

BLOQUE III.- CARACTERIZACIÓN Y PROPIEDADES

Tema 7.- Ensayos mecánicos

* William F. Smith
"Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales".
Tercera Edición. Ed. Mc-Graw Hill

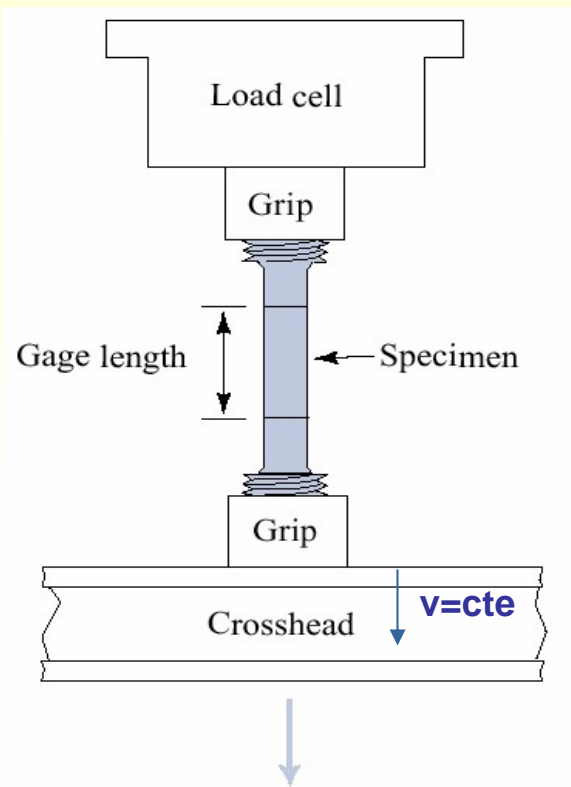
* James F. Shackelford
"Introducción a la Ciencia de Materiales para Ingenieros".
Cuarta edición. Ed. Prentice Hall (1998)

- Conocerla importancia de la evaluación de las propiedades mecánicas
- Explicar y entender que es tensión-deformación
 - Deformación elástica y plástica
 - Coeficiente de Poisson
 - Tensión de cizalladura
- Describir el ensayo de tracción
 - Curva de tensión-deformación nominal o ingenieríl
 - Curva de tensión-deformación real
- Describir el ensayo de compresión
- Conocer el ensayo a flexión
- Explicar el ensayo de cizalladura
- Explicar el ensayo de dureza

Ensayo de tracción uniaxial

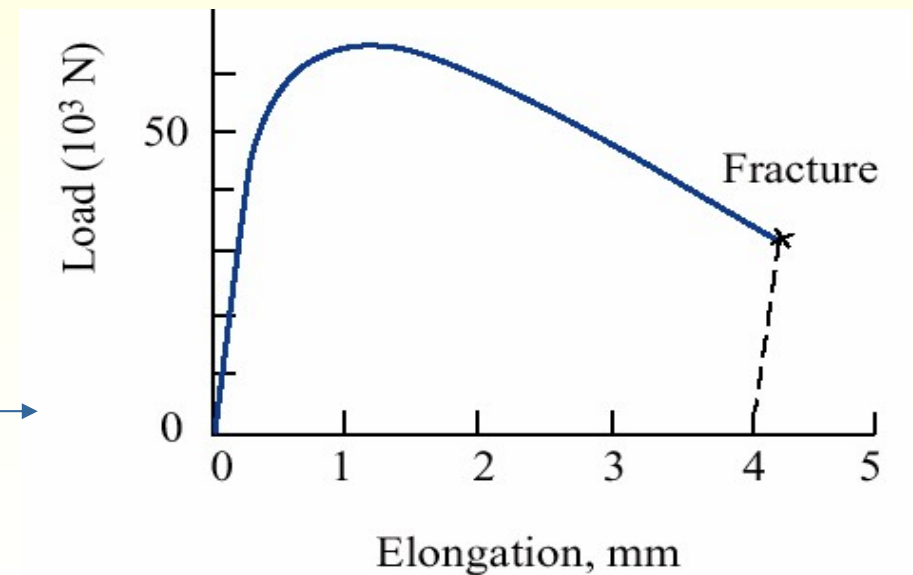
Los **materiales**, bajo esfuerzos de tracción o compresión, se deforman primero **elásticamente** (**deformación recuperable**) y luego **plásticamente** (**deformación permanente**)

Probeta sometida a una fuerza de tensión uniaxial a velocidad constante



Resultado
del ensayo

Diagrama de tensión-deformación

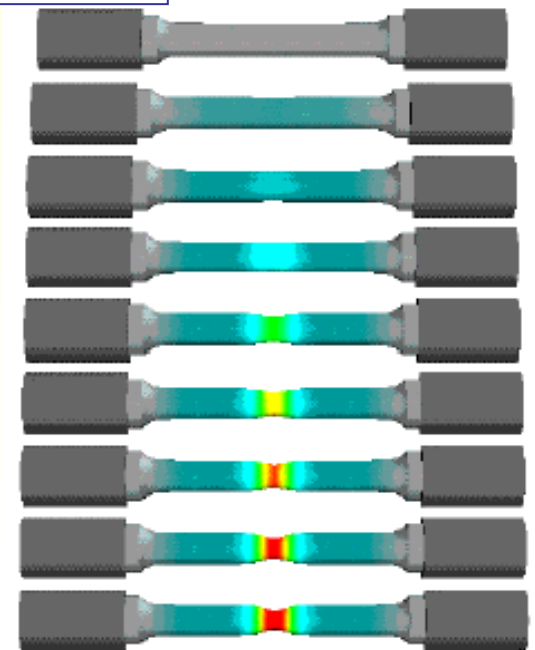
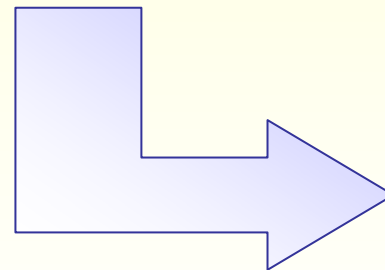


Ensayo más utilizado: **NORMALIZADO**

Maquina de Tracción

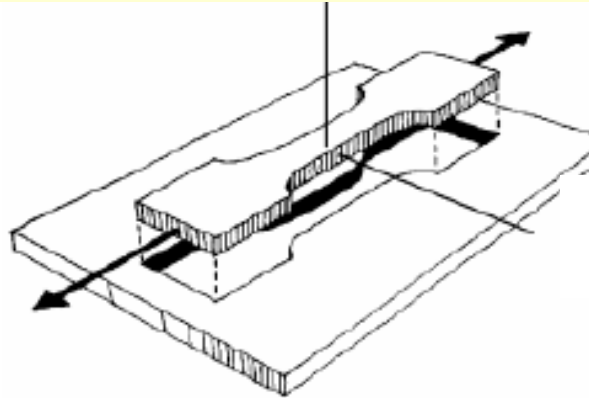


Evolución de las probetas
rectangulares durante el
ensayo de tracción
(la zona central es la que
soporta mayor deformación,
y por esa zona romperá)

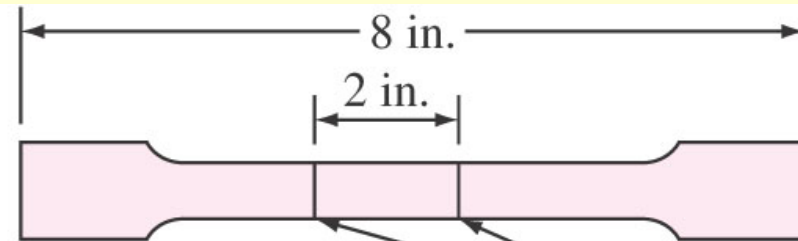


Geometría de las probetas: Normalizadas

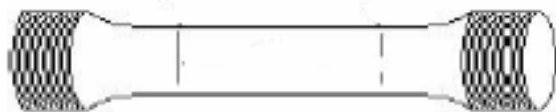
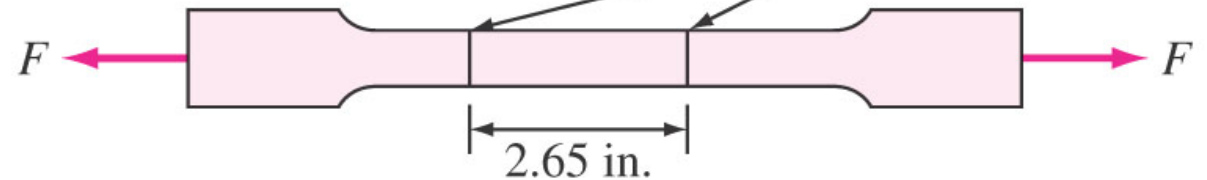
Rectangulares



Muestra no tensionada

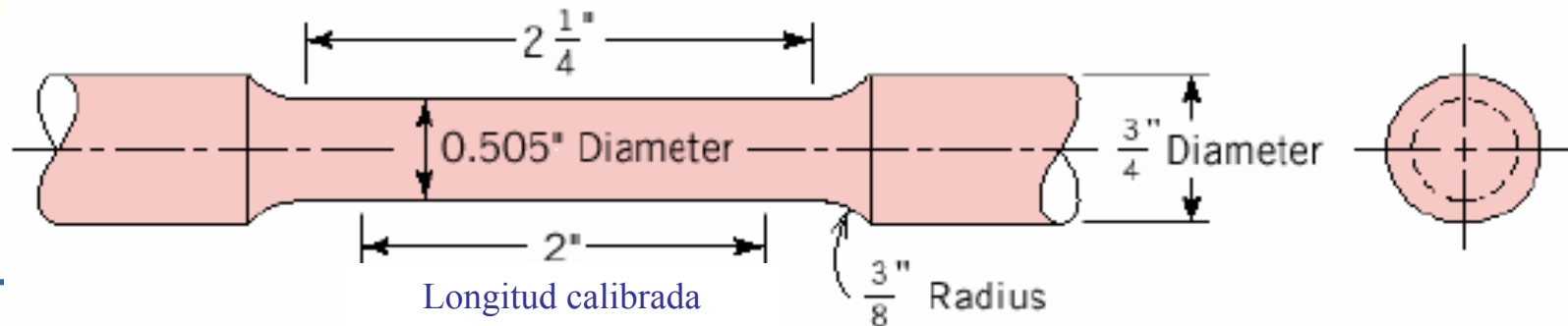


Muestra tensionada

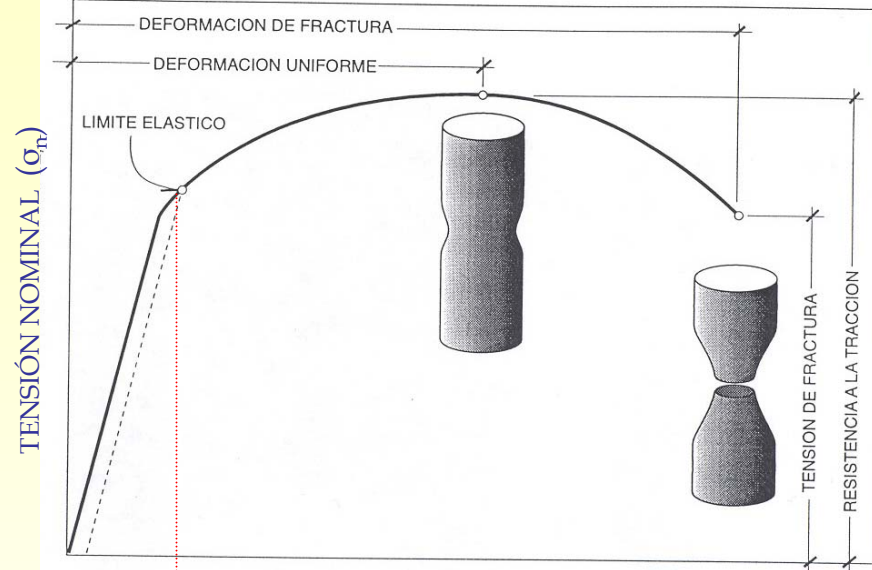


Cilíndricas

Reduced section



Curva tensión-deformación



Zona Elástica

Zona Plástica

DEFORMACIÓN NOMINAL (ϵ_n)

