

ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS I

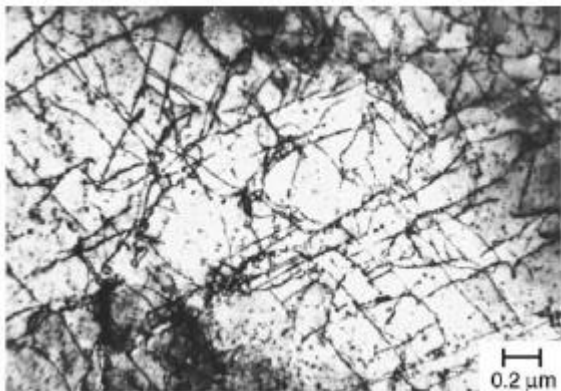
Aula 5

Conteúdo: Mecanismos de Aumento de Resistência em
Metais

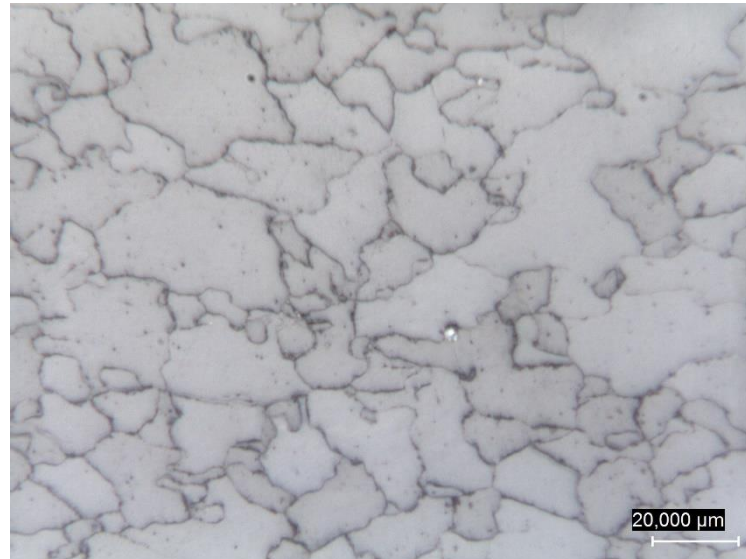
Estrutura Cristalina, Defeitos e Propriedades Mecânicas

- A **manipulação adequada** dos diversos tipos de defeitos nos cristais é, talvez a principal ferramenta do Engenheiro de Materiais para o desenvolvimento de materiais com propriedades desejadas.

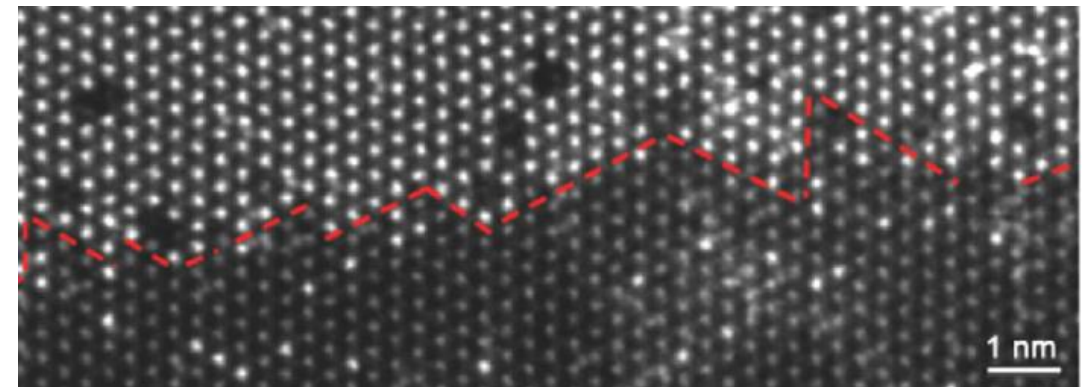
Controla deformação plástica.



Restringe movimento das discordâncias, entre outras coisas.



Controla fenômenos de difusão, auxilia no processo de endurecimento por precipitação.



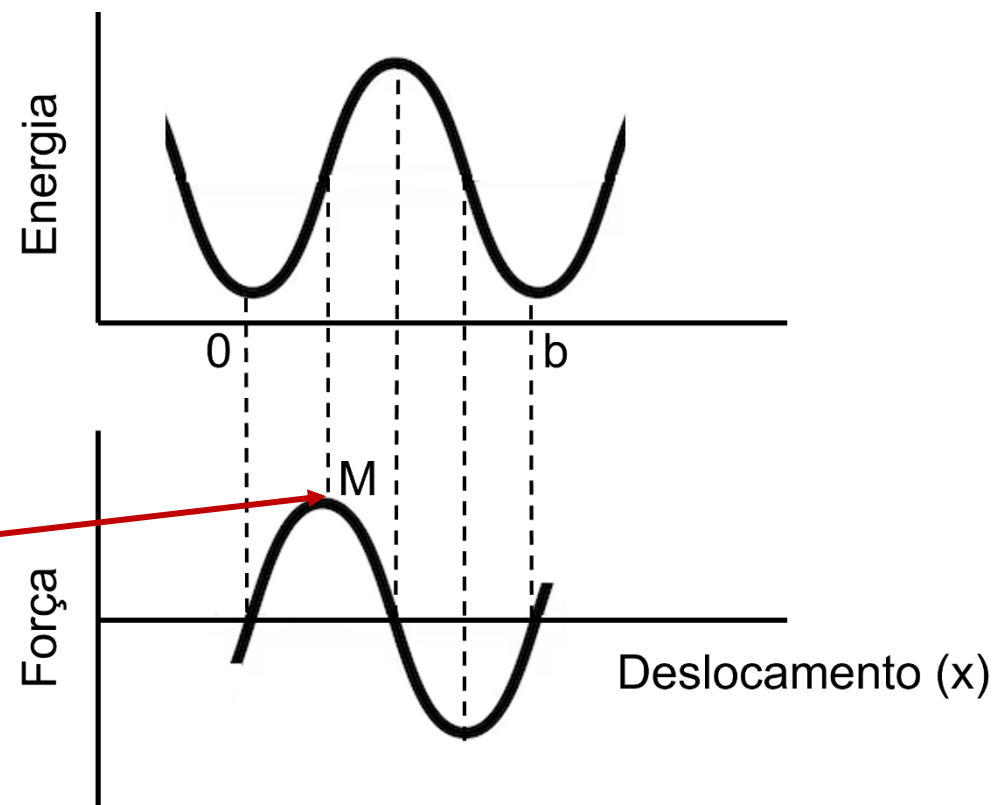
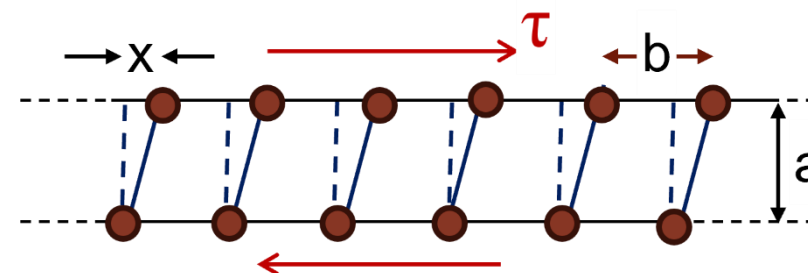
Discordâncias nos Metais

