



# Introdução a Ciência dos Materiais

## Relação Microestrutura e Propriedade

### Deformação Elástica e Plástica

Professora: Maria Ismenia Sodero

[maria.ismenia@usp.br](mailto:maria.ismenia@usp.br)

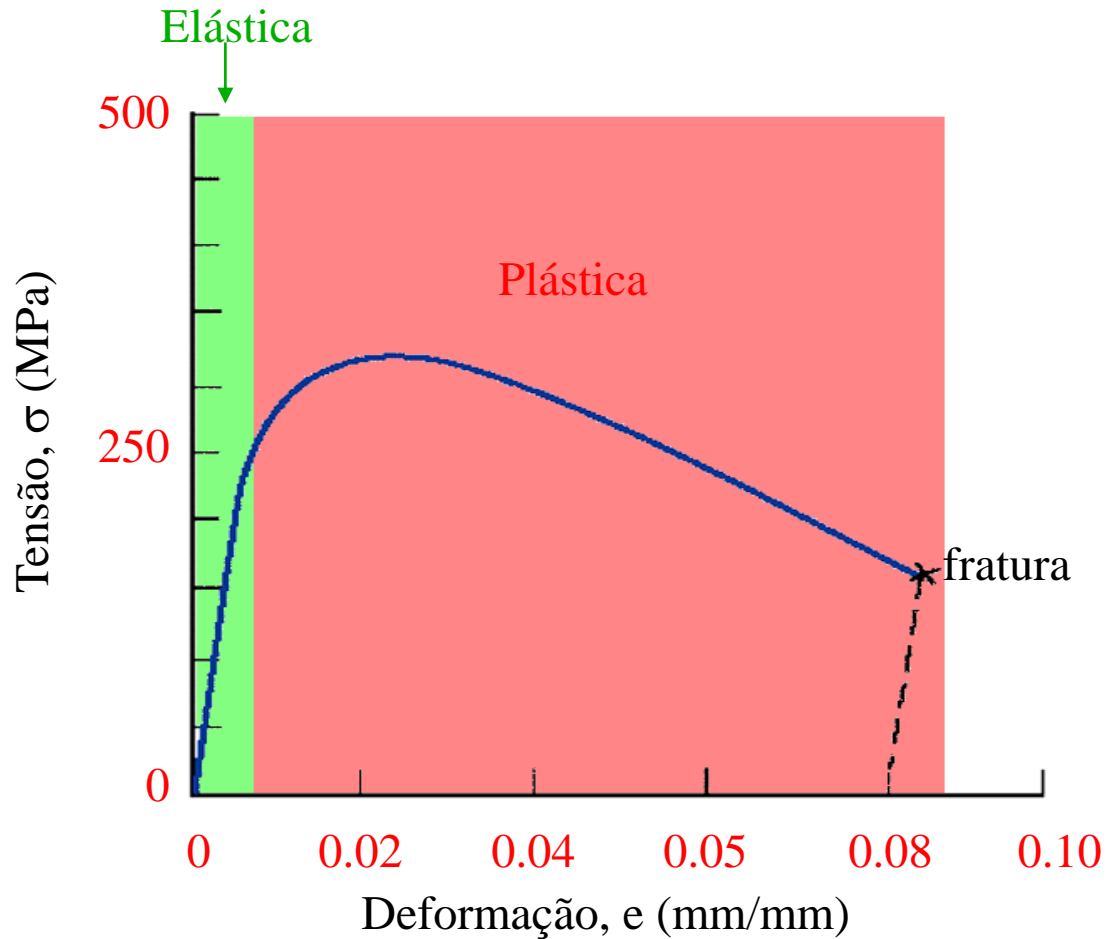


# Tópicos abordados

1. Mecanismos atômicos de deformação elástica e da deformação plástica
2. Deformação plástica em monocristais
3. Deformação plástica em metais policristalinos
4. Deformação por maclagem
5. Ensaio de tração



# Comportamento Tensão-Deformação



O Módulo de Young,  $E$ , (ou módulo de elasticidade) é dado pela derivada da curva na região linear.

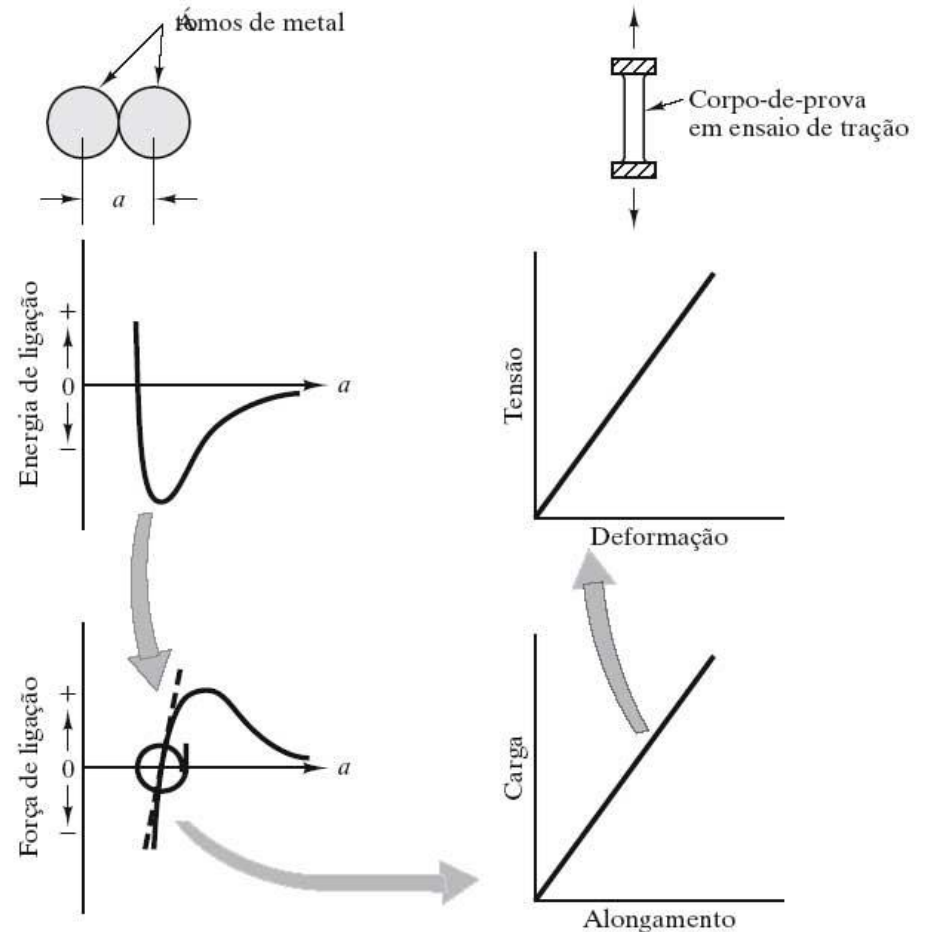


# Mecanismos atômicos de deformação elástica

## DEFORMAÇÃO ELÁSTICA

O mecanismo fundamental da deformação elástica é o estiramento das ligações atômicas;

A deformação fracionária do material na região elástica é pequena, de modo que estamos lidando com a parte da curva de força X separação atômica na vizinhança imediata da distância de separação em equilíbrio dos átomos;

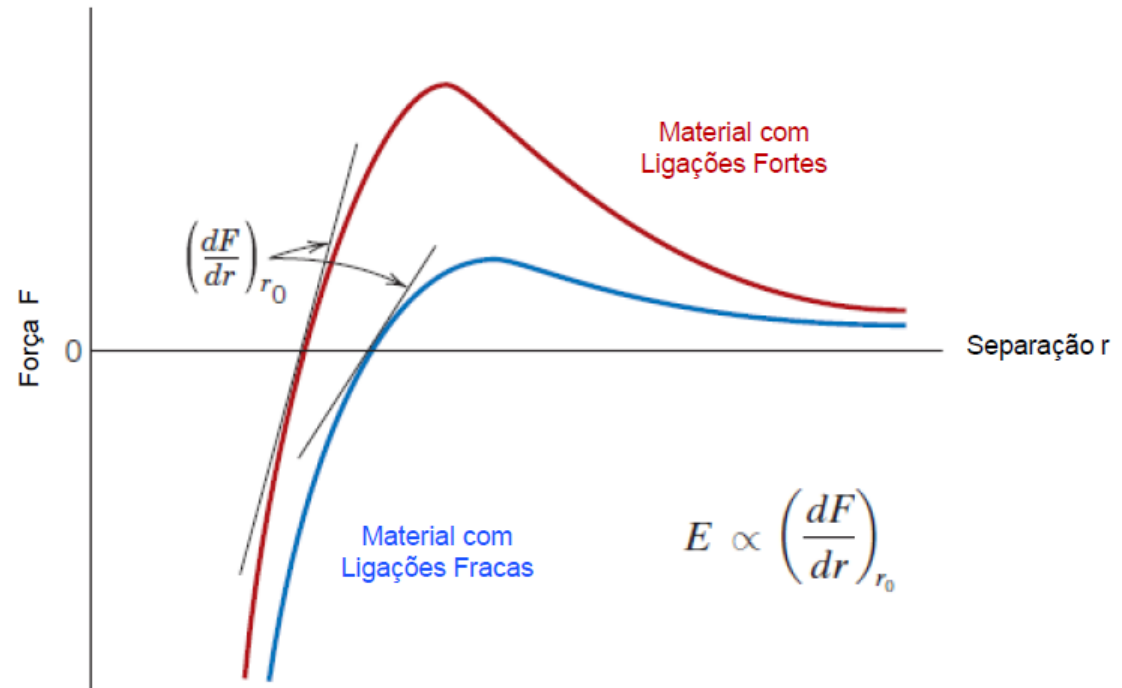
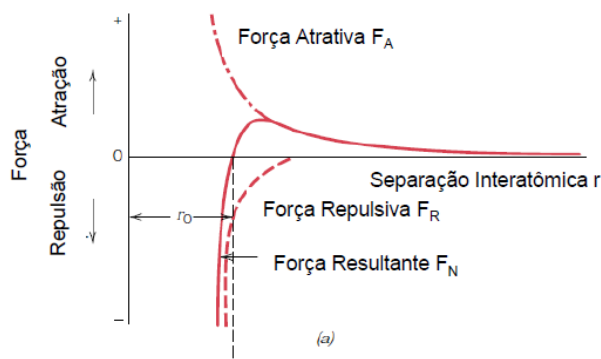
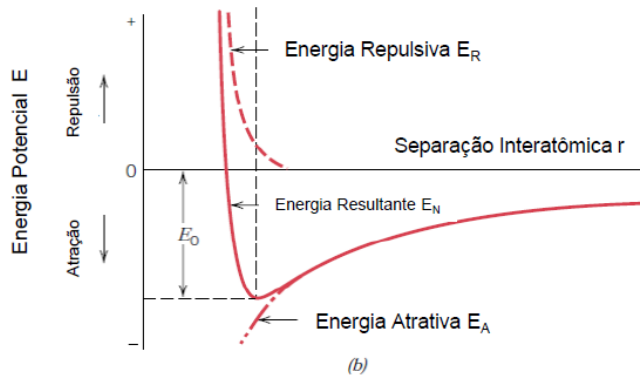


Relação entre a deformação elástica e o estiramento das ligações atômicas



# Módulo de elasticidade

A inclinação da região linear inicial da curva tensão-deformação é o módulo de elasticidade, ou módulo de Young. É uma medida de rigidez do material. Quanto menor é o módulo, menor é a deformação elástica resultante da aplicação de uma determinada carga. Determinado pela força de ligação entre os átomos.

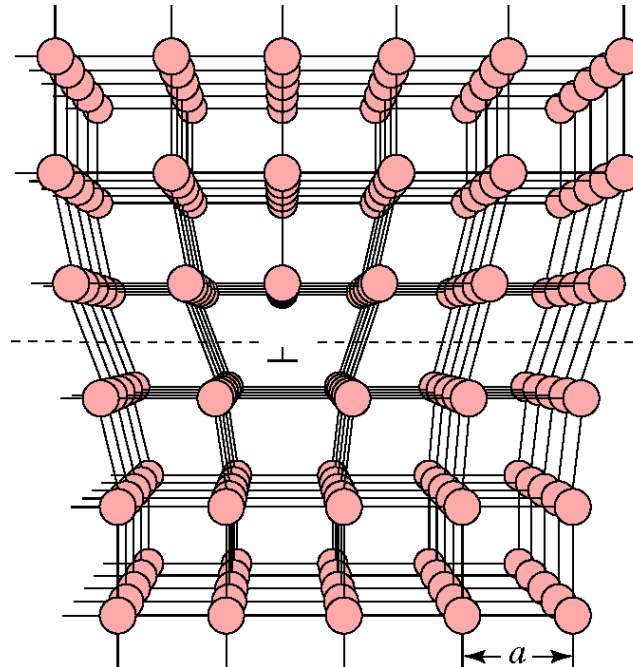




# Mecanismos atômicos de deformação plástica

## Discordâncias

Defeito responsável pelo fenômeno de deslizamento, através do qual se deforma a maioria dos metais.  
Este defeito auxilia na explicação da discrepância entre os valores teóricos e experimentais da resistência dos metais no cisalhamento.

