

ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS I

Aula 5 parte 2

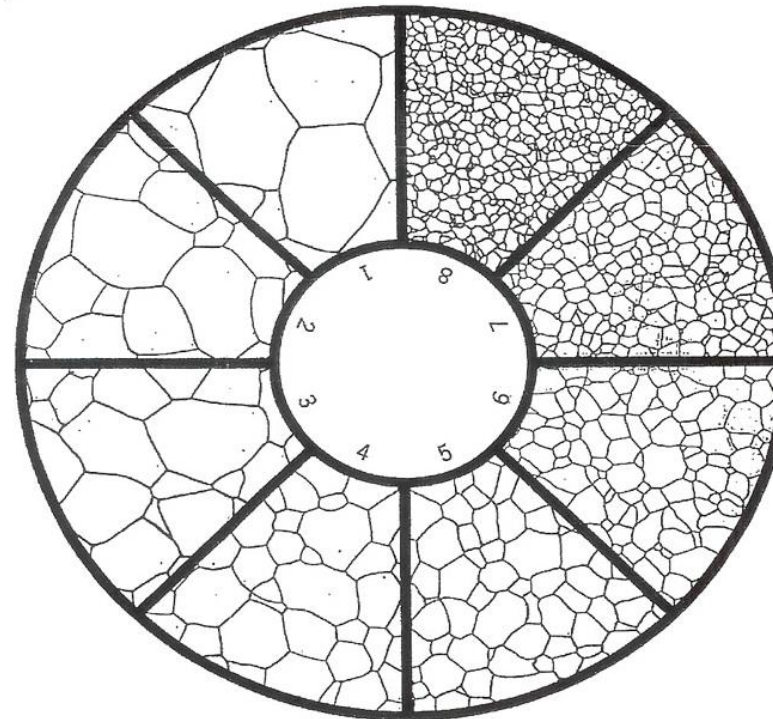
Conteúdo: Mecanismos de Aumento de Resistência em
Metais

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!

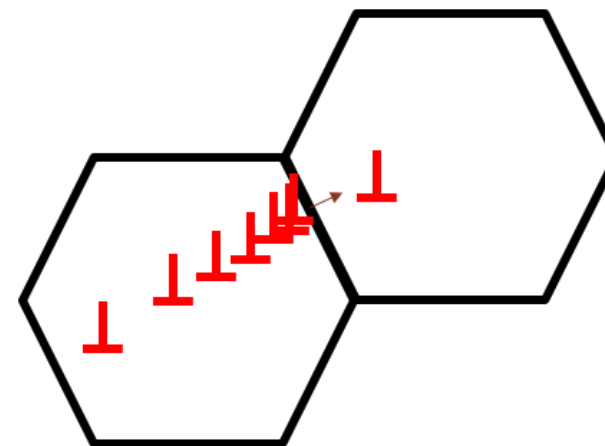
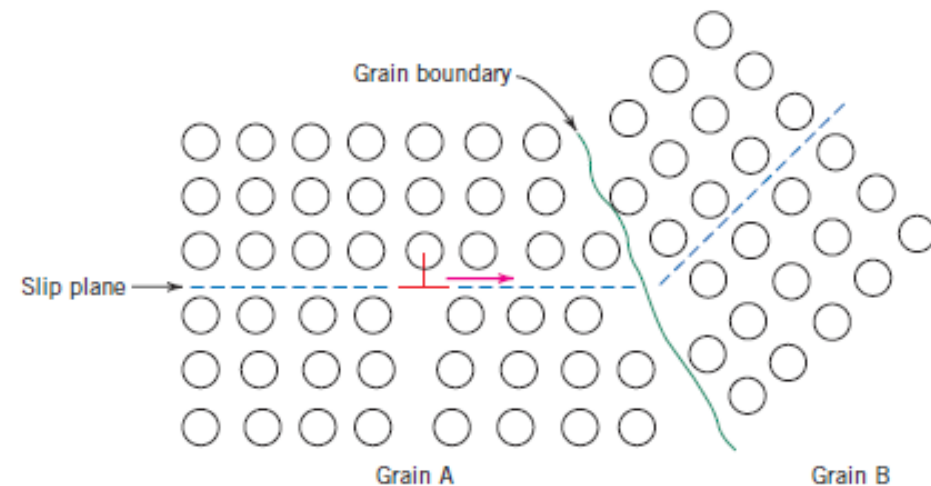
Materiais podem ter diferentes tamanhos de grão!

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.



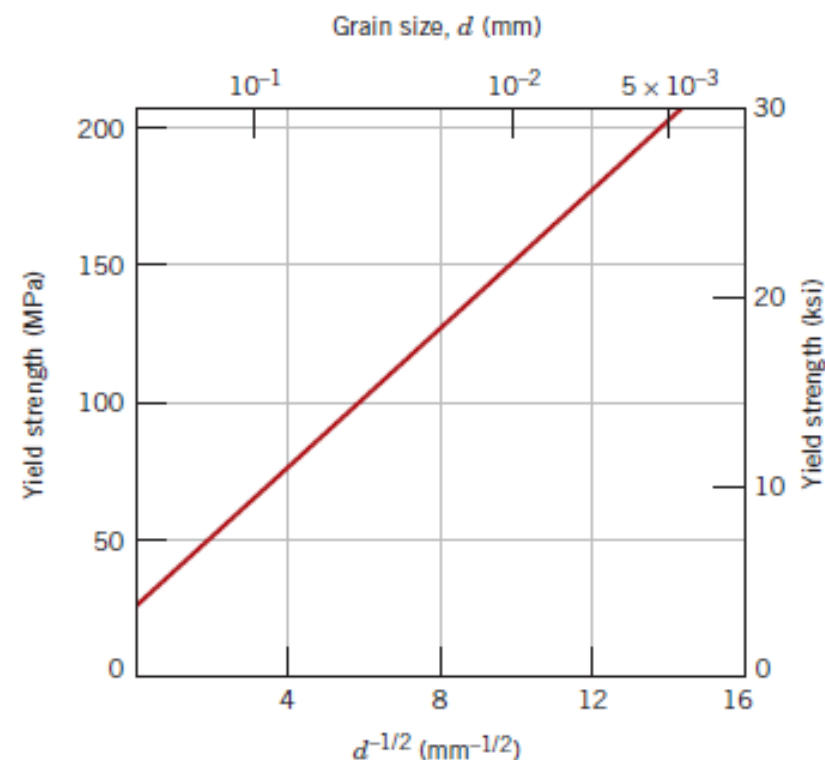
Endurecimento por Refino de Grão

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

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

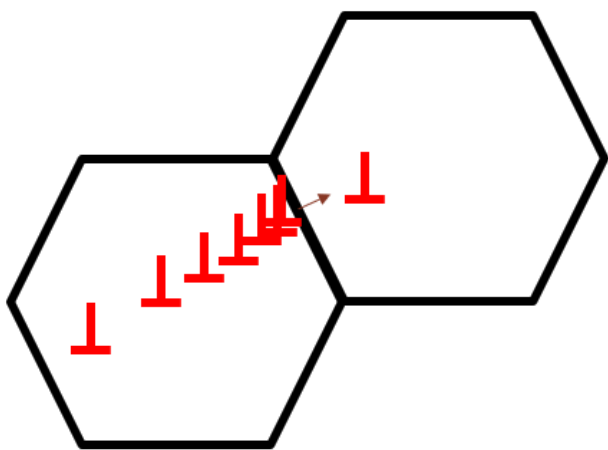
onde “ σ_0 ” é a tensão de escoamento para um grão muito grande, “ k_y ” é o coeficiente de endurecimento e “ d ” o tamanho de grão.

