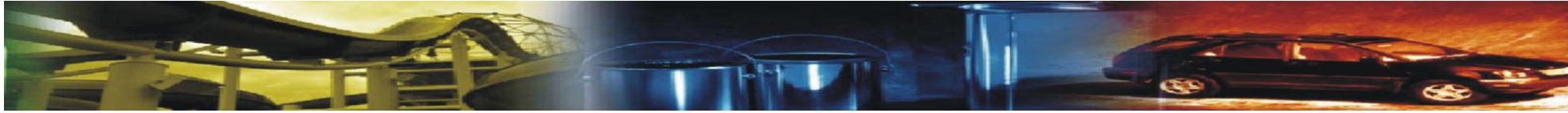


# **Propriedades Mecânicas dos Aços**

**DEMEC – TM175**  
**Prof Adriano Scheid**



## Propriedades Mecânicas: Tensão e Deformação

### Deformação Elástica

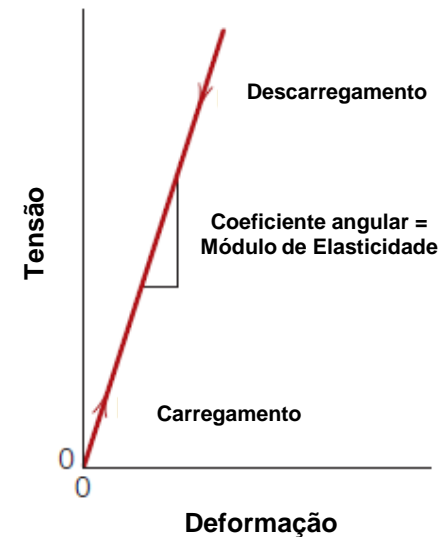
### Comportamento tensão-Deformação

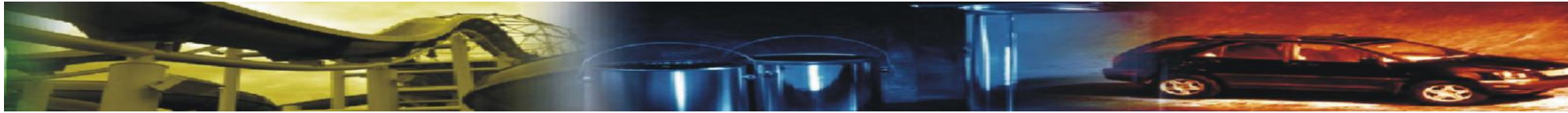
O grau com o qual a estrutura cristalina se deforma depende da magnitude da tensão aplicada.

Para tensões baixas, a relação entre a tensão e a deformação é dada por:

$$\sigma = E\epsilon$$

Esta é conhecida como lei de Hooke, com comportamento linear entre a tensão e a deformação, sendo  $E$  a constante de proporcionalidade ou Módulo de Elasticidade ou Módulo de Young.



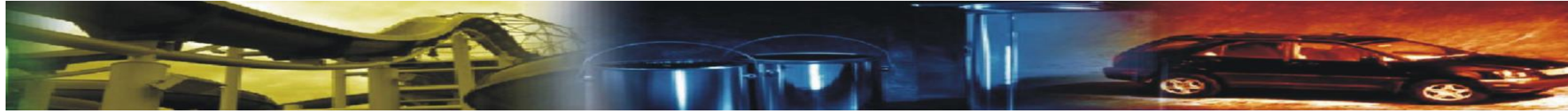


## **Propriedades Mecânicas: Tensão e Deformação**

### **Deformação Elástica**

Na região de deformação elástica, o comportamento pode ser pensado como a rigidez do material ou resistência à deformação Elástica.

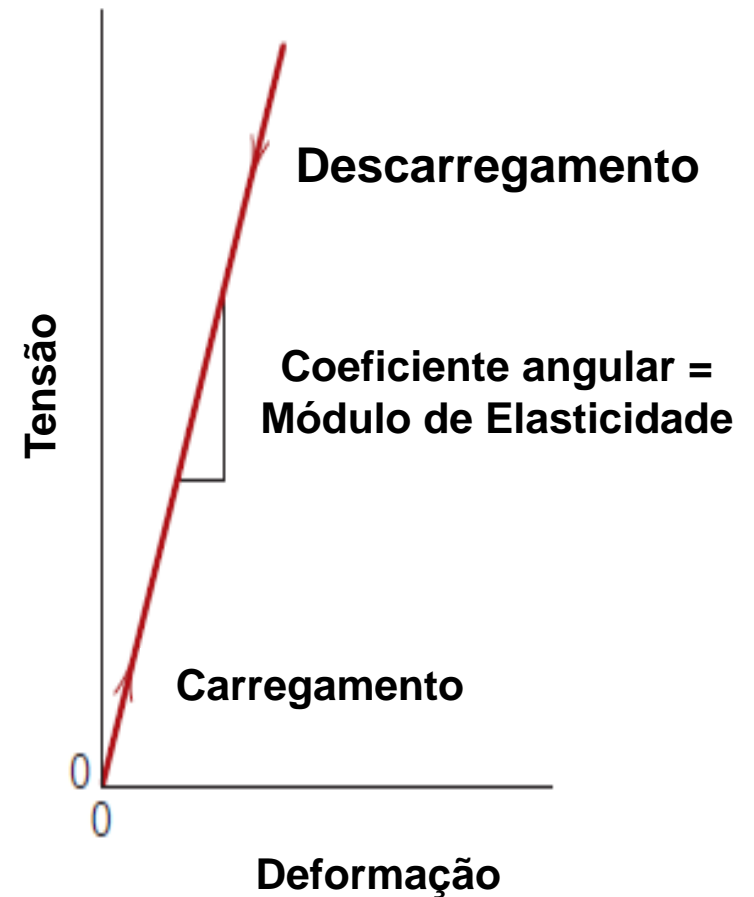
Neste regime de deformação, uma vez que a carga for cessada, o componente retorna às suas dimensões originais.



# Propriedades Mecânicas: Tensão e Deformação

## Deformação Elástica

Metal ou Liga	Módulo de Elasticidade	
	<i>GPa</i>	$10^6$ <i>psi</i>
Alumínio	69	10
Latão	97	14
Cobre	110	16
Magnésio	45	6.5
Níquel	207	30
Aço	207	30
Titânio	107	15.5
Tungstênio	407	59



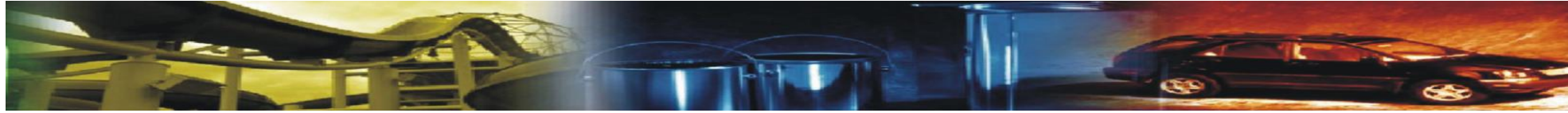


## **Propriedades Mecânicas: Tensão e Deformação**

### **Deformação Elástica Não Linear**

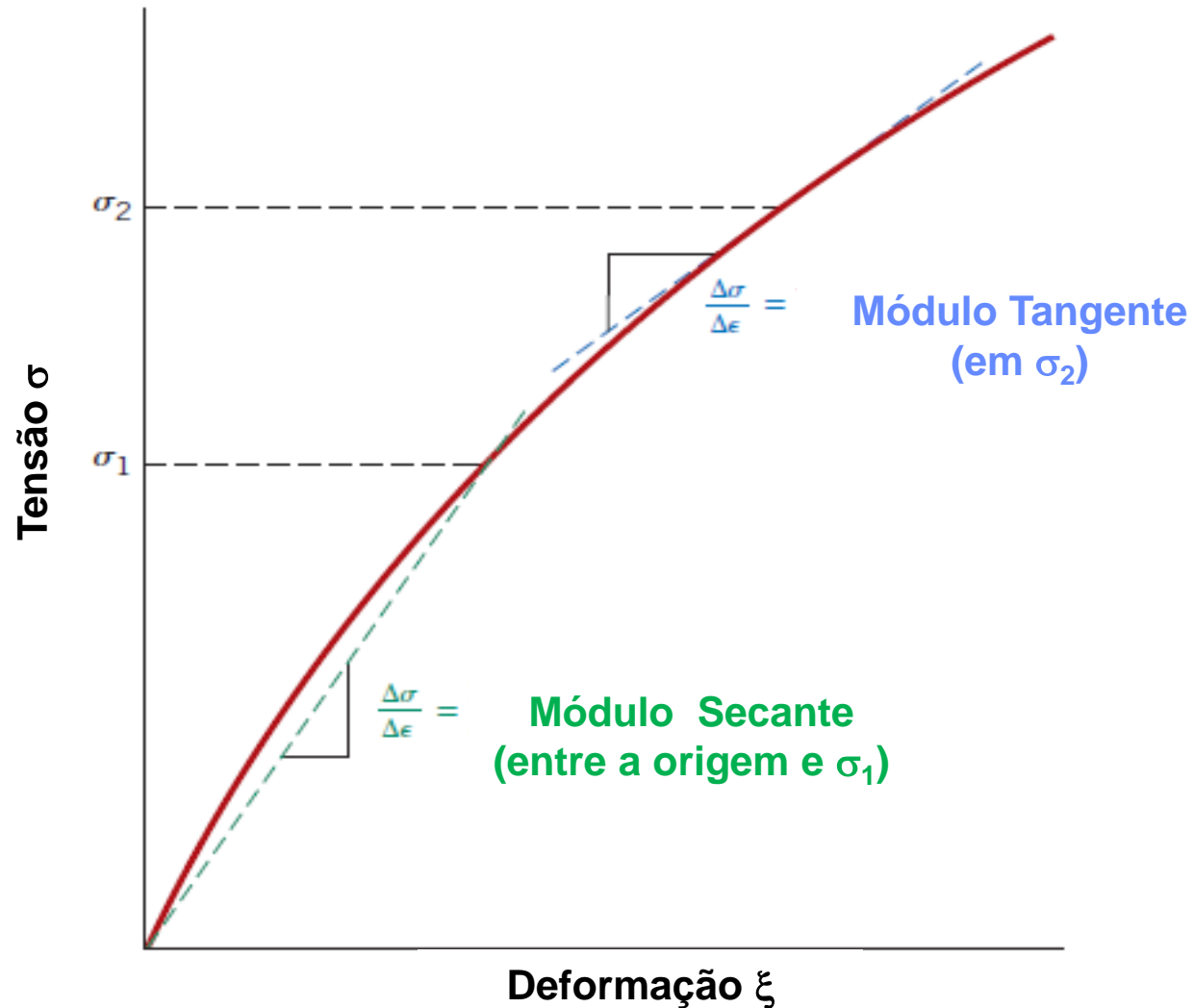
Alguns materiais (Ferro Fundido Cinzento, Polímeros, Concreto) podem apresentar comportamento não linear, sendo então representados pelos Módulos Tangente ou Secante.