- Os **níveis de resistência** à deformação plástica **observados experimentalmente** nos metais são muito **inferiores as previsões** de resistência teórica.
- A tensão de cisalhamento necessária para essa movimentação é periódica.

$$\tau = \tau_{max} \sin\left(\frac{2\pi x}{b}\right)$$

- Pode-se mostrar que, nessas condições:

$$\tau_{max} = \frac{Gb}{2\pi a}$$

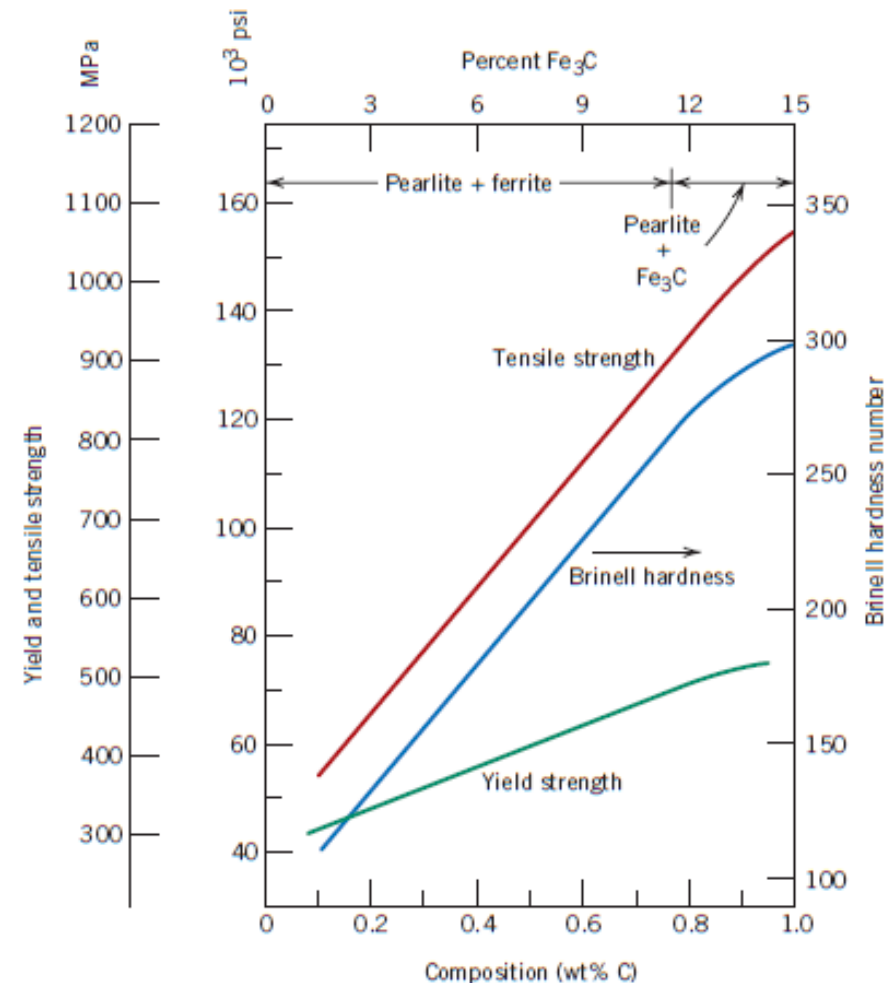


Discordâncias nos Metais

- Em geral, nos metais, $b/a \cong 1$, então:

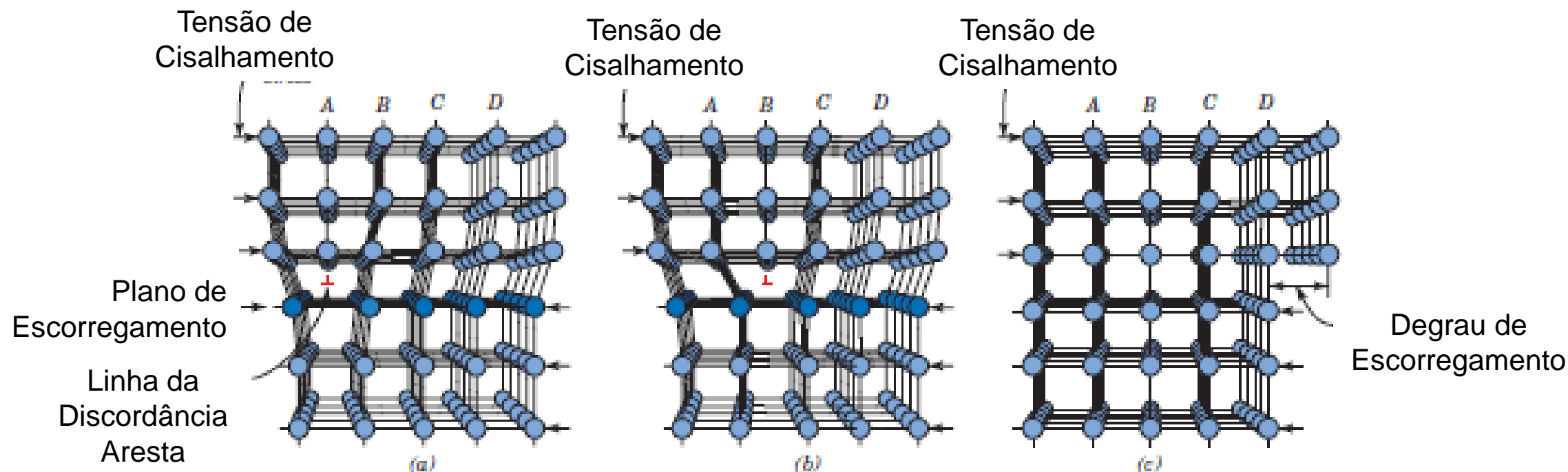
$$\tau_{max} = \frac{Gb}{2\pi a} \cong \frac{E}{10}$$

- Por exemplo, cobre puro que tem $E=128$ GPa, após conversão entre tensão de cisalhamento e tensão em tração, retornaria um limite de escoamento de:
- $\sigma_{max} \cong 12.8$ GPa
- Isso significa que ele conseguiria suspender um carro médio, com um fio de menos de 1 mm de diâmetro!