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

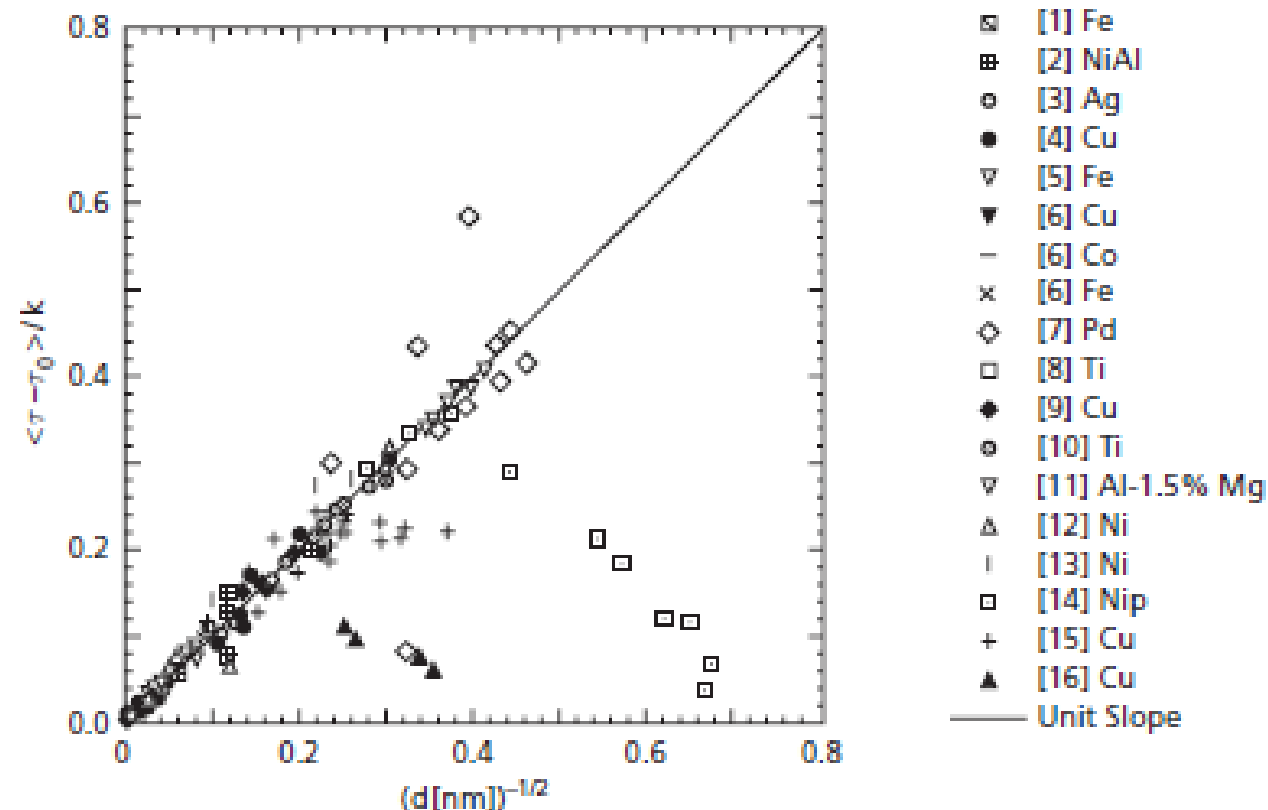


Efeito do tamanho de grão no limite de escoamento de uma liga 70Cu-30Zn

Endurecimento por Refino de Grão



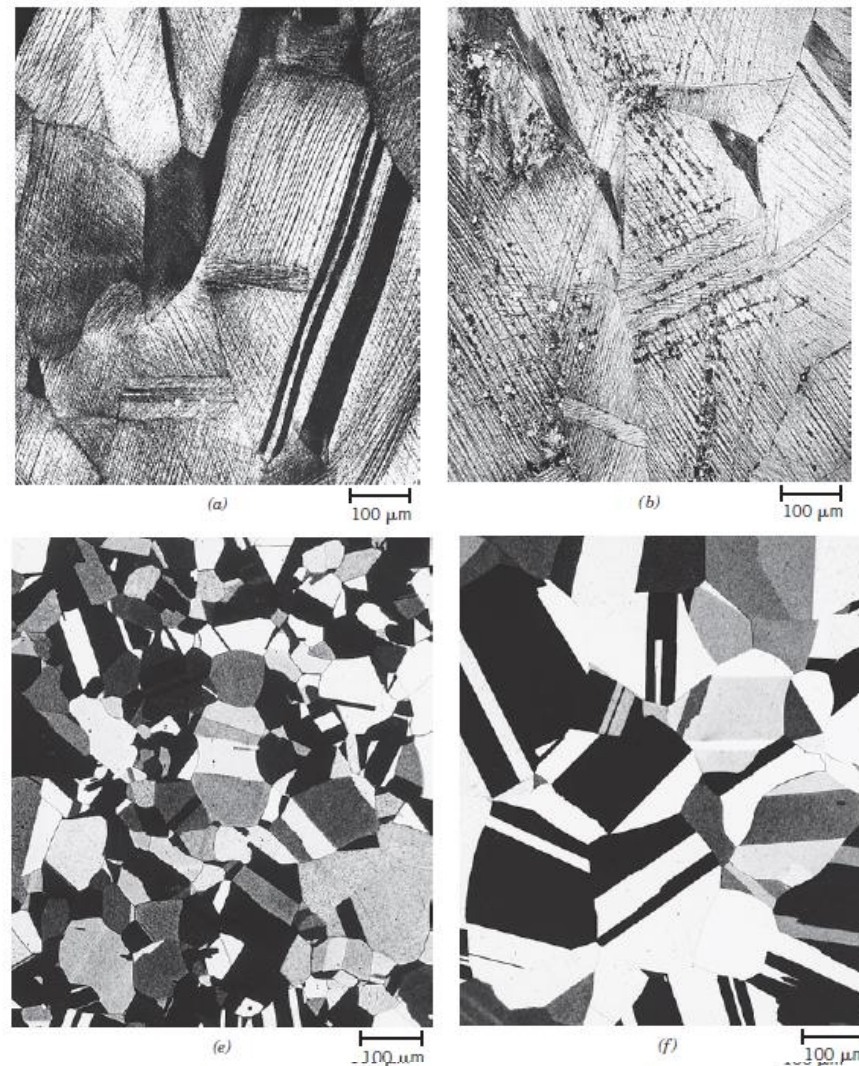
$$\sigma_{y,d} = \sigma_0 + k_y d^{-1/2}$$



Masumara et al. Acta Materialia, 46, V10, 4527-4534.

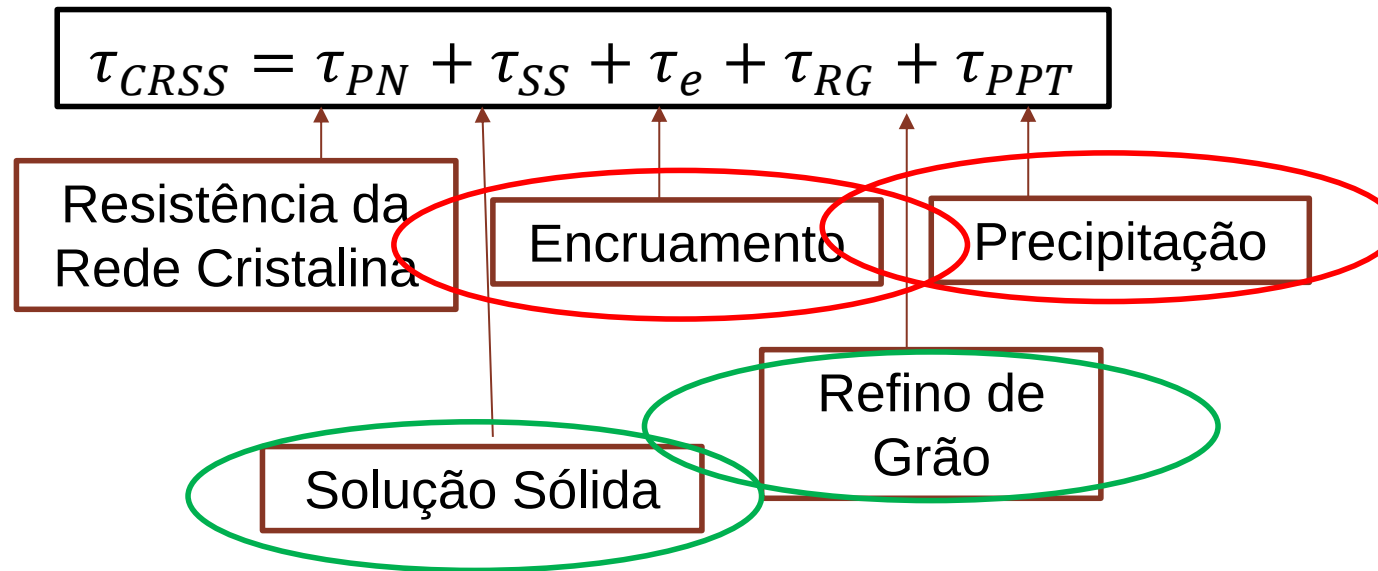
Endurecimento por Refino de Grão

- Como controlar o tamanho de grão?
- Geralmente nas ligas metálicas isso é feito através de tratamentos termomecânicos adequados.
- Por exemplo: deformação a frio seguido de recozimento.



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



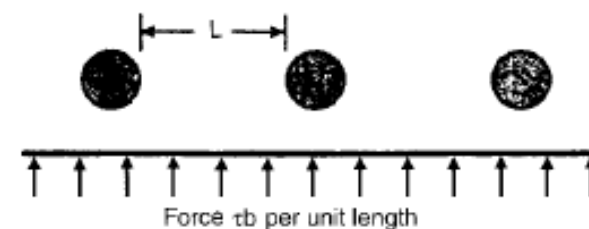
Endurecimento por Precipitação

- Diversos sistemas metálicos podem apresentar a formação de **precipitados finamente dispersos** em uma matriz.
- Os precipitados geralmente são fases intermetálicas de dureza muito superior à matriz, que é a fase dúctil nesse sistema.
- A figura ao lado mostra precipitados de carbonetos de vanádio, em uma matriz ferrítica.



Endurecimento por Precipitação

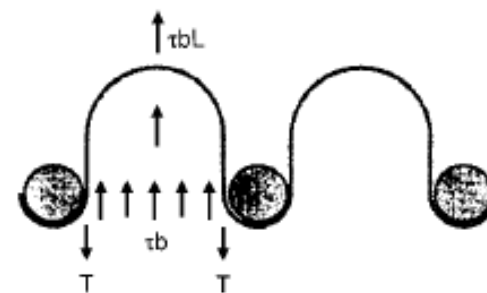
- Um dos principais modelos matemáticos para descrição do efeito da precipitação no aumento da resistência mecânica dos metais é o **mecanismo de Orowan**.
- Nesse modelo, o endurecimento é gerado pela **restrição da movimentação** de linhas de discordância quando encontram precipitados deformáveis.
- Essa teoria tem grande correlação com dados experimentais de diversos materiais



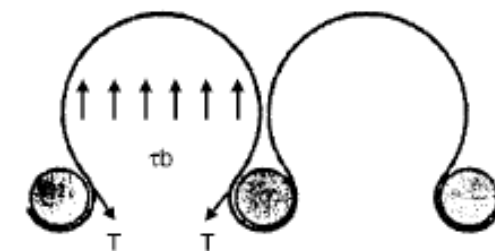
(a) Approach situation



(b) Sub-critical situation



(c) Critical situation



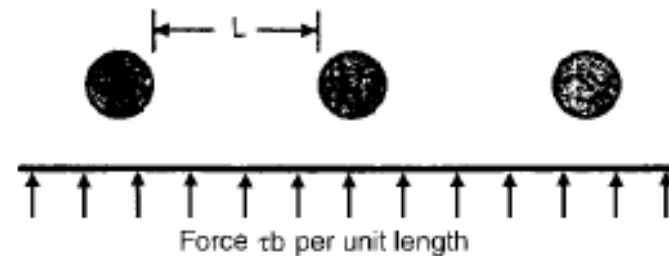
(d) Escape situation

Endurecimento por Precipitação

- O modelo básico usa o conceito de **Tensão de linha**, “ T ” que para uma discordância pode ser expressa como:

$$T = \frac{Gb^2}{2}$$

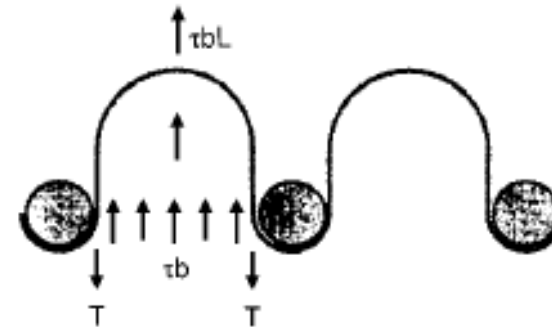
- b é o vetor de Burgers da linha de discordância e G é o módulo de cisalhamento da matriz.
- A tensão de linha representa uma energia por **unidade** de comprimento ou **Força**. Por consequência, a **discordância** se comporta como um “elástico”, **buscando o menor tamanho possível**.