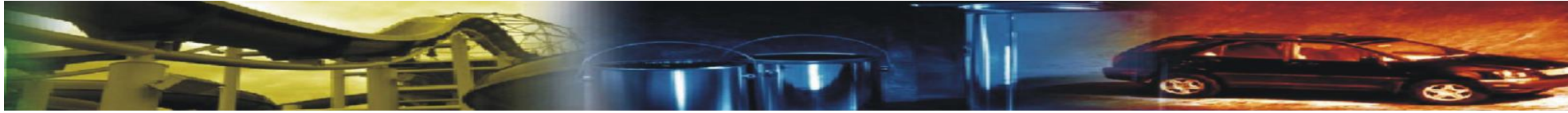
O **Módulo Tangente** é calculado em uma determinada tensão e o **Módulo Secante** é sempre considerado da origem até um dado valor de tensão.



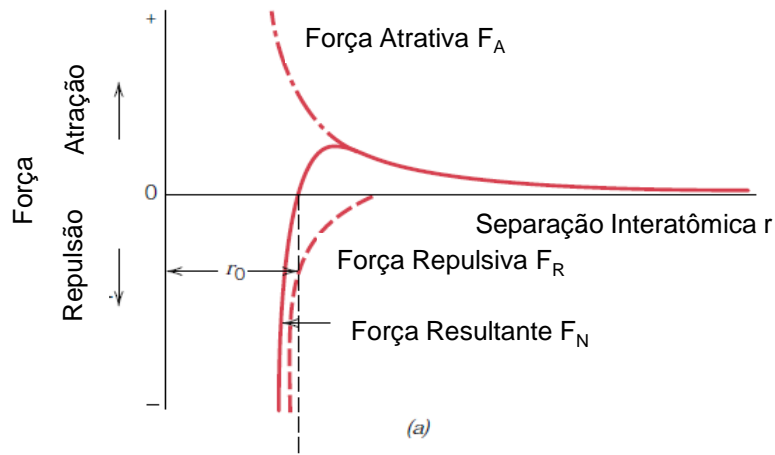
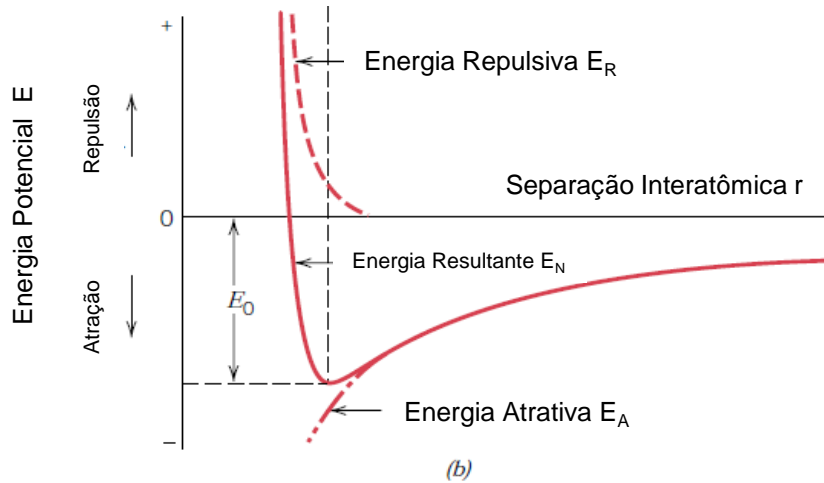
# Propriedades Mecânicas: Tensão e Deformação

## Deformação Elástica Não Linear

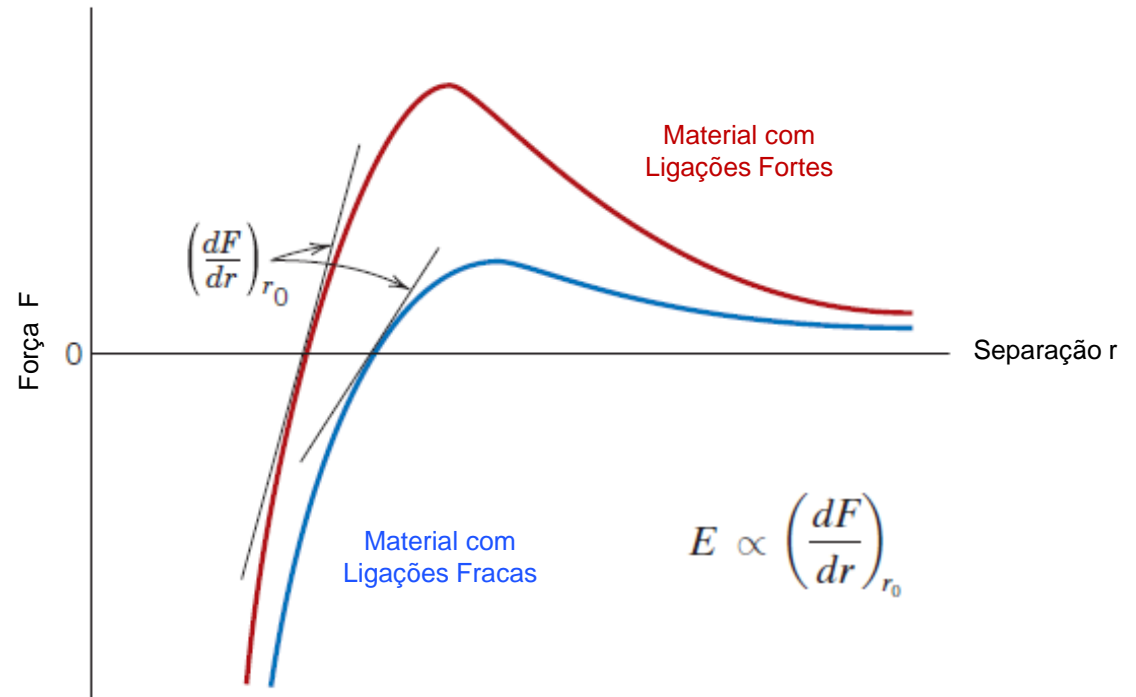


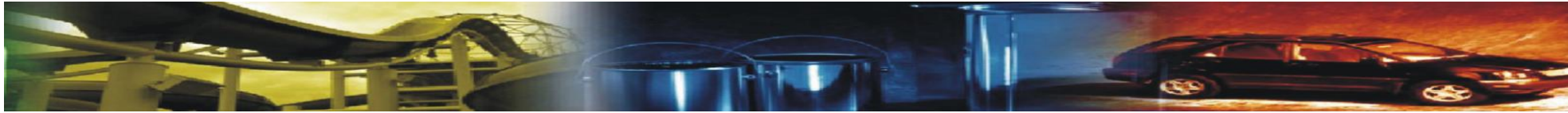


# Propriedades Mecânicas: Deformação Elástica



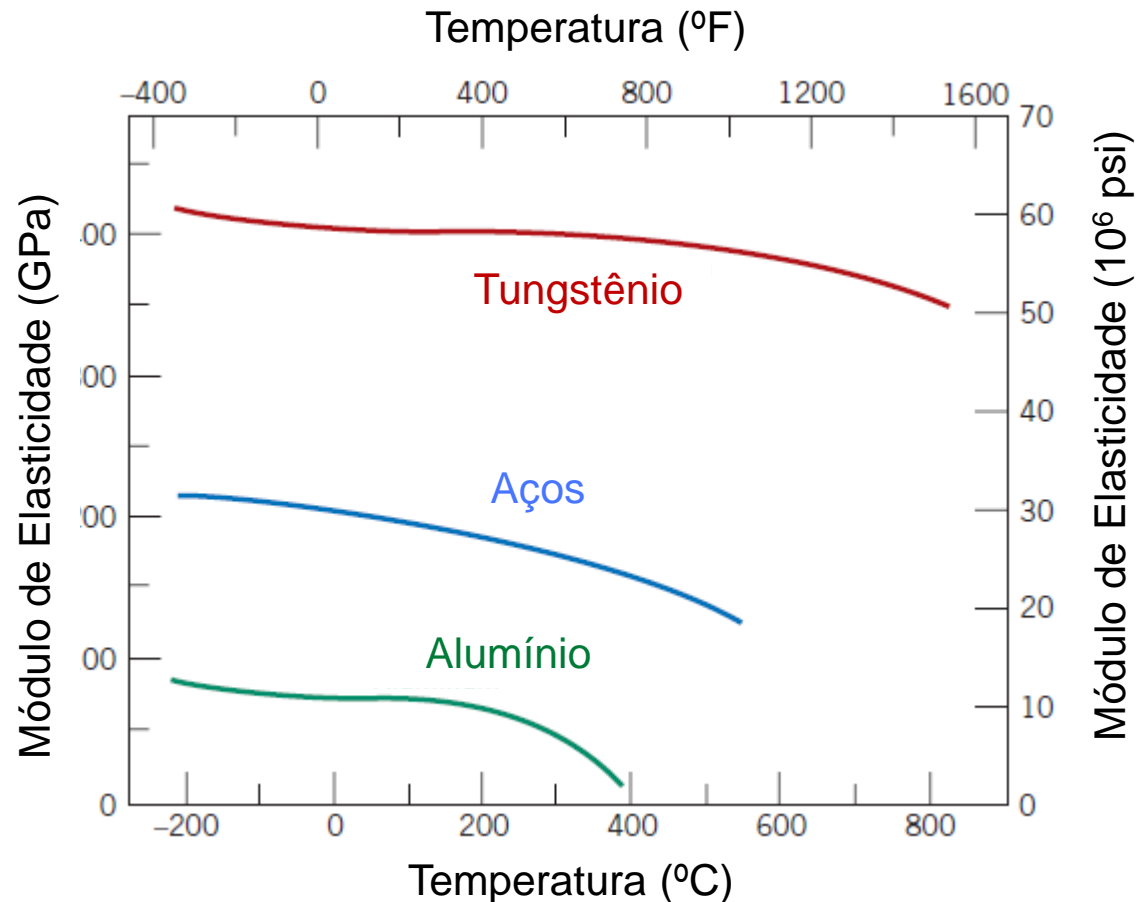
Em escala atômica, a deformação elástica é manifestada como pequenas mudanças no espaçamento atômico ou estiramento das ligações atômicas.



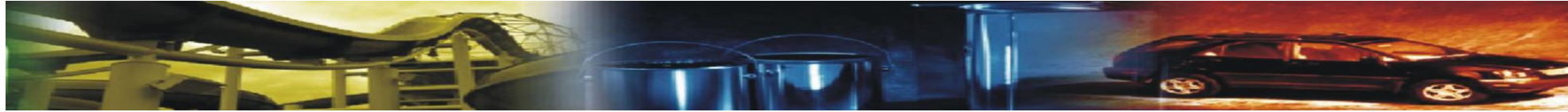


## Propriedades Mecânicas: Deformação Elástica

O Módulo de Elasticidade é similar entre Metais e Cerâmicos, sendo significativamente menor para os Polímeros, como consequência dos diferentes tipos de ligação atômica de cada material.