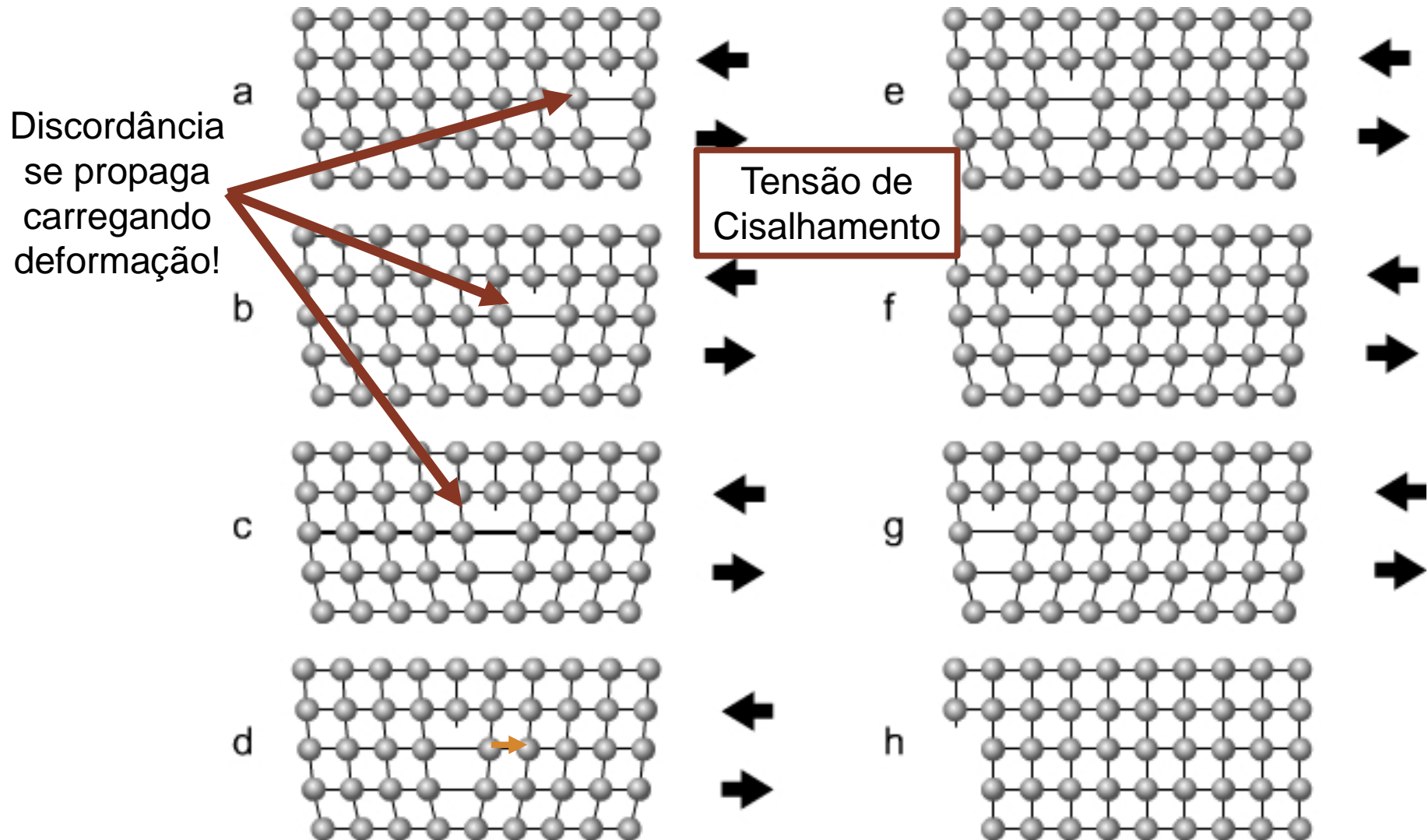


Discordâncias nos Metais

- A razão para essa **discrepância** é explicada pela **teoria de discordâncias**, que descreve os mecanismos de deformação plástica nos metais.

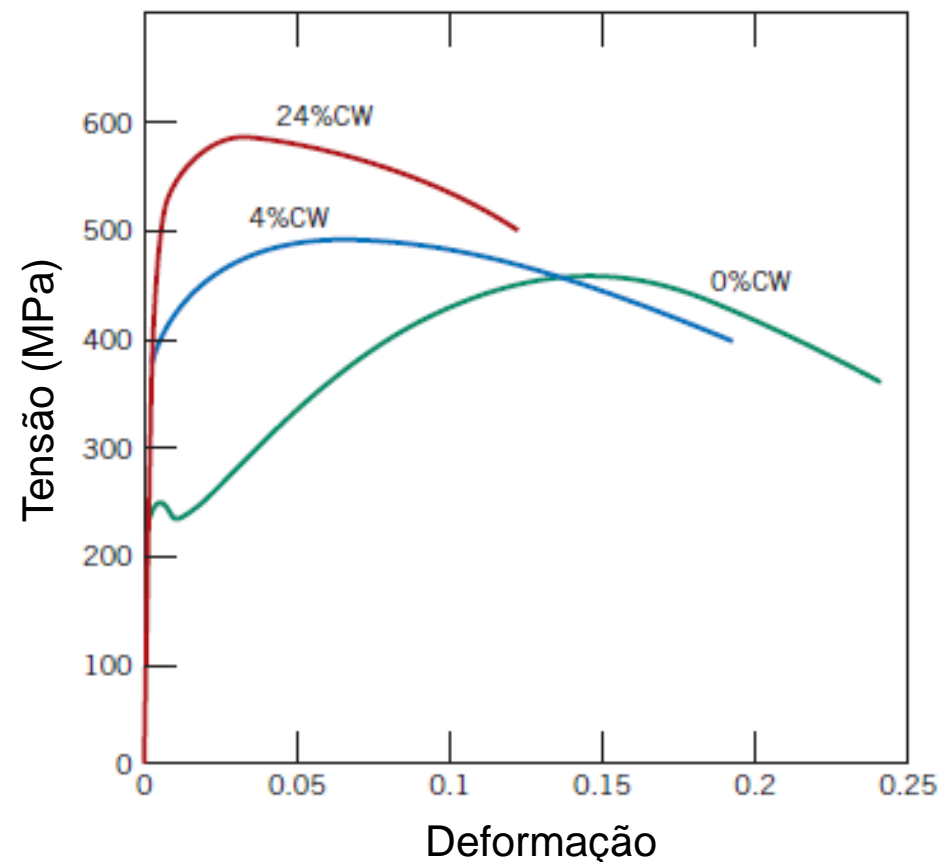


Discordâncias nos Metais



Discordâncias nos Metais

- A facilidade de um metal se deformar plasticamente depende da facilidade com a qual as discordâncias se movem na estrutura cristalina.
- **Reduzindo sua mobilidade**, a resistência mecânica à deformação plástica aumenta, ou seja, o **metal fica endurecido**.
- Compreender **como os aspectos microestruturais influenciam a mobilidade** desse defeito, é crucial para entendermos os mecanismos de endurecimento.



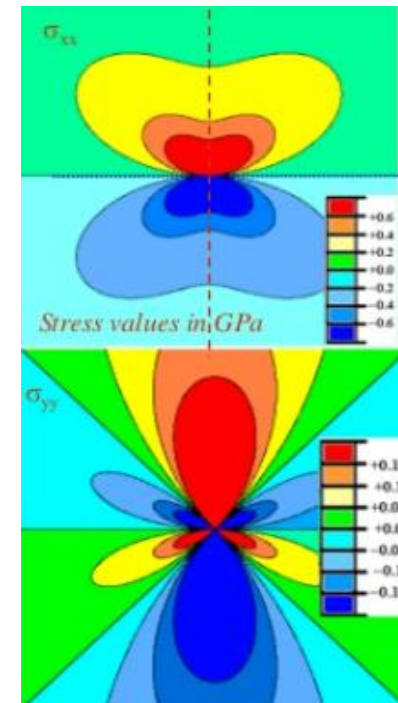
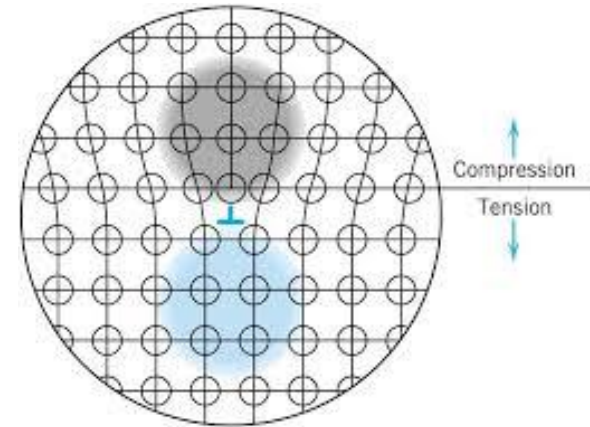
Curvas de Tensão – deformação de Engenharia para um aço-C em diferentes deformações plásticas.

