



# Ensaaios dos Materiais

Engenharia e Ciência dos Materiais I  
Profa.Dra.Lauralice Canale



## Normas Técnicas para Ensaaios

- As normas são utilizadas para se descrever o método correto para se efetuar um determinado ensaio mecânico.
- As normas mais utilizadas pelos laboratórios de ensaios mecânicos pertencem as seguintes associações:
- ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas)
- ASTM (American Society for Testing and Materials)
- DIN (Deutsches Institut für Normung)
- BSI (British Standards Institution)
- ASME (American Society of Mechanical Engineers)
- ISSO (International Organization for Standardization)
- JIS (Japanese Industrial Standards)
- SAE (Society of Automotive Engineers)



# Ensaaios Mecânicos

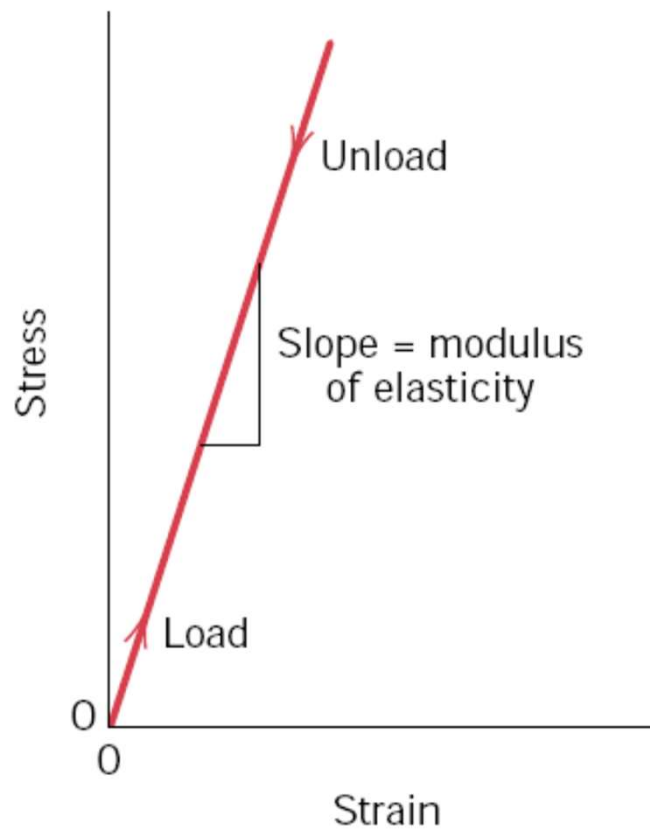
- Servem para se conhecer as características dos materiais de modo a poder projetar componentes de tal maneira que, quando em serviço as deformações não sejam excessivas e não causem fratura.
- O comportamento mecânico de um materiais reflete a relação entre a sua resposta ou deformação a uma carga ou força aplicada



# Deformação Elástica

- Deformação não é permanente, o que significa que quando a carga é liberada, a peça retorna à sua forma original
- Processo no qual tensão e deformação são proporcionais
- A deformação elástica é resultado de um pequeno alongamento ou contração da célula cristalina na direção da tensão (tração ou compressão) aplicada.
- Gráfico da tensão x deformação resulta em uma relação linear. A inclinação deste segmento corresponde ao **módulo de elasticidade E**

# Módulo de Elasticidade



$$\sigma = E \varepsilon$$

$E$  = módulo de elasticidade

$\sigma$  = tensão

$\varepsilon$  = deformação



# Módulo de Elasticidade

- Quanto maior o módulo,

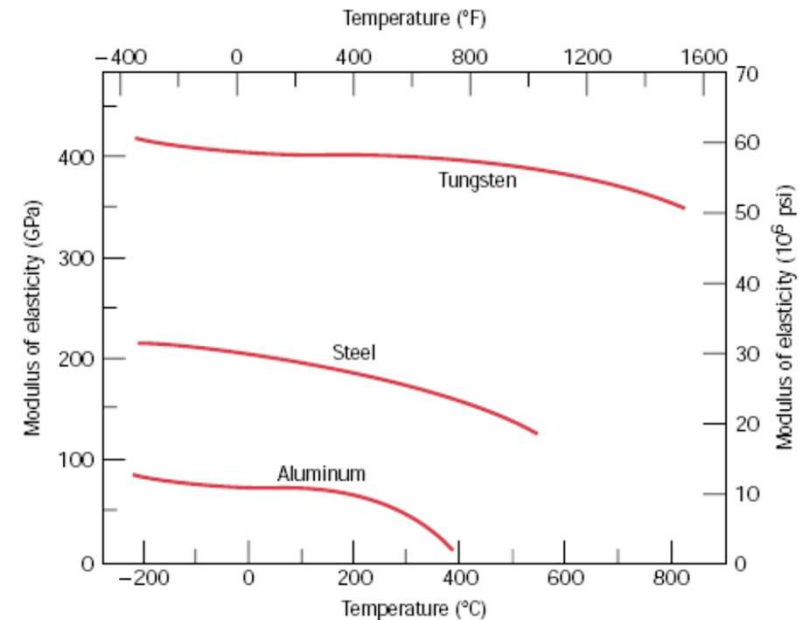
mais rígido será o material ou menor será a deformação elástica

O módulo do aço é cerca de 3 vezes maior que o correspondente para as ligas de alumínio, ou seja, quanto maior o módulo de elasticidade, menor a deformação elástica resultante.

Módulo de elasticidade: rigidez ou uma resistência do material à deformação elástica

# Módulo de Elasticidade

- O módulo de elasticidade é dependente da temperatura, com o aumento da temperatura, o módulo de elasticidade tende a diminuir



Valores típicos dos módulos de elasticidade a diferentes temperaturas.

	<b>Módulo de Elasticidade, GPa.</b>				
<b>Material</b>	<b>20°C</b>	<b>205°C</b>	<b>427°C</b>	<b>538°C</b>	<b>649°C</b>
<b>Aço carbono</b>	210	190	158	137	127
<b>Ligas de Ti</b>	116	98	75	71	
<b>Ligas de Al</b>	74	67	55		



# Deformação Plástica

- Para a maioria dos materiais metálicos, o regime elástico persiste apenas até deformações de aproximadamente 0,005. À medida que o material é deformado além, desse ponto, a tensão não é mais proporcional à deformação (lei de Hooke) e ocorre uma deformação permanente não recuperável, a deformação plástica.





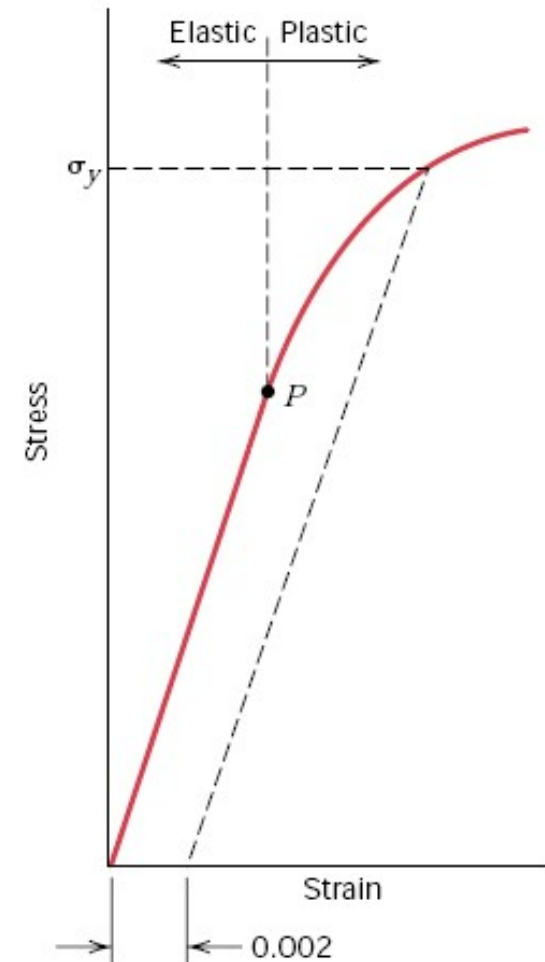
# Deformação Plástica

A deformação plástica corresponde à quebra de ligações com os átomos vizinhos originais e em seguida formação de novas ligações

A deformação ocorre mediante um processo de escorregamento, que envolve o movimento de discordâncias

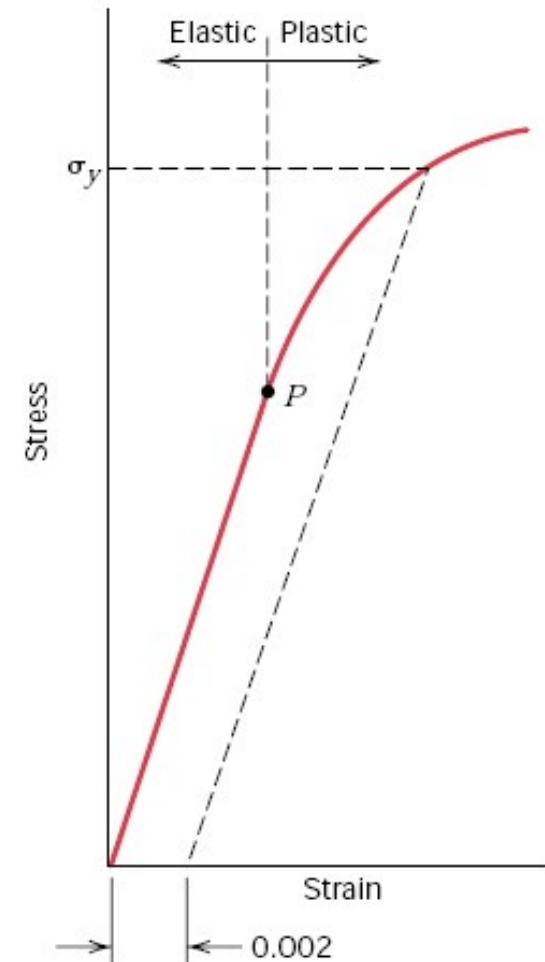
# Limite de proporcionalidade e Tensão limite de escoamento

- O limite de proporcionalidade pode ser determinado como o ponto onde ocorre o afastamento da linearidade na curva tensão – deformação (**ponto P**)



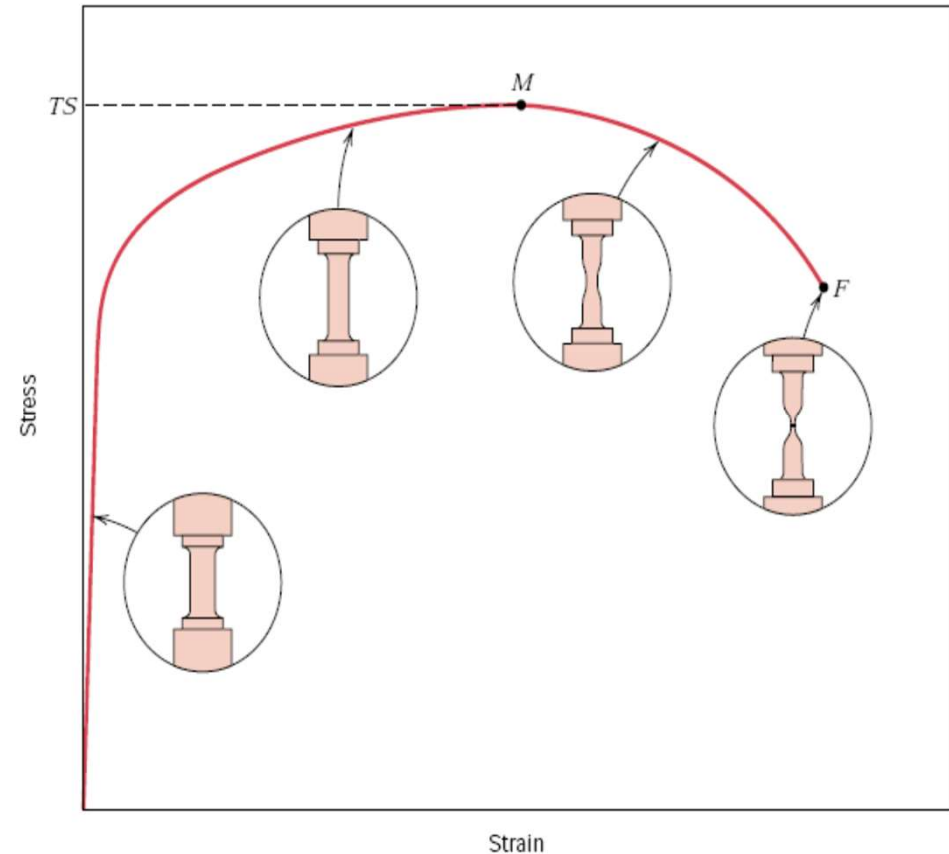
# Limite de proporcionalidade e Tensão limite de escoamento

A posição deste ponto pode não ser determinada com precisão. Por consequência foi adotada uma convenção: é construída uma linha paralela à região elástica a partir de uma pré-deformação de 0,002. A intersecção desta linha com a curva tensão – deformação é a **tensão limite de escoamento ( $\sigma_y$ )**