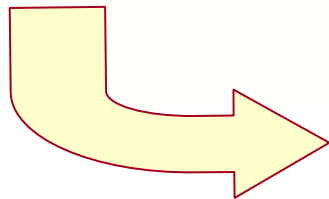
Deformación ELÁSTICA

Linealidad
Deformación No permanente

Deformación PLÁSTICA

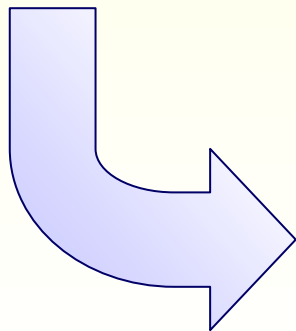
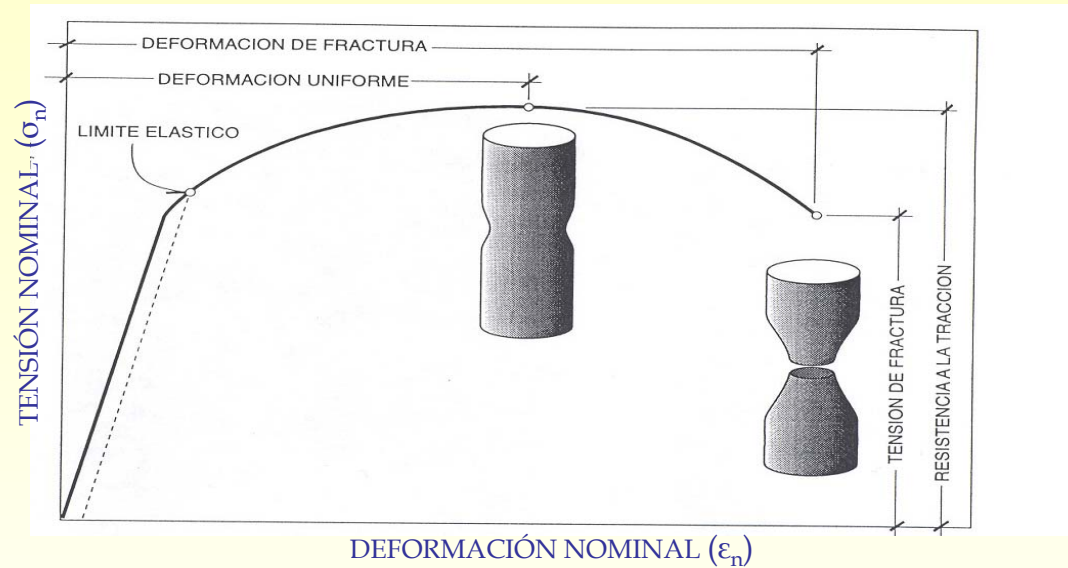
Al cesar la tensión sobre una probeta, la probeta experimenta un cambio permanente respecto a sus dimensiones originales.

Los átomos son desplazados permanentemente de sus posiciones originales y toman nuevas posiciones

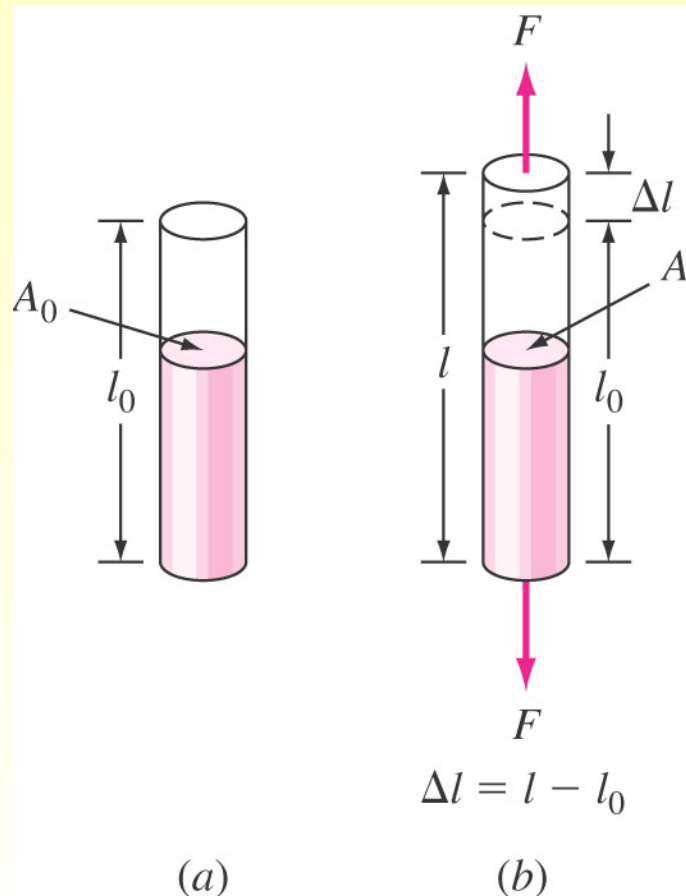


La posibilidad de deformación plástica del acero posibilita que partes del automóvil (parachoques, cubiertas y puertas) se puedan troquelar mecánicamente sin romperse el metal

Parámetros: \Rightarrow Curva tensión-deformación



- Módulo de Young o Módulo de Elasticidad (E)
- Límite elástico (σ_y) a un 0.2%
- Resistencia máxima a la tracción
- Tensión de fractura
- Deformación plástica o ductilidad
- Resiliencia o Energía absorbida



1638: Galileo Galilei

La carga de fractura de una barra en tensión es proporcional a A_0 e independiente de L_0

Tensión/esfuerzo nominal (σ_n):

$$\sigma_n = \frac{F}{A_0}$$

Unidades del S.I.:

$$\text{N/m}^2 = \text{Pa}$$

$$1 \text{ N/mm}^2 = 1 \text{ MPa}$$

Sistema anglosajón: $\text{psi} = \text{lb/pul}^2$

$$1 \text{ psi} = 6,89 \cdot 10^3 \text{ Pa}$$

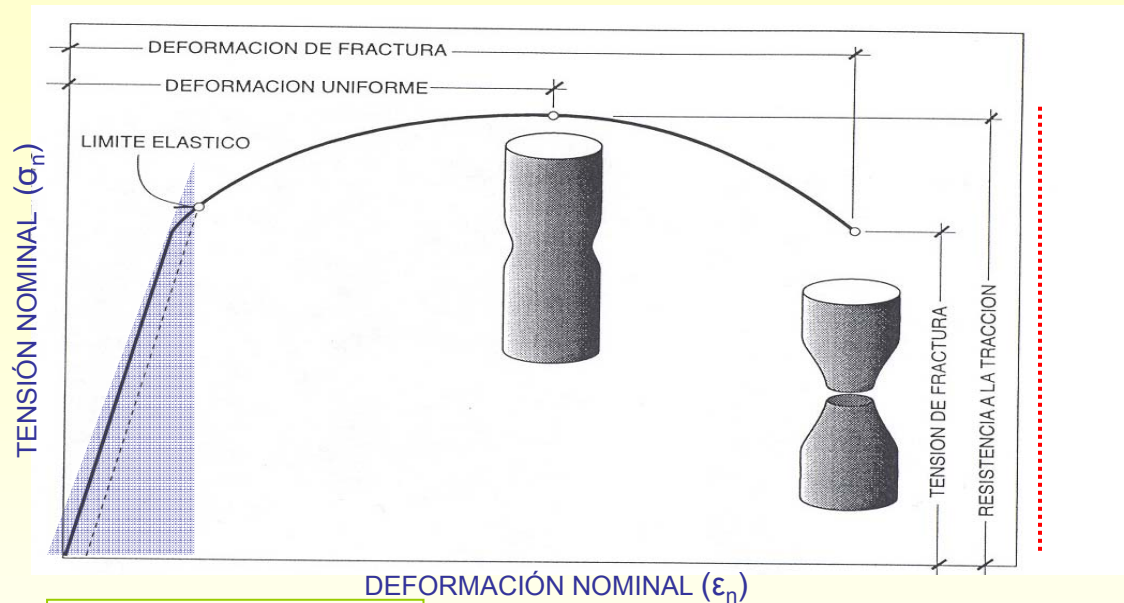
Deformación nominal (ε):

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

S.I.: m/m (adimensional)

$$\% \varepsilon = (\Delta L / L_0) \times 100$$

Curva tensión-deformación



Zona Elástica

Deformación elástica $\sigma < \sigma_y$

I) Zona Lineal

$$\sigma = E \epsilon$$

Ley de Hooke

E: Módulo de Elasticidad ó de Young:

rigidez material o resistencia a la deformación elástica (no permanente)

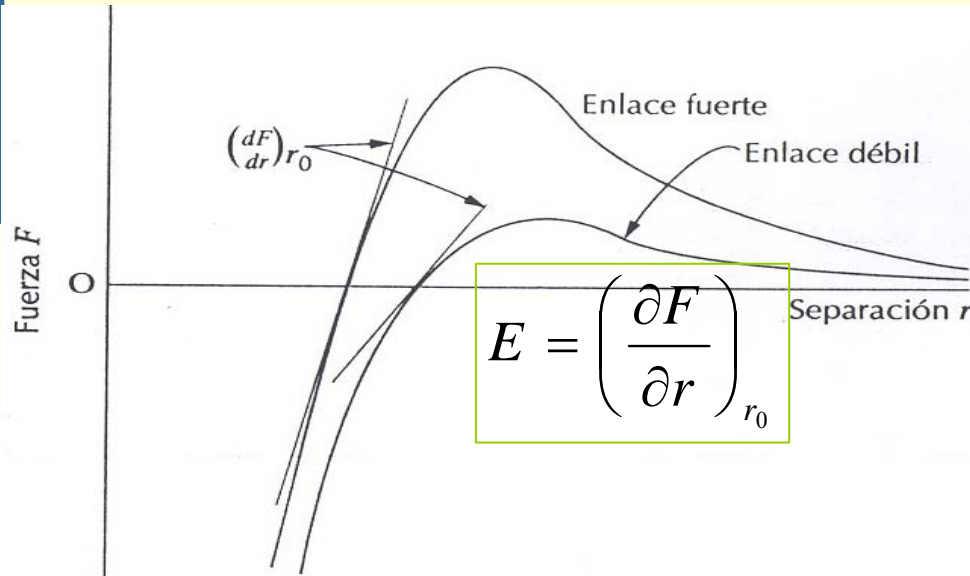
Al retirar carga/tensión \Rightarrow pieza recupera forma original (No \exists deformación permanente)

Deformación elástica: escala atómica

$E = f(\text{fuerza de enlace}) \Rightarrow \text{si } \uparrow \text{ Fuerza de enlace entre átomos } \Rightarrow \uparrow E$

↳ Mecanismo asociado a la def.

