

# 9. PROPIEDADES MECÁNICAS EN SÓLIDOS

MATERIALES I

12/13

- Introducción
- Bloque I
  - Teoría Elástica
  - Tensión-deformación
  - Propiedades mecánicas
- Bloque II
  - Desgaste
  - Dureza

# Resistencia de Materiales

- Cantidad de carga que puede soportar el material antes de ceder
- Se determina por medio de ensayos mecánicos ( tensión, compresión, cizalla o torsión)
- Los tratamientos consiguen variar las propiedades mecánicas del material, entre ellas la resistencia mecánica.

3

## Algunos conceptos...

	Características y propiedades	
Ductilidad	Capacidad de un material de sufrir deformación plástica antes de la fractura	Ductility
Dureza <i>Propiedad / Ensayo</i>	Resistencia a la deformación plástica	Hardness
Fatiga	Degradación mecánica de un material sometido a esfuerzos cíclicos o variables	Fatigue
Fluencia	Deformación plástica que sufre un material sometido a carga constante	Creep
Resiliencia	Capacidad de absorber energía en la zona elástica	Resilience
Resistencia (máxima) a la tracción	Esfuerzo correspondiente al máximo en los ensayos de tracción ( $\sigma_E - \epsilon_E$ )	(Ultimate) tensile strength UTS TS
Rigidez	Resistencia a la deformación elástica	Stiffness
Tenacidad	Capacidad de un material de absorber energía en la zona plástica, antes de la fractura	Toughness

4

# Bloque I: TENSIÓN DEFORMACIÓN

## 1. Tensión y deformación en metales

- Cuando se aplica una fuerza sobre un material → **Deformación.**
- Dos tipos de deformación:
  - Elástica: tras aplicar la fuerza recupera las dimensiones iniciales. Los átomos no han ocupado nuevas posiciones
  - Plástica: Tras cesar la carga la deformación no se recupera, los átomos se han desplazado.  
Recordatorio! Las dislocaciones!!

# 1. Tensión y deformación en metales. 1.2. Tensiones

La tensión ingenieril ejercida sobre un sólido será igual a la fuerza que se aplica dividido entre el área aplicada. Debido a esta generación de esfuerzos en áreas

$$\partial\sigma = \frac{\partial F}{\partial A} = \frac{F}{A}$$

A cada superficie le queda definido un vector tensión:

$\sigma_n$  = tensión normal

$T_{xy}$  = tensión Tangencial

7

# 1. Tensión y deformación en metales. 1.3. Deformaciones

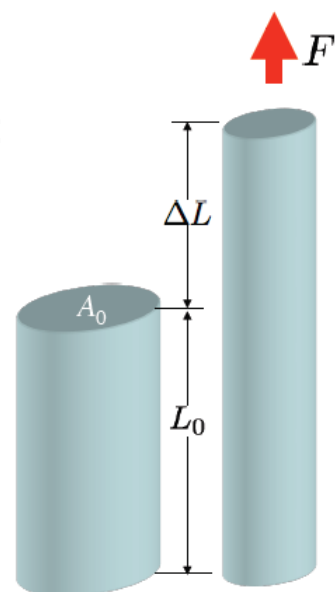
Deformación: variación geometría de un cuerpo debido a la aplicación de la carga:

Longitudinal ( $\epsilon$ )  $\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$

Angular: ( $\gamma$ )  $tg\gamma = \frac{\Delta L}{L_0}$

$$\frac{\gamma_{xy}}{2} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad \frac{\gamma_{xz}}{2} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)$$

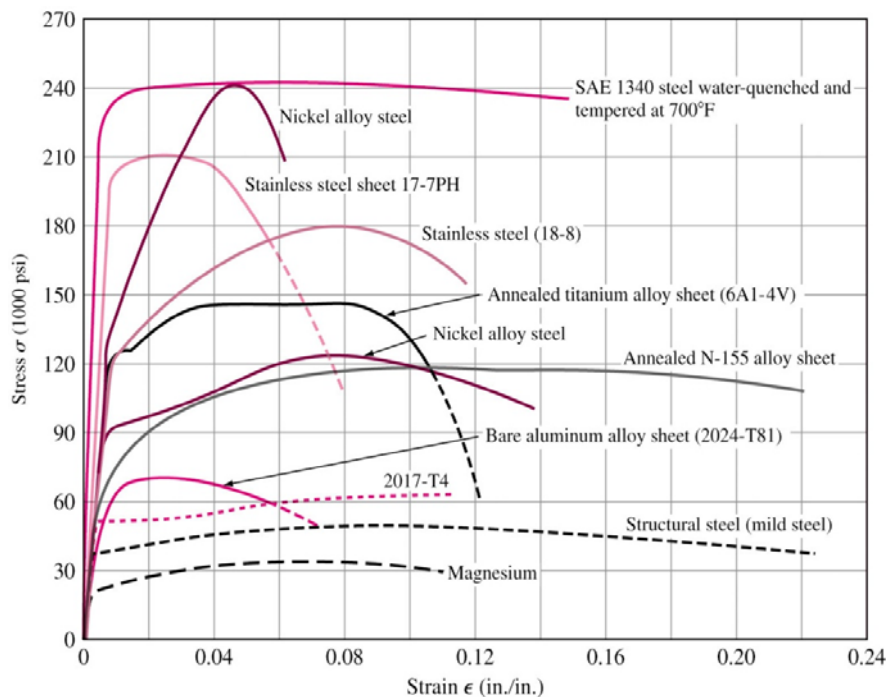
$$\frac{\gamma_{zx}}{2} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)$$



8

# 1. Tensión y deformación en metales.

## 1.3. Deformaciones



9

# 1. Tensión y deformación en metales. 1.4.

## Relación Tensión-Deformación

- ECUACIONES CONSTITUTIVAS: Ley de Hooke.
- Estado uniaxial:  $\sigma_{xx}$

$$\epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E}$$

$$\epsilon_y = -\frac{\nu}{E} \sigma = \epsilon_z$$

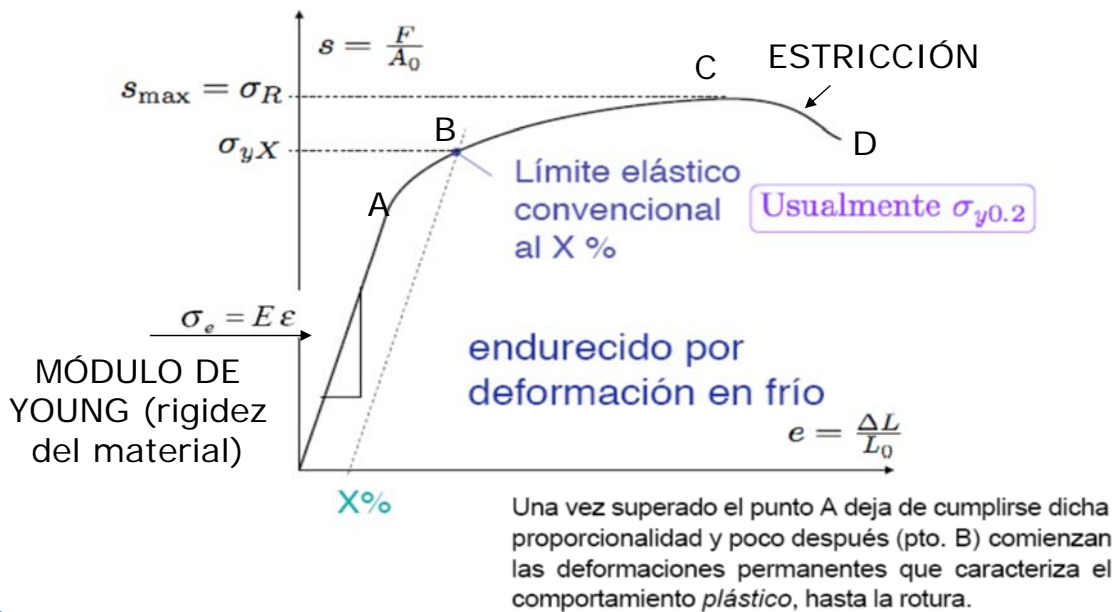
E= MÓDULO ELASTICIDAD (GPa)

$\nu$ = MÓDULO DE POISSON: debido a la generación de deformaciones laterales por la existencia de deformaciones longitudinales

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

10

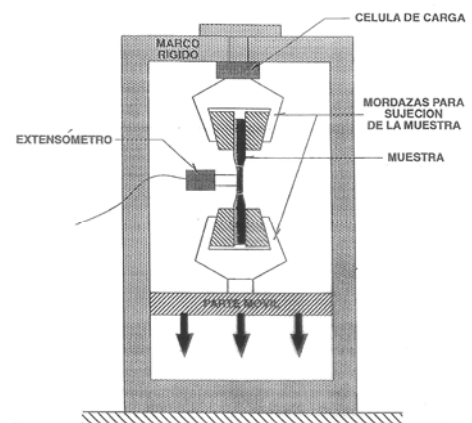
## 2. Relación Tensión-Deformación.