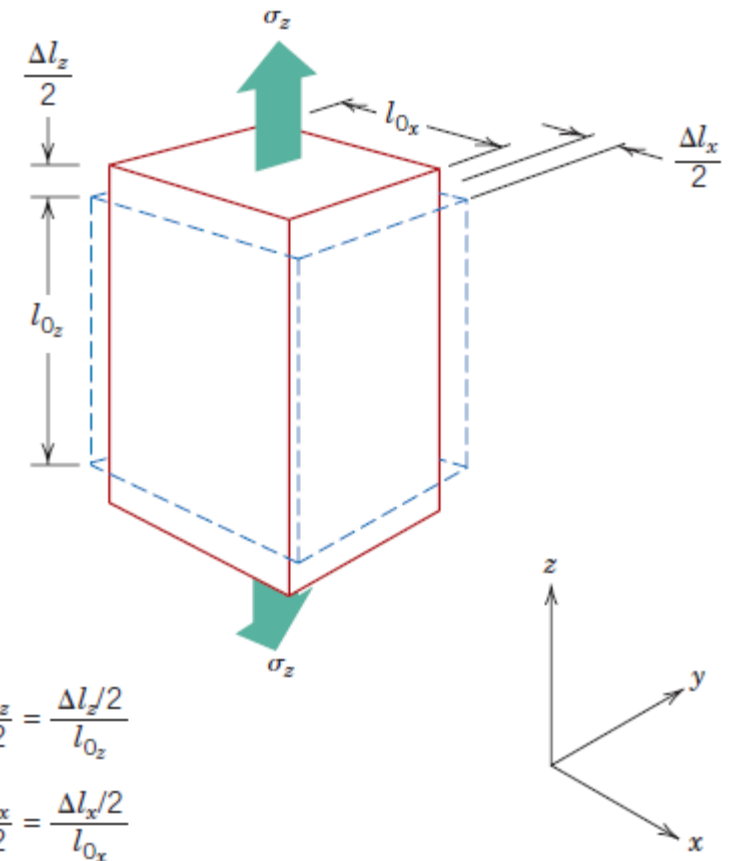


## Propriedades Mecânicas

### Propriedades Elásticas dos Materiais

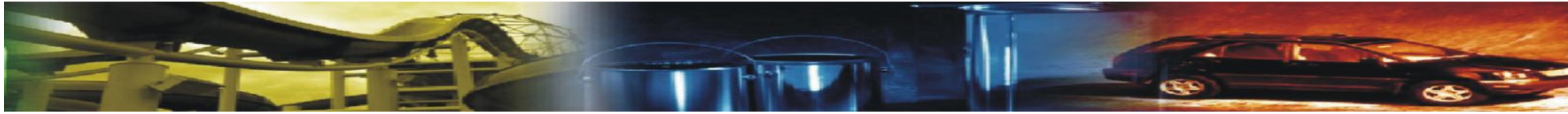
Como resultado da aplicação de tensão no eixo z, surgem deformações nos eixos x e y.

A **razão de Poisson** ( $\nu$ ) é definida como a razão da deformação no eixo x e y em relação a z, conforme segue:



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

Metal ou Liga	Módulo de Elasticidade		Razão de Poisson
	GPa	$10^6$ psi	
Alumínio	69	10	0.33
Latão	97	14	0.34
Cobre	110	16	0.34
Magnésio	45	6.5	0.29
Níquel	207	30	0.31
Aço	207	30	0.30
Titânio	107	15.5	0.34
Tungstênio	407	59	0.28



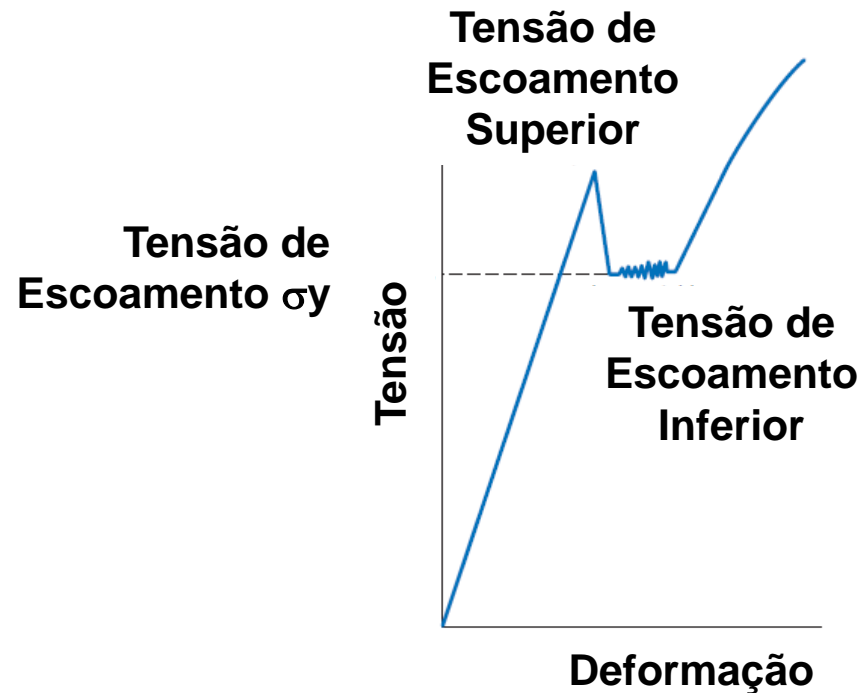
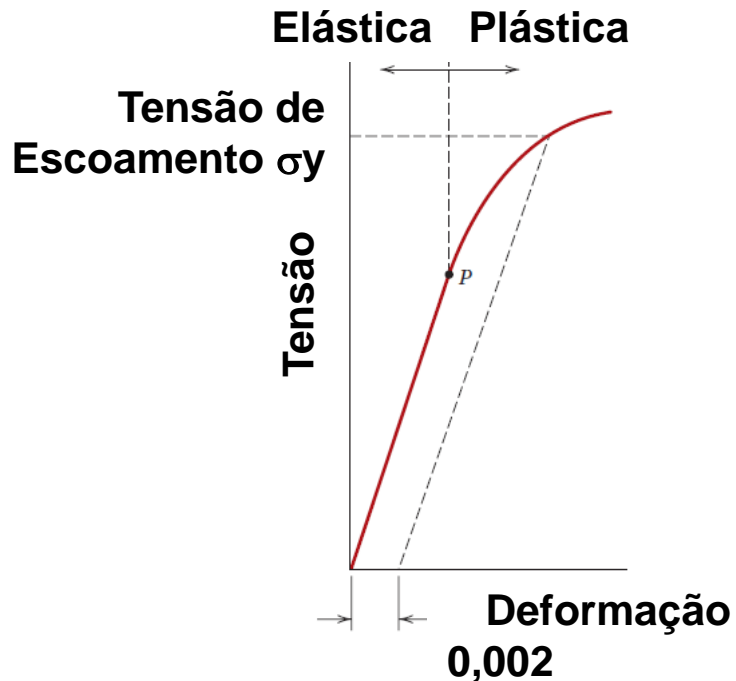
# Propriedades Mecânicas

## Limite de Escoamento

Os projetos são concebidos para que o componente trabalhe no regime elástico, sob pena de perder as dimensões ou deixar de funcionar adequadamente se deformado plasticamente.

Limite de Proporcionalidade ou  
Limite de Escoamento de Engenharia

Limite de Escoamento Nítido





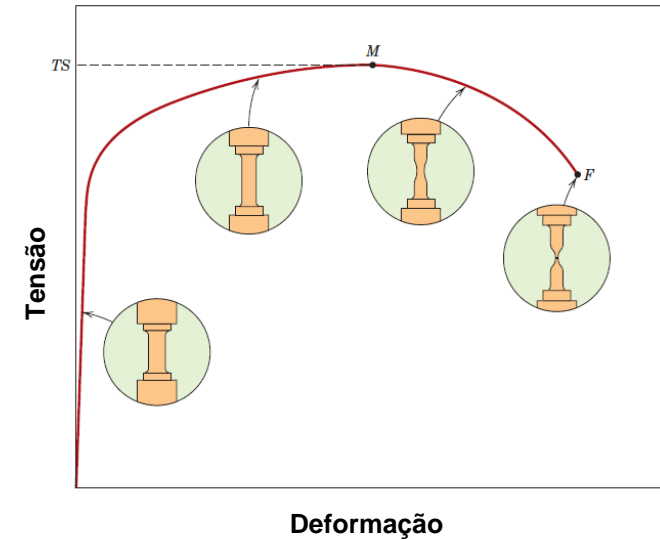
## Propriedades Mecânicas: Deformação Plástica dos Materiais

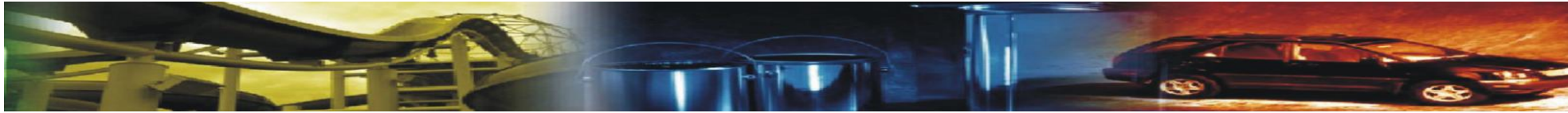
A maioria dos materiais apresenta deformação no regime elástico até cerca de 0,5%.

Quando a tensão promove deformações superiores a este valor, surge um outro modo de deformação, chamado deformação Plástica. Neste regime, o material não retorna à dimensão original quando cessada a tensão.