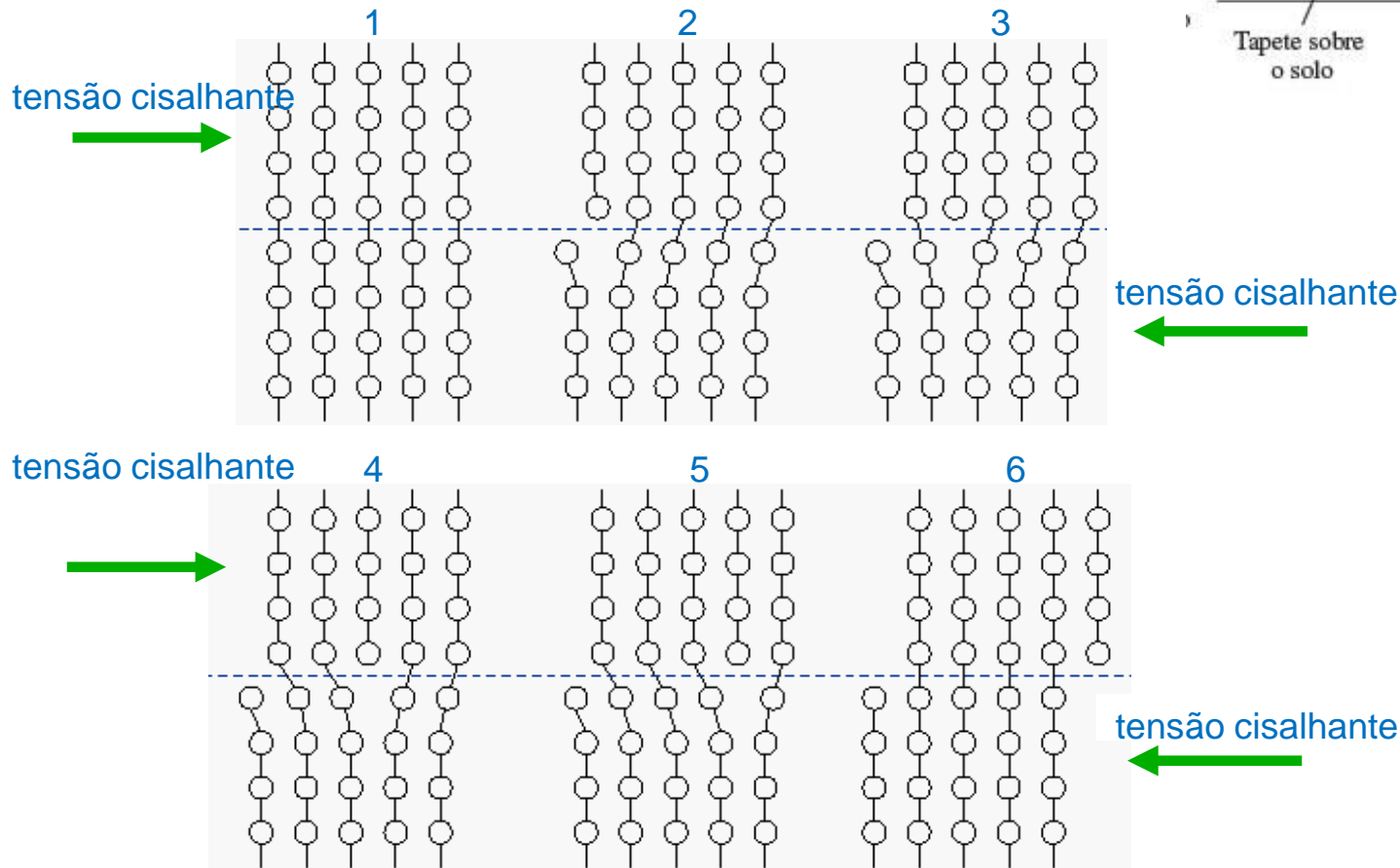
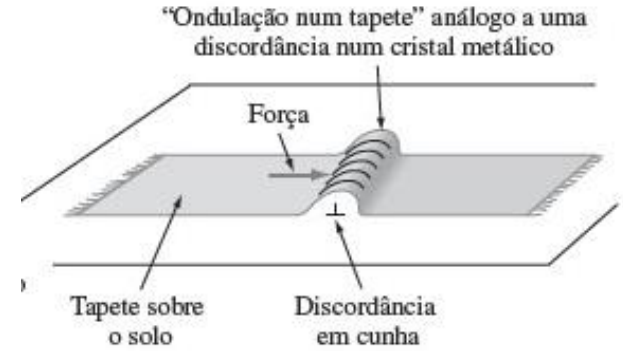


Arranjo dos átomos em torno de uma discordância em cunha (“edge dislocation”)



# Discordâncias e deformação por deslizamento

<https://www.youtube.com/watch?v=txRWX5wZ4lc>



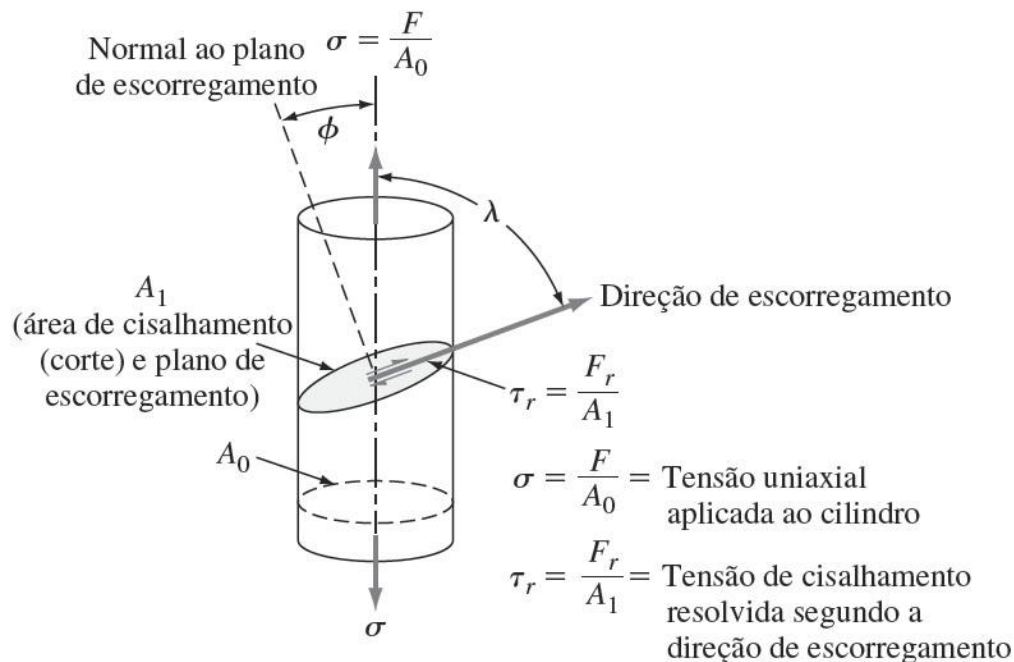


# Tensão Cisalhante Crítica para deslizamento

A extensão de deslizamento num monocristal depende da magnitude da tensão cisalhante produzida pela ação de cargas externas, da geometria da estrutura cristalina e da orientação dos planos de deslizamento ativos em relação às tensões de cisalhamento.

O deslizamento começa quando a tensão cisalhante no plano de deslizamento, segundo a direção de deslizamento, atinge um valor limite denominado **Tensão cisalhante resolvida crítica**.

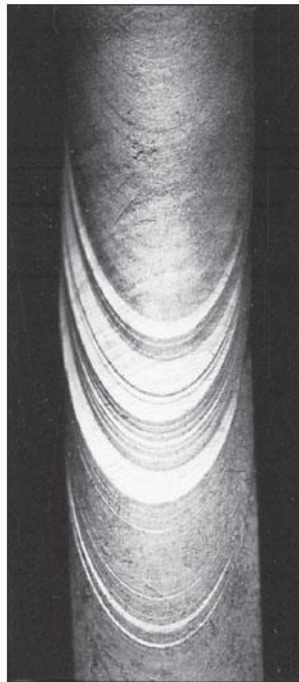
Este valor é o equivalente para monocristais ao limite de escoamento da curva  $\sigma \times \epsilon$ .



$$\tau_R = \sigma \cdot \cos \lambda \cdot \cos \Phi$$



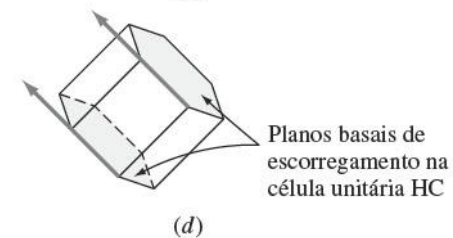
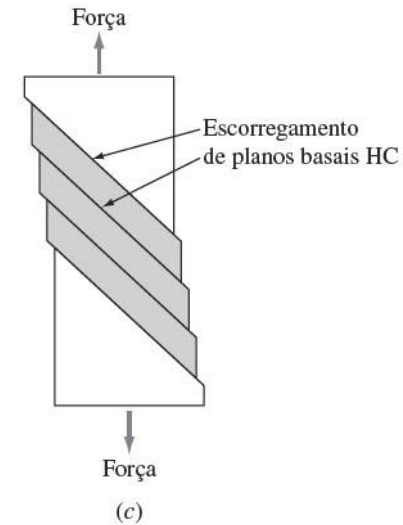
# Deformação Plástica em Monocristal



(a)



(b)



Monocristal de zinco deformado plasticamente, mostrando bandas de escorregamento: (a) vista frontal do cristal, (b) vista lateral do cristal, (c) vista lateral esquemática, indicando os planos basais de escorregamento no cristal HC e (d) indicação dos planos basais de escorregamento na célula unitária HC.



## Sistemas de escorregamento e tensões de cisalhamento resolvidas críticas em monocristais metálicos à temperatura ambiente

Metal	Estrutura cristalina	Pureza %	Plano de escorregamento	Direção de escorregamento	Tensão de cisalhamento crítica (MPa)
Zn	HC	99,999	(0001)	$[11\bar{2}0]$	0,18
Mg	HC	99,996	(0001)	$[1120]$	0,77
Cd	HC	99,996	(0001)	$[11\bar{2}0]$	0,58
Ti	HC	99,99	(1010)	$[11\bar{2}0]$	13,7
		99,9	(1010)	$[11\bar{2}0]$	90,1
Ag	CFC	99,99	(111)	$[1\bar{1}0]$	0,48
		99,97	(111)	$[1\bar{1}0]$	0,73
		99,93	(111)	$[1\bar{1}0]$	1,3
Cu	CFC	99,999	(111)	$[1\bar{1}0]$	0,65
		99,98	(111)	$[1\bar{1}0]$	0,94
Ni	CFC	99,8	(111)	$[1\bar{1}0]$	5,7
Fe	CCC	99,96	(110)	$[\bar{1}10]$	27,5
			(112)		
			(123)		
Mo	CCC		(110)	$[\bar{1}11]$	49,0

Fonte: G. Dieter, "Mechanical Metallurgy", 2. ed., McGraw-Hill, 1976, p. 129.

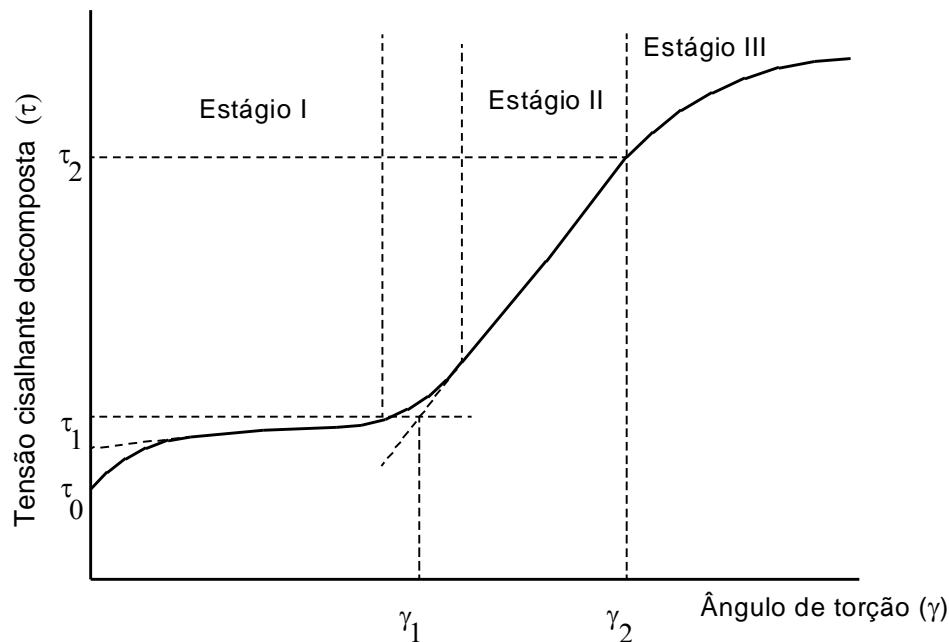


# Curva de escoamento genérica para monocristais CFC

## Região de escoamento fácil

Esse estágio é uma região linear, com taxa de encruamento muito baixa, pode não se apresentar em materiais com pequenas quantidades de impurezas, pela deformação a temperaturas elevadas ou pela orientação do cristal de forma que diversos sistemas de deslizamento fossem favorecidos sob tração. Não existe em policristais.

Durante o estágio I a deformação ocorre provavelmente pelo deslizamento num único sistema (*sistema primário*), ativada pela interação de discordâncias com defeitos de ponto e pela interseção de discordâncias móveis com outras discordâncias que cortam os planos de deslizamento. São interações de pequena amplitude que explicam a pequena taxa de encruamento observada nesse estágio.



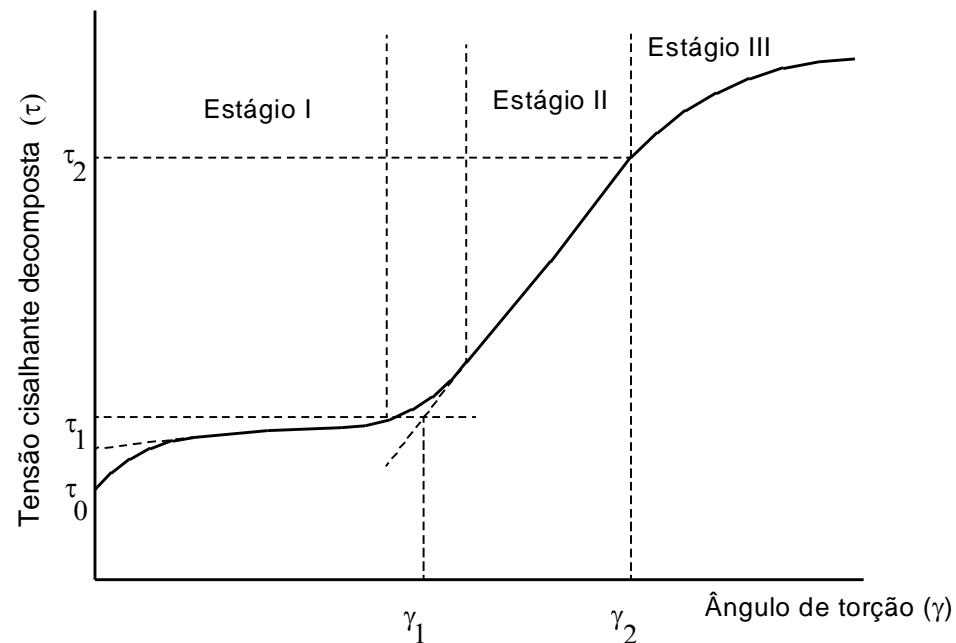


# Curva de escoamento genérica para monocristais CFC

## Região de encruamento linear

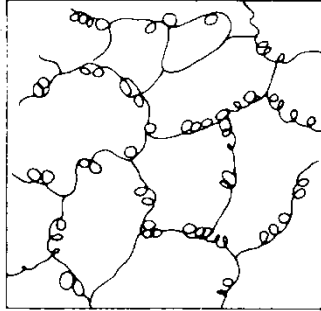
Tem-se um aumento rápido da taxa de encruamento até atingir um valor constante. O coeficiente de encruamento nesse estágio é bastante estável e independente da taxa de deformação e da temperatura empregadas no ensaio.