Elástica = Relajación enlaces.



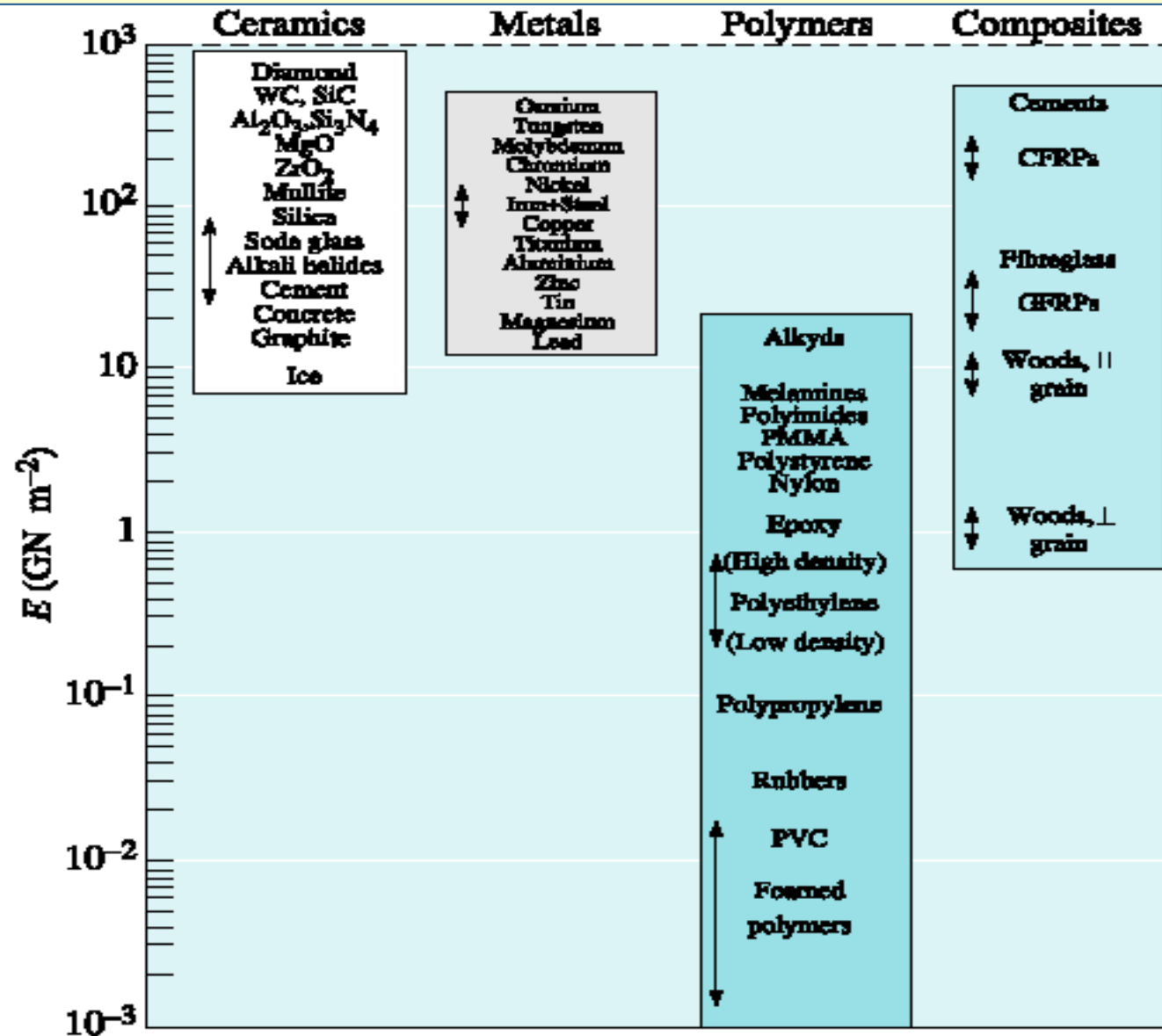
DATA FOR YOUNG'S MODULUS, E

Material	$E/\text{GN m}^{-2}$	Material	$E/\text{GN m}^{-2}$
Diamond	1000	Niobium and alloys	80-110
Tungsten carbide, WC	450-650	Silicon	107
Osmium	551	Zirconium and alloys	96
Cobalt/tungsten carbide cermets	400-530	Silica glass, SiO ₂ (quartz)	94
Borides of Ti, Zr, Hf	500	Zinc and alloys	43-96
Silicon carbide, SiC	450	Gold	82
Boron	441	Calcite (marble, limestone)	81
Tungsten	406	Aluminium	69
Alumina, Al ₂ O ₃	390	Aluminium and alloys	69-79
Beryllia, BeO	380	Silver	76
Titanium carbide, TiC	379	Soda glass	69
Molybdenum and alloys	320-365	Alkali halides (NaCl, LiF, etc.)	15-68
Tantalum carbide, TaC		Granite (Westerly granite)	62
Niobium carbide, NbC		Tin and alloys	41-53
Silicon nitride, Si ₃ N ₄		Concrete, cement	45-50
Chromium	289	Fibreglass (glass-fibre/epoxy)	35-45
Beryllium and alloys	200-289	Magnesium and alloys	41-45
Magnesia, MgO	250	GFRP	7-45
Cobalt and alloys	200-248	Calcite (marble, limestone)	31
Zirconia, ZrO	160-241	Graphite	27
Nickel	214	Alkyds	20
Nickel alloys	130-234	Shale (oil shale)	18
CFRP	70-200	Common woods, to grain	9-16
Iron	196	Lead and alloys	14
Iron-based superalloys	193-214	Ice, H ₂ O	9.1
Ferritic steels, low-alloy steels	200-207	Melamines	6-7
Stainless austenitic steels	190-200	Polyimides	3-5
Mild steel	196	Polyesters	1-5
Cast irons	170-190	Acrylics	1.6-3.4
Tantalum and alloys	150-186	Nylon	2-4
Platinum	172	PMMA	3.4
Uranium	172	Polystyrene	3-3.4
Boron/epoxy composites	125	Polycarbonate	2.6
Copper	124	Epoxies	3
Copper alloys	120-150	Common woods, ⊥ to grain	0.6-1.0
Mullite	145	Polypropylene	0.9
Zircon, ZrO ₂	145	Polyethylene, high density	0.7
Vanadium	130	Foamed polyurethane	0.01-0.06
Titanium	116	Polyethylene, low density	0.2
Titanium alloys	80-130	Rubbers	0.01-0.1
Palladium	124	PVC	0.003-0.01
Brasses and bronzes	103-124	Foamed polymers	0.001-0.01

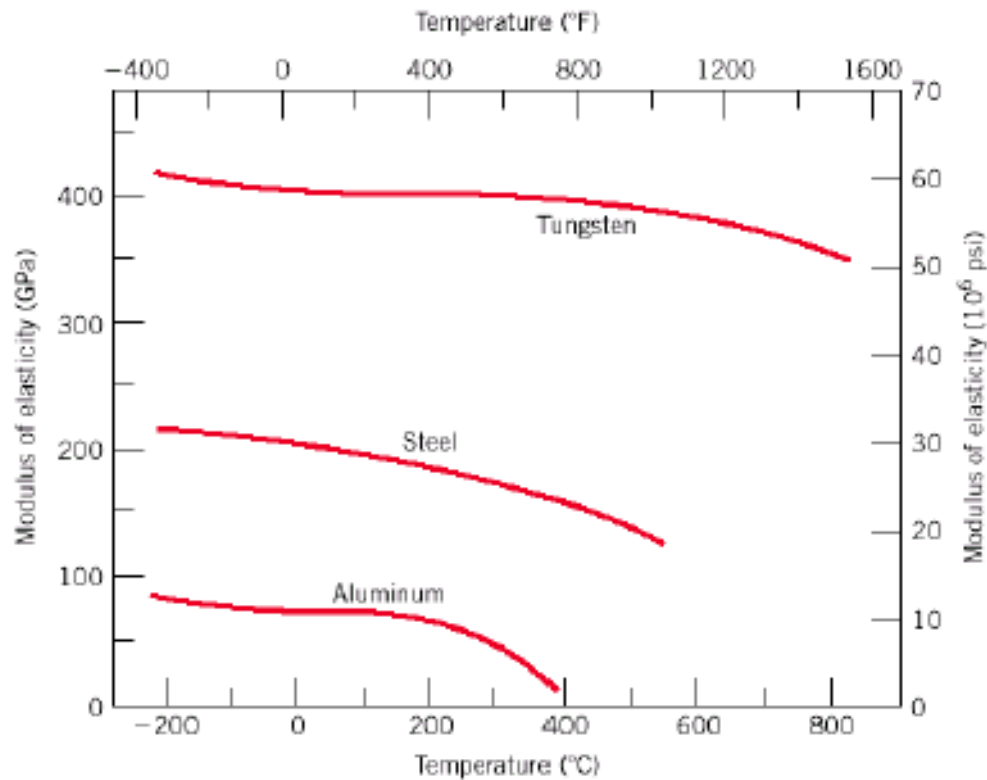
En general:

$E_{\text{cerámicos (cov. y/o ionic)}} > E_{\text{metales (met)}} > E_{\text{polímeros (secund entre cadenas)}}$

Módulo de elasticidad



Curva Tensión-deformación: E: F(temperatura)



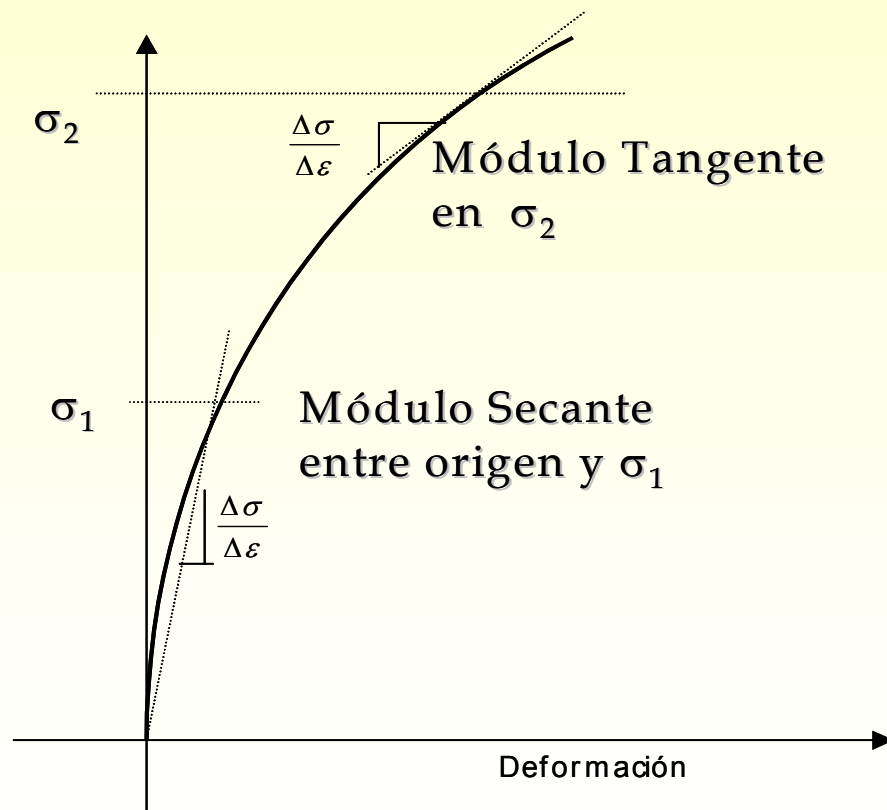
Al aumentar la Temp \Rightarrow
debilitamiento de los enlaces
(\downarrow rigidez estructura)



$\downarrow\downarrow$ del Mod. Young

Deformación elástica $\sigma < \sigma_y$

2) No lineal: Se produce en algunos materiales (algunos polímeros, hormigón, fundición gris, etc...)