11

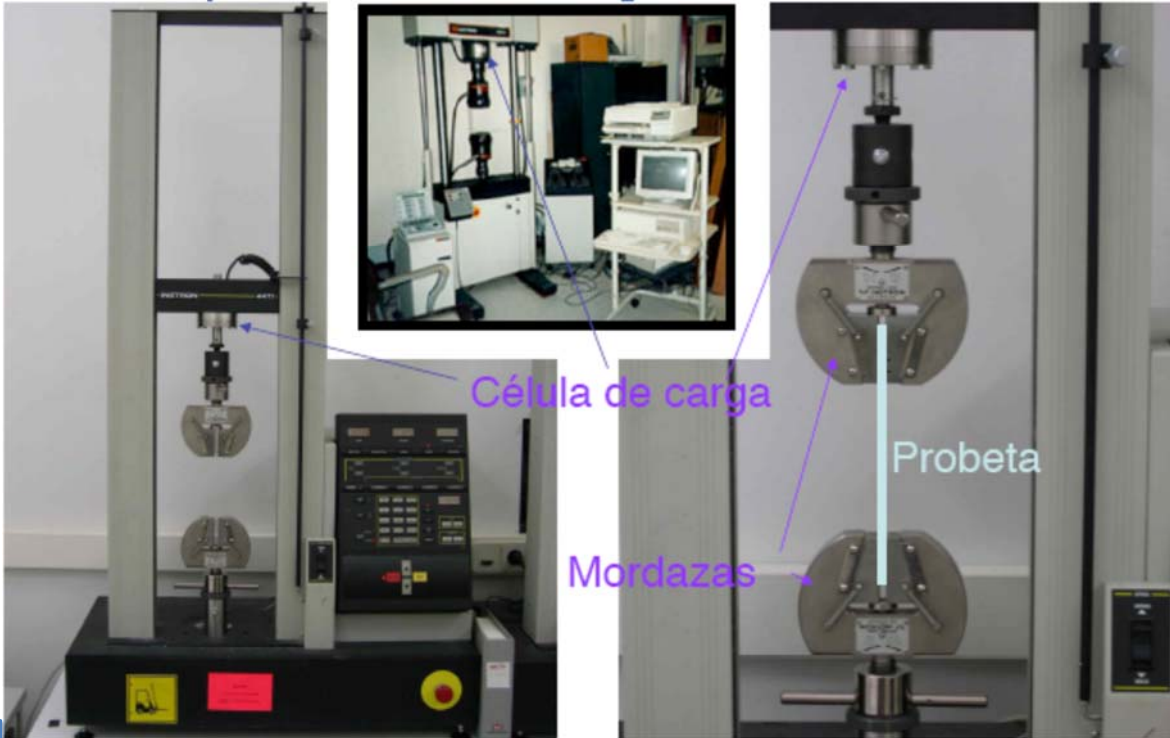
## Ensayo de tracción o tensión-deformación

- Se puede obtener información sobre:
  1. Módulo elástico.
  2. Límite elástico convencional (0.2%)
  3. Resistencia a tracción
  4. Porcentaje de alargamiento a fractura
  5. Porcentaje de estricción a fractura