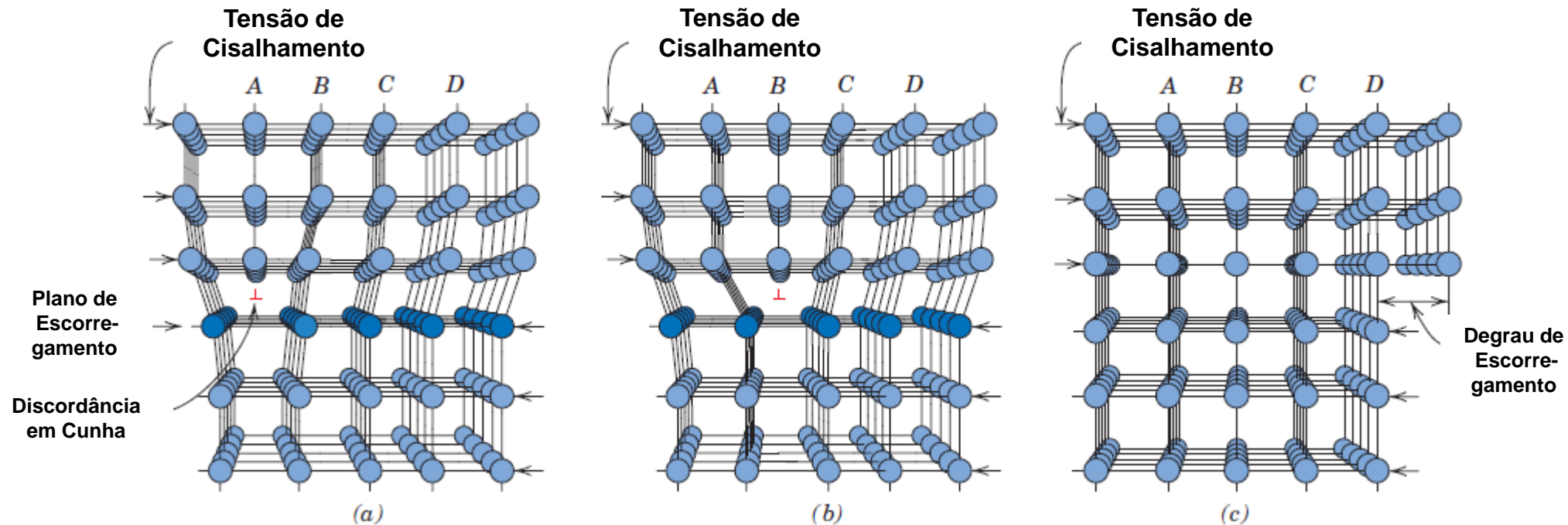
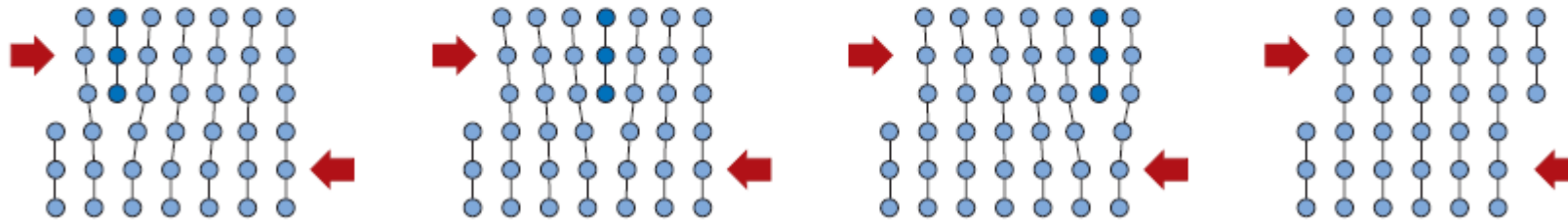
A deformação Plástica envolve a ruptura de ligações atômicas com a formação ou estabelecimento das ligações em regiões diferentes das anteriores no material.

Este processo ocorre pela geração de movimentação de discordâncias.





# Deformação Plástica Metais – Movimento de Discordâncias



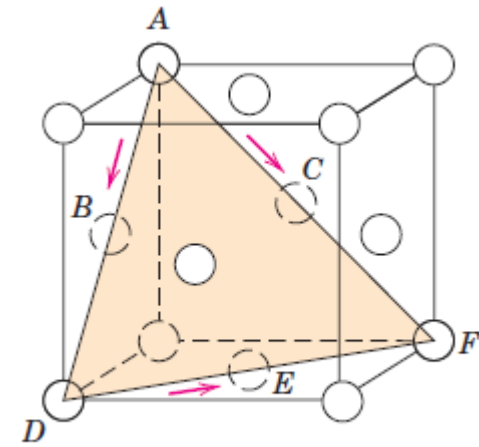


# Deformação Plástica Metais – Movimento de Discordâncias

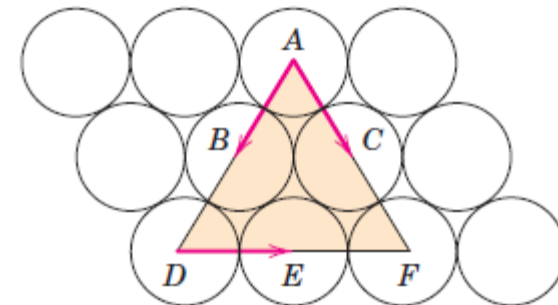
(a) Sistema de Escorregamento  $\{111\}$   $[110]$  da estrutura CFC

(b) Plano  $(111)$  com as três direções de escorregamento  $[110]$

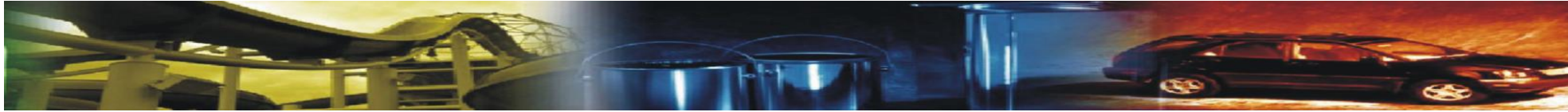
Metais	Plano Escorregamento	Direção Escorregamento	Número de Sistemas Escorregamento
	<b>Cúbica de Face Centrada</b>		
Cu, Al, Ni, Ag, Au	$\{111\}$	$\langle \bar{1}\bar{1}0 \rangle$	12
	<b>Cúbica de Corpo Centrado</b>		
$\alpha$ -Fe, W, Mo	$\{110\}$	$\langle \bar{1}11 \rangle$	12
$\alpha$ -Fe, W	$\{211\}$	$\langle \bar{1}11 \rangle$	12
$\alpha$ -Fe, K	$\{321\}$	$\langle \bar{1}11 \rangle$	24
	<b>Hexagonal Compacto</b>		
Cd, Zn, Mg, Ti, Be	$\{0001\}$	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	3
Ti, Mg, Zr	$\{10\bar{1}0\}$	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	3
Ti, Mg	$\{10\bar{1}1\}$	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	6



(a)



(b)



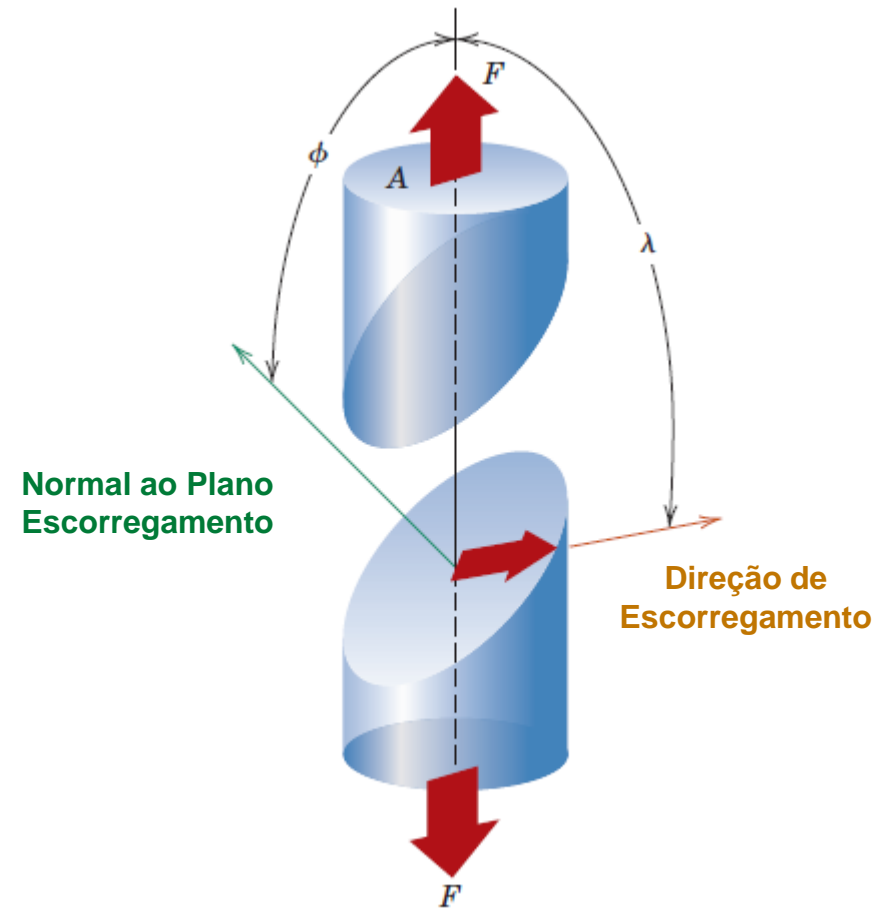
# Deformação Plástica Metais - Monocristal

Conforme lei de Schmid, a tensão axial mínima para haver escorregamento ocorre quando :

$$\phi = \lambda = 45^\circ$$

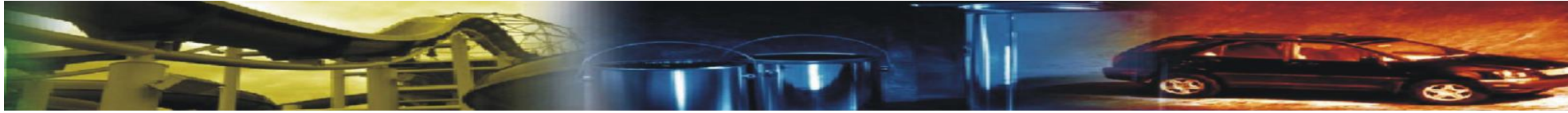
Neste caso, a tensão de cisalhamento crítica  $\tau_R$  é a metade da tensão axial  $\sigma$ .

A tensão de cisalhamento efetiva é sempre menor que a metade da tensão axial para quaisquer outras orientações.



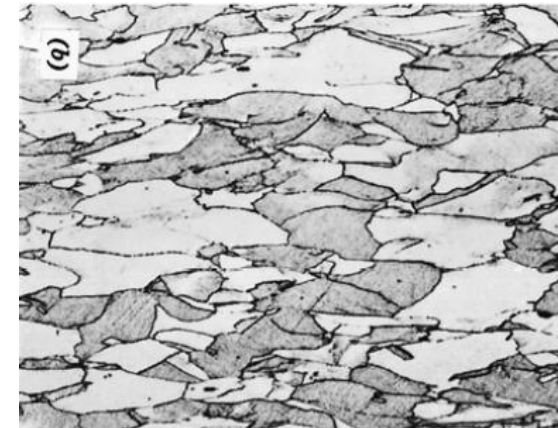
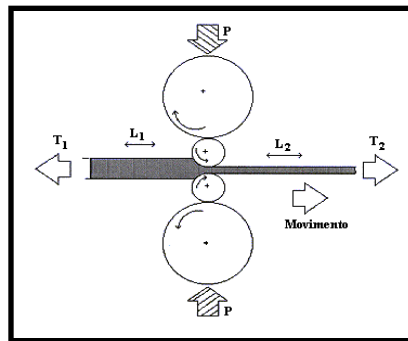
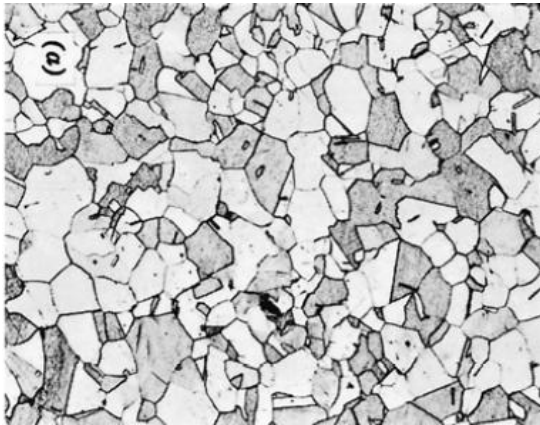
$$\tau_R = \sigma \cos \phi \cos \lambda$$

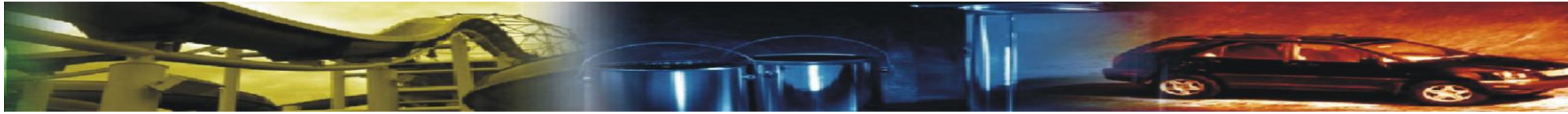
Lei de Schmid



## Deformação Plástica - Metais Policristalinos

Em materiais Policristalinos, a movimentação da discordância ocorre ao longo do sistema de escorregamento que possui orientação mais favorável.





