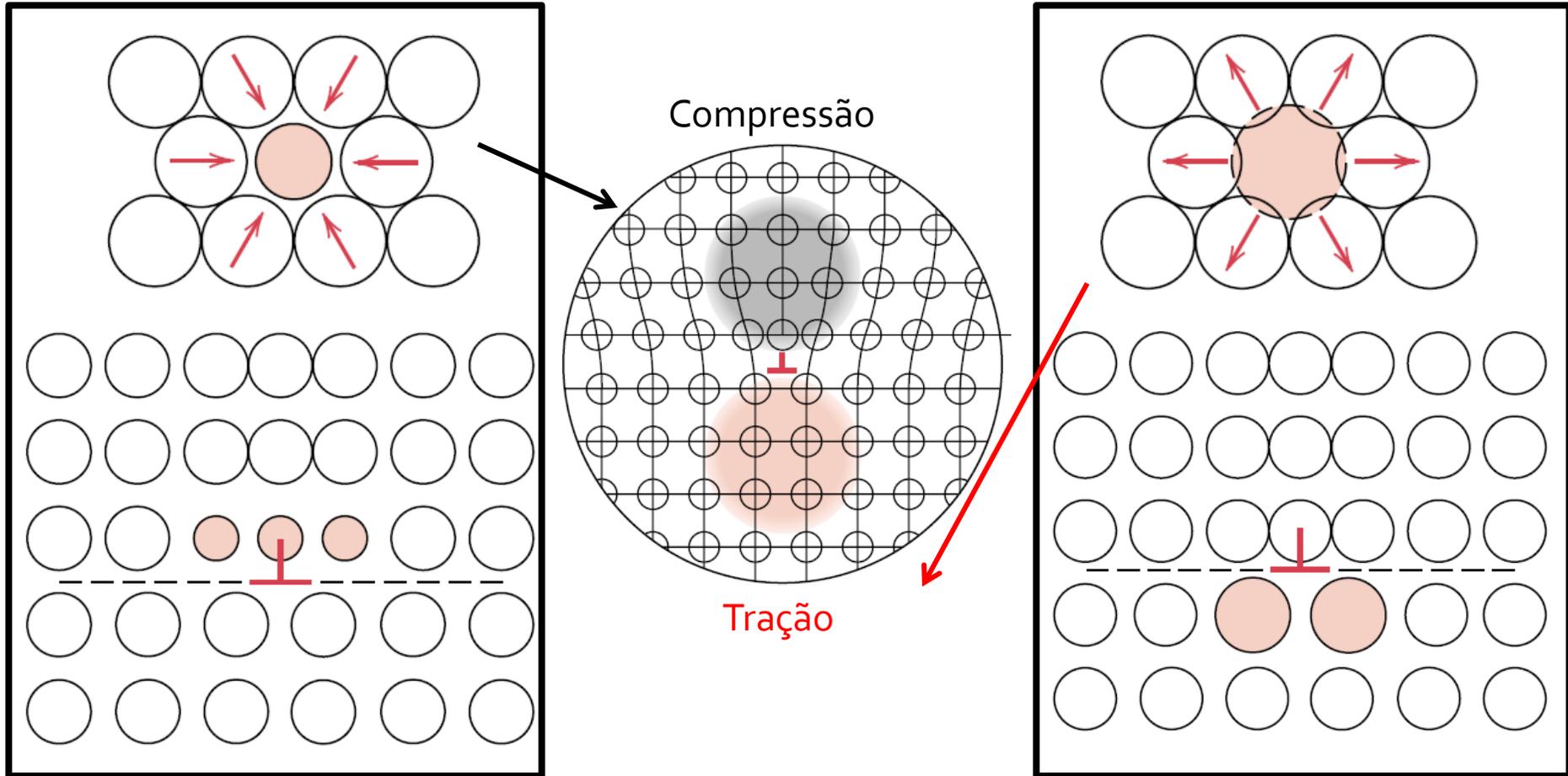
## Soluto Substitucional (átomo maior)



**Deformações  
de  
compressão**

# Formação de Solução Sólida

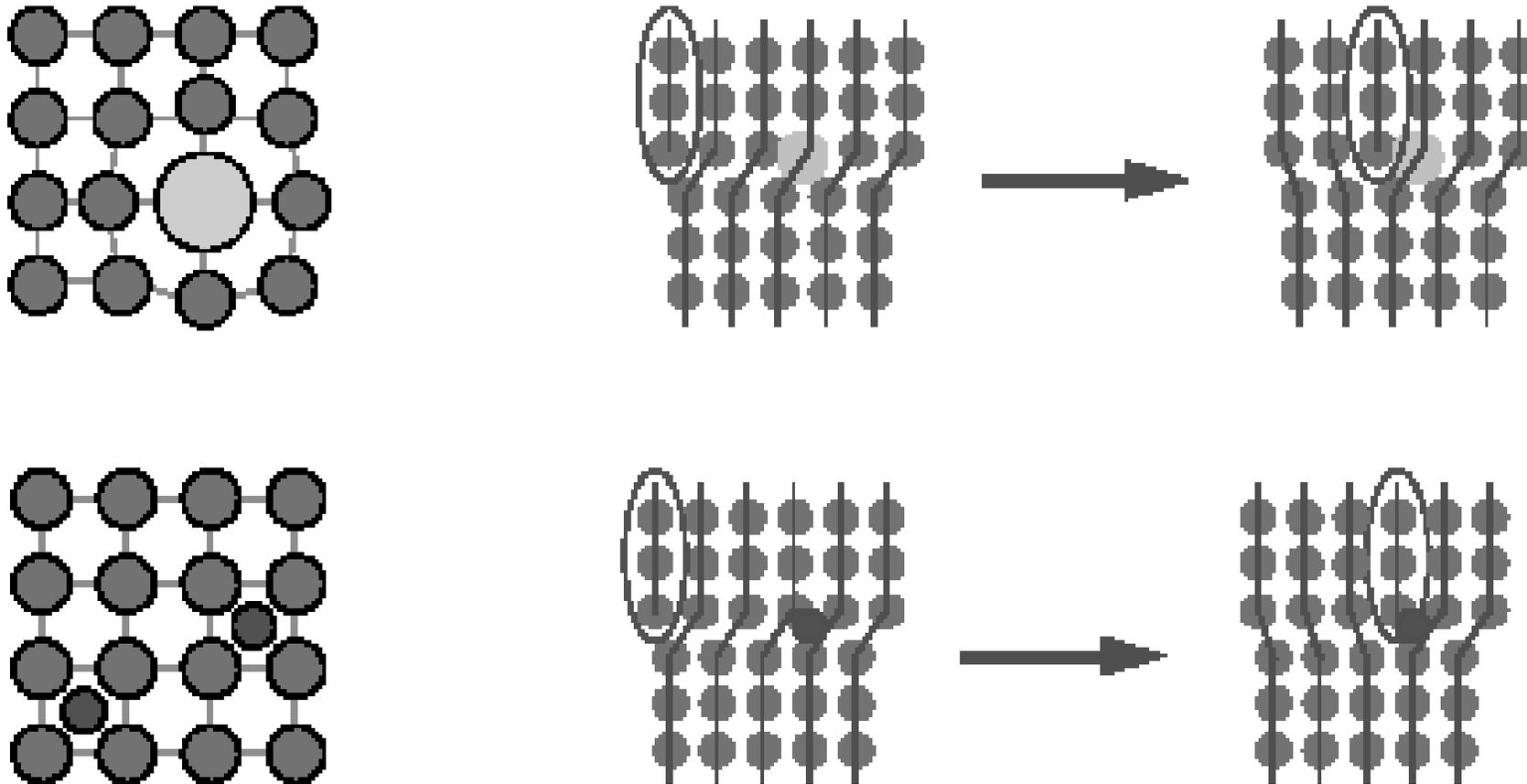
**Solutos Substitucionais:** tendem a se difundir e a se segregar ao redor das discordâncias de maneira a reduzir a energia total