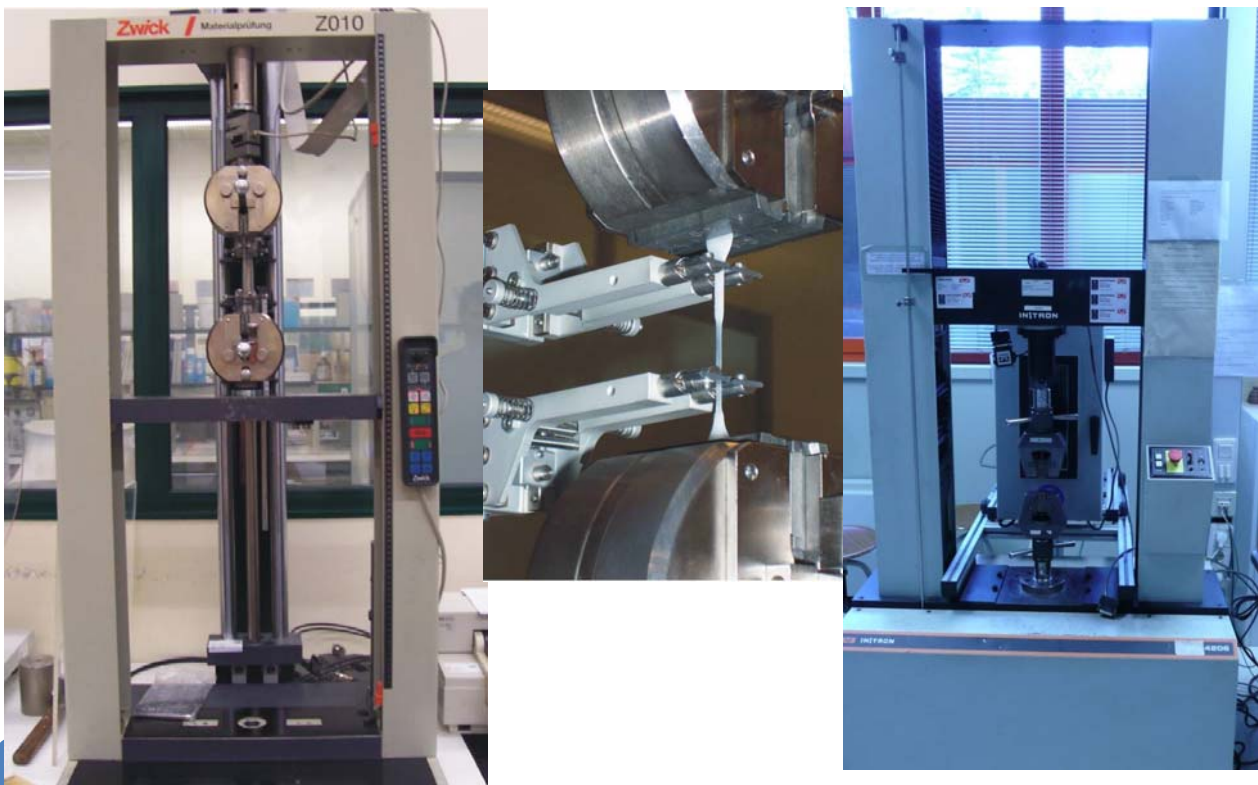
12

# Maquina de Ensayos

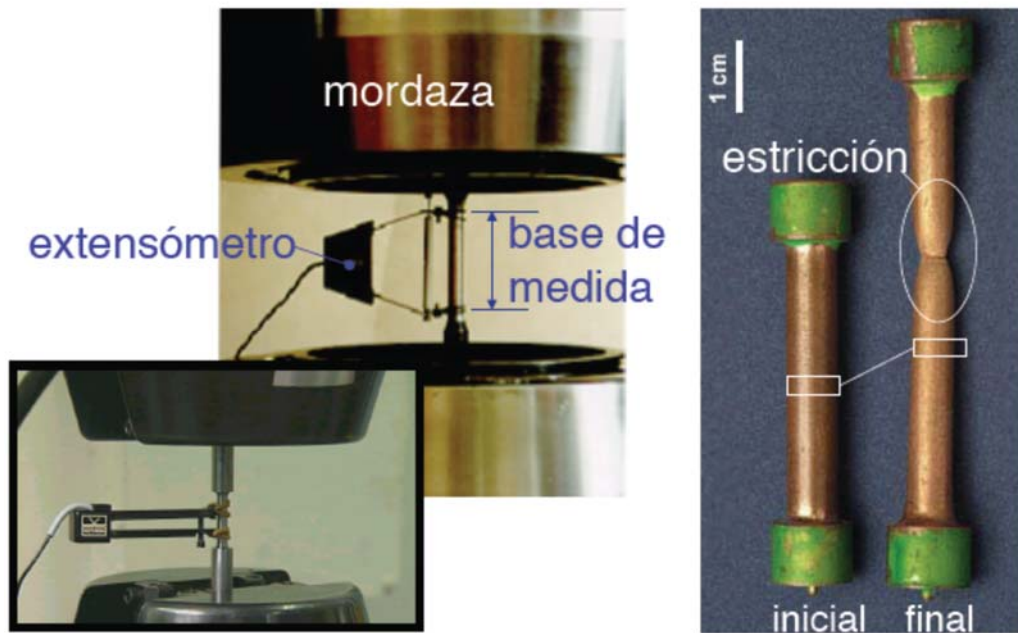


13

# Maquina de Ensayos



# Maquina Universal de Ensayos



15

## Ensayo de tracción



Una vez superado el punto A deja de cumplirse dicha proporcionalidad y poco después (pto. B) comienzan las deformaciones permanentes que caracteriza el comportamiento *plástico*, hasta la rotura.

16

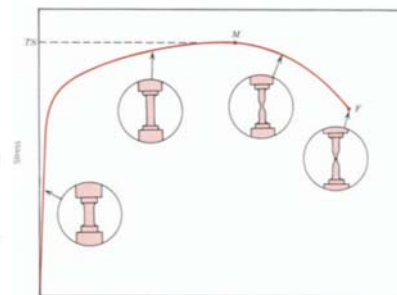
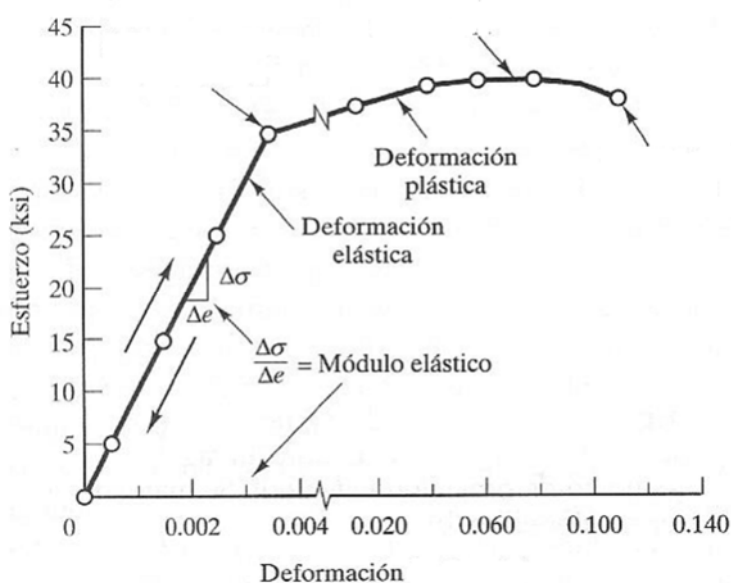


# Ensayo de tracción

- El módulo de elasticidad se relaciona con la fuerza de enlace los átomos o metal, los aceros poseen en torno a 200GPa, los Aluminios en torno a 70GPa
- Límite elástico: indica el nivel de tensión que soporta la estructura previo a mostrar una deformación plástica significativa.
- Resistencia a tracción: es la máxima tensión que alcanza la curva tensión deformación. Es la máxima tensión que soporta la probeta sin estricción.

17

# Ensayo tracción. Puntos significativos



- Módulo Elástico
- Límite elástico
- Tensión de rotura
- Resiliencia
- Alargamiento

18

## Ensayo tracción. Ingenieril vs Verdadera

- Las curva ingenieril expresa la tensión y la elongación en función de las condiciones iniciales.
- Las curva verdadera tiene en cuenta la disminución de área y la elongación real. Cuando ocurre la estricción, la tensión real o verdadera es mayor que la ingenieril

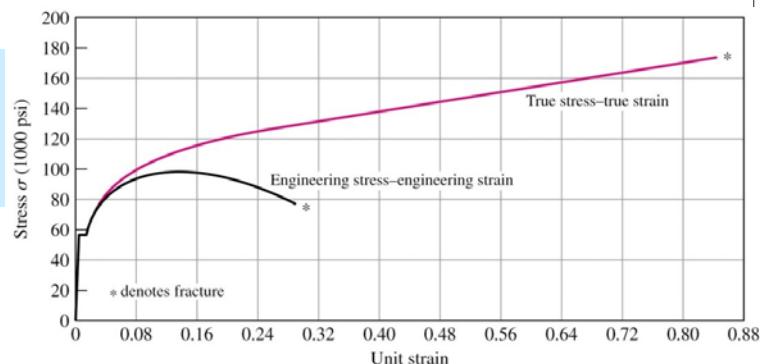
$$\begin{aligned} \text{Area inicial} &= A_i & \text{Deformación ingenieril} &= \frac{l_f - l_i}{l_i} \\ \text{Deformación puntual} &= \frac{dl}{l} \rightarrow \text{Deformación total real} &= \int_{l_i}^{l_f} \frac{dl}{l} \\ A_i l_i &= A_f l_f \end{aligned}$$

19

## Ensayo tracción. Ingenieril vs Verdadera

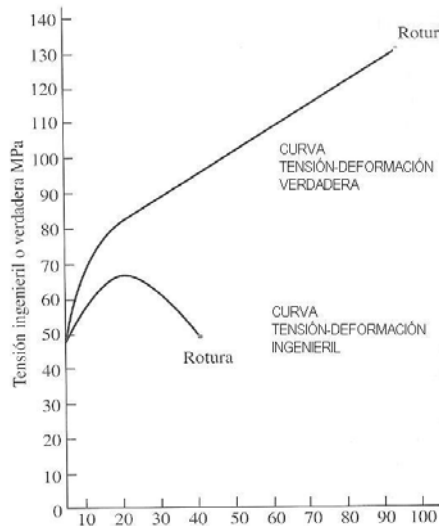
- Ejemplo: Comparar la tensión y deformación ingenieriles y verdaderas de una barra de sección circular de acero que tiene un diámetro inicial de 0.5 cm que se carga con 170 kg. El diámetro bajo carga es de 0.472 cm

$$\begin{aligned} s &= \frac{F}{A_i} = 867 \text{ kg/cm}^2 & e &= \frac{0.196}{0.175} - 1 = 0.12 \\ \sigma &= \frac{F}{A} = 971 \text{ kg/cm}^2 & \varepsilon &= \ln \frac{0.196}{0.175} = 0.113 \end{aligned}$$



20

## 4. Tensión-Deformación Real



Si  $\downarrow A \rightarrow \uparrow \sigma$

Tensión real

deformación real

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

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

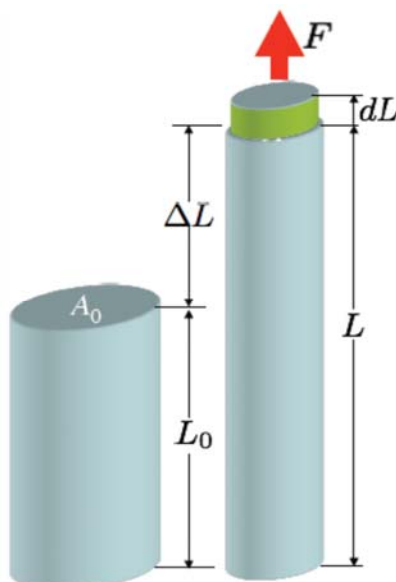
Si no existe variación de Volumen:

$$A_i l_i = A_0 l_0$$

21

## 4. Tensión-Deformación Real

- La sección de la probeta varía durante el ensayo.