Como Mover uma Discordância?

- Discordância tem seu campo de tensões
- Há uma interação entre este campo e a tensão aplicada
- Equação de Peach-Koehler – Força (F) sob uma discordância (por unidade de comprimento)

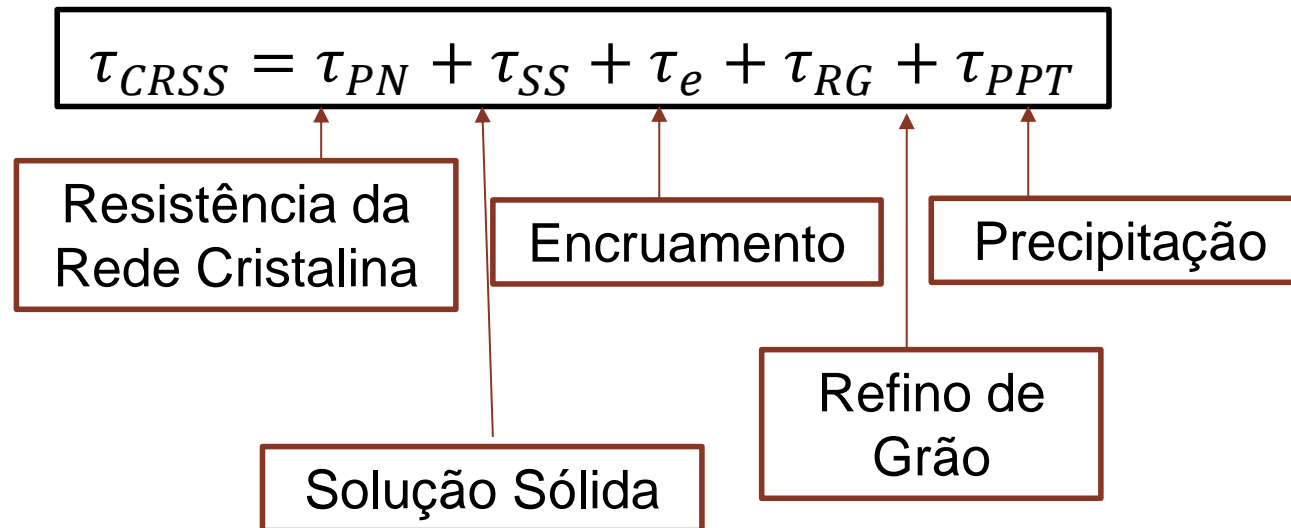
$$F = \tau b$$

- τ - Tensão de cisalhamento – Só tensão de cisalhamento move discordâncias!
- **Discordância só se moverá se τ_{aplicado} for maior que um certo valor (o τ_{CRSS})**
- **Mas o que controla τ_{CRSS} ???**

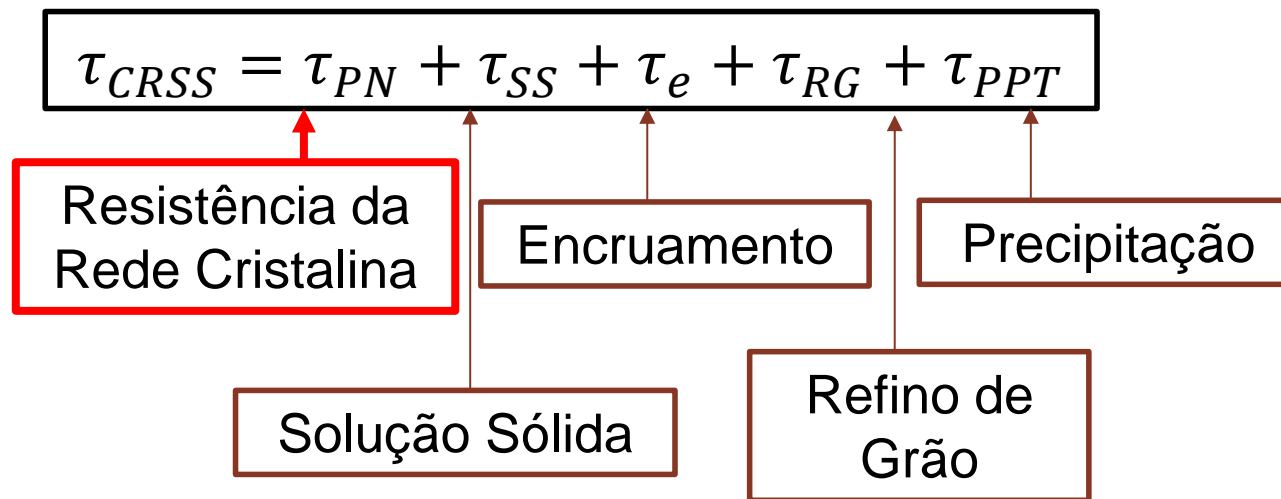


A Resistência de um Metal

τ_{CRSS} possui várias contribuições!
Ter em mente que τ_{CRSS} é a tensão para mover discordâncias
Ou seja, para **deformar o material**



A Resistência da Rede Cristalina



A Resistência da Rede

- **Tensão de Peierls-Nabarro** - Tensão necessária para mover uma discordância
- Uma aproximação, para nos dar a ordem de grandeza:

$$\tau_{PN} = G \exp\left(-\frac{2\pi d}{b[1 - \nu]}\right)$$

- d – espaçamento interatômico do plano de escorregamento
- b – vetor de burgers
- ν – Módulo de Poisson
- G – Módulo de Cisalhamento