Durante o estágio II o deslizamento ocorre em mais de um conjunto de planos e assim são formados os emaranhados de discordâncias, que darão origem a uma **estrutura celular de discordâncias**, que consiste em regiões praticamente livres de discordâncias rodeadas por material de alta densidade de discordâncias.

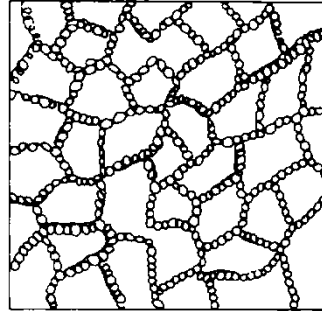




# Estrutura celular de discordâncias



(a)



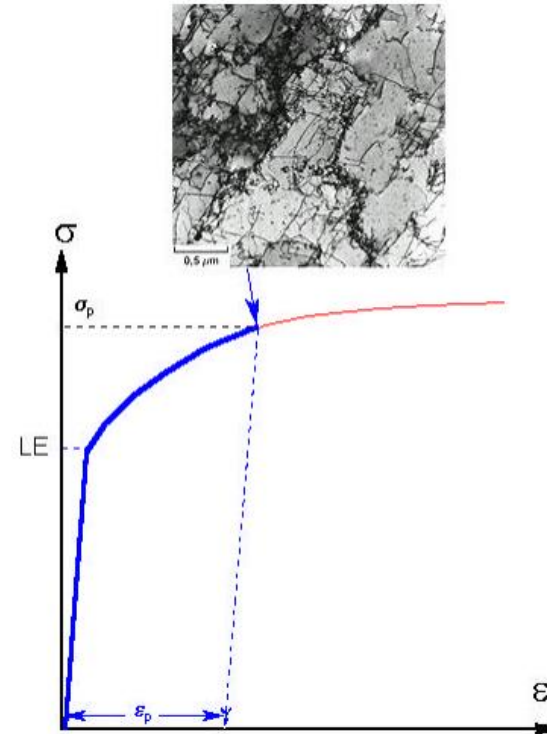
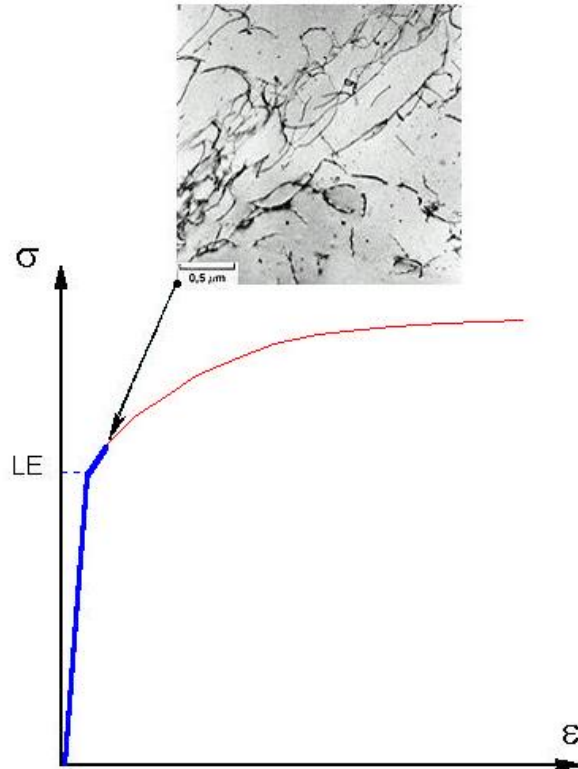
(b)





# Encruamento

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



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

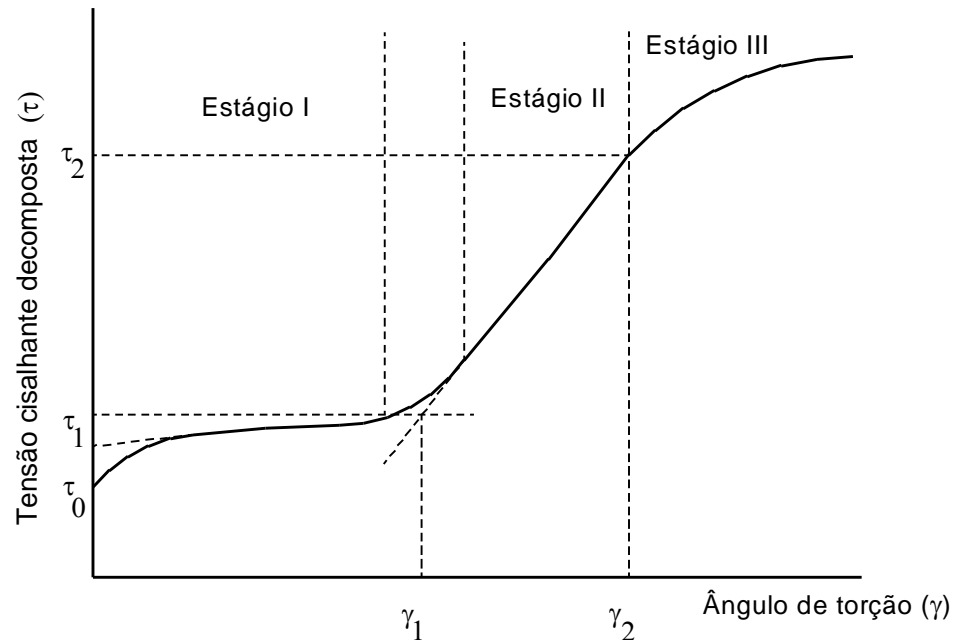


# Curva de escoamento genérica para monocristais CFC

## *Região de encruamento parabólico*

A taxa de encruamento decresce continuamente e a tensão cisalhante passa a ser uma função parabólica da distorção.

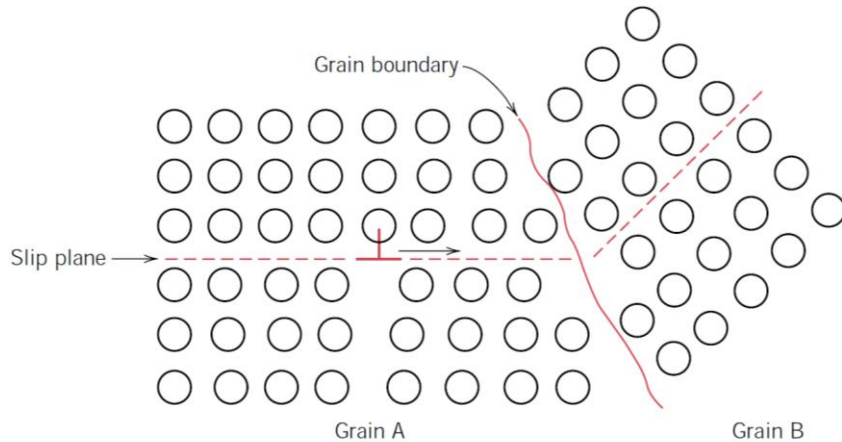
Começa a ocorrer rearranjo de discordâncias, com aniquiliação, escorregamento com desvio, ascensão, etc. Diminuindo a taxa de encruamento devido à recuperação



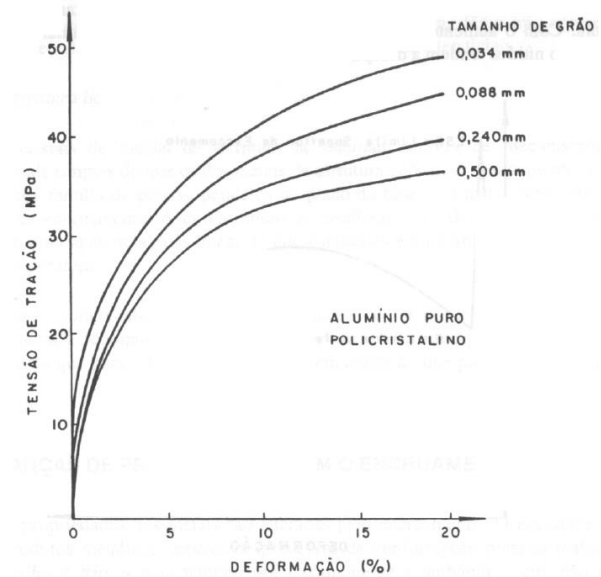


# O papel do contorno de grão

O papel do contorno de grão na causa da deformação heterogênea e na introdução do deslizamento múltiplo



Influência da tamanho de grão na tensão de escoamento



## Equação de Hall-Petch

$$\sigma_y = \sigma_0 + k / (d)^{1/2}$$

$\sigma_y$  = tensão limite escoamento

$d$  = media do tamanho de grão

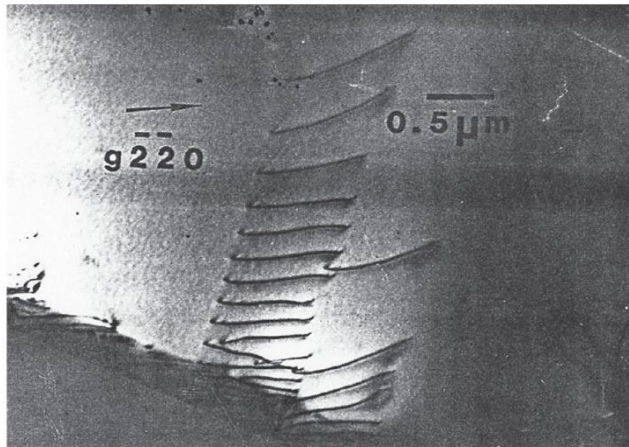
$\sigma_0$  e  $k$  são constantes do material

$\sigma_0 = 70$  Mpa

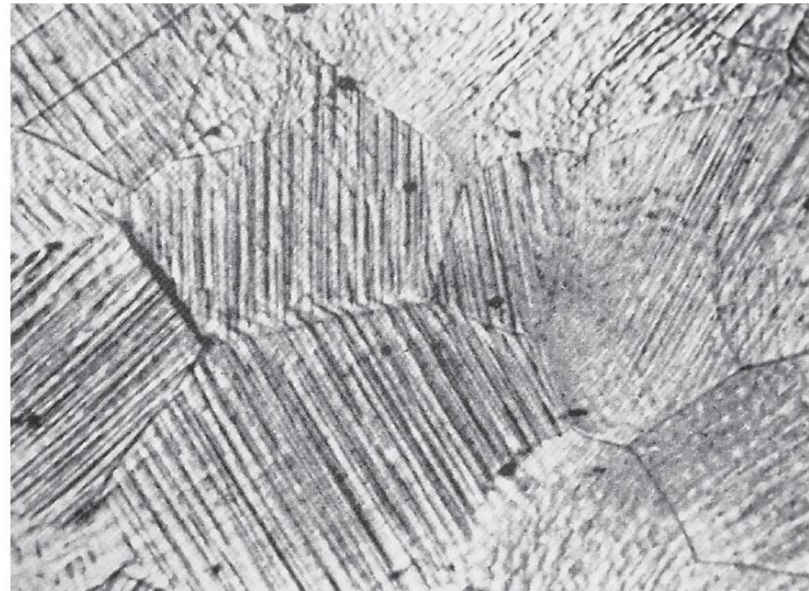




# Deformação Plástica em Policristais



Discordâncias empilhadas em um contorno de grão, observadas em uma folha fina de aço inoxidável utilizando microscopia eletrônica de transmissão. (Ampliação 20.000 × .)



Alumínio policristalino deformado plasticamente. Note-se que as bandas de escorregamento são paralelas no interior do grão, mas que há descontinuidade nos contornos. (Ampliação 60 × .)



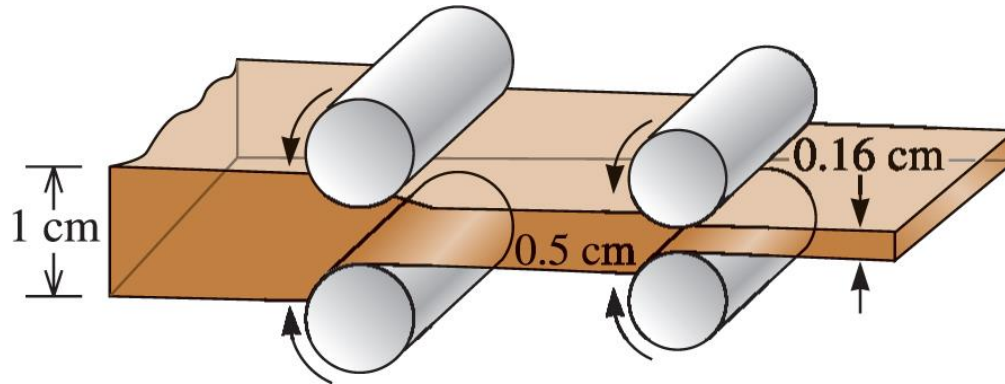
## Constantes da relação de Hall-Petch para materiais selecionados.

	$\sigma_0$ (MPa)	$K$ (MPa · m <sup>1/2</sup> )
Cu	25	0,11
Ti	80	0,40
Aço baixo carbono	70	0,74
Ni <sub>3</sub> Al	300	1,70

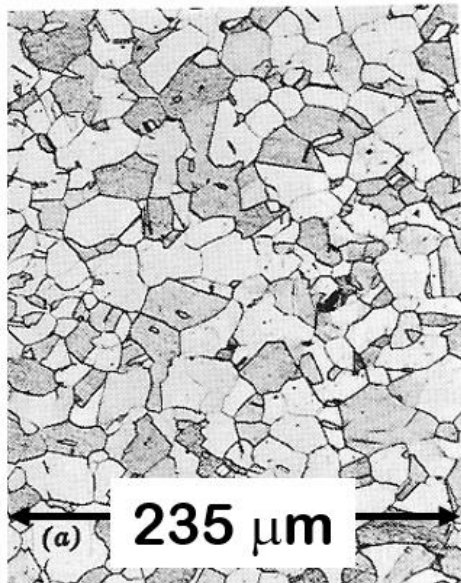
Fonte: [www.tf.uni-kiel.de/matwis/matv/pdf/chap\\_3\\_3.pdf](http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/matv/pdf/chap_3_3.pdf).