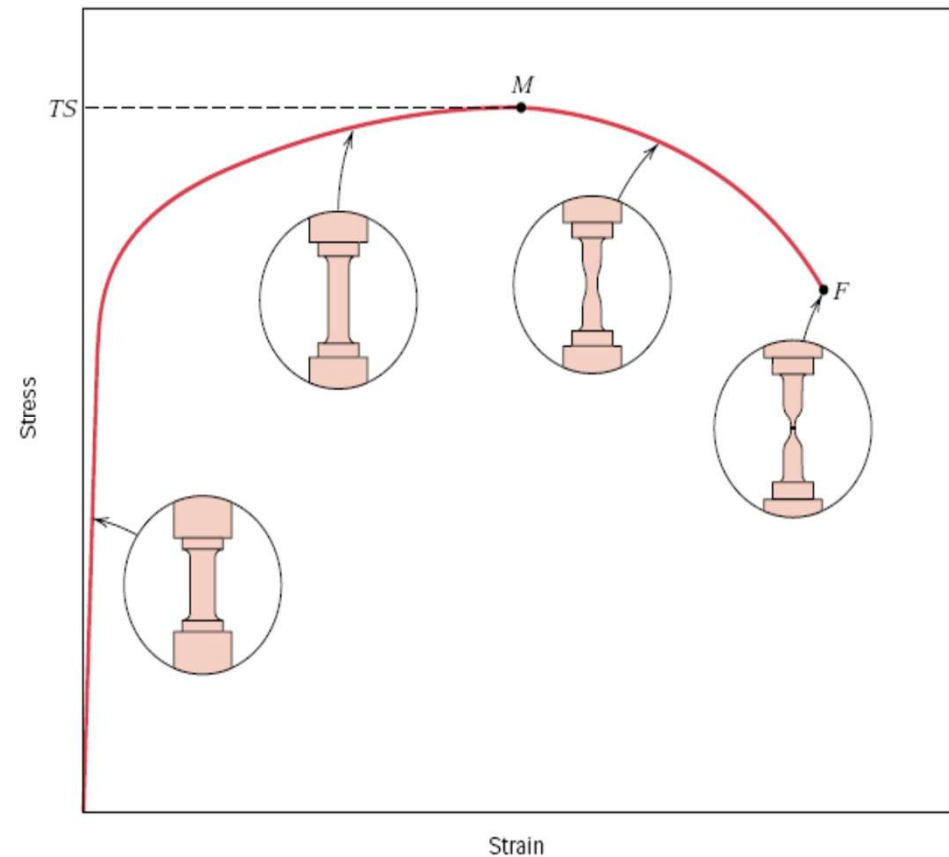
# Limite de resistência à tração

- Após o escoamento, a tensão necessária para continuar a deformação plástica aumenta até um valor máximo (ponto M) e então diminui até a fratura do material.



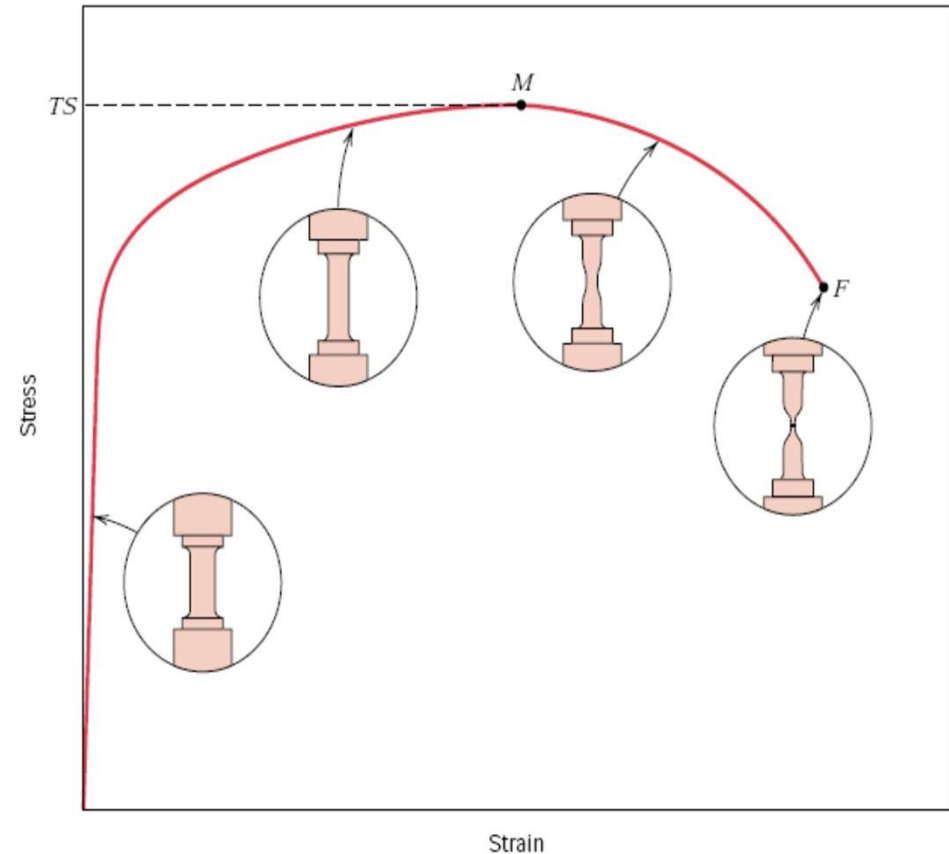
# Limite de resistência à tração

Para um material de alta capacidade de deformação plástica, o diâmetro do cp decresce rapidamente ao ultrapassar o ponto M e assim a carga necessária para continuar a deformação, diminui até a ruptura final



# Limite de resistência à tração

O limite de resistência à tração é a tensão no ponto máximo da curva tensão-deformação. É a máxima tensão que pode ser sustentada por uma estrutura que se encontra sob tração

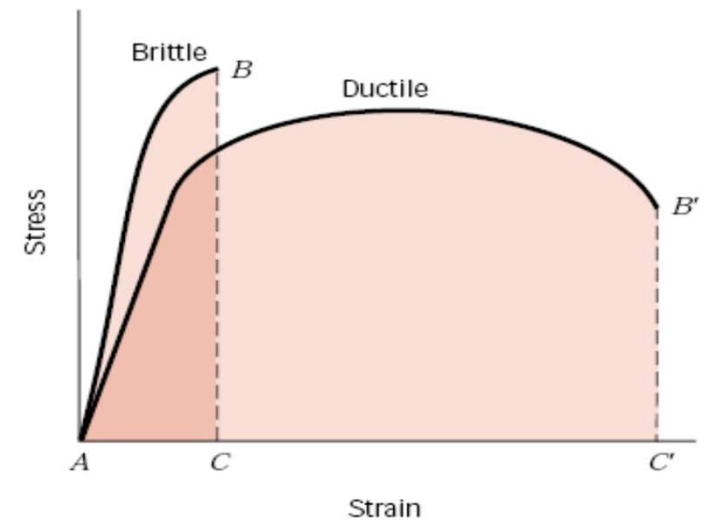


# Tenacidade

- Representa uma medida da habilidade de um material em absorver energia até a fratura

Pode ser determinada a partir da curva tensão – deformação. Ela é a área sob a curva

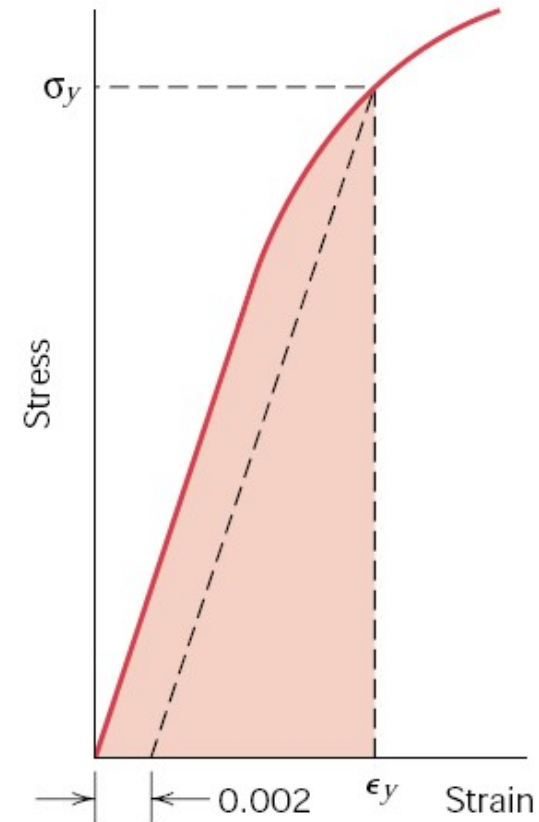
Para que um material seja tenaz, deve apresentar resistência e ductilidade. Materiais dúcteis são mais tenazes que os frágeis



# Resiliência

Capacidade de um material absorver energia quando ele é deformado elasticamente e depois, com o descarregamento ter essa energia recuperada.

O módulo de resiliência é dado pela área da curva tensão-deformação até o escoamento ou através da fórmula



$$U_r = \int_0^{\epsilon_e} \sigma d\epsilon$$

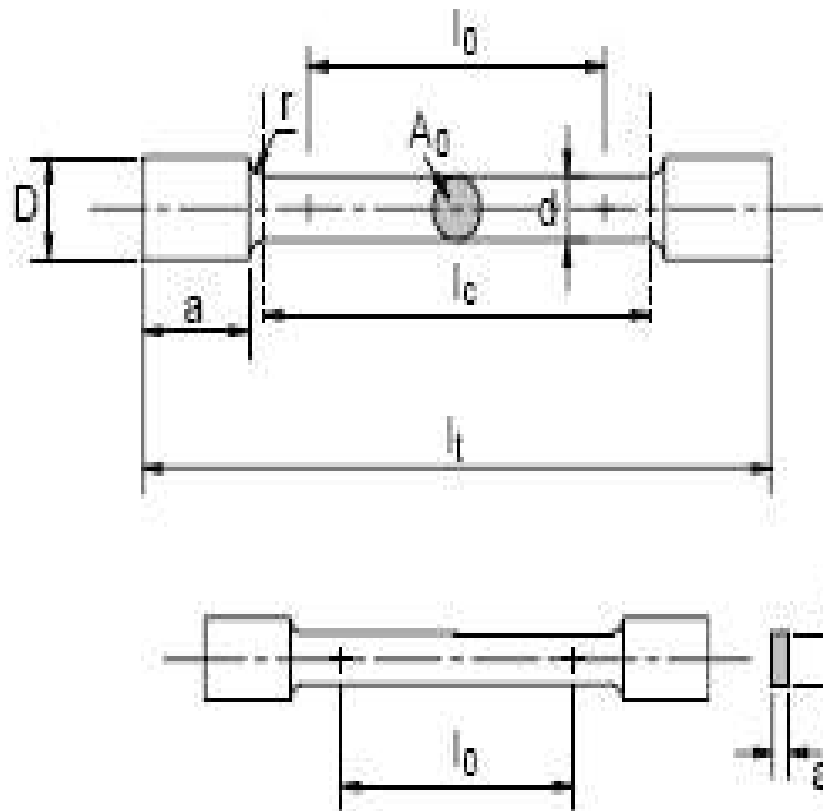




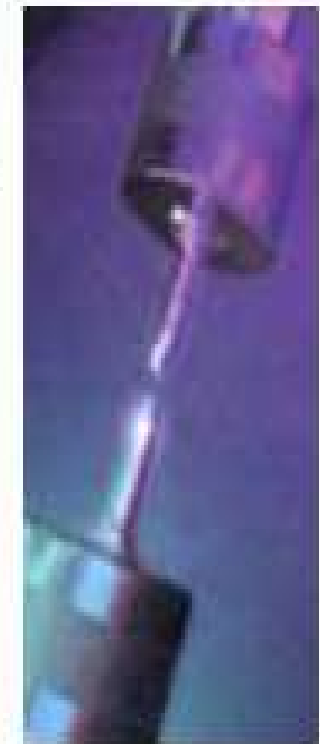
# Ensaio de tração uniaxial

- O ensaio de tração consiste na aplicação de carga uniaxial crescente até a ruptura. Mede-se a variação do comprimento como função da carga e fornece dados quantitativos das características mecânicas dos materiais
- Os corpos de prova geralmente possuem seção transversal circular ou retangular com proporções geométricas normalizadas