## Propriedades Mecânicas

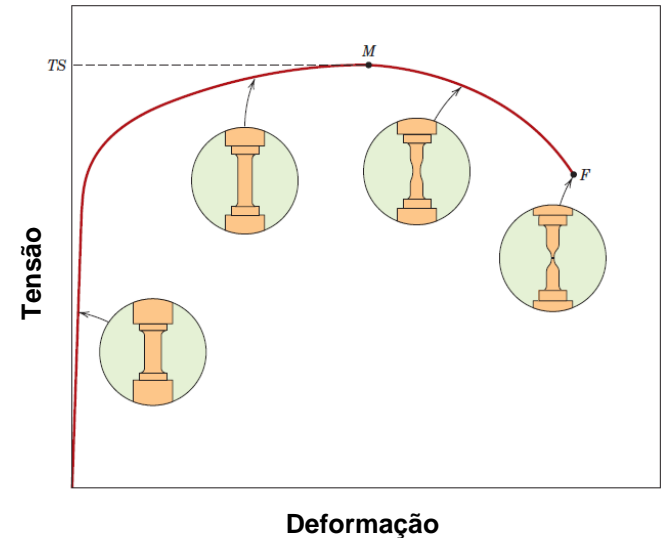
### Limite de Resistência à Tração

A tensão máxima ou limite de Resistência à tração é a máxima tensão suportada pelo material submetido a ensaio de tração.

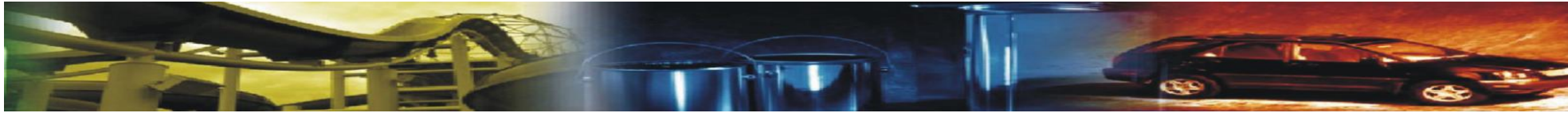
A partir do escoamento, o material:

a- se deforma plasticamente até o máximo  $M$  da curva (deformação uniforme) com encruamento associado.

b- Entre  $M$  e  $F$ , a tensão cai, como resultado do coslescimento de microcavidades, o que resulta na estrição do corpo de prova.







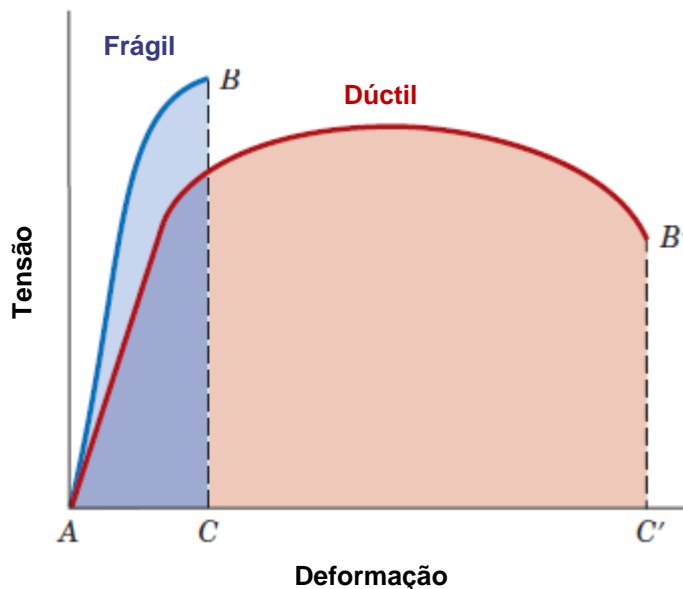
## Propriedades Mecânicas: Ductilidade

A ductilidade é uma medida do grau de deformação plástica até a fratura. Os materiais podem ser:

a- **Frágeis**: pequena (<5%) deformação plástica até a fratura.

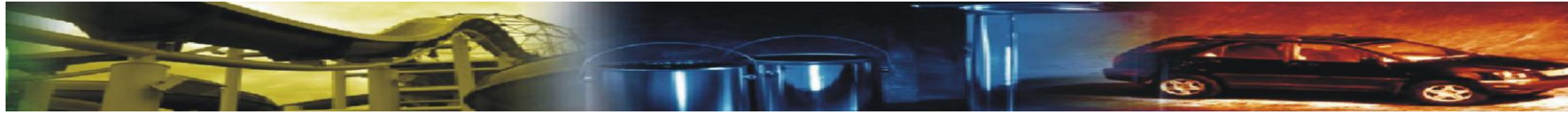
b- **Dúcteis**: apresentam grande deformação plástica até a fratura.

É uma propriedade importante para referir a deformação até a ruptura e para conhecer a capacidade de deformação plástica em processos.



$$\%EL = \left( \frac{l_f - l_0}{l_0} \right) \times 100$$

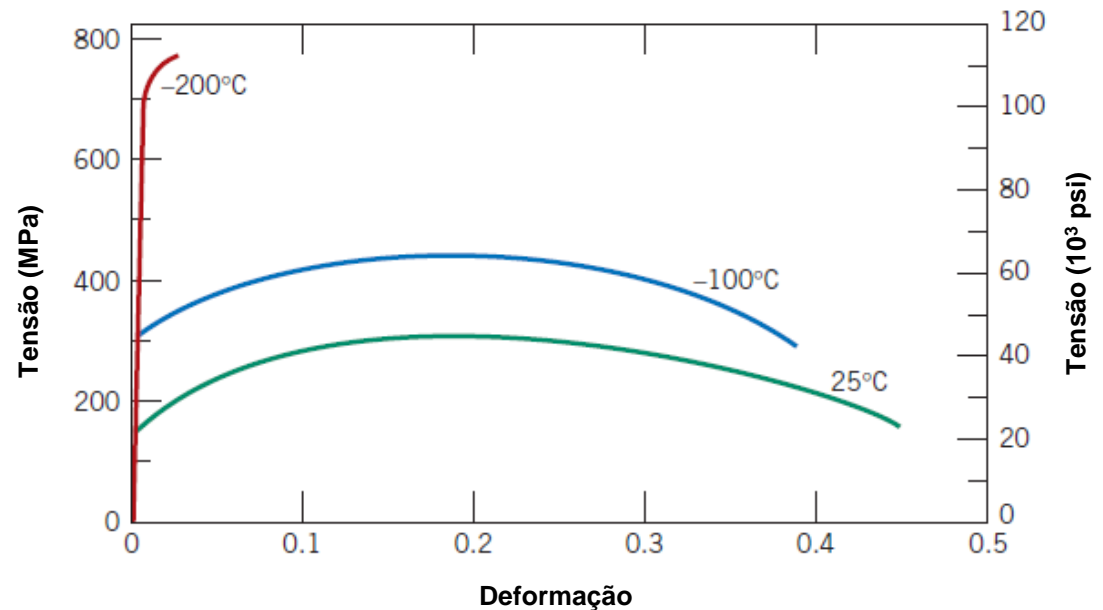
$$\%RA = \left( \frac{A_0 - A_f}{A_0} \right) \times 100$$

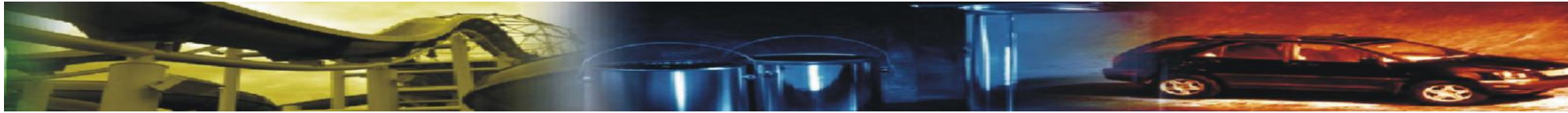


# Propriedades Mecânicas

Liga Metálica	Escoamento MPa (ksi)	Resistência MPa (ksi)	Ductilidade A (%) em 50mm
Alumínio	35 (5)	90 (13)	40
Cobre	69 (10)	200 (29)	45
Latão (70Cu-30Zn)	75 (11)	300 (44)	68
Ferro	130 (19)	262 (38)	45
Níquel	138 (20)	480 (70)	40
Aço (1020)	180 (26)	380 (55)	25
Titânio	450 (65)	520 (75)	25
Molibdênio	565 (82)	655 (95)	35

O limite de escoamento, a resistência mecânica e a ductilidade são sensíveis à temperatura.



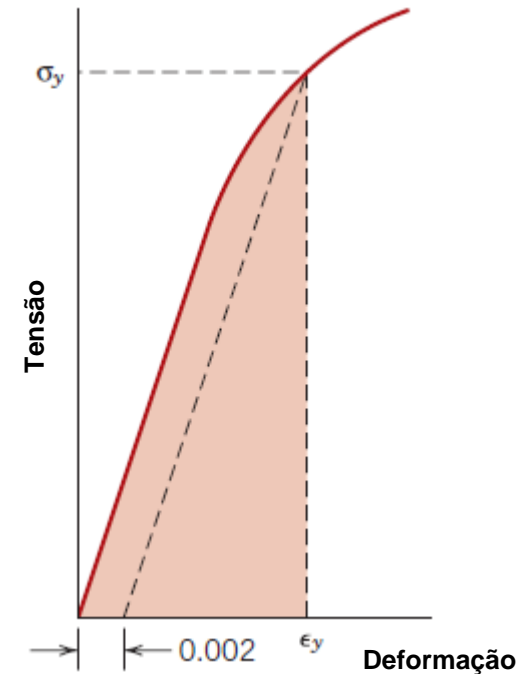


## Propriedades Mecânicas

### Resiliência

É a capacidade de absorver energia quando deformado elasticamente e, então, devolvê-la no descarregamento. O módulo de resiliência é dado por  $U_r$

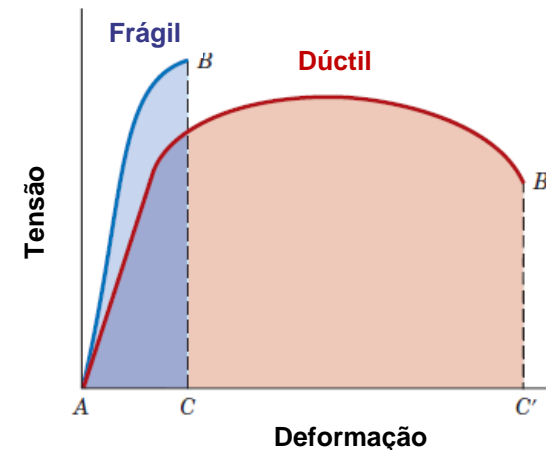
$$U_r = \int_0^{\epsilon_y} \sigma d\epsilon$$

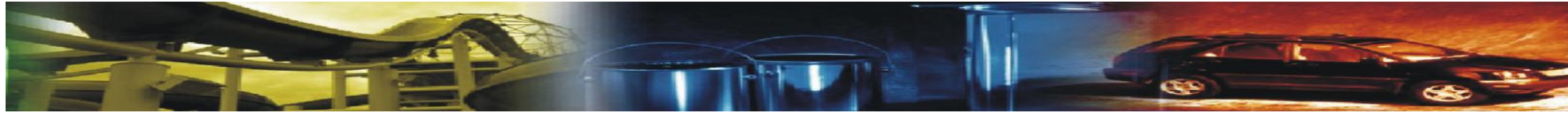


### Tenacidade

É a capacidade do material de absorver energia até a fratura. Um material tenaz precisa ser resistente e dúctil.

