



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Unidade 10

Propriedades Mecânicas II

Controle de Propriedades por meio do Controle da Microestrutura

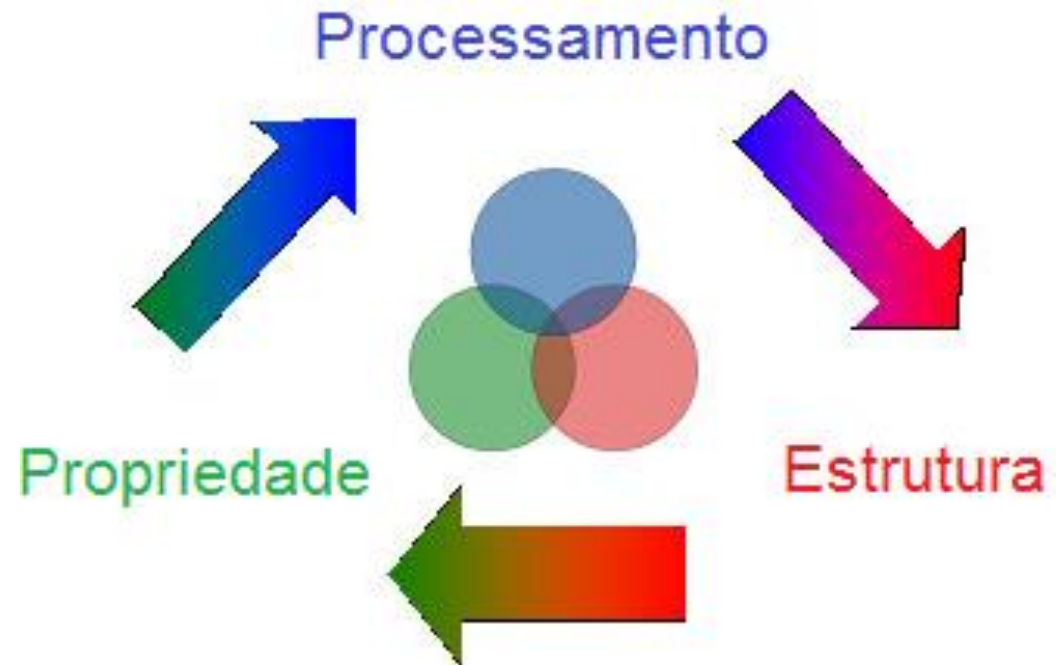
PMT 3100 - Fundamentos de Ciência e Engenharia dos Materiais
1º semestre de 2017

Mecanismos de Controle da Microestrutura

- Na primeira Unidade do nosso curso, foi dada a seguinte definição de Engenharia dos Materiais :

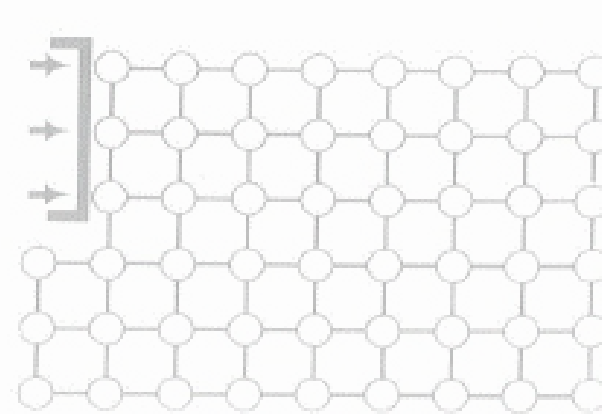
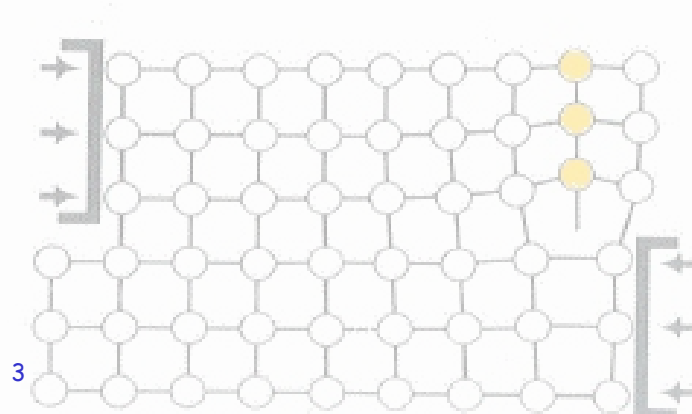
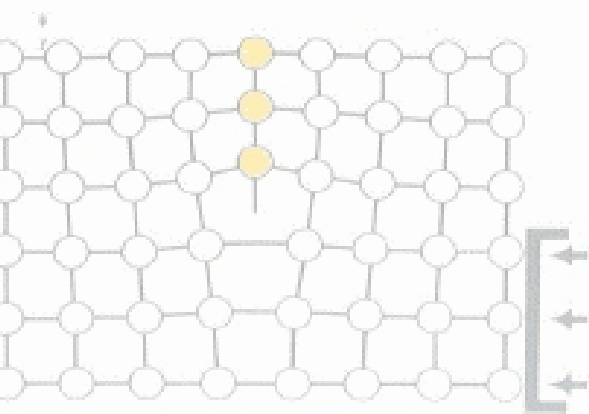
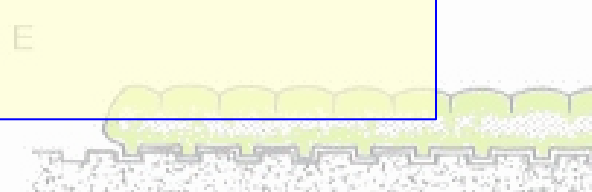
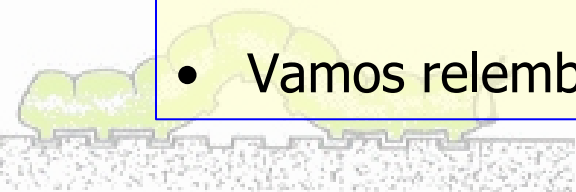
"Projeto, desenvolvimento e/ou aperfeiçoamento de técnicas de processamento de materiais, com base nas relações entre composição/estrutura e propriedades, visando um desempenho desejado".

- Nesta Unidade serão apresentadas algumas estratégias empregadas para conseguir controlar propriedades mecânicas de materiais por meio de técnicas de processamento capazes de alterar as suas microestruturas.



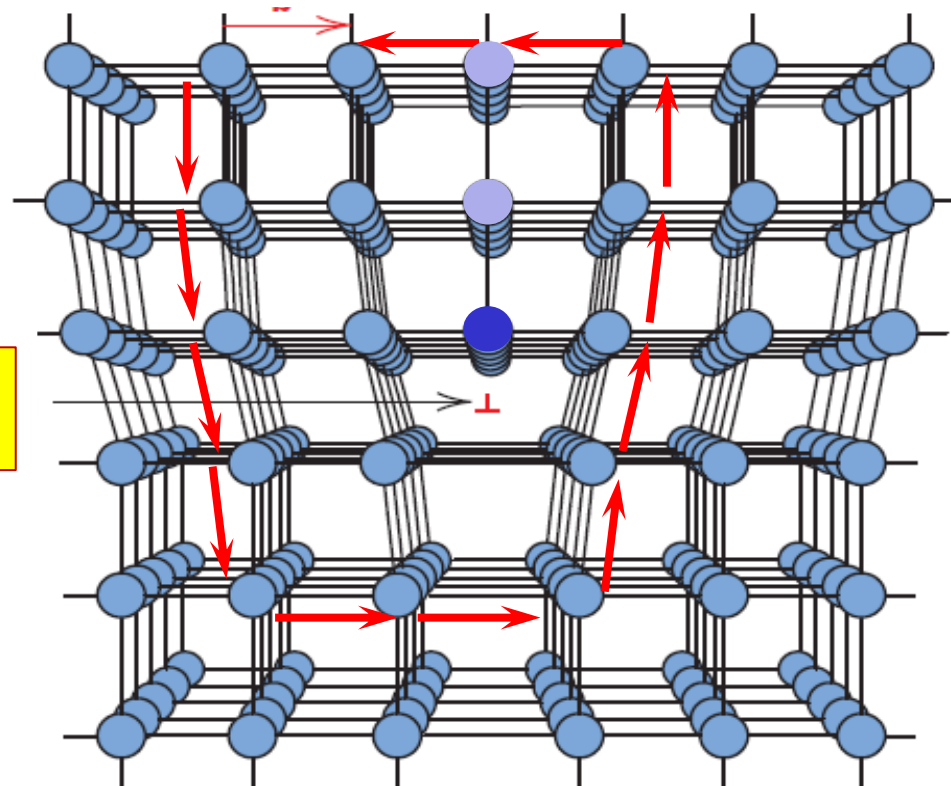
Mecanismos de Controle da Microestrutura Materiais Metálicos

- ✓ Na Unidade do nosso curso que tratou de defeitos cristalinos, foi dito que a existência de discordâncias é fundamental para a explicação do fato de que os metais deformam plasticamente em tensões muito inferiores às tensões teóricas calculadas a partir das suas energias de ligação.
- Vamos relembrar o conceito de discordância...

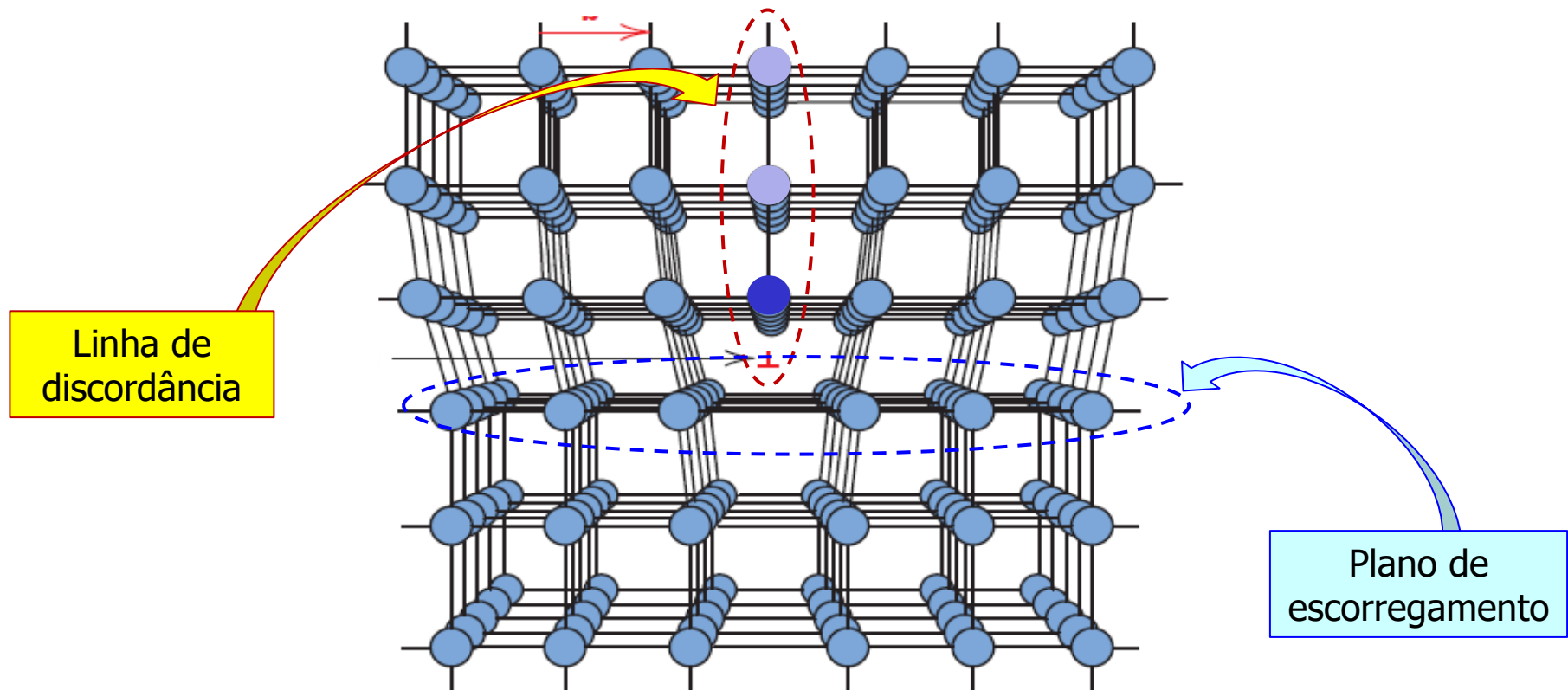


...para lembrar: DISCORDÂNCIA EM CUNHA ("*edge dislocation*")

Linha de
discordância

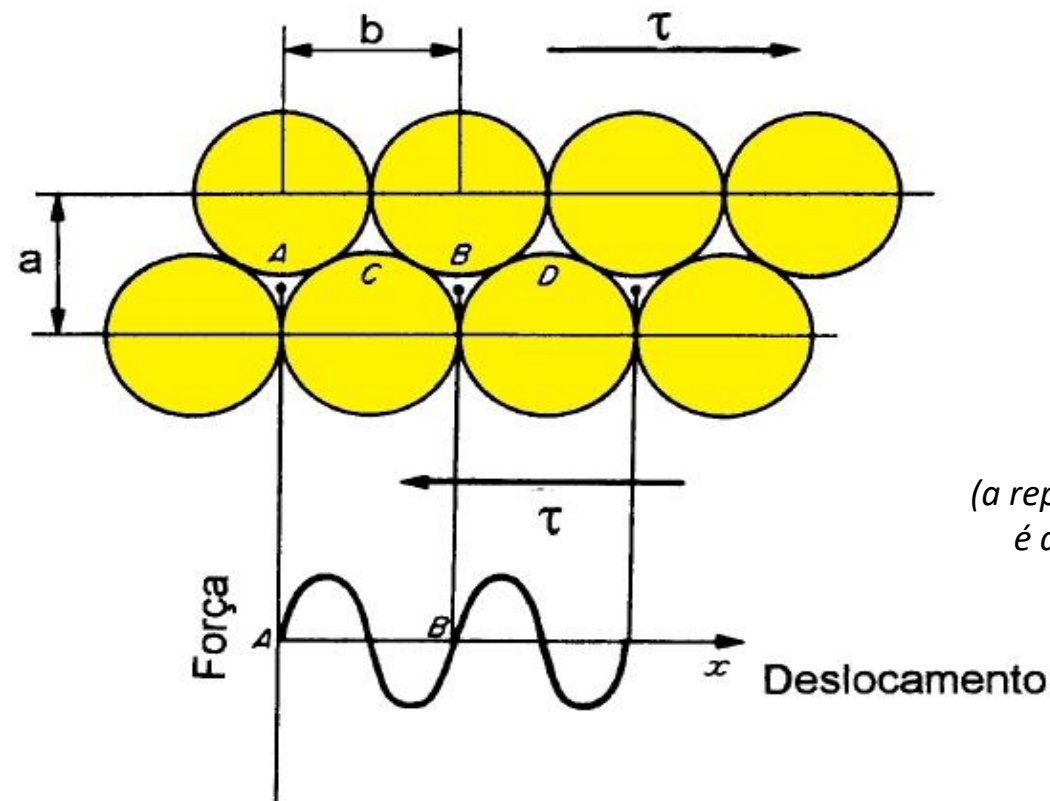


...para lembrar: DISCORDÂNCIA EM CUNHA ("*edge dislocation*")



Introdução histórica ao conceito de discordância

A deformação plástica ou permanente de um cristal perfeito (isento de defeitos cristalinos) pode ocorrer pelo deslocamento de planos de átomos em relação aos planos paralelos adjacentes. Em princípio, o deslocamento do plano deve ocorrer por meio do movimento simultâneo e cooperativo de todos os átomos (do plano que está deslizando) de uma posição atômica de equilíbrio para a posição vizinha, conforme ilustra a figura 9.1.



(a representação esquemática é de um cristal metálico)

Figura 9.1 — Deformação plástica de um cristal perfeito.

A **tensão de cisalhamento ou cisalhante** necessária para que o processo da figura 9.1 ocorra foi calculada pela primeira vez em 1926 por J. Frenkel. A análise de Frenkel leva à uma tensão teórica cisalhante máxima:

$$\tau_t = \frac{b}{a} \frac{G}{2\pi}$$

onde

G é o módulo de cisalhamento e
 a e b estão definidos na figura.

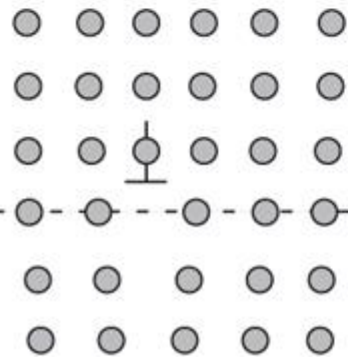
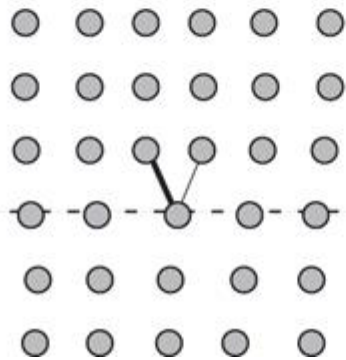
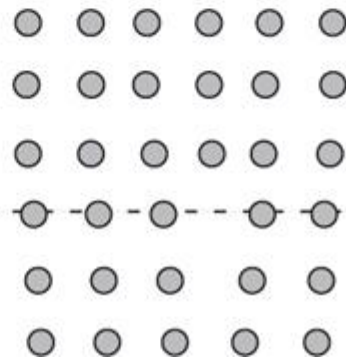
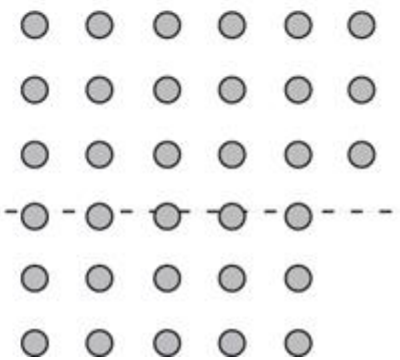
...ESTE É O PONTO IMPORTANTE !!

Supondo-se $b = a$ e assumindo-se o valor de 80650 N/mm² para o módulo de cisalhamento do ferro puro, obtém-se um valor de $\tau_t = 12836$ N/mm² para o referido metal. Embora este cálculo seja aproximado, **o valor medido experimentalmente para a tensão necessária para iniciar a deformação plástica do ferro é várias ordens de grandeza menor.** Por exemplo, os aços de construção civil utilizados hoje em dia, que são aços relativamente simples e baratos, têm limite de escoamento (limite elástico) cerca de 1/20 do valor calculado acima. O limite de escoamento de cristais de ferro de alta pureza é da ordem de 10 N/mm². **De um modo geral, os cristais reais começam a deformar-se plasticamente em tensões entre 1/1000 e 1/10000 da tensão teórica calculada por Frenkel.**

A conclusão inevitável da comparação do valor da tensão calculado por Frenkel com os valores medidos experimentalmente é que o modelo de deformação plástica considerado por Frenkel não reflete o comportamento dos cristais reais. Por exemplo, os cristais reais contêm defeitos que reduzem a sua resistência mecânica. Já em 1921, o inglês A.A. Griffith havia postulado a presença de fissuras microscópicas para justificar a baixa resistência mecânica dos sólidos frágeis (sólidos que pouco se deformam plasticamente, como os vidros). As microfissuras postuladas por Griffith podem ser observadas facilmente nos vidros mas são extremamente raras nos cristais metálicos.

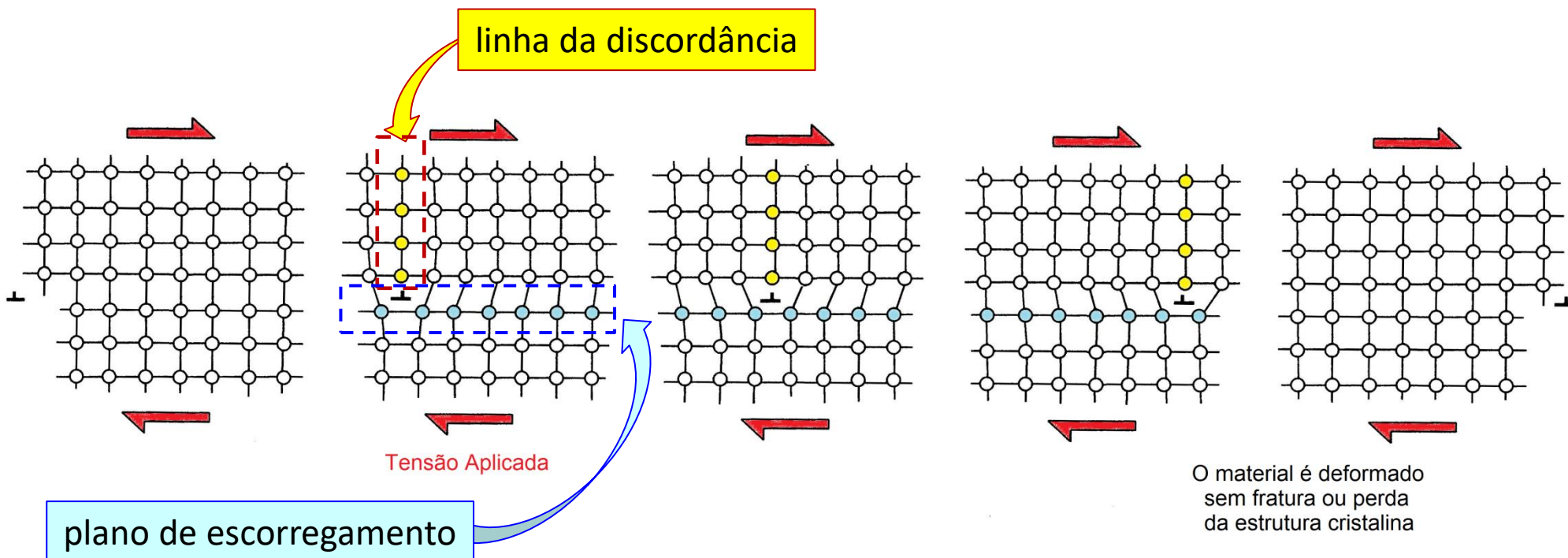
Em 1934, E. Orowan, M. Polanyi e G. I. Taylor propuseram, em trabalhos independentes, a existência de um defeito cristalino linear denominado “Versetzung”, em alemão, por Orowan e Polanyi, e “dislocation”, por Taylor. Este defeito será denominado *discordância* neste texto, embora alguns grupos de pesquisa no Brasil prefiram o termo *deslocação*.

O conceito de discordância, na verdade de *discordância em cunha*, pode justificar a discrepância entre as tensões calculada e medida nos sólidos cristalinos.