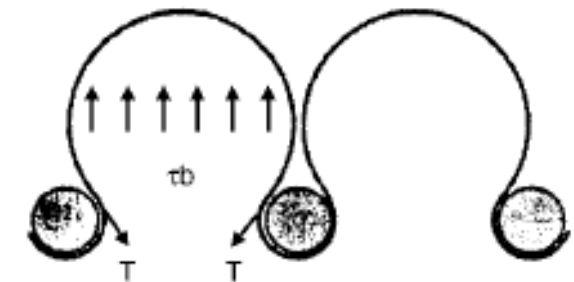
(a) Approach situation



(b) Sub-critical situation



(c) Critical situation



(d) Escape situation

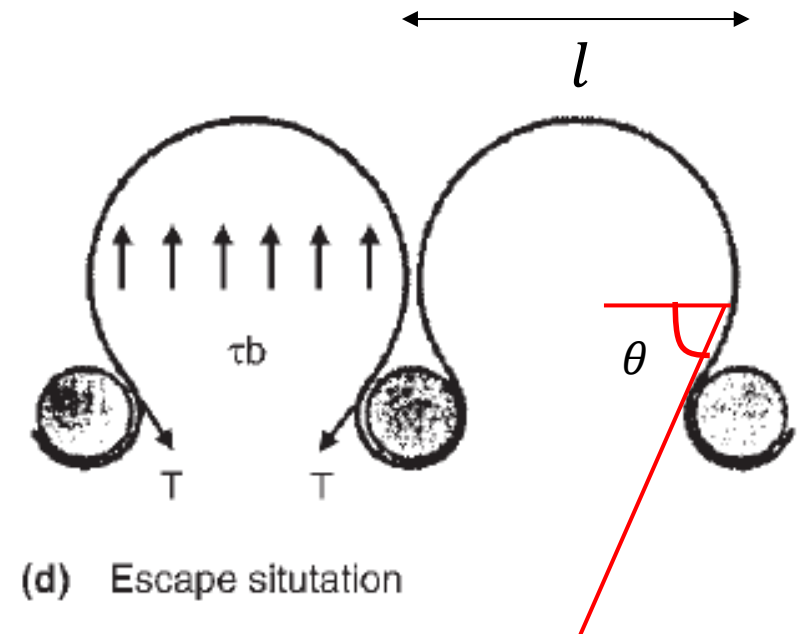
Endurecimento por Precipitação

- A força que é realizada pela aplicação da tensão externa, para movimentar a linha discordância entre dois precipitados a uma distância “ l ” é:

$$F = \tau b l$$

- A força “ F ” que é contrabalanceada pela tensão de linha “ T ”, da discordância é:

$$F = 2T \sin \theta$$

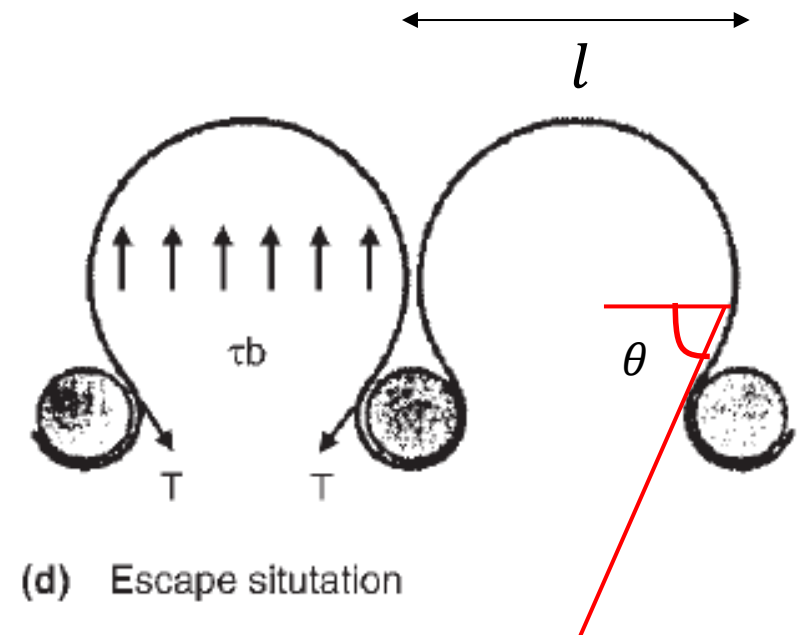


Endurecimento por Precipitação

- Se essas duas forças estiverem em equilíbrio mecânico:

$$F = \tau b l = 2T \sin \theta$$

- A **máxima força** que a partícula pode realizar contra a movimentação da discordância ocorre em $\theta = 90^\circ$. A partir disso, a partícula não consegue mais segurar a discordância e ela continuará se movimentando.



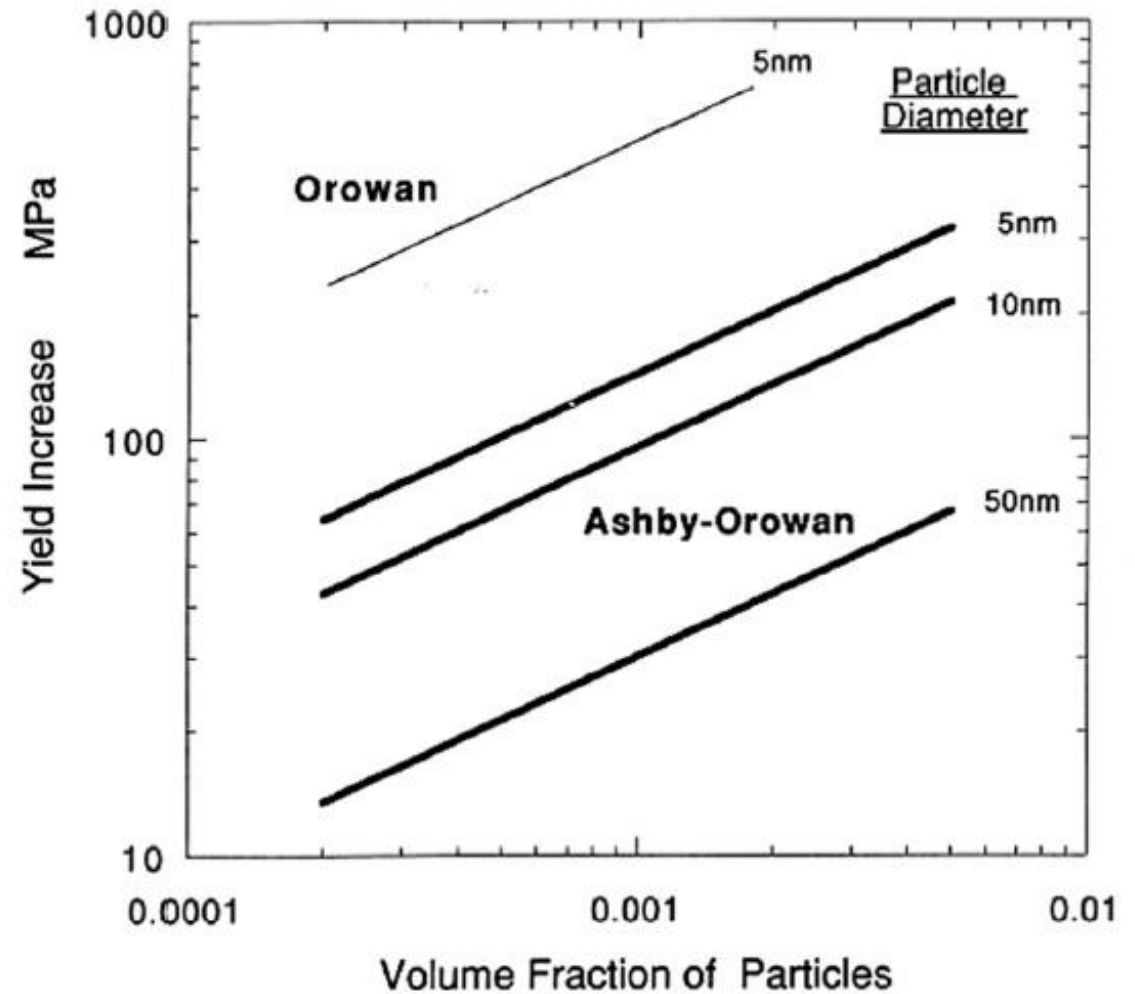
Endurecimento por Precipitação

- Dessa forma: $\tau_{max}bl = 2T$. Com $T = \frac{Gb^2}{2}$
- Chegamos na Equação de Orowan:

$$\tau_{max} = \frac{Gb}{l}$$

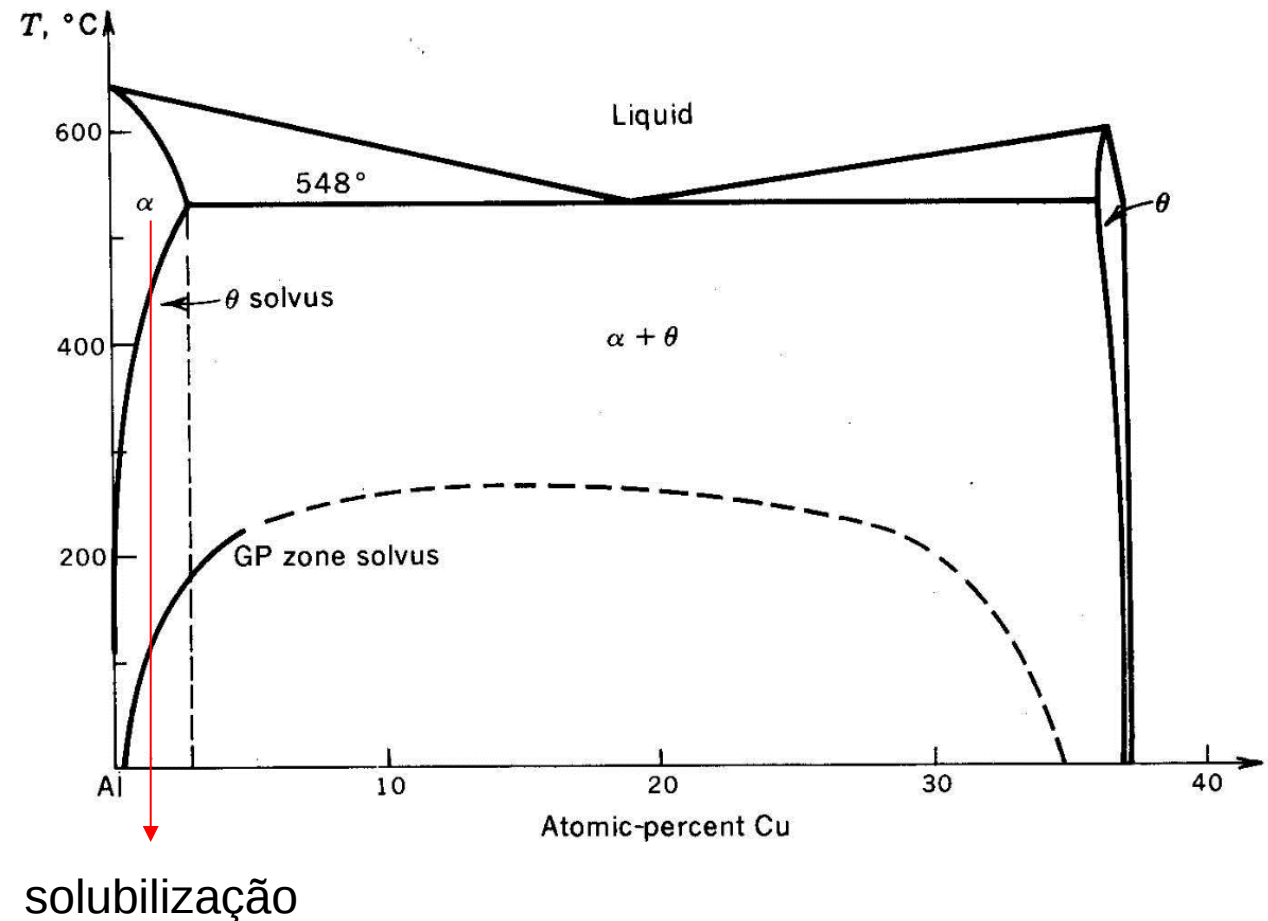
O parâmetro “ l ” pode ser convertido em **fração volumétrica e tamanho médio de partícula**, baseado em alguma hipótese de como elas estão distribuídas na matriz.