Tensão para Mover uma Discordância no Cobre

- **Vamos calcular:**

- **Plano (111) = 2.073 Å**
- **b = 2.556 Å**
- **G = 128 GPa**
- **v = 0.33**

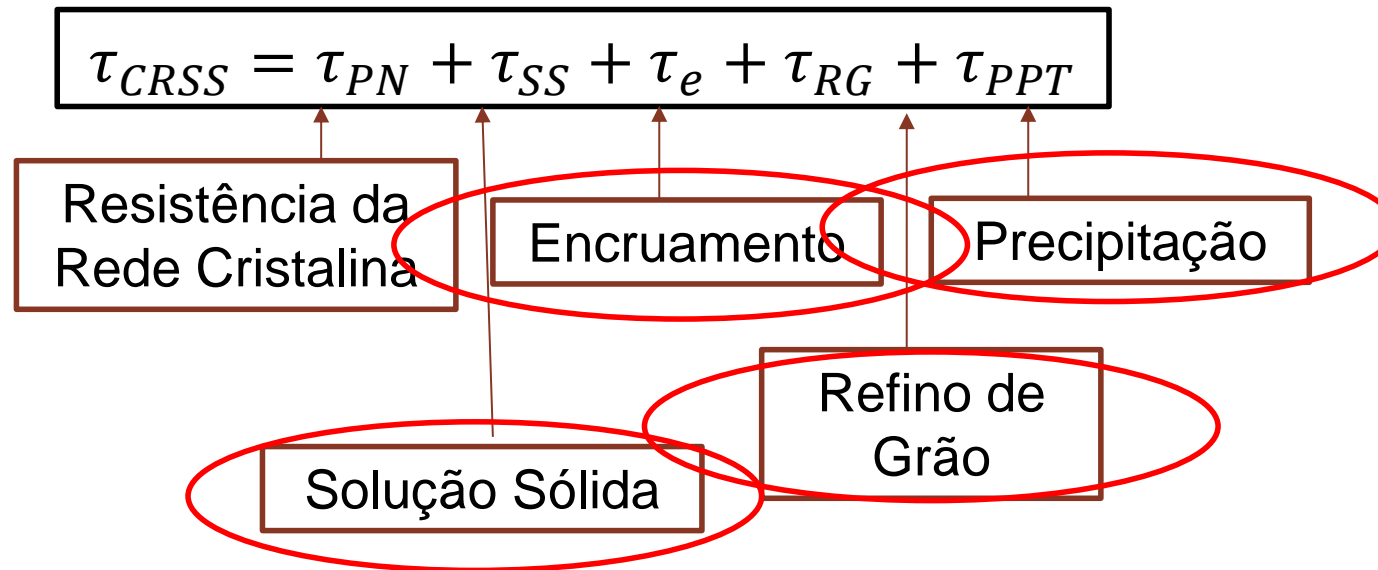
$$\tau_{PN} = G \exp\left(-\frac{2\pi d}{b[1-v]}\right)$$

- **Cobre – escoamento calculado de 63 MPa**

- Comparar com os 12.8 GPa calculado para resistência teórica – 200 vezes menor!
- “Fio” de 2.0 cm para levantar o carro

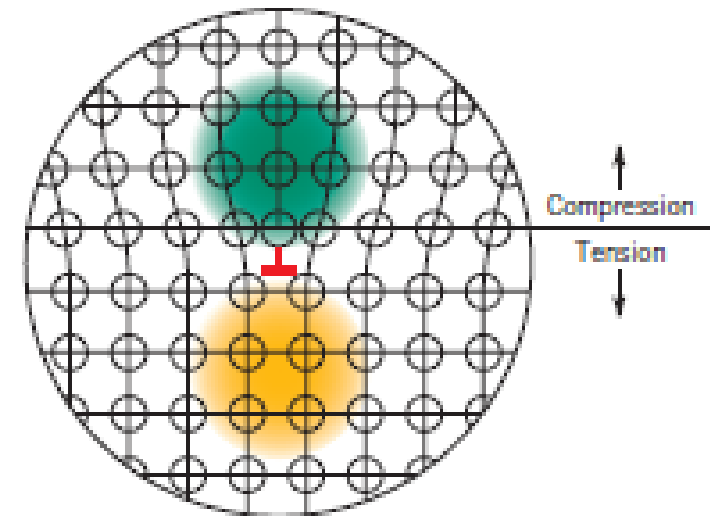
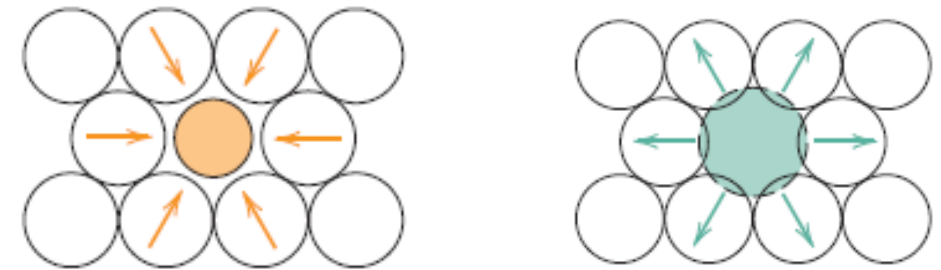
A Resistência de um Metal

τ_{CRSS} possui várias contribuições!
Ter em mente que τ_{CRSS} é a tensão para mover discordâncias
Ou seja, para **deformar o material**

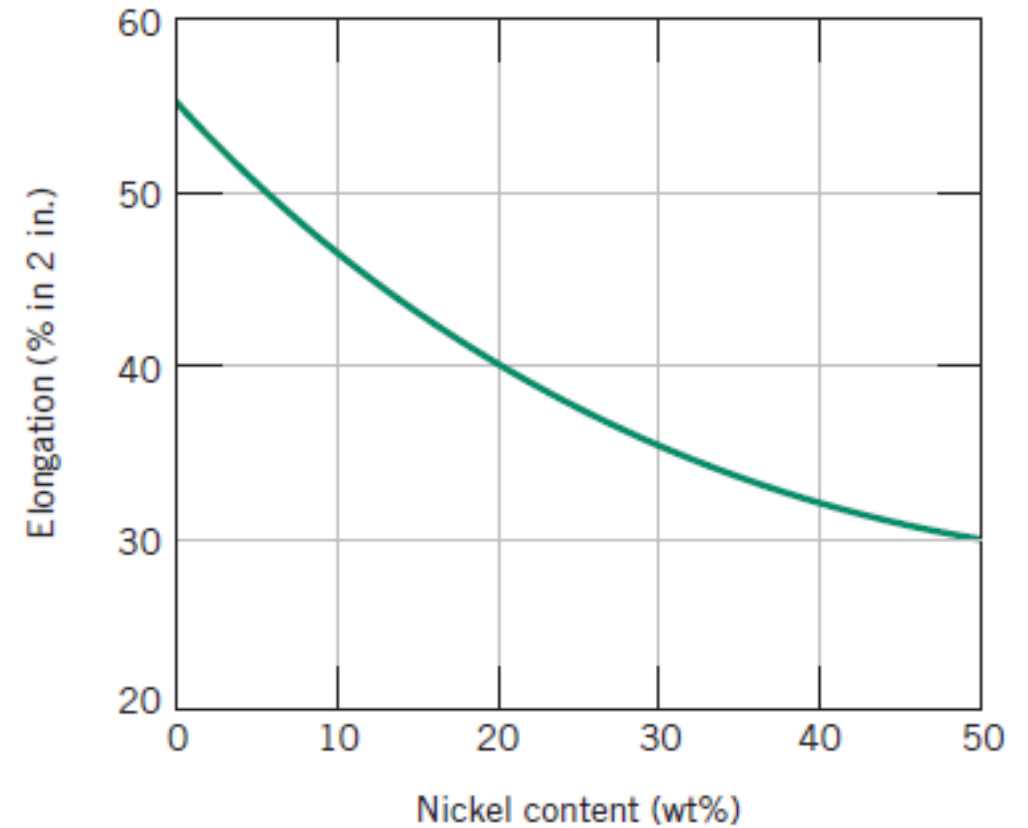
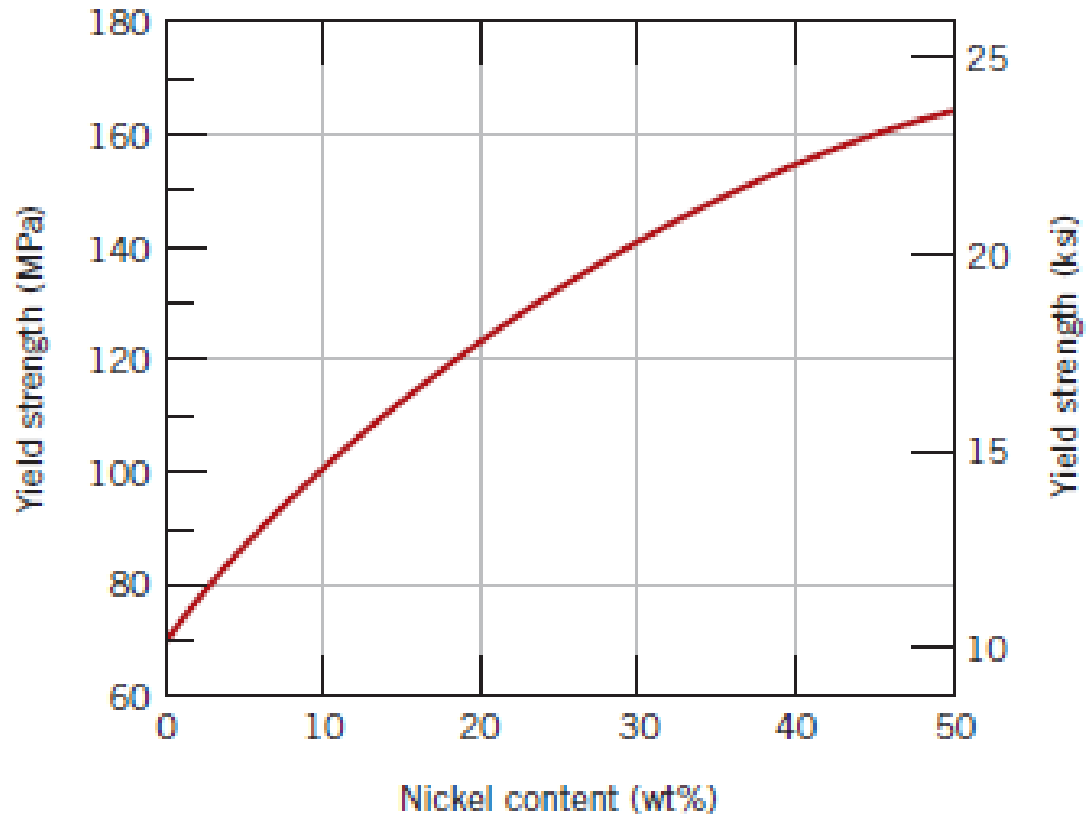