Tensión verdadera:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Deformación verdadera:

$$d\epsilon = \frac{dL}{L} \Rightarrow \int_0^\epsilon d\epsilon = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L}$$

$$\Rightarrow \epsilon = \ln \frac{L}{L_0}$$

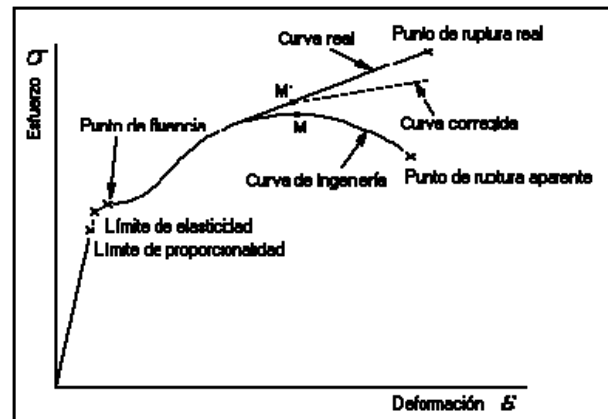
22

## 4. Tensión-Deformación Real

- $\epsilon\text{-}\sigma_{\text{real}} \rightarrow \epsilon\text{-}\sigma_{\text{ingenieril}}$

$$\sigma_T = \sigma(1 + \epsilon)$$

$$\epsilon_T = \ln(1 + \epsilon)$$



Tensión Axial en la estricción (M) < tensión ingenieril

Tensión deformación a partir de M:

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

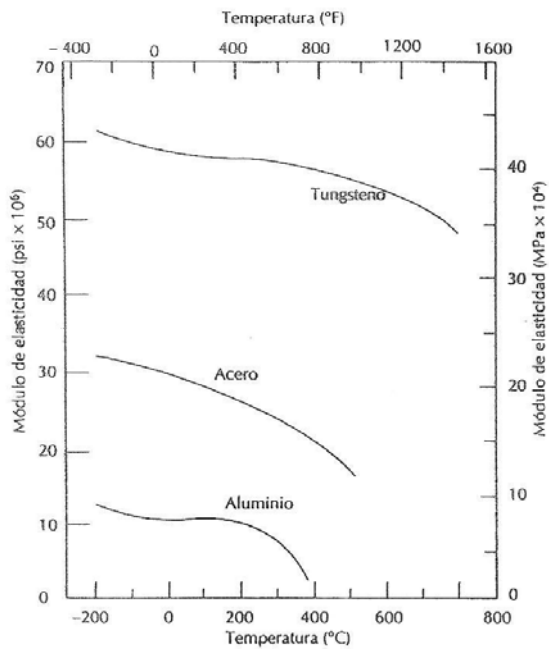
23

## Propiedades. Módulo Young

Material	E/GN m <sup>-2</sup>	Material	E/GN m <sup>-2</sup>
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 <sub>2</sub> (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 <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	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 <sub>3</sub> N <sub>4</sub>		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 <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub>	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	0.003-0.0
Brasses and bronzes	103-124	Foamed polymers	0.001-0.0

24

# Propiedades y Temperatura



TODAS las propiedades se ven influenciadas por las temperaturas, y en especial las propiedades mecánicas.

25

# FUNDAMENTOS DE LA FRACTURA: FRÁGIL, DÚCTIL

Modo de fractura = f ( mecanismo de propagación de la grieta)

Dúctil:

- ↑ deformación plástica
- proceso lento
- grieta estable, se mantiene si no ↑  $\sigma$

Frágil:

- ↓ deformación plástica
- proceso rápido
- grieta inestable, progresa sin ↑  $\sigma$

Preferible la fractura dúctil

- aparece acompañada por deformación
- se requiere + E de deformación (> tenacidad)

26

## Fragilidad

### FRACTURA FRÁGIL

- No se produce deformación plástica
- No se almacena energía de deformación plástica
- No avisa: fractura súbita y catastrófica
- La grieta se propaga a gran velocidad (grieta inestable)
- Propagación sin aumento de tensión
- 1. Dirección del movimiento de la grieta  $\perp$  dirección de  $\sigma$
- 2. Superficie de fractura plana
- 3. Cerámicos, Metales con estructura de pocos sistemas de deslizamiento (hcp o bcc).
- 4. Rotura de enlaces atómicos en los planos cristalográficos

27

## Ductilidad

- Medida grado **deformación plástica** de un material hasta su fractura
- Baja ductilidad  $\leftrightarrow$  material frágil
- Se puede expresar como el porcentaje de alargamiento tras la ruptura

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

- $l_f$  = longitud final fractura
- $l_0$  = longitud inicial

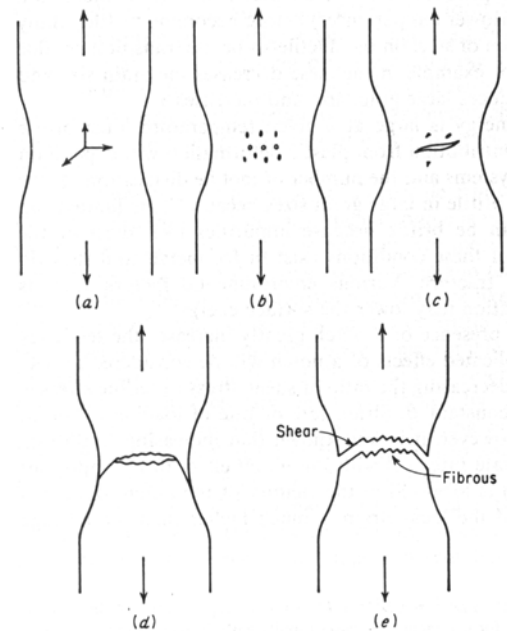
- Ductilidad es importante porque:
  - Mide grado deformación plástica antes de rotura
  - Mide grado deformación útil para operaciones conformado
- No está realmente definido pero en general se denomina dúctil cuando  $\%EL > 5\%$

28

# Ductilidad

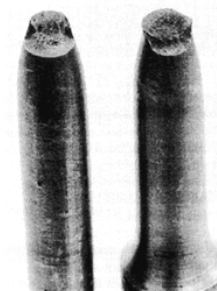
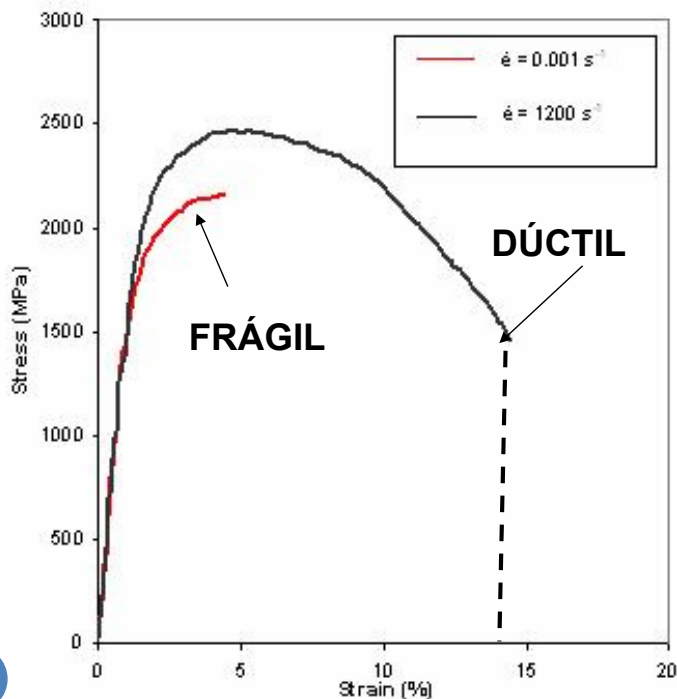
## Etapas de fractura DÚCTIL:

1. Aparición de estricción
2. Formación de microcavidades en el interior
3. Aumento de microcavidades y coalescencia  $\Rightarrow$  grieta elíptica
4. Propagación de la grieta por la estricción, forma ángulo de  $45^\circ$  ( $\sigma$  cizalladura es máxima)
5. Fractura copa-cono



29

## 3. Propiedades mecánicas. 3.1 Ductilidad



(a)

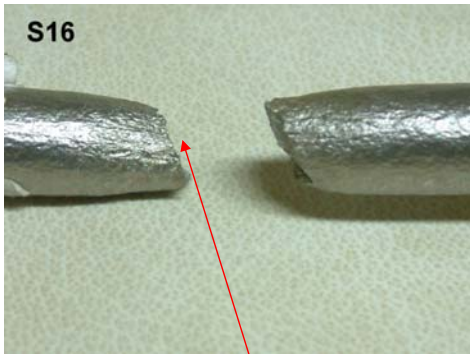


(b)