Endurecimento por Precipitação



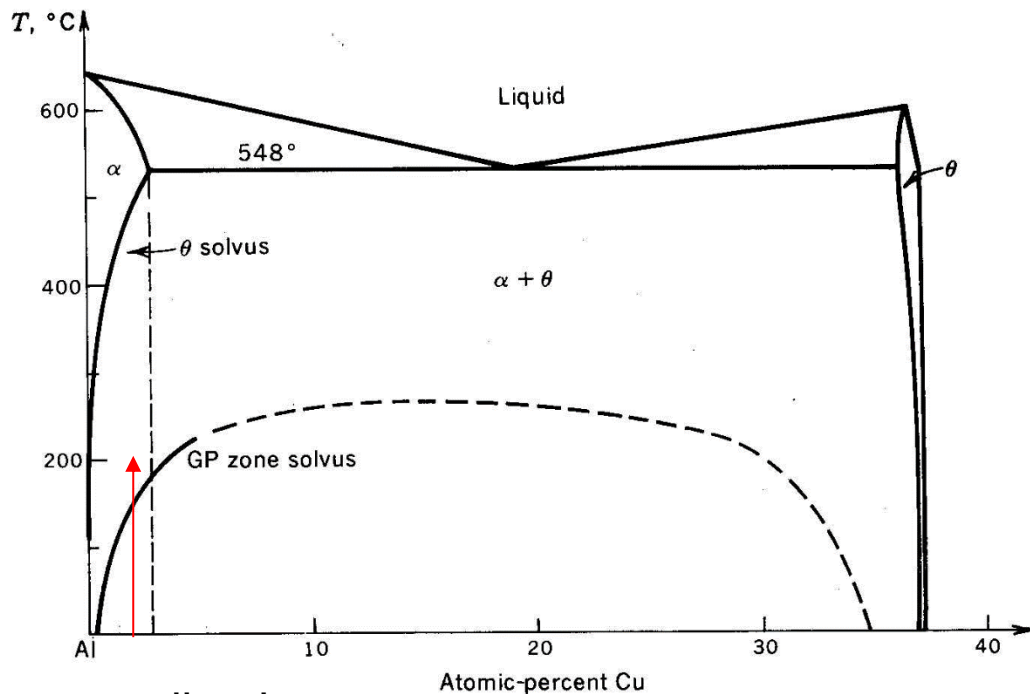
Endurecimento por Precipitação

- Através de um tratamento térmico de solubilização seguido de envelhecimento, ligas de alumínio com limites de escoamento comparáveis a aços de média resistência podem ser obtidas.
- Usadas na indústria aeroespacial.

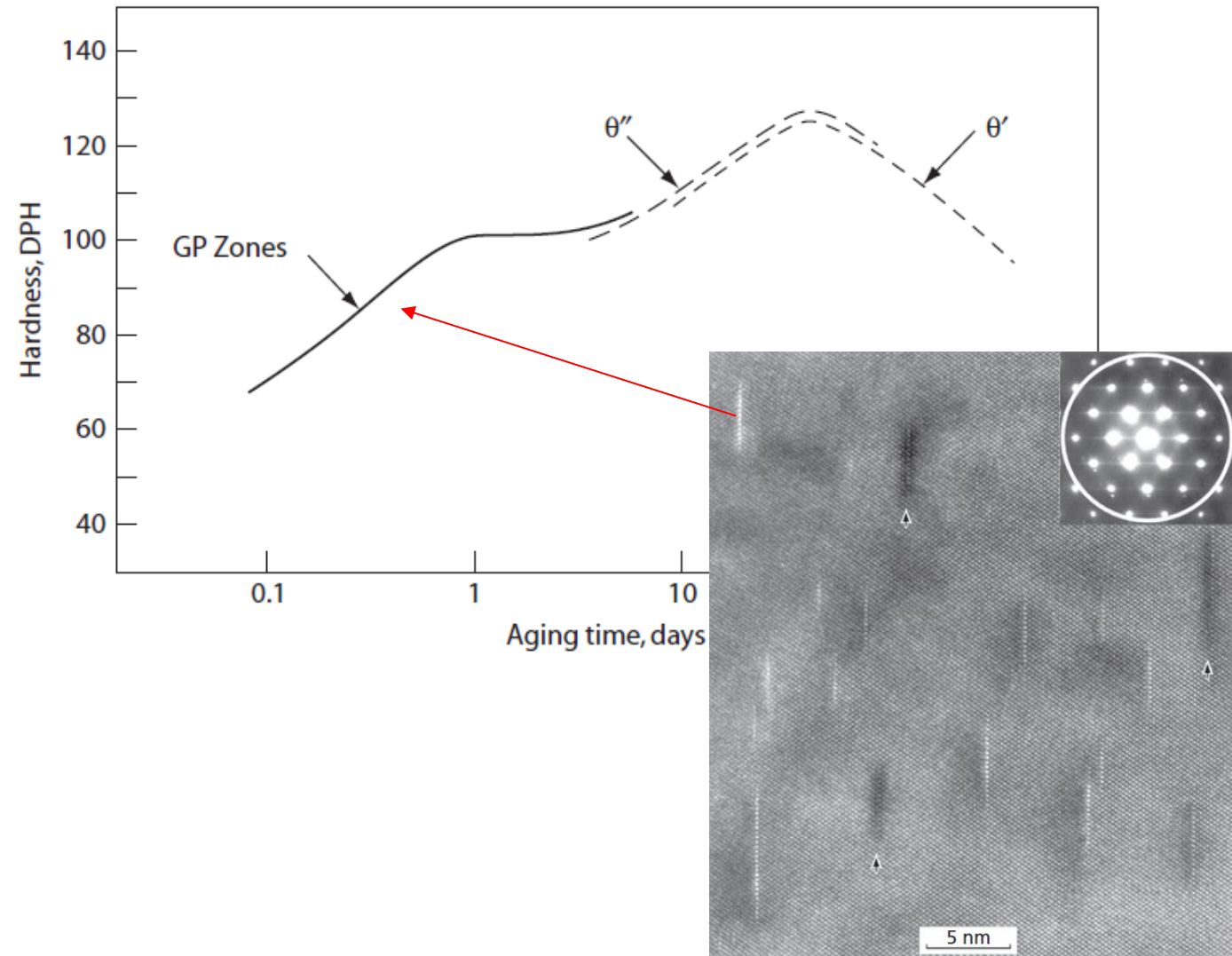


Endurecimento por Precipitação

Principal mecanismo de endurecimento em diversas ligas de Alumínio.
Formação de precipitados coerentes com a matriz.