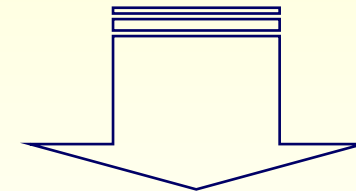


Parámetros: curva tensión-deformación

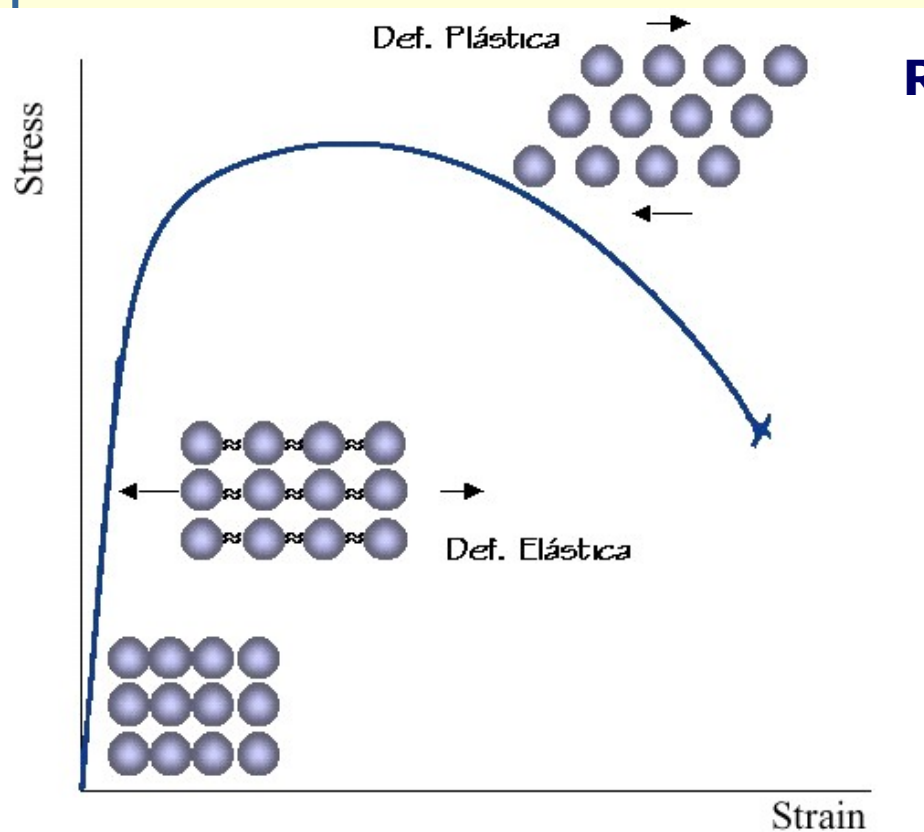
Límite elástico (σ_y) : σ a partir de la cual se produce **deformación permanente**

ϵ deja de ser proporcional a σ

Ruptura y formación de nuevos enlaces



No recupera la forma inicial

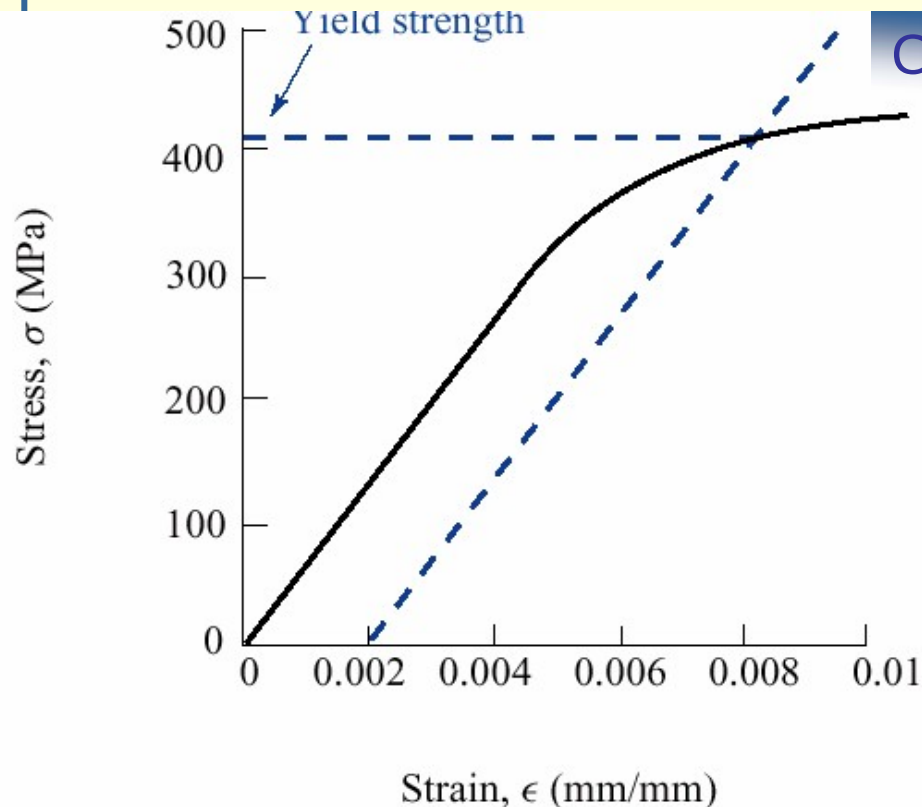


Curva tensión-deformación: Limite elástico (I)

Límite elástico (σ_y) : σ a partir de la cual se produce deformación permanente

para $F \neq 0 \Rightarrow \varepsilon$ (permanente) = ε [elast+plást]

para $F = 0 \varepsilon$ (permanente) = ε [plást]



Criterios de Cálculo del Límite Elástico (I)

Dependiendo de la deformación del material se adoptan \neq criterios:

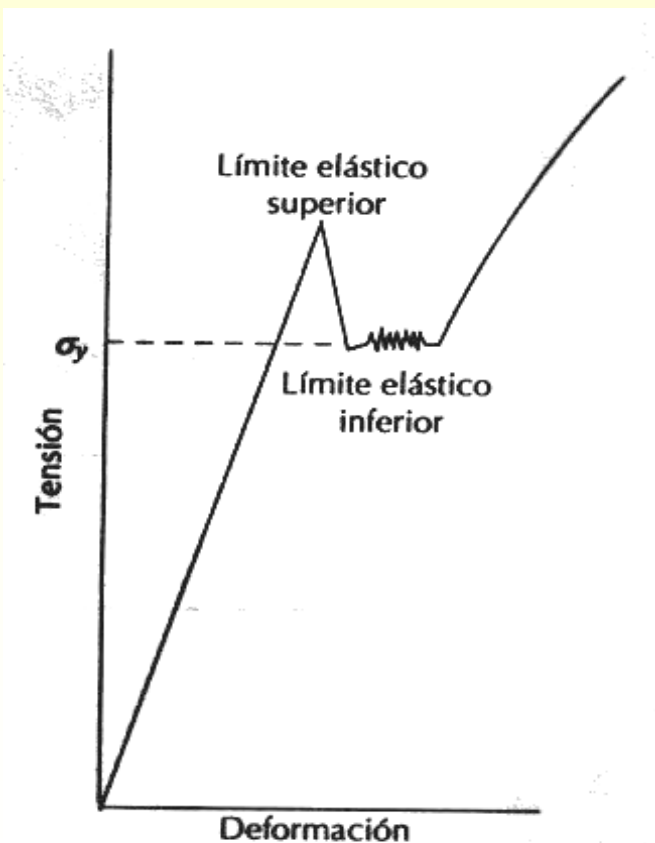
El + admitido en **metálicos** \approx **0,2% de la ε elástica**



Límite Elástico Convencional

Curva tensión-deformación: Limite elástico (I)

Criterios de Cálculo del Límite Elástico (II)

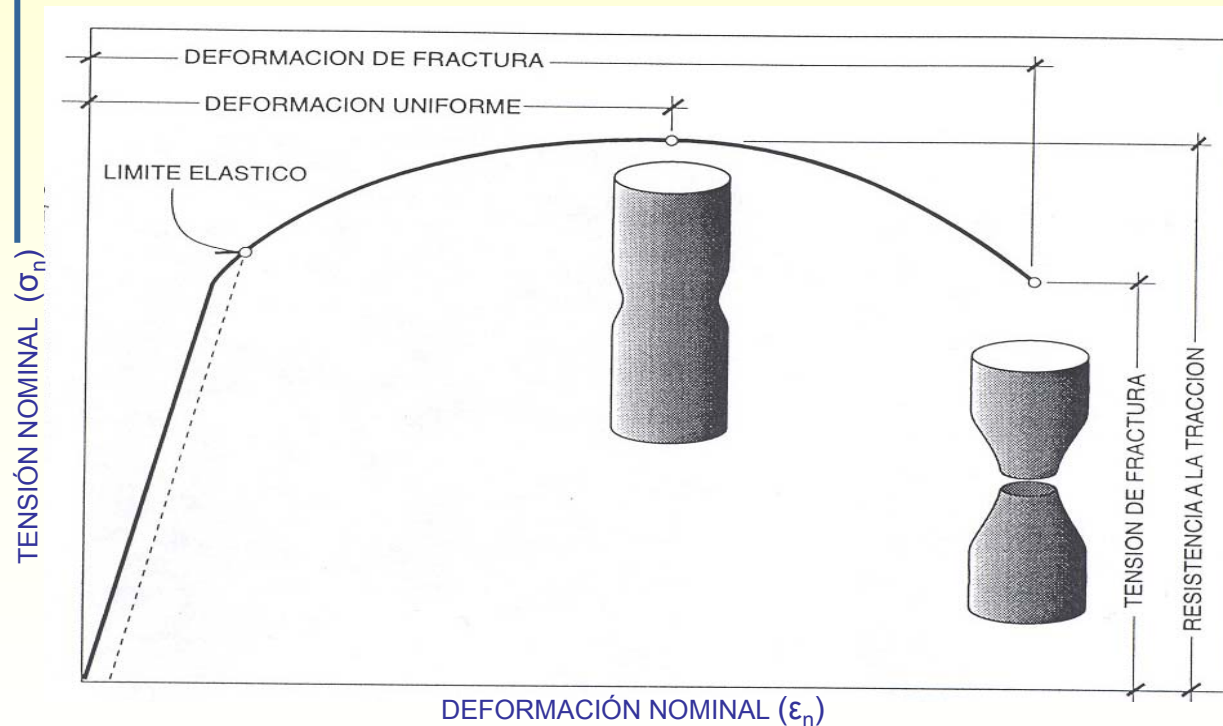


Fenómeno de discontinuidad en el punto de fluencia: (Ej: aceros, algunos polímeros, etc...)

$$\sigma_y = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$

Curva tensión-deformación: Zona plástica

Resistencia a la tracción: máxima tensión nominal que soporta la probeta a tracción



Resistencia de rotura: tensión que soporta el material en el pto de rotura.