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

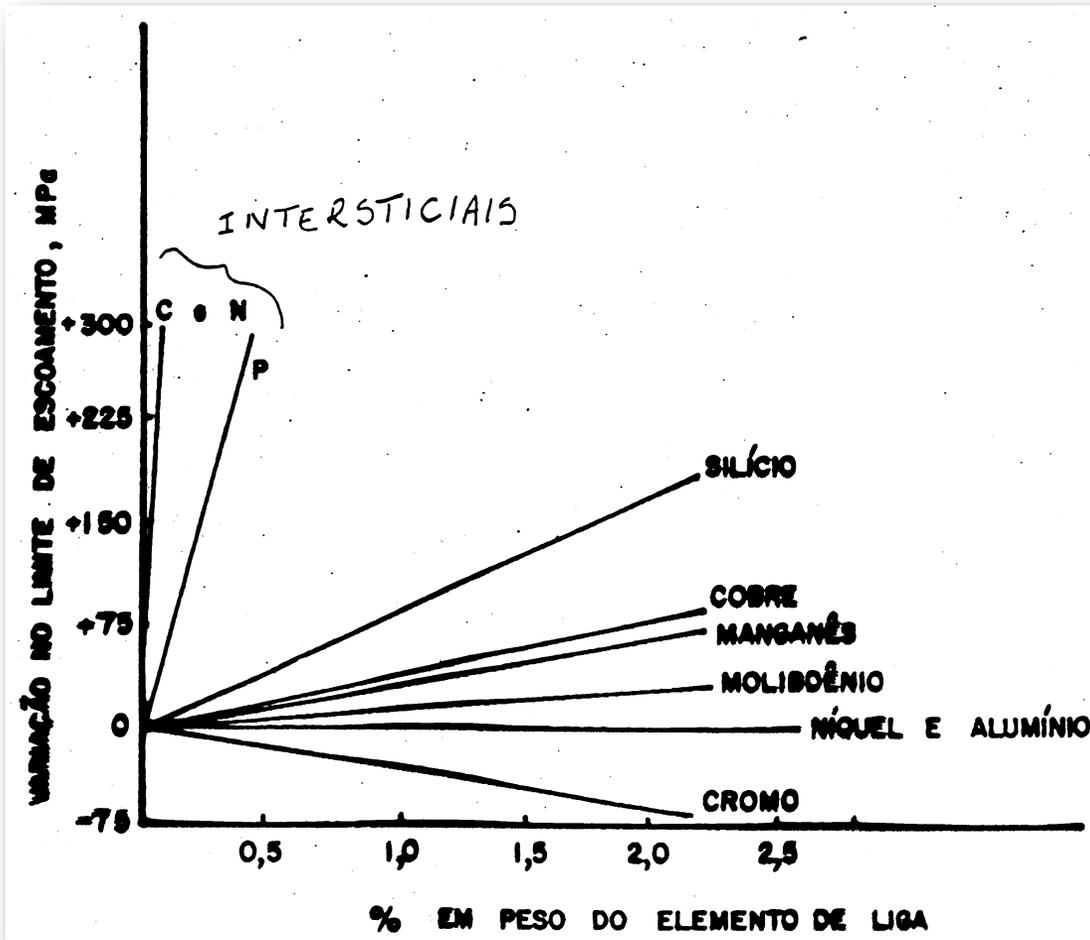
# Formação de Solução Sólida

## Interação dos átomos de soluto com as discordâncias:

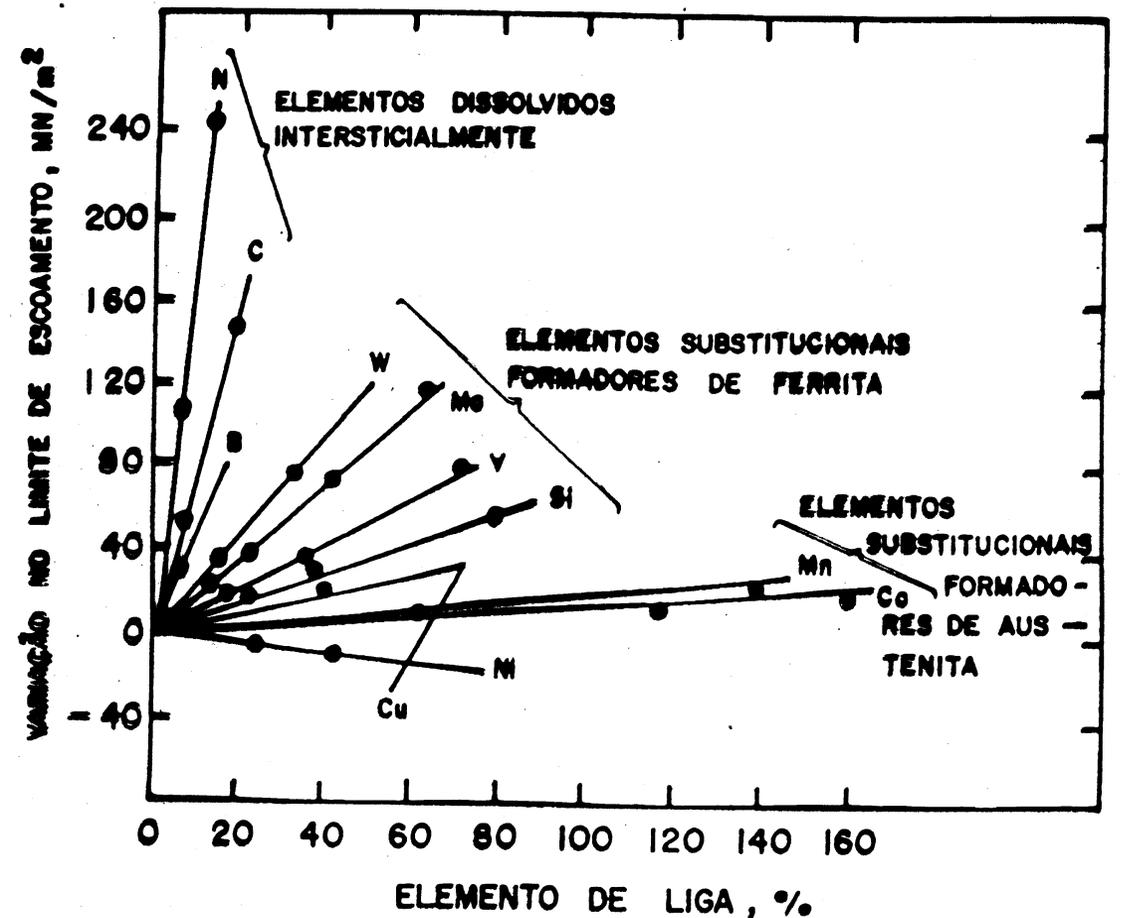


# Formação de Solução Sólida

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

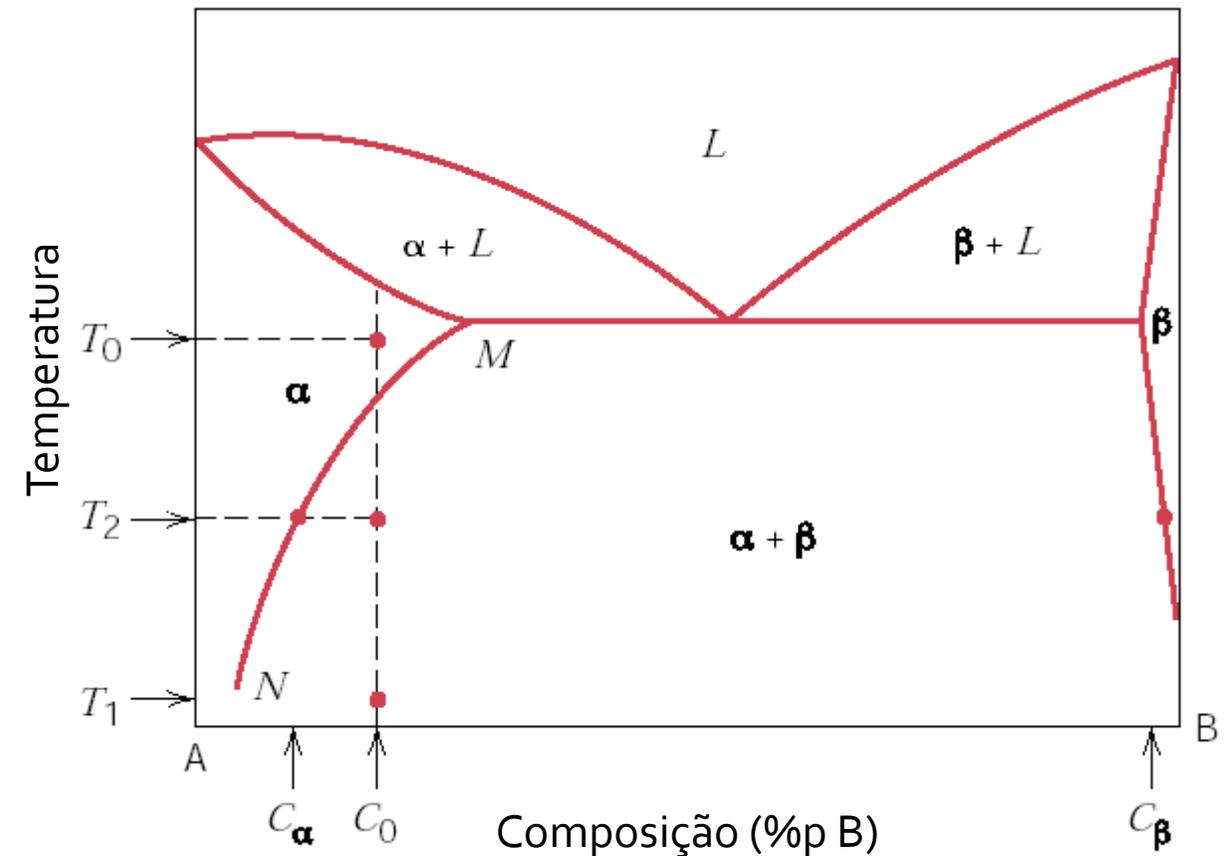
- ✓ O endurecimento por Precipitação é obtido por dois tratamentos térmicos diferentes: **Solubilização e Precipitação**
- ✓ Endurecimento por precipitação é comumente empregado para ligas de alumínio de alta resistência;
  - ✓ Mais extensivamente utilizado para ligas de Al-Cu;
- ✓ Superligas de níquel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