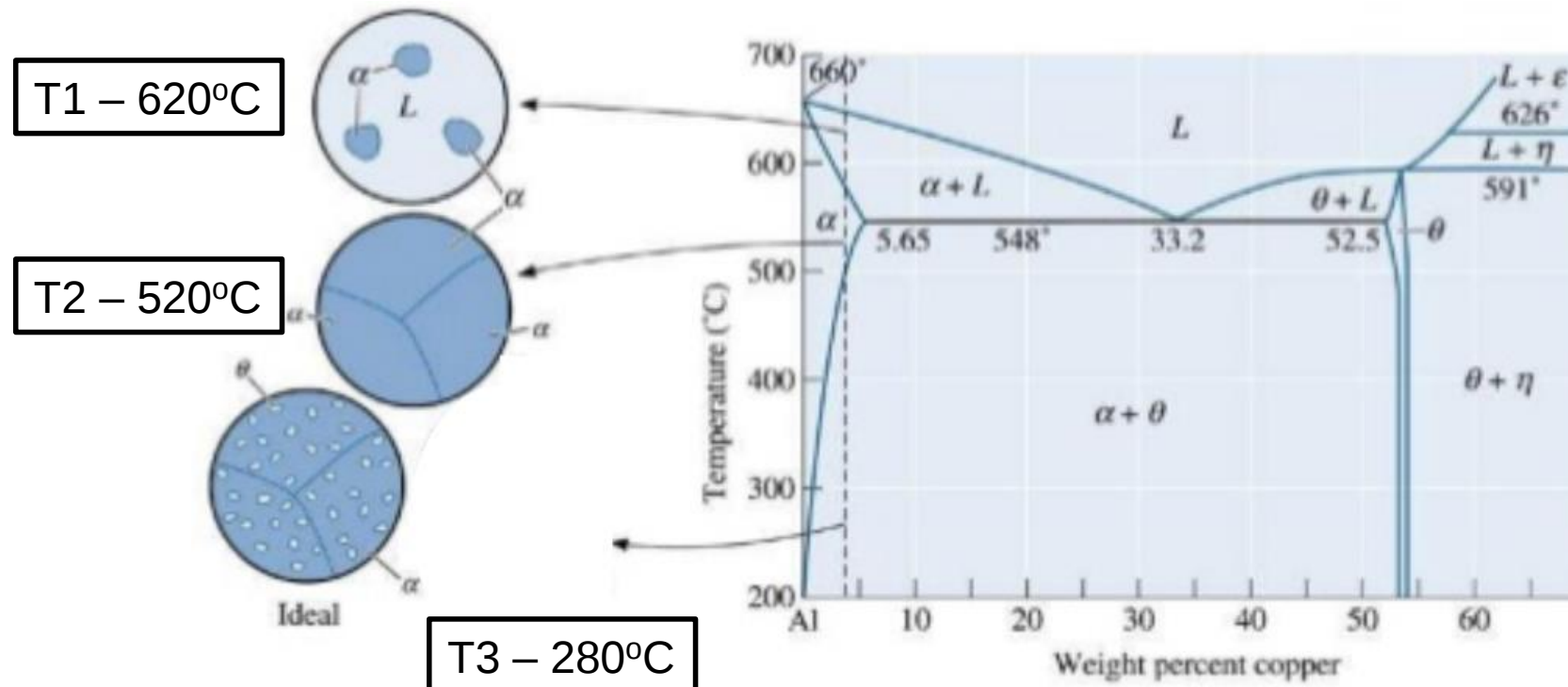


Envelhecimento

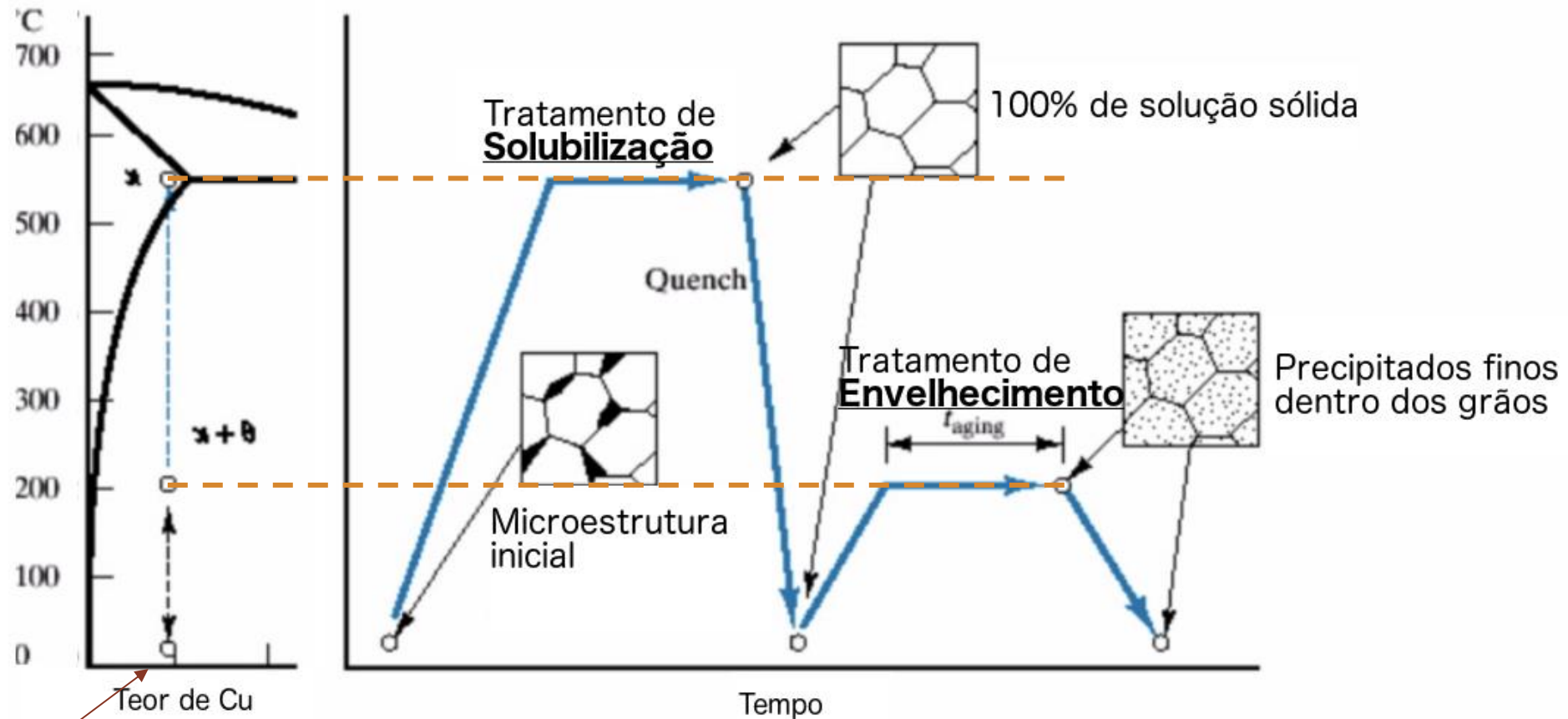


Formando os Precipitados

- Formando os precipitados – preciso de uma composição que seja monofásica em certa temperatura (neste caso 520°C) e que forme segunda fase em baixas temperaturas (ex 280°C)



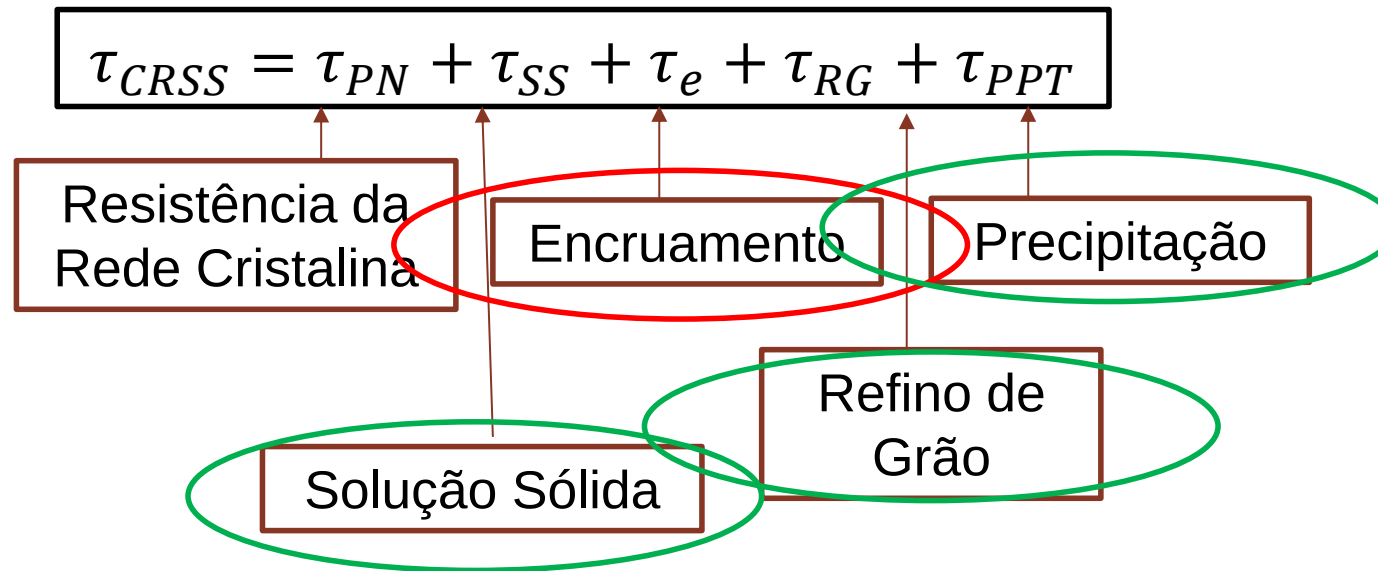
Passo a Passo no Endurecimento por Precipitação



Nossa composição – Al-8Cu

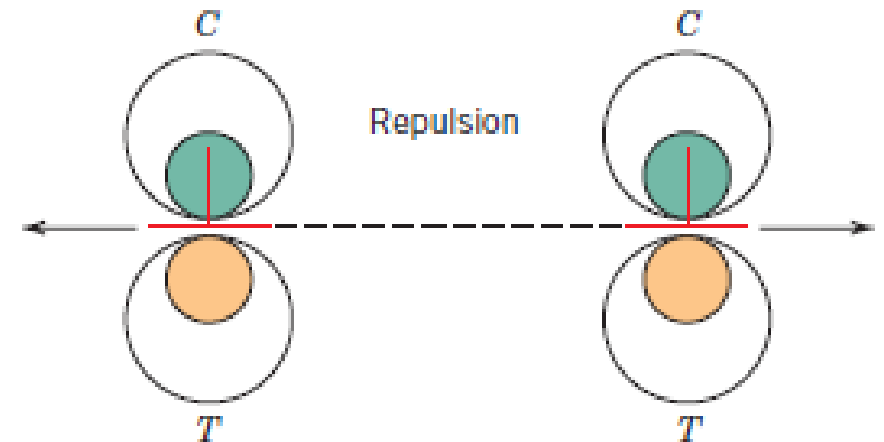
A Resistência de um Metal

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 Trabalho a Frio

- Também chamado de encruamento.
- No trabalho a frio o metal é deformado plasticamente em uma temperatura suficientemente baixa para que não haja recristalização.
- Aumenta σ_y e Limite de resistência, mas diminui a ductilidade.
- $\%T.F. = \left(\frac{A_0 - A_{def}}{A_0} \right) \times 100$



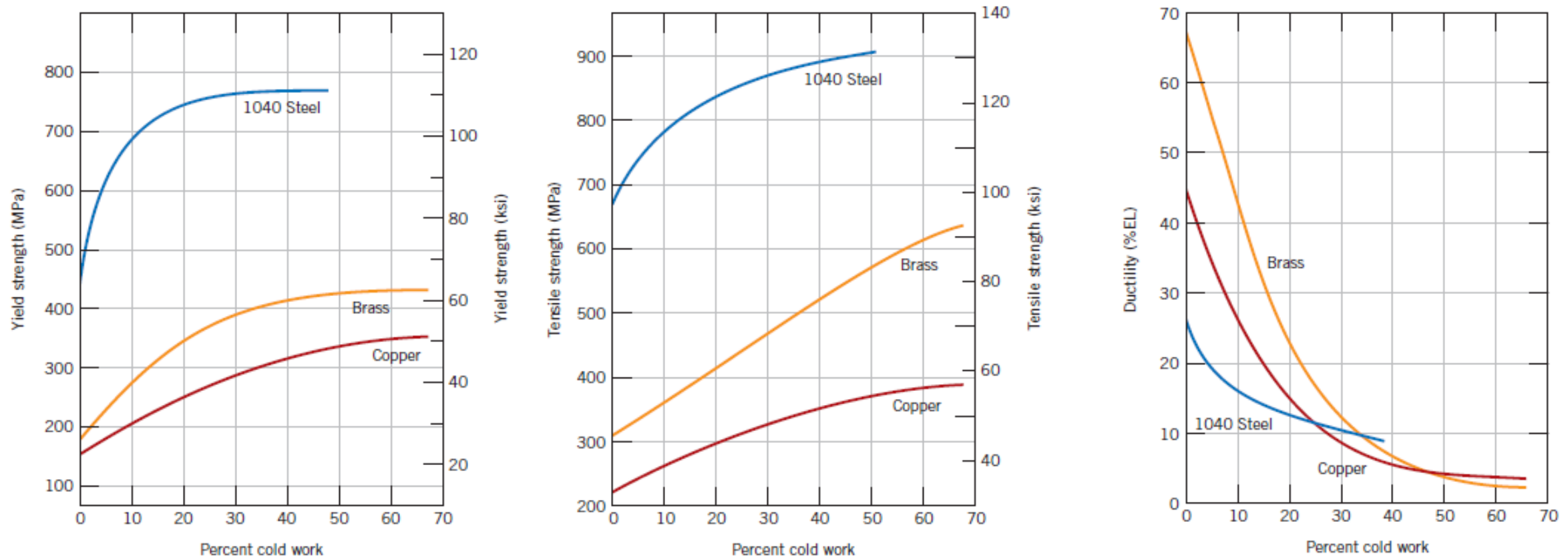
Densidade de Discordâncias e Deformação

- Materiais deformados possuem muitas discordâncias!
- Onde é mais fácil andar?