**a****b****c****d**

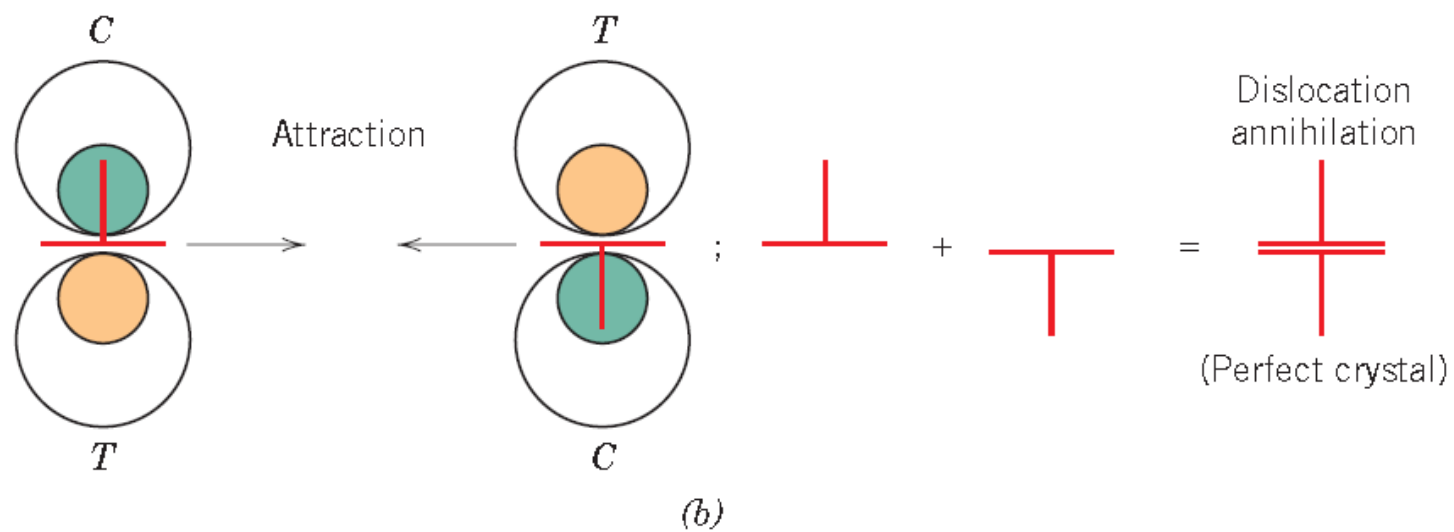
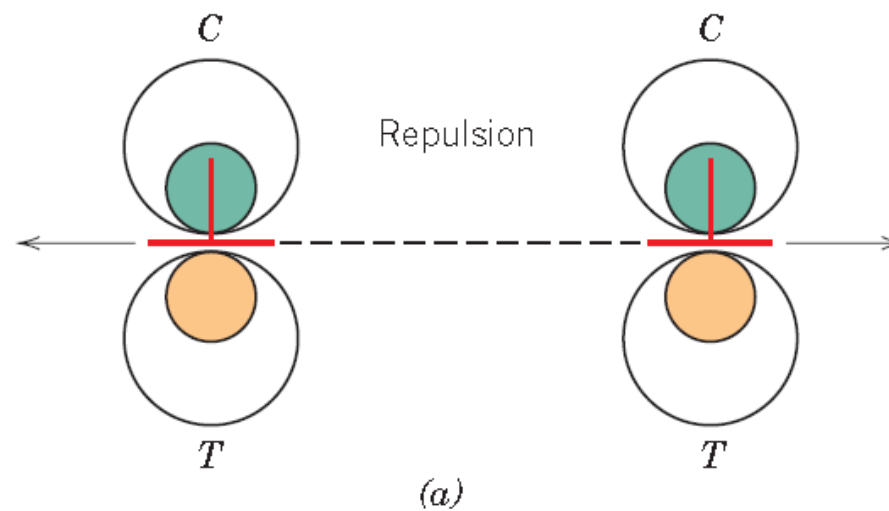
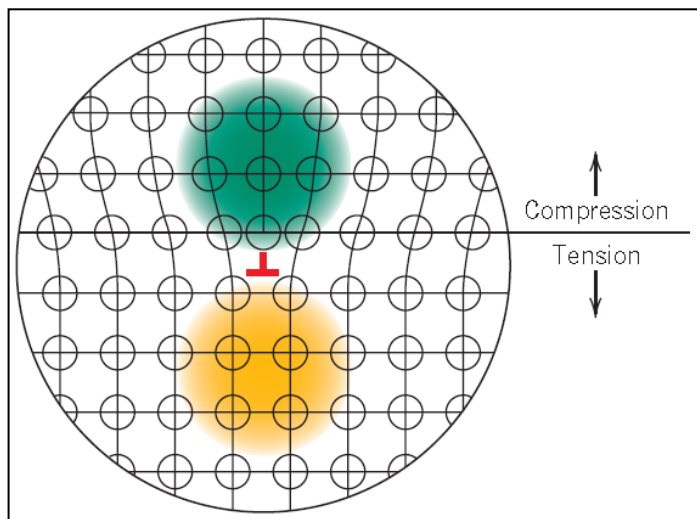
Movimentação de Discordâncias e Deformação Plástica

- A *deformação plástica* ocorre por movimentação das *linhas de discordância*, e também causa *multiplicação* de discordâncias.



...se as discordâncias não se moverem, a deformação plástica não ocorre!

Campos de Tensão e Interações entre Discordâncias



IDEIA CENTRAL

- *Se eu quero controlar propriedades mecânicas:*
- **Identificar o mecanismo** responsável pela deformação plástica (e, em última análise, pela falha...).
 - Nos metais, a deformação plástica nos metais pode ser relacionada à *quantidade* e à *mobilidade* das *discordâncias* existentes.
 - Em vidros, a falha está relacionada à existência e propagação de trincas superficiais.
- Atuar sobre os mecanismos de modo a **dificultar e/ou impedir seus efeitos.**

Mecanismos de Controle da Microestrutura

Materiais Metálicos

- Vários métodos existem para modificar propriedades mecânicas tais como a **resistência ao escoamento** (*"yield strenght"*), a **ductilidade** (*"ductitlity"*), a **tenacidade** (*"toughness"*) e a **dureza** (*"hardness"*) dos materiais.
- A **deformação plástica** nos metais pode ser relacionada à **quantidade** e à **mobilidade** das **discordâncias** existentes.
- Assim sendo, no caso dos materiais metálicos, a maioria dos métodos para modificar propriedades mecânicas atua no sentido de facilitar ou de dificultar/impedir o movimento das discordâncias:
 - ...se o método tende a **facilitar o movimento das discordâncias** → aumenta possibilidade de deformação plástica → aumenta ductilidade → diminui resistência ao escoamento e dureza.
 - ... se o método tende a **dificultar/impedir o movimento das discordâncias** → diminui ductilidade → aumenta resistência a escoamento → aumenta dureza.

Mecanismos de Endurecimento em METAIS e LIGAS METÁLICAS MONOFÁSICAS

- **Restringir ou dificultar a movimentação das discordâncias torna os metais mais resistentes à deformação plástica, mais duros e menos dúcteis.**
 - ✓ Endurecimento por **deformação plástica (ENCRUAMENTO)** (“*strain hardening*”, “*work hardening*” ou “*cold work*”)
 - ✓ Endurecimento **por diminuição (REFINO) do tamanho de grão** (“*strengthening by grain size reduction*”)
 - ✓ Endurecimento por **SOLUÇÃO SÓLIDA** (“*solid solution strengthening*”)
 - ✓ Endurecimento por **PRECIPITAÇÃO** ou **DISPERSÃO**
 - ✓ Tratamentos Térmicos Específicos para Desenvolvimento de Microestruturas → exemplo: **TÊMPERA** em aços

Endurecimento em Metais: Encruamento

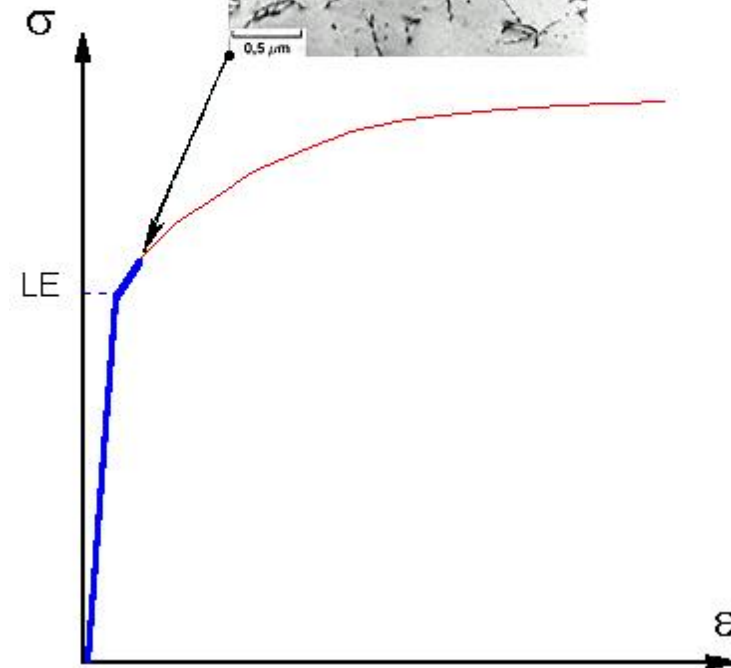
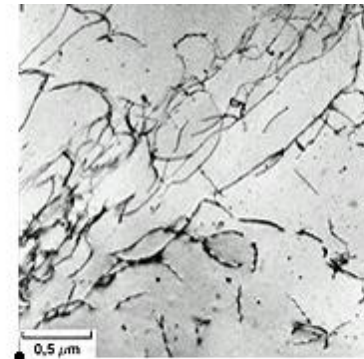
- O *endurecimento por deformação* ou *encruamento* é o mais utilizado dentre os mecanismos de endurecimento, pois praticamente todo metal ou liga pode ser submetido a este tipo de endurecimento.
- Este foi provavelmente o primeiro mecanismo de endurecimento observado pelo homem.
- Vannoccio Biringuccio, no seu livro *De La Pirotechnia* (considerado o primeiro livro tratando de Metalurgia impresso no mundo, em 1540, em Veneza), já mencionava que os metais ao serem deformados tornavam-se mais resistentes à uma deformação posterior. Em outras palavras, *eles endureciam por deformação*.



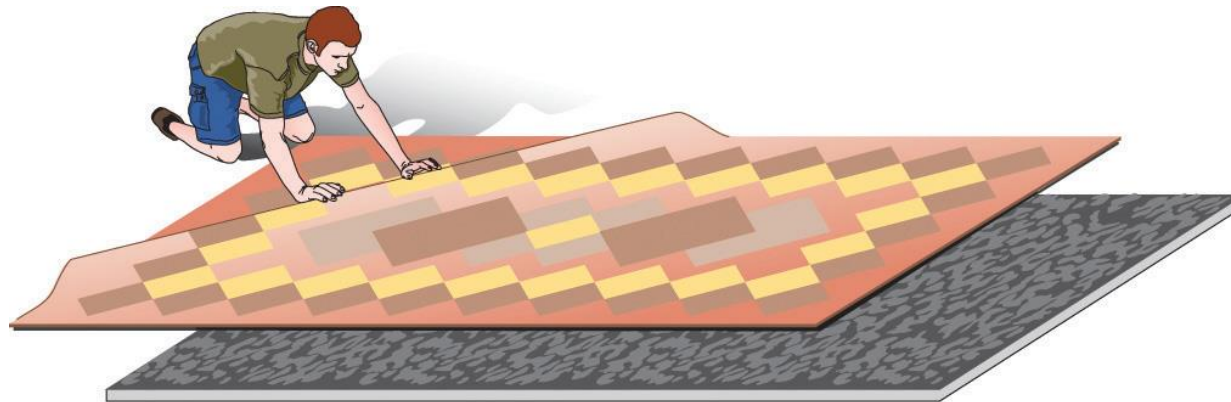
Endurecimento em Metais: Encruamento

- O **encruamento** é o mecanismo pelo qual um metal dúctil se torna mais duro e resistente depois de ter sido **submetido a uma deformação** em uma **temperatura** que pode ser considerada **baixa** em relação à sua temperatura de fusão.
- Durante a deformação plástica, as discordâncias movimentam-se, multiplicam-se, interagem entre si formando “emaranhados”.
- *As discordâncias são obstáculos para o movimento de outras discordâncias...*
- Para que a movimentação das discordâncias continue a ocorrer passa a haver a necessidade de tensões crescentes.

Metal policristalino dúctil
Ferro deformado plasticamente
Densidade de discordâncias :
 $2 \times 10^8 \text{ cm/cm}^3$)



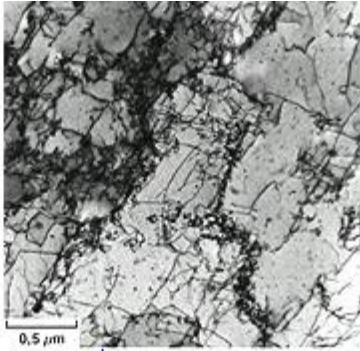
*Movimento
de
discordâncias*



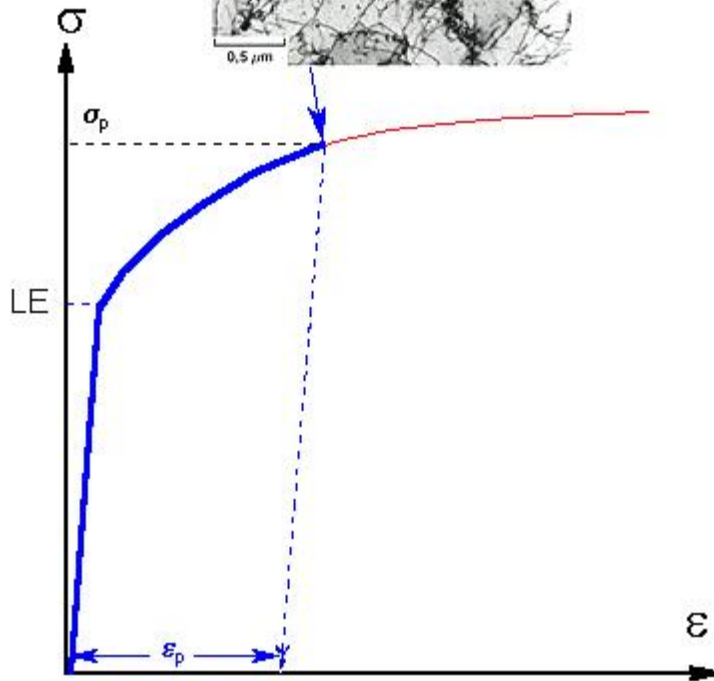
*...as discordâncias
são obstáculo para
o movimento de
outras discordâncias...*



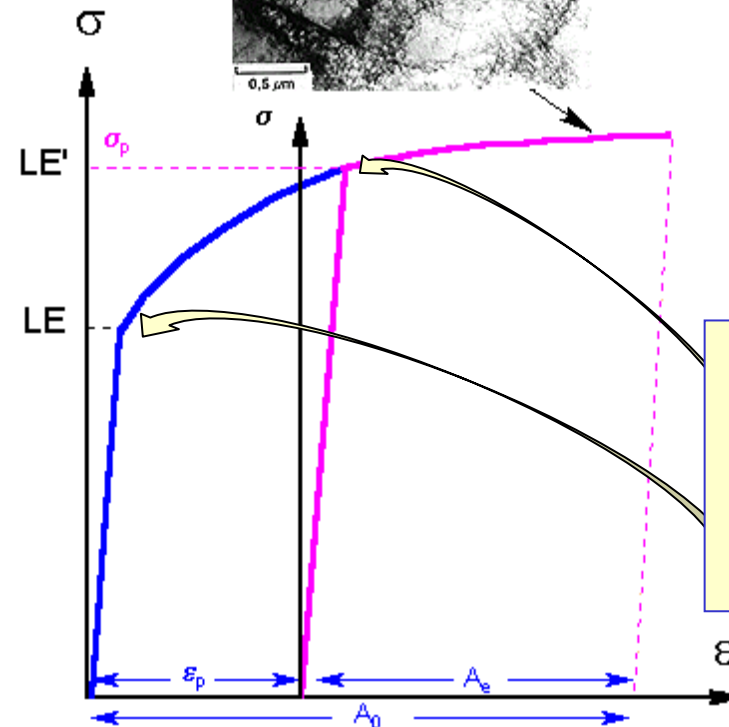
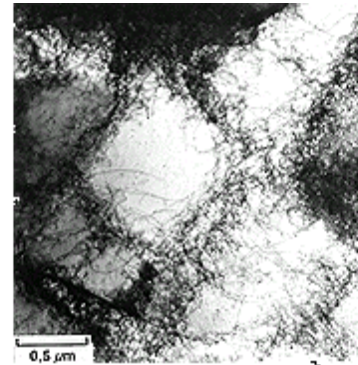
Endurecimento em Metais: Encruamento



Metal policristalino dúctil
Ferro deformado plasticamente
Densidade de discordâncias :
 $2 \times 10^{11} \text{ cm/cm}^3$



Metal policristalino dúctil
Ferro deformado plasticamente
Densidade de discordâncias :
 $2 \times 10^{10} \text{ cm/cm}^3$



A tensão é relaxada e se for novamente aplicada, o limite de escoamento aumentará: passará de LE para LE'

Endurecimento em Metais: Encruamento

- ✓ À medida em que um metal é deformado plasticamente, as discordâncias se movimentam e se multiplicam → a movimentação de discordâncias vai ficando cada vez mais difícil !
- ✓ Essa maior dificuldade faz com que o material fique progressivamente **mais duro** à medida que é deformado → **encruamento**.
- ✓ O aumento da quantidade de discordâncias **não afeta apenas as propriedades mecânicas dos metais**:
 - *Também afeta outras propriedades, como por exemplo **as propriedades elétricas**. Exemplo: no cobre, é observada uma queda de 3% de condutividade elétrica após 97% de deformação plástica.*
- ✓ Esse endurecimento pode ser revertido por meio de um tratamento térmico → **recozimento** (“annealing”).
- ✓ *Esse tratamento térmico de recozimento será discutido em detalhe mais adiante nesta aula...*

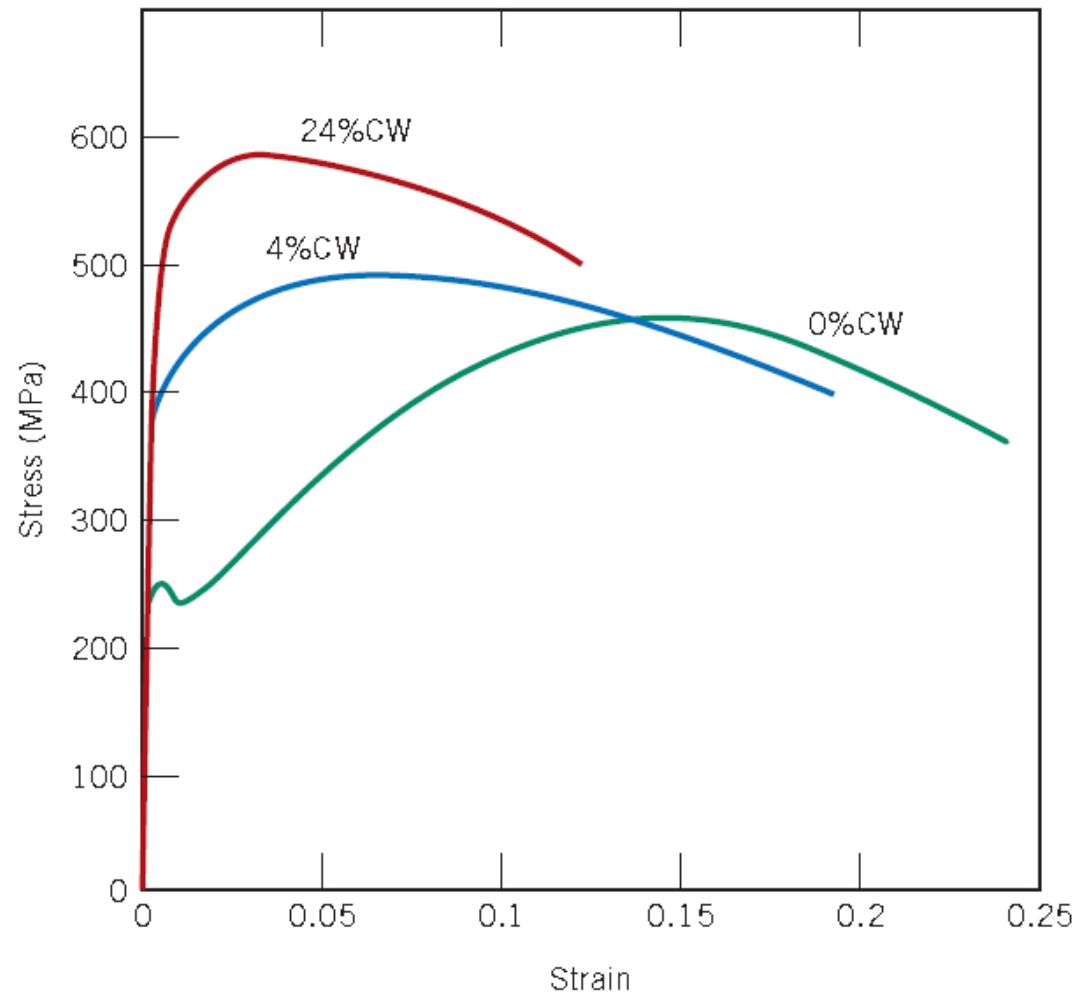
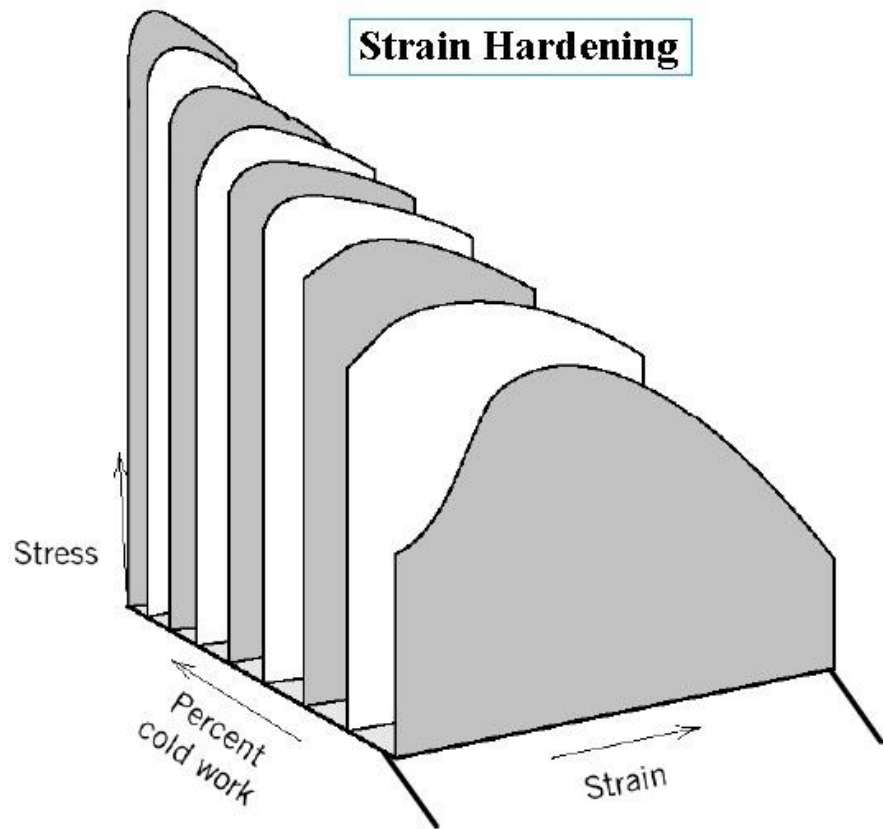