# Alteração da estrutura de grãos após deformação



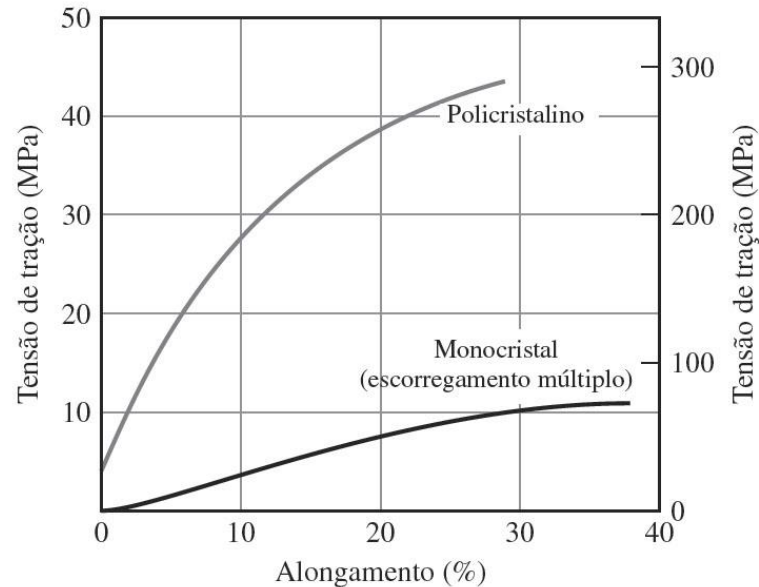
Reorientação dos grãos em uma orientação preferencial



rolling direction



# Comparação entre deformação monocristal e policristal

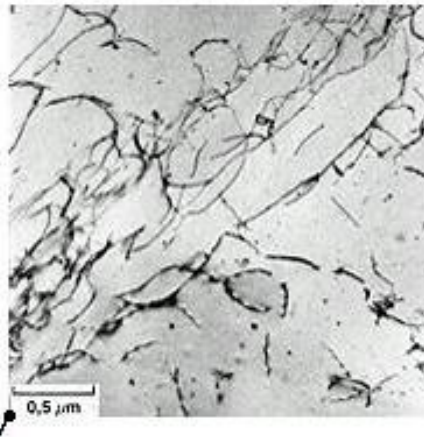


Monocristal	Policristal
Anisotrópica	Isotrópica
Único sistema	Vários sistemas (vários grãos)
Homogênea	Heterogênea (restrição geométrica de outros grãos e cg)

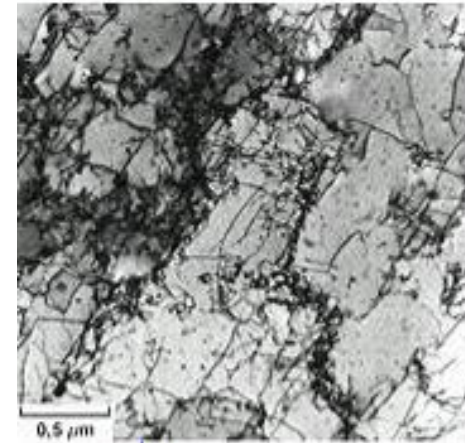


# Deformação a frio

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



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

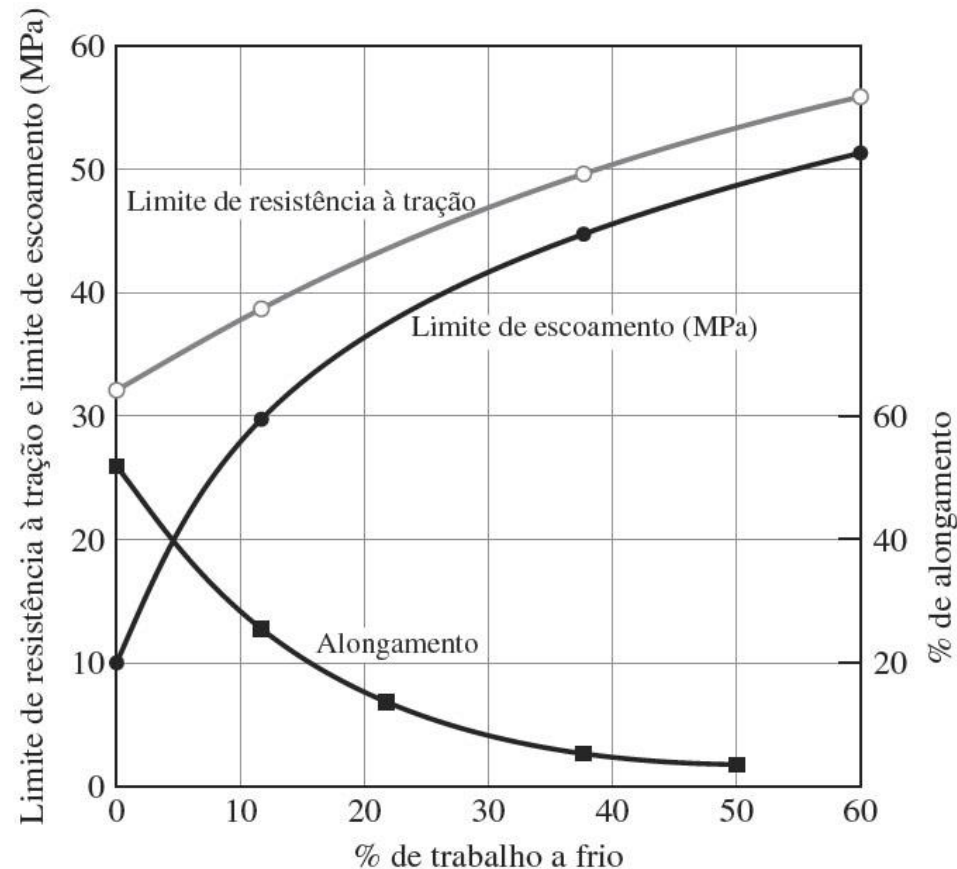






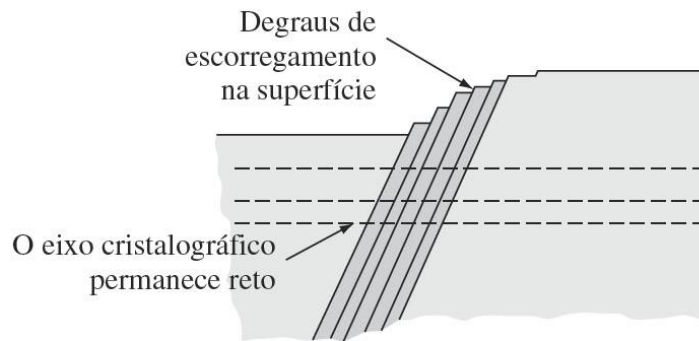
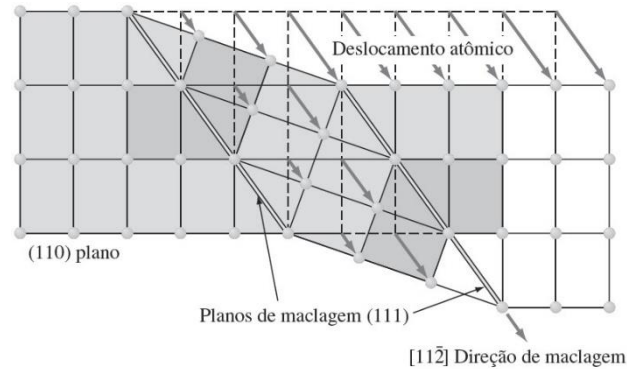
# Influência nas propriedades mecânicas

## Trabalho a frio

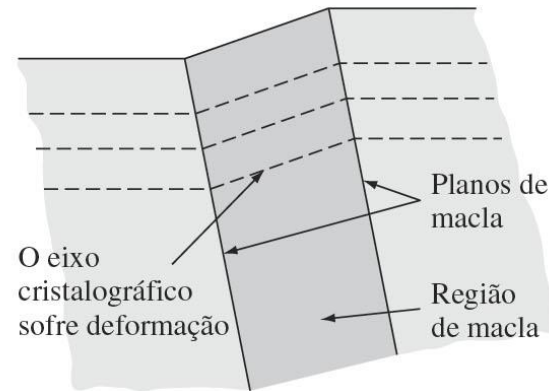


Porcentagem de deformação a frio em função do limite de resistência à tração e do alongamento até a fratura para o cobre desoxigenado. O grau de deformação a frio é expresso pela porcentagem de redução de área da seção reta da amostra metálica.

# Deformação por maclação



(a)



(b)

Esquema da superfície de um material metálico deformado por (a) escorregamento e (b) maclagem.

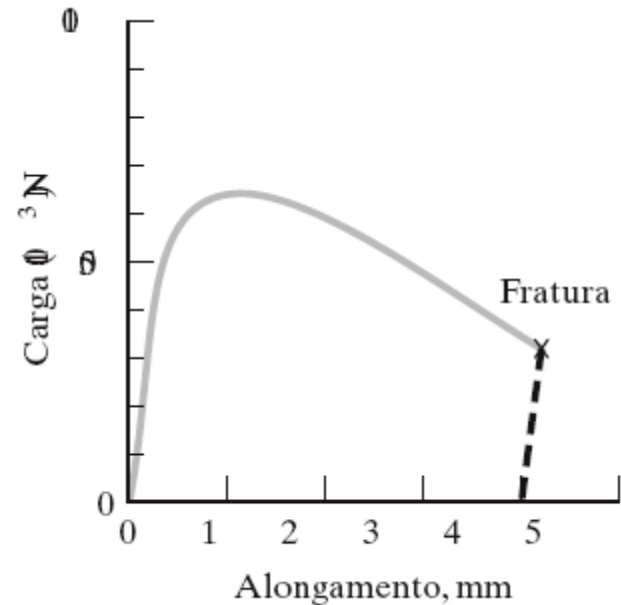


# Ensaio de tração

Consiste na aplicação de uma carga de tração uniaxial crescente em um corpo-de-prova específico até a ruptura. Mede-se a variação do comprimento ( $l$ ) como função da carga ( $P$ );



Máquina de tração. A força (carga) aplicada ao corpo de prova é registrada por uma célula de carga. A deformação sofrida pela amostra é também registrada por um extensímetro acoplado à amostra. Os dados são coletados e analisados por software controlado por computador.

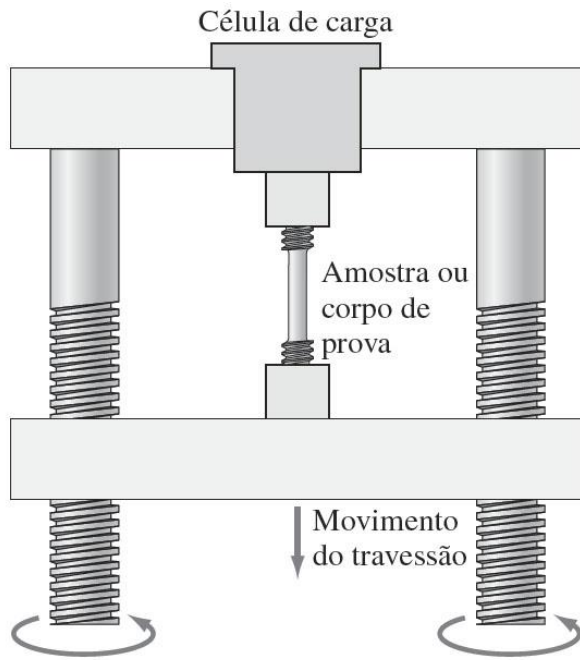


Curva de carga versus alongamento obtida em um ensaio de ruptura por tração. O corpo de prova utilizado foi alumínio 2024 T81.

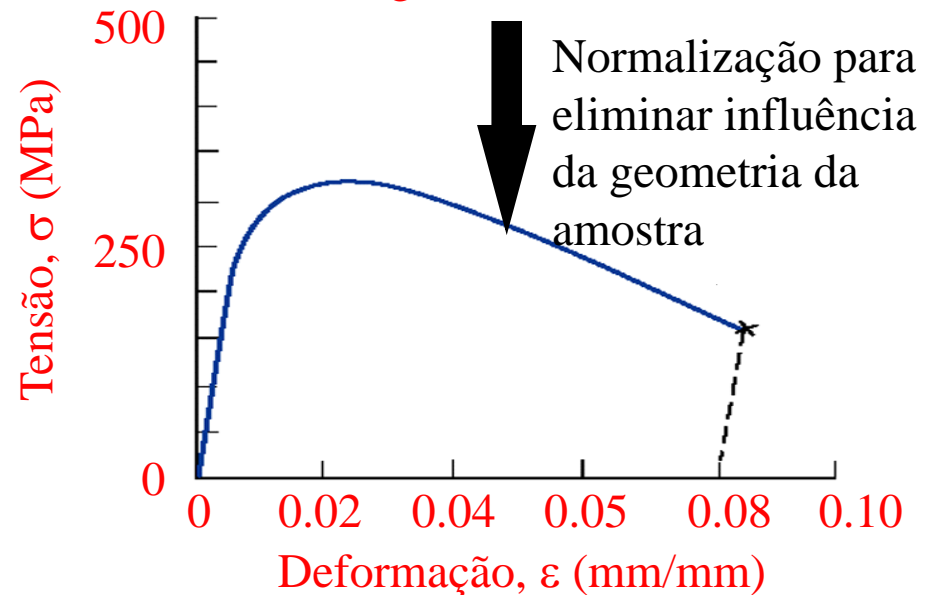
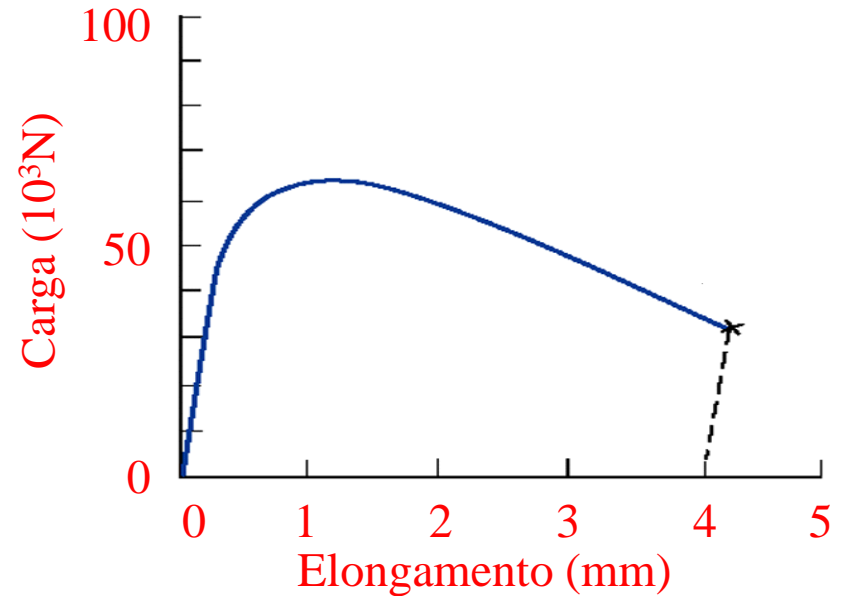