Endurecimento por Solução Sólida

- Átomos de impureza, substitucionais ou intersticiais aumentam o limite de escoamento " σ_y " e o limite de resistência a tração, com redução da ductilidade.
- Os **átomos de impureza** normalmente **impõem deformações** sobre a rede do átomo hospedeiro.
- Como consequência **interações de repulsão entre os campos** de deformação das discordâncias e próximos dos átomos de soluto, **restringem a movimentação** de linhas de discordância.



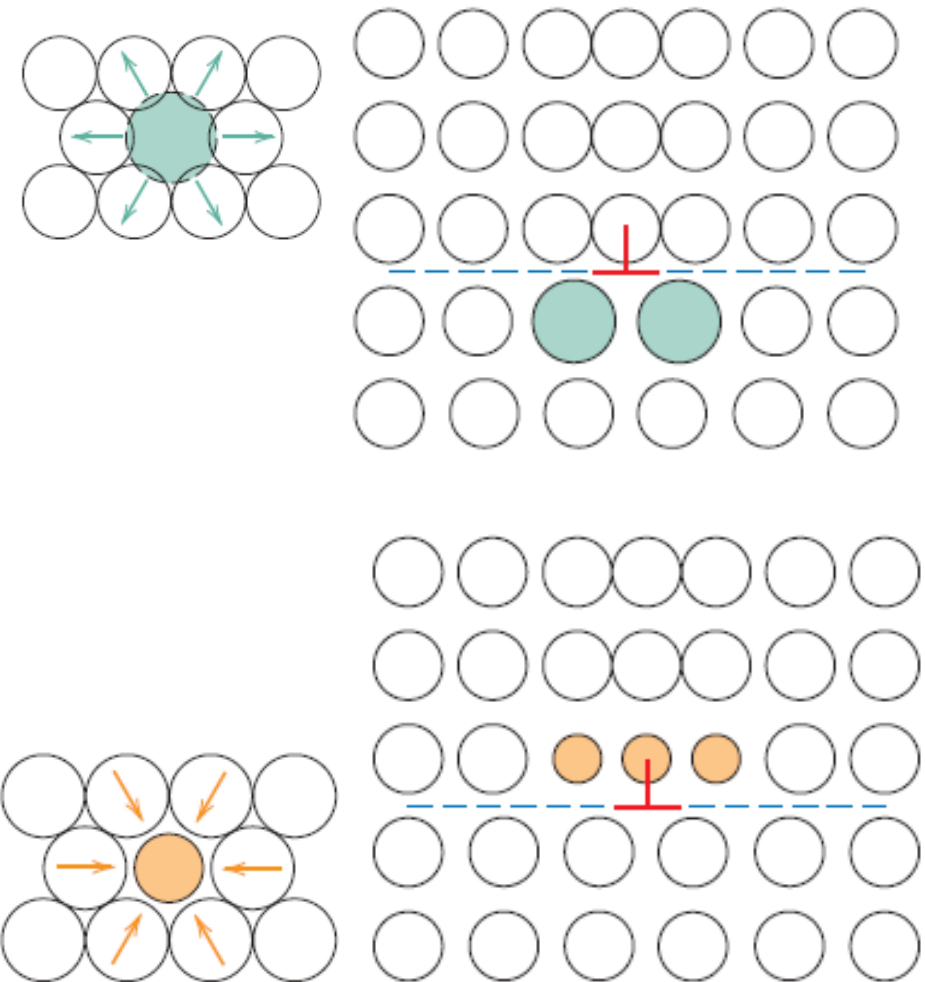
Endurecimento por Solução Sólida



Influência nas propriedades mecânicas da adição de Níquel no Cobre.

Endurecimento por Solução Sólida

- Os solutos tendem a se difundir e segregar ao redor de linhas de discordância de modo a reduzir a energia de deformação global do material.
- Assim, eles restringem a movimentação das discordâncias pois, isso causaria um aumento da deformação total da rede.

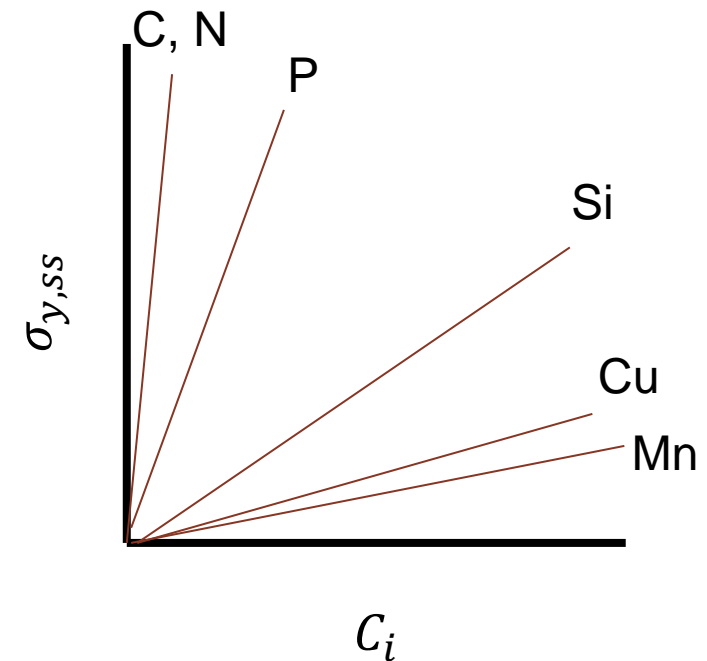


Endurecimento por Solução Sólida

- Quando adicionados em **pequenas quantidades**, muitas vezes o efeito de **endurecimento por solução sólida** em uma liga pode ser **aproximada** por um comportamento linear, como:

$$\Delta\sigma_{y,ss} = k_i C_i$$

onde “ k_i ” é o coeficiente de endurecimento do componente “ i ” e “ C_i ” a concentração.