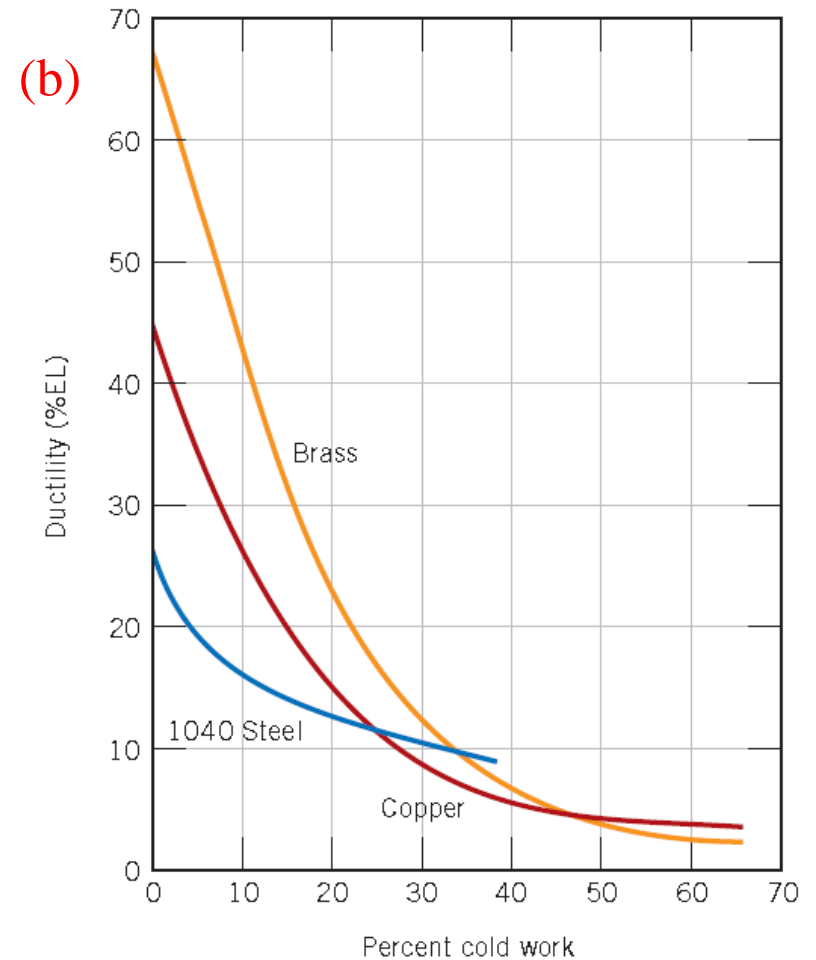
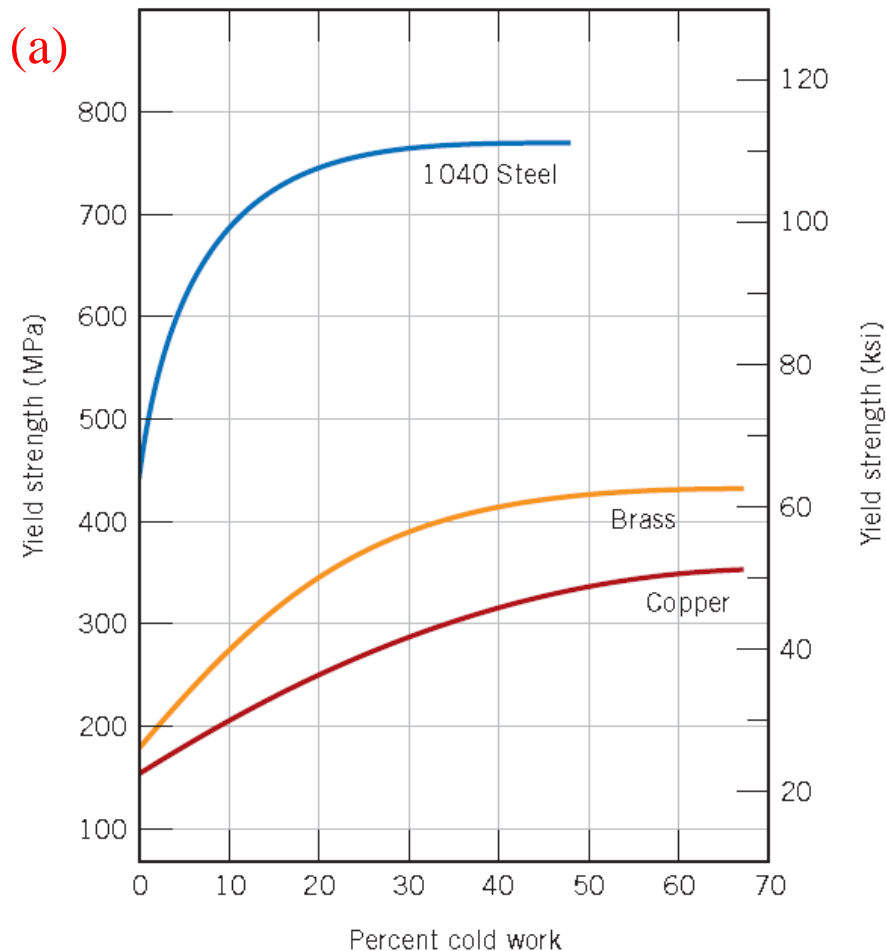
Figure 7.20 The influence of cold work on the stress–strain behavior of a low-carbon steel; curves are shown for 0%CW, 4%CW, and 24%CW.

Yield strength and hardness are increasing as a result of strain hardening but **ductility is decreasing** (material becomes more brittle).

Endurecimento em Metais: Encruamento

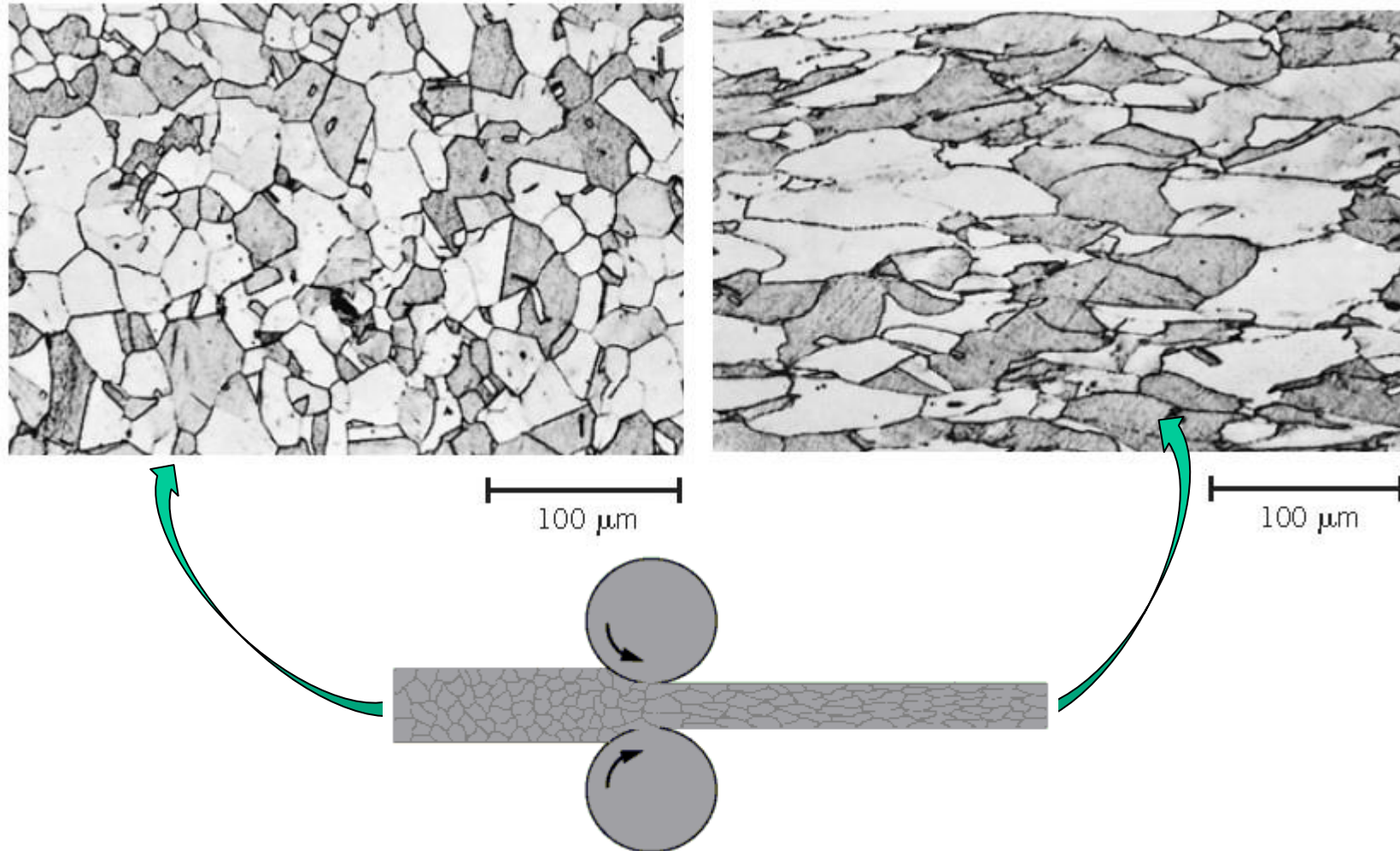
$$\%CW = \left(\frac{A_o - A_f}{A_o} \right) \times 100\%$$

%CW é trabalho a frio, **A_o** e **A_f** são áreas de seção transversal, respectivamente, antes e depois da deformação.



Varição de : (a) limite de escoamento e (b) ductilidade com o grau de deformação, em % de redução de área (%CW) para aço AISI 1040, latão e cobre, todos trabalhados a frio.

- Nos metais, devido à deformação plástica que ocorre em processos de conformação a frio, as discordâncias movimentam-se, multiplicam-se, interagem entre si formando “emaranhados” (encruamento) – mas não é só isso o que pode ocorrer → **a microestrutura é alterada** , pois os grãos se deformam.



Recozimento (“Annealing”)

- O termo **recozimento** se refere a um tratamento térmico no qual um material é exposto a uma temperatura elevada (*mas ainda bem inferior à temperatura de fusão*) por um período de tempo adequado para serem atingidos os resultados (*alívio de tensões / microestrutura / propriedades*) desejados.
- Qualquer processo de **recozimento** é constituído de três etapas:
 - Aquecimento até a temperatura de tratamento;
 - Manutenção do material na temperatura de tratamento por um tempo suficiente para sejam atingidos a microestrutura e/ou as propriedades desejadas;
 - Resfriamento, geralmente até a temperatura ambiente.

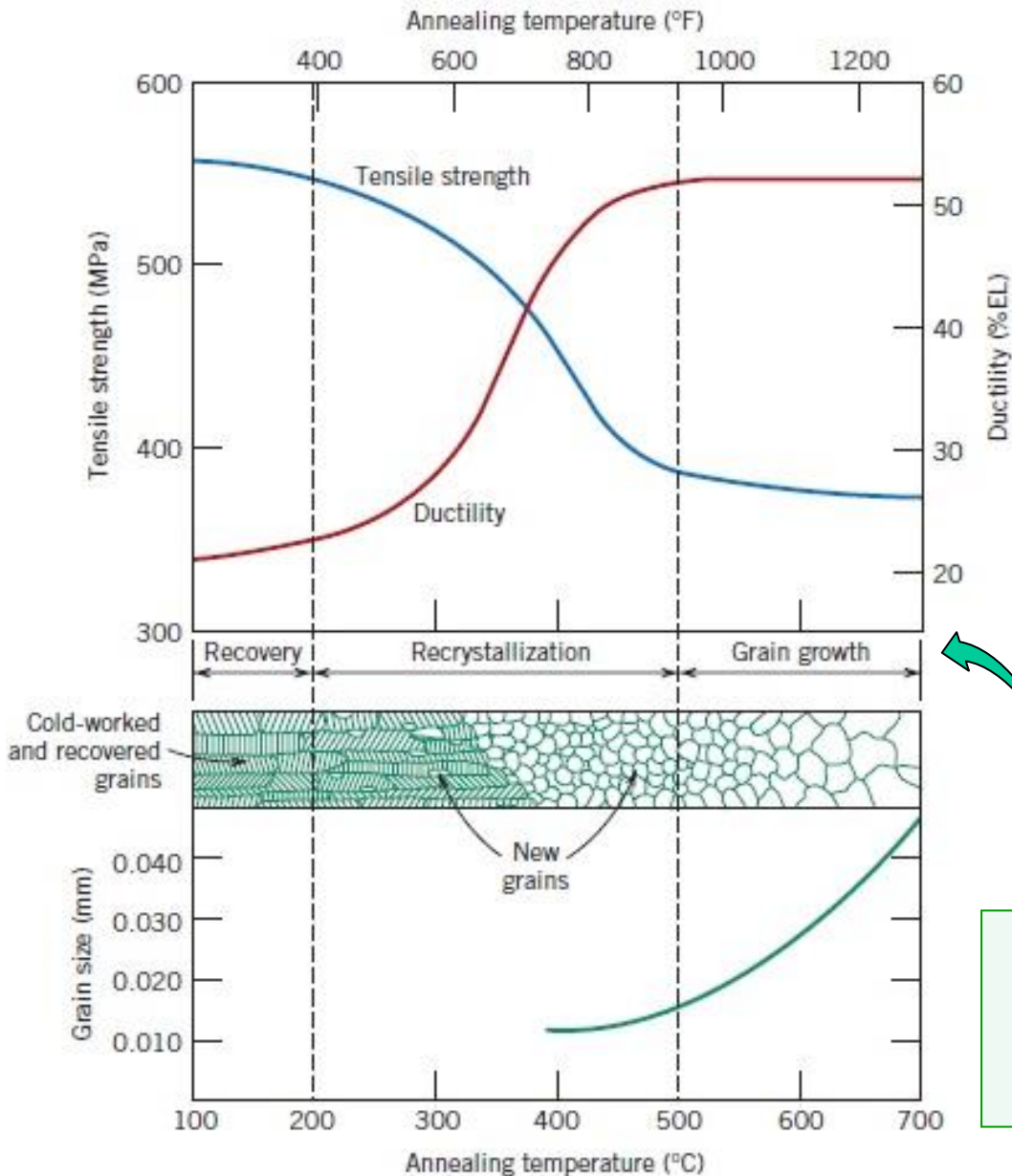
Recozimento

- O **tempo** de tratamento e as **velocidades** de aquecimento e resfriamento são parâmetros importantes no processo.
 - Durante o aquecimento e o resfriamento, existem *gradientes de temperatura* que devem ser respeitados → suas magnitudes dependem do tamanho e geometria das peças.
 - O tempo de tratamento deve ser suficiente para que os efeitos desejados (redução de tensões; microestrutura) sejam obtidos.
- A **temperatura** de tratamento é um outro parâmetro importante no processo.
 - Os *mecanismos* que atuam no processo de recozimento são *termicamente ativados*.

Recozimento

- Ao longo de tratamentos de recozimento podem ser ativados mecanismos de :
 - Alívio de tensões internas induzidas por
 - Processos de deformação plástica na conformação;
 - Resfriamento não uniforme durante a fabricação, em processos realizados a partir do estado líquido (fundição);
 - Transformações de fase que ocorram durante a produção de peças, no caso em que as fases de origem e aquelas presentes no produto tenham densidades muito diferentes.
 - Movimentação de discordâncias;
 - Recristalização;
 - Precipitação.

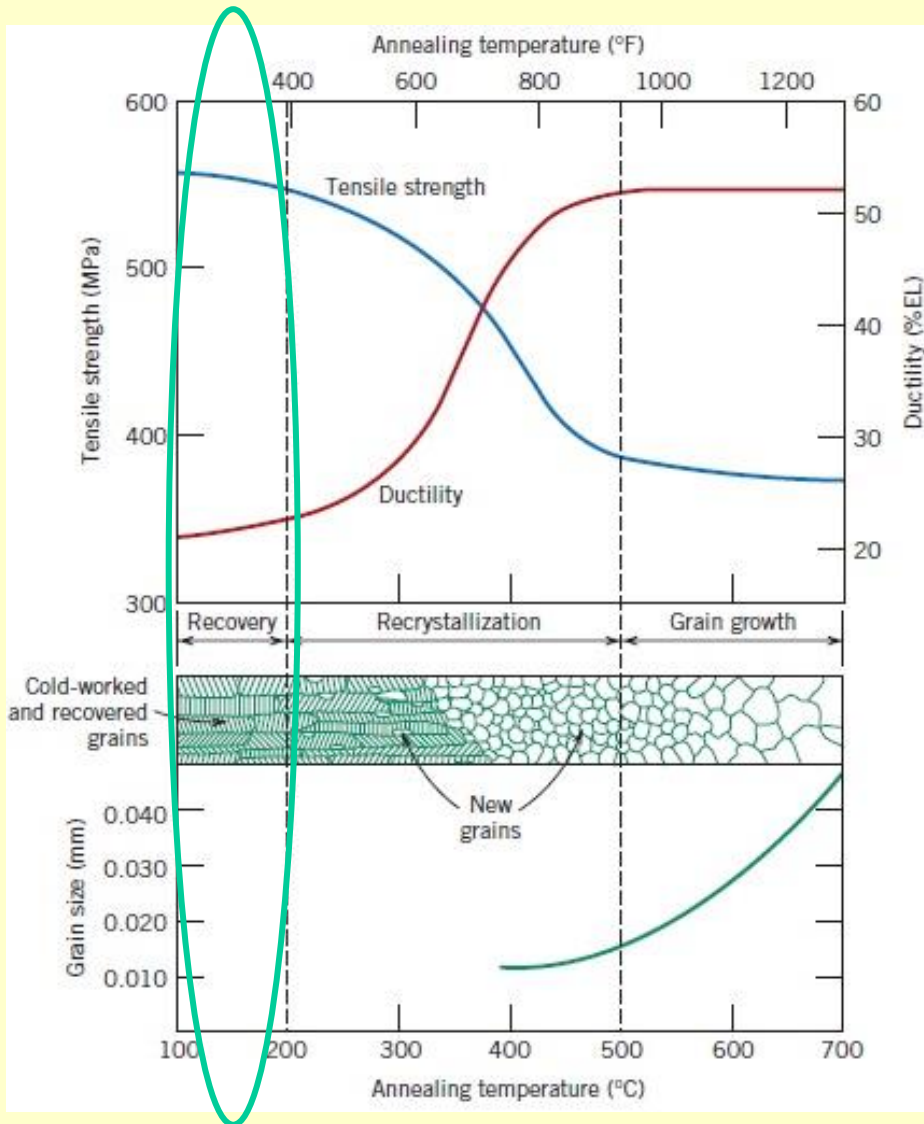
Recozimento



Ciclos de deformação a frio e recozimento (cápsula para cartuchos)

Influência da temperatura de recozimento na resistência à tração e na ductilidade de um latão ("brass" - liga Cu-Zn). Tempo de tratamento térmico: 1h.

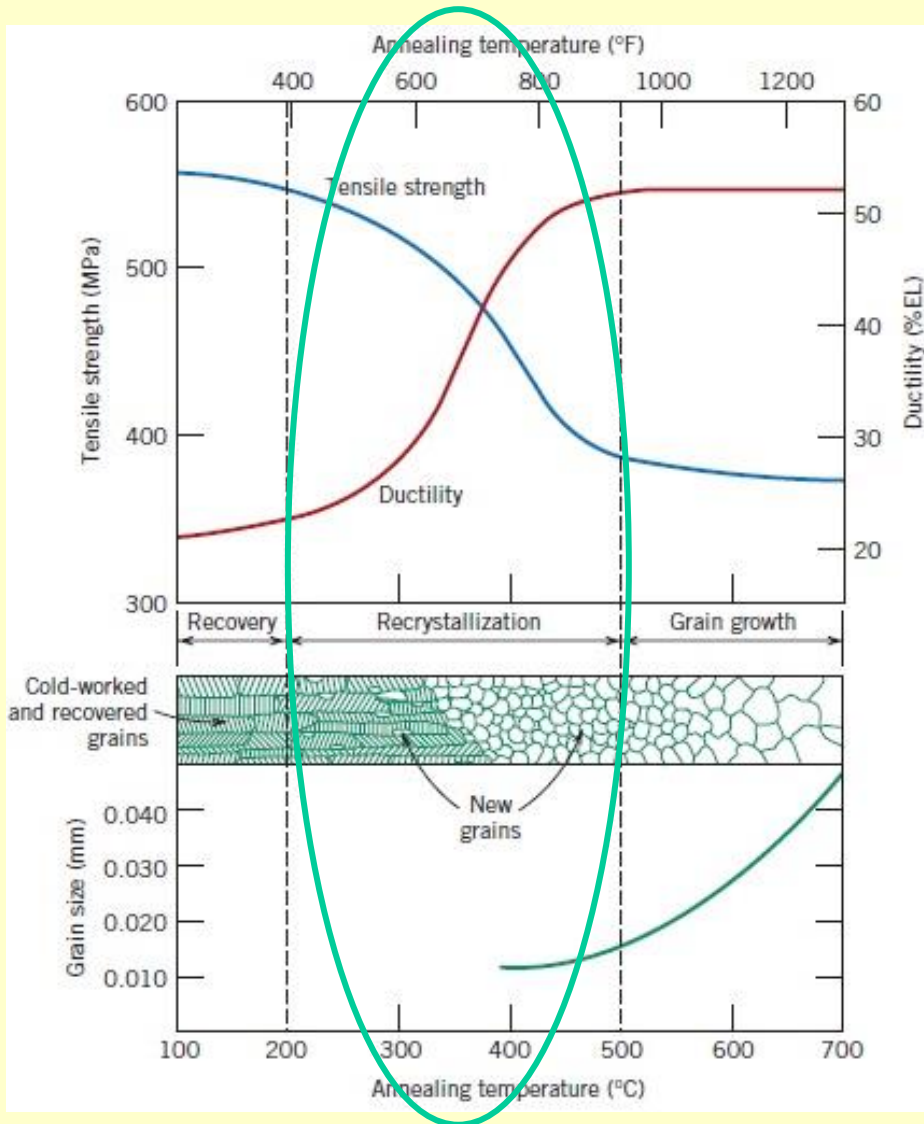
Recuperação (“*Recovery*”)



- Uma fração da energia empregada na deformação é armazenada no metal na forma de energia associada a zonas de tração, compressão e cisalhamento ao redor das discordâncias recém-criadas pela própria deformação.
- Propriedades e estruturas alteradas pela deformação plástica podem ser revertidas por meio de um tratamento térmico apropriado.
- Durante o recozimento, os seguintes *processos ativados pela temperatura* (que facilita a difusão) ocorrem:
 - **RECUPERAÇÃO**
 - **RECRISTALIZAÇÃO**

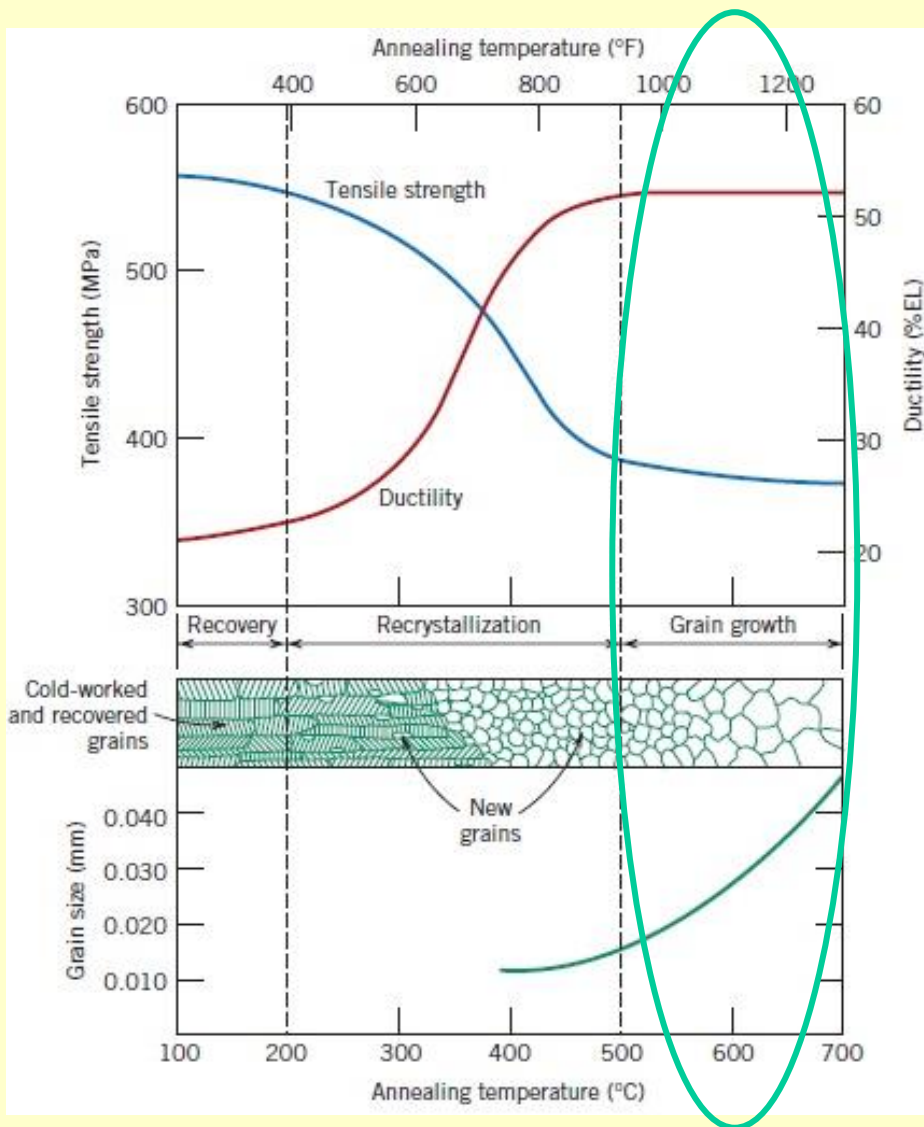
Recuperação (“Recovery”)

Recristalização (“Recrystallization”)



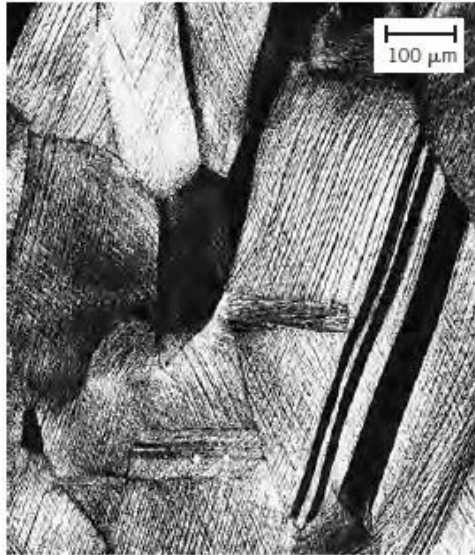
- **RECUPERAÇÃO** → movimentação de discordâncias, com liberação de parte da energia interna “armazenada” no processo de deformação.
- **RECRISTALIZAÇÃO** → processo de formação de novos grãos, menores, equiaxiais e livres de deformações.
- Se o tratamento térmico de recozimento prosseguir por tempo suficientemente longo, pode haver **crescimento dos grãos** formados na recristalização.