# Curva Tensão-Deformação

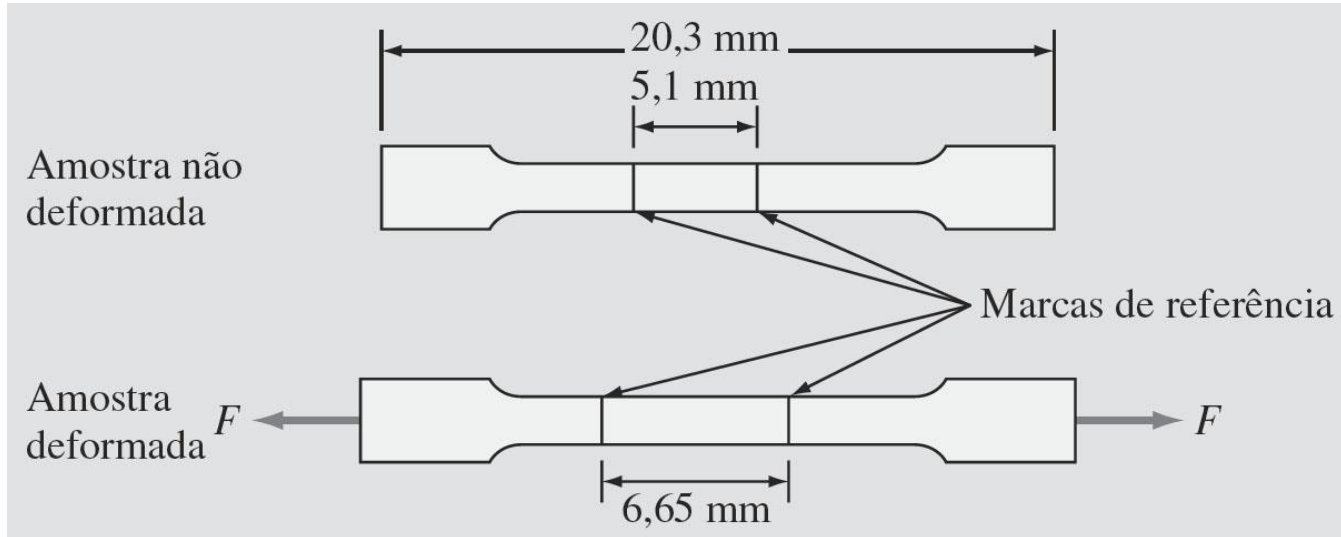


Esquema de funcionamento da máquina de tração da Figura 6.16. Observe, entretanto, que o travessão da máquina da Figura 6.16 se move para cima.





# Corpo de prova padronizado

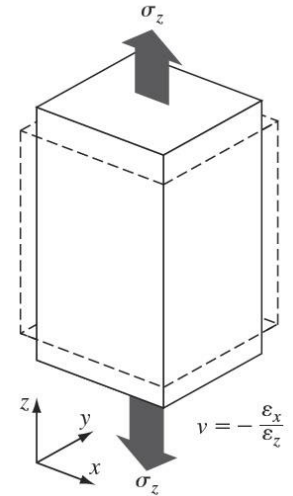


Corpo de prova plano (chapa) de tração, antes e após deformação.



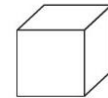
# Tensão ( $\sigma$ )

Tensão de engenharia  $\sigma = \frac{F \text{ (força de tração uniaxial média)}}{A_0 \text{ (área da seção transversal inicial)}}$

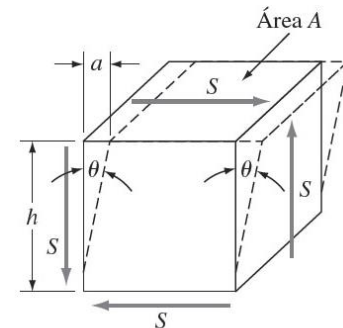


(b) Amostra cúbica submetida à tensão de tração

Tensão de cisalhamento  $\tau = \frac{F \text{ (força em direção paralela as faces superior)}}{A_0 \text{ (área da seção transversal inicial)}}$



(a) Amostra cúbica



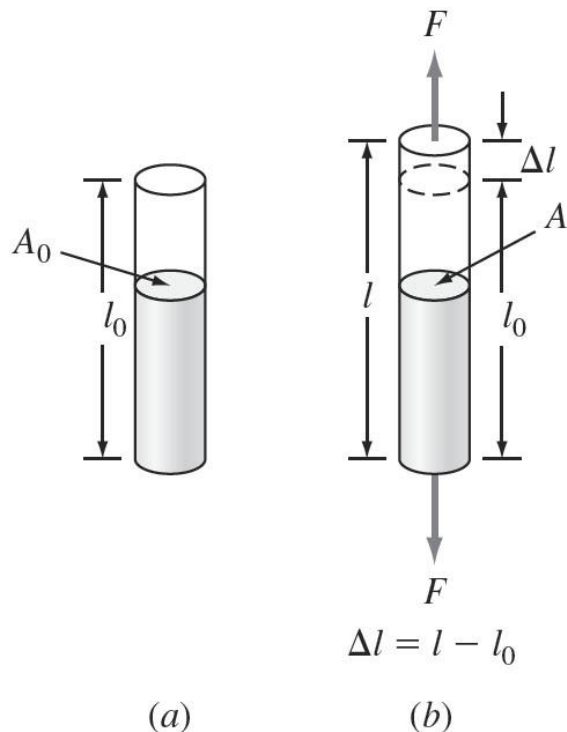
$S$  = força de cisalhamento

(c) Amostra cúbica submetida à força de cisalhamento



# Deformação ( $\varepsilon$ )

Quando se aplica uma força de tração uniaxial a uma barra cilíndrica, a barra se alonga segunda a direção de aplicação da força. O deslocamento é chamado de deformação



$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l}$$

**Alongamento ( $\Delta l$ )** de uma barra cilíndrica de um material metálico submetido a uma força de tração uniaxial  $F$ .

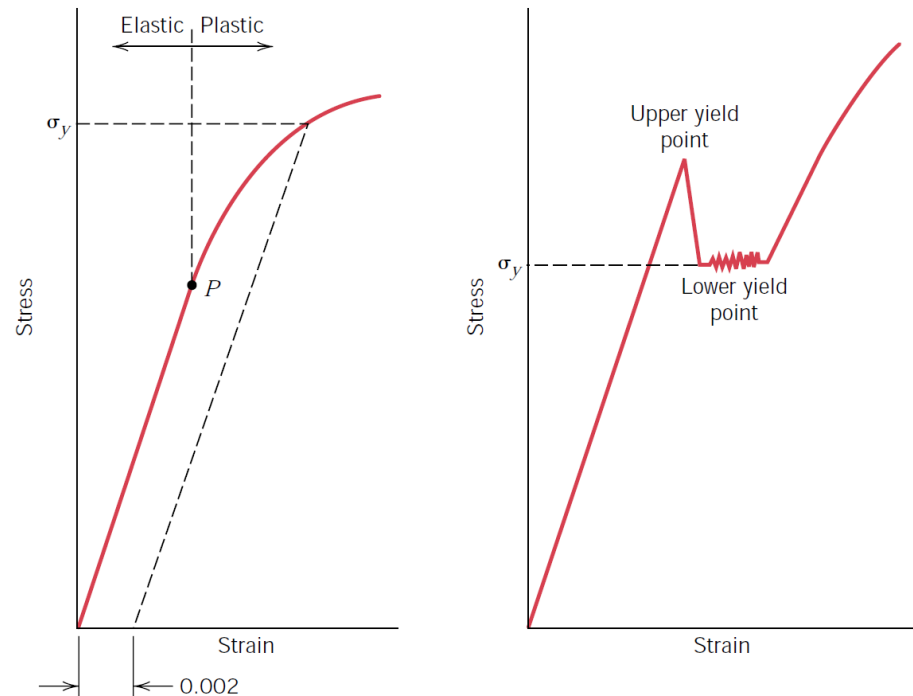
(a) Barra cilíndrica sem qualquer força aplicada;

(b) barra cilíndrica submetida a uma força de tração uniaxial  $F$ , que provoca o alongamento da barra cilíndrica desde o comprimento  $l_0$  até  $l$ .



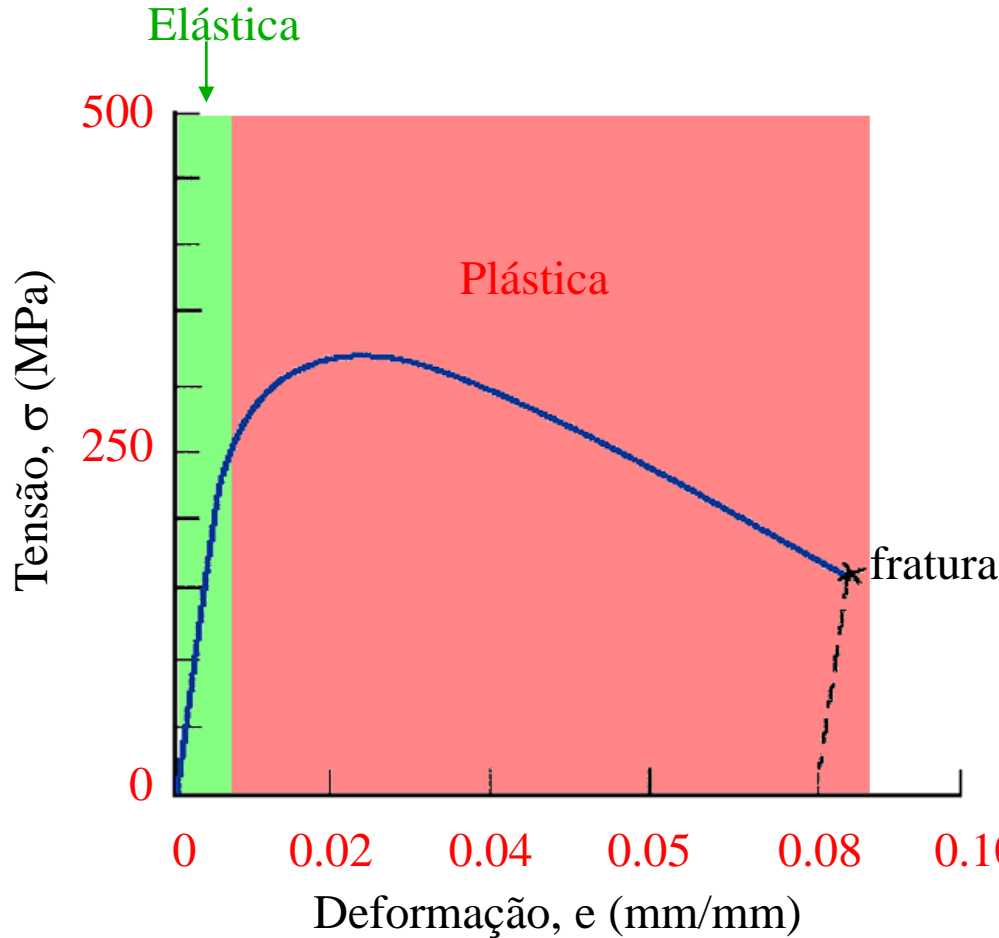
# Região elástica

- $\sigma$  é proporcional a  $\varepsilon \Rightarrow \sigma = E \cdot \varepsilon$  **E=módulo de Young**
- A deformação é reversível.
- Ligações atômicas são alongadas mas não se rompem.

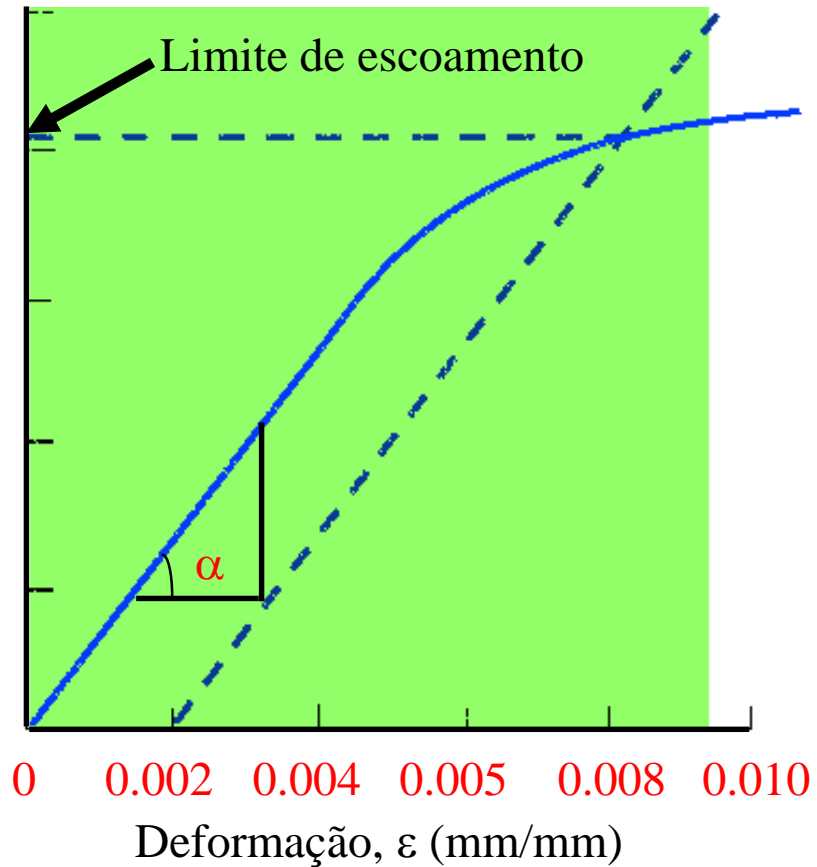




# Curva Tensão-Deformação (cont.)



O Módulo de Young,  $E$ , (ou módulo de elasticidade) é dado pela derivada da curva na região linear.