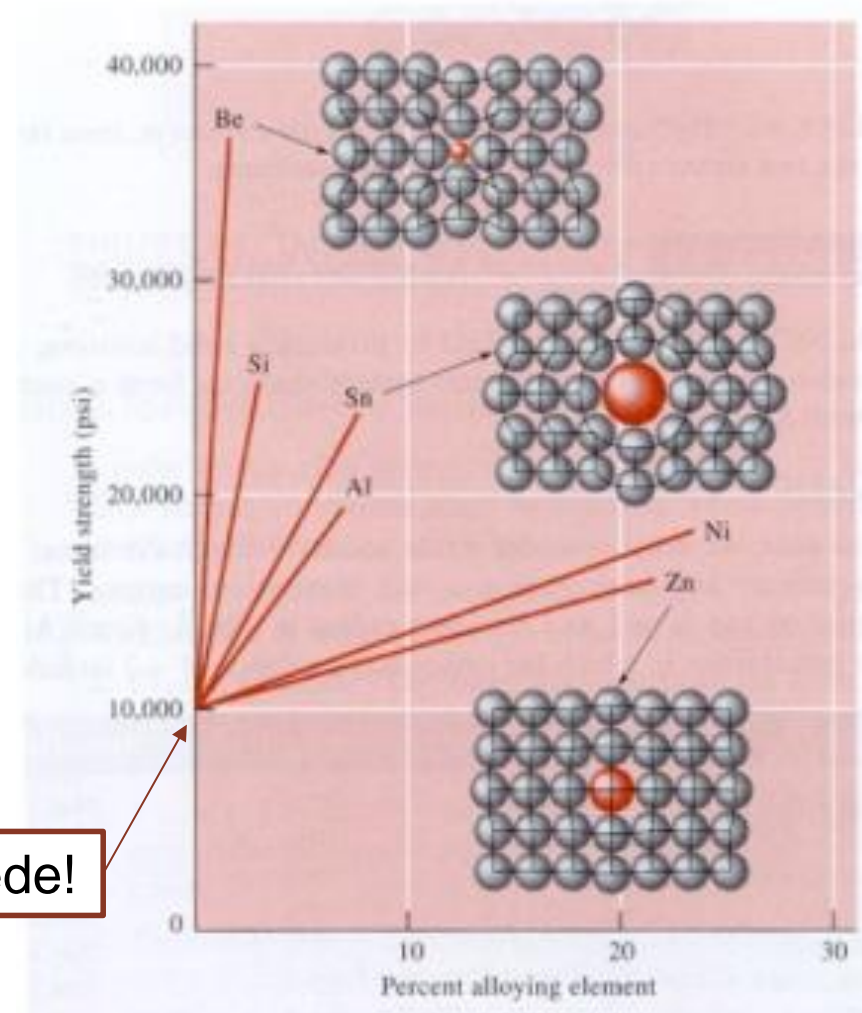


Efeitos de pequenas adições (até ~2% massa) na ferrita.

Endurecimento por Solução Sólida

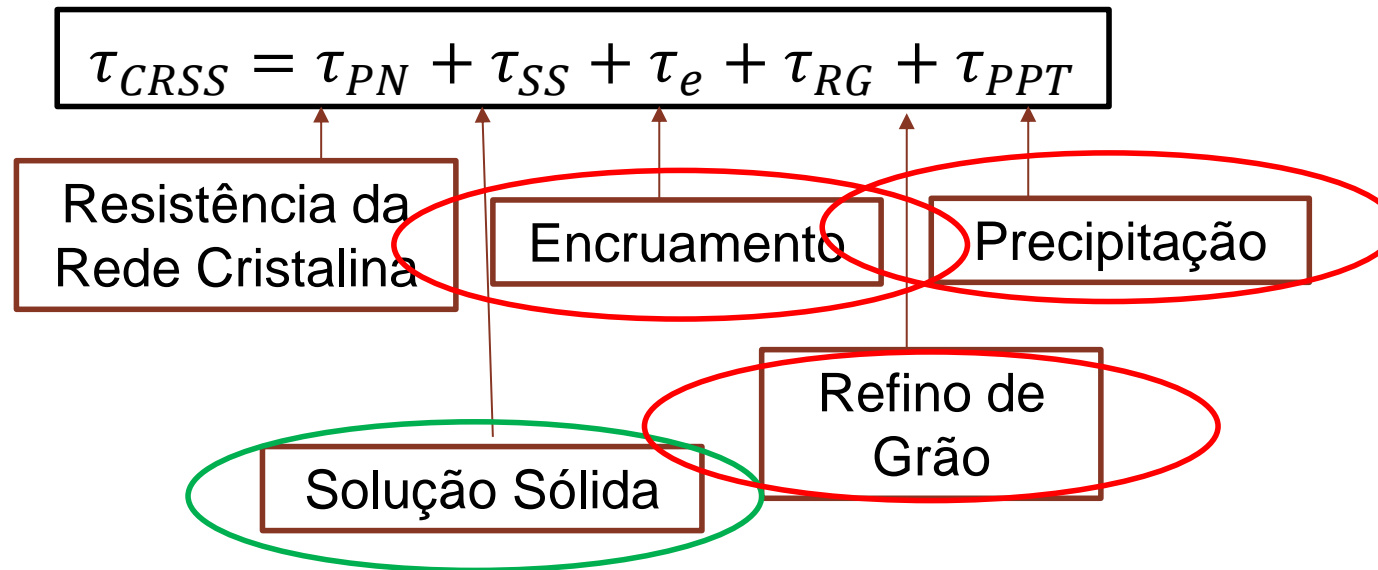
- Elementos de liga na ferrita ($\text{Fe } \alpha$)
- Notar – átomos muito maiores ou menores
 - Causam maior endurecimento
- Átomos relativamente similares
 - Menor endurecimento

Somente a resistência da rede!