Crescimento de Grãos (“Grain Growth”)

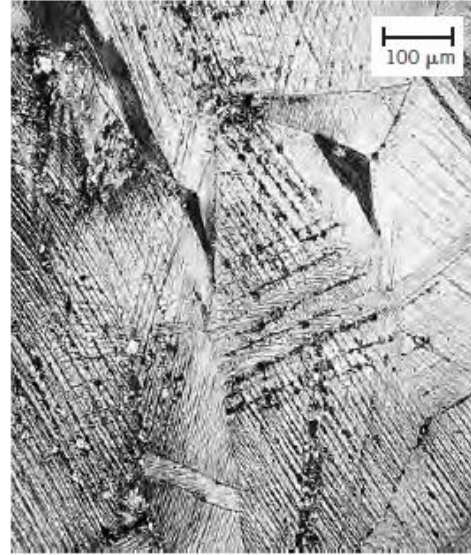


- Uma energia está associada aos contornos dos grãos.
- À medida que os grãos aumentam de tamanho, a área total dos contornos diminui, produzindo uma consequente redução da energia total → essa é a *força motriz do processo*.
- Se os grãos forem muito grandes, eles podem ser reduzidos por um processo de *refino de grãos*.

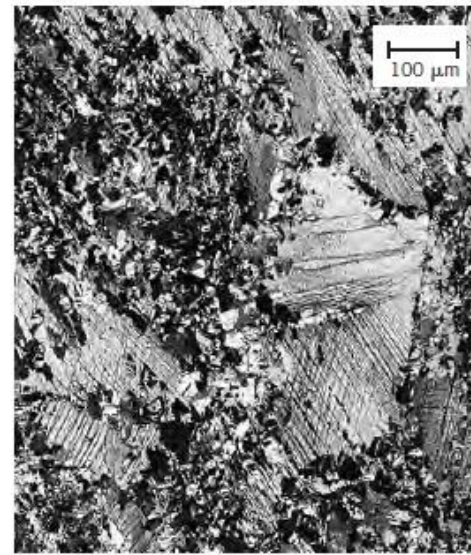
Refino de Grãos
 =
 { *Deformação Plástica + Recristalização* }



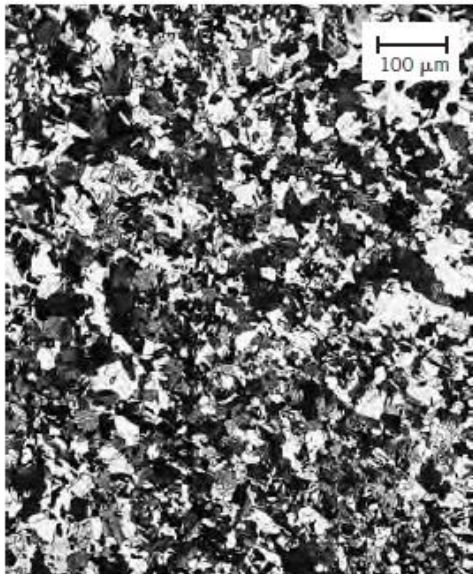
(a)



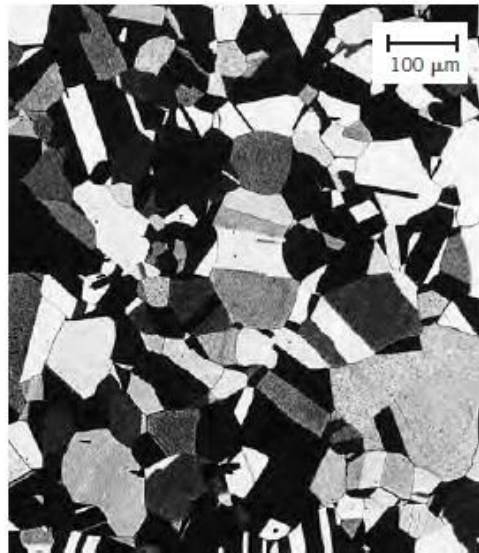
(b)



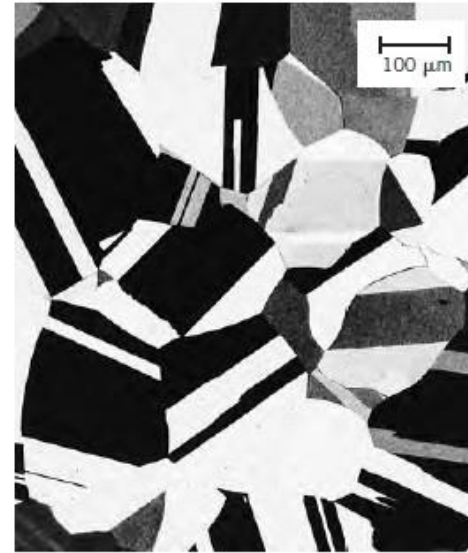
(c)



(d)



(e)



(f)

Micrografias mostrando estágios de recristalização e de crescimento de grãos em latão

- a) Estrutura de material deformado a frio (33% CW).
- b) Estágio inicial de recristalização (3s – 580°C) → grãos diminutos aparecem.
- c) Substituição parcial de grãos do material endurecido por grãos gerados no processo de recristalização (3s – 580°C).
- d) Recristalização completa (8s – 580°C).
- e) Crescimento de grãos depois de tratamento térmico por 15min a 580°C.
- f) Crescimento de grãos depois de tratamento térmico por 10min a 700°C.

(micrografias: J.E.Burke, GE Co.; retirado de Callister, cap. 7)

Exemplo de Processamento para Obtenção de Microestruturas / Propriedades

Material de Partida : **Aço 1006**

Laminação a frio (90% de redução)

Recozimento – 610°C
– 8 horas

Laminação a frio – 5%
de redução

G2L590 - Tensão de escoamento > 560 MPa

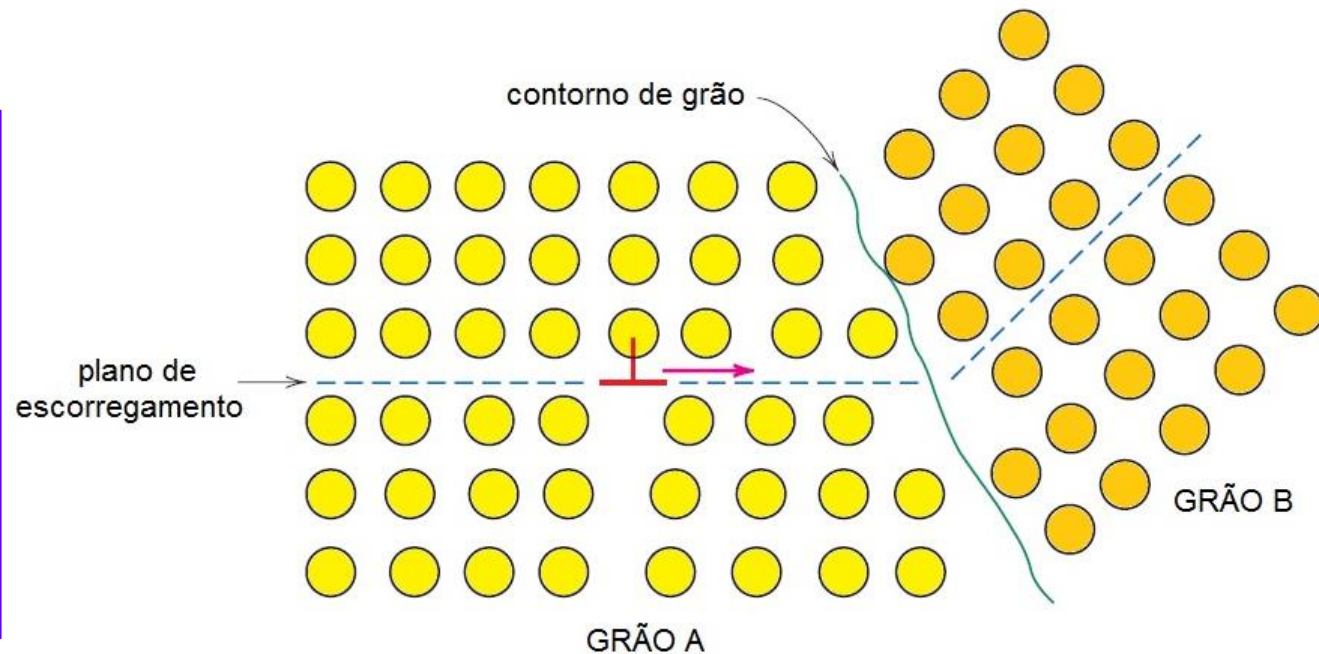
G2RL - Tensão de escoamento < 280 MPa

Endurecimento por Refino de Grão

- Os maior parte dos materiais utilizados em engenharia são policristalinos.
- Os contornos de grão são barreiras que dificultam a movimentação das discordâncias, pois uma discordância não consegue atravessá-los.

Grãos tem orientações cristalinas diferentes.

Assim sendo, uma discordância que tentasse passar de um grão A para dentro de um outro grão B teria de alterar sua direção de movimentação.



Endurecimento por Refino de Grão

- Um material que possui *grãos pequenos* é mais duro e mais resistente do que um material que possui grãos maiores, uma vez que tem uma maior área total de contornos de grão para dificultar o movimento das discordâncias.
- *Este é o único mecanismo de endurecimento que também **umenta a tenacidade do material**.*
- Hall e Petch, trabalhando independentemente, propuseram uma equação para o *endurecimento causado por refino de grão* :

$$\sigma = \sigma_0 + \frac{K_e}{\sqrt{d}}$$

- onde σ é o limite de escoamento, σ_0 e K_e são constantes, e d é o tamanho médio dos grãos.

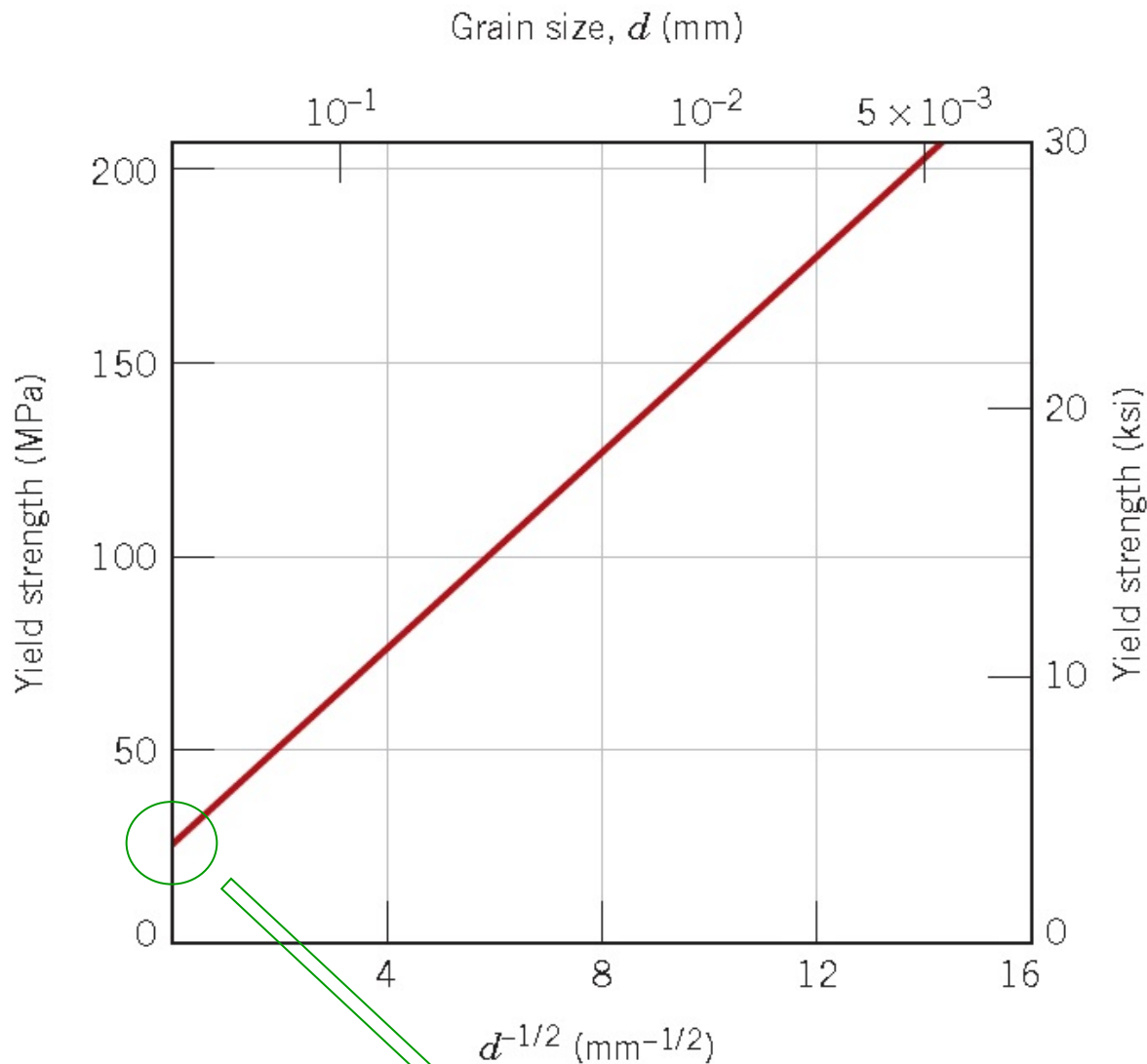
Significado do σ_0

$$\sigma = \sigma_0 + \frac{K_e}{\sqrt{d}}$$

- Para que $\sigma = \sigma_0 \rightarrow \frac{K_e}{\sqrt{d}} = 0$
- Para que $\frac{K_e}{\sqrt{d}} = 0$, d deve ser muito grande (idealmente, infinito)
- ...ou seja, σ_0 seria o limite de resistência de um monocristal infinito.

...só que não é bem assim...

- A orientação do monocristal interfere nas suas propriedades mecânicas, e isso é ainda mais pronunciado em metais não cúbicos.
- A própria orientação dos grãos em uma amostra policristalina poderá influir no valor do σ .
- O valor de σ_0 é determinado graficamente (*VER PRÓXIMO SLIDE*).



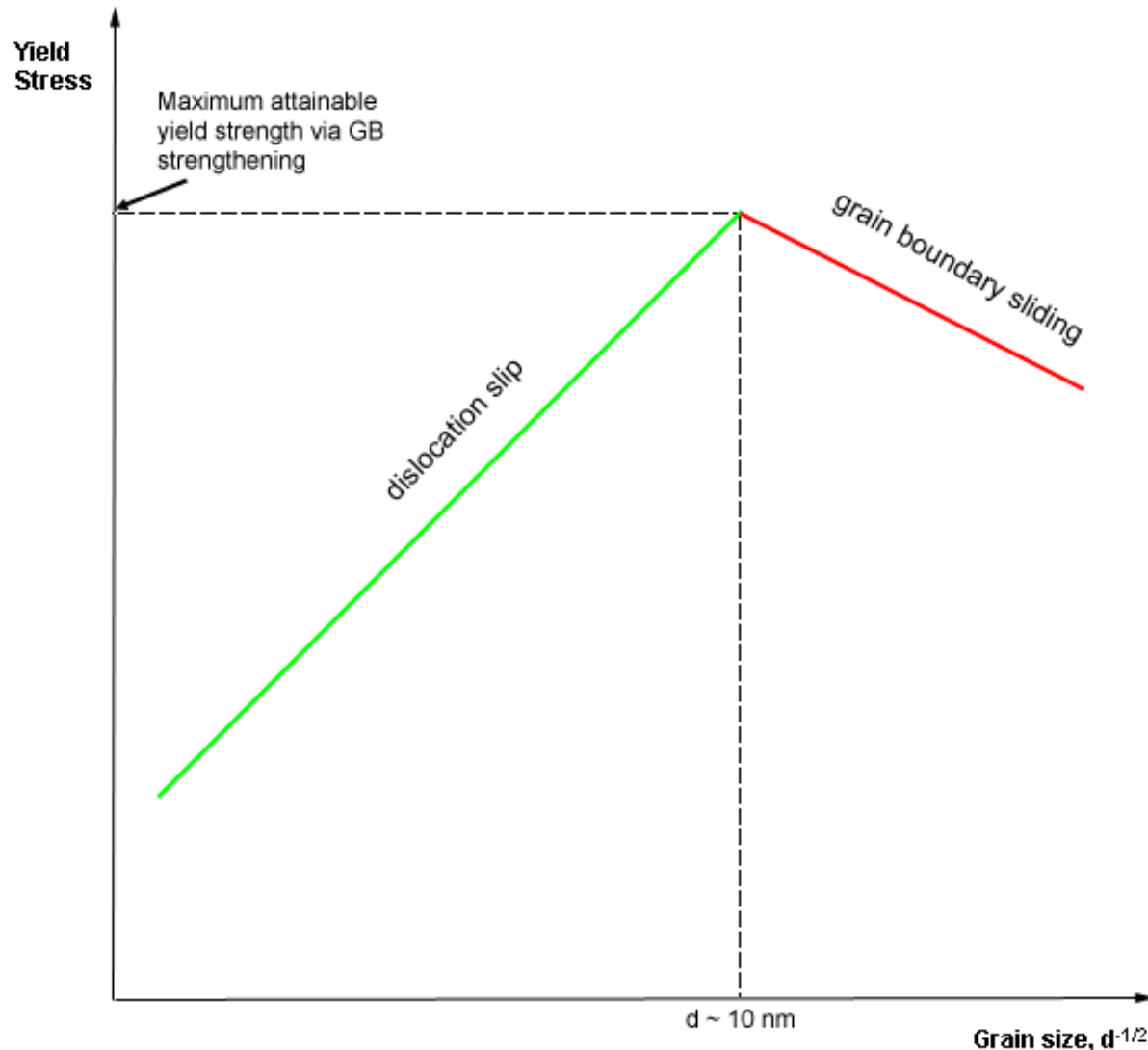
$$\sigma = \sigma_0 + \frac{K_e}{\sqrt{d}}$$

- **O tamanho dos grãos pode ser controlado :**
- mediante o ajuste da taxa de solidificação a partir da fase líquida (em produtos obtidos por *fundição*, por ex.);
- por deformação plástica seguida de tratamento térmico adequado (*recristalização*).

Hall-Petch constants

Material	σ_0 [MPa]	k [MPa $\text{m}^{1/2}$]
Copper	25	0.11
Titanium	80	0.40
Mild steel	70	0.74
Ni ₃ Al	300	1.70

Hall-Petch Strengthening Limit



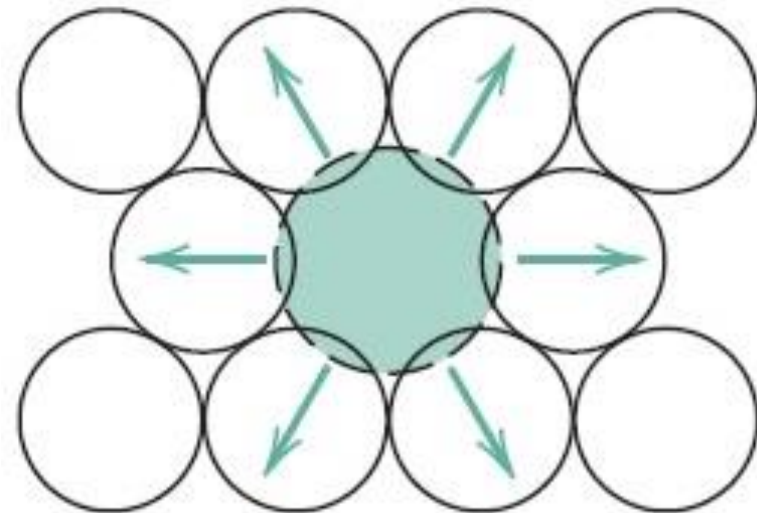
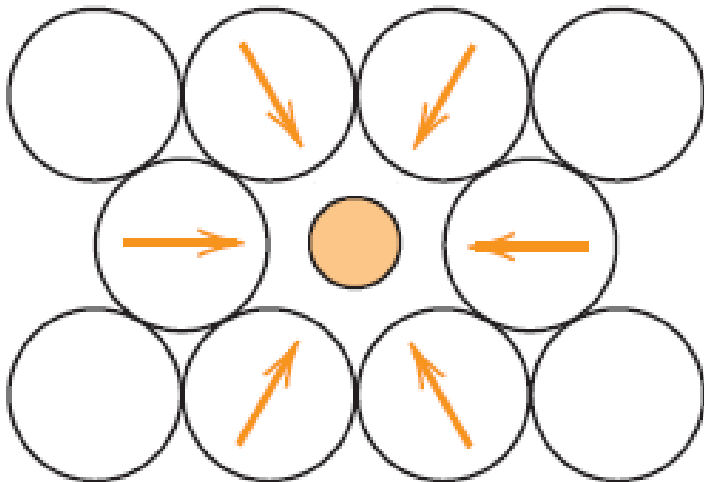
- Existe um limite para esse método de endurecimento.
- Para grãos muito pequenos, o tamanho das discordâncias começa a ser comparável ao tamanho dos grãos.
- Por exemplo, para grãos de 10nm, somente uma ou duas discordâncias cabem dentro do grão.
- No caso de grãos tão pequenos, quando se submete o material a uma tensão, os grãos começam a deslizar uns sobre os outros, e a resistência cai.
- Esse mecanismo de endurecimento funciona bem para grãos com dimensões acima de $1\mu\text{m}$.