Curva tensión-deformación: Ductilidad

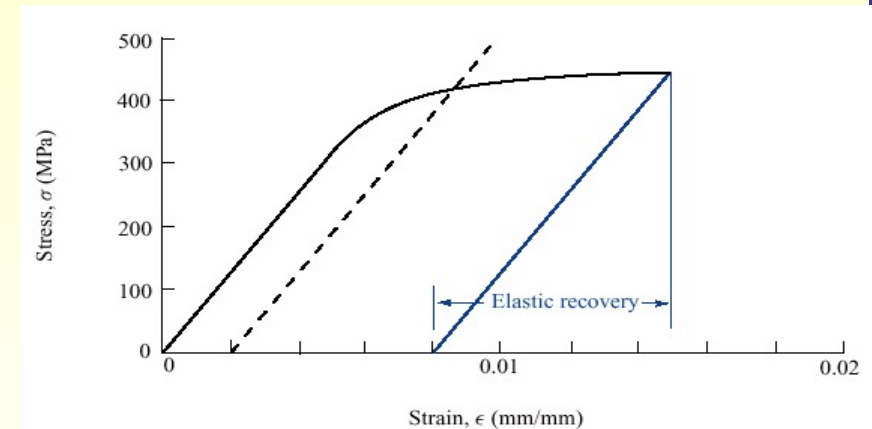
Medida del **grado** de **deformación plástica** que puede ser soportada por un material antes de la rotura

- 1. Deformación porcentual total:**
aumento porcentual de la deformación que experimenta la probeta

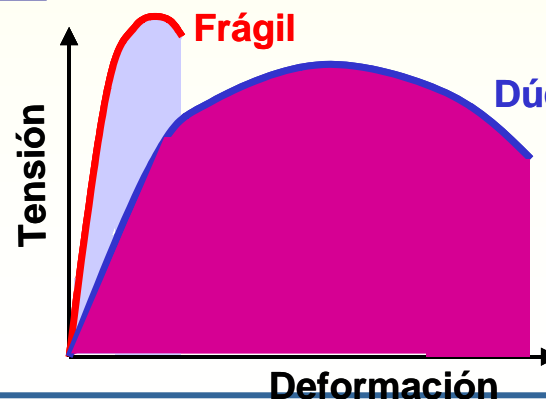
$$\varepsilon(\%) = \frac{l_f - l_0}{l_0} \times 100$$

- 2. % Reducción área (estricción):**

$$AR(\%) = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100$$

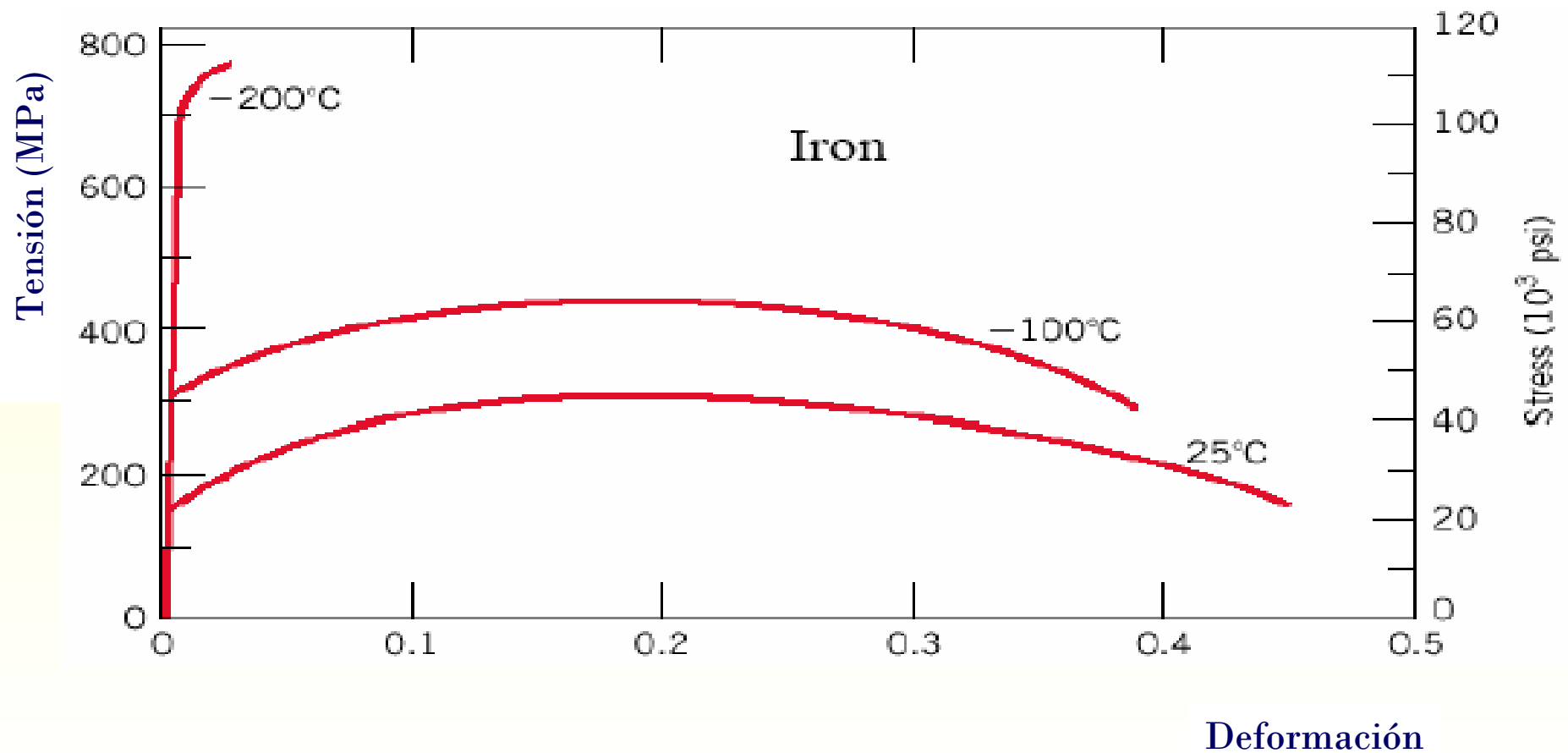


- 3. Área bajo la curva**



Materiales que son **frágiles** presentan poca **deformación plástica**
(Ej: **cerámicas y vidrios**)

Ductilidad - Temperatura

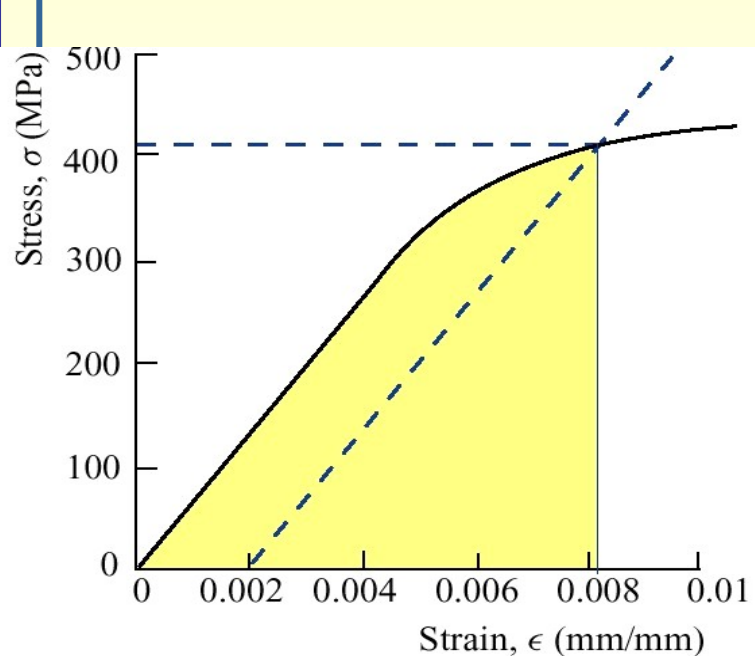


Mayor temperatura: ⇒ mayor ductilidad

Curva tensión-deformación: Resiliencia

Resiliencia.- Capacidad de un material de absorber $E_{\text{elástica}}$ cuando es deformado hasta alcanzar el límite elástico \Rightarrow **Área bajo la curva**

Modulo de resiliencia, U_r .- $E_{\text{deformación}}$ por unidad de V necesaria para deformar un material hasta límite elástico.