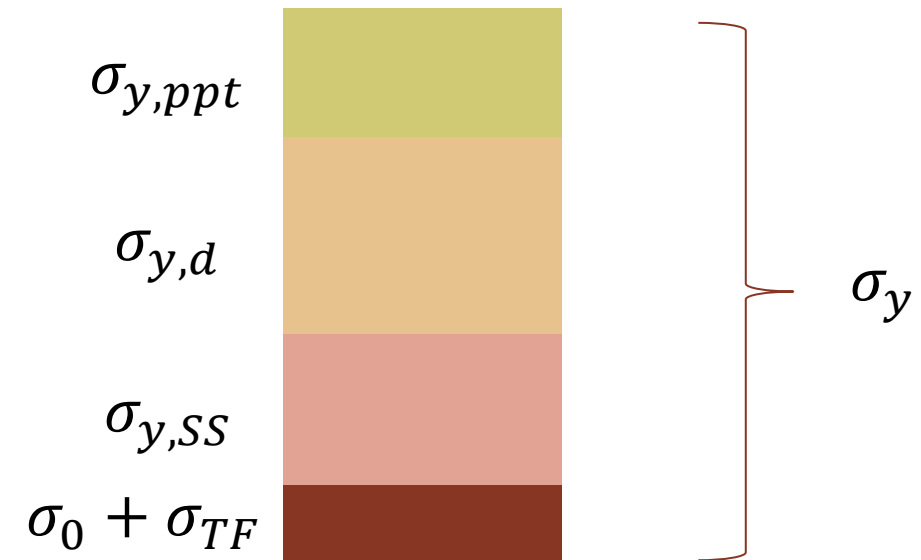
- O encruamento nada mais é do que o resultado da interação entre as discordâncias em um material!

Endurecimento por Trabalho a Frio

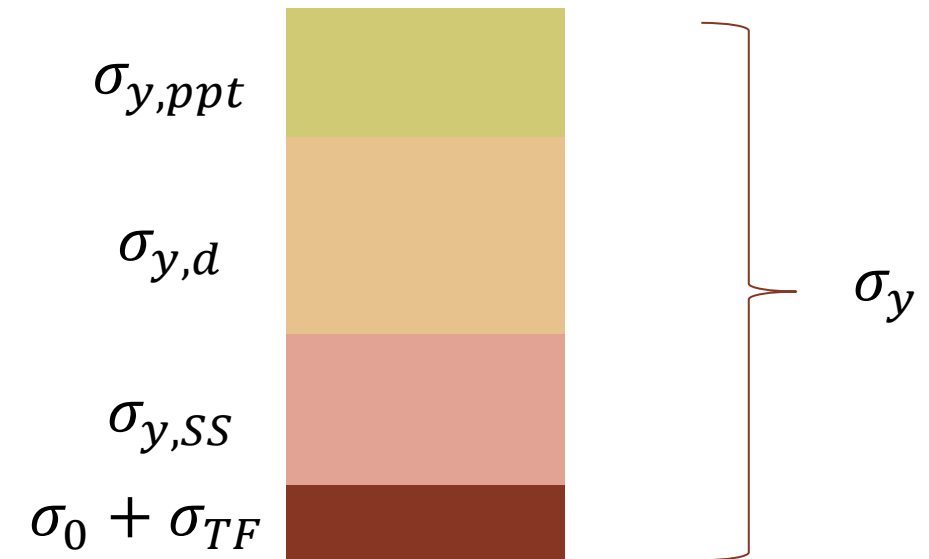
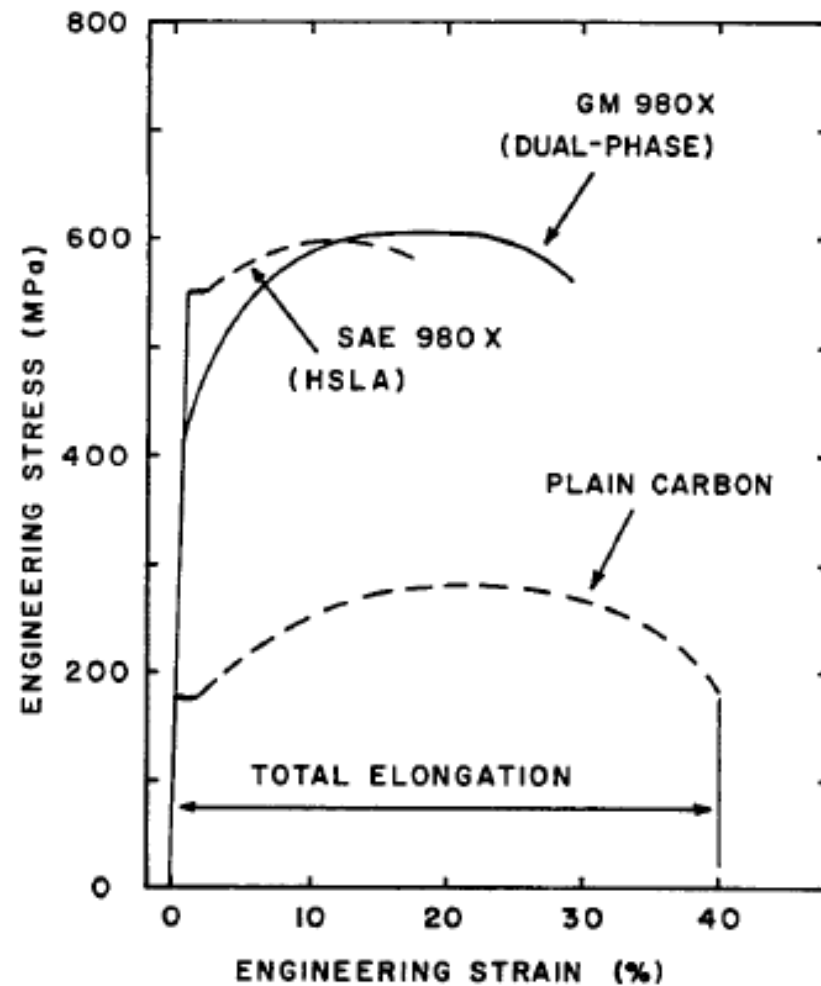


Combinação dos Mecanismos de Endurecimento

- A resistência ao escoamento de uma liga metálica será consequência de como esses mecanismos são utilizados.
- O valor total do limite de escoamento produzido, pode ser entendido como um **somatório de cada um dos mecanismos** detalhados.



Combinação dos Mecanismos de Endurecimento



Introdução à Mecânica da Fratura

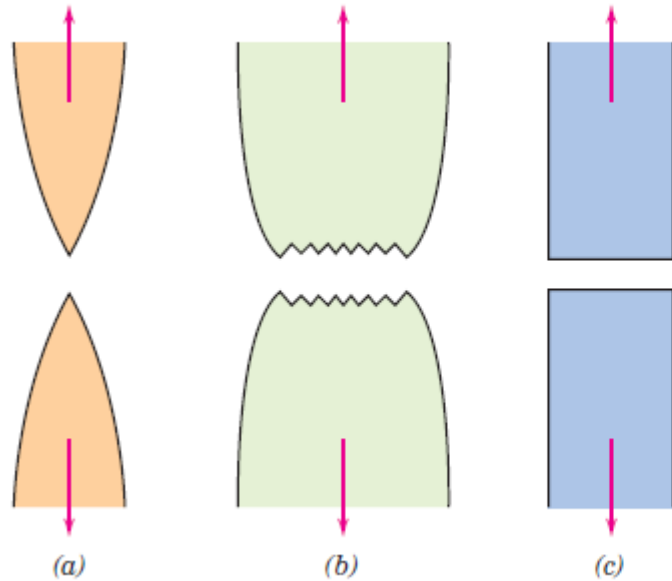
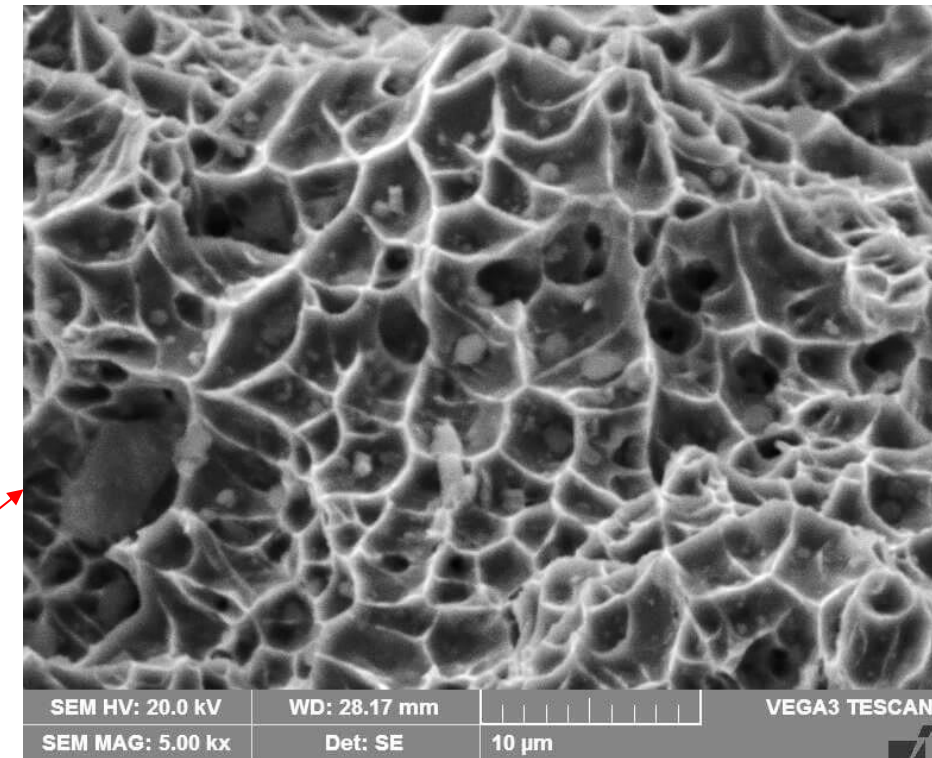
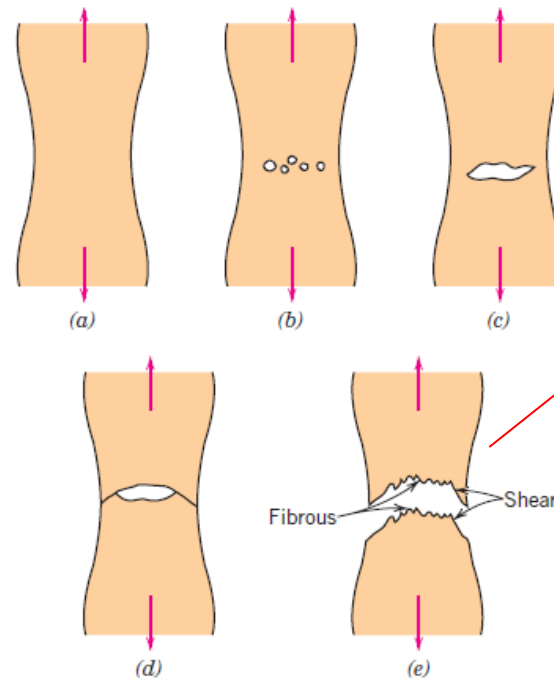


Figure 8.1 (a) Highly ductile fracture in which the specimen necks down to a point. (b) Moderately ductile fracture after some necking. (c) Brittle fracture without any plastic deformation.