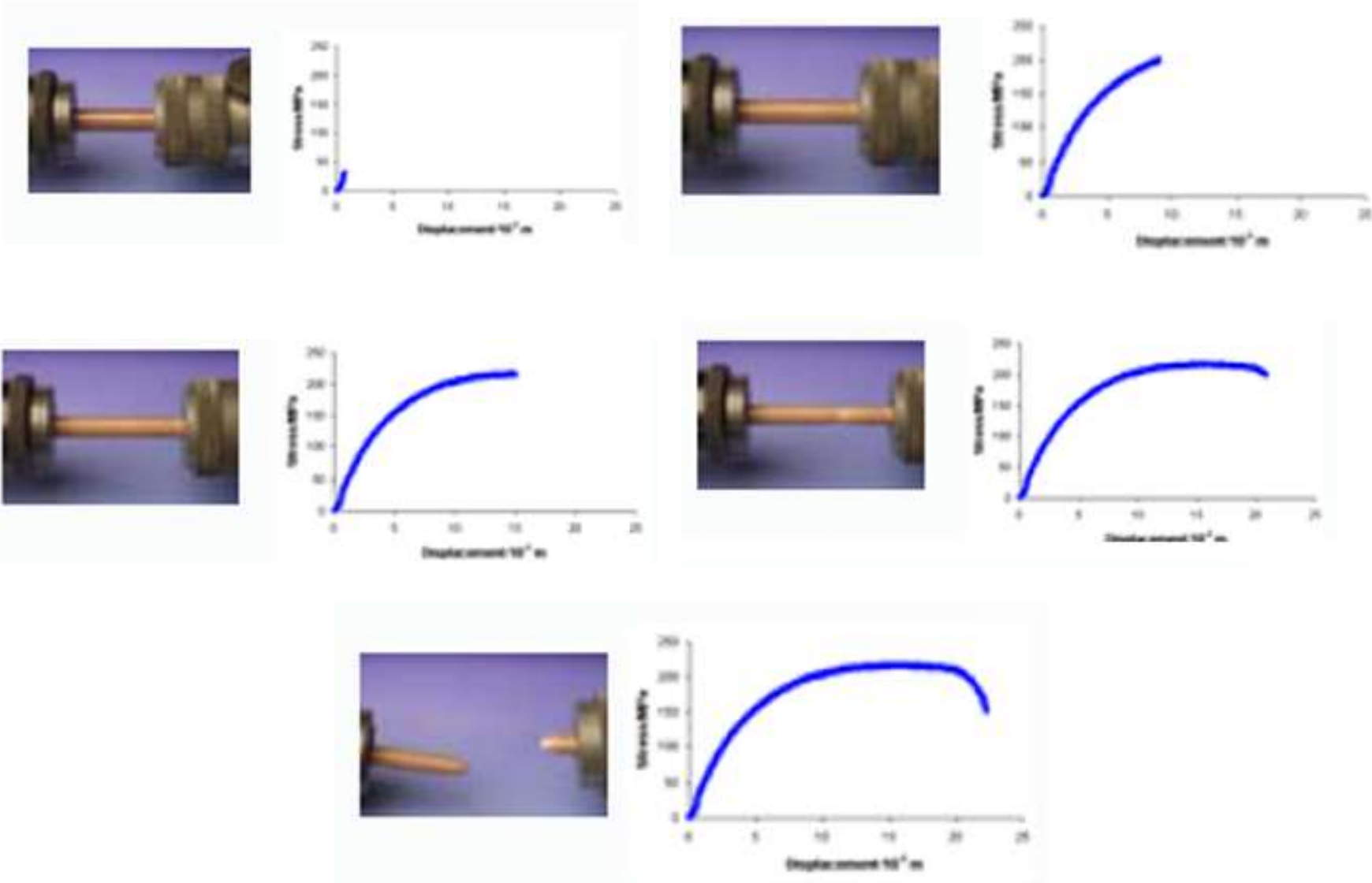
# Ensaio de tração uniaxial



$l_0$  - comprimento de referência  
 $l_c$  - comprimento da zona calibrada  
 $l_t$  - comprimento total



# Ensaio de Tração COBRE RECOZIDO



# Ensaio de Tração: Curva Tensão – Deformação Convencional

- Tensão Convencional, nominal ou de Engenharia

$\sigma_c$ =tensão

$P$ =carga aplicada

$S_0$ =seção transversal original

$$\sigma_c = \frac{P}{A_0}$$

# Ensaio de Tração: Curva Tensão – Deformação Convencional

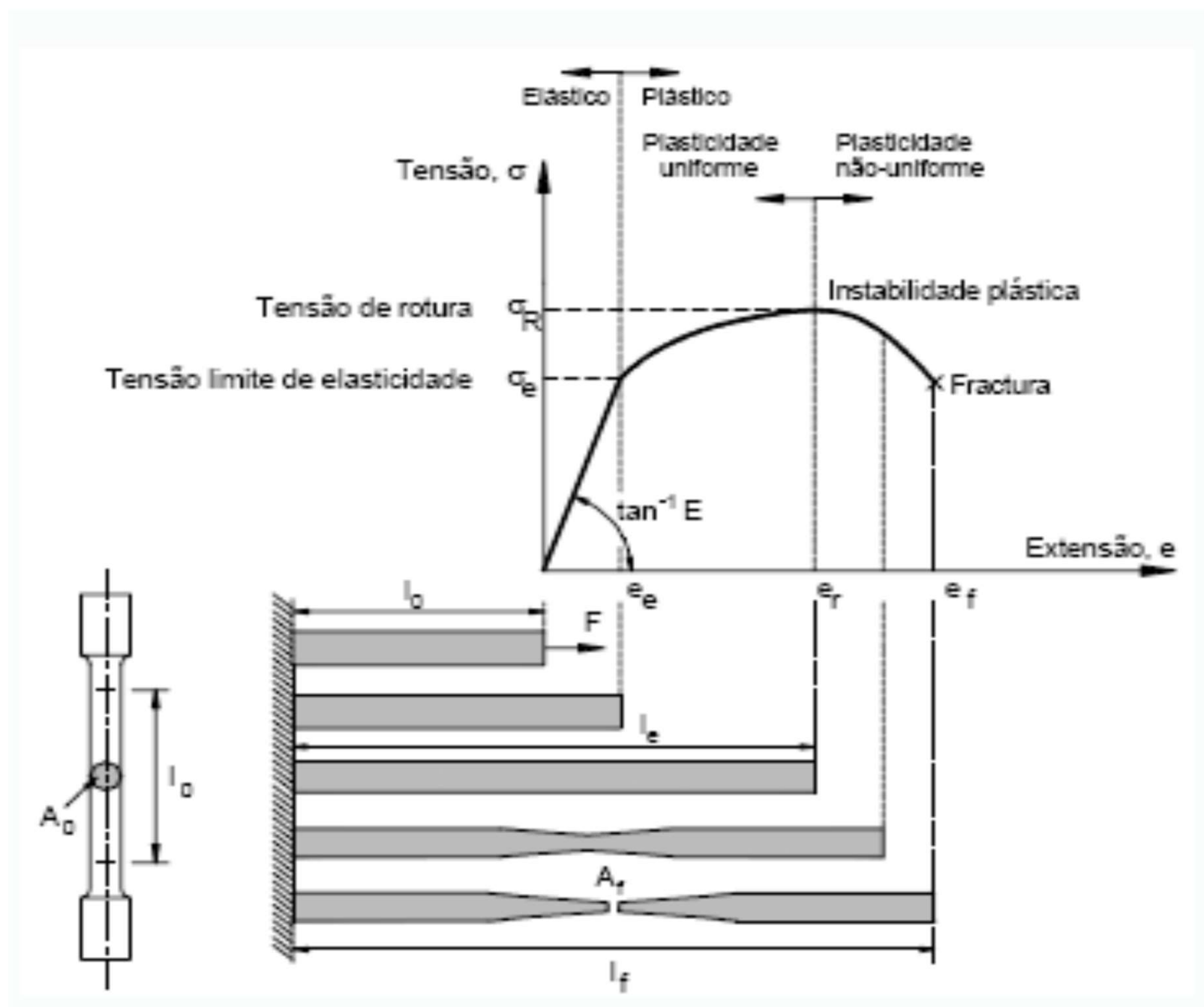
- Deformação Convencional, nominal ou de Engenharia

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

$\varepsilon_C$  = deformação (adimensional)

$l_0$  = comprimento inicial de referência

$l$  = comprimento de referência para cada carga



# Ensaio de Tração

$$1\text{kgf} = 0,454\text{ lb} = 9,807\text{N}$$

**Tensão de escoamento**

$$1\text{kgf/mm}^2 = 1422\text{ psi} = 9,807\text{ Mpa} = 9,807\text{ N/mm}^2$$

**Tensão máxima ou limite de resistência à tração**

**Tensão de ruptura**

**Alongamento**

**Estricção**

**Módulo de elasticidade**

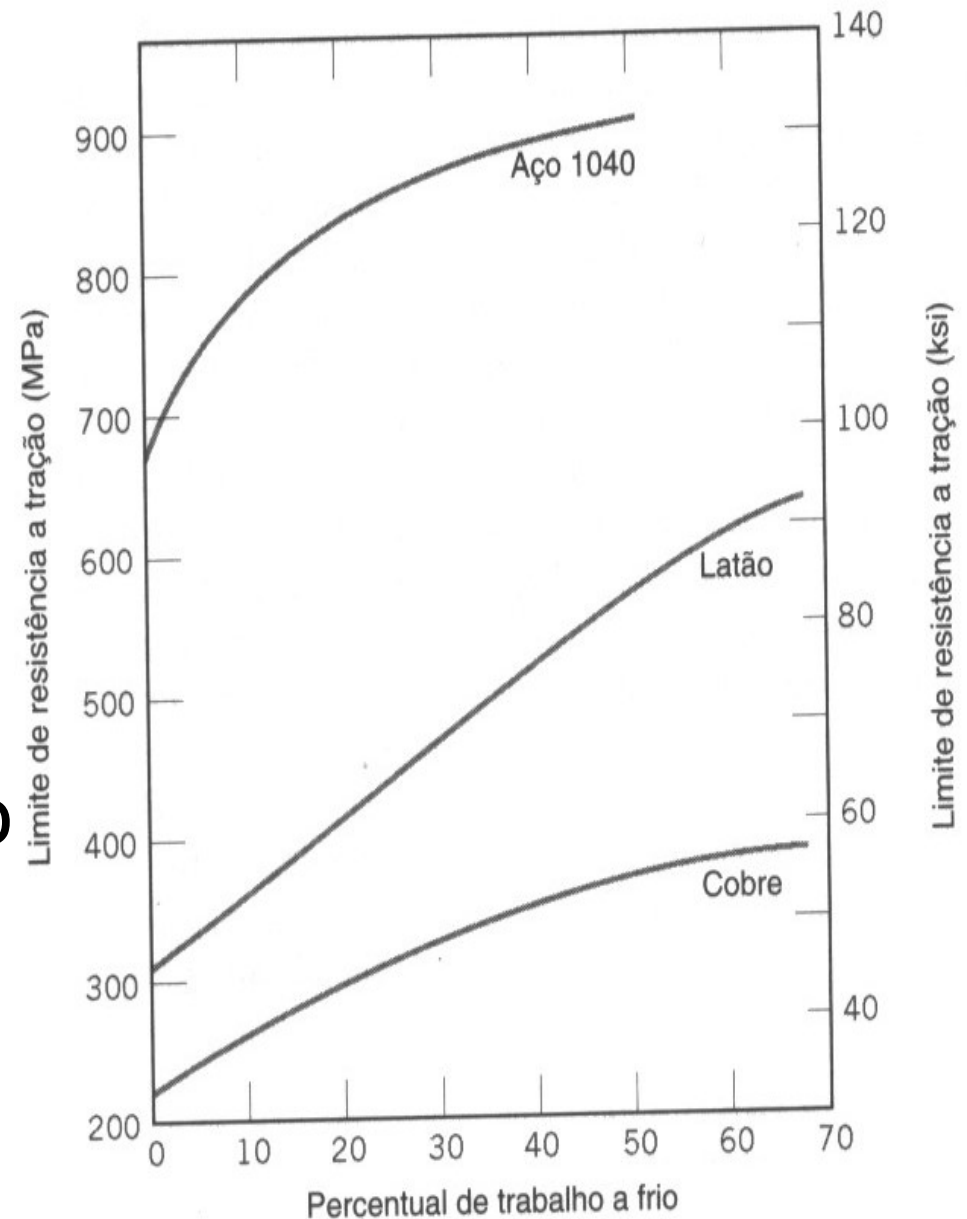
# Propriedades Mecânicas da metais e ligas

<i>Material</i>	<i>Yield Strength</i>		<i>Tensile Strength</i>		<i>Ductility, %EL [in 50 mm (2 in.)]<sup>a</sup></i>
	<i>MPa</i>	<i>ksi</i>	<i>MPa</i>	<i>ksi</i>	
	<b>Metal Alloys<sup>b</sup></b>				
Molybdenum	565	82	655	95	35
Titanium	450	65	520	75	25
Steel (1020)	180	26	380	55	25
Nickel	138	20	480	70	40
Iron	130	19	262	38	45
Brass (70 Cu-30 Zn)	75	11	300	44	68
Copper	69	10	200	29	45
Aluminum	35	5	90	13	40



# Encruamento

- A partir da região de escoamento, o material entra no campo de deformações permanentes, onde ocorre endurecimento por trabalho a frio (**encruamento**)