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

Integrando, si la región elástica es lineal

$$U_r = \frac{1}{2} \sigma_y \epsilon_y$$

$$\epsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} \quad (\text{Ley de Hooke})$$

Materiales con \uparrow **Resiliencia**: $\uparrow \sigma_y \downarrow E$
APLICACIÓN: diferentes **aleaciones para fabricar muelles**

$$U_r = \frac{1}{2} \frac{\sigma_y^2}{E}$$

Curvas tensión-deformación verdaderas (II)

Tensión real o verdadera (σ_r):

$$\sigma_r = \frac{F}{A} = \frac{F}{A_0} \frac{A_0}{A} = \sigma_n \frac{A_0}{A}$$

Como $\Delta V = 0 \Rightarrow$ se cumple que $V = A_0 \times L_0 = \text{cte} = A_{\text{instantáneo}} \times L_{\text{instantáneo}}$

$$\sigma_r = \sigma_n \frac{L}{L_0} = \sigma_n (1 + \varepsilon_n)$$

(hasta comienzo estricción)

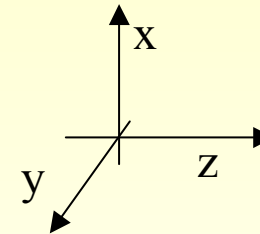
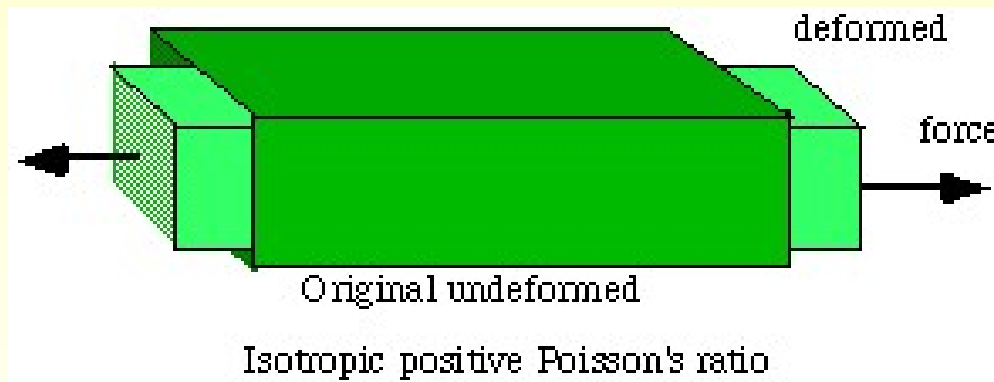
Para ε pequeñas: $\varepsilon_r = \ln(1 + \varepsilon_n) \approx \varepsilon_n$

$$\sigma_r = \sigma_n (1 + \varepsilon_n) \approx \sigma_n$$

Coeficiente de Poisson, ν

Relación entre las deformaciones laterales y axiales

Toda deformación elástica longitudinal \Rightarrow Δ dimensional Lateral



Conocer Comportamiento elástico: ν y **E**

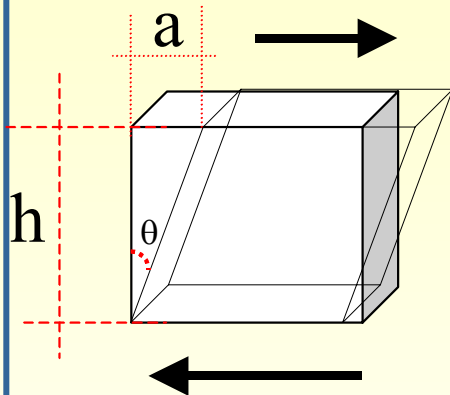
$$\nu = \frac{\varepsilon_{\text{lateral}}}{\varepsilon_{\text{longitudinal}}} = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z}$$

Materiales ideales: $\nu=0.5$

Materiales reales: $\nu=0.2-0.4$

	ν
Caucho natural	0,39-0,49
Polímeros	0,3-0,45
Metales	0,25-0,4

A. Tensión de cizalladura (τ , en Pa):



$$\tau = \frac{P_s}{A_s}$$

P_s = carga aplicada
 A_s = área de la muestra paralela a la dirección de aplicación de la carga

Deformación de cizalladura (γ):

$$\gamma = \frac{a}{h} = \text{tg } \theta$$

a: desplazamiento por cizalla
h: distancia sobre la que actúa la cizalla

Cizalla puramente elástica: $\tau = G \gamma$

G = Mód. De cizalladura o de rigidez o de Coulomb (\rightarrow da idea de la rigidez)

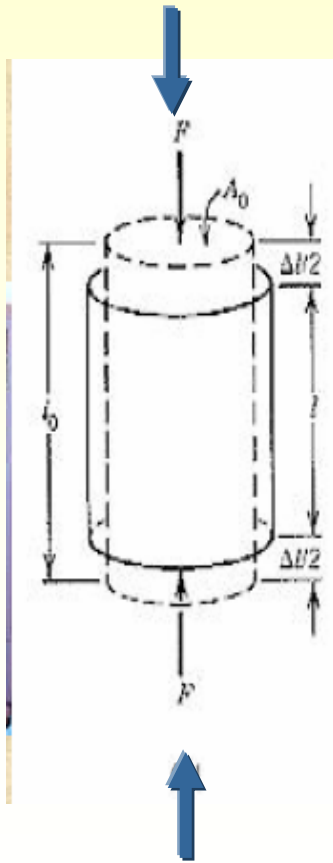
Existe una relación ente módulos: $E = 2 G (1 + \nu)$

ν : modulo de Poisson

Menos habitual que tracción

Se emplea:

- Para conocer comportamiento de material bajo def. permanentes grandes
- Cuando **material** presenta comportamiento **frágil** a tracción. (⇒ Ej: cerámicos y vidrios: No deformación plástica)



Forma de realización:

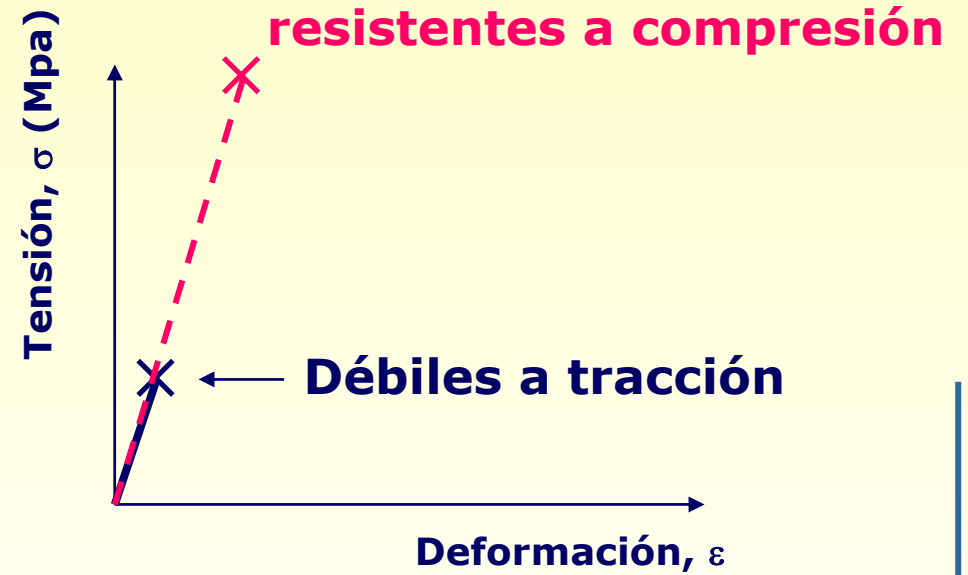
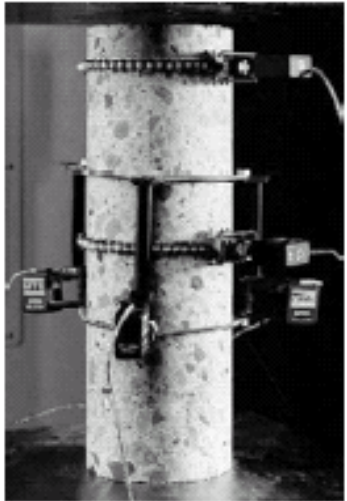
Similar a tracción (ahora F es compresiva) ⇒

$$F_{\text{compresión}} = - F_{\text{tracción}}$$

Carga de compresión ⇒ contracción y deformación lineal negativa

Carga de tracción ⇒ alargamiento y deformación lineal positiva

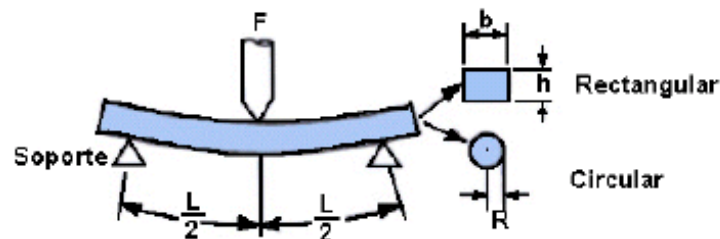
Maquina de ensayo-Probeta de compresión



Ensayo de flexión

Evalúa el comportamiento **esfuerzo-deformación** y la **resistencia a la flexión de materiales frágiles**: \Rightarrow Resistencia a flexión es equivalente al módulo de rotura de los cerámicos

Adecuado: **cerámicos, vidrios** y polímeros



Donde: M = máximo momento de flexión

C = Distancia del centroide a la fibra a analizar

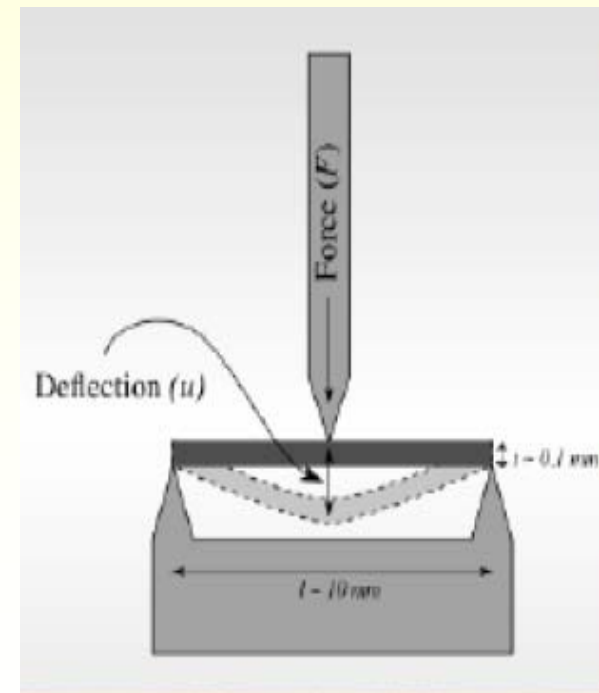
I = momento de inercia

F = carga aplicada

b y h = Ancho y altura de la viga, R = Radio de la viga

Probeta	M	c	I	σ
Rectangular	$\frac{FL}{4}$	$\frac{h}{2}$	$\frac{bh^3}{12}$	$\frac{3FL}{2bh^2}$
Circular	$\frac{FL}{4}$	R	$\frac{\pi R^4}{4}$	$\frac{FL}{\pi R^3}$

Esquema del ensayo de flexión en tres puntos



Resistencia superficial que presenta un material a la deformación plástica localizada.

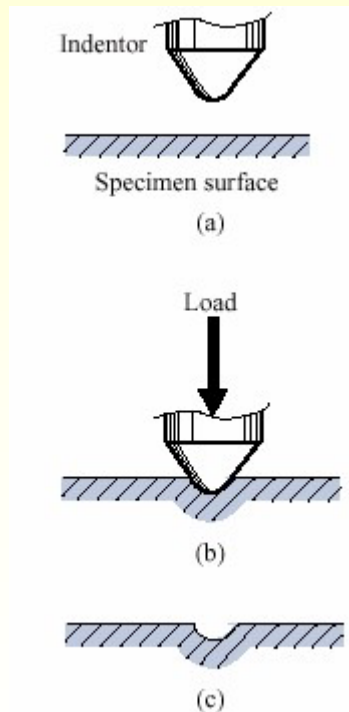
Dureza \Leftrightarrow relacionada con resistencia a la tracción y límite elástico

Se determina forzando con un **penetrador** sobre su superficie

“Medición de huella realizada con un penetrador”

Clasificación = f (carga y penetrador)

Bola, pirámide o
cono (material
muy duro)



- A.- Ensayo Brinell (HBW)
- B.- Ensayo Rockwell (HR)
- C.- Ensayo Vickers (HV)
- D.- Ensayo de dureza superficial: Vickers y Rockwell
- E.- Ensayo de microdureza: Vickers.