# Solubilização e Precipitação

## Características obrigatórias para que ocorra o Endurecimento por Precipitação

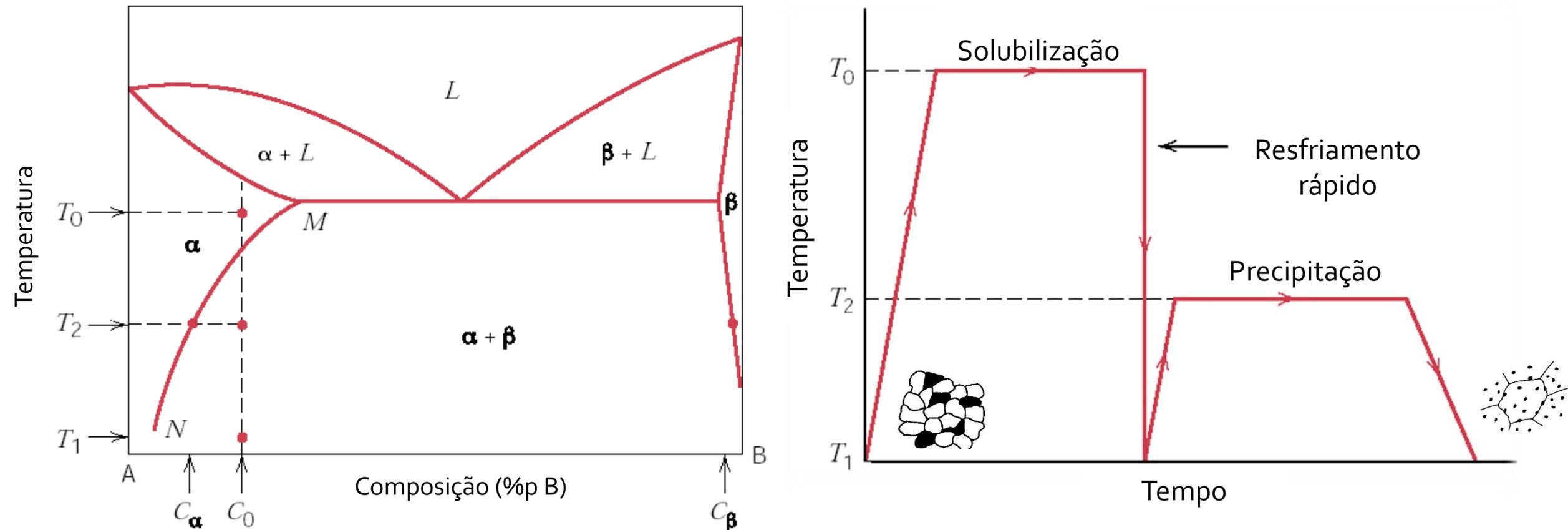
Adaptado de Callister, W.D. Materials Science and Engineering: An Introduction. 7th Ed. Wiley.

- ✓ 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.

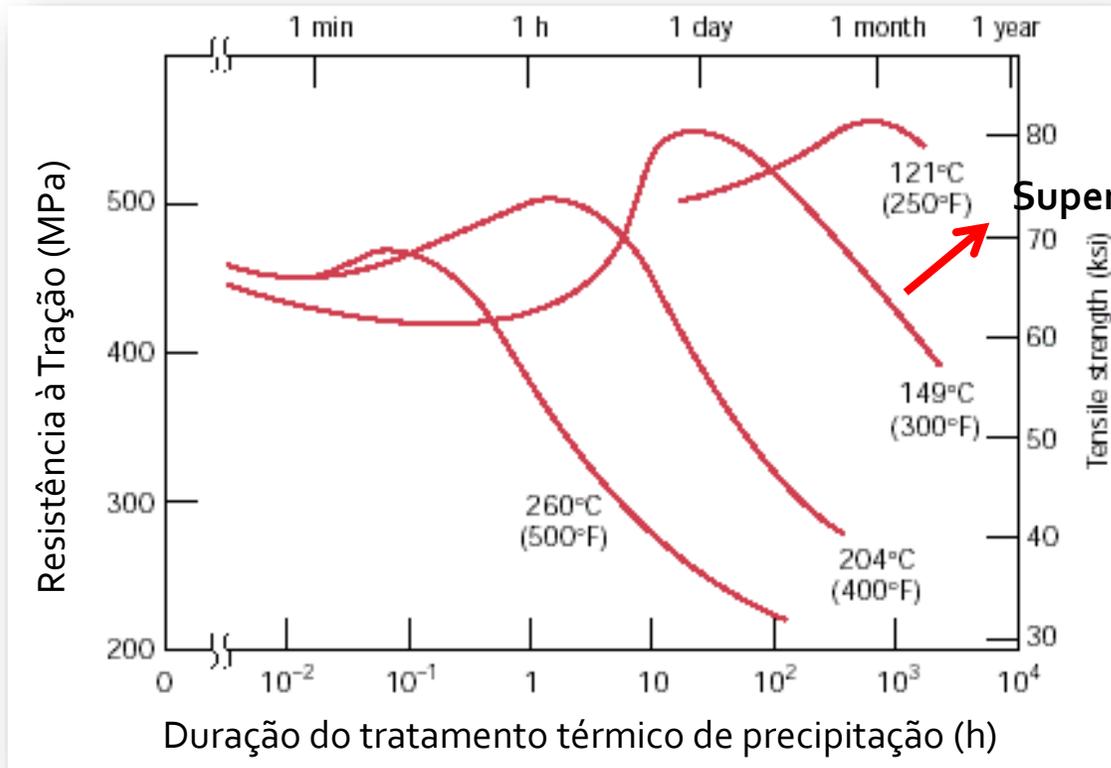


Adaptado de Callister, W.D. Materials Science and Engineering: An Introduction. 7th Ed. Wiley.

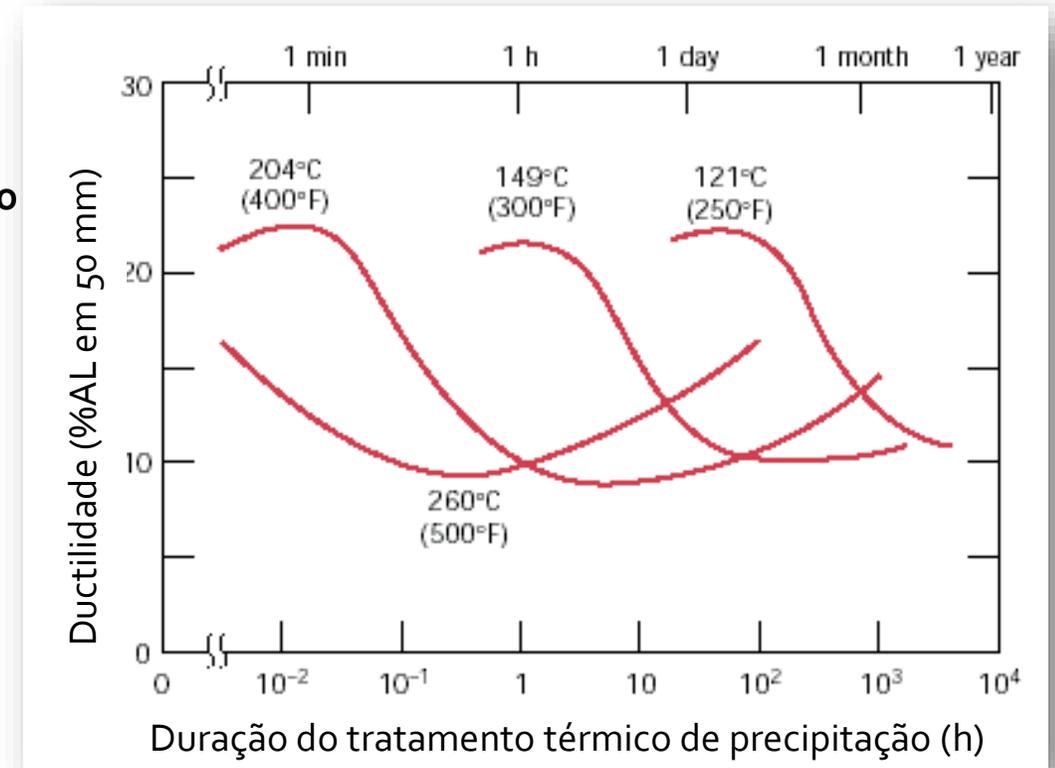
# Solubilização e Precipitação

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.