A Resistência de um Metal

τ_{CRSS} possui várias contribuições!
Ter em mente que τ_{CRSS} é a tensão para mover discordâncias
Ou seja, para **deformar o material**

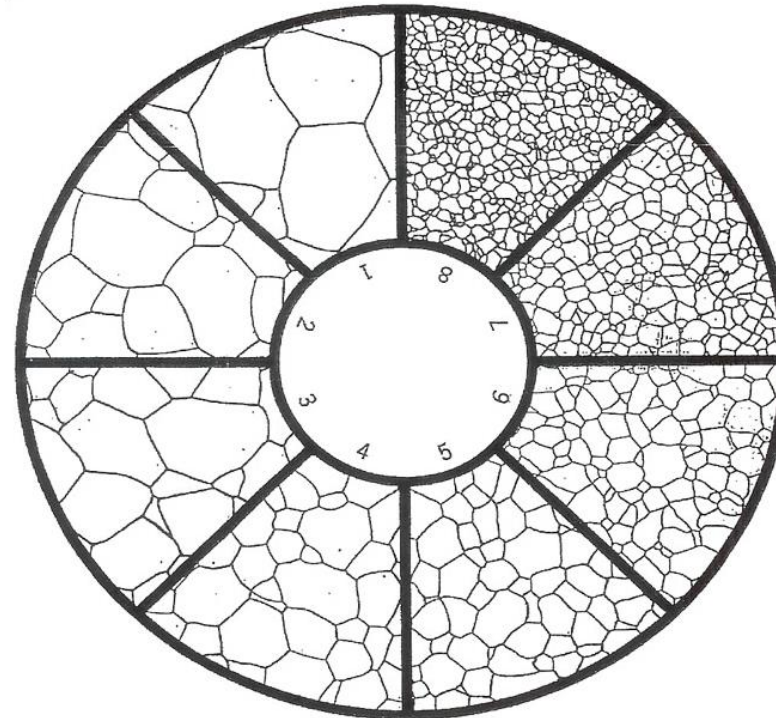


E se meu Grão for Refinado?

- Policristais tem uma importante contribuição para a resistência mecânica devido ao refino de grão
- Esta contribuição é importante em quase todos os materiais metálicos comerciais!

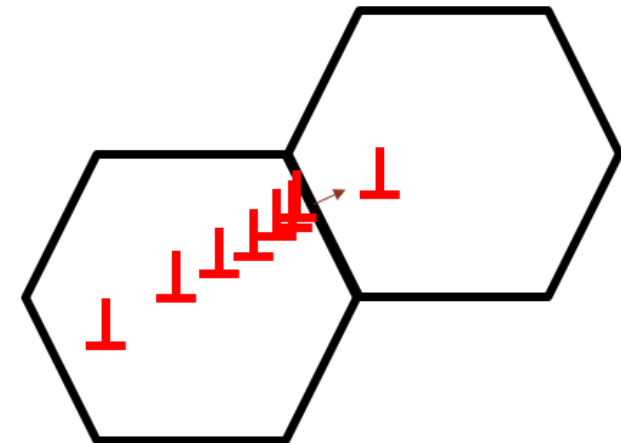
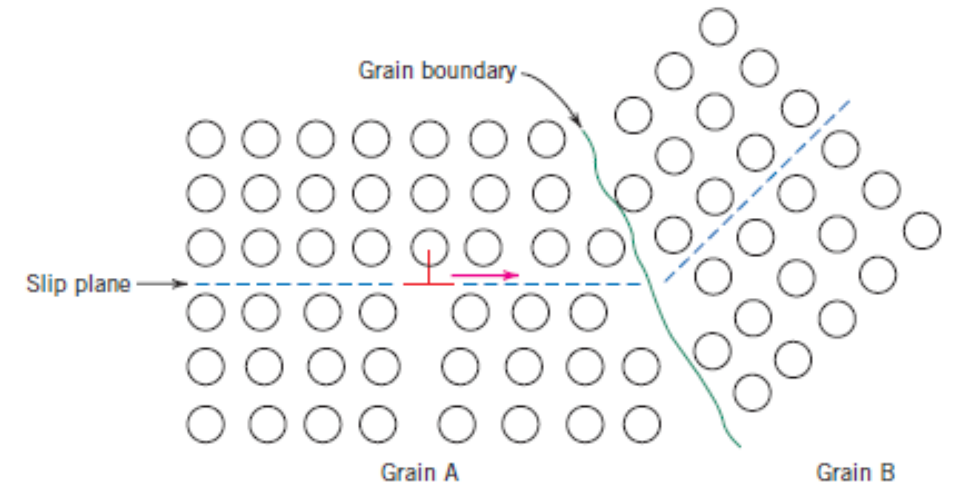
Materiais podem ter diferentes tamanhos de grão!

Ex. manter um material em alta temperatura por certo tempo leva ao crescimento dos grãos



Endurecimento por Refino de Grão

- Linhas de discordância que estejam escorregando em um dos grãos, quando chegam no contorno, não conseguem continuar sua movimentação.
- Isso leva a um **acúmulo de discordâncias no contorno** e um aumento nos campos de deformação e tensão do mesmo.
- **Quanto maior o tamanho de grão, maior o número de discordâncias que vão se concentrar** no contorno e maior será a tensão no grão a frente que ainda não se deformou. Ou seja, mais facilmente o grão adjacente vai se deformar para uma dada tensão aplicada.



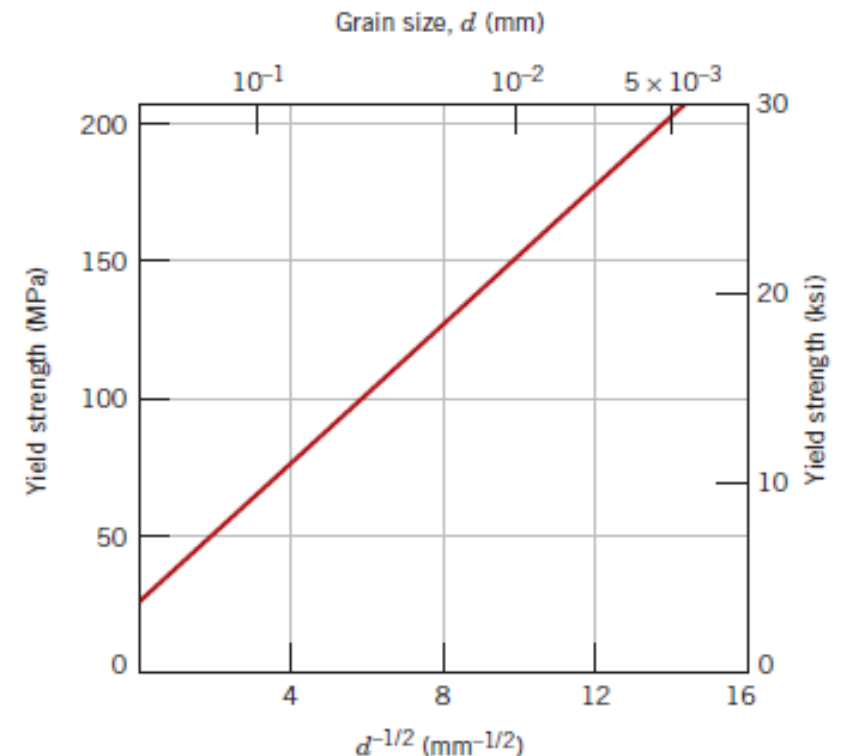
Endurecimento por Refino de Grão

- A equação Hall-Petch que relaciona a influência do tamanho de grão no aumento de resistência ao escoamento:

$$\sigma_{y,d} = \sigma_0 + k_y d^{-1/2}$$

onde “ σ_0 ” é a tensão de escoamento para um grão muito grande, “ k_y ” é o coeficiente de endurecimento e “ d ” o tamanho de grão.

- O mecanismo de endurecimento por refino de grão é **um dos poucos métodos que além de aumentar a resistência, também afeta positivamente a tenacidade.**



Efeito do tamanho de grão no limite de escoamento de uma liga 70Cu-30Zn