Resistencia a la abrasión

1. Escala de Mohs (1882)

Aplicación en geología o mineralogía

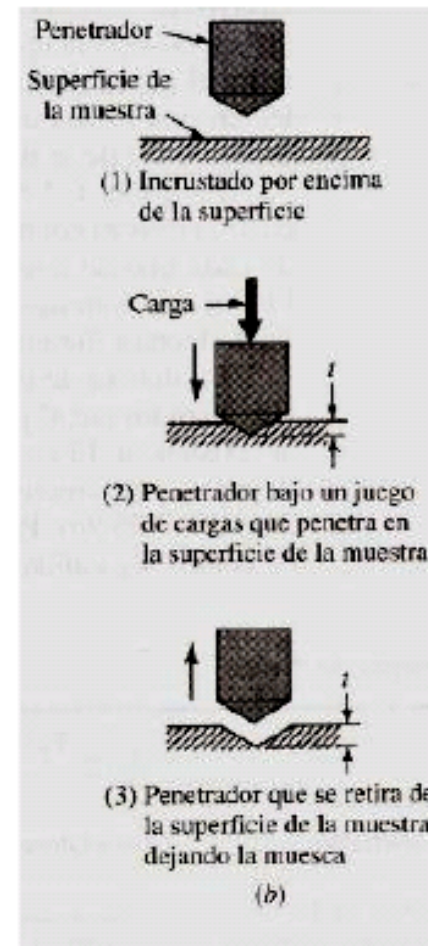
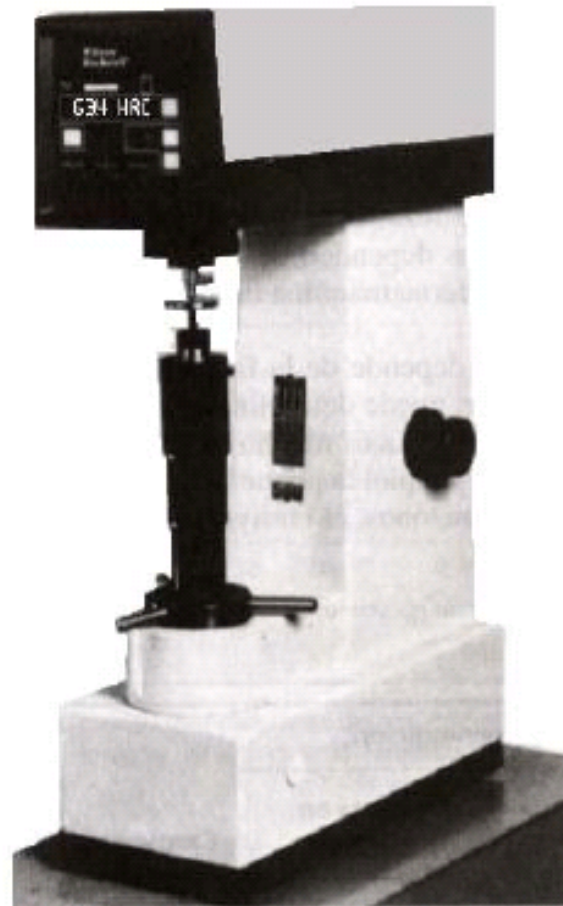
Cada material es rayado por los de escala superior



Material	Escala
Talco	1
Yeso	2
Caliza	3
Fluorita	4
Apatita	5
Feldespatos	6
Cuarzo	7
Topacio	8
Safiro (corindón)	9
Diamante	10

2.- Nuevos Durómetros especialmente diseñados para la determinación exacta/precisa de la dureza

Equipo moderno



Dureza en polímeros

Dureza en cauchos

Shore A



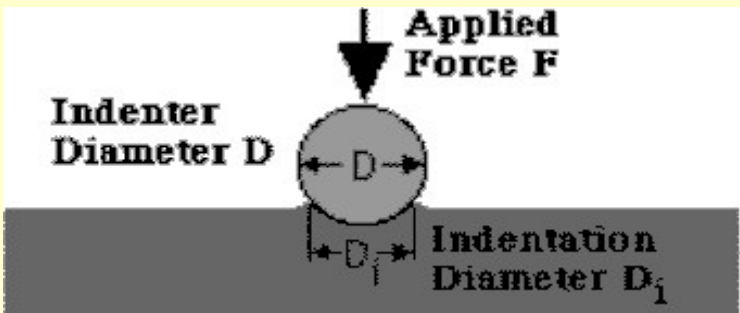
Shore D



Microdureza y nano dureza



A.- Dureza Brinell (HBW)



$$H = \frac{P}{S} = \frac{P}{\pi \frac{D}{2} (D - \sqrt{D^2 - D_i^2})}$$

P= Peso aplicado en kg

S= Superficie del casquete esférico en mm²

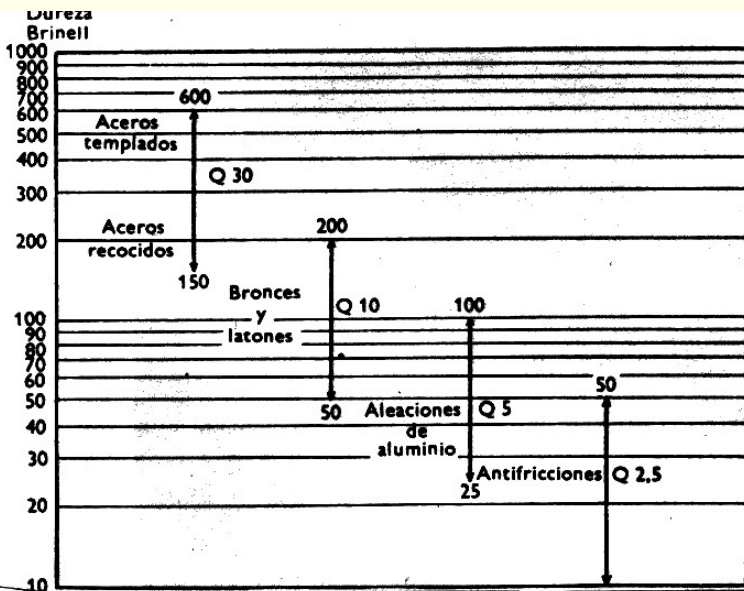
D= Diámetro de la bola en mm (de carburo de W)

Di= Diámetro del casquete esférico.

$$\text{Factor de carga} = Q = \frac{P}{D^2} = \text{cte}$$

Bola de acero duro/carburo de W (φ=10 mm)

Se oprime contra la superficie del metal y se mide el diámetro de la impresión, generalmente de 2 a 6 mm)



P = carga de ensayo; D= Ø de bola

Para espesores pequeños (chapones) ⇒

D ↓ (5, 2.5, 1.25 y 0.625 mm)

Diámetro Bola D mm	Factor de carga Q			
	30	10	5	2,5
	Cargas en kg			
10	3000	1000	500	250
5	750	250	125	62,5
2,5	187,5	62,5	322	15,6
125	46,9	15,6	7,81	3,91
0,625	11,7	3,91	1,953	0,977

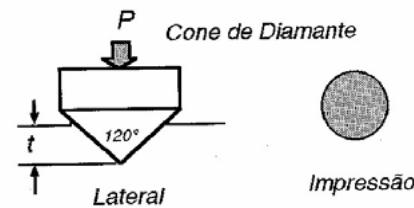
Dureza Rockwell (HR)

Medida

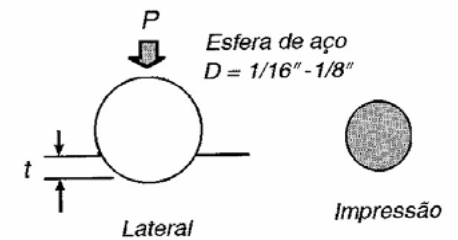
La dureza es función de la **profundidad de penetración.**

- Precarga: 10 Kg
- Carga: 65 - 150 Kg
- Penetradores:
 - 1) bolas de acero templado (\Rightarrow Materiales blandos)
 - 2) cono de diamante tallado con ángulo de 120° (\Rightarrow Materiales duros)

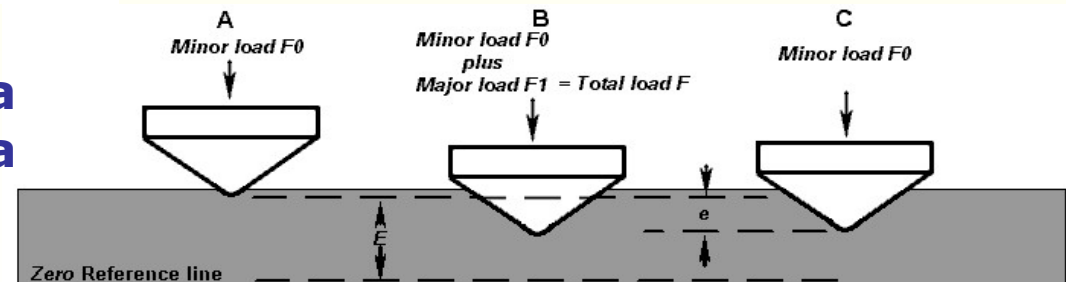
Rockwell (A, C, D)
P (60 kgf, 150 kgf, 100 kgf)



Rockwell (B, F, G)
P (100 kgf, 60 kgf, 150 kgf)



Se aplican 2 cargas sucesivas a un penetrador y se mide la profundidad de La huella, h.



Escala Designación	Tipo de prueba	Tipo y tamaño del penetrador	Carga menor en Kg.	Carga mayor en Kg.	Escala del comparador		Aplicaciones
					Color	Colocación	
A	Normal	Cono de diamante	10	60	Negro	Fuera	Aceros nitrurados, flejes estirados en frío, hojas de afeitar. Carburos metálicos (90 a 98).
D	Normal	Cono de diamante	10	100	Negro	Fuera	Aceros cementados.
E	Normal	Bola de 1/8"	10	100	Rojo	Dentro	Metales blandos, como antifricción y piezas fundidas.
F	Normal	Bola de 1/16"	10	60	Rojo	Dentro	Bronce recocido.
G	Normal	Bola de 1/16"	10	150	Rojo	Dentro	Bronce fosforoso y otros metales.
H	Normal	Bola de 1/8"	10	60	Rojo	Dentro	Metales blandos, con poca homogeneidad, fundición de hierro.
K	Normal	Bola de 1/8"	10	150	Rojo	Dentro	Metales duros, con poca homogeneidad, fundición de hierro.
L	Normal	Bola de 1/4"	10	60	Rojo	Dentro	Metales duros, con poca homogeneidad, fundición de hierro.
M	Normal	Bola de 1/4"	10	100	Rojo	Dentro	Metales duros, con poca homogeneidad, fundición de hierro.
P	Normal	Bola de 1/4"	10	150	Rojo	Dentro	Metales duros, con poca homogeneidad, fundición de hierro.
R	Normal	Bola de 1/2"	10	60	Rojo	Dentro	Metales muy blandos.
S	Normal	Bola de 1/2"	10	100	Rojo	Dentro	Metales muy blandos.
V	Normal	Bola de 1/2"	10	150	Rojo	Dentro	Metales muy blandos.
15-N	Superficial	Cono de diamante	3	15	Rojo	Dentro	Aceros nitrurados, cementados y de herramientas de gran dureza.
30-N	Superficial	Cono de diamante	3	30	Rojo	Dentro	Aceros nitrurados, cementados y de herramientas de gran dureza.
45-N	Superficial	Cono de diamante	3	45	Rojo	Dentro	Aceros nitrurados, cementados y de herramientas de gran dureza.
15-T	Superficial	Bola de 1/16"	3	15	Rojo	Dentro	Bronce, latón y acero blando.
30-T	Superficial	Bola de 1/16"	3	30	Rojo	Dentro	Bronce, latón y acero blando.
45-T	Superficial	Bola de 1/16"	3	45	Rojo	Dentro	Bronce, latón y acero blando.

