

## PROPIEDADES MECÁNICAS

La selección de un material significa adecuar sus propiedades mecánicas a las condiciones de servicio requeridas para el componente.

Se requiere analizar la aplicación a fin de determinar las características más importantes que el material debe poseer:

-¿Estará sometido a la acción de una fuerza cíclica importante?

- ¿Deberá ser resistente, rígido o dúctil?

- ¿Estará sometido a la aplicación de una fuerza súbita intensa, a un gran esfuerzo y temperatura elevada o a condiciones abrasivas?

Conocidas las propiedades requeridas, se deberá seleccionar el material apropiado, utilizando la información existente en los manuales.

Sin embargo se requiere conocer como se llega a determinar las propiedades de los materiales, tomando en cuenta el conocimiento de los ensayos aplicados para su determinación que son ideales y deben ser adaptados criteriosamente a las aplicaciones ingenieriles de la vida real.

## PROPIEDADES MECÁNICAS

TRACCIÓN Y COMPRESIÓN: Barras cargadas axialmente



Fig. 1

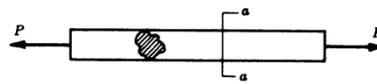


Fig. 2 a

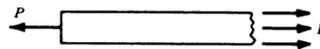


Fig. 2 b

Distribución de las fuerzas resistentes: Se admite que las fuerzas están repartidas uniformemente.

Esfuerzo o tensión normal:

Fuerza normal que actúa sobre una superficie unidad de la sección transversal ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

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

## PROPIEDADES MECÁNICAS

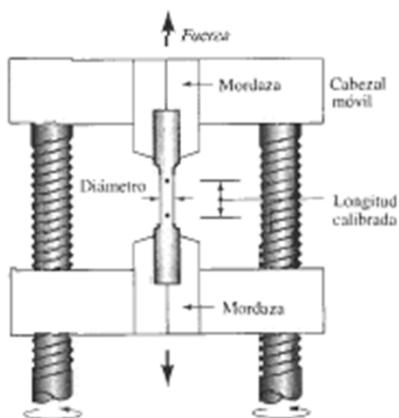
Deformación ( $\epsilon$ )

$$\epsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \qquad \epsilon = \frac{\delta}{L_0}$$

**TABLA 6-1** Resultados de un ensayo de tensión de una barra de aleación de aluminio de 0.505 plg de diámetro

Carga (lb)	Medido		Calculado	
	Longitud calibrada (plg)	Esfuerzo (psi)	Deformación (plg/plg)	
$\emptyset$	2.000	0	0	
1000	2.001	5,000	0.0005	
3000	2.003	15,000	0.0015	
5000	2.005	25,000	0.0025	
7000	2.007	35,000	0.0035	
7500	2.030	37,500	0.0150	
7900	2.080	39,500	0.0400	
8000 (carga máxima)	2.120	40,000	0.0600	
7950	2.160	39,700	0.0800	
7600 (fractura)	2.205	38,000	0.1025	

## PROPIEDADES MECÁNICAS



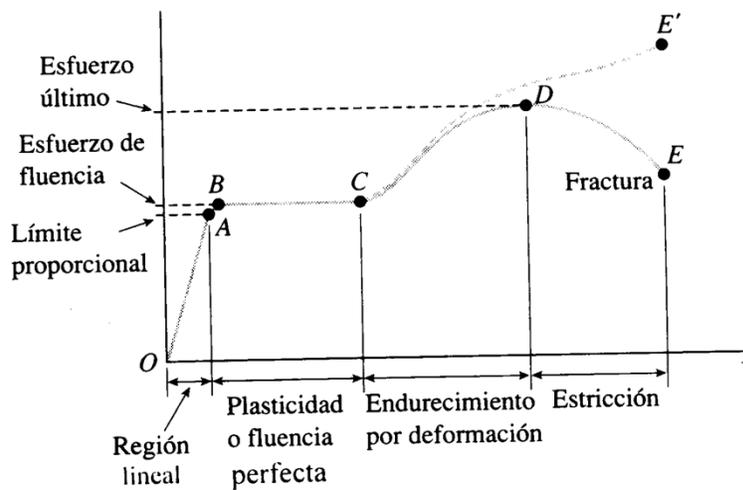
**FIGURA 6-1** Mediante un cabezal móvil, en la prueba de tensión se aplica una fuerza unidireccional a una probeta.

## PROPIEDADES MECÁNICAS



**FIGURA 6-2** Curva esfuerzo-deformación correspondiente a una aleación de aluminio de la tabla 6-1.

## Diagramas esfuerzo deformación unitaria



## PROPIEDADES MECÁNICAS

### EJEMPLO 6-1

Convierta los datos de carga-longitud calibrada que aparecen en la tabla 6-1 a esfuerzo deformación ingenieriles y grafique la curva esfuerzo-deformación.