Endurecimento por Solução Sólida

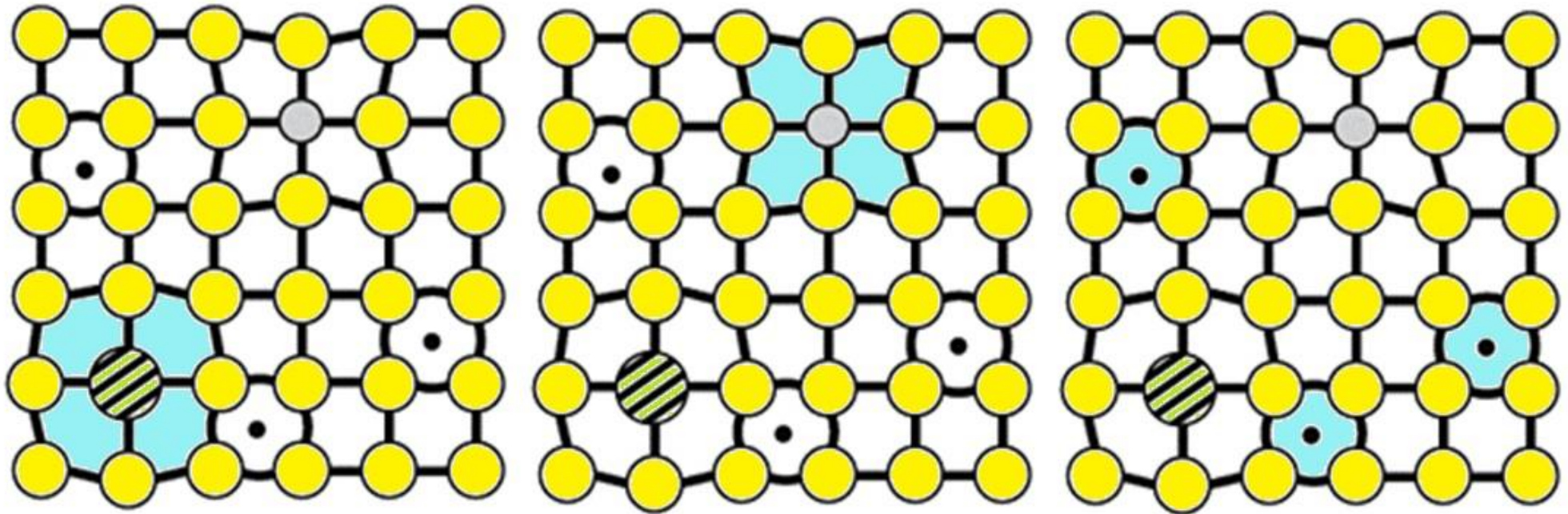
- Uma técnica utilizada para aumentar a resistência de materiais consiste na inserção de elementos químicos diferentes daqueles que compõem a matriz do material que se deseja “endurecer”.
- Em metais, esse processo consiste na formação de ligas com átomos de impurezas que entram em solução sólida substitucional ou intersticial.
- Em vidros, esse processo consiste na difusão de elementos diferentes daqueles da matriz a partir da superfície do material (*processo também chamado de “têmpera química”*) .

Endurecimento por Solução Sólida – Metais




- As ligas são mais resistentes do que os metais puros, pois os átomos das impurezas que entram em solução sólida geralmente impõem *deformações* na rede cristalina formada pelos átomos “hospedeiros” → **e ssas deformações dificultam a movimentação das discordâncias**.
- Se o átomo de impureza for **menor** que o átomo da rede → *deformação de tração*
- Se o átomo de impureza for **MAIOR** que o átomo da rede → *deformação de compressão*



- Se o átomo do soluto for *um pouco maior* ou *um pouco menor* do que o átomo do metal de base da liga (*que é o solvente*) → **SUBSTITUCIONAL**
- Se o átomo do soluto for *bem menor* (*tipicamente ao menos 10% menor*) do que o átomo do metal de base da liga (*que é o solvente*) → **INTERSTICIAL**



— Interatomic bond

-  Substitutional alloying element that is bigger than the matrix element
-  Substitutional alloying element that is smaller than the matrix element
-  Interstitial alloying element

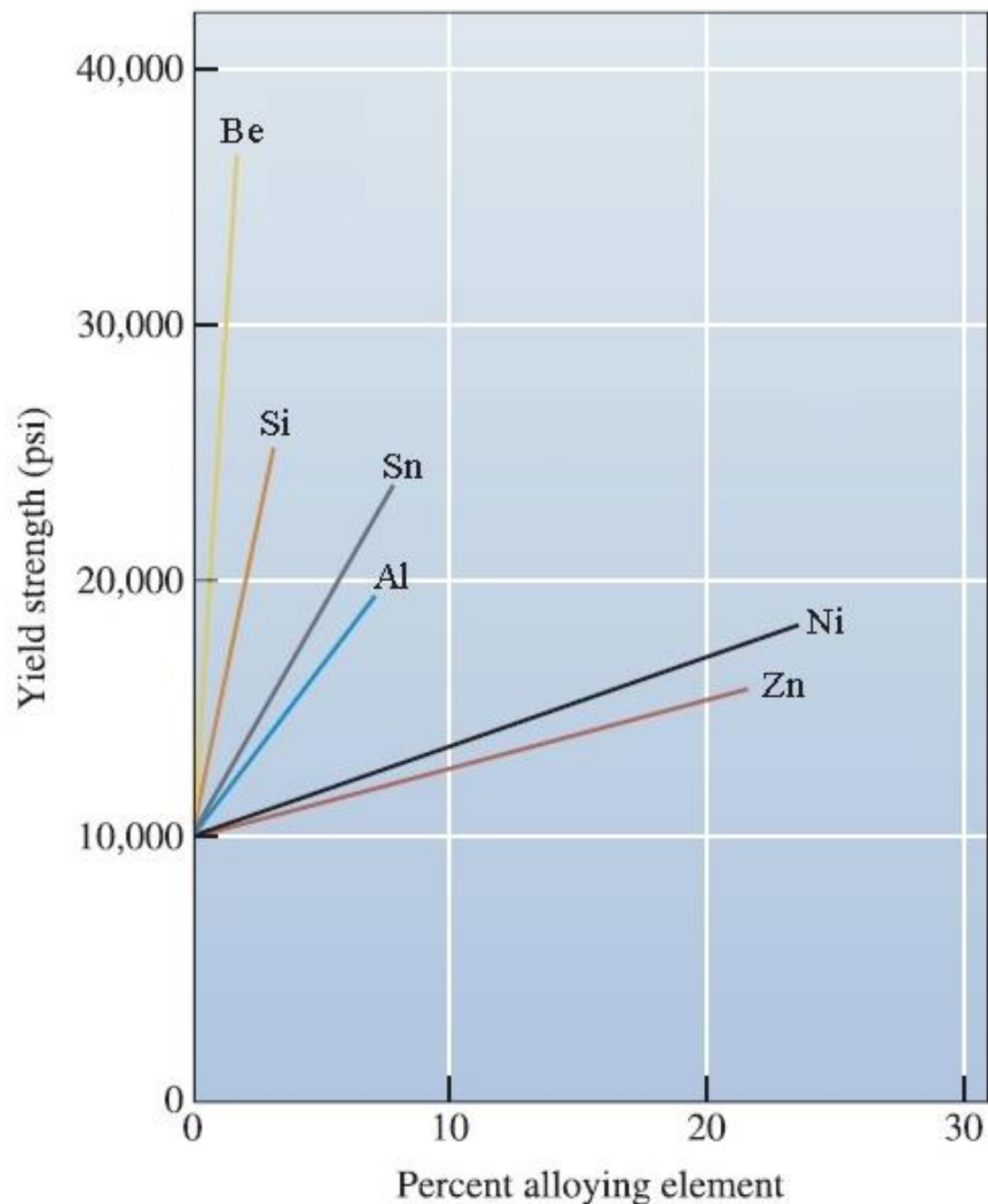


Figure 10-7

The effects of several alloying elements on the yield strength of copper. Nickel and zinc atoms are about the same size as copper atoms, but beryllium and tin atoms are much different from copper atoms. Increasing both the atomic size difference and the amount of alloying element increases solid-solution strengthening.

Elemento	Raio atômico (Empírico; pm)	Raio atômico (Calculado; pm)
Be	105	112
Si	110	111
Sn	145	145
Al	125	118
Ni	135	149
Zn	135	142
Cu	135	145

Endurecimento por Solução Sólida – Metais

- *Os átomos de impureza ou elementos de liga em solução sólida interagem com a rede cristalina e os campos de tensão ao seu redor interagem com as discordâncias, dificultando a sua movimentação.*
- A presença das impurezas dificulta a movimentação das discordâncias → a aplicação de uma maior tensão é necessária para em primeiro lugar iniciar a movimentação dos átomos e depois para dar continuidade à deformação plástica → **aumento da resistência** (= aumento do limite de escoamento) e **aumento da dureza**.

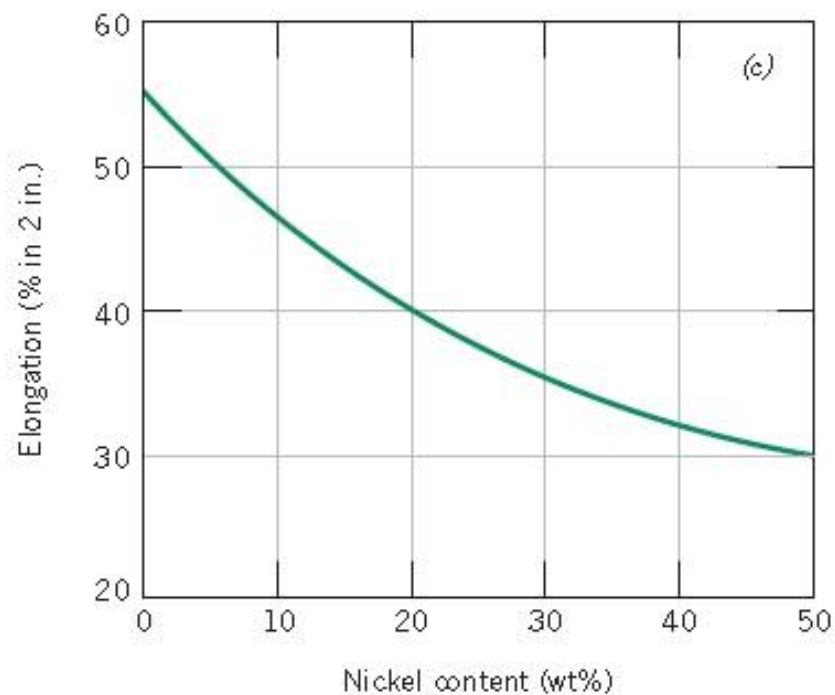
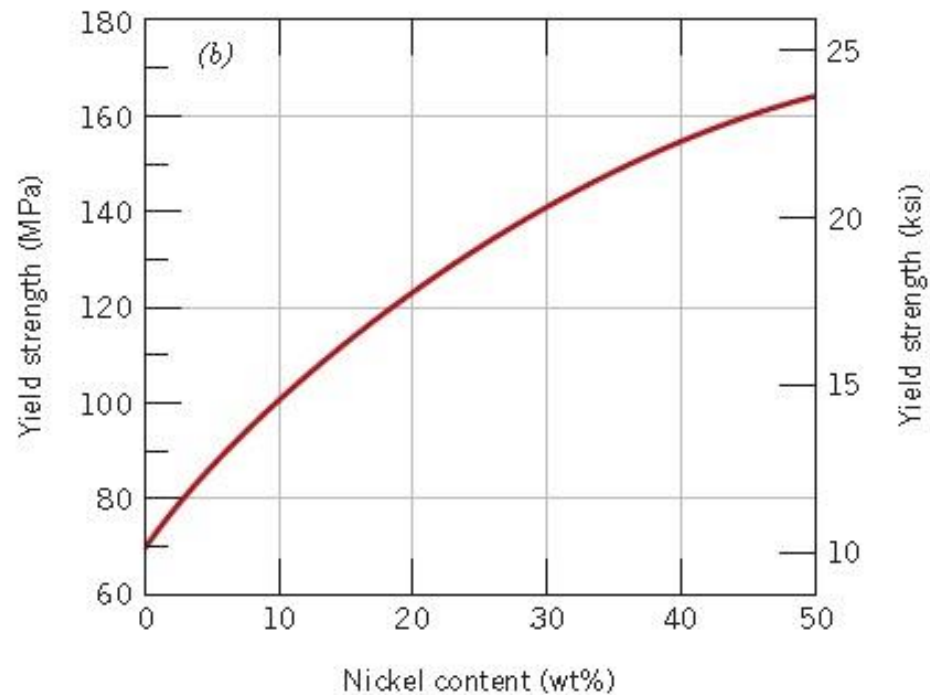
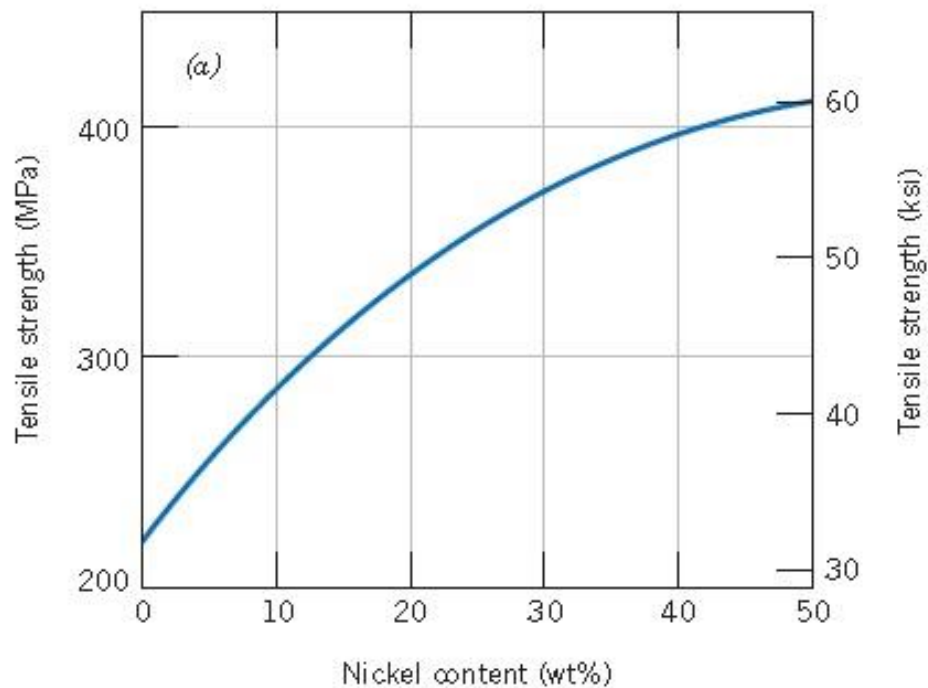


Figure 7.16 Variation with nickel content of (a) tensile strength, (b) yield strength, and (c) ductility (%EL) for copper–nickel alloys, showing strengthening.

Endurecimento por Solução Sólida
Liga Cu-Ni

Endurecimento Superficial por Solução Sólida – Metais

- Metais podem ter suas superfícies endurecidas por meio de tratamentos térmicos nos quais ocorre a difusão de elementos que entram na rede cristalina, a partir da superfície, como solutos intersticiais. Esses elementos podem dar origem a novas fases ou criar condições favoráveis para tratamentos térmicos → os elementos mais comuns são C, N e B. Exemplos:
 - **Carbono** → Carbonetação ou Cementação (*"carburizing"*)
 - **Nitrogênio** → Nitretação (*"nitriding"*)
 - **Carbono + Nitrogênio** (C>N) → Carbonitretação (*"carbonitriding"*)
 - **Nitrogênio + Carbono** (N>C) → Nitrocarbonetação (*"nitrocarburizing"*)
 - **Boro** → Boretção (*"boron heat treatment"*)
- Esses tratamentos de endurecimento superficial são também conhecidos como *tratamentos termoquímicos*.
- As principais finalidades desses tratamentos são conferir *propriedades às superfícies das peças tratadas* tais como resistência ao atrito, à fadiga, à corrosão e à oxidação em altas temperaturas. O mecanismo como cada um atua é diferente.

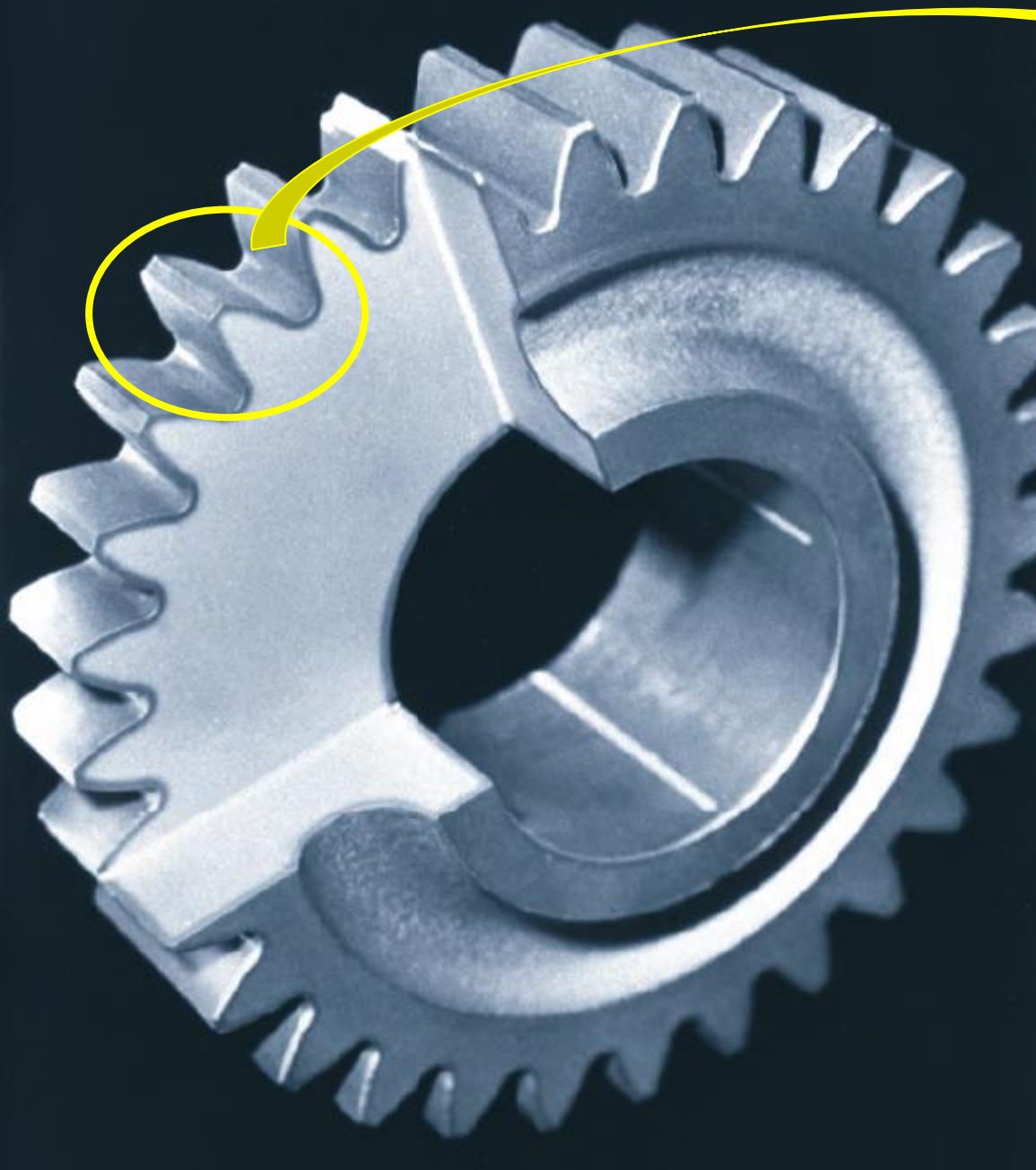


Foto de engrenagem de aço que teve sua superfície endurecida por um processo de carbonetação (*cementação – "carburizing"*)

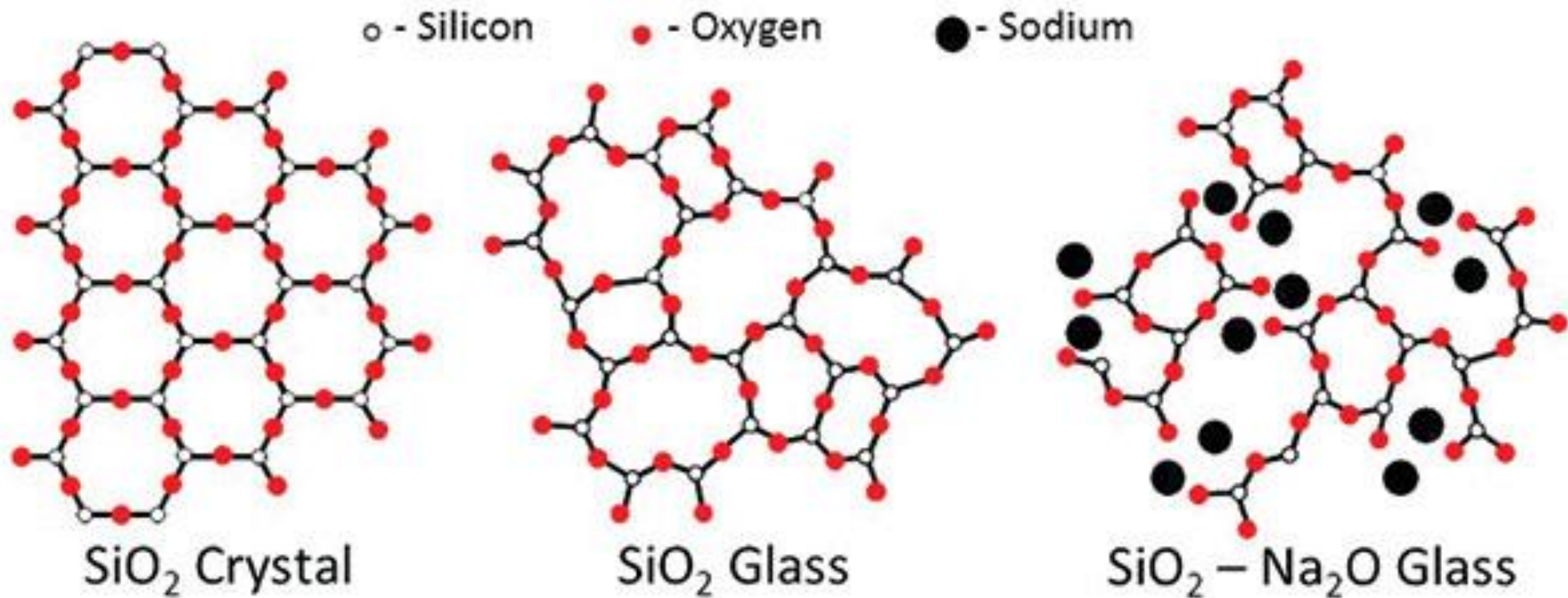
Endurecimento Superficial de Vidros – TÊMPERA QUÍMICA

- Apesar de ainda não termos tratado do tema “VIDROS” no curso (ele será abordado com mais detalhe na Unidade que tratará de Materiais Cerâmicos), é interessante falar da *TÊMPERA QUÍMICA DE VIDROS* neste momento pela analogia que esse processo de endurecimento superficial de vidros tem com o endurecimento superficial de metais por solução sólida.
- De forma simplificada, a fratura de vidros depende da existência e da propagação de trincas → em especial trincas superficiais.
- *Impedir a formação e/ou dificultar a propagação de **trincas superficiais** torna os vidros mais resistentes e mais duros.*