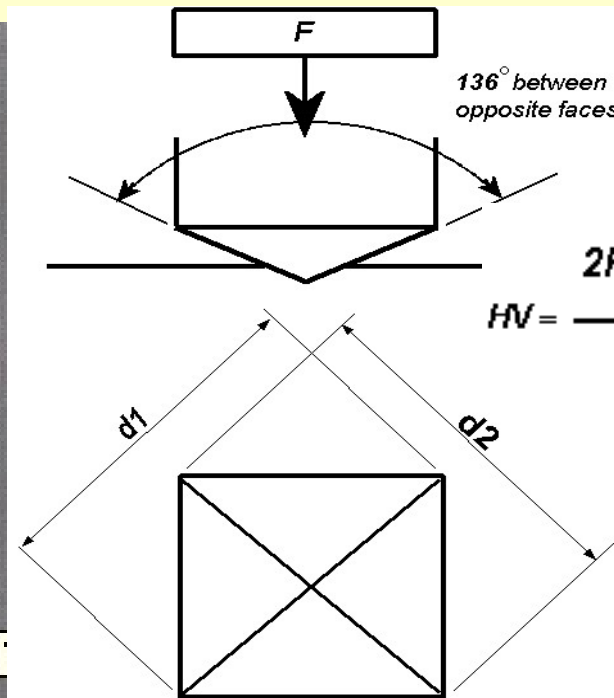
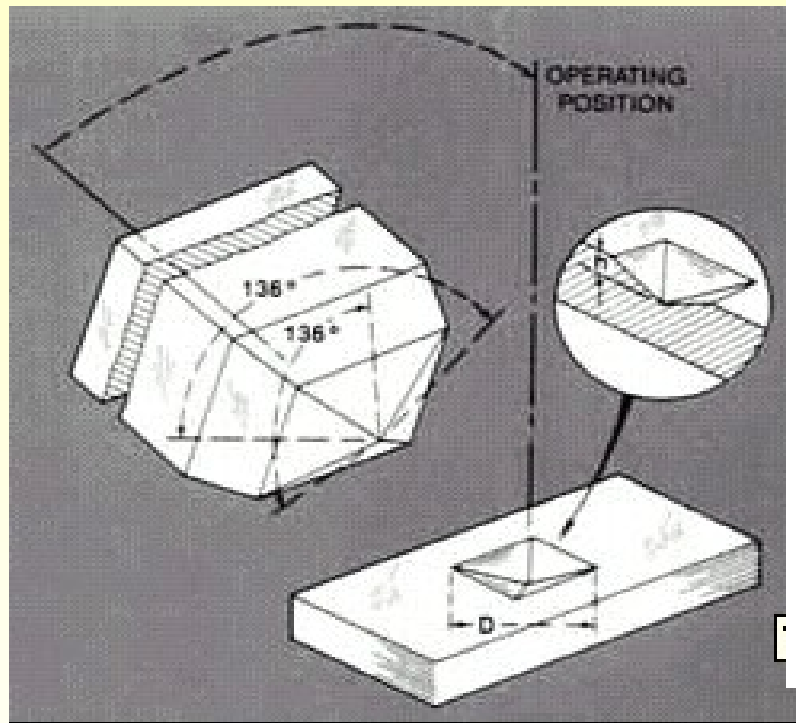
Diferentes escalas en función de carga y penetrador.

Ventajas

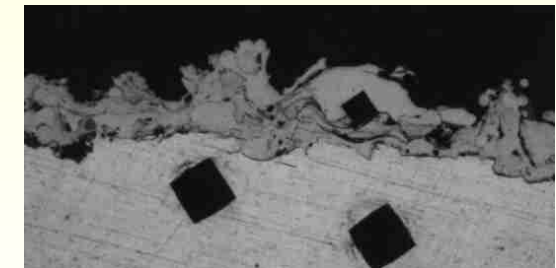
- Rapidez
- Ensayo para todo tipo de materiales.
- Gran precisión ($\pm 0.002\text{mm} \Leftrightarrow \pm 1\text{unidad}$)
- Pueden usarlo personas no cualificadas.

Polímeros

Microdureza Vickers (HV)



$$HV = \frac{2F \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} \quad HV = 1.854 \frac{F}{d^2}$$



Penetrador: **diamante tallado en forma de pirámide cuadrangular con 136° entre caras**

El valor de la dureza es función de la diagonal de la huella = f (área de la pirámide)

HV30 ó HV15 ó HV10.....(HVkgf)

F = Fuerza en kgf [1- 120]kg

d = Media aritmética entre las diagonales d_1 y d_2 en mm.

Tiempo = 10-15 s

Medida: 345 HV30-25 (\approx HVkgf-s)

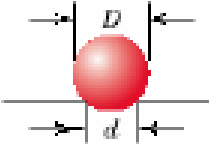




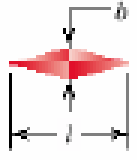
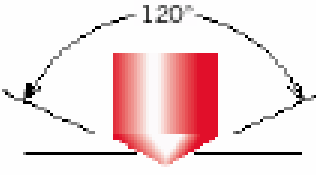



Ventajas Dureza Vickers

- Resultado Universal, el valor es indpte de la carga
- Con un único penetrador se mide una amplia gama de materiales
- Posibilidad de medir piezas delgadas ($\geq 0.05\text{mm}$ de espesor)
- Se puede medir dureza superficial
- Más precisa que la escala Rockwell (1u. Rockwel = 32,5 u. Vickers)

Precauciones para ensayo de dureza (en general)

- Superficie lisa y \perp al eje de aplicación de carga
- Superficie pulida y limpia de óxidos, carburos, grasa,...
- Distancia al borde de pieza $> 4 \phi$ (Brinell o Rockwell)
- Espesor de la probeta $> 2 \phi$ (Brinell o Rockwell)
 > 1.5 veces la diagonal de huella (Vickers)

Table 6.4 Hardness Testing Techniques

Test	Indenter	Shape of Indentation		Load	Formula for Hardness Number ^a
		Side View	Top View		
Brinell	10-mm sphere of steel or tungsten carbide			P	$HB = \frac{2P}{\pi D [D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$
Vickers microhardness	Diamond pyramid			P	$HV = 1.854P/d_1^2$
Knoop microhardness	Diamond pyramid			P	$HK = 14.2P/l^2$
Rockwell and Superficial Rockwell	<ul style="list-style-type: none"> ⎧ Diamond cone ⎧ 1/8, 1/4, 1/2, 1/2 in. diameter steel spheres 	 	 	<ul style="list-style-type: none"> 60 kg 100 kg 150 kg } Rockwell <ul style="list-style-type: none"> 15 kg 30 kg 45 kg } Superficial Rockwell	

Metales

Material	Brinell, HB	Rockwell, HR*
Aluminio recocido	20	
Aleaciones Al endurecidas	90	52B
Hierro colado	175	10C
Bronce	100	60B
Plomo	4	
Acero	150	85B
Titanio alta pureza	200	95B
Zinc	30	

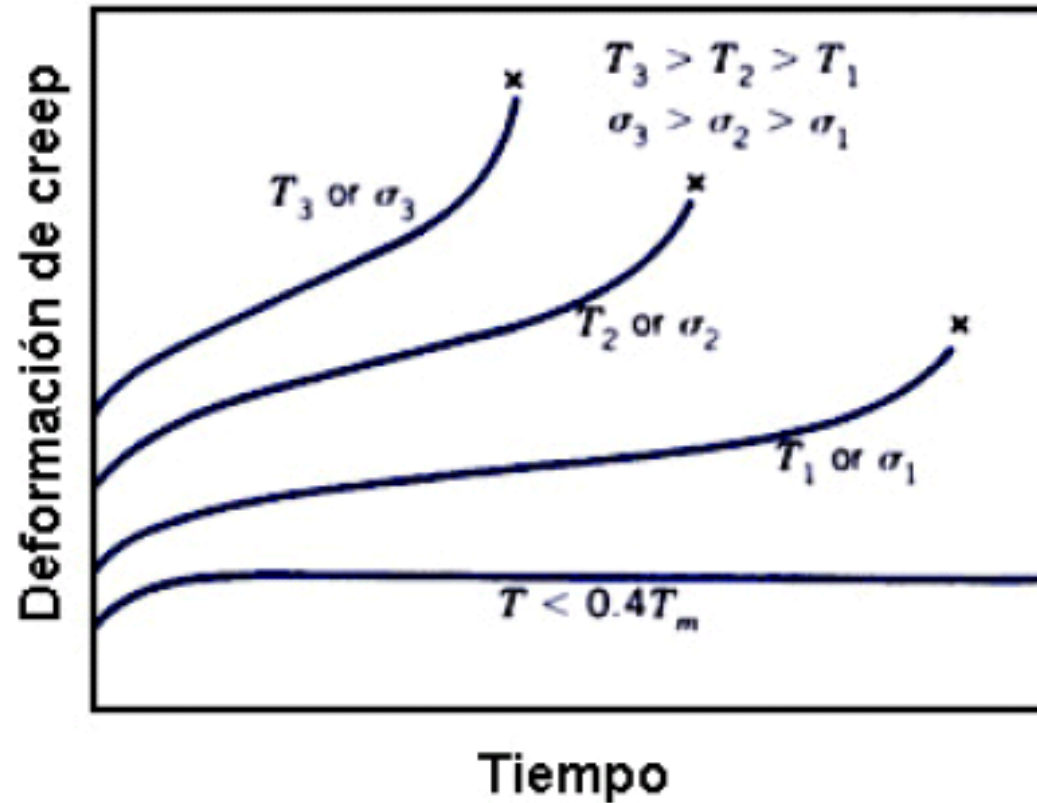
Cerámicas

Material	Vickers, HV	Knoop, HK
Acero herramienta	800	850
Widia (WC-Co)	2000	1400
Alúmina	2200	1500
Carburo de silicio	2600	1900
Carburo de titanio	3200	2500
Nitruro de boro cúbico (BN)	6000	4000
Diamante sintetizado	7000	5000
Diamante natural	10000	8000

Polímeros

Material	Brinell, HB
Nylon	12
Polietileno baja densidad	2
Polietileno alta densidad	4
Polipropileno	7
Poliestireno	20
Cloruro de polivinilo	10

Fluencia y Curvas de Fluencia



Influencia del esfuerzo σ y la temperatura T sobre el comportamiento al creep.

Elastic Solid

- Stress-strain
- What happens when force is removed?
 - Recovery