Fratura Dúctil: coalescimento de vazios após muita deformação

Introdução à Mecânica da Fratura

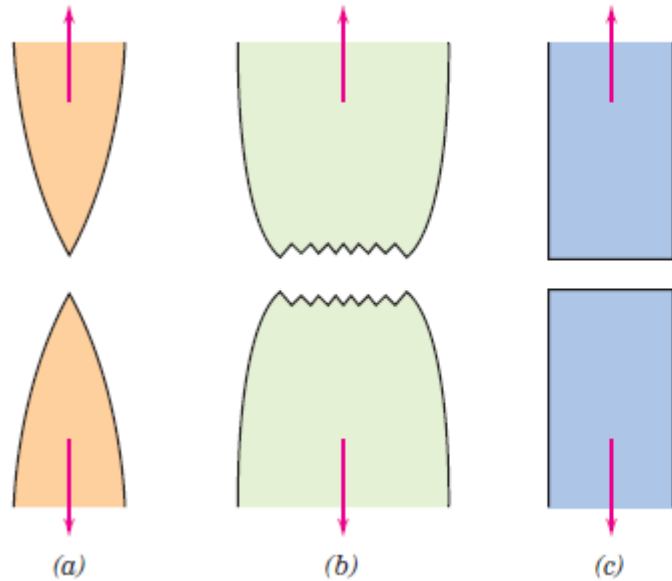


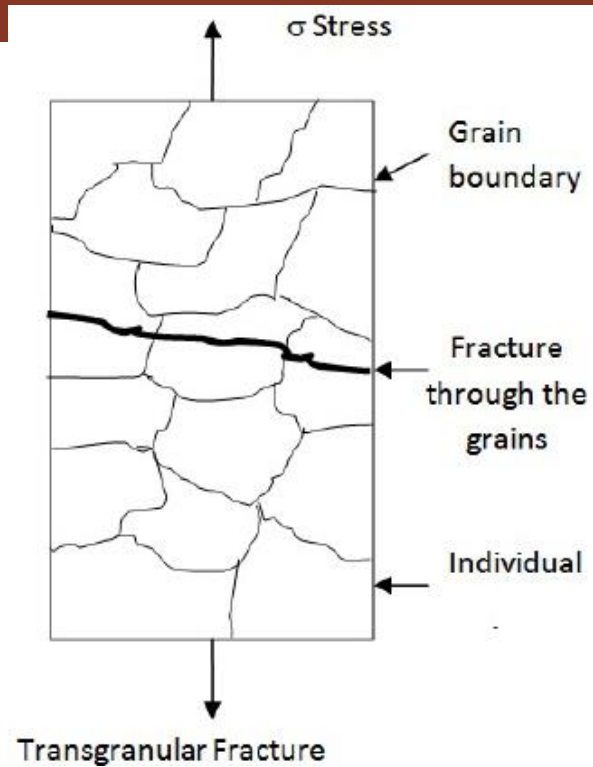
Figure 8.1 (a) Highly ductile fracture in which the specimen necks down to a point. (b) Moderately ductile fracture after some necking. (c) Brittle fracture without any plastic deformation.



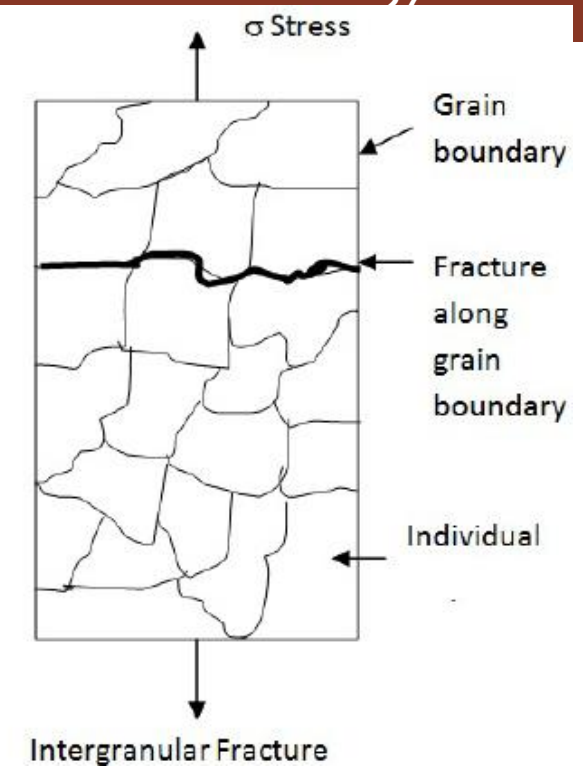
Fratura frágil

Fratura Frágil

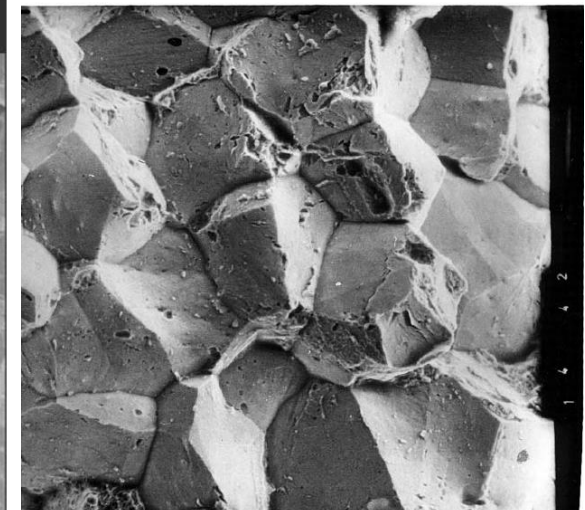
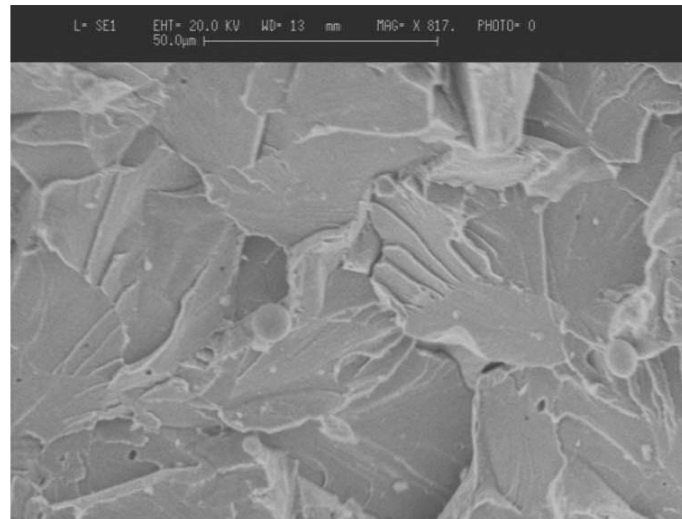
- Clivagem ou transgranular – trinca se propaga pelo material atravessando os grãos
- Intergranular – trinca contorna os grãos



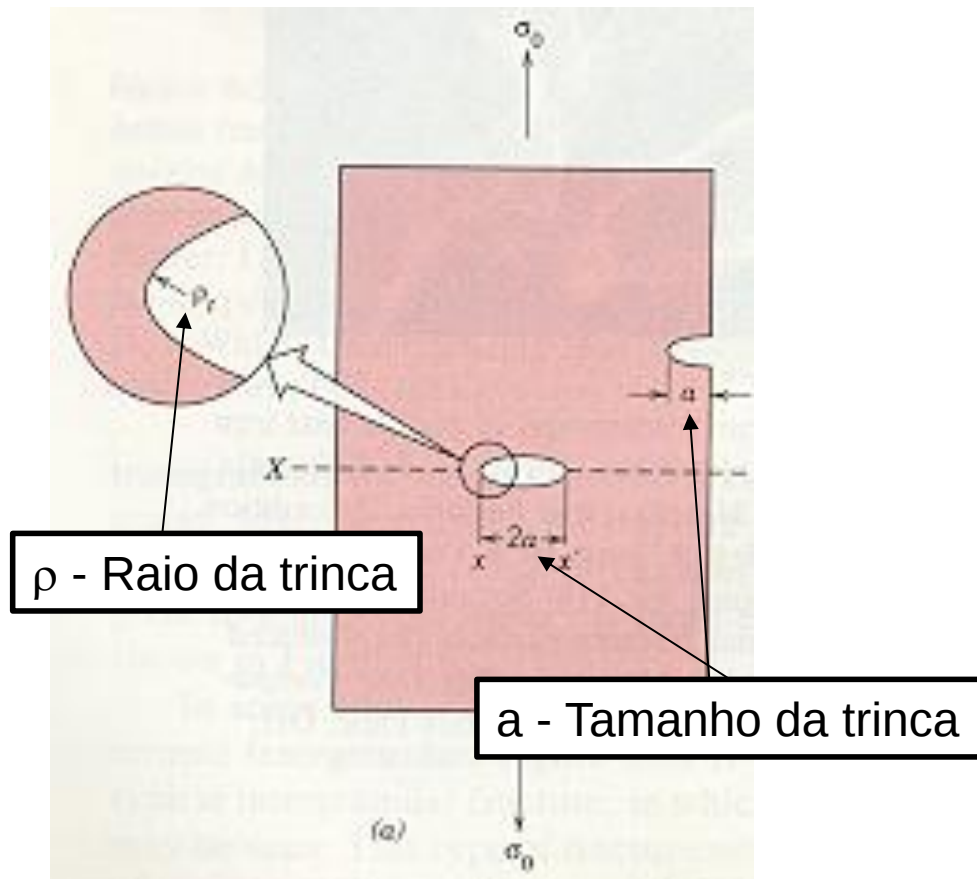
Frágil - Clivagem



Frágil - Intergranular



Concentração de Tensões



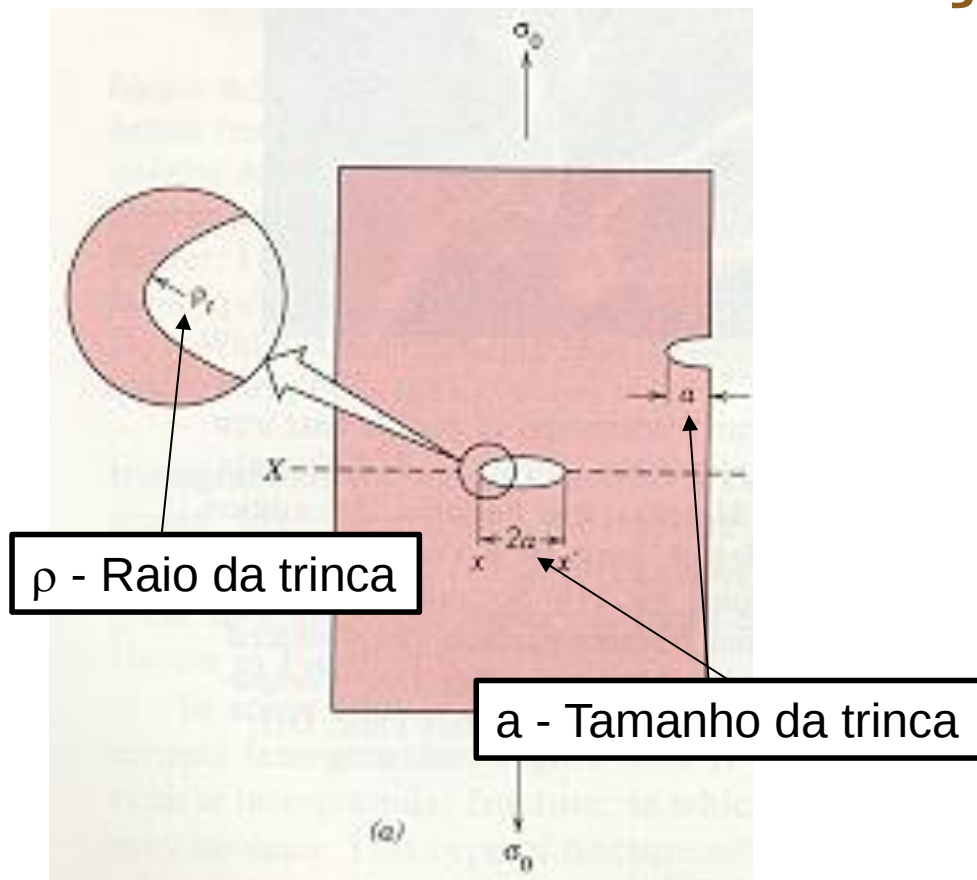
Problema – quase impossível de se medir ρ !