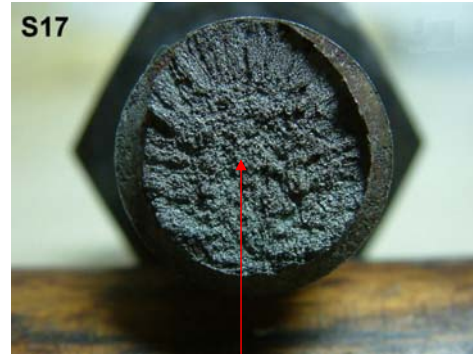
30

# Fallos en servicio. Forense

## Fractura dúctil vs Fractura frágil



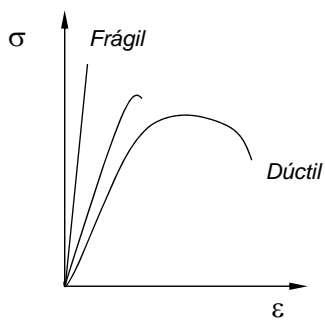
**FRACTURA DÚCTIL**



**FRACTURA FRÁGIL**

31

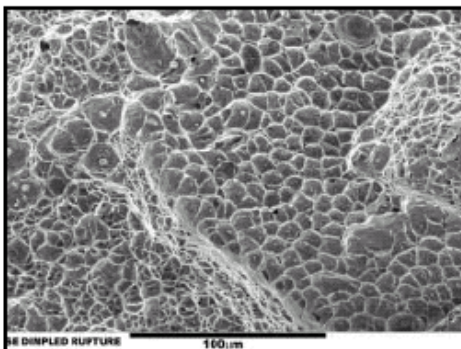
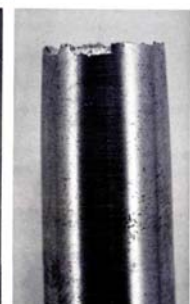
## Fractura dúctil vs Fractura frágil



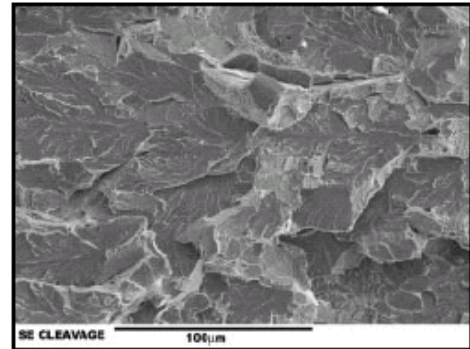
**FRACTURA DÚCTIL**



**FRACTURA FRÁGIL**



**FRACTURA DÚCTIL**



**FRACTURA FRÁGIL**

32



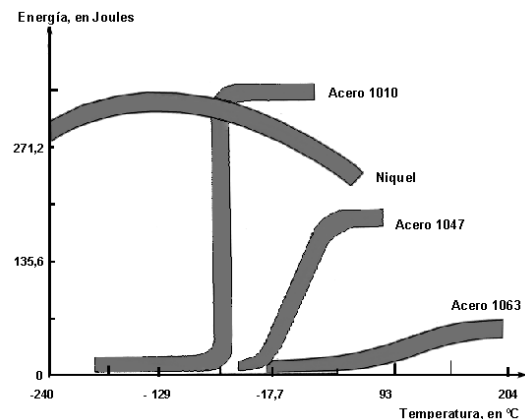
## Resiliencia

- Capacidad de un material de absorber energía **elástica** cuando es deformado. Área debajo de la curva tensión deformación hasta la fluencia.
- La energía elástica se recupera

$\sigma_y$  = Límite elástico

$E$  = Módulo elástico

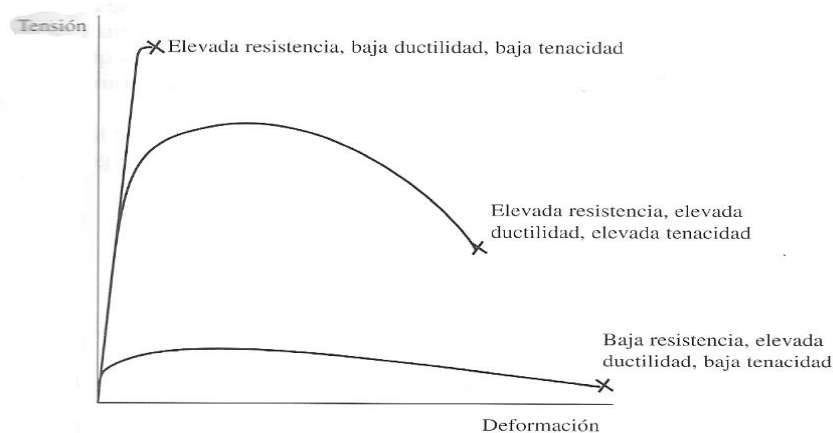
$$U_r = \frac{1}{2} \sigma_y \varepsilon_y = \frac{1}{2} \sigma_y \left( \frac{\sigma_y}{E} \right) = \frac{\sigma_y^2}{2E}$$



33

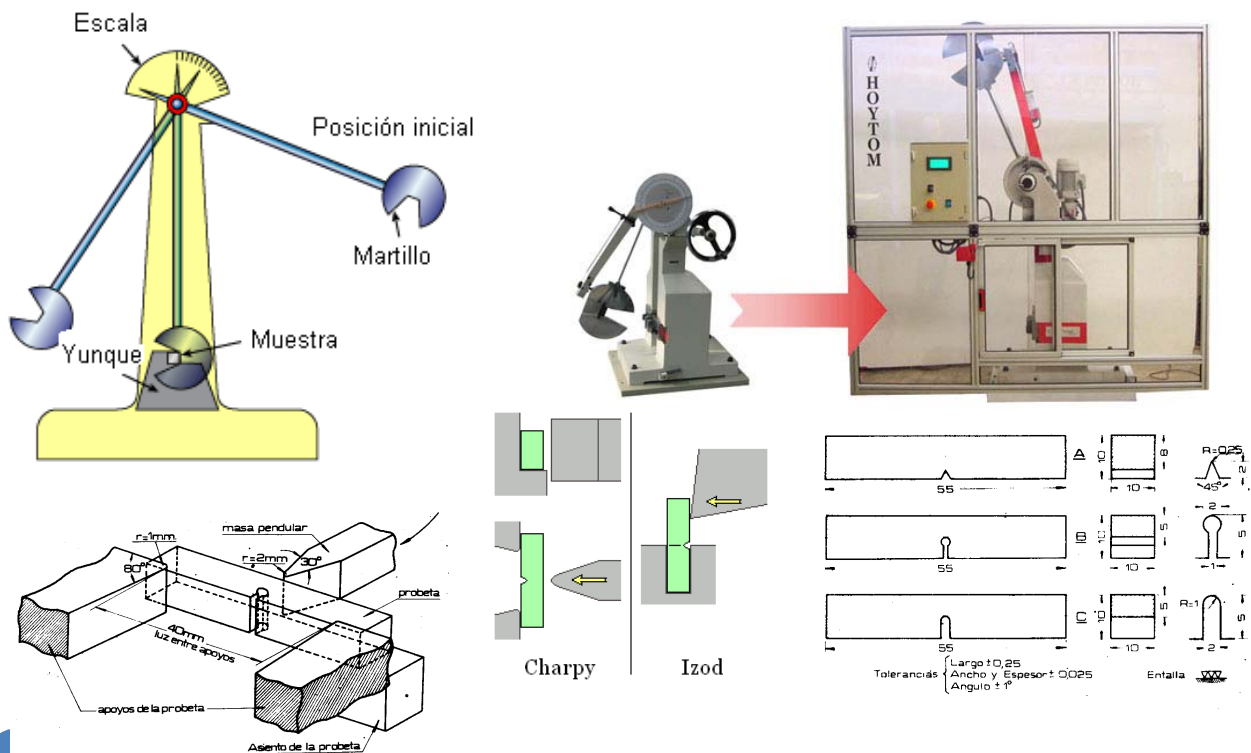
## Tenacidad

- Tenacidad = capacidad de un material de **absorber energía** antes de la fractura, Es la energía necesaria para crear nuevas superficies
- ↑ Tenacidad implica ↑ resistencia mecánica y ↑ ductilidad DE MANERA SIMULTÁNEA
- Para hacer una estimación de ella es necesario ensayos específicos aunque la curva tensión-deformación puede dar indicaciones