Endurecimento Superficial de Vidros – TÊMPERA QUÍMICA

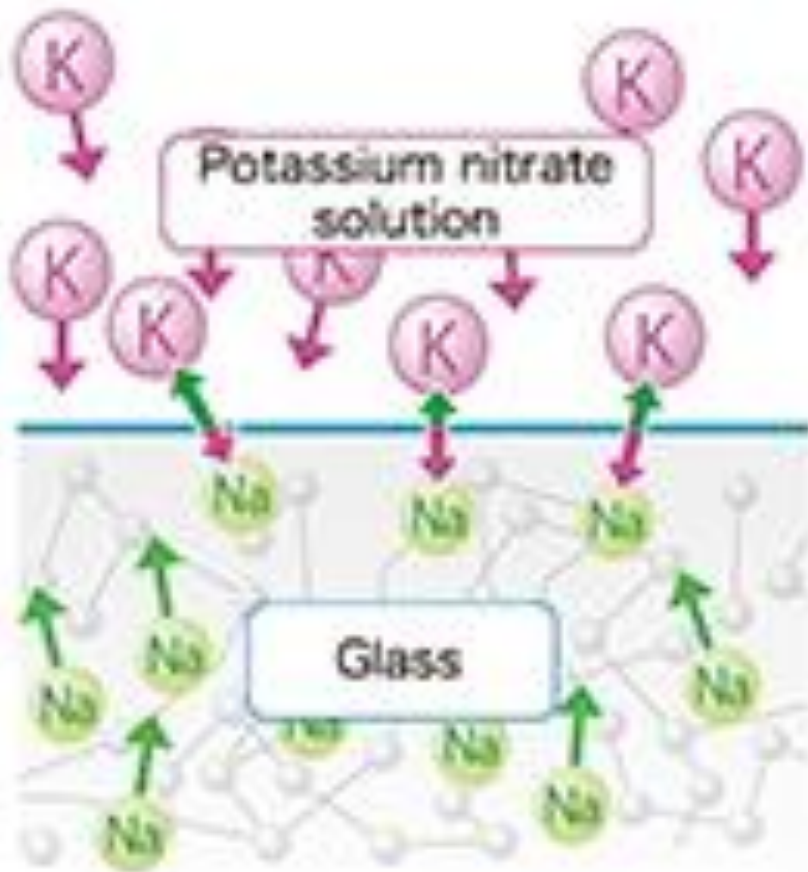
- Nos **VIDROS** (materiais *amorfos...*) :
 - *Não existem discordâncias*
 - Não é observada deformação plástica (*somente deformação elástica...*)
 - *A resistência mecânica* não depende, portanto, da movimentação de discordâncias (elas não existem...) → *depende da existência e da propagação de trincas*
 - **Aumento da resistência** → pode ser obtido por processamento que dificulte a formação e/ou a propagação de trincas superficiais

Representação Esquemática da Estrutura dos Vidros



Representação Esquemática do Processo de TÊMPERA QUÍMICA

Before ion exchange



After ion exchange



The ion exchange mechanism of glass strengthening

Un-strengthened glass

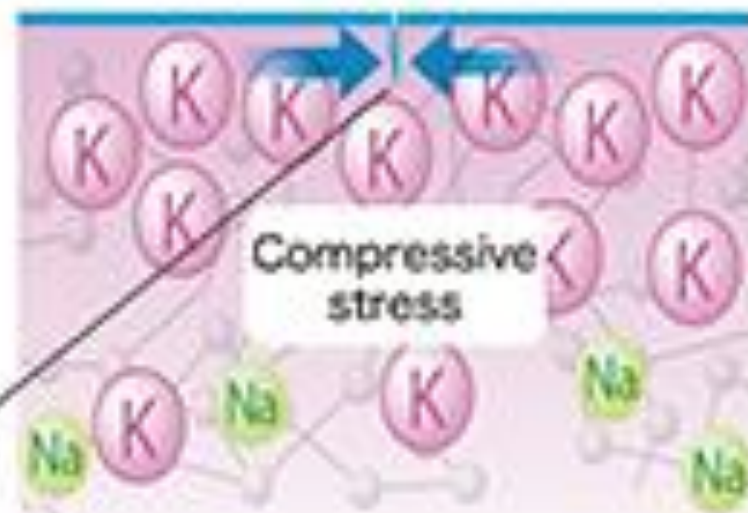
← Tensile stress →



Crack

Strengthened glass

← Tensile stress →



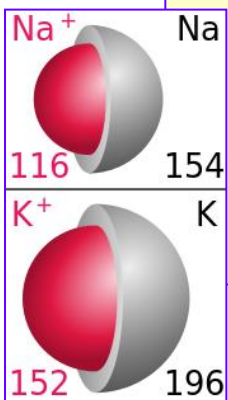
Compressive stress

A entrada de íons K^+ na estrutura do vidro leva ao estabelecimento de **tensões de compressão** na sua superfície (raio iônico $K^+ >$ raio iônico Na^+)

Essas tensões se contrapõem às trincas → para se propagarem, as trincas precisam vencer as tensões de compressão induzidas na superfície.

Resultado → **AUMENTO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA e DA DUREZA.**

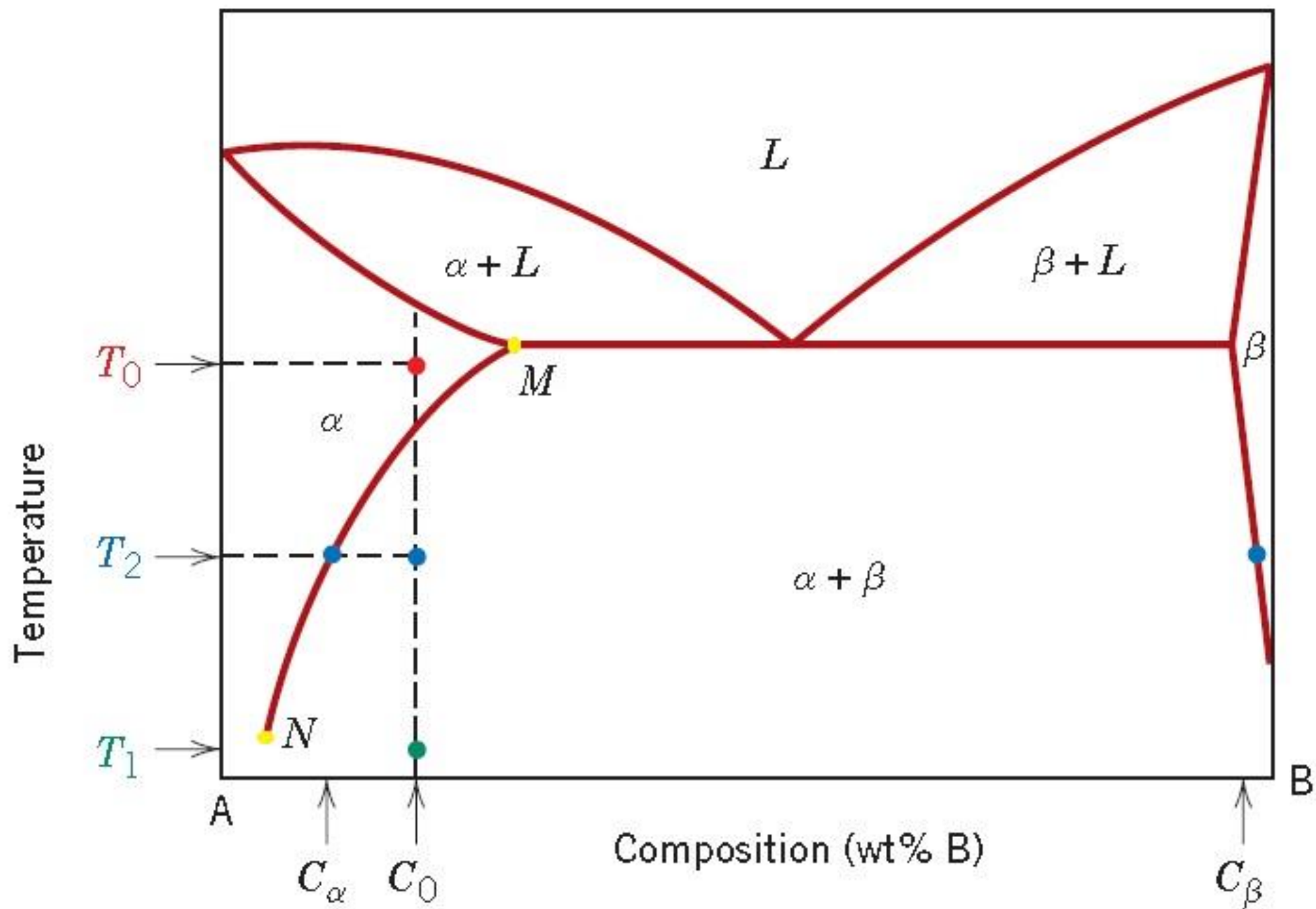
Raios iônicos e atômicos em picometros (10^{-12} m)



Endurecimento por Precipitação

- **ENDURECIMENTO POR PRECIPITAÇÃO** → precipitação de uma nova fase no seio de uma fase “matriz”.
- O sistema deve apresentar necessariamente duas características para poder ser endurecido por precipitação:
 - Deve haver uma *solubilidade máxima apreciável de um componente no outro* (da ordem de vários pontos percentuais) → ponto **M** na figura a seguir;
 - Deve haver um *limite de solubilidade que diminua rapidamente com a concentração do componente principal* em função da diminuição da temperatura → linha **solvus**, de **M** para **N** na figura a seguir.

ATENÇÃO: *essas condições são necessárias, mas não são suficientes...*



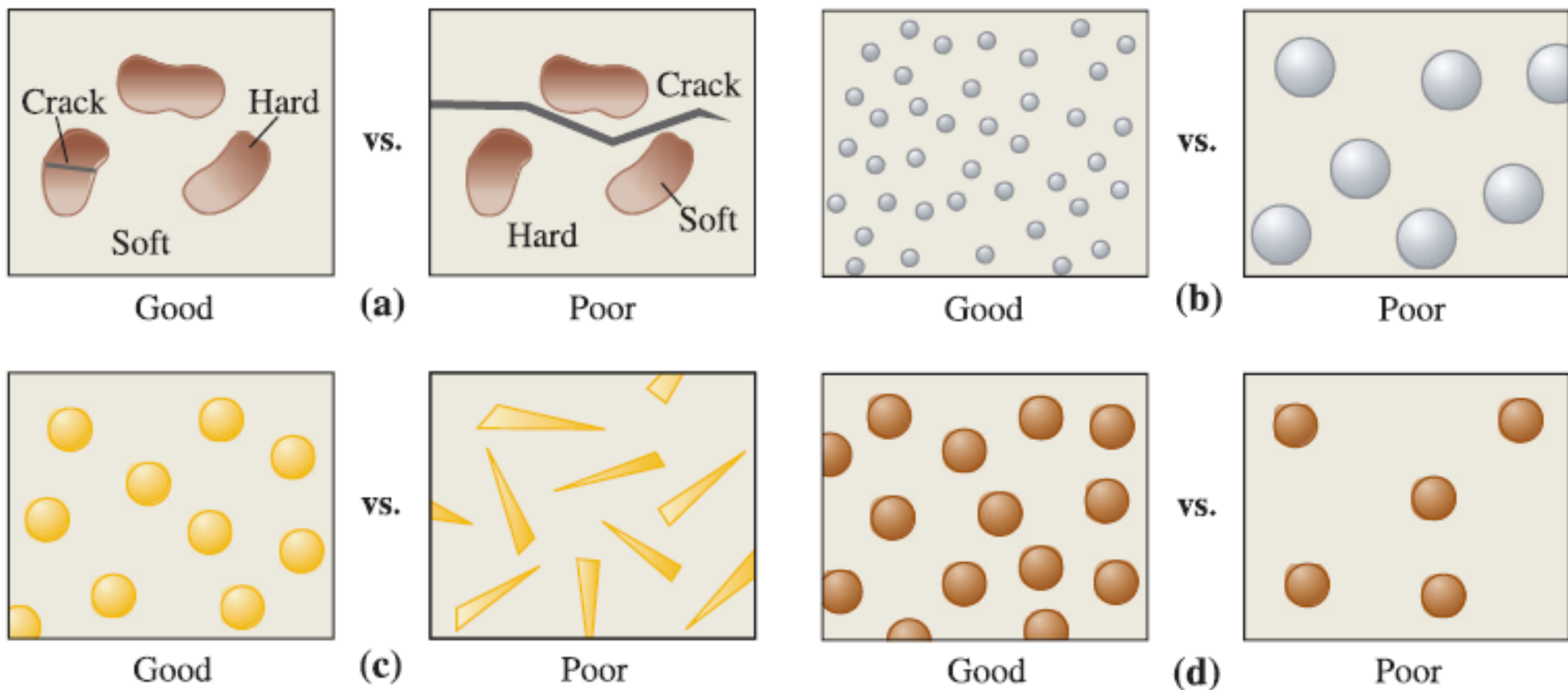
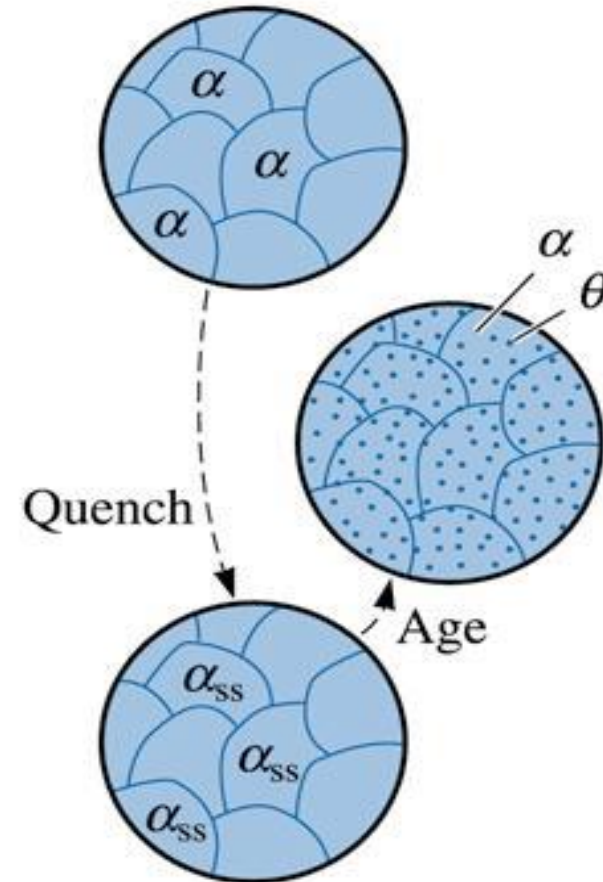
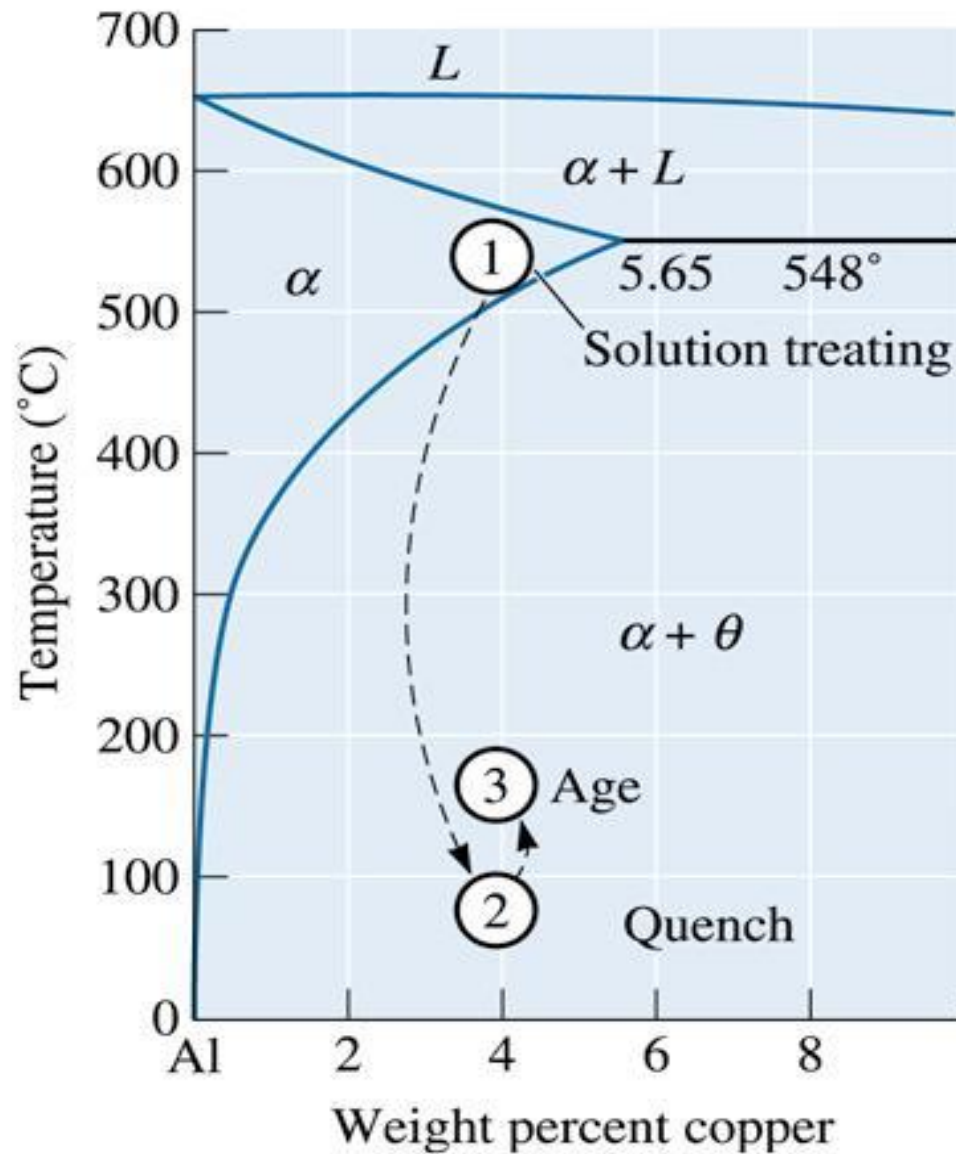


Figure 11-1

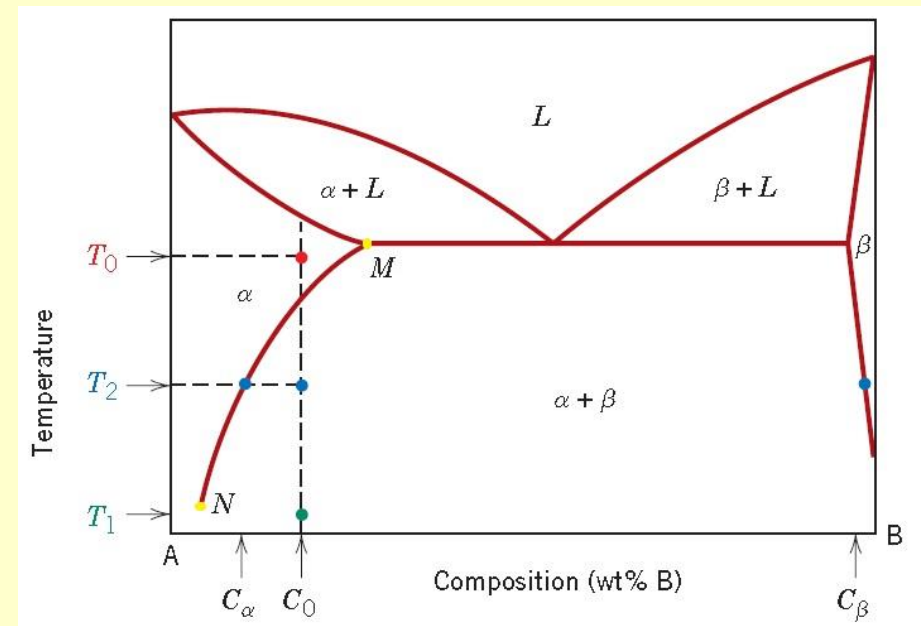
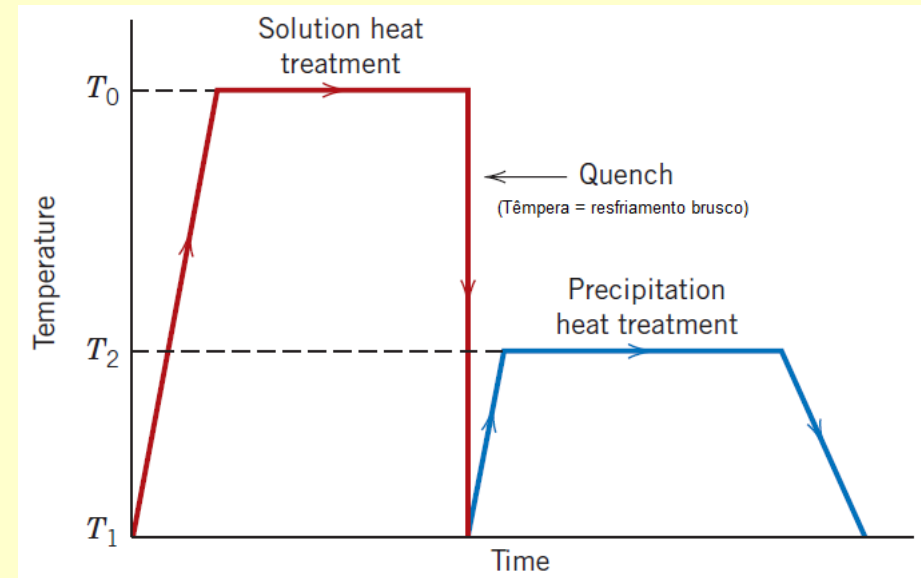
Considerations for effective dispersion strengthening:
 (a) The precipitate phase should be hard and discontinuous, while the matrix should be continuous and soft, (b) the dispersed phase particles should be small and numerous, (c) the dispersed phase particles should be round rather than needle-like, and (d) larger amounts of the dispersed phase increase strengthening.



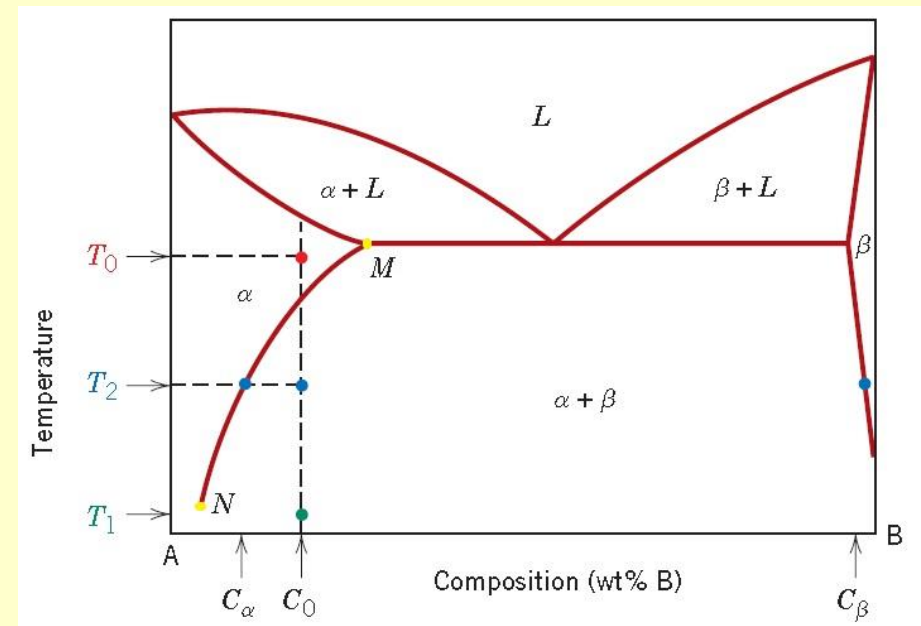
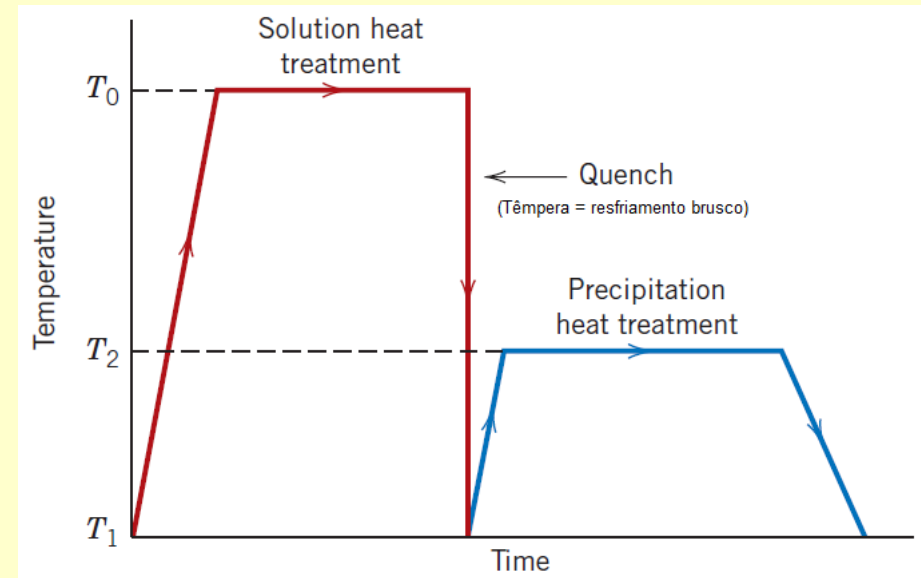
©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning,™ is a trademark used herein under license.