É uma medida da área abaixo da curva tensão-deformação.



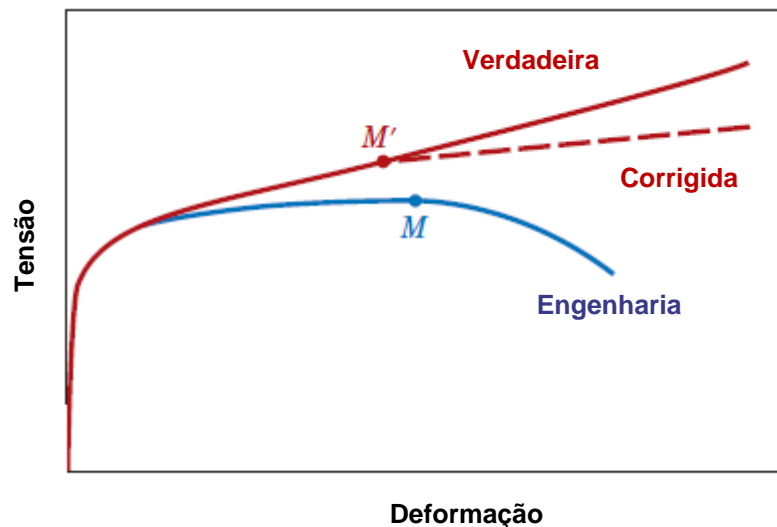


## Propriedades Mecânicas

### Curva Tensão-Deformação Verdadeira

A curva tensão-deformação verdadeira considera a área instantânea da seção ao invés da área inicial do corpos de prova.

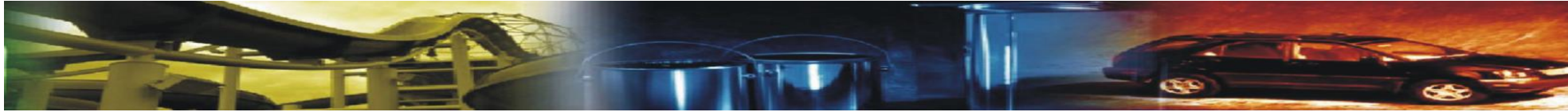
Para a região de estricção, surgem componentes de tensão adicionais à tensão axial, de forma que surge a curva de tensão verdadeira corrigida:



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

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

$$\epsilon_T = \ln \frac{l_i}{l_0}$$



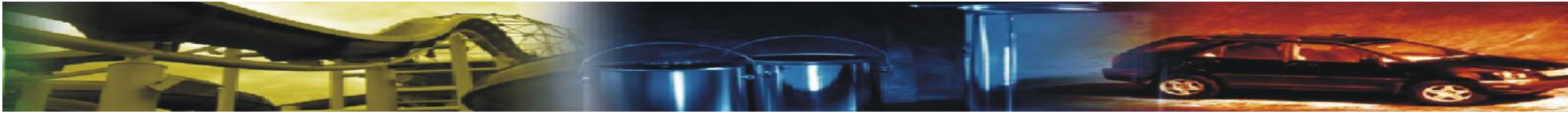
## Propriedades Mecânicas

### Curva Tensão-Deformação Verdadeira

Onde  $n$  é o expoente de encruamento, dependente de cada material e  $K$  também é uma constante.

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

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



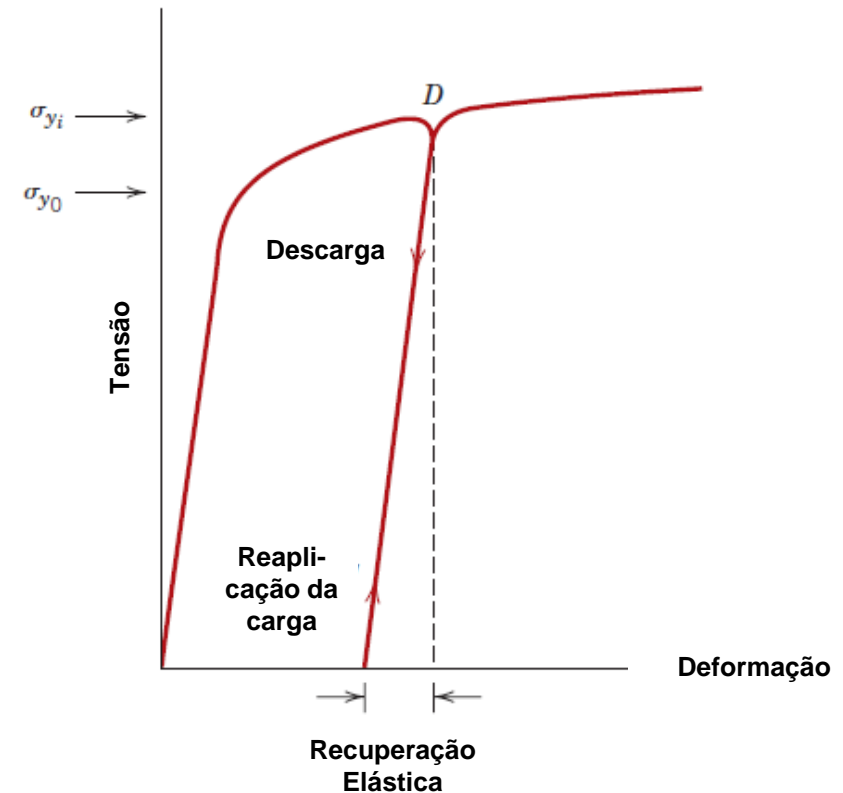
## Propriedades Mecânicas

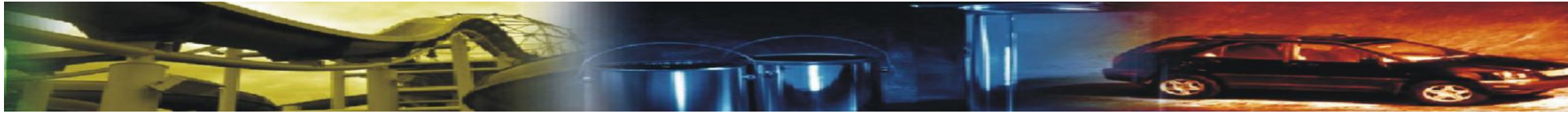
### Recuperação Elástica após Deformação Plástica

Quando a deformação plástica é cessada, ocorre uma recuperação da deformação referente ao comportamento elástico. Esta recuperação é particularmente importante para processos de conformação mecânica a frio.

Outro efeito importante da deformação plástica está relacionado ao novo limite de escoamento que o material apresenta após ter sido deformado plasticamente.

O novo Limite de Escoamento é maior que o original, sem deformação plástica associada.





## Propriedades Mecânicas

### Ensaio de Dureza

Dureza:

“Resistência à deformação plástica localizada causada por um indentador”

Principais Métodos:

- Rockwell
- Brinell
- Vickers
- Knoop



**Forma do Indentador**

**Carga**

**Fórmula para o Número de Dureza**

**Brinell**



$P$

$$HB = \frac{2P}{\pi D[D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$$

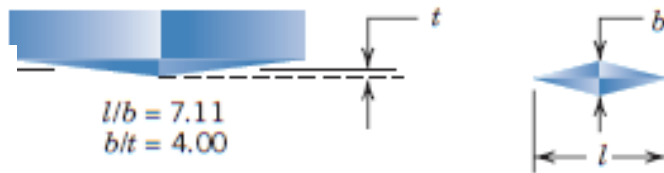
**Vickers**



$P$

$$HV = 1.854P/d_1^2$$

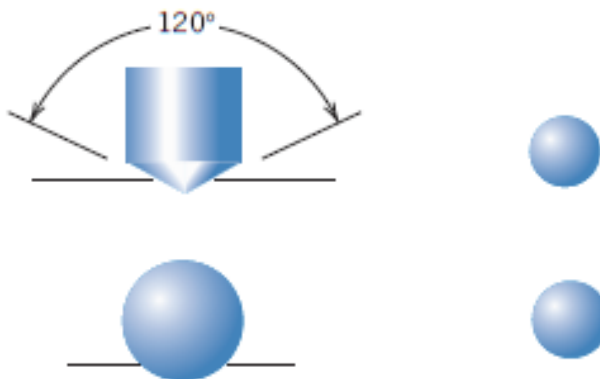
**Knoop**



$P$

$$HK = 14.2P/l^2$$

**Rockwell**



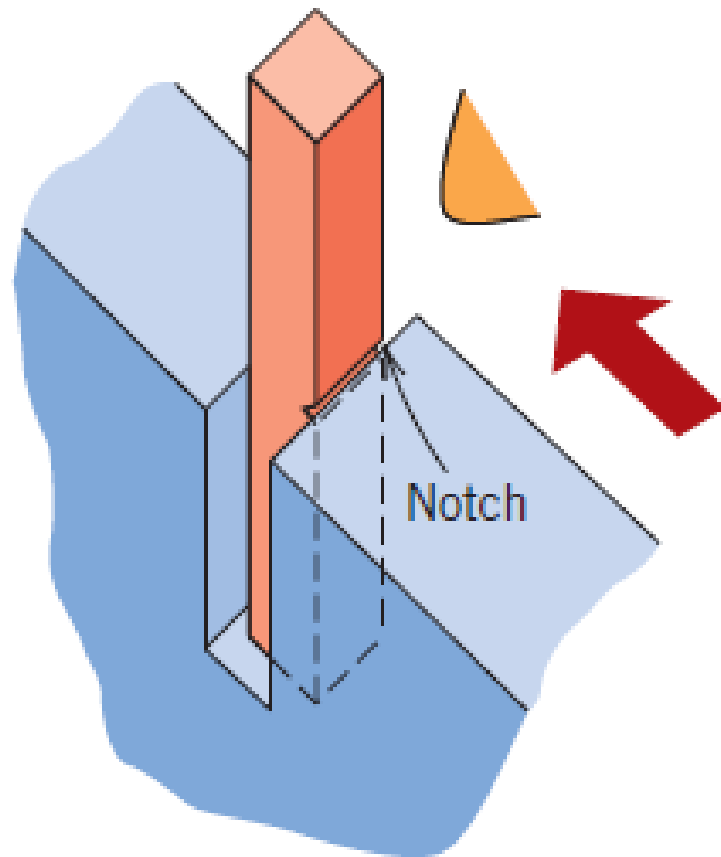
60 kg }  
100 kg } **Rockwell Normal**  
150 kg }