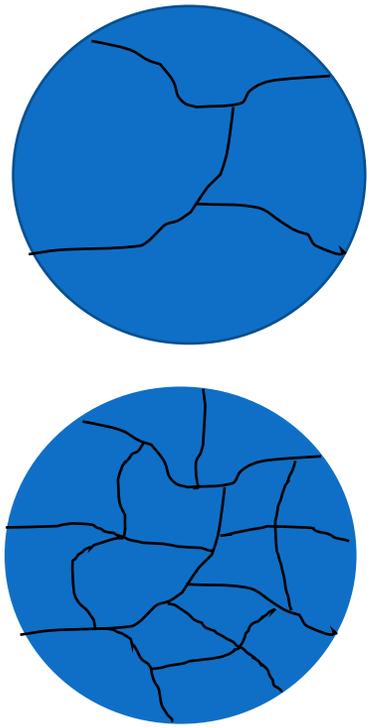
Limite de Resistência à Tração



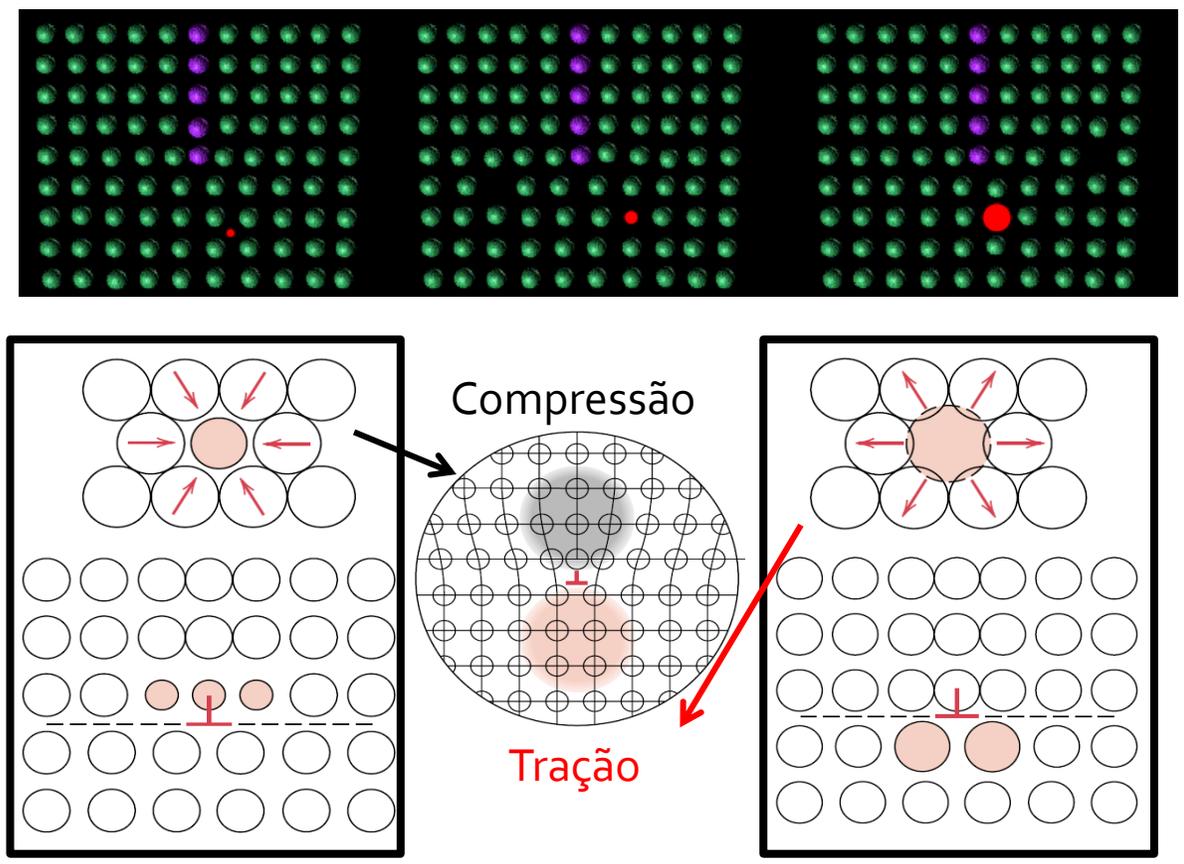
Ductilidade (%AL)