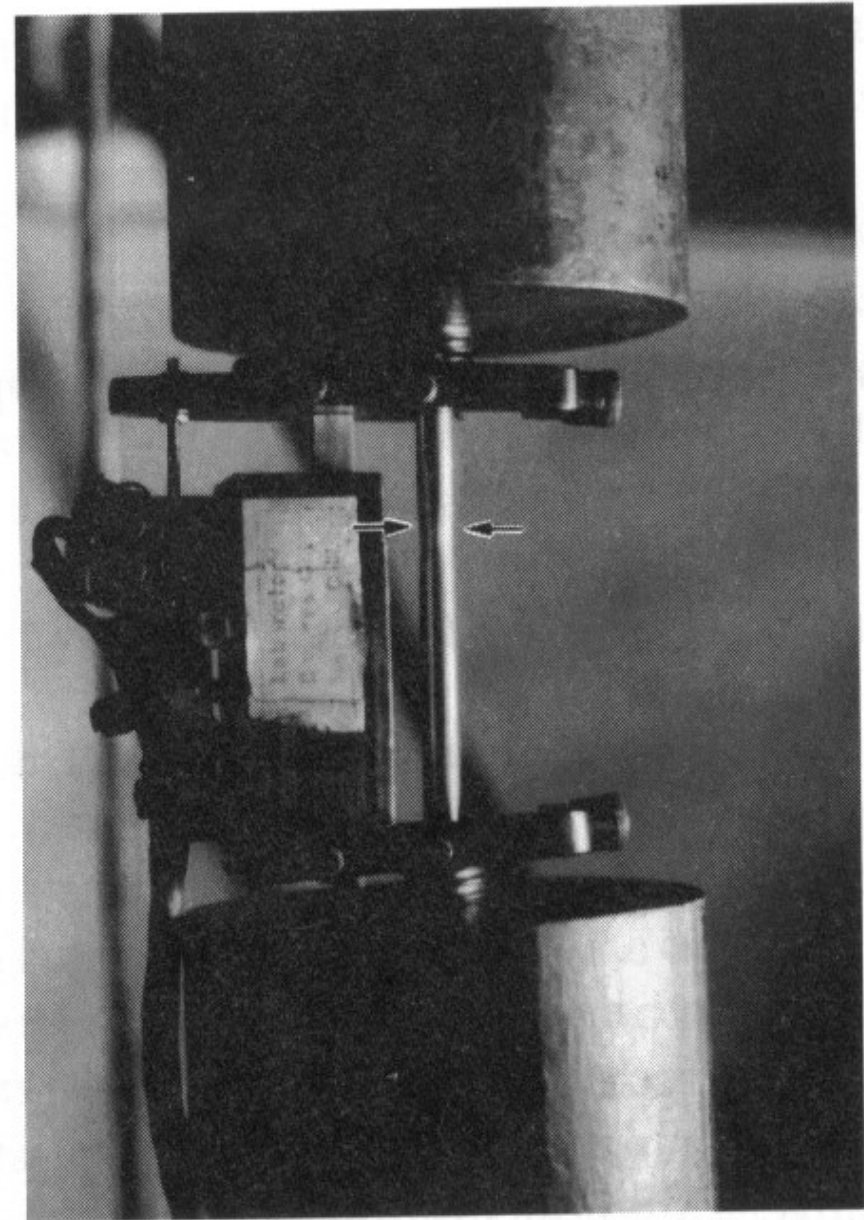


# Encruamento

- Resulta em função da interação entre discordâncias e das suas interações com obstáculos como solutos e contornos de grãos.
- É preciso uma energia cada vez maior para que ocorra essa movimentação

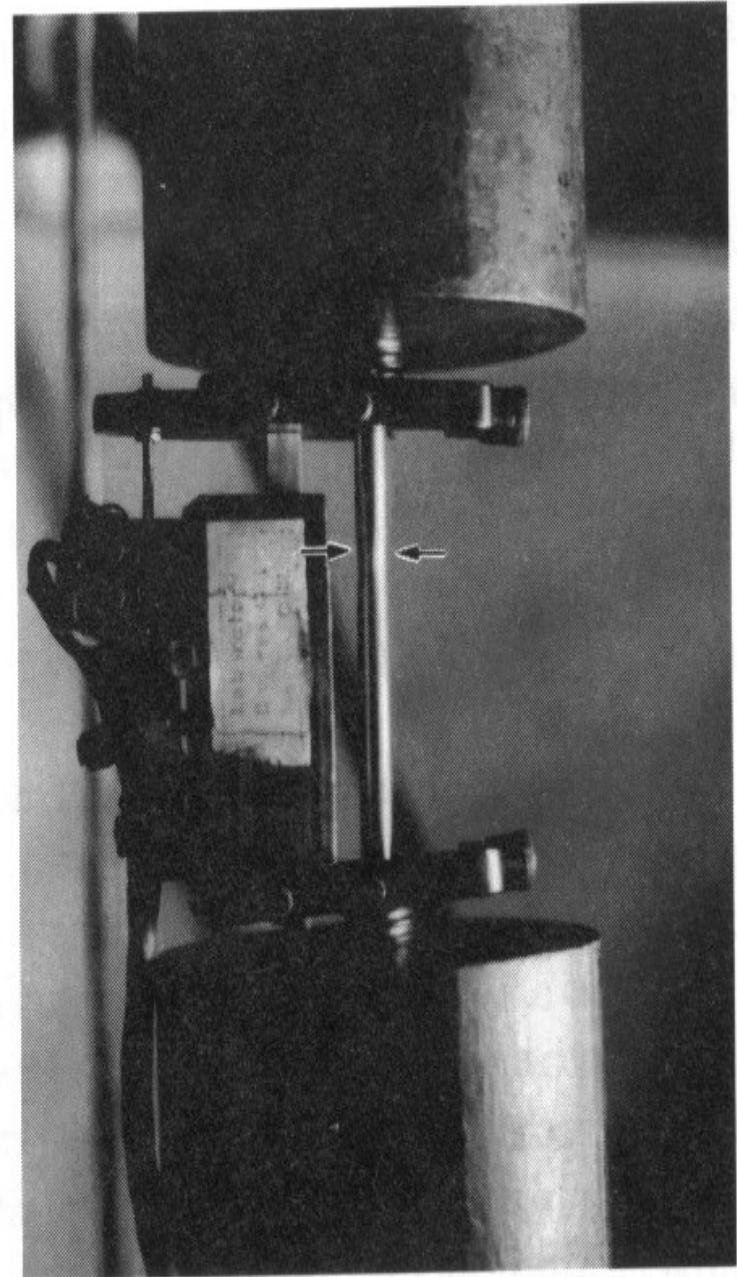
# Empescoçamento Estricção

- Região localizada em uma seção reduzida em que grande parte da deformação se concentra



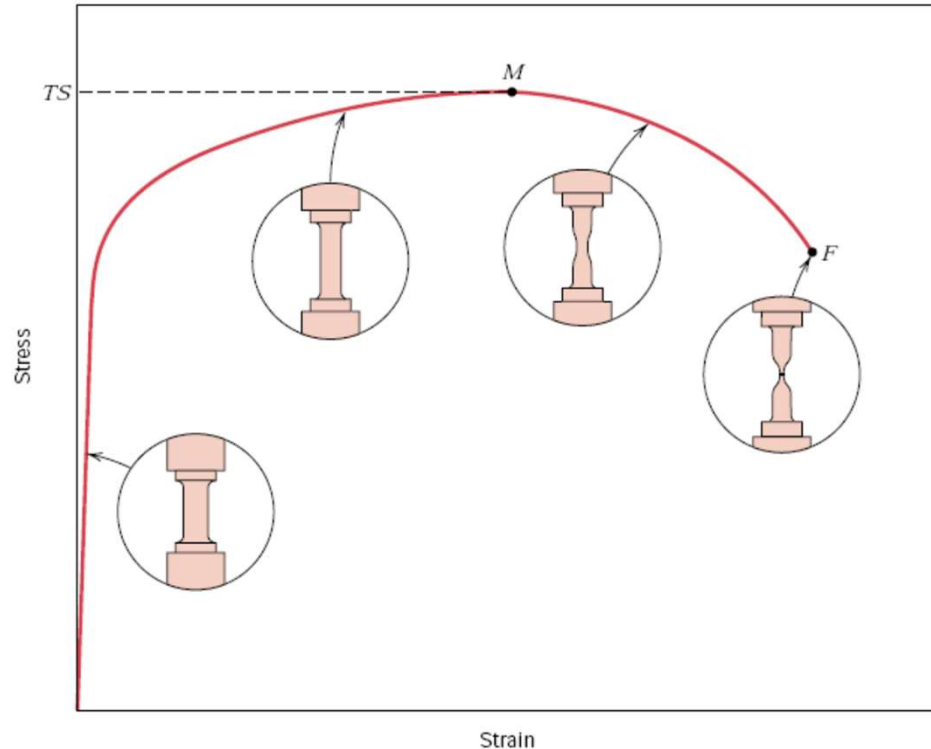
# Empescoçamento Estricção

- Ocorre quando o aumento da dureza por encruamento é menor que a tensão aplicada e o material sofre uma grande deformação



# Tensão Verdadeira e Deformação Verdadeira

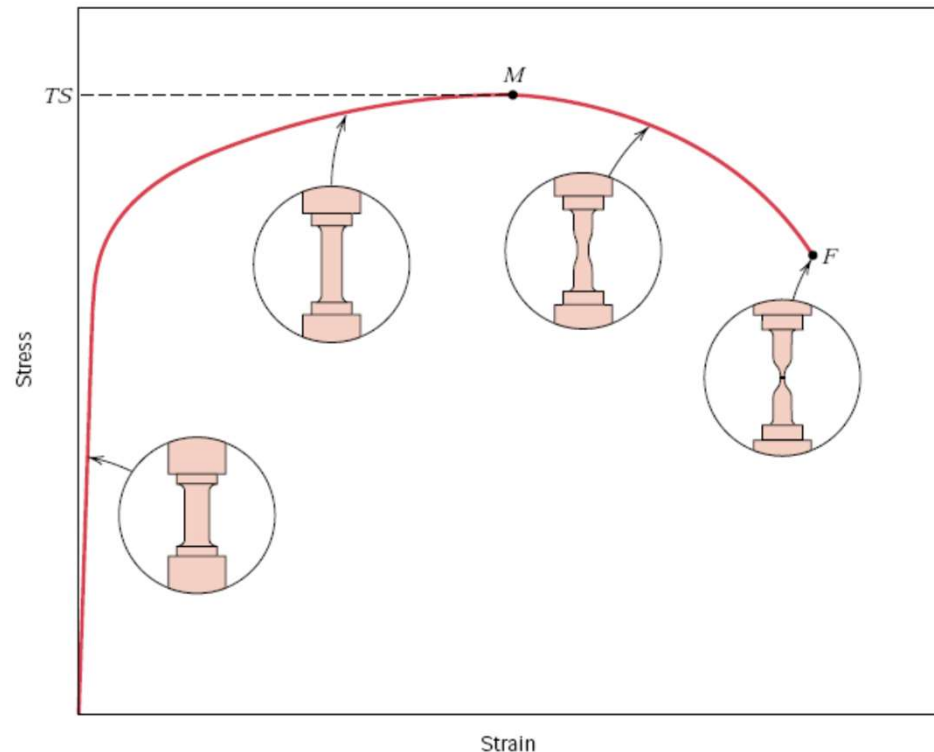
- Na curva tensão-deformação convencional após o ponto máximo (ponto M), o material aumenta em resistência devido ao encruamento, mas a área da seção reta está diminuindo devido ao empescoçamento.