15 kg }  
30 kg } **Rockwell Superficial**  
45 kg }

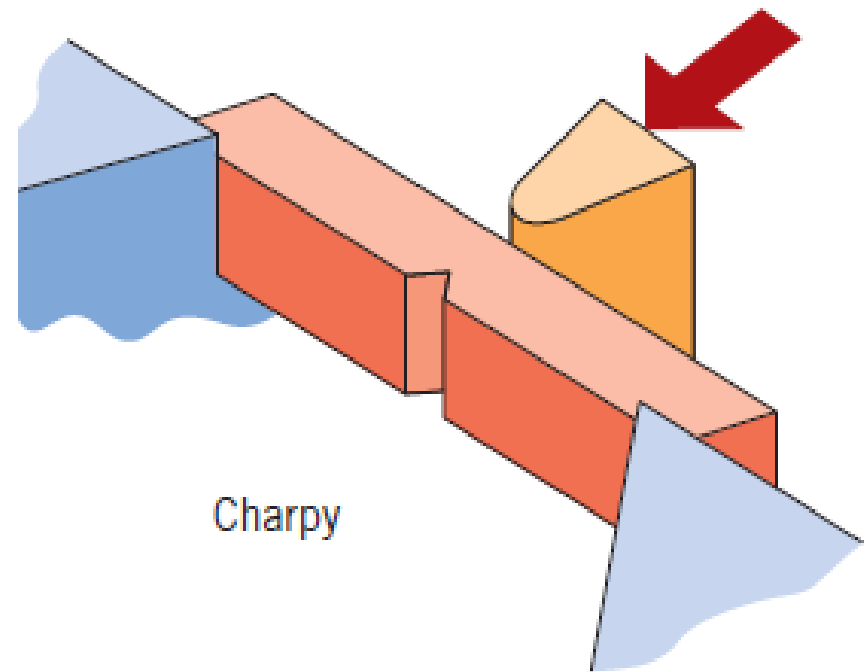


# Ensaio de Impacto

## Tenacidade em Impacto Charpy-Izod (ASTM A 370)



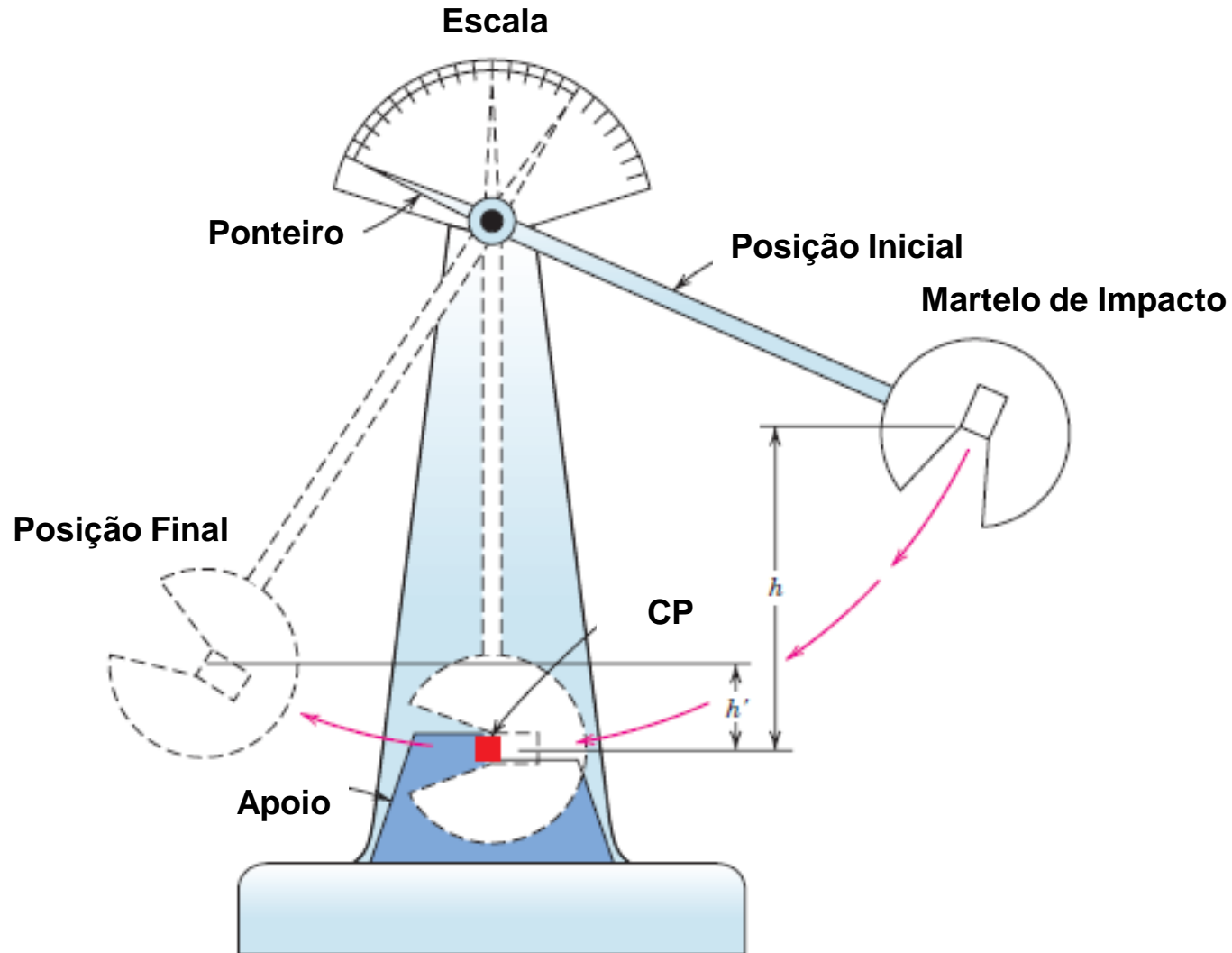
Izod



Charpy

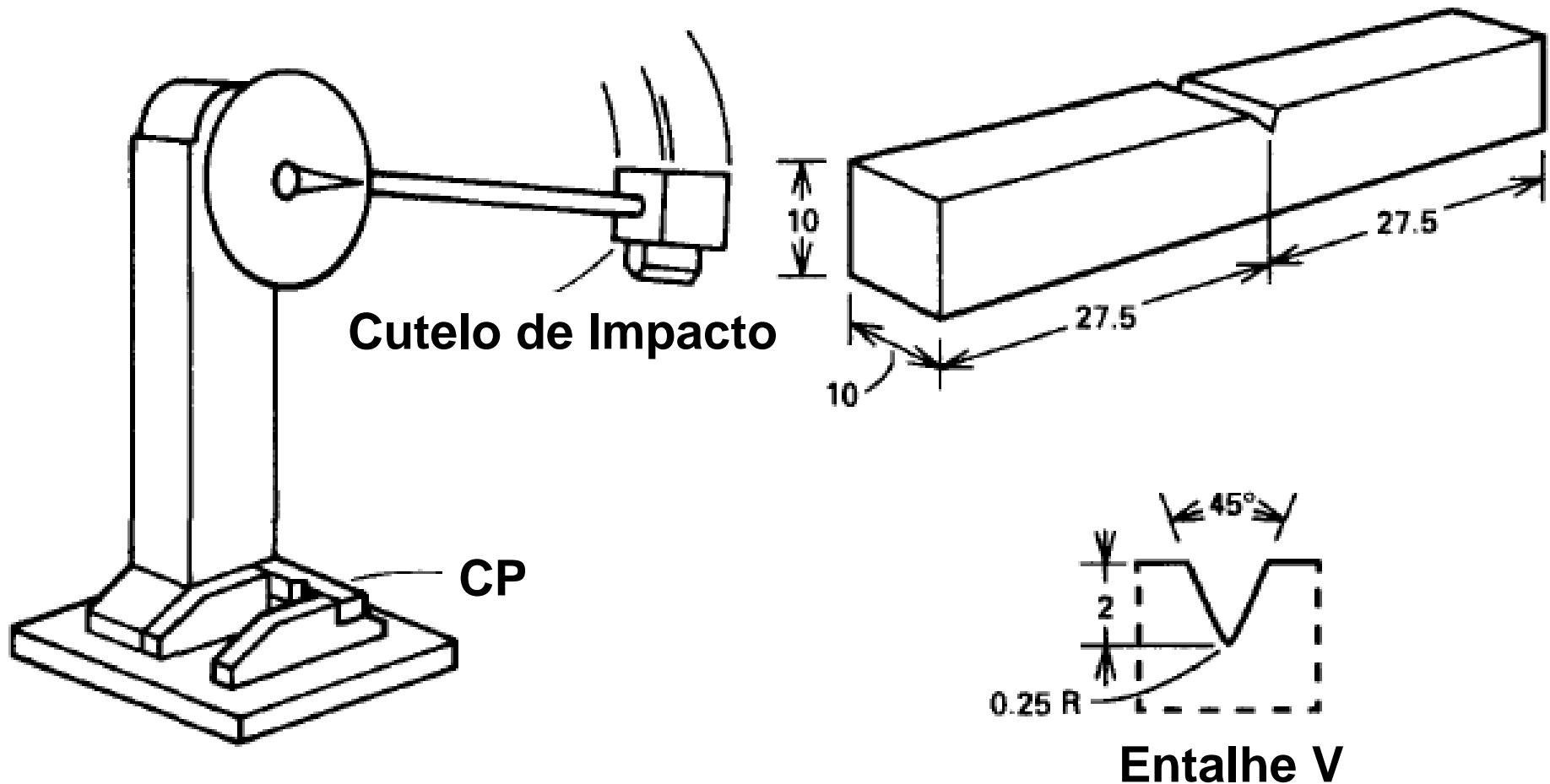
# Ensaio de Impacto

## Tenacidade em Impacto Charpy (ASTM A 370)



# Ensaio de Impacto Charpy

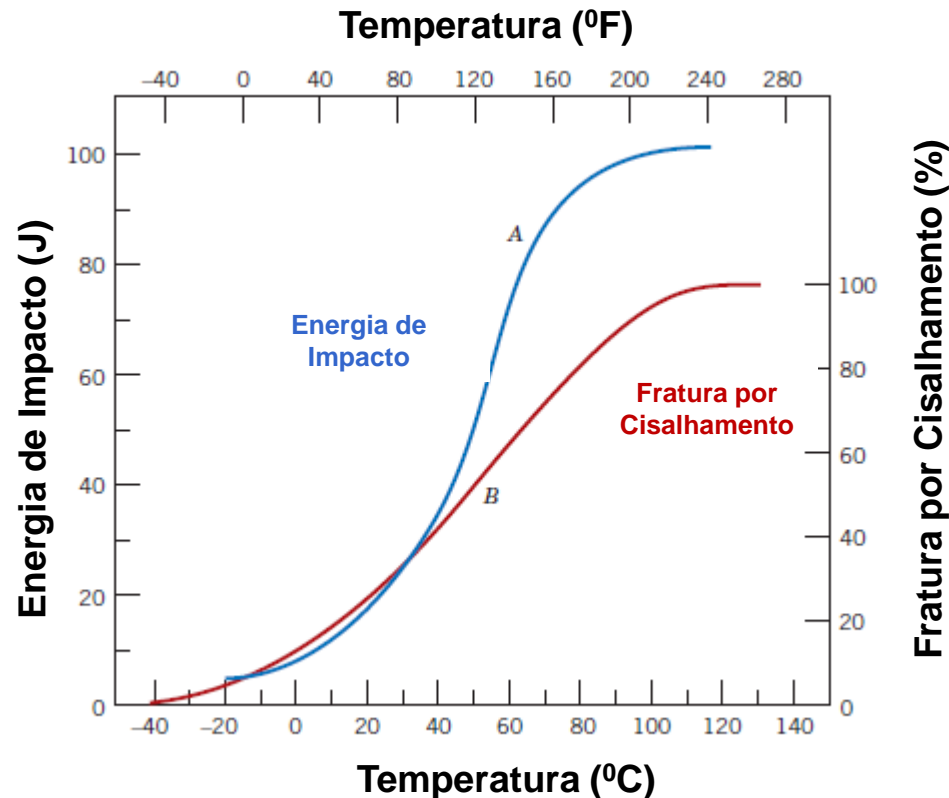
## Tenacidade em Impacto Charpy (ASTM A 370)