# Resumo da Aula

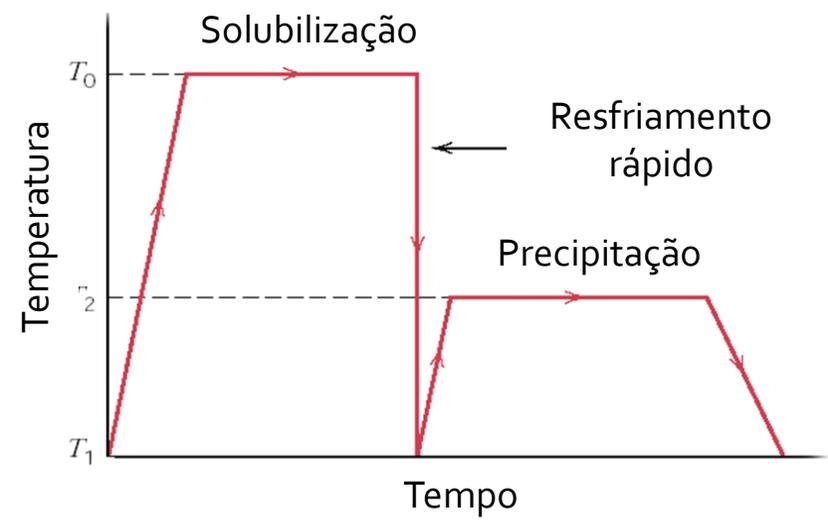
## Redução do Tamanho de Grão



## 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.

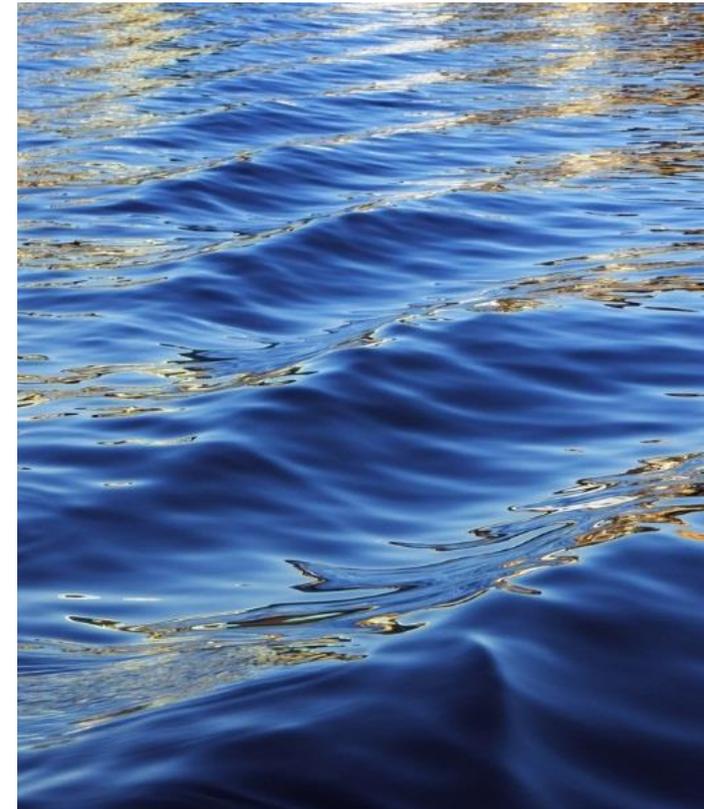


***Muito  
obrigada!***



# Aula 6 – Parte 2 Mecanismos de Endurecimento

Kelly Benini

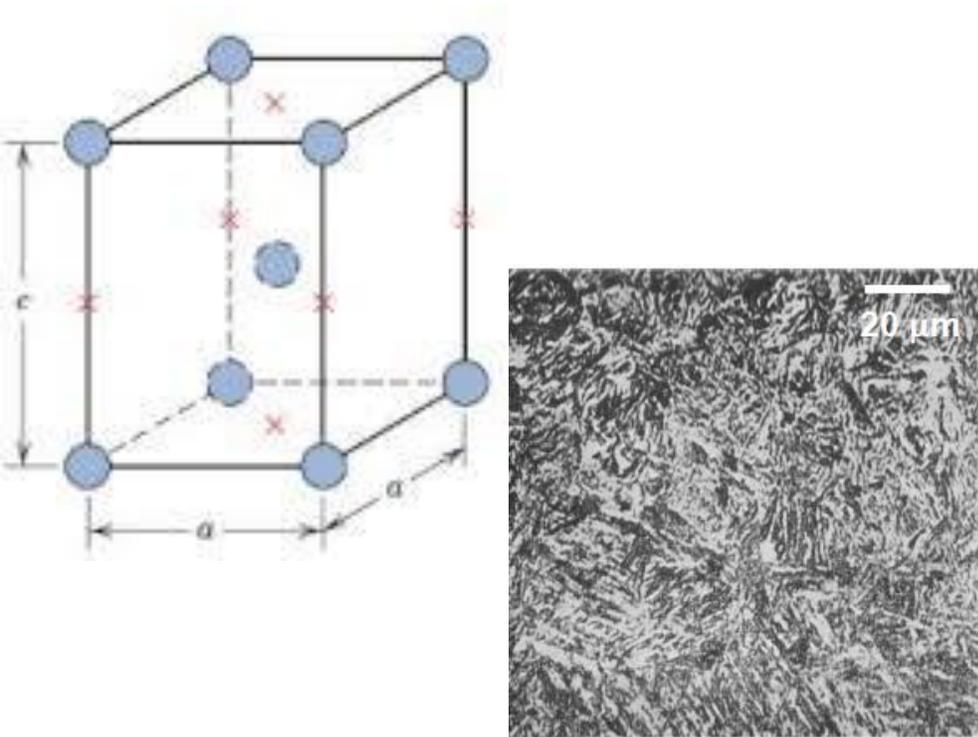


# Mecanismos de Endurecimento

- ✓ 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**.



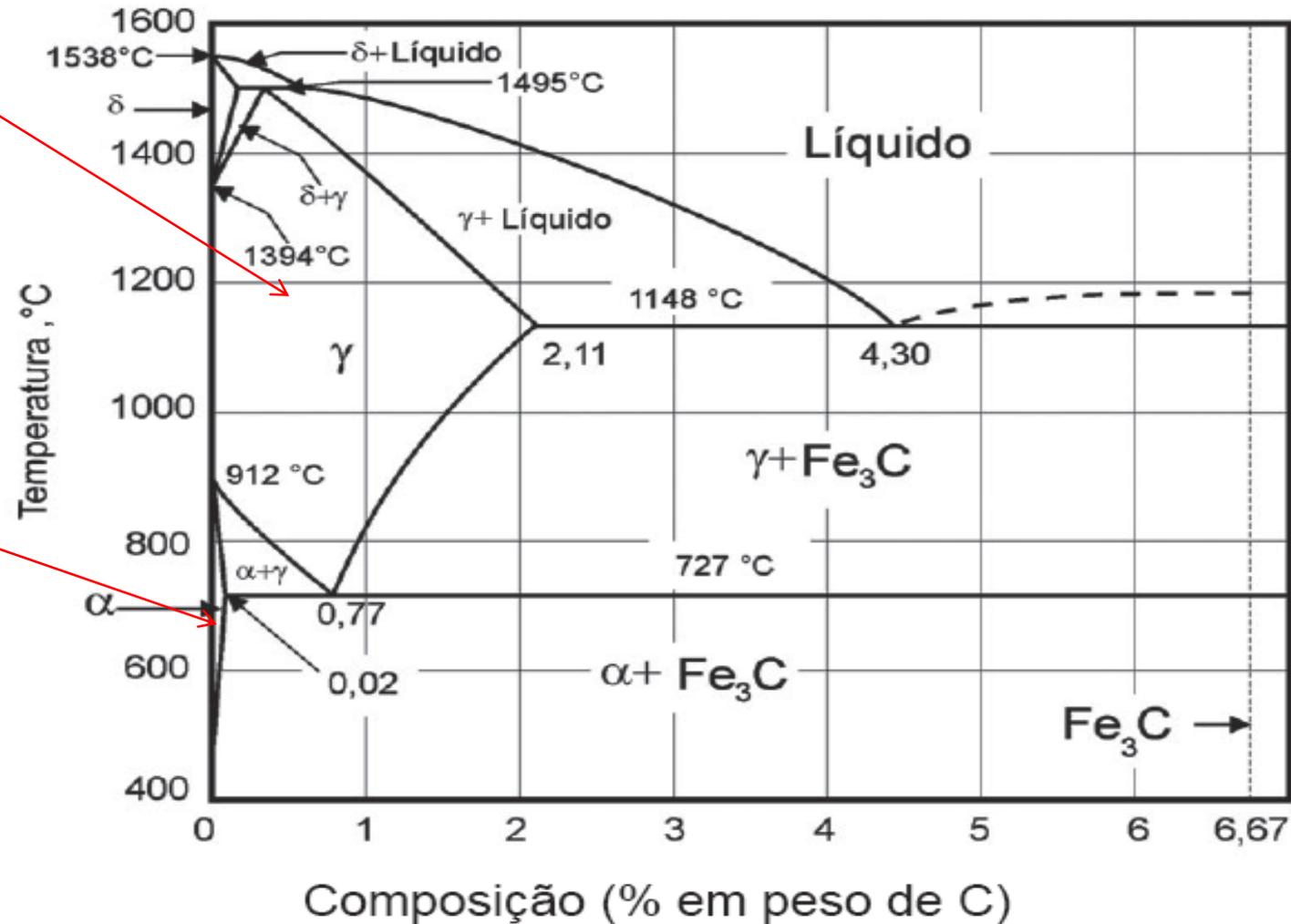
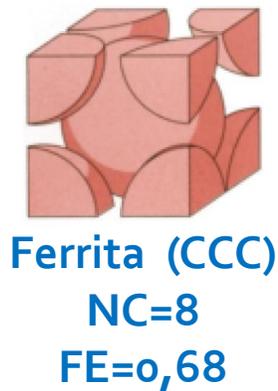
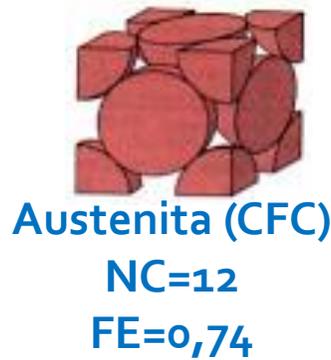
**martensita**