Resulta em uma redução na capacidade do corpo em suportar carga

# Tensão Verdadeira e Deformação Verdadeira

- A tensão calculada nessa carga é baseada na área da seção original e não leva em conta o pescoço

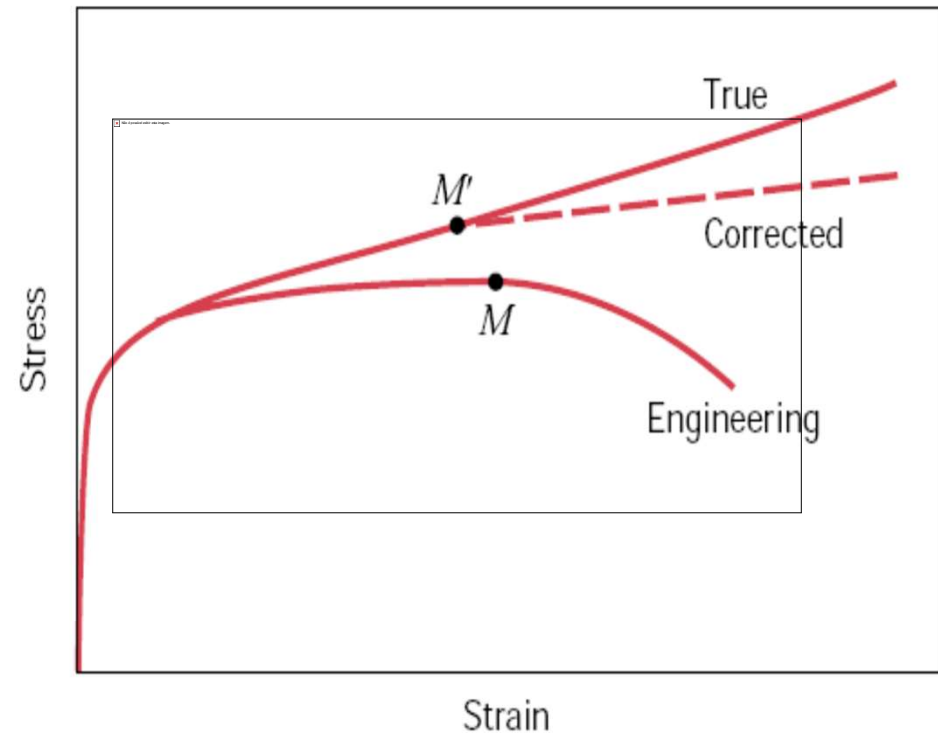


# Tensão Verdadeira e Deformação Verdadeira

- A Tensão Verdadeira é definida como sendo a carga  $P$  sobre a área instantânea, ou seja, área do pescoço após o limite de resistência à tração

A Deformação Verdadeira é definida pela expressão

$$\sigma_V = \frac{P}{A_i} \quad \varepsilon_V = \ln \frac{l_i}{l_0}$$



# Relações entre Tensões e Deformações Reais e Convencionais

## ■ Deformação

$$\varepsilon_C = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l}{l_0} - 1$$

$$\frac{l}{l_0} = 1 + \varepsilon_C$$

$$\varepsilon_r = \ln \frac{l}{l_0} = \ln(1 + \varepsilon_C)$$

## ■ Tensão

$$\ln \frac{S_0}{S} = \ln \frac{l}{l_0} = \ln(1 + \varepsilon_C)$$

$$S = \frac{S_0}{1 + \varepsilon_C}$$

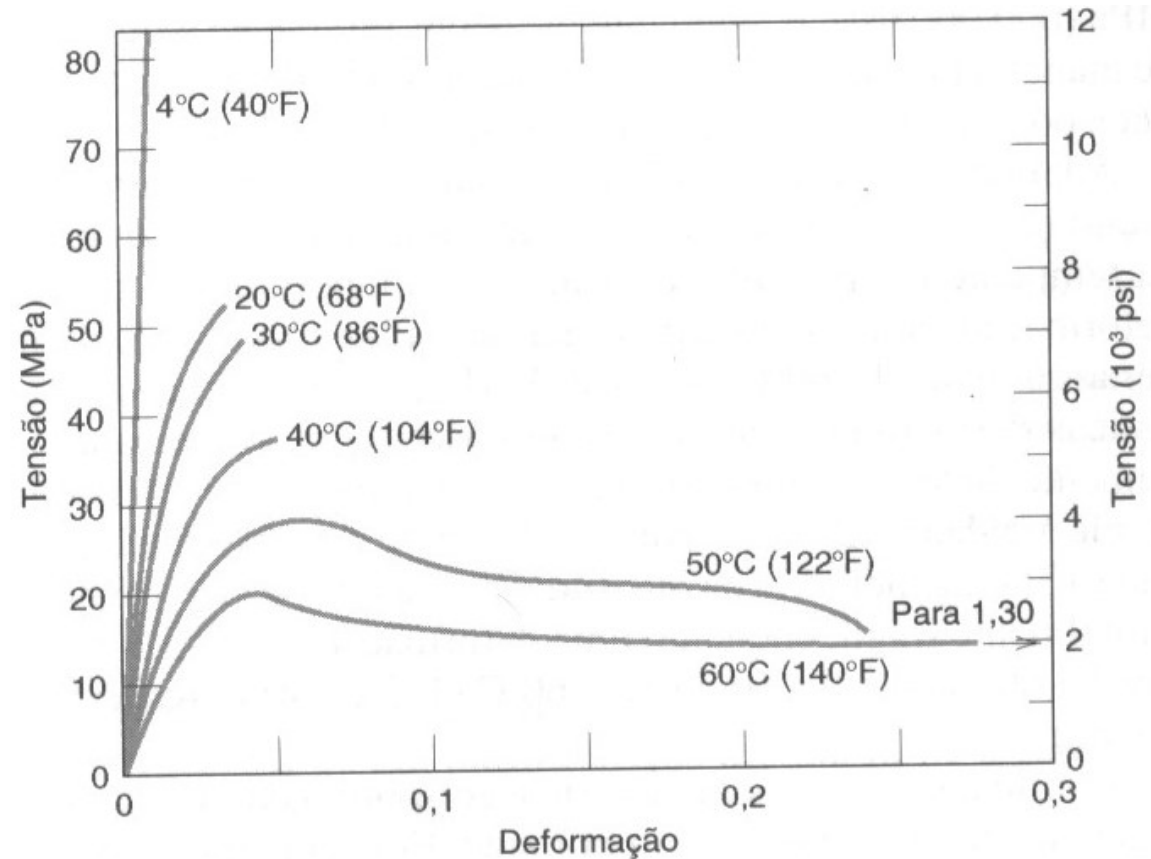
$$\sigma_r = \frac{P}{S} = \frac{P}{S_0} (1 + \varepsilon_C)$$

$$\sigma_r = \sigma_C (1 + \varepsilon_C)$$



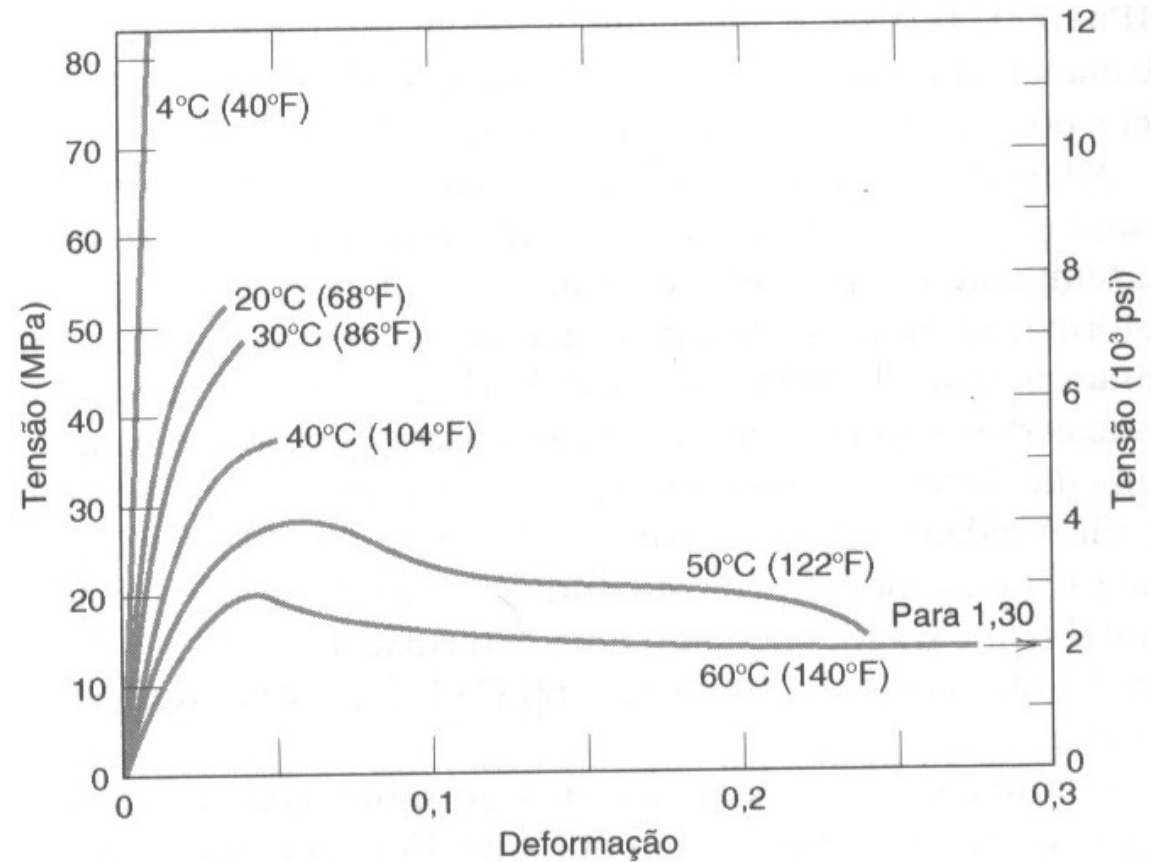
# Efeito da temperatura

- A temperatura pode ter grande influência nas propriedades mecânicas levantadas pelo ensaio de tração



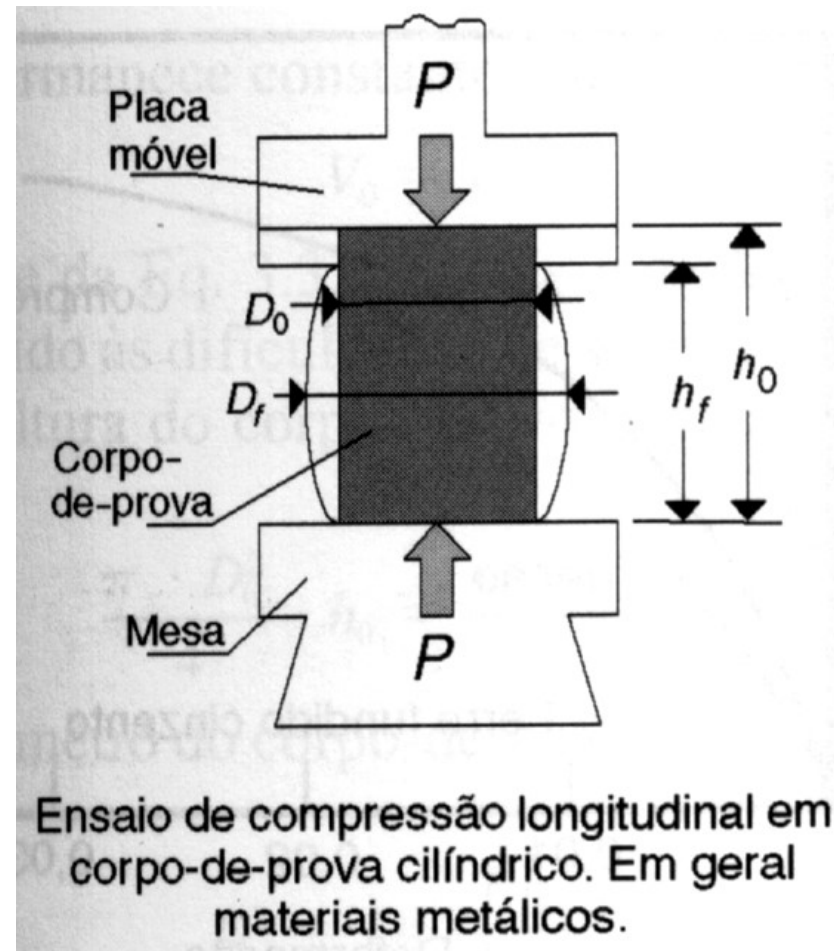
# Efeito da temperatura

- Em geral, a resistência diminui e a ductilidade aumenta conforme o aumento de temperatura

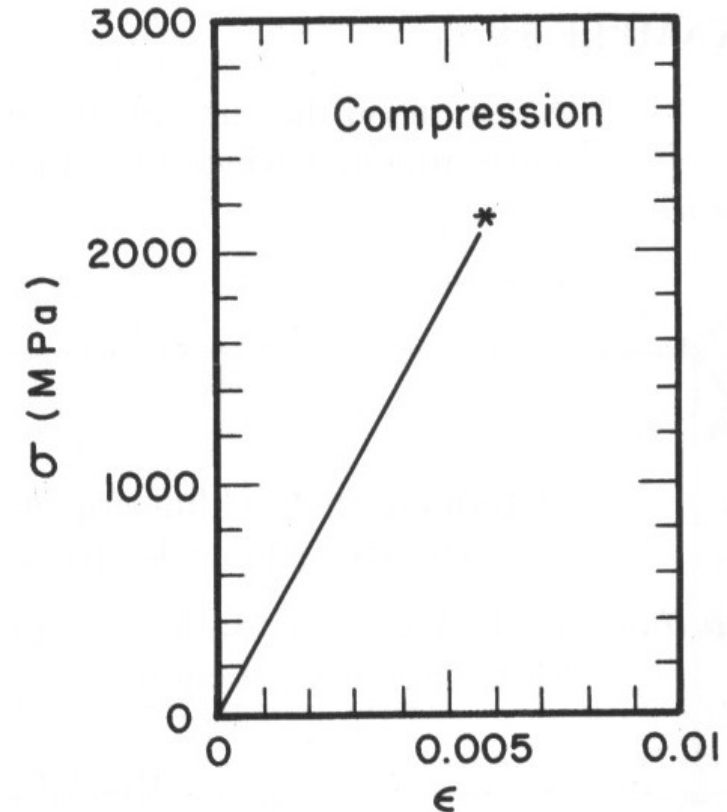
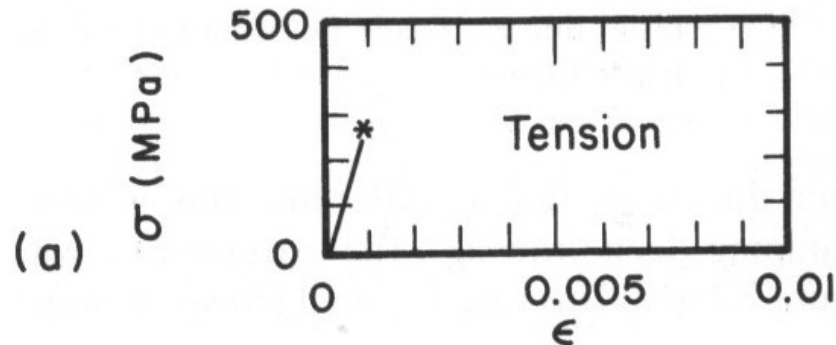