# Tenacidade ao Impacto - Transição Dúctil-Frágil

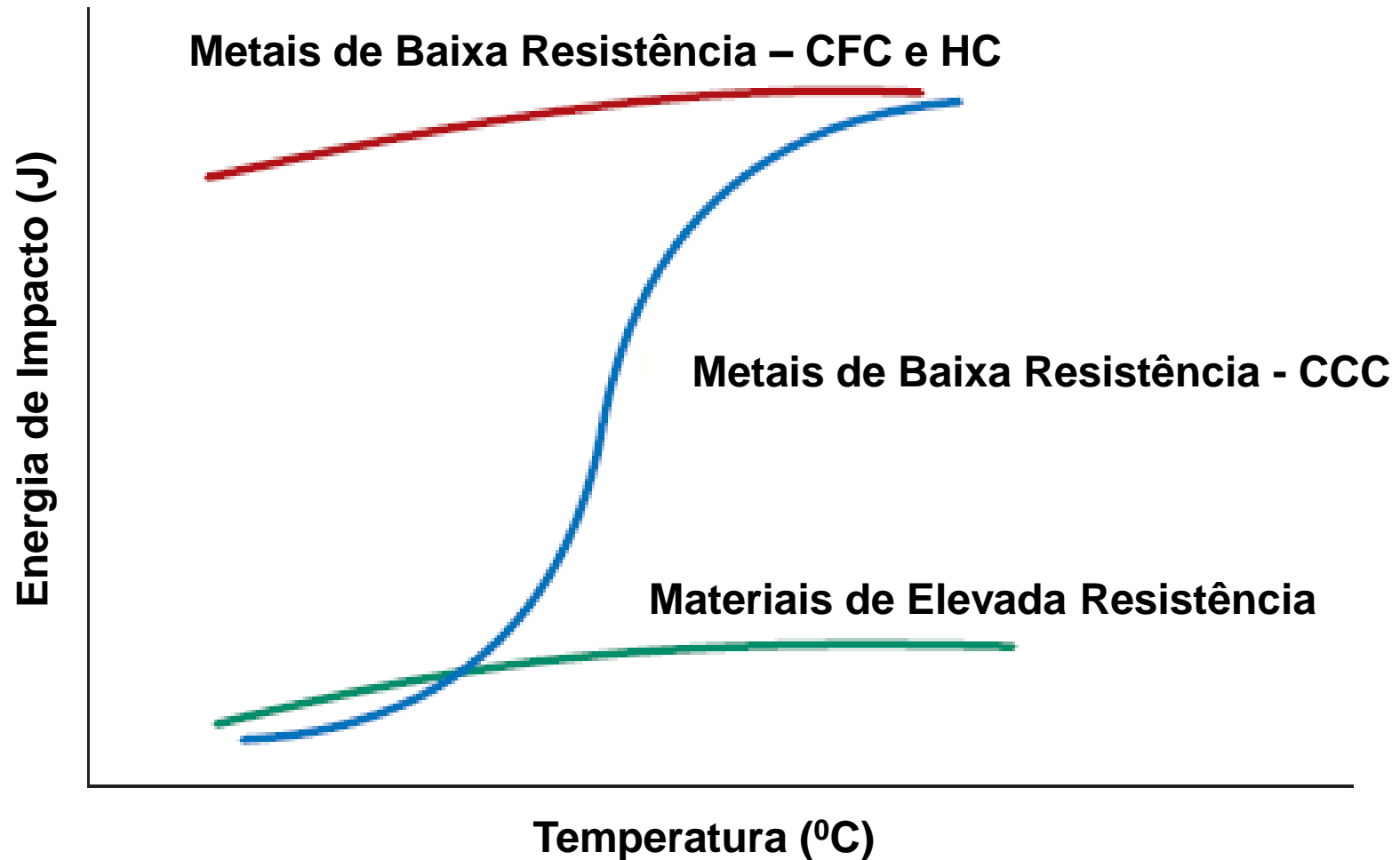
Este tipo de comportamento ocorreu primeiramente em grandes e contínuas estruturas como vasos de pressão, tubulações, navios de guerra, pontes e outras estruturas restritas, freqüentemente construídas por soldagem.

Histórico: 250 navios na 2ª guerra mundial apresentaram fratura frágil, tendo aços dúcteis como matéria-prima. Destes, 19 romperam ao meio.



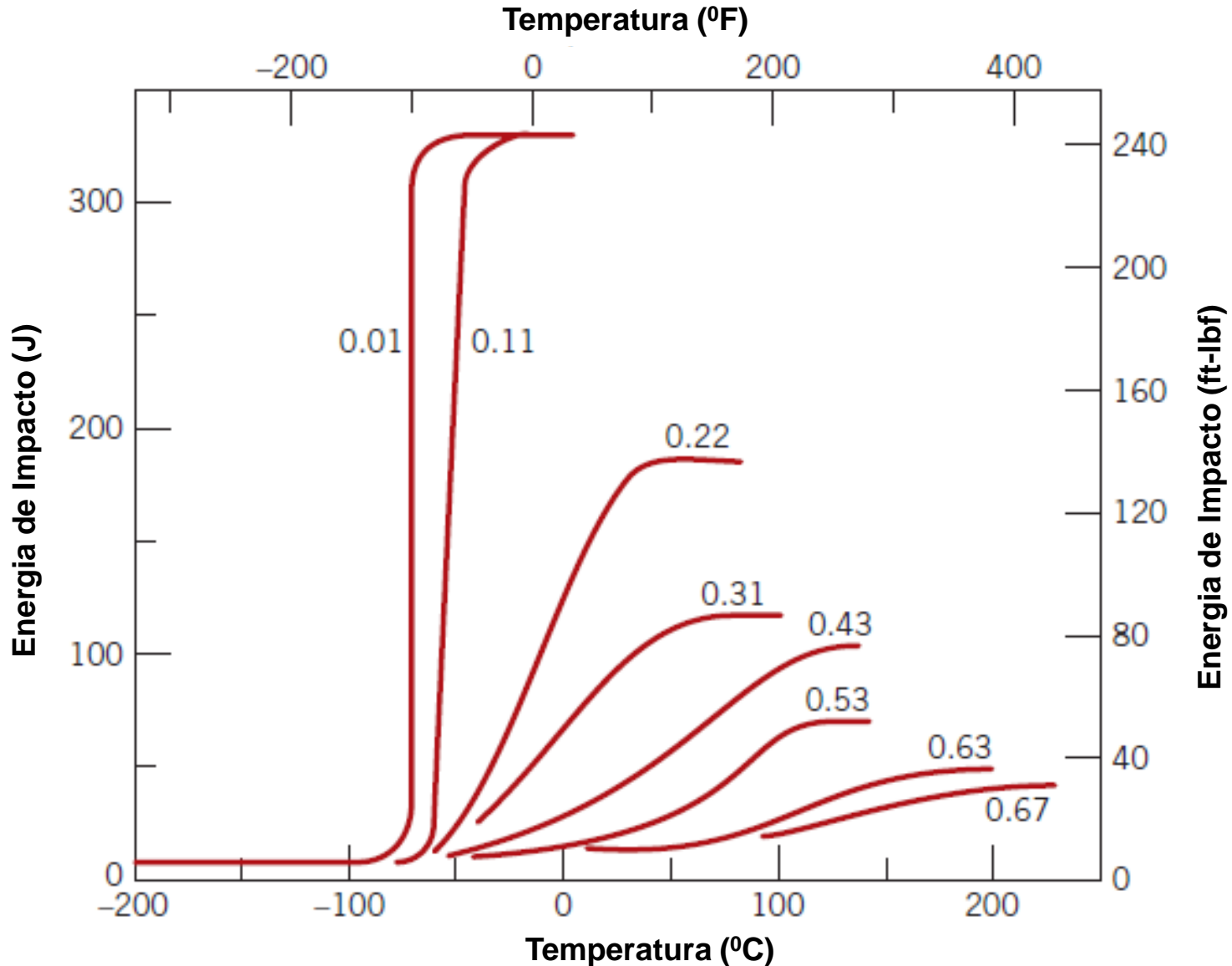
# Tenacidade ao Impacto - Transição Dúctil-Frágil

Fatores que afetam a transição Dúctil-Frágil em aços.



# Tenacidade ao Impacto - Transição Dúctil-Frágil

Fatores que afetam a transição Dúctil-Frágil em aços.



# Tenacidade ao Impacto - Transição Dúctil-Frágil

Fatores que afetam a transição Dúctil-Frágil em aços

**1- Teor de Carbono e Manganês:**

a- O teor de Carbono eleva a temperatura de transição para uma dada energia absorvida.

b- O teor de Carbono ainda influenciam a energia máxima absorvida e a forma das curvas.

c- O teor de Manganês reduz a temperatura de transição para uma dada energia absorvida.

**2- Teor de Fósforo:**

O teor de Fósforo eleva a temperatura de transição para uma dada energia absorvida.

**3- Teor de Níquel:**

Adições de até 2% de Níquel reduzem a temperatura de transição.

# Tenacidade ao Impacto - Transição Dúctil-Frágil

Fatores que afetam a transição Dúctil-Frágil em aços

## 3- Tamanho de grão Austenítico:

A redução no tamanho de grão ASTM resulta em decréscimo da temperatura de transição.

## 4- Direção de conformação:

Corpos de prova retirados na direção de conformação (laminação) desenvolvem maior energia absorvida ao impacto charpy.

## 5- Fragilização ao Revenido:

Fenômenos de fragilização ao revenido levam à redução na energia absorvida em ensaio de impacto charpy.

## 6- Microestrutura:

Aços com microestrutura Martensítica revenida apresentam, em geral, melhor combinação entre a energia absorvida e a resistência à tração.