Como não existe um limite claro entre as regiões elástica e plástica, define-se o **Limite de escoamento**, como a tensão que, **após liberada**, causa uma pequena deformação residual de 0.2%.



# Cisalhamento

Uma tensão cisalhante causa uma deformação cisalhante, de forma análoga a uma tração.

## Tensão cisalhante

$$\tau = F/A_0$$

onde  $A_0$  é a área **paralela** a aplicação da força.

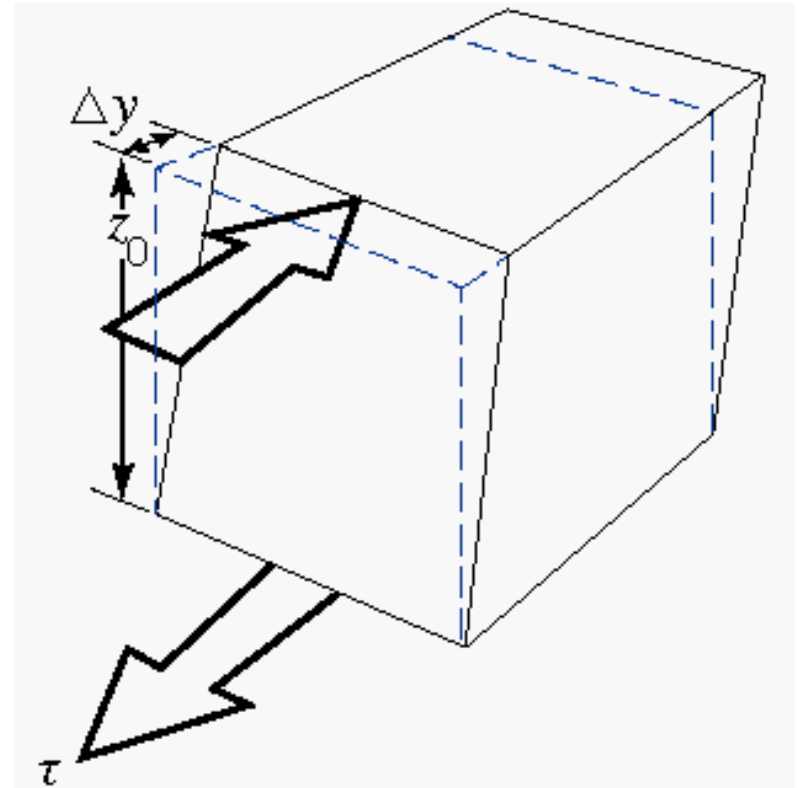
## Deformação cisalhante

$$\gamma = \tan \theta = \Delta y/z_0$$

onde  $\theta$  é o ângulo de deformação

Módulo de cisalhamento  $G$

$$\tau = G \gamma$$





# Coeficiente de Poisson

A deformação elástica longitudinal de um material metálico é acompanhada de uma variação de dimensões transversais. A aplicação da tensão de tração  $\sigma_z$ , provoca uma deformação axial  $+\varepsilon_z$  e contrações laterais  $-\varepsilon_x$  e  $-\varepsilon_y$ .

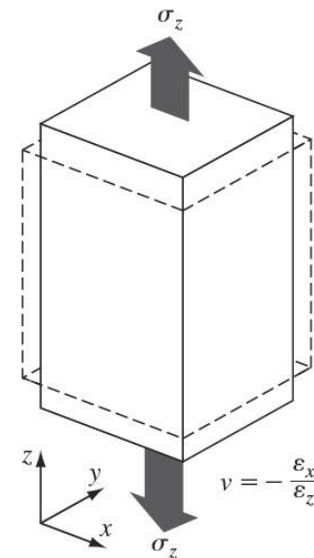
Considerando comportamento isotrópico,  $\varepsilon_x$  e  $\varepsilon_y$  são iguais.

A Relação entre as deformações é dada pelo **coeficiente de Poisson  $\nu$** .

Valores entre 0,25 e 0,40

$$E = 2G(1+\nu)$$

$$\nu = - \frac{\varepsilon \text{ (lateral)}}{\varepsilon \text{ (longitudinal)}} = - \frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z} = - \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z}$$



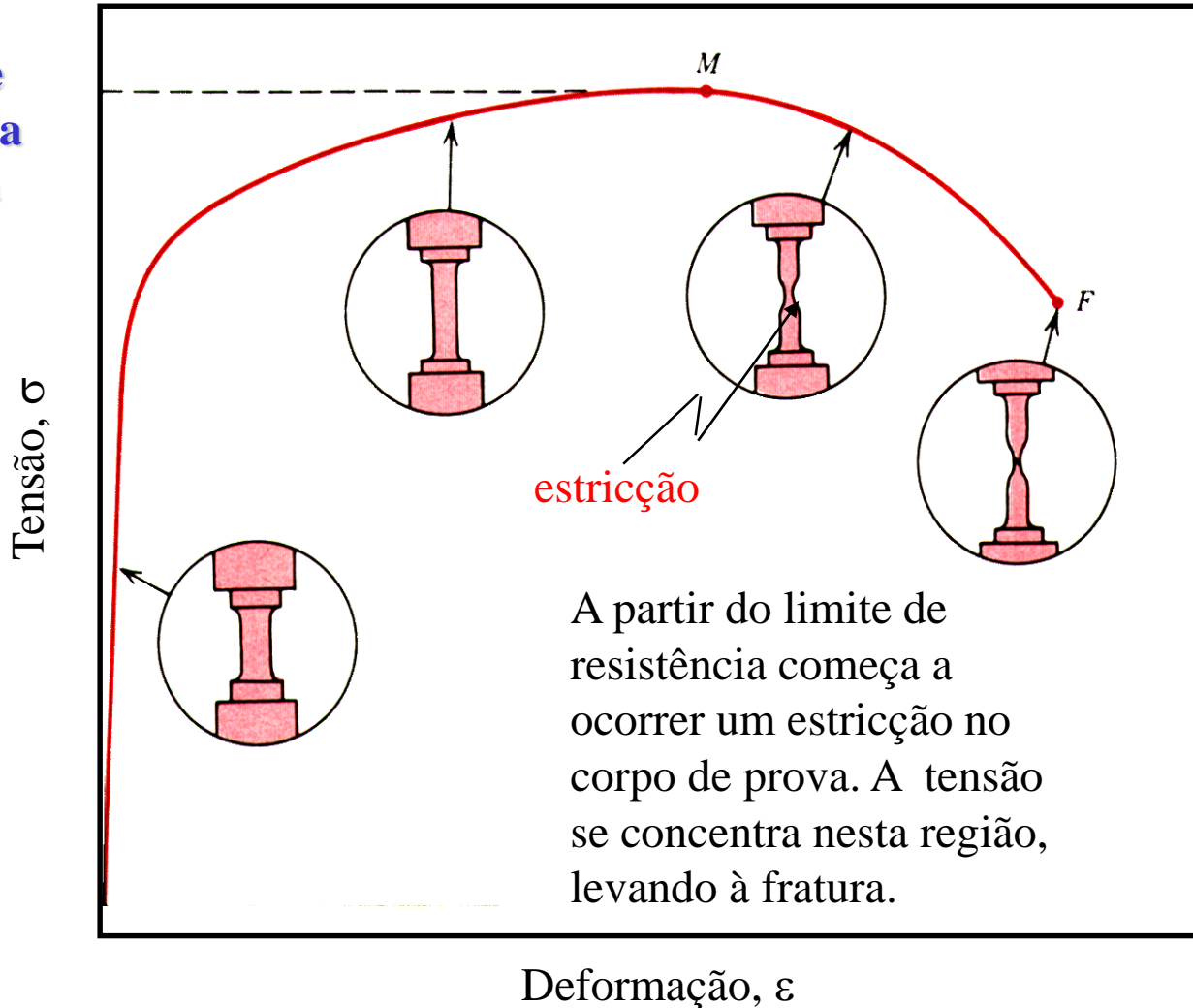
(b) Amostra cúbica submetida à tensão de tração





# Estricção e limite de resistência

Limite de  
resistência  
mecânica





# Ductilidade

Ductilidade é uma medida da extensão da deformação que ocorre até a fratura.

Ductilidade pode ser definida como:

$$\% \text{ alongamento} = \frac{\text{comprimento final} - \text{comprimento inicial}}{\text{comprimento inicial}} = \frac{l - l_0}{l_0} \times 100$$

$$\% \text{ redução de área} = \frac{\text{área inicial} - \text{área final}}{\text{área inicial}} = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100$$

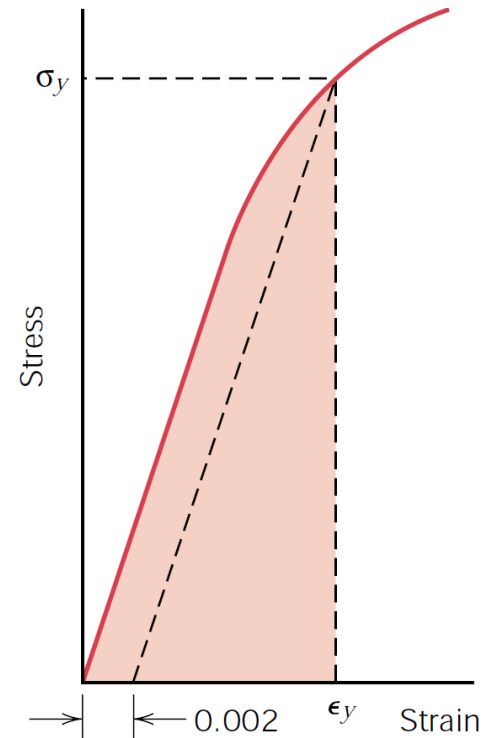


# Resiliência

Resiliência é a capacidade que o material possui de absorver energia elástica sob tração e devolvê-la quando relaxado.

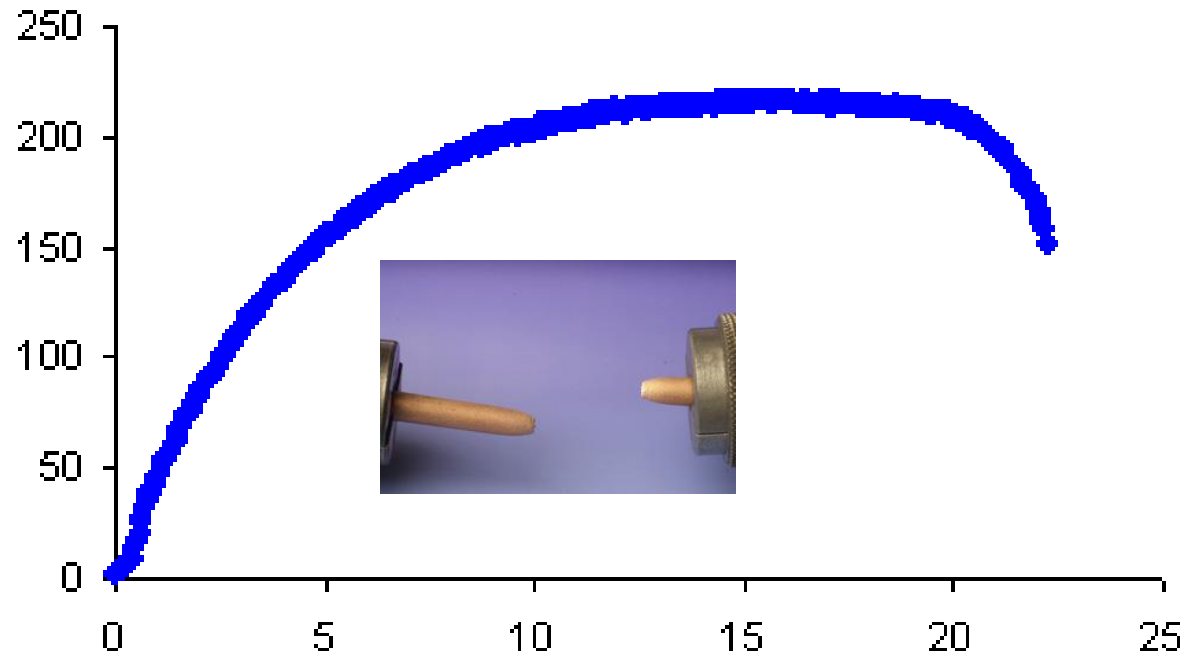
área sob a curva dada pelo limite de escoamento e pela deformação no escoamento.

Estes materiais seriam ideais para uso em molas.