## 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).

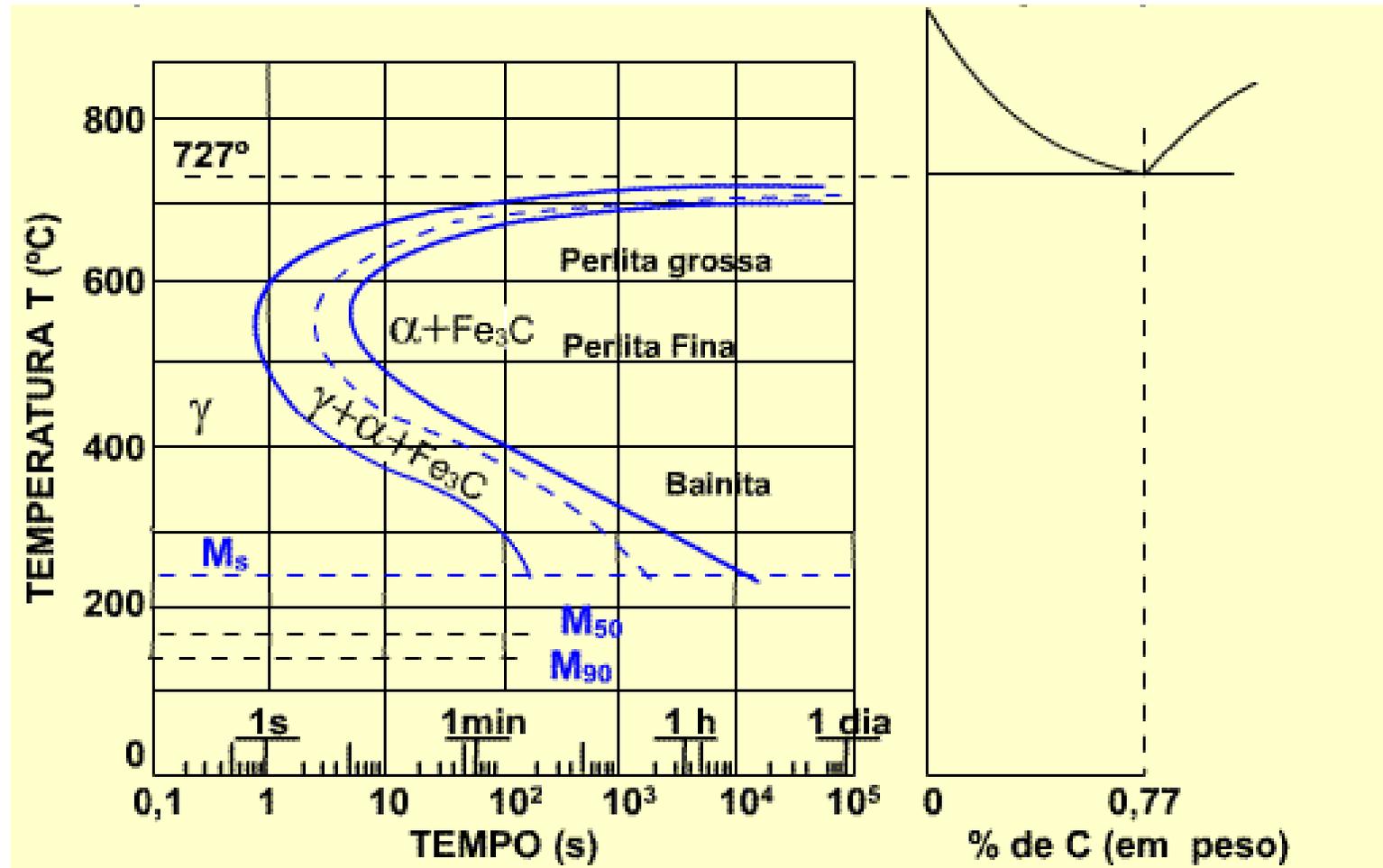
# Transformação de Fases - Têmpera

## Diagrama de fases ferro-carbeto de ferro ( $\text{Fe}_3\text{C}$ )



# 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:

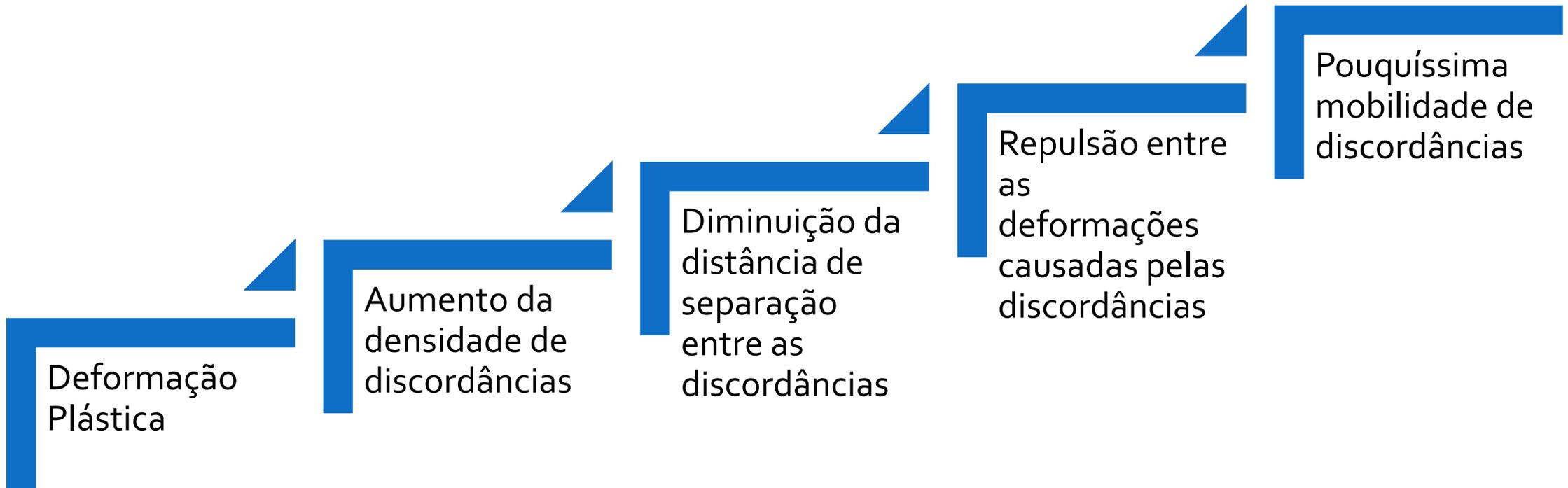
- ✓ Redução de ductilidade;
- ✓ Redução da tenacidade;
- ✓ Aparecimento de tensões internas;
  - ✓ Formação de trincas.

# Mecanismos de Endurecimento

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

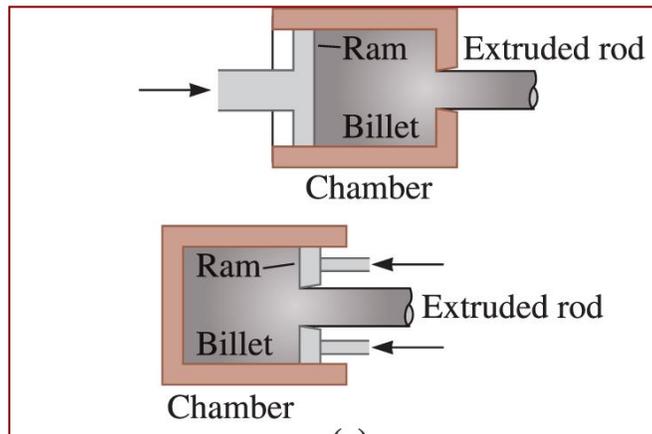
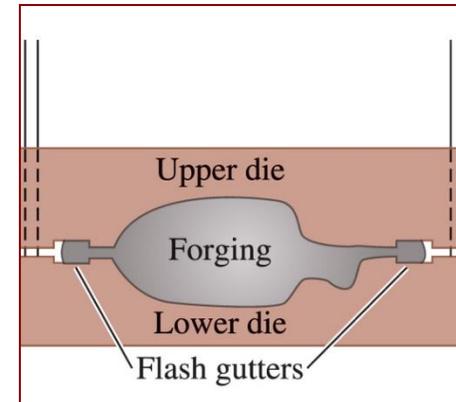
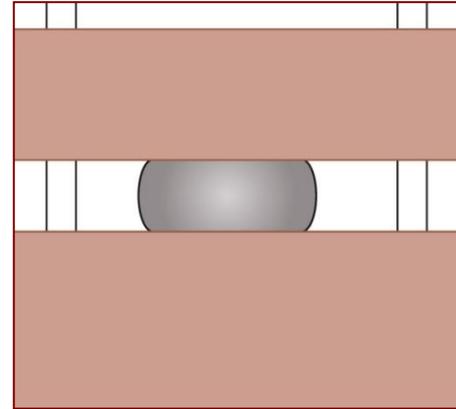
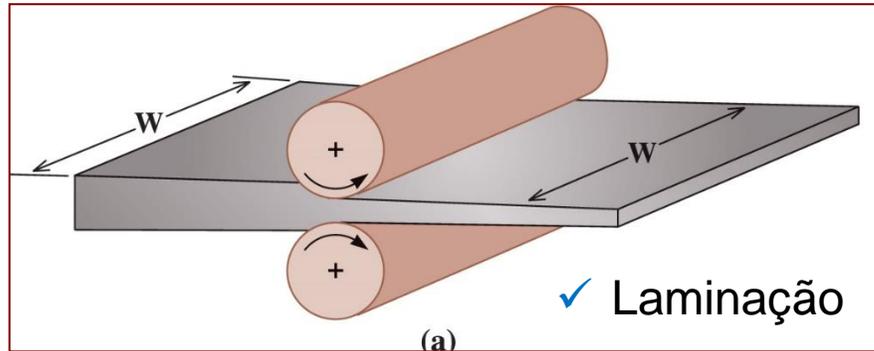
# Encruamento