# Ensaio de Compressão

- O ensaio de compressão é a aplicação de carga compressiva uniaxial em um corpo de prova
- A deformação linear obtida pela medida da distância entre as placas que comprimem o corpo versus a carga de compressão consiste no resultado do teste
- As propriedades mecânicas obtidas são as mesmas do ensaio de tração



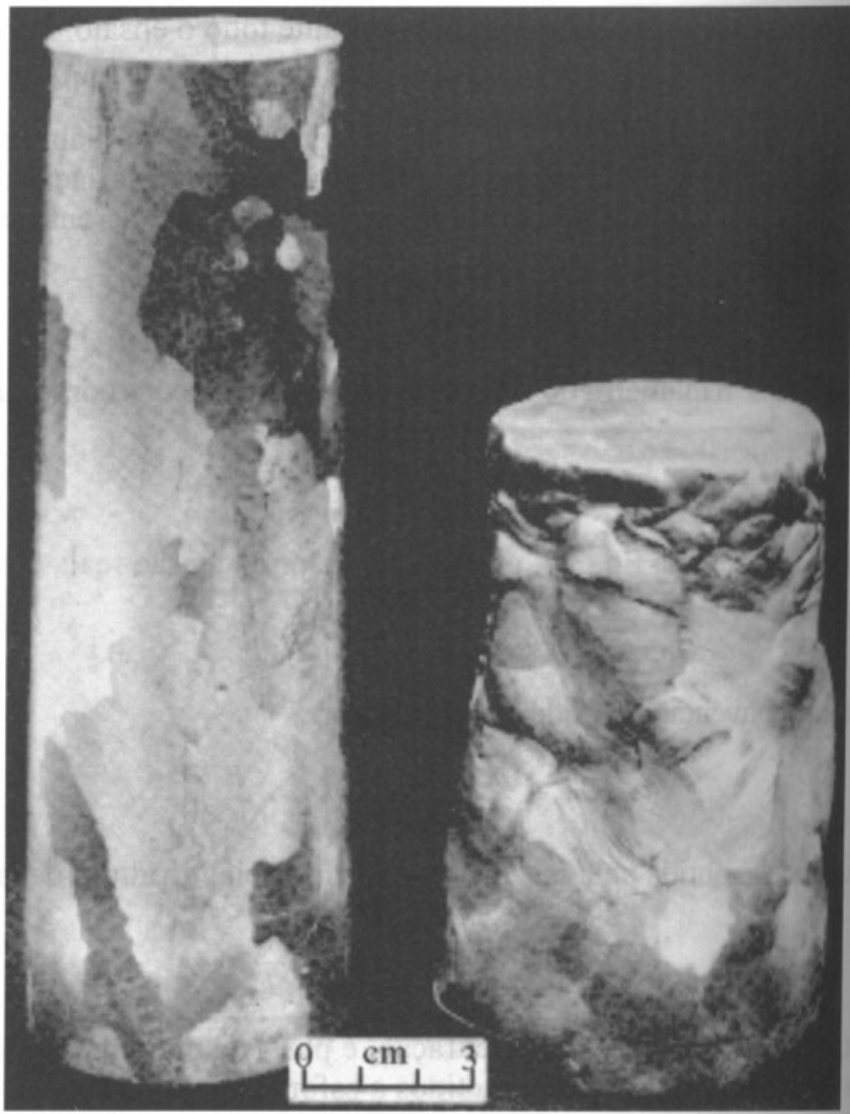
# Ensaio de Compressão



Em função de trincas submicroscópicas os materiais frágeis são geralmente fracos em condições de tração, já que as tensões de tração tendem a propagar essas trincas

Materiais frágeis como as cerâmicas apresentam porém alta resistência à compressão

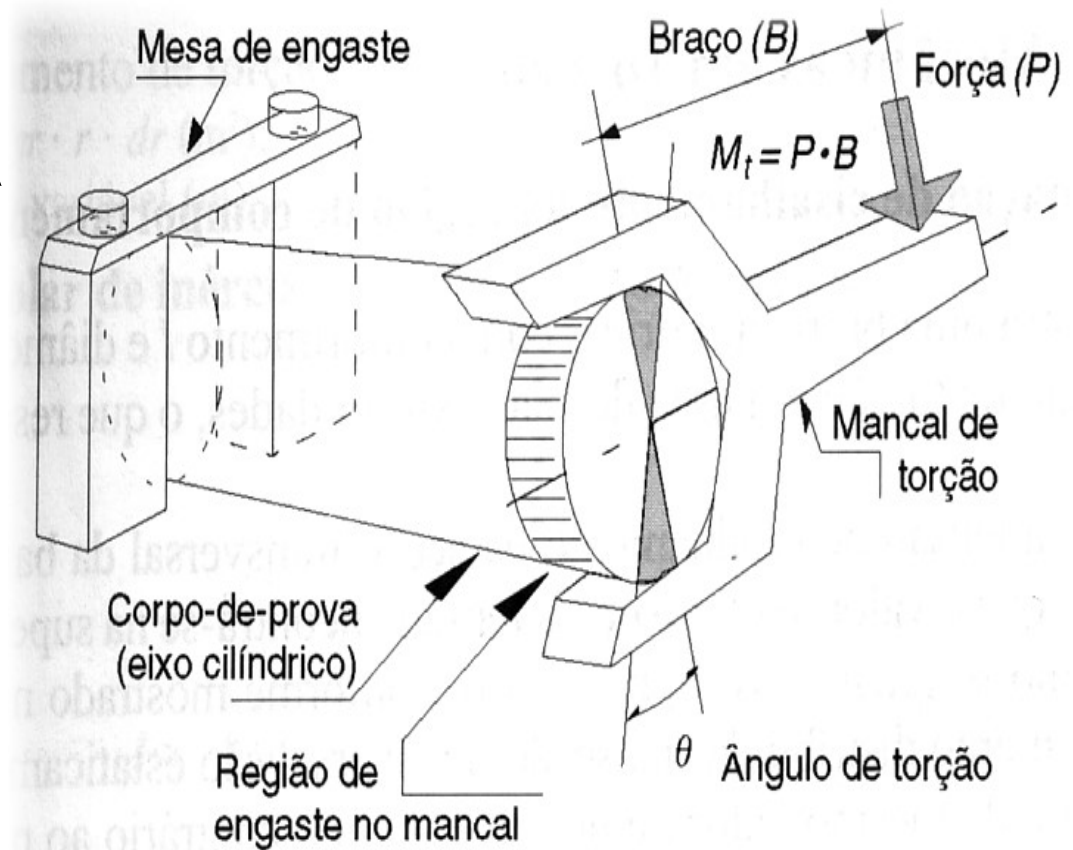
# Ensaio de Compressão



- Resultado do ensaio de compressão aplicado em um cilindro de cobre

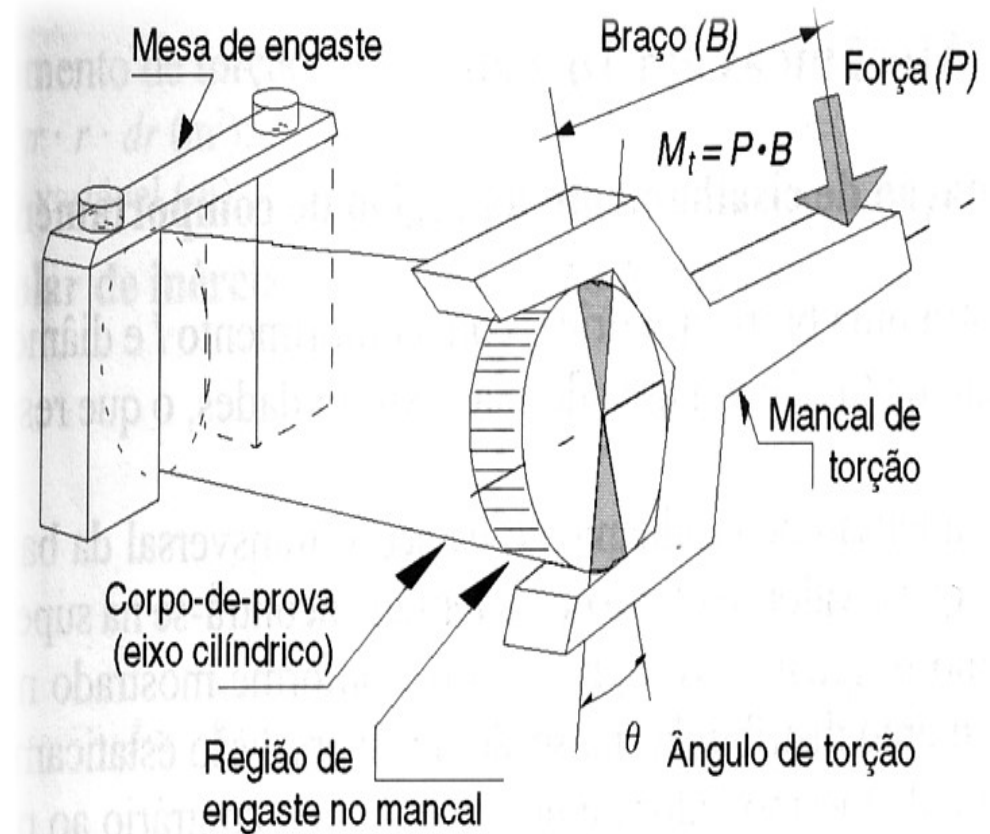
# Ensaio de Torção

- O Ensaio de torção consiste na aplicação de carga rotativa em um corpo de prova geralmente de geometria cilíndrica



# Ensaio de Torção

- Mede-se o ângulo de torção como função do momento torsor aplicado
- Muito utilizado na indústria de componentes mecânicos como motores de arranque, turbinas aeronáuticas, rotores de máquinas pesadas,...

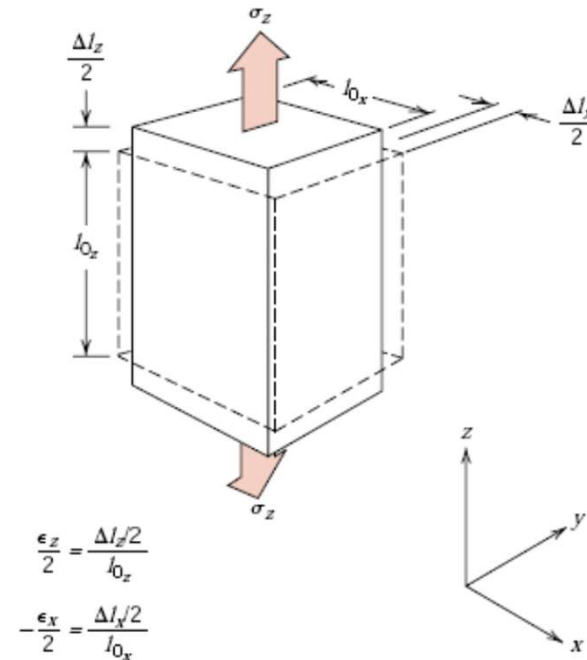


# Coeficiente de Poisson

- É o coeficiente que mede a rigidez do material na direção perpendicular à direção da carga de tração uniaxial aplicada. No ensaio de tração é o quociente entre a deformação lateral ( $\epsilon_x$ ) e a deformação na direção da tensão ( $\epsilon_z$ ) para materiais isotrópicos

$$\nu = - \frac{\epsilon_x}{\epsilon_z}$$

- Para materiais isotrópicos, o módulo de elasticidade está relacionado com o coeficiente de Poisson



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

G= módulo de elasticidade transversal (ensaios de torção)