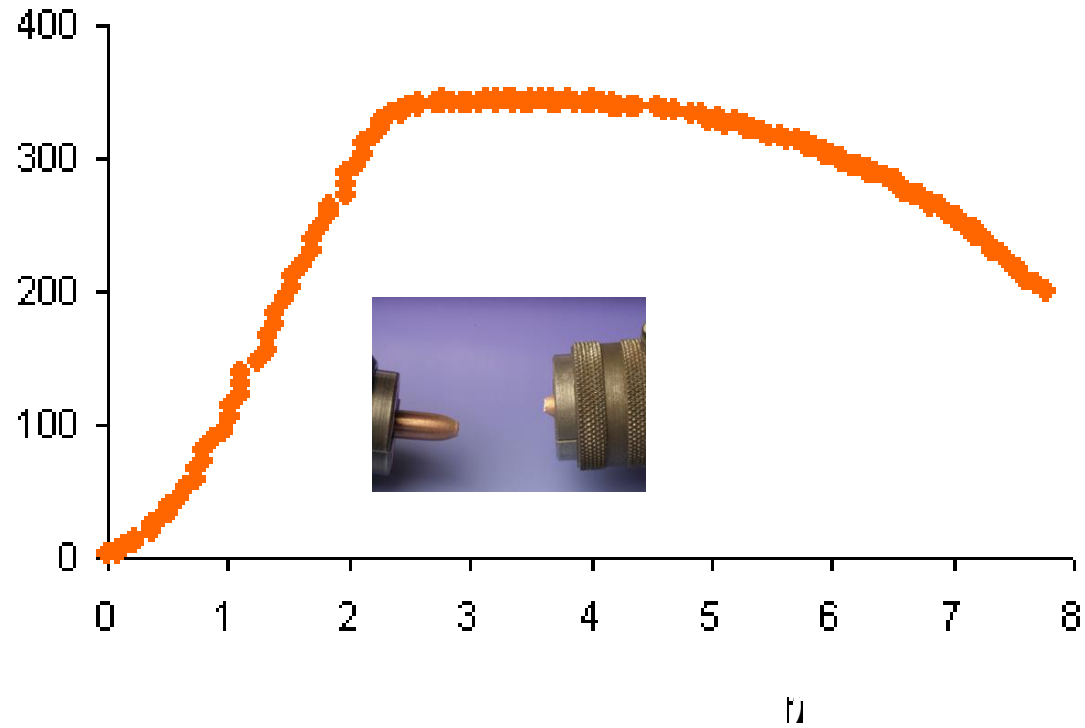


# Curva $\sigma$ - $\epsilon$ para Cobre Recozido



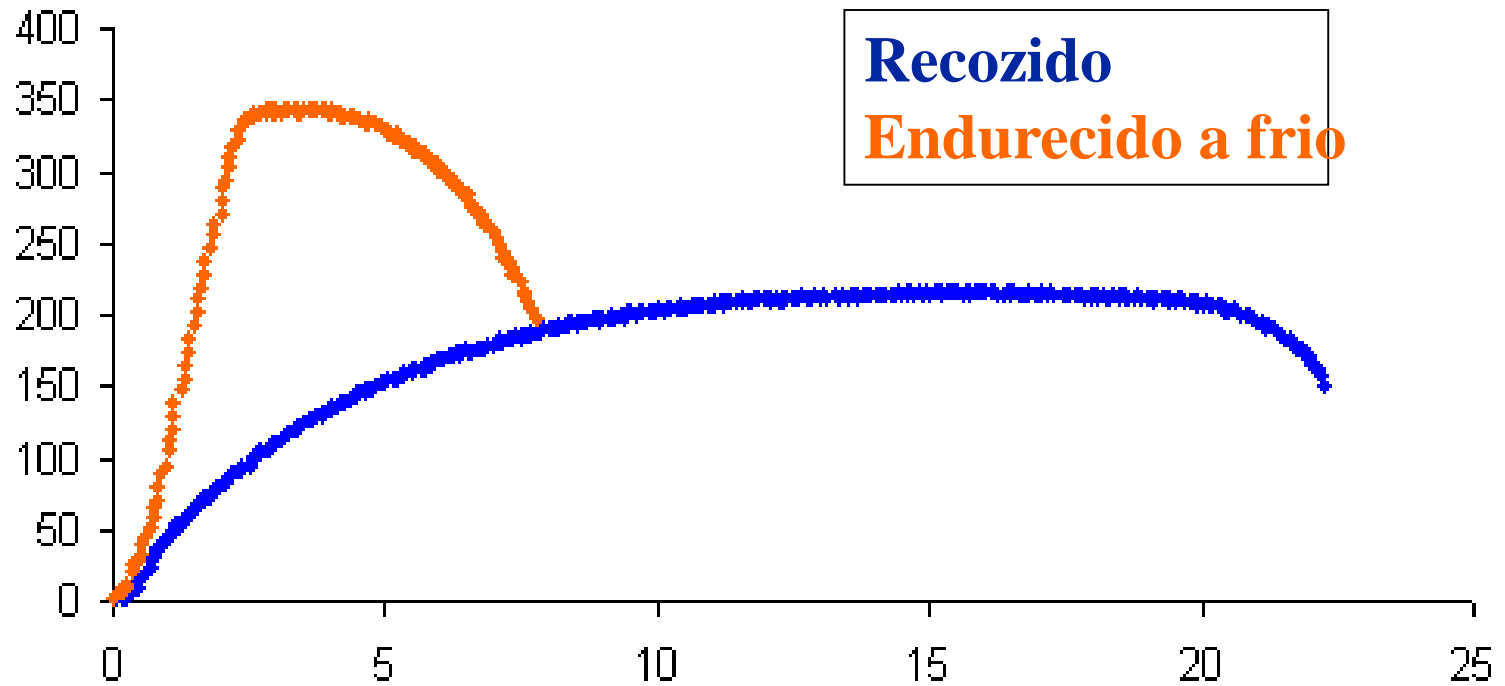


# Curva $\sigma$ - $\epsilon$ para Cobre Endurecido a Frio





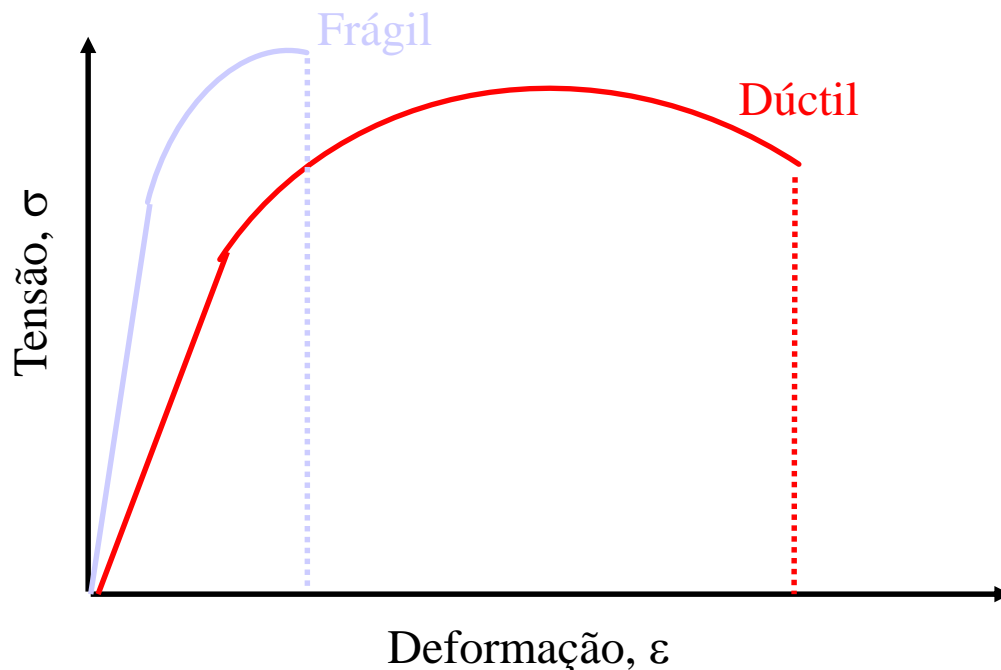
# Comparação





# Tenacidade

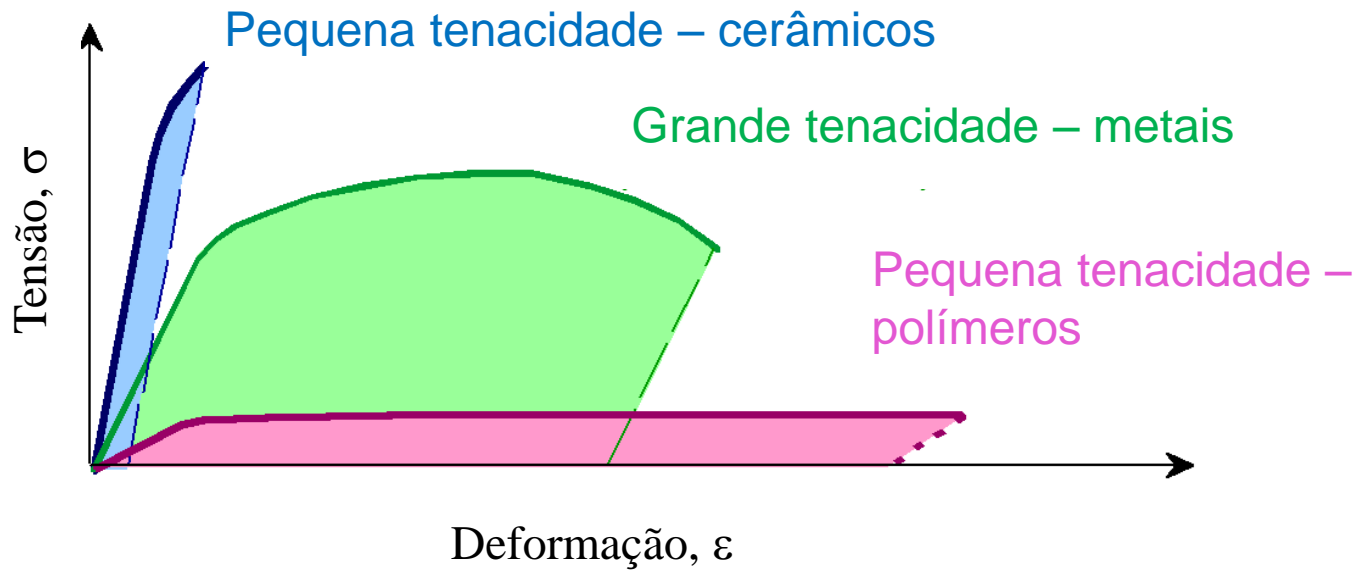
Tenacidade (toughness) é a capacidade que o material possui de absorver energia mecânica até a fratura. área sob a curva até a fratura.



O material frágil tem maior limite de escoamento e maior limite de resistência. No entanto, tem menor tenacidade devido a falta de ductilidade (a área sob a curva correspondente é muito menor).



# Tenacidade

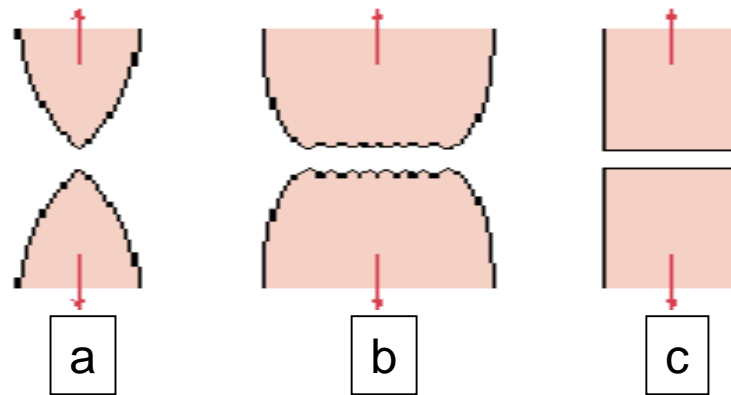






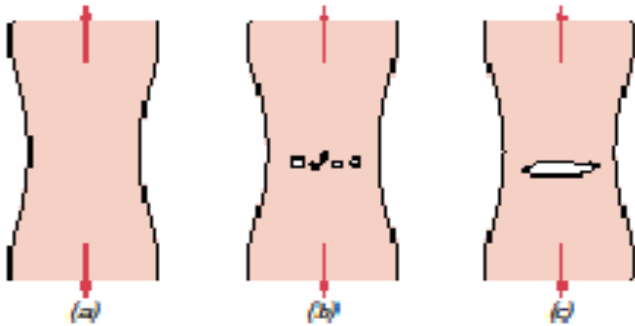
# Correlação microestrutura e propriedade

- Falha mecânica

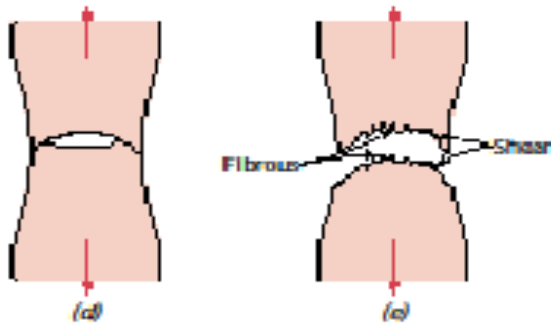


- (a) – fratura muito dúctil – ouro puro ou chumbo  
(b) – fratura moderadamente dúctil  
(c) – fratura frágil

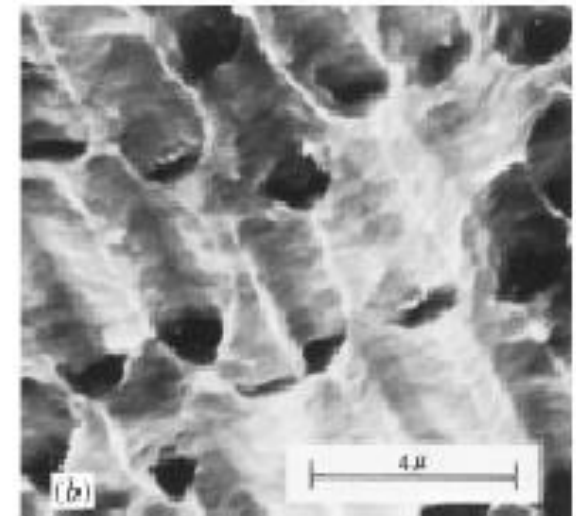
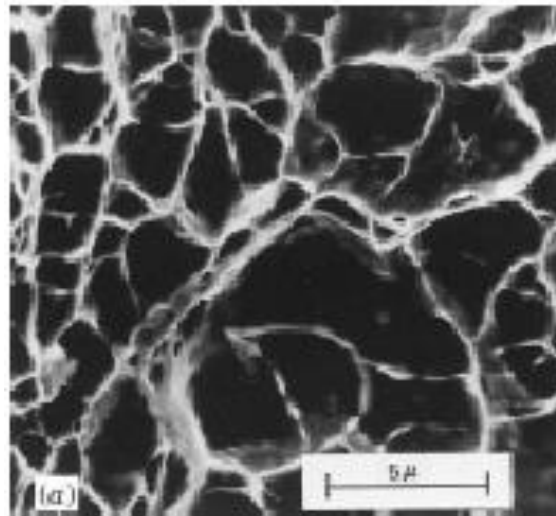
# Fratura dúctil