- Todos os materiais possuem defeitos ou trincas, às vezes muito pequenos (mícrons, nanômetros), sua formação é inevitável no processamento
- Uma tensão aplicada no material é amplificada na extremidade do defeito. O número de vezes que a tensão é ampliada no defeito é o **fator de concentração de tensões**.
- Para uma trinca que possui formato elíptico que está orientada perpendicularmente à direção da aplicação da tensão, a tensão máxima na ponta da trinca (σ_m) é igual a:

$$\sigma_m = 2\sigma_0 \left(\frac{a}{\rho} \right)^{1/2}$$

A razão σ_m/σ_0 é conhecida como **fator de concentração de tensão (F)**: $F = 2 \left(\frac{a}{\rho} \right)^{1/2}$

Concentração de Tensões



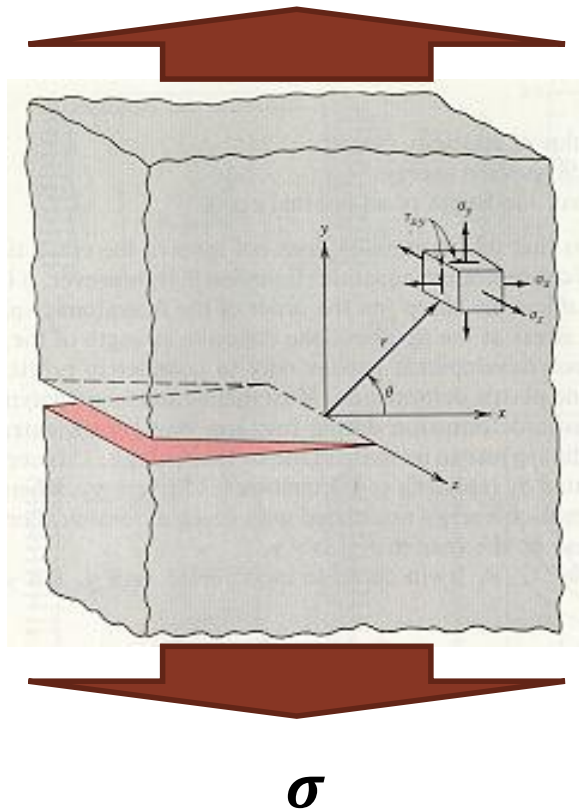
- Pensar em uma trinca de 1mm com um raio de 100nm

$$F = 2 \left(\frac{1000}{0.1} \right)^{1/2} = 200$$

- **Tensão na frente da trinca é 200 vezes maior que a aplicada!!**
- 100 MPa aplicados viram 20 GPa!
- Fica muito fácil chegar na resistência teórica

Problema – quase impossível de se medir ρ !

O Fator Intensidade de Tensão



- Não é o mesmo do fator de concentração de tensão
- Definição – **K** fator intensidade de tensão

$$K = Y\sigma\sqrt{\pi a}$$

Y – fator geométrico
(1 para caso do desenho)

a – tamanho da maior trinca (defeito crítico)

σ – tensão aplicada

- K aumenta na medida em que eu aplico mais tensão
- K será maior se meu defeito máximo for grande!

A Tenacidade à Fratura

- O material irá quebrar quando K chegar a um valor crítico, chamado de K_{IC} ou Tenacidade à Fratura (unidade $\text{MPa m}^{-1/2}$)
 - É uma **propriedade do material**
 - Mede a tolerância a defeitos!

The diagram illustrates the equation for fracture stress, $\sigma_f = \frac{K_{IC}}{\sqrt{\pi a}}$, with three annotated components:

- Tensão de fratura (não é propriedade do material)**: A red box with an arrow pointing to the σ_f term in the numerator.
- Tenacidade à Fratura (é propriedade do material)**: An orange box with an arrow pointing to the K_{IC} term in the numerator.
- Tamanho da Trinca (não é propriedade do material)**: A green box with an arrow pointing to the a term in the denominator.

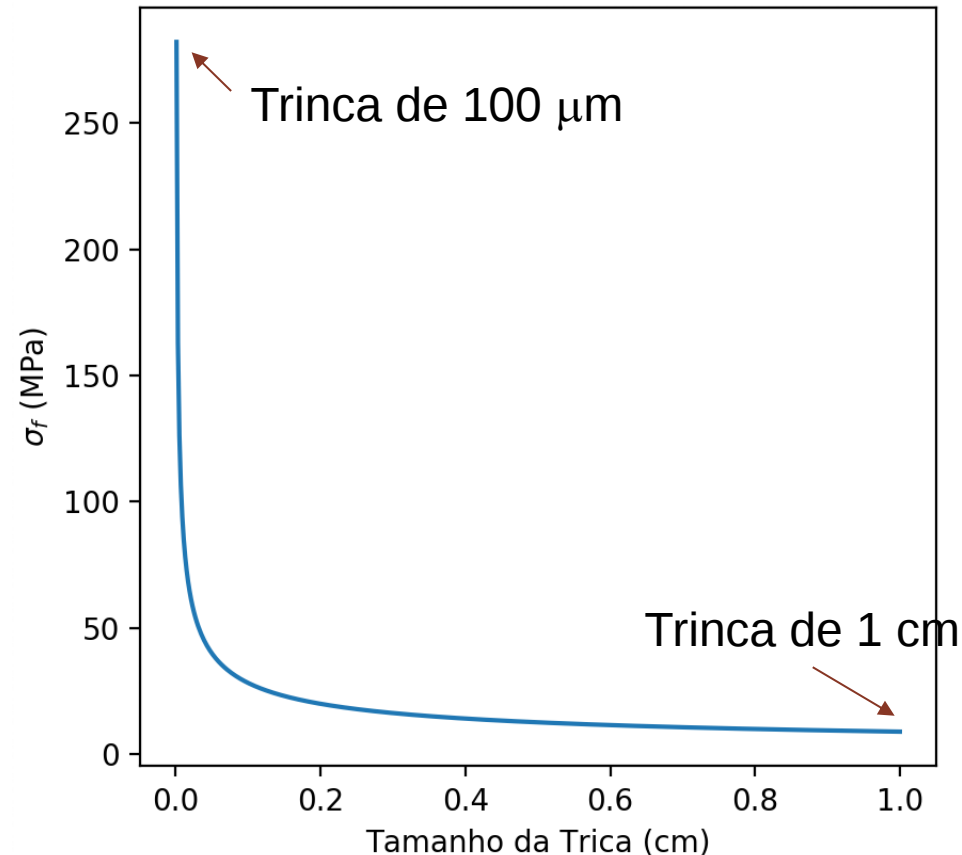
- Chamado **tenacidade à fratura** (K_{IC})
 - Não confundir com tenacidade em um ensaio de tração (área sob a curva), estas quantidades estão relacionadas mas são diferentes!

Aumentando a Resistência Mecânica de Um Material Frágil

- 1ª opção – reduzir o tamanho dos defeitos críticos
- Método muito efetivo mas limitado pelo processamento

Alumina – $K_{IC} = 5 \text{ MPa m}^{-1/2}$

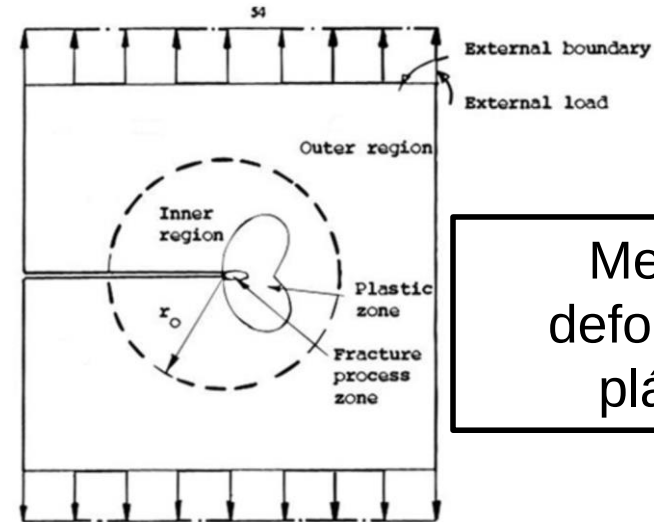
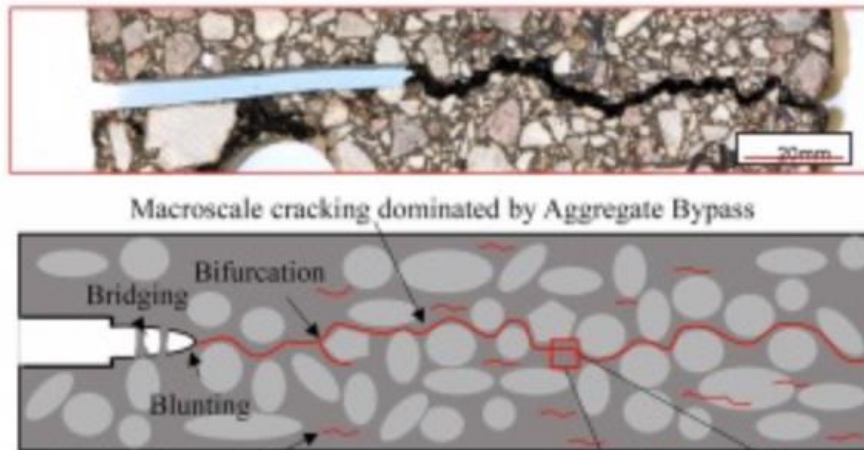
$$\sigma_f = \frac{K_{IC}}{\sqrt{\pi a}}$$



Aumentando a Resistência Mecânica de Um Material Frágil

- 2ª opção – aumentar o K_{IC}
- Incorporar mecanismos de aumentar a tenacidade do material – idéia é dificultar a propagação das trincas

Concreto – adicionar partículas que impedem o movimento da trinca



Metais –
deformação
plástica

Compósitos – Fibras que
fecham a trinca