Região rica em Al do diagrama de fases Al-Cu mostrando as três etapas do tratamento térmico de endurecimento por precipitação e as respectivas microestruturas que são obtidas.

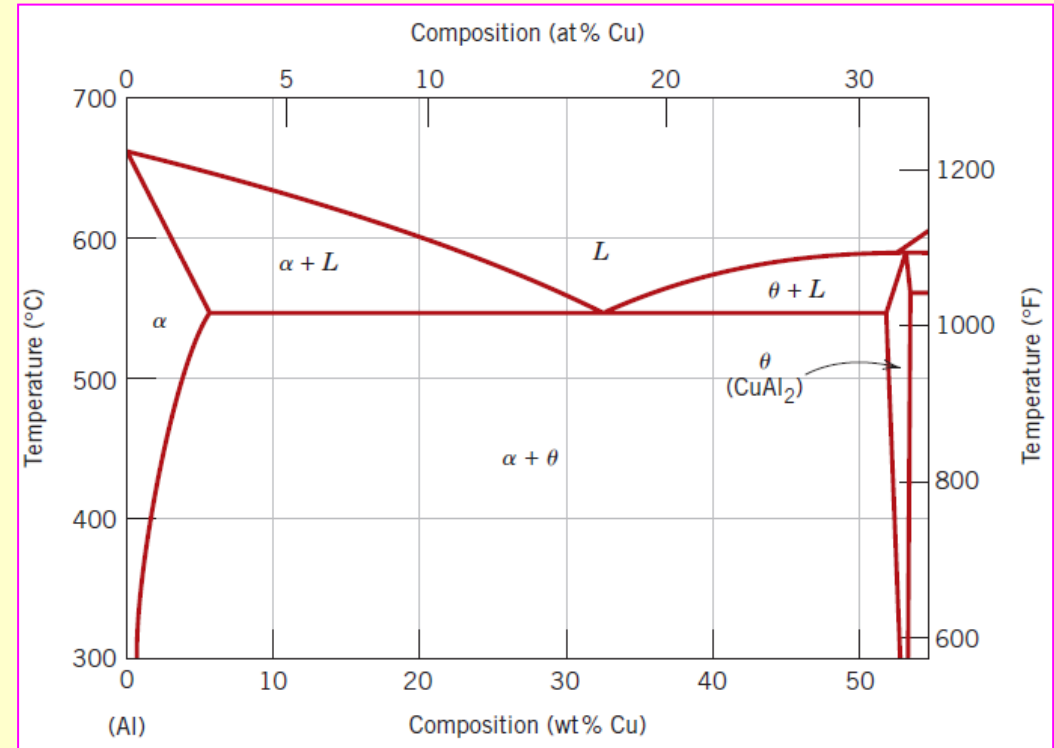
- O **endurecimento por precipitação** é obtido mediante dois tratamentos térmicos diferentes.
- O **primeiro** é um *tratamento térmico de solubilização* na temperatura T_0 , no qual todos os átomos do soluto são dissolvidos para formar uma solução sólida monofásica.
- Esse procedimento é seguido por um resfriamento rápido (*têmpera* ou “*quench*”) até a temperatura T_1 - difusão e formação de fase β é evitada.
- Dessa forma, *na temperatura T_1 existe uma situação de ausência de equilíbrio*, onde somente existe uma fase α supersaturada no componente B (em relação à composição da fase α que existiria no equilíbrio).



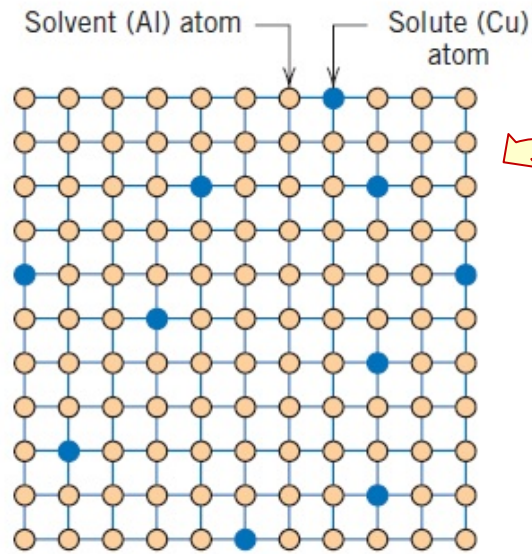
- No **segundo** tratamento térmico, o *tratamento térmico de precipitação*, a solução sólida com composição α supersaturada é aquecida à temperatura T_2 , localizada dentro da região bifásica ($\alpha + \beta$).
- Na temperatura T_2 , a velocidade de difusão começa a ficar apreciável.
- A fase β começa a precipitar na forma de cristais muito pequenos, de composição C_β .
- Com a manutenção do tratamento térmico à temperatura T_2 , esses cristais da fase β precipitada crescem.
- Decorrido o tempo adequado de tratamento à temperatura T_2 (também chamado de *tempo de envelhecimento*), o material é resfriado à temperatura ambiente.



- O endurecimento por precipitação é empregado comumente em ligas de alumínio de alta resistência.
- Esse mecanismo de endurecimento foi extensivamente estudado para as ligas alumínio-cobre.
- A natureza das partículas precipitadas e, subsequentemente, as propriedades mecânicas do material (resistência, ductilidade, dureza) dependem tanto da temperatura de precipitação T_2 , quanto do tempo de envelhecimento a essa temperatura.

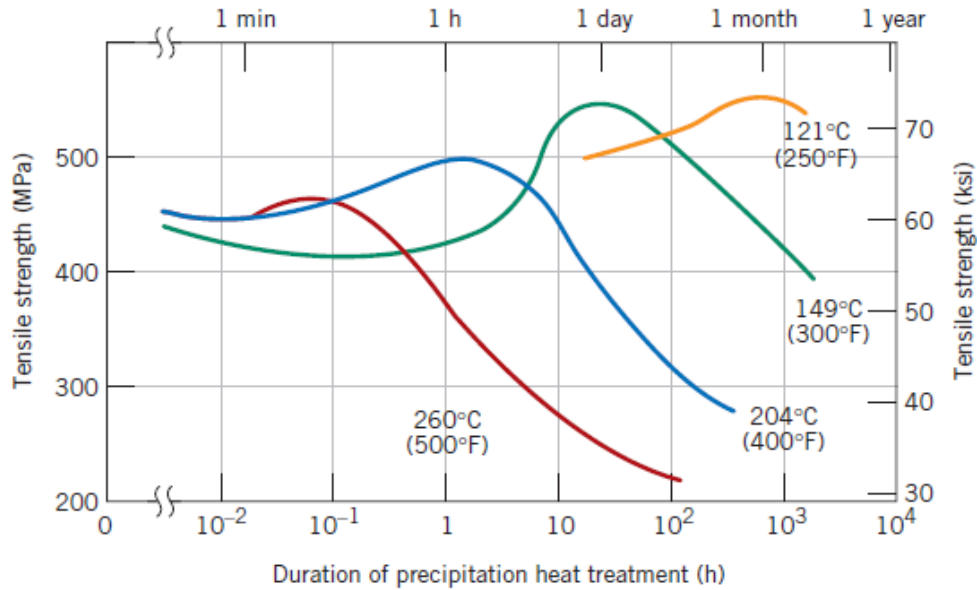
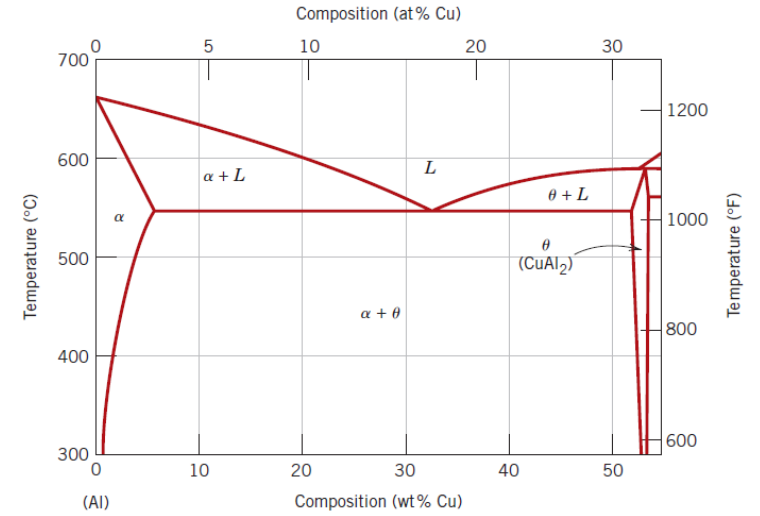


- Com o aumento do tempo, a resistência (ou dureza) aumenta, atinge um valor máximo e finalmente diminui.
- Essa redução na resistência e na dureza que ocorre após tempos de tratamento térmico excessivo é chamada de *superenvelhecimento*.

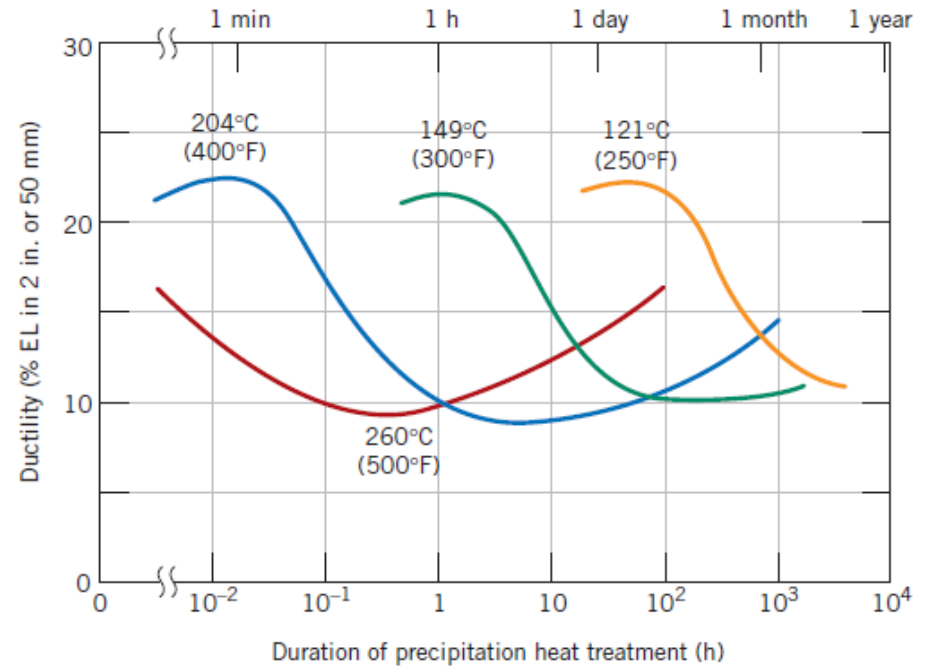


Fase α supersaturada
Início do tratamento térmico

(a)

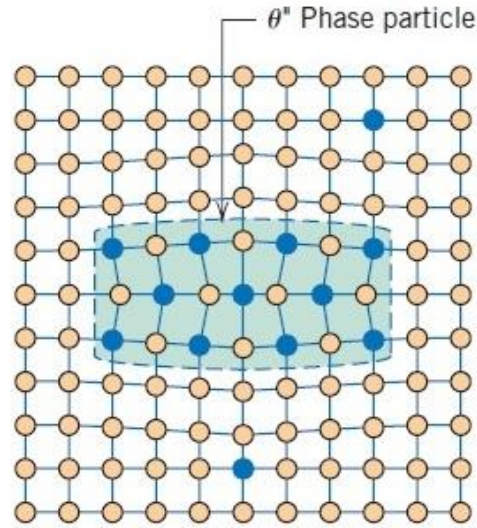


(a)

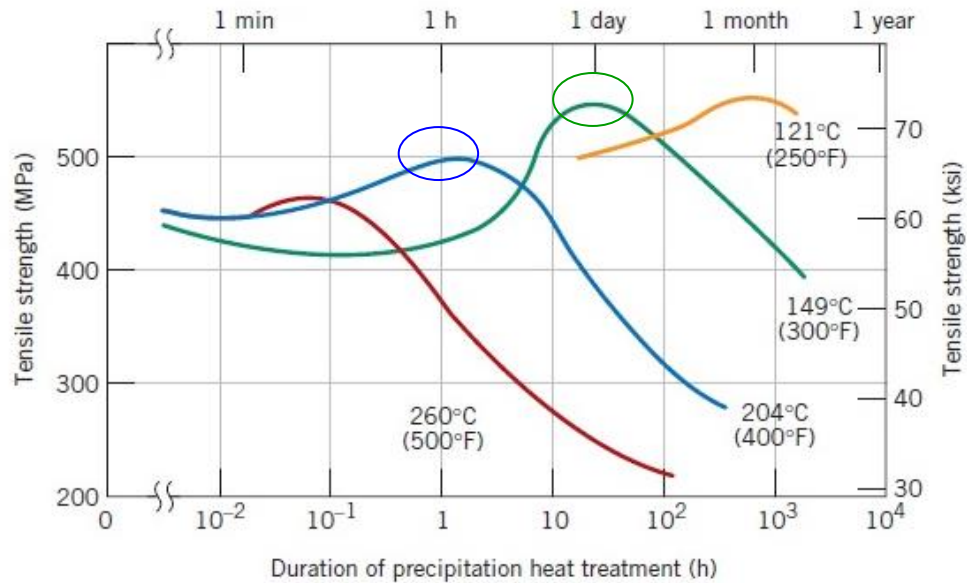


(b)

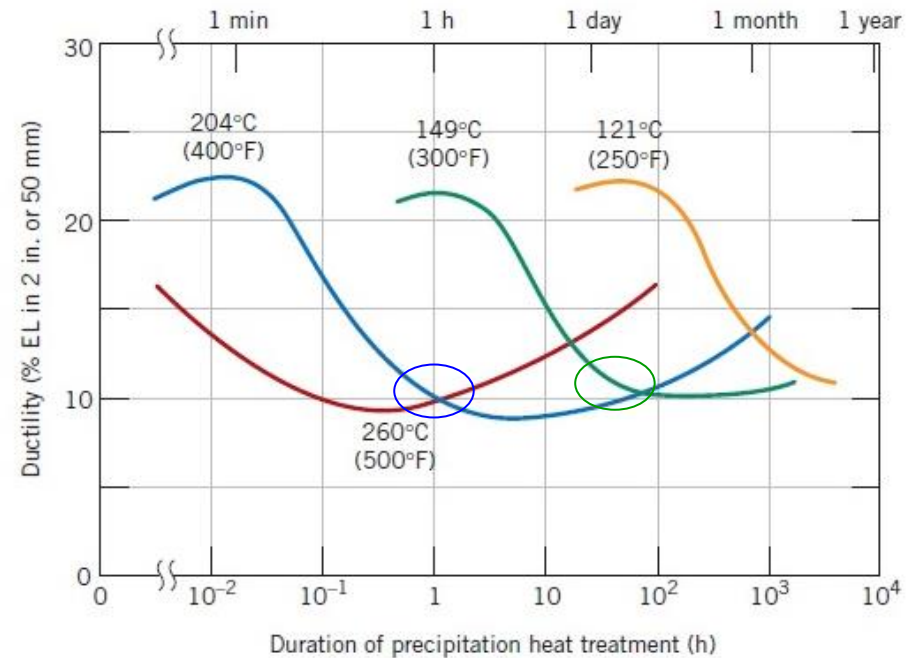
Partícula de precipitado de fase de transição θ'' (cristal pequeno; precipitado coerente) \rightarrow quando esses precipitados existem, o sistema atinge o máximo de resistência e o mínimo de ductilidade



(b)

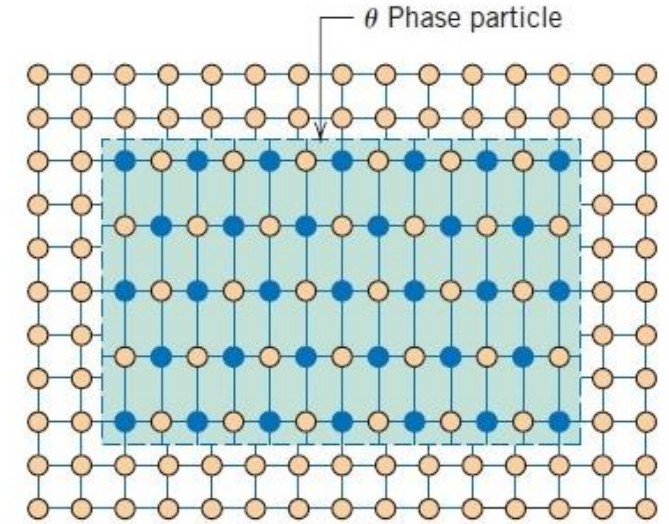


(a)

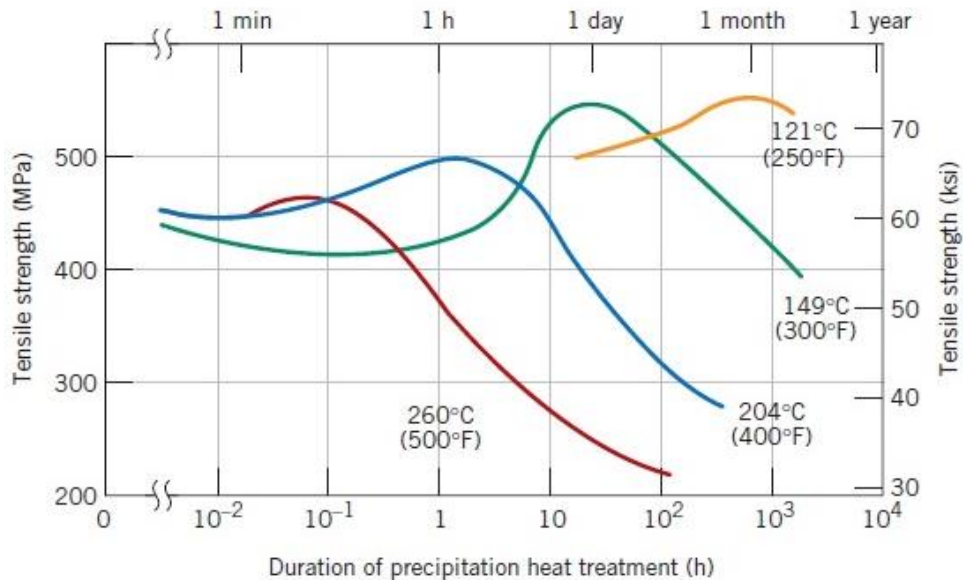


(b)

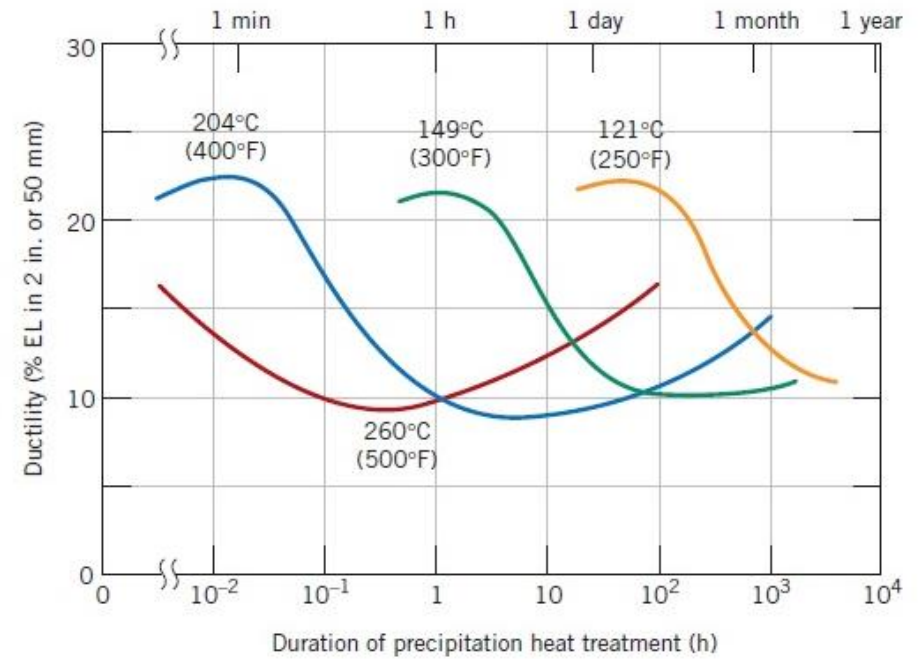
Partícula de precipitado de fase de equilíbrio θ (precipitado incoerente) \rightarrow quando esses precipitados crescem, a resistência do sistema cai, e atinge-se o estado de superenvelhecimento



(c)

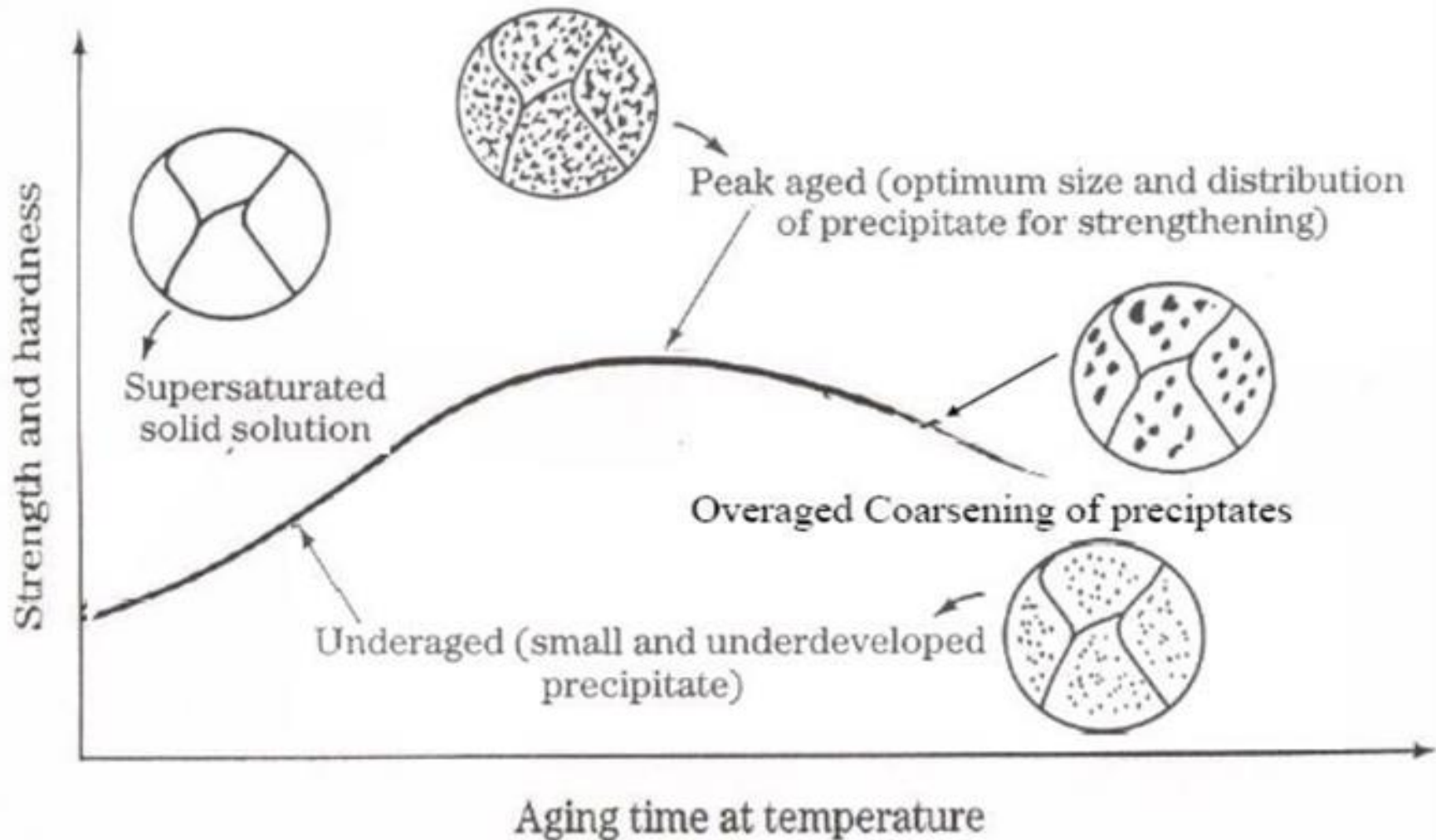


(a)



(b)

Strengthening Curve



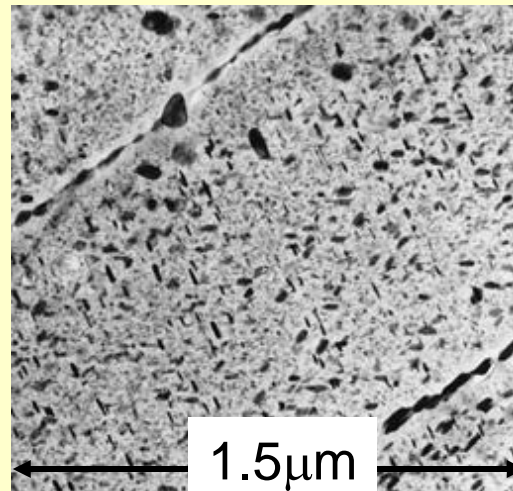
Application: Precipitation Strengthening

- Internal wing structure on Boeing 767



Adapted from chapter-opening photograph, Chapter 11, *Callister & Rethwisch 3e.* (courtesy of G.H. Narayanan and A.G. Miller, Boeing Commercial Airplane Company.)