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

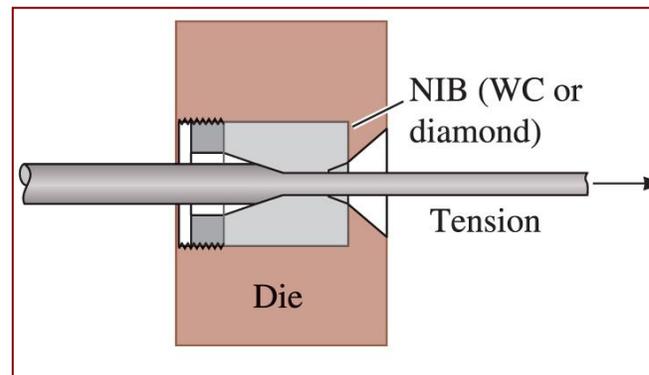


# Encruamento

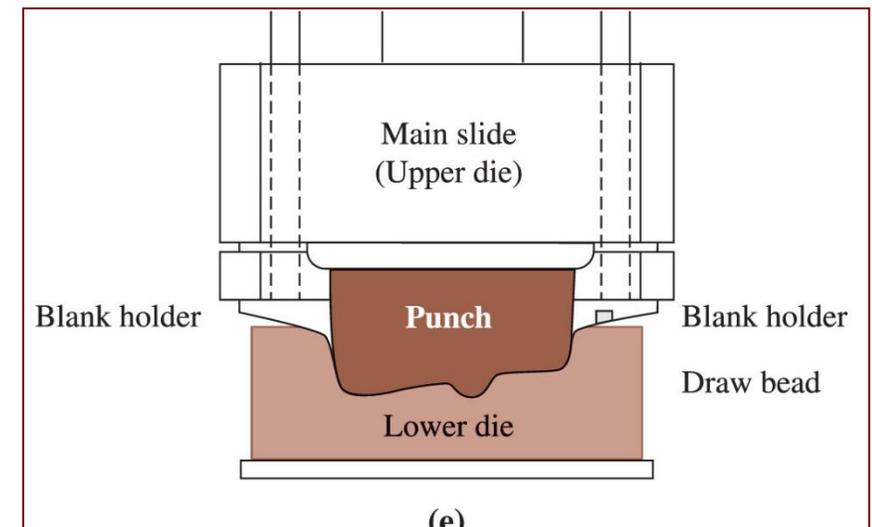
O encruamento é utilizado comercialmente para aumentar as propriedades mecânicas por processos de conformação tais como:



✓ Extrusão Direta ou inversa - perfis

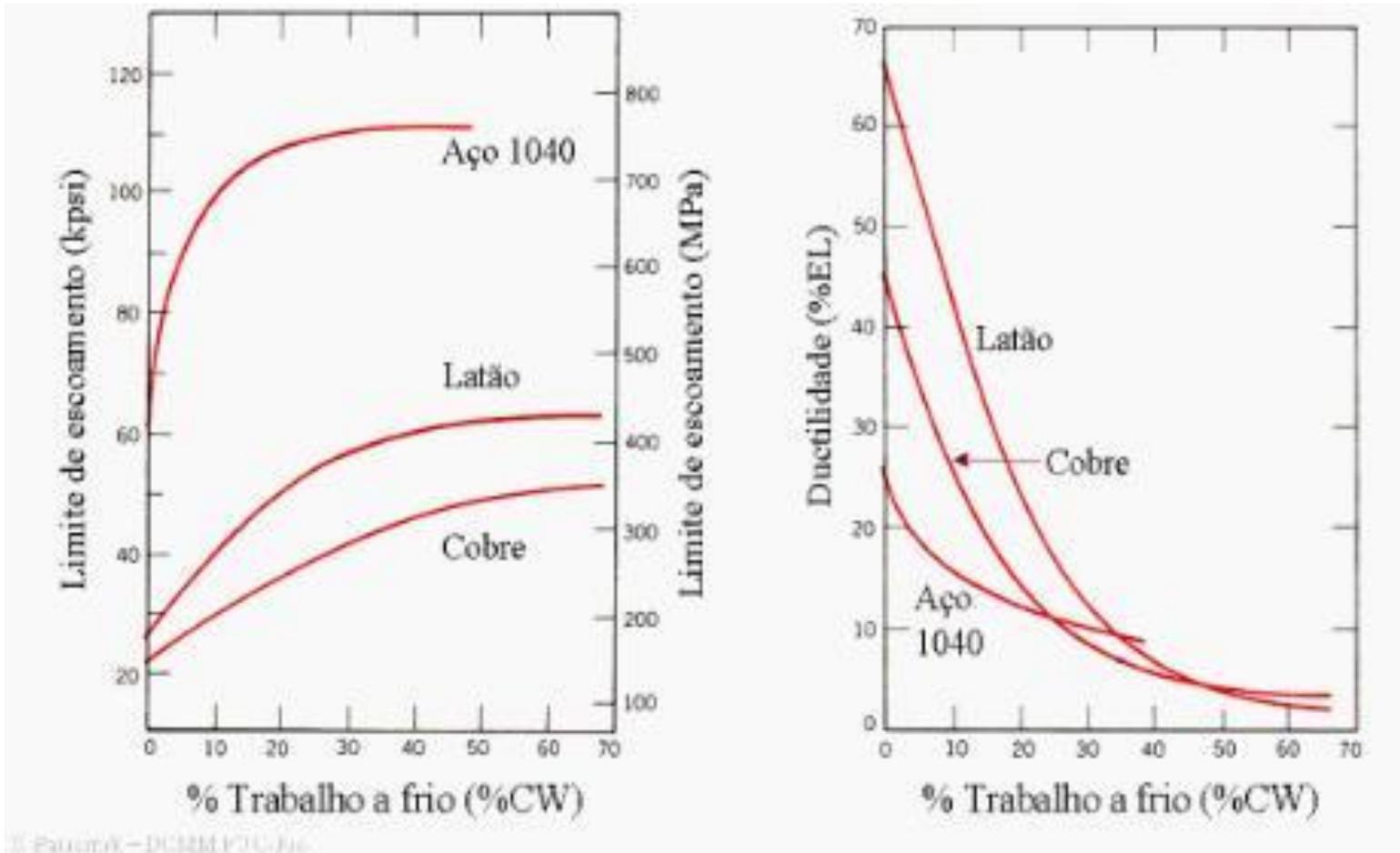


✓ Trefilação de Arames



# 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

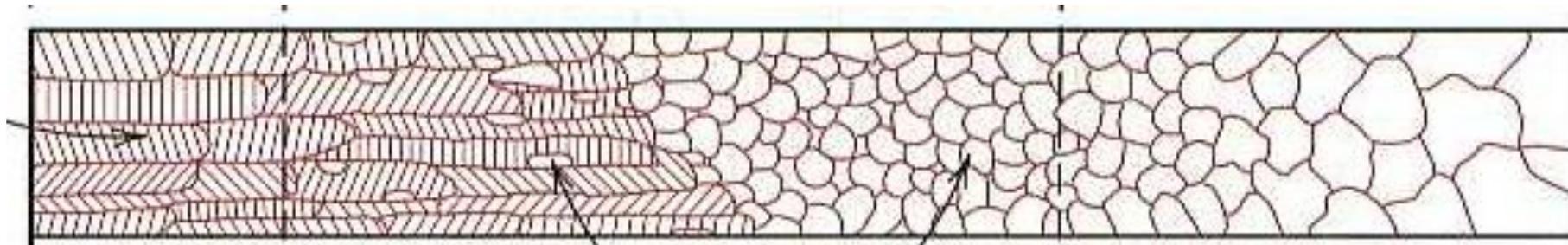
Se os metais deformados plasticamente forem submetidos ao um aquecimento controlado, este aquecimento fará com que haja um rearranjo dos cristais deformados plasticamente, diminuindo a dureza dos mesmos.