G= Tensão de cisalhamento

Deformação de cisalhamento

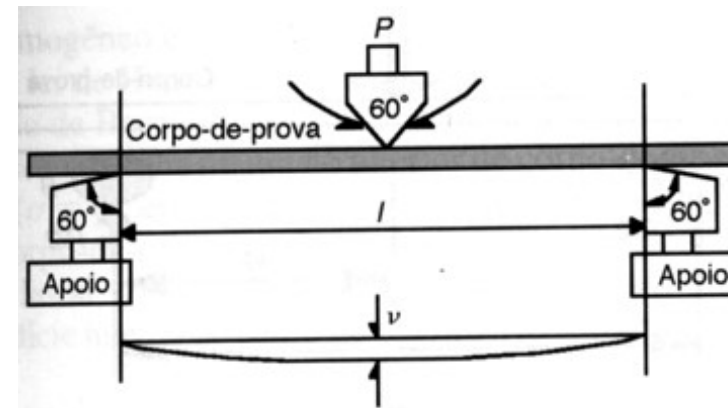


# Valores de módulos de elasticidade e coeficiente de Poisson

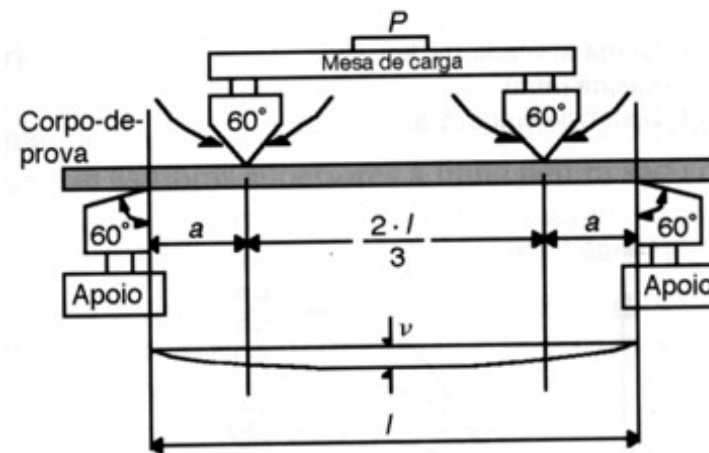
<i>Material</i>	<i>Modulus of Elasticity</i>		<i>Shear Modulus</i>		<i>Poisson's Ratio</i>
	<i>GPa</i>	<i>10<sup>6</sup> psi</i>	<i>GPa</i>	<i>10<sup>6</sup> psi</i>	
<b>Metal Alloys</b>					
Tungsten	407	59	160	23.2	0.28
Steel	207	30	83	12.0	0.30
Nickel	207	30	76	11.0	0.31
Titanium	107	15.5	45	6.5	0.34
Copper	110	16	46	6.7	0.34
Brass	97	14	37	5.4	0.34
Aluminum	69	10	25	3.6	0.33
Magnesium	45	6.5	17	2.5	0.35

# Ensaio de Flexão

- O Ensaio de flexão consiste na aplicação de uma carga crescente em determinados pontos de uma barra
- Mede-se o valor da carga versus a deformação máxima
- Existem dois tipos principais de Ensaios: Ensaio de flexão em três pontos e Ensaio de flexão em quatro pontos



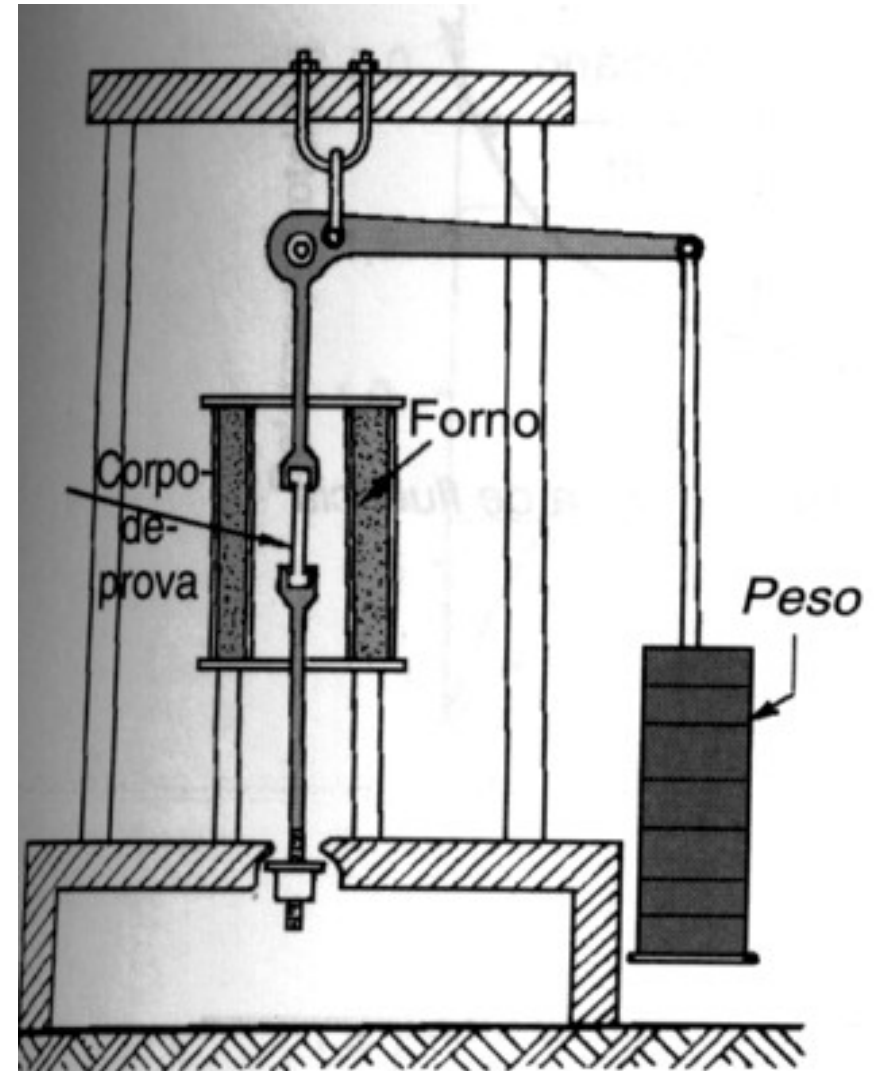
(A) Ensaio de flexão em três pontos



(B) Ensaio de flexão em quatro pontos

# Ensaio de Fluência

- O ensaio de fluência consiste na aplicação de uma carga constante em um material durante um período de tempo, em temperaturas elevadas
- Essas condições são favoráveis às mudanças de comportamento dos materiais devido à difusão dos átomos, movimento de discordâncias, escorregamento e recristalização



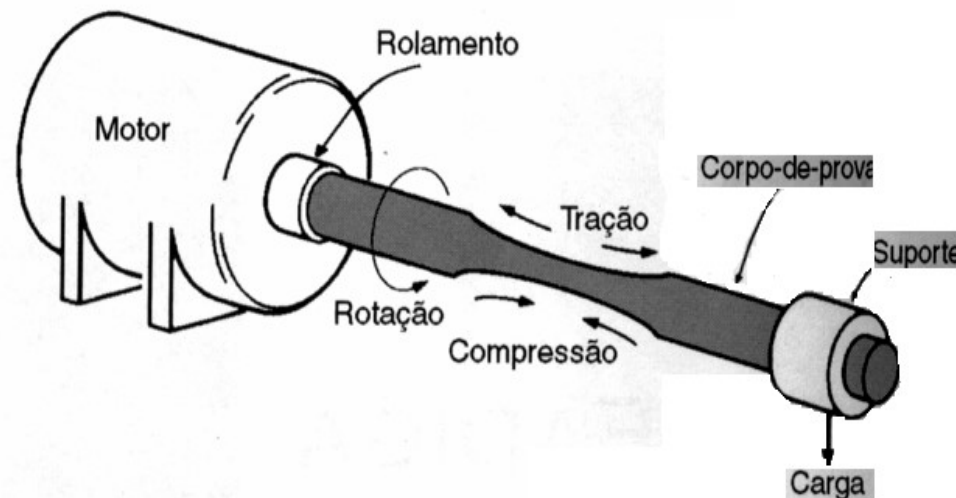


# Ensaio de Fluência

- No ensaio de fluência são medidas as deformações que ocorrem no corpo de prova em função do tempo
- Entre os materiais ensaiados em fluência pode-se citar os empregados em instalações de refinarias petroquímicas, usinas nucleares, indústria aeroespacial, turbinas, ...

# Ensaio de Fadiga

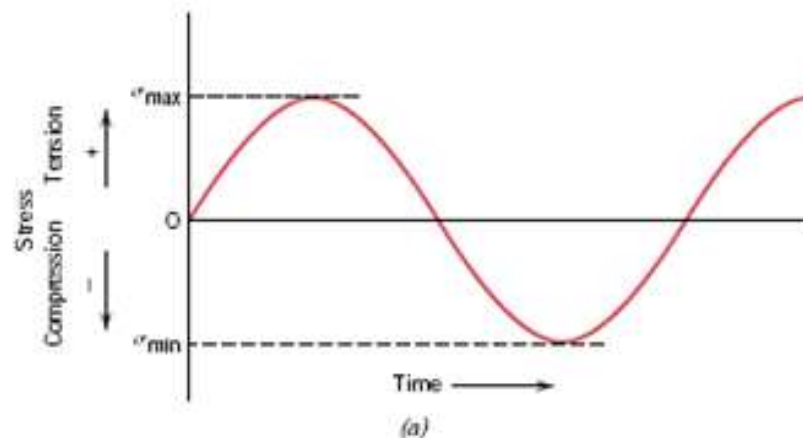
- Os materiais metálicos, quando submetidos a esforços cíclicos rompem-se a tensões inferiores àquelas determinadas nos ensaios de tração e compressão. A ruptura que ocorre é denominada ruptura por fadiga
- O ensaio de fadiga consiste na aplicação de carga cíclica em corpo de prova padronizado



# Tensões Cíclicas

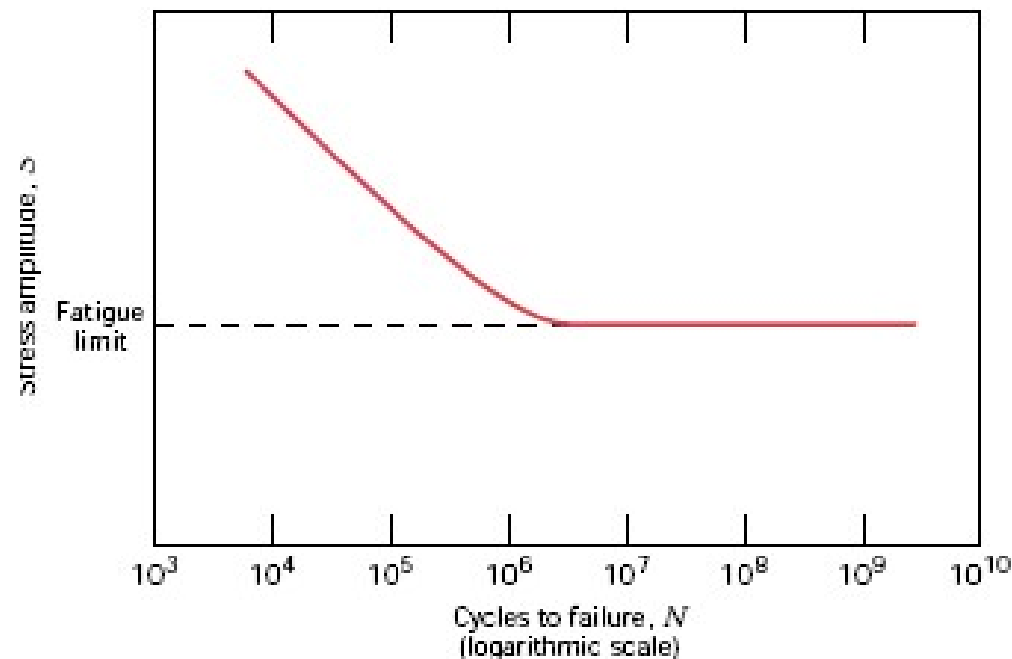
Em geral são possíveis três modalidades diferentes de tensão oscilante-tempo

- Ciclo de tensões alternadas: dependência regular e senoidal em relação ao tempo, alternando entre uma tensão máxima de tração e uma tensão mínima de compressão de igual magnitude