- Aluminum is strengthened with precipitates formed by alloying.

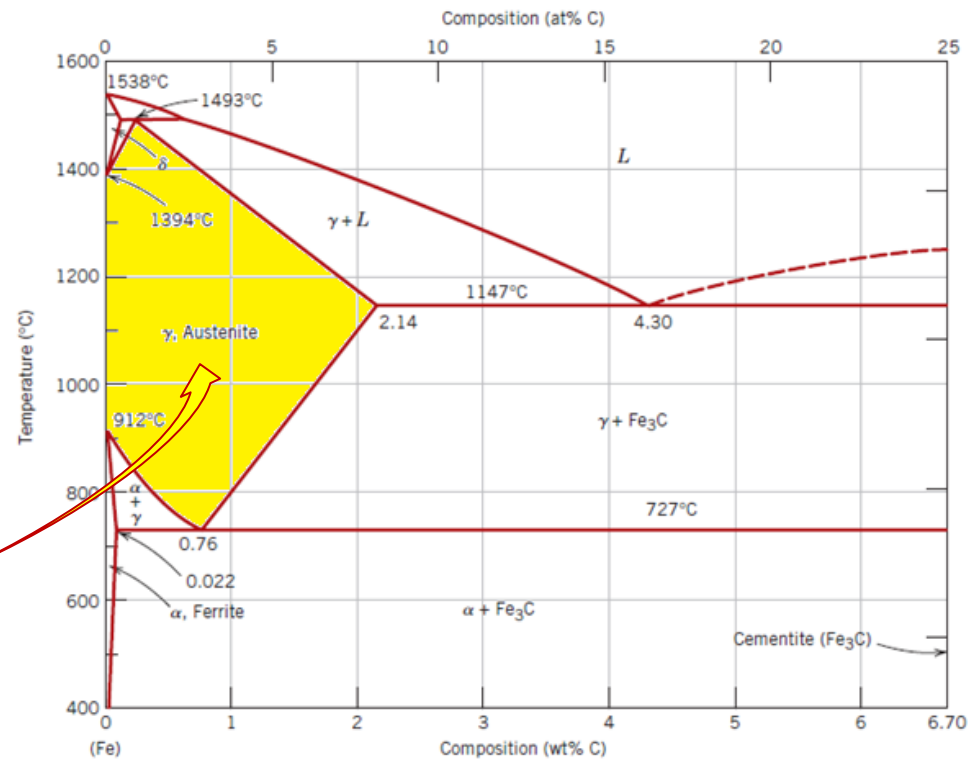


Adapted from Fig. 11.26, *Callister & Rethwisch 8e.* (Fig. 11.26 is courtesy of G.H. Narayanan and A.G. Miller, Boeing Commercial Airplane Company.)



Têmpera em Aços

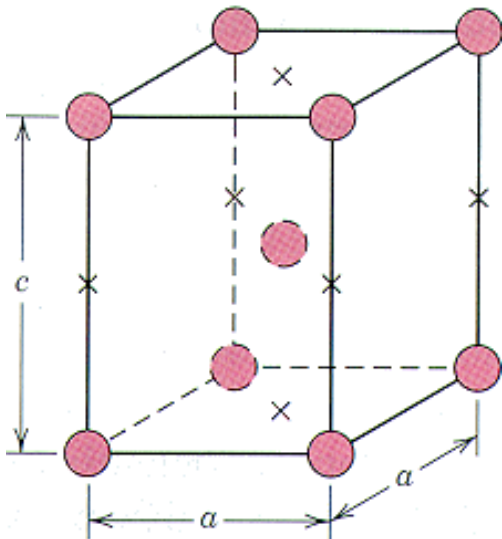
- O tratamento de **têmpera** do aço é descrito na Odisséia, (*atribuída a Homero*), obra escrita supostamente entre os séculos XII e VIII a.C. .
- A **TÊMPERA** consiste em resfriamento brusco (em água ou óleo) de aços com composições dentro do **campo austenítico**.
- Forma-se uma fase de não-equilíbrio (>0,6 % C) de morfologia acicular denominada **MARTENSITA**.
- A *transformação de fase austenita (CFC) para martensita (TCC) ocorre sem difusão* → transformações desse tipo recebem o nome de transformações martensíticas.



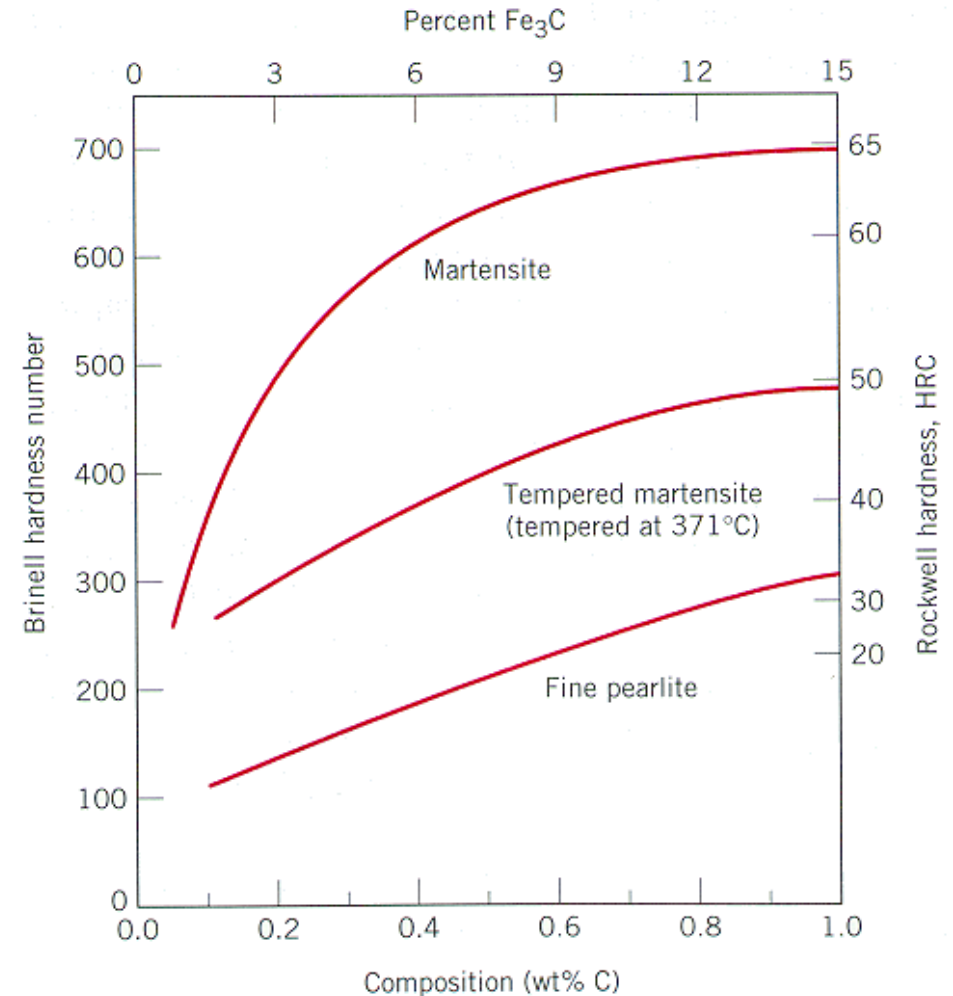
Plaquetas de martensita em um fundo de austenita retida.

Têmpera em Aços

A transformação martensítica ocorre quando a velocidade de resfriamento é rápida o suficiente para impedir a difusão do carbono.



- A martensita é uma fase dura e frágil.
- Sua dureza aumenta com o teor de carbono do aço.
- Sem tratamento térmico posterior à têmpera (*revenido*), o aço tratado não tem utilidade – é frágil demais !



Estrutura da **martensita** (TTC - tetragonal de corpo centrado) : os círculos indicam as posições dos átomos de Fe, enquanto os X indicam posições que podem ser ocupadas por átomos de C.

TÊMPERA

Aço aquecido a 1100°C e resfriado em água

Resultado: material muito frágil, que **quebra** com uma martelada

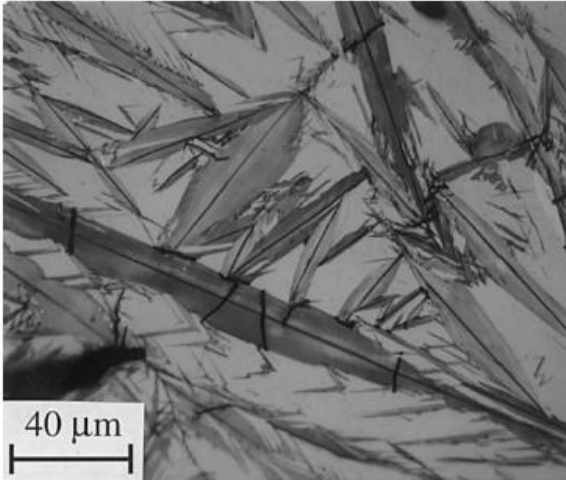


Fig. 5. Microstructure of plate martensite in an Fe-1.86 wt.% C alloy. Light micrograph. Courtesy of M.G. Mendiratta.

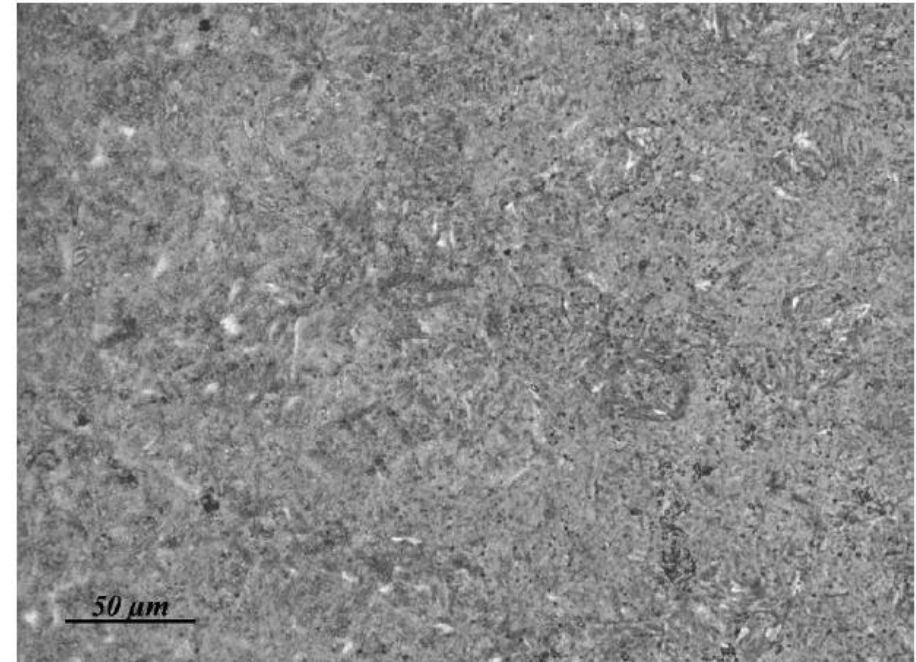
TÊMPERA E REVENIDO

- Aquecimento em temperaturas no campo austenítico.
- Resfriamento rápido = **Têmpera** → imersão em água, óleo, polímero, jato de ar,

Material resultante extremamente duro e frágil.

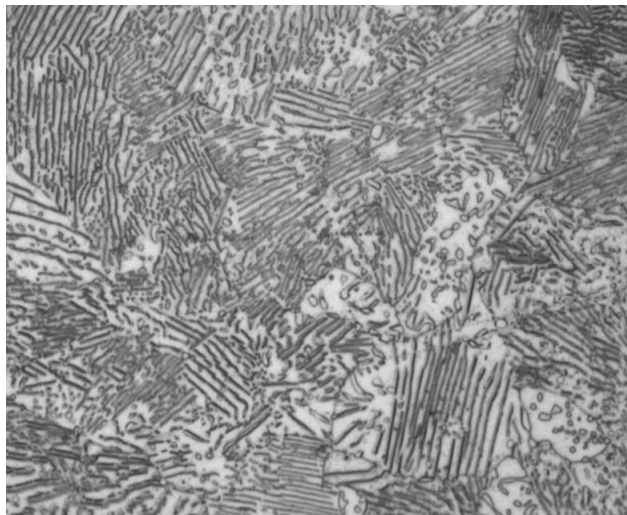
- Novo aquecimento a temperaturas relativamente baixas → 250°C-600°C, dependendo da composição do aço = **Revenido**.
- Resfriamento ao ar

Resultado: *material de alta dureza e alta tenacidade.*



Aquecido a 1100°C e
resfriado ao ar

Resultado: material mais tenaz, que **amassa** com uma martelada

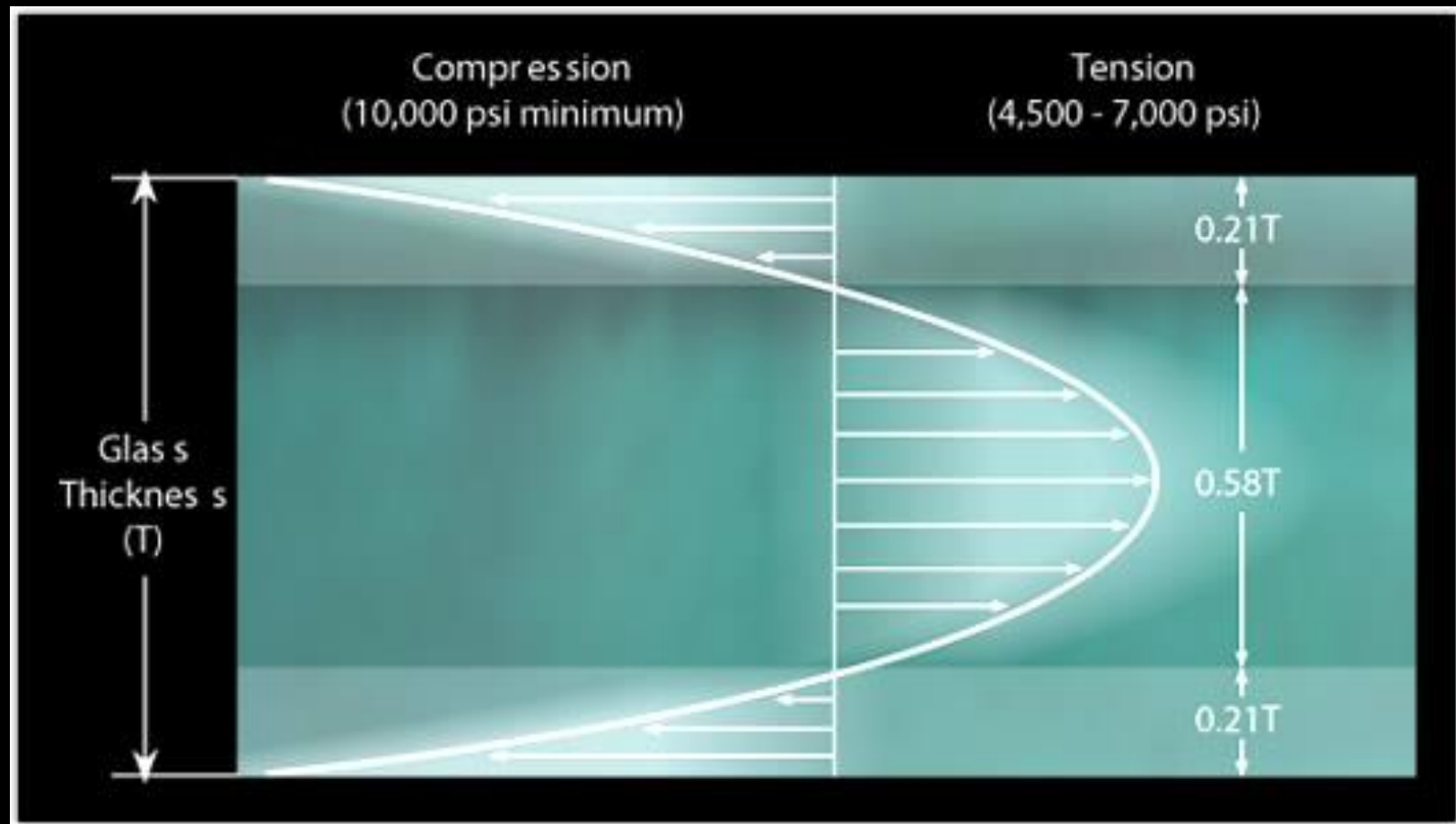


Endurecimento Superficial de Vidros – TÊMPERA

- ...novamente falando de vidros : é interessante falar da *TÊMPERA TÉRMICA DE VIDROS* neste momento, pelo fato de que esse processo de endurecimento superficial de vidros tem o mesmo nome do processo de têmpera em aços, embora o mecanismo envolvido em cada um deles seja completamente diferente !
- Nos dois casos – aços e vidros – o processo se chama **TÊMPERA** → envolve um resfriamento brusco dos materiais que estão sendo processados.
- No caso dos vidros, o resfriamento brusco induz tensões superficiais de compressão que *impedem a formação e/ou dificultam a propagação de trincas superficiais*, o que torna *os vidros mais resistentes e mais duros*.

Endurecimento Superficial de Vidros – TÊMPERA

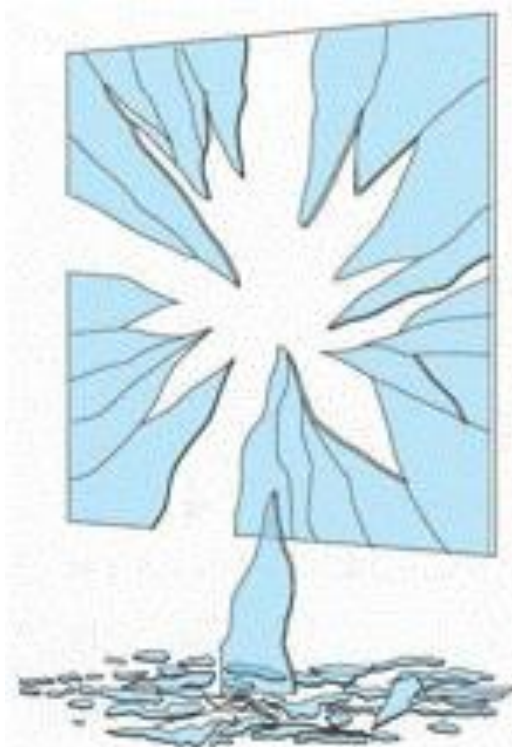
- O resfriamento rápido realizado no processo de têmpera cria um perfil de tensões de compressão na superfície e de tração no interior das peças termicamente tratadas.



Endurecimento Superficial de Vidros – TÊMPERA

- Para causar a fratura de uma peça de vidro temperado, uma tensão de tração externa deverá ser capaz de ser suficientemente grande para superar a tensão residual de natureza compressiva da superfície, e além disso tensionar adicionalmente a superfície o suficiente para criar uma trinca.
- Essa trinca, para se propagar, deverá conseguir superar as tensões de compressão que existem na camada superficial da peça.
- Se uma trinca conseguir atingir a região interna, que está submetida a tensões de tração, ela se propagará de forma catastrófica pela grande liberação das tensões existentes nessa → a peça quebrará de forma praticamente instantânea, em cacos pequenos e arredondados.

vidro comum



vidro temperado



...finalizando Controle de Propriedades...

- Ao final do estudo dos conteúdos desta Unidade você deve ser capaz de:
 - descrever a relação entre o movimento de discordâncias e a deformação plástica em materiais metálicos.
 - descrever o mecanismo de endurecimento de metais por encruamento.
 - descrever os mecanismos que ocorrem em um tratamento de recozimento de metais: recuperação, recristalização e crescimento de cristais.
 - descrever o mecanismo de endurecimento de metais por refino de grãos.
 - descrever o mecanismo de endurecimento de metais por solução sólida, bem como os chamados tratamentos termoquímicos (tratamentos de endurecimento superficial).
 - descrever o mecanismo de endurecimento de metais por precipitação.
 - descrever brevemente o mecanismo de têmpera de aços.
 - descrever os mecanismos de aumento de resistência mecânica de vidros que foram apresentados: têmpera térmica e têmpera química.

Referências – Unidade 10

- **Callister, W.D.** Materials Science and Engineering: An Introduction. 7th Ed. Wiley. 2007. Cap. 7, Seções 7-8 a 7-13; Cap.11, Seção 11-9; Têmpera (martensita) : Cap.10, Seções 10-5 e 10-8; Têmpera de Vidros: Cap. 13, Seção 13-9.
 - Obs.: outras edições do livro do Callister existentes nas bibliotecas da EP, em inglês ou português, também cobrem o conteúdo apresentado nesta Unidade.
- **Askeland, D.R.; Phulé, P.P.** Ciência e Engenharia dos Materiais. Cengage Learning. 2008. Cap. 8; Cap. 10, Seções 10-4; Cap. 11, Seção 11-1.
- **Padilha, A.F.** – Materiais de Engenharia. Hemus. São Paulo. 1997. Cap. 15 .