# Recozimento para Recristalização

Mecanismo que ocorre no aquecimento de um material encruado

## Estágios do Recozimento:

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



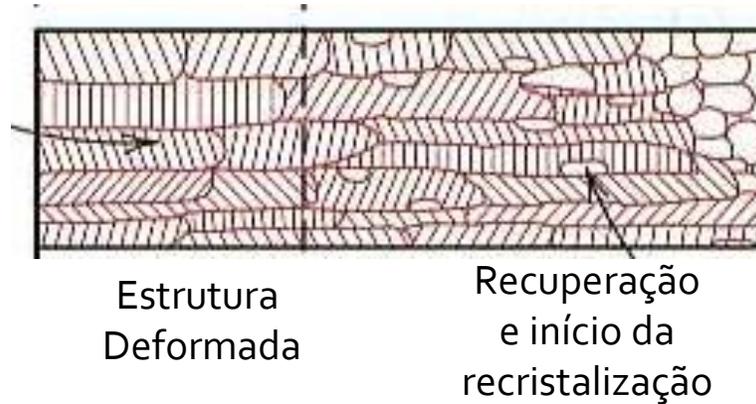
Estrutura  
Deformada

Recuperação  
e início da  
recristalização

Estrutura  
Recristalizada

Crescimento  
de Grão

# Estágios do Recozimento: Recuperação



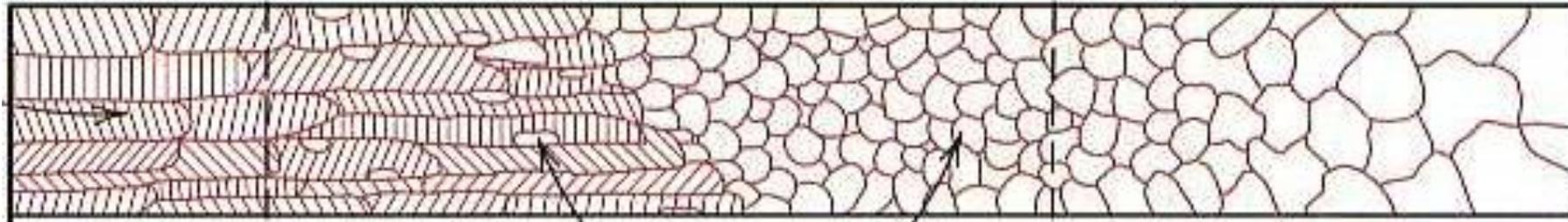
- ✓ Há um alívio das **tensões internas** armazenadas durante a deformação devido ao movimento das discordâncias resultante da difusão atômica;
- ✓ Redução do número de discordâncias e um rearranjo das mesmas;
- ✓ Propriedades físicas como condutividade térmica e elétrica voltam ao seu estado original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

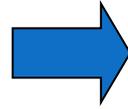
- ✓ Depois da recristalização se o material permanecer por mais tempo em temperaturas elevadas o grão continuará à crescer;
- ✓ Em geral, quanto maior o tamanho de grão mais mole é o material e menor é sua resistência.

# Estágios de Recozimento: Crescimento de Grão

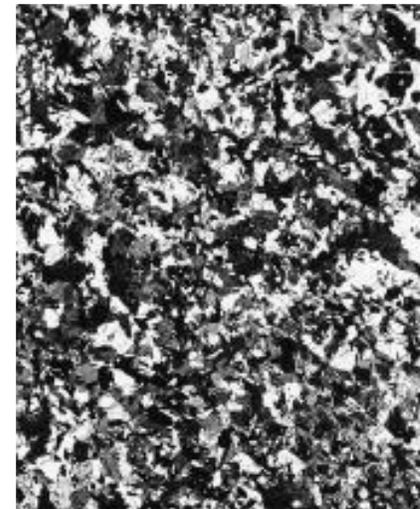
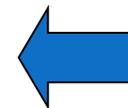
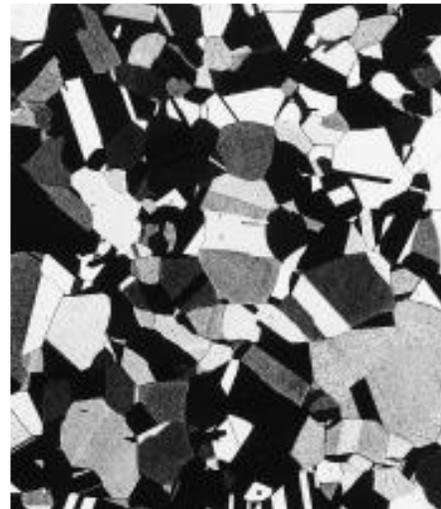
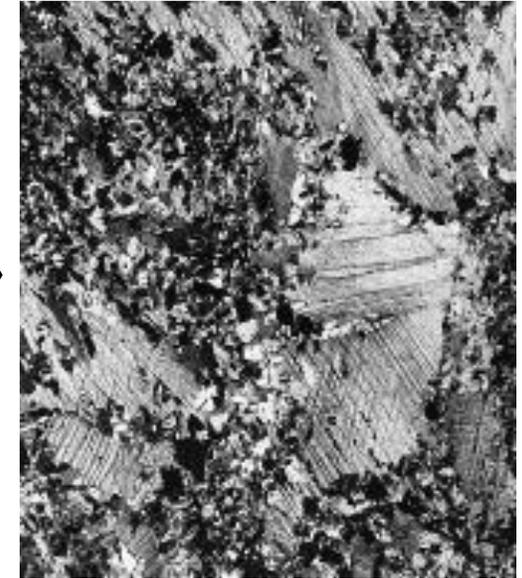
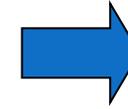
Microestrutura inicial



Após 33% de TF



Recuperação e início da recristalização



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

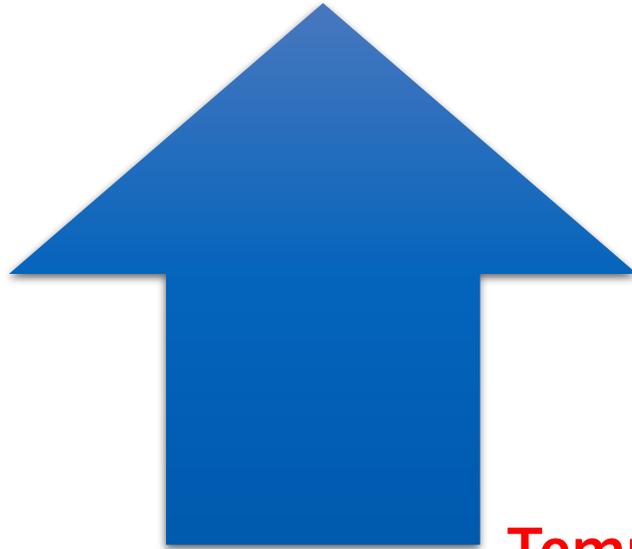
# Temperatura de Recristalização

- ✓ 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

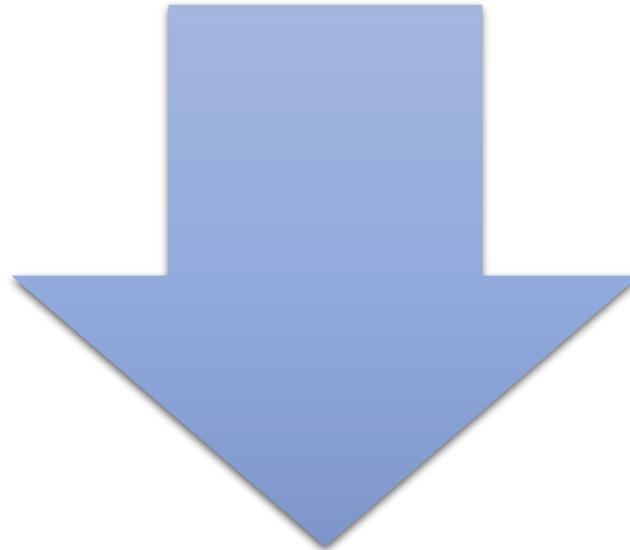
**Temperatura de Recristalização:**  
temperatura na qual a recristalização termina em 1 hora.

# 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

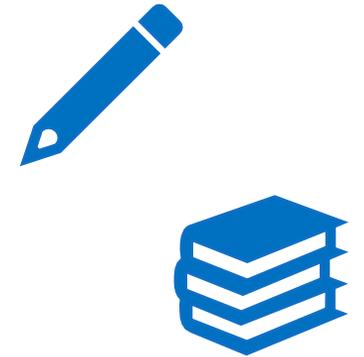
- ✓ Aumenta a dureza e a resistência dos materiais, mas a ductilidade diminui;
- ✓ Permite a obtenção de dimensões dentro de tolerâncias estreitas;
- ✓ Produz melhor acabamento superficial.

# 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!***