34

# Ensayo Charpy para Tenacidad



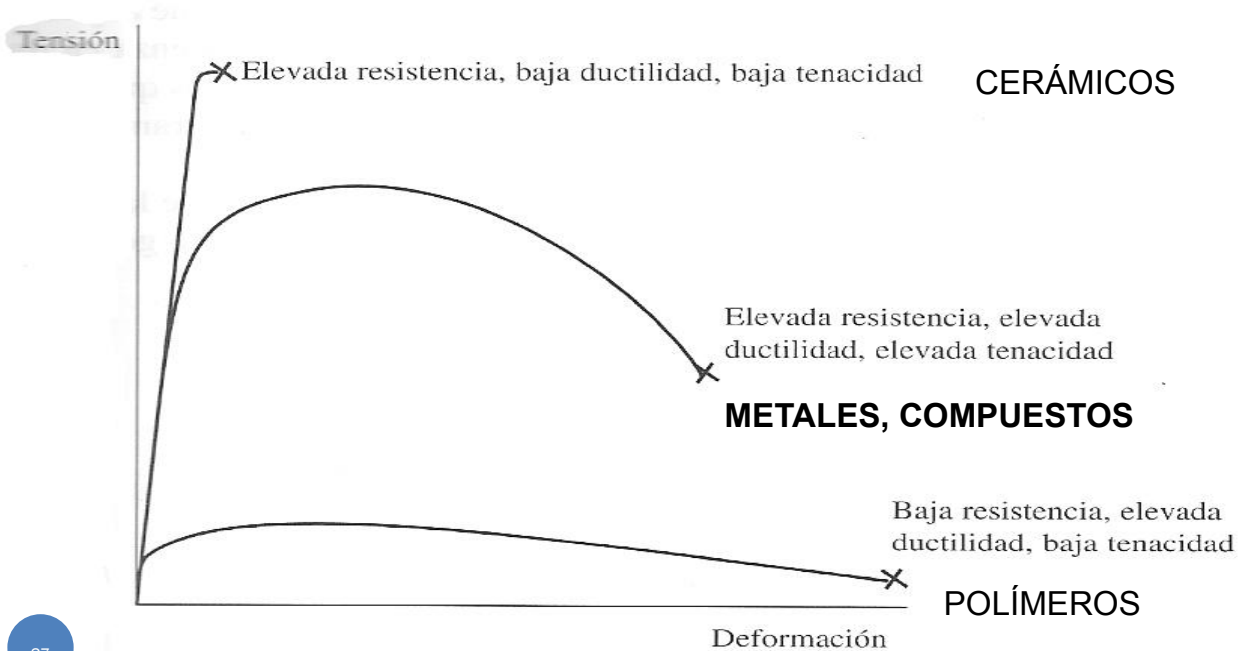
# Ensayo Charpy para Tenacidad

- Mide la energía de impacto de un dispositivo ( péndulo) de masa conocida respecto a la probeta problema
- La probeta presenta una entalla → acumulación de tensiones → origen y propagación de la grieta de fractura
- El péndulo se lanza a una altura  $h$  y un ángulo  $\alpha$  respecto de la vertical. La variación de energía mecánica del péndulo, tras el choque → energía absorbida por la probeta.

$$E_{\text{Absorb.Material}} = E_{m_{\text{Final}}} - E_{m_{\text{Inicial}}} = m_{\text{péndulo}} g ( h_{\text{final}} - h_{\text{inicial}} )$$

- A mayor cantidad de energía absorbida → mayor tenacidad del material (capacidad de absorción de energía, elástica y plástica)

### 3. Propiedades mecánicas. 3.3. Tenacidad



37

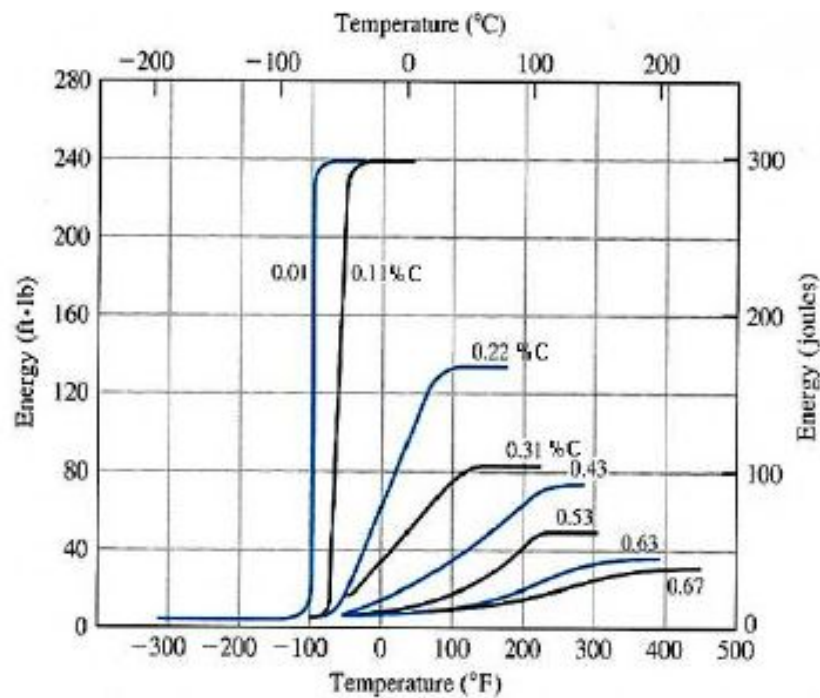
### Transición dúctil-frágil

- En los materiales, dos de las características más importantes son la resistencia y la ductilidad.
- La Temperatura afecta fuertemente a estos dos factores → El aumento de la temperatura genera nuevos sistemas de deslizamiento
- La ductilidad  $\uparrow$  mientras que la resistencia  $\downarrow$ .
- Este cambio en la resistencia y en la ductilidad afecta directamente a la tenacidad de fractura

38

## Transición dúctil-frágil

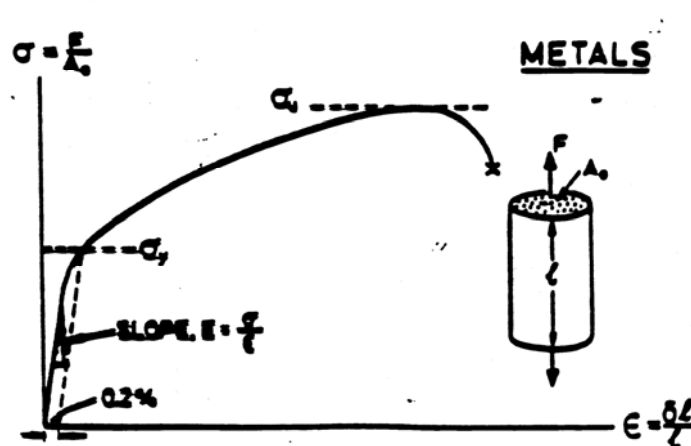
- Por lo tanto



39

## Propiedades Mecánicas. Materiales

- **Metales**
  - Límite elástico a tracción ( $\sigma_T$ )  $\approx$  Límite elástico a compresión ( $\sigma_C$ )
  - $\uparrow$  Tenacidad ( $\uparrow$  dureza,  $\uparrow$  ductibilidad)
  - Buenas propiedades conformado

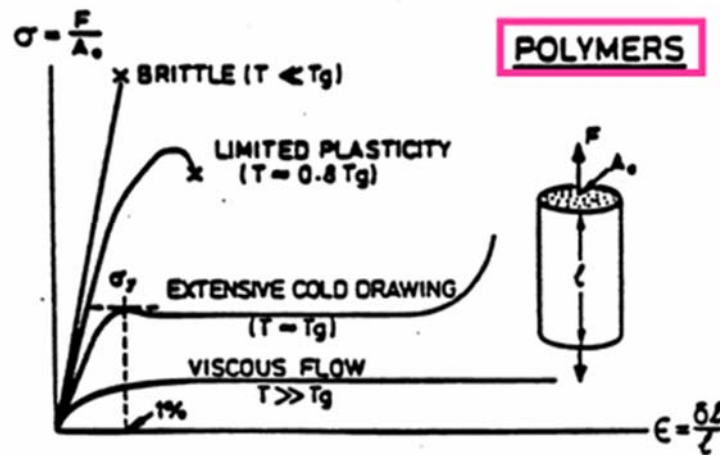


40

# Propiedades Mecánicas. Materiales

## • Polímeros

- Las propiedades decaen rápidamente con la T y dependen de ella
- ↑ ductilidad, ↓ tenacidad ( ↓ dureza)
- Buenas propiedades para conformado