Fratura tipo taça e cone



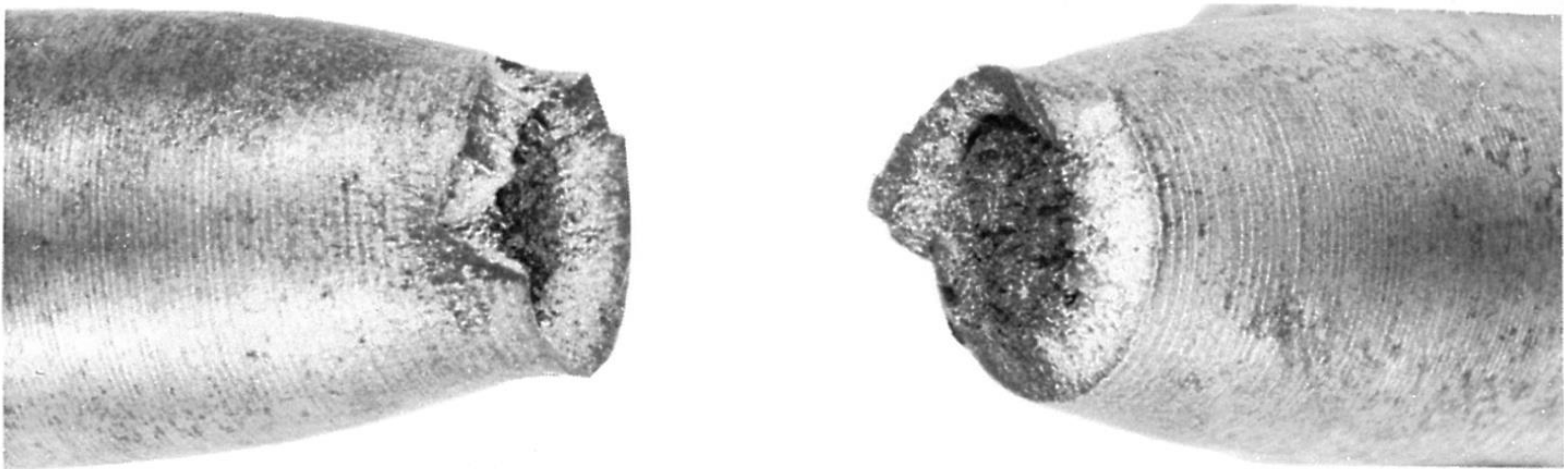
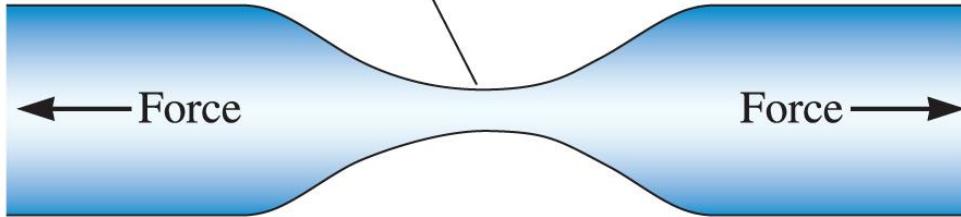
Estágios na fratura taça e cone



Microcavidades esféricas fratura ductil cargas de tração uniaxiais



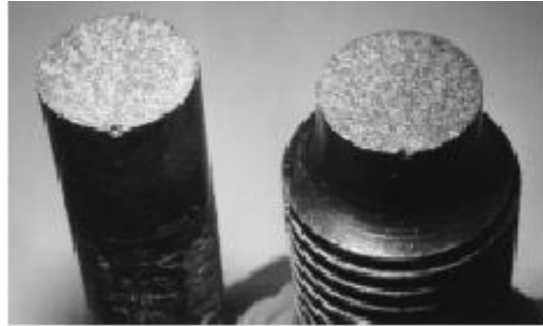
Formação da estrição



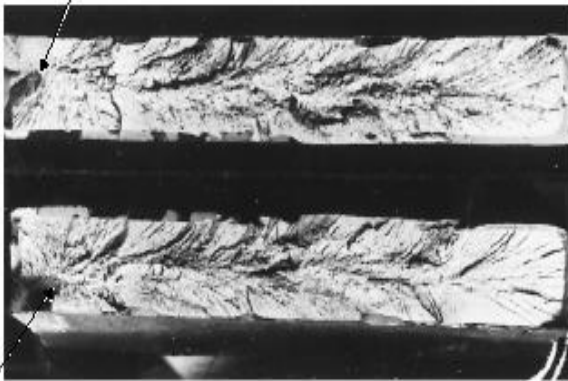
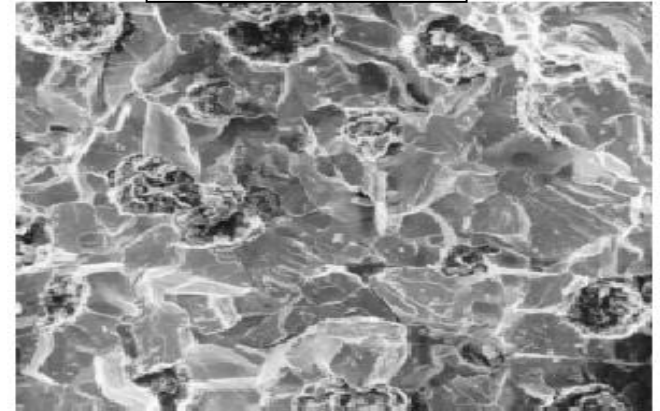
Deformação localizada de um material dúctil durante testes de tração produz estrição



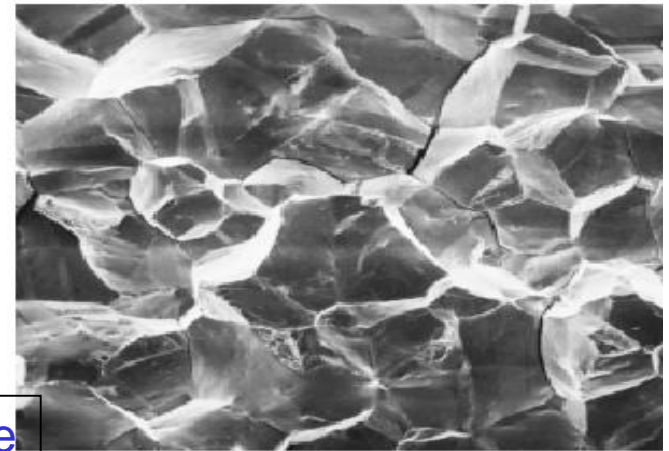
# Fratura Frágil



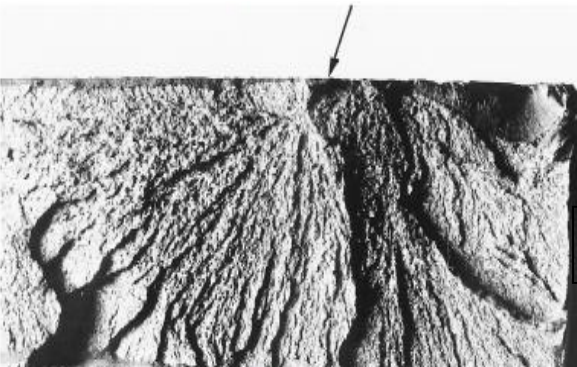
transgranular



Marcas de sargento



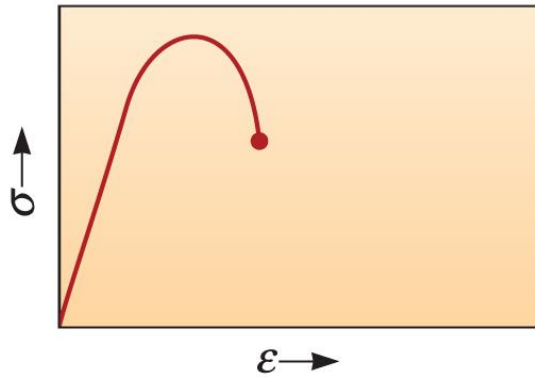
intergranular



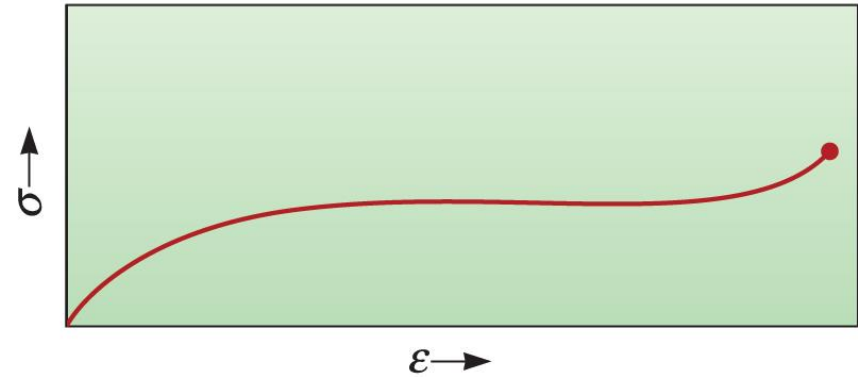
Nervuras em forma de leque



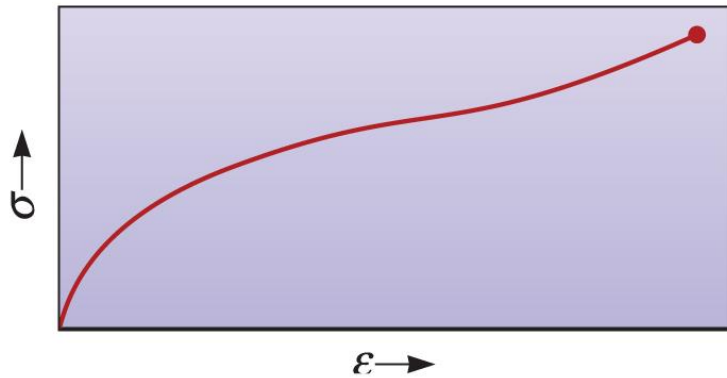
(a) Metal



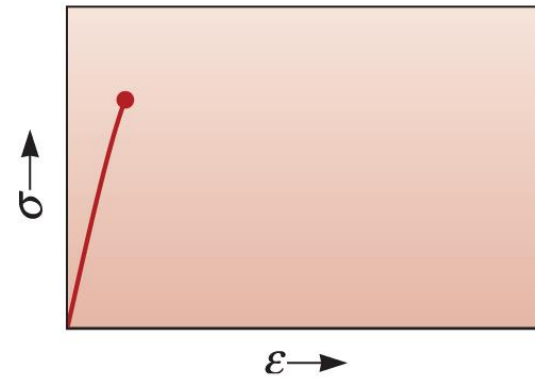
(b) Material termoplástico acima de  $T_g$   
temperatura de transição vítrea



(c) Elastômero



(d) Cerâmicas, vidro e concreto



Curvas tensão-deformação referentes à tração de diferentes materiais.

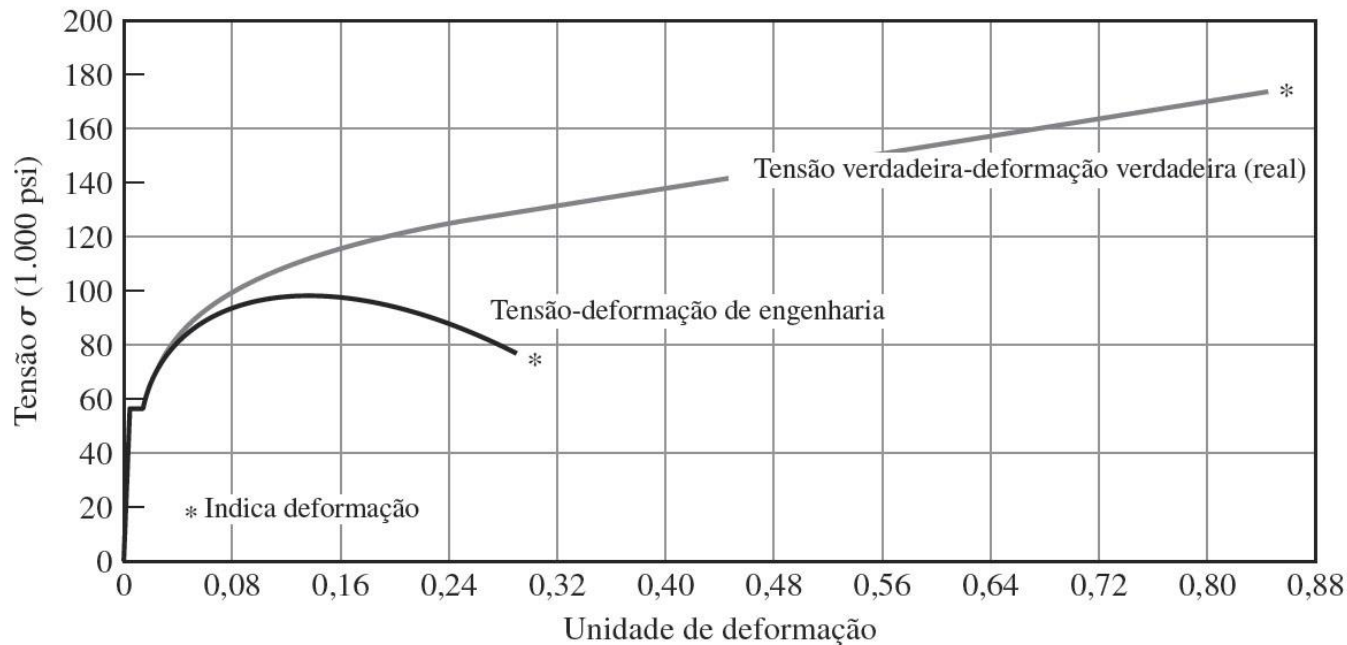


# A curva $\sigma$ - $\epsilon$ real

A tensão de engenharia é calculada dividindo a  $F$  aplicada ao corpo de prova pela área inicial da sua seção reta  $A_0$ . No entanto, durante o ensaio de tração, a área da seção reta do corpo de prova varia continuamente e a tensão nominal calculada é um valor preciso.

$$\sigma_v = \frac{F}{A_i}$$

$$\text{Deformação verdadeira} = \int_{l_0}^{l_i} \frac{dl}{l} = Ln \frac{l_i}{l_0} = Ln \frac{A_0}{A_i}$$





# Coeficiente de encruamento

Quanto mais se deforma plasticamente um metal, mais ele endurece. Deste modo, é necessário aplicar tensões ainda mais elevadas para continuar deformando-o plasticamente. A sensibilidade de uma metal a esse encruamento pode ser avaliada pelo coeficiente de encruamento,  $n$ , medido na região plástica das curvas tensão-deformação verdadeiras.

$$\sigma_T = K\epsilon_T^n$$

Material	$n$	$K$	
		MPa	psi
Aço Baixo Carbono (Recozido)	0.21	600	87,000
Aço Liga 4340 Temperado e Revenido a 315°C)	0.12	2650	385,000
Aço Inoxidável 304 (Recozido)	0.44	1400	205,000
Cobre (Recozido)	0.44	530	76,500
Latão Naval (Recozido)	0.21	585	85,000
Liga Alumínio 2024 (Trat. Térm. T3)	0.17	780	113,000
Liga Magnésio AZ-31B (Recozida)	0.16	450	66,000



# Referências Bibliográficas

- 1) Askeland, D. R.; Phule, P. P. Ciência e engenharia dos materiais. São Paulo: CENGAGE, 2008;
- 2) Callister Jr., W. D. Fundamentos da ciência e engenharia de materiais. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2006;
- 3) Callister Jr., W. D. Ciência e engenharia de materiais. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2008;
- 4) Shackelford, J. E. Ciência dos materiais. São Paulo: Prentice Hall, 2008;
- 5) Smith, W. Hashemi, J. Fundamentos de Engenharia e Ciência dos Materiais – MacGrawHill