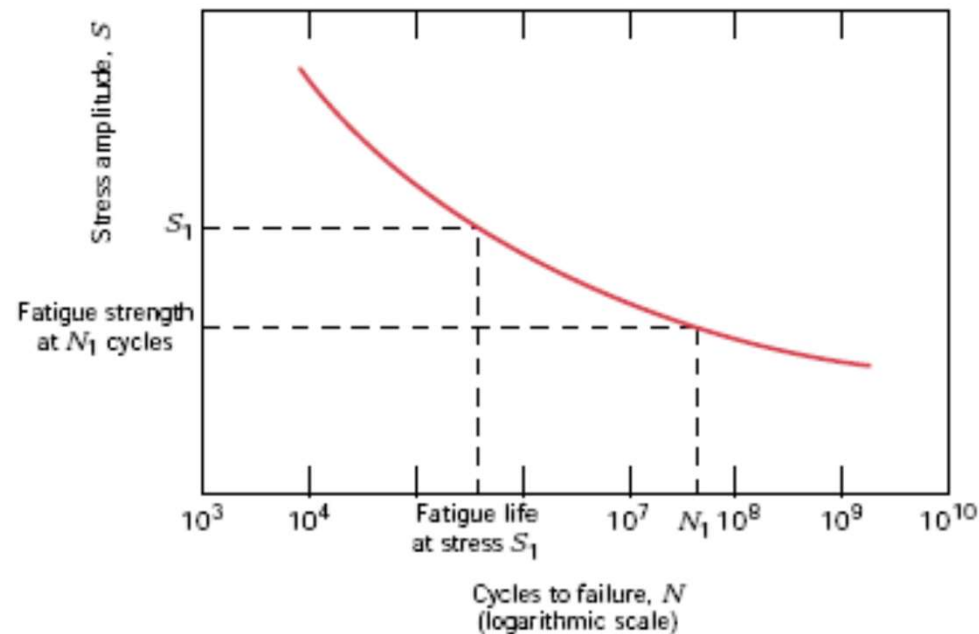
# Curva $\sigma$ - $N$ ou Curva de Wöhler

- Em geral, a curva  $\sigma$ - $N$  de materiais ferrosos apresenta um **limite de resistência à fadiga**. Para valores abaixo desse limite o corpo de prova nunca irá sofrer ruptura por fadiga



# Curva $\sigma$ - $N$ ou Curva de Wöhler

- Para ligas não ferrosas a fadiga é caracterizada pela **resistência à fadiga**, tensão na qual ocorre ruptura por fadiga após um número de ciclos específicos ( $10^7$  ou  $10^8$ )



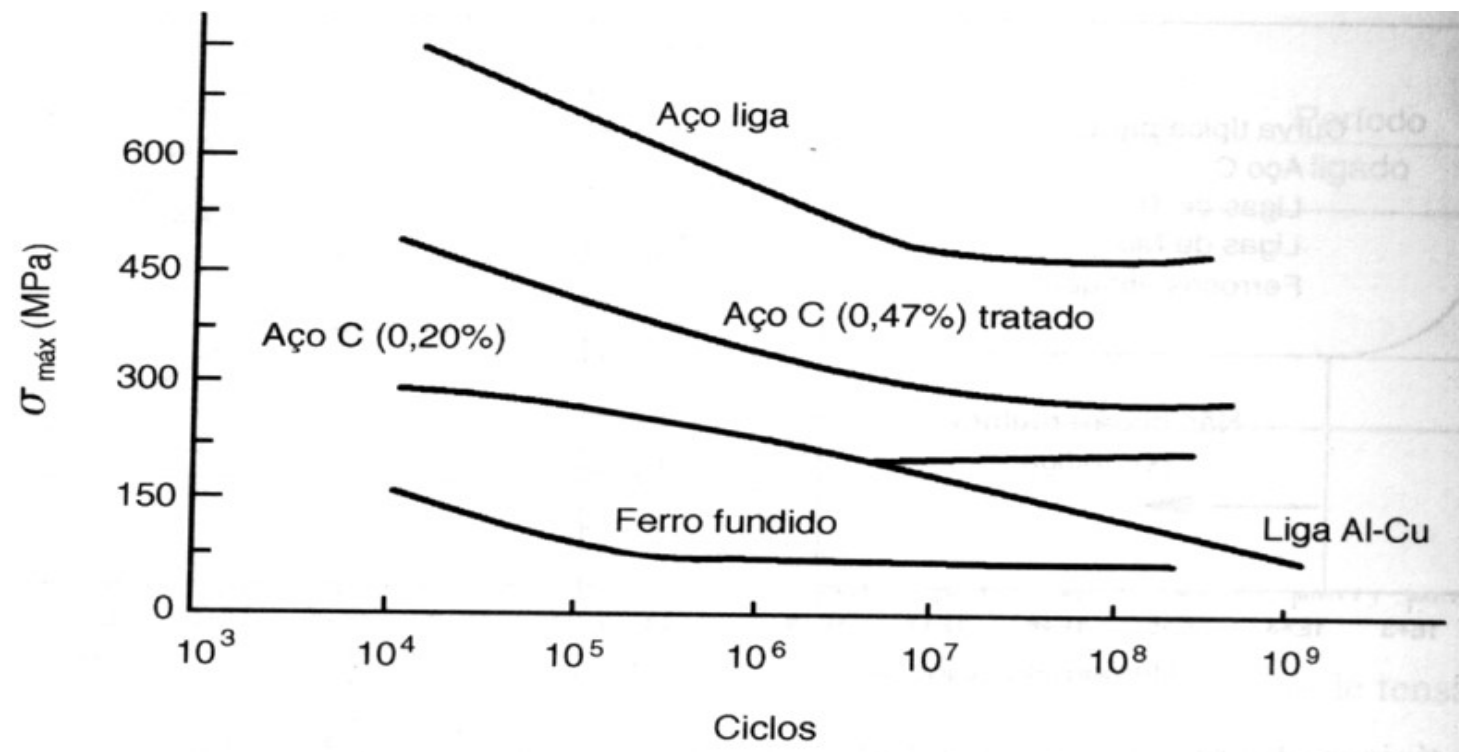




# Curva $\sigma$ -N ou Curva de Wöhler

- **Vida à fadiga** consiste no número de ciclos que causará a ruptura em determinado nível de tensão
- Em função do número de ciclos para haver ruptura o ensaio pode ser de **baixo ciclo** ( $10^4$ ) ou de **alto ciclo** (acima desse limite)

# Curva $\sigma$ -N ou Curva de Wöhler



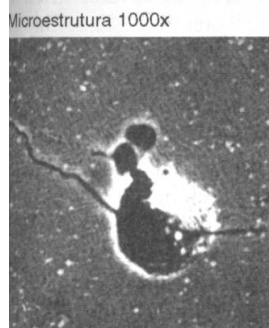
- Resultado de ensaio de fadiga para diferentes materiais

# Nucleação da Trinca

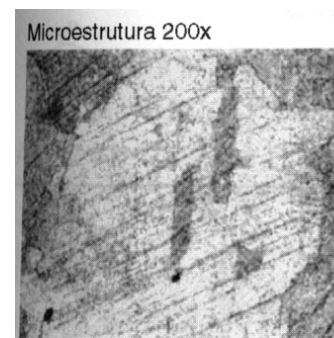
- A ruptura do material por fadiga ocorre devido à formação e propagação de trincas
- As trincas se iniciam principalmente em defeitos de superfície, entalhes, inclusões, contornos de grãos, defeitos de solidificação, pontos de corrosão e pontos que sofrem deformação localizada



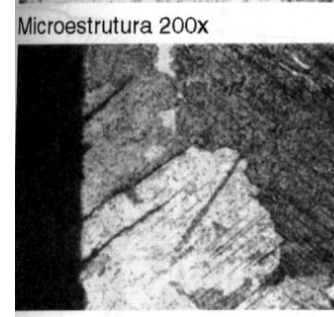
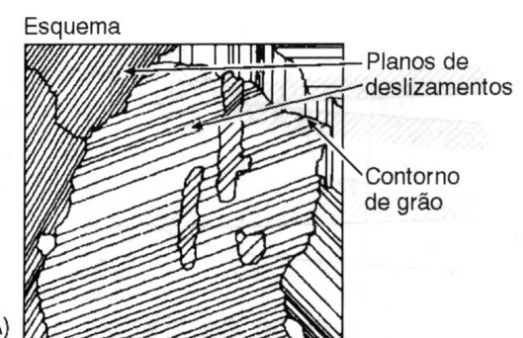
(A)



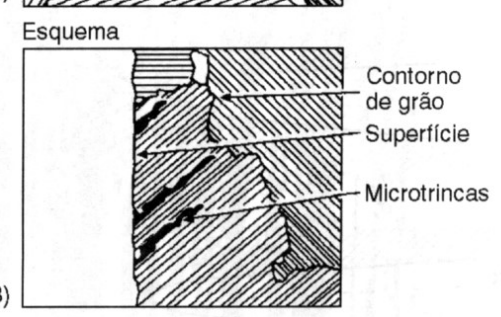
(B)



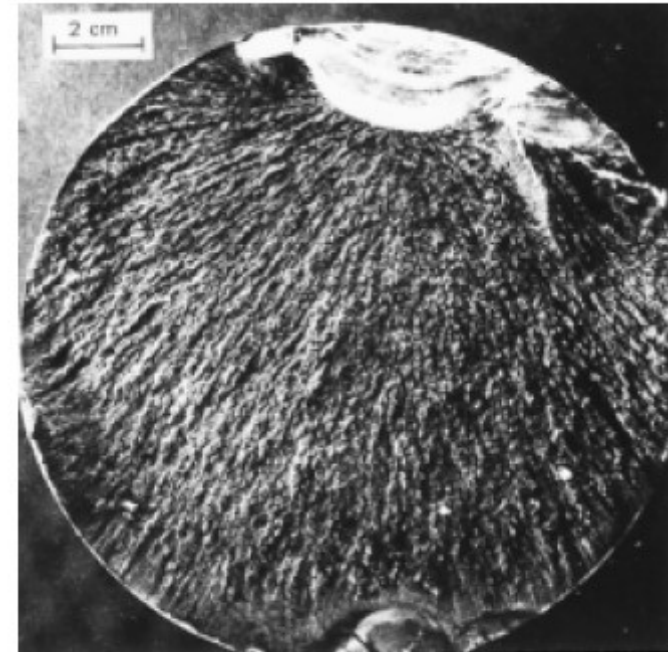
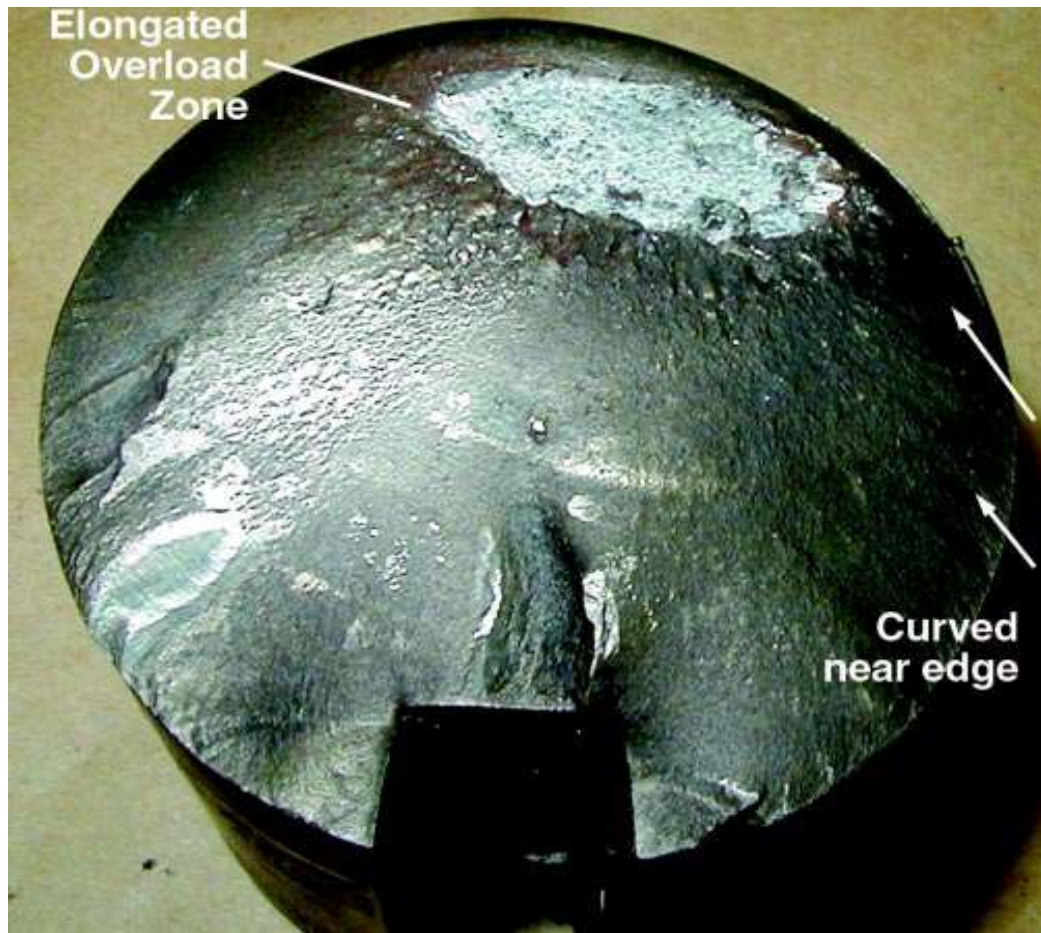
(A)



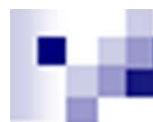
(B)



# Falhas catastróficas



Uma trinca se formou na aresta superior, a região lisa próxima a parte superior corresponde a área em que a trinca se propagou lentamente



Praia.....  
Mulher....  
Cerveja....