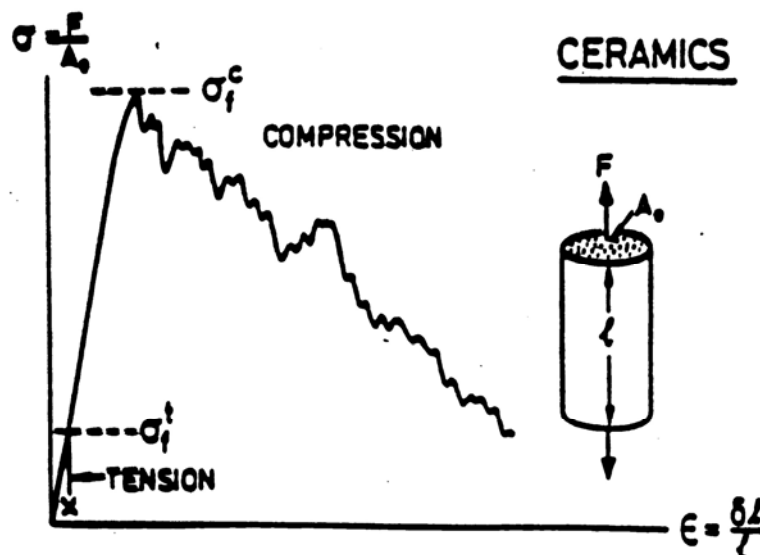


41

# Propiedades Mecánicas. Materiales

## • Cerámicos

- ↓↓ Tenacidad ( ↑↑ dureza, ↓↓↓ ductibilidad)



42

# Bloque II: DEAGASTE Y DUREZA

## 1. Desgaste. Tipos de desgaste

Se entiende como desgaste la pérdida de material debido al rozamiento directo con otro, fricción, por el movimiento.

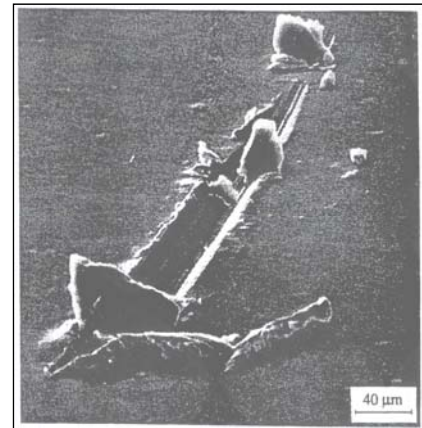
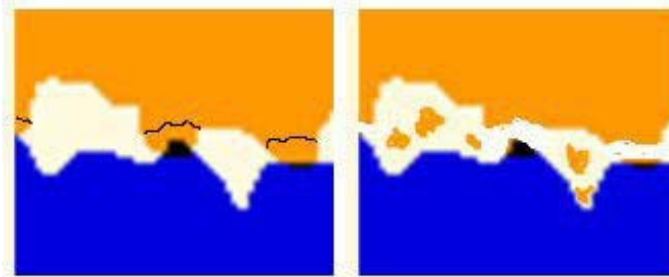
Experimentalmente: distintos tipos de sistemas de fricción, aunque no existe una teoría generalizada.

- Disco-Disco
- Punzón sobre disco
- Piñón sobre disco

# 1. Desgaste. Tipos de desgaste

## • Desgaste Abrasivo:

- Debido a asperezas duras de una superficie contra otra.
- Pérdida progresiva de material
- Produce marcas de rayado en la dirección del movimiento

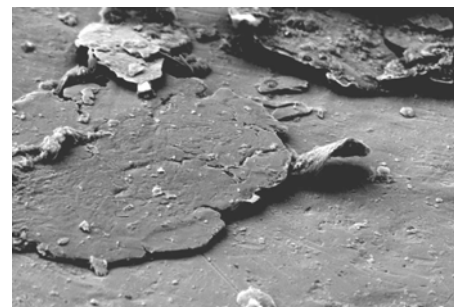
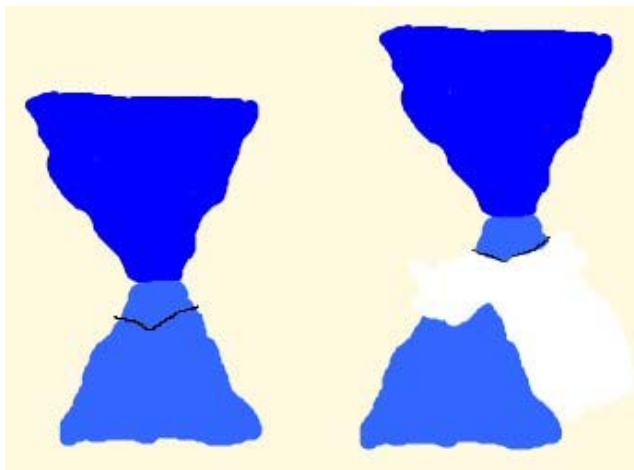


45

# 1. Desgaste. Tipos de desgaste

## • Desgaste adhesivo:

- Debido a unión de asperezas por el deslizamiento de superficies que llegan a la rotura
- El material más débil es quién pierde material

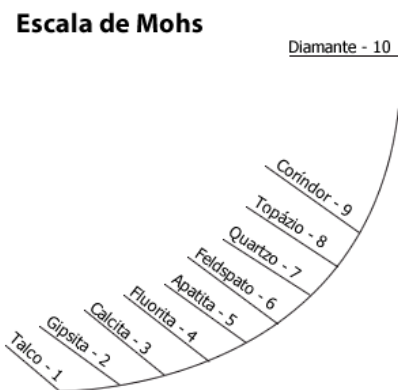


46

## 2. Dureza

Resistencia a la penetración. Es el resultado de la compresión de un material duro, con una carga definida sobre otro.

Ppios: Escala Mohs, mineralogía: informa de la resistencia de un material a ser rayado



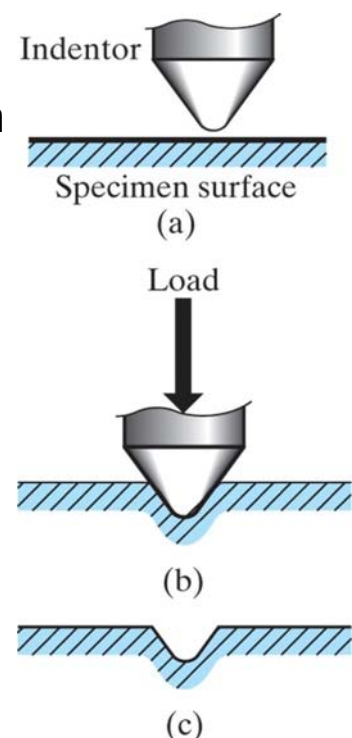
47

## 2. Dureza. Tipos de dureza

Actualmente: ensayos de penetración de un indentador muy duro sobre la superficie de la pieza midiendo la huella.

Según el penetrador y la huella:

- Rockwell B: bola de acero, se mide profundidad
- Rockwell C: Cono de diamante, se mide profundidad
- Brinell: bola de acero, se mide huella
- Vickers: pirámide de diamante, se mide huella



48



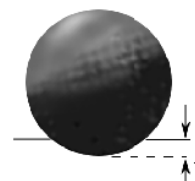
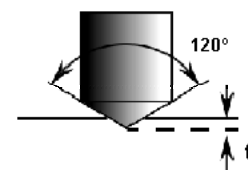
**Table 6.2** Hardness tests

Test	Indenter	Shape of indentation		Load	Formula for hardness number
		Side view	Top view		
Brinell	10 mm sphere of steel or tungsten carbide			$P$	$BHN = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
Vickers	Diamond pyramid			$P$	$VHN = \frac{1.72P}{d_1^2}$
Knoop microhardness	Diamond pyramid			$P$	$KHN = \frac{14.2P}{l^2}$
Rockwell					
A } C } D }	Diamond cone			60 kg $R_A =$ 150 kg $R_C =$ 100 kg $R_D =$	100-500f
B } F } G }	$\frac{1}{16}$ -in.-diameter steel sphere			100 kg $R_B =$ 60 kg $R_F =$ 150 kg $R_G =$ 100 kg $R_E =$	
E	$\frac{1}{8}$ -in.-diameter steel sphere				

Source: After H. W. Hayden, W. G. Moffatt, and J. Wulff, "The Structure and Properties of Materials," vol. III, Wiley, 1965, p. 12.

## 2. Dureza./ 2.1. Rockwell

- Rockwell:
  - Partimos de una bola o cono que realizan la indentación para medir la profundidad de la huella
  - LA DUREZA ES FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD
  - Precarga: 10kg
  - Carga: 60-150kg
  - Existen distintas escalas.
  - Indentadores:
    - Bola acero templado
    - Cono de diamante tallado a 120°



## 2. Dureza./ 2.2. Brinell

- Huella realizada con bola acero templado

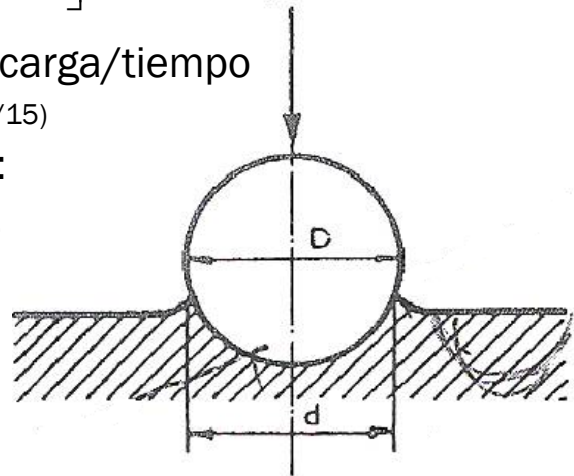
$$NDB = \frac{2P}{\pi D \left[ D - \sqrt{D^2 - d^2} \right]}$$

- Designación: HBdiámetro/carga/tiempo

(HB5/125/15)

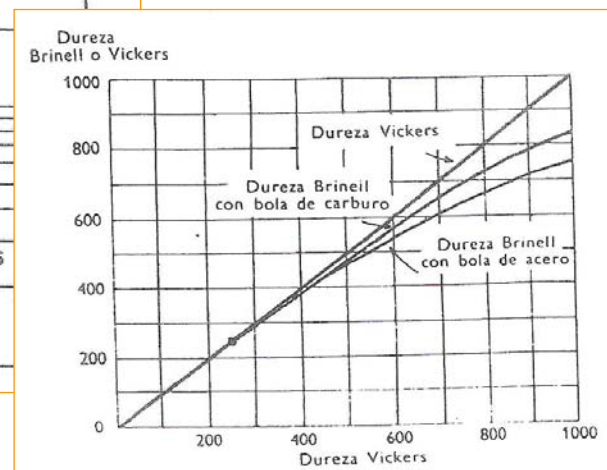
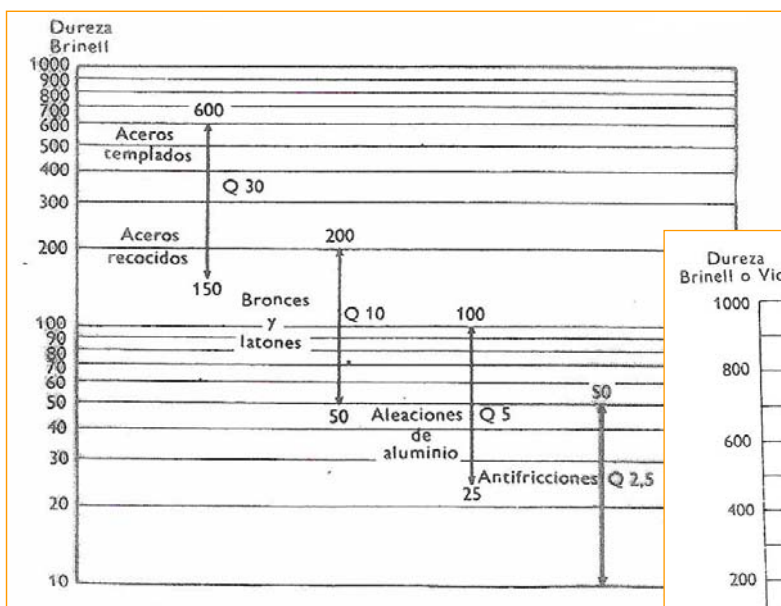
- Condiciones normalizadas:

- Duración 10, 15 ó 30s
- Espesor pieza > 8h
- Distancia:
  - huella-borde pieza > 3d
  - entre huellas > 6d



51

## 2. Dureza./ 2.2. Tabla comparativa Brinell



52

## 2. Dureza./ 2.2. Tabla durezas Brinell

Hardness scale	Ball diameter, $D$ / mm	Nominal value of test force, $F$ / N
HBW 10/3 000	10	29 420
HBW 10/1 500	10	14 710
HBW 10/1 000	10	9 807
HBW 10/500	10	4 903
HBW 10/250	10	2 452
HBW 10/100	10	980,7
HBW 5/750	5	7 355
HBW 5/250	5	2 452
HBW 5/125	5	1 226
HBW 5/62,5	5	612,9
HBW 5/25	5	245,2
HBW 2,5/187,5	2,5	1 839
HBW 2,5/62,5	2,5	612,9
HBW 2,5/31,25	2,5	306,5
HBW 2,5/15,625	2,5	153,2
HBW 2,5/6,25	2,5	61,29
HBW 1/30	1	294,2
HBW 1/10	1	98,07
HBW 1/5	1	49,03
HBW 1/2,5	1	24,52
HBW 1/1	1	9,807

53

## 2. Dureza./ 2.3. Vickers

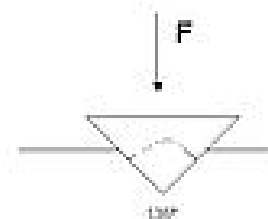
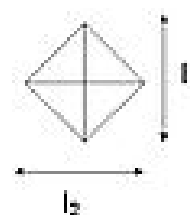
- Indentador pirámide de diamante de base cuadrada y ángulo entre caras=136°

$$HV = \frac{1,854P}{d^2}$$

$d$  = Diagonal cara

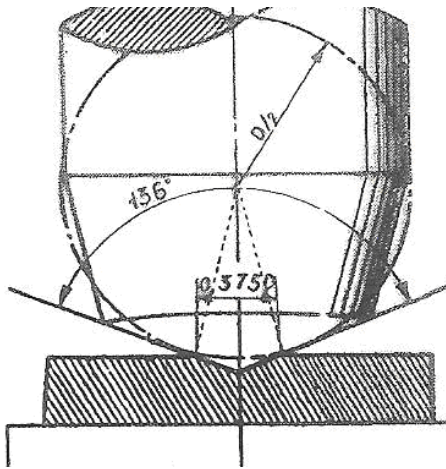
$P$  = Carga aplicada

- Condiciones:
  - Cargas: de 1-100kg (10kg más común)
  - Duración: 10 ó 15s
  - Espesor pieza > 1.5d
  - Distancias:
    - Huella-centro > 2.5d
    - Entre huellas > 2.5d



54

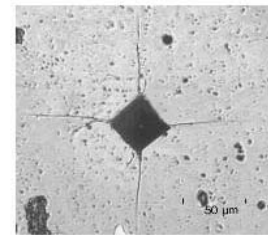
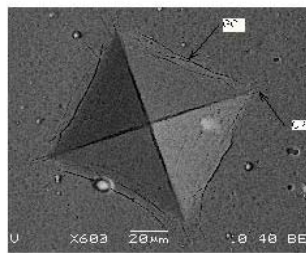
## 2. Dureza./ 2.3. Vickers



$$HV = \frac{1,854P}{d^2}$$

**d** = Diagonal cara

**P** = Carga aplicada



55

## 2. Dureza./ 2.3. Vickers

- Ventajas ensayo Vickers:
  - Cifras independientes de carga
  - Con un penetrador se mide una amplia gama de materiales
  - Posibilidades de medir piezas delgadas ( $\geq 0,05$  mm de espesor)
  - Se puede medir dureza superficial
  - Más precisa que la escala Rockwell

56