### SOLUCIÓN

En el caso de una carga de 1000 lb:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} = \frac{1000 \text{ lb}}{(\pi/4)(0.505 \text{ plg})^2} = \frac{1000 \text{ lb}}{0.2 \text{ plg}^2} = 5000 \text{ psi}$$

$$\epsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{2.001 \text{ plg} - 2.000 \text{ plg}}{2.000 \text{ plg}} = 0.0005 \text{ plg/plg}$$

Los resultados de cálculos similares para cada una de las cargas restantes se dan en la tabla 6-1 y aparecen en la figura 6-2. ■

## PROPIEDADES MECÁNICAS

### TABLA de Unidades y Factores de Conversión

1 libra (lb) = 4,448 newtons (N)

1 psi = lb por pulgada cuadrada

1 MPa = megapascal = meganewton por metro cuadrado (MN/m<sup>2</sup>)

=newton por milímetro cuadrado (N/mm<sup>2</sup>)

1 Gpa = 1000 Mpa = gigapascal

1 ksi = 1000 psi = 6,895 Mpa

1 psi = 0,006895 Mpa

1 Mpa = 0,145 ksi = 145 ksi

## PROPIEDADES MECÁNICAS

### LEY DE HOOKE

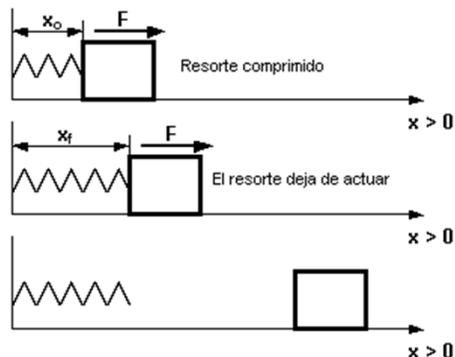
#### FUERZA ELÁSTICA

**Resortes:** Los resortes reales se comportan según la siguiente ecuación, conocida como la Ley de Hooke: las tensiones son proporcionales a las elongaciones. Los materiales que responden a esta ley son *perfectamente elásticos*.

$$F = k \cdot \Delta x$$

k: magnitud de la fuerza por unidad de elongación, que depende de cada resorte [N/m].

$$\Delta x = x_f - x_o \text{ [m]}$$



## PROPIEDADES MECÁNICAS

**Tensión o esfuerzo:** es la relación entre una carga y la superficie sobre la que actúa. Se considera como tal a la reacción que opone el material de un cuerpo frente a una sollicitación externa (de tensión, compresión, cortante) que tiende a producir un cambio en su tamaño o forma.

$$\sigma = F/A \Rightarrow \sigma = \varepsilon \cdot E$$

E: módulo de elasticidad del material. [N/m<sup>2</sup>; kgr/cm<sup>2</sup>]

A: sección del material [m<sup>2</sup>; cm<sup>2</sup>];       $\varepsilon$  = deformación unitaria axial

**Elongaciones:** un cuerpo sometido a la acción de fuerzas externas sufre alargamientos o acortamientos en una dirección dada que reciben el nombre de deformaciones.

**Deformación específica:**

$\varepsilon = \Delta l/l$ ;  $\Delta l$ : elongación

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L_0}$$

l: longitud original

acortamiento  $\varepsilon < 0$

alargamiento  $\varepsilon > 0$

**Esfuerzos y cargas permisibles:** Capacidad de un objeto para soportar o transmitir cargas (resistencia).

Para evitar una falla estructural, las cargas que una estructura es capaz de soportar, deben ser mayores que las cargas a las cuales estará sometida en servicio.

La resistencia verdadera de una estructura debe exceder la resistencia requerida.

*Definiciones importantes:*

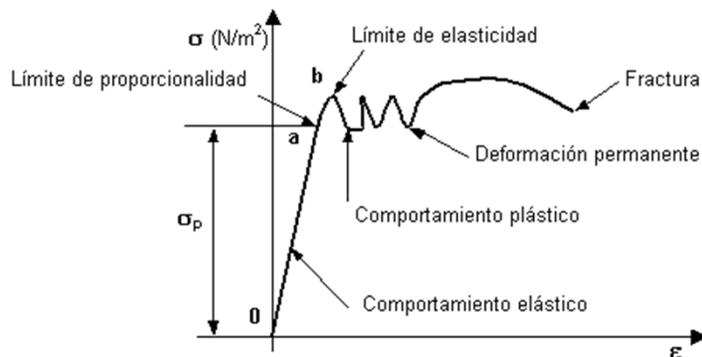
$$\sigma_{perm} = \frac{\sigma_y}{n_1} \quad \text{Factor de seguridad } n = \frac{\text{Resistencia verdadera}}{\text{Resistencia requerida}}$$

$$\tau_{perm} = \frac{\tau_y}{n_2} \quad \text{Esfuerzo Permissible} = \frac{\text{Resistencia a la Fluencia}}{\text{Factor de seguridad}}$$

$\sigma_y$   $\tau_y$  Son los esfuerzos de fluencia y  $n_1$  y  $n_2$  son los factores de seguridad

En el diseño de aviones: Margen de seguridad =  $n - 1$

## PROPIEDADES MECÁNICAS



Dentro del límite de proporcionalidad ( $\sigma_p$ ), el módulo de elasticidad de un material dado es constante, dependiendo solo de la naturaleza del material.

De 0 hasta a, se llama *recta de Hooke*. Sin embargo hasta b inclusive, cuando descargamos la pieza recupera su longitud original (entre 0 y b, el material es elástico).

**Módulo de Young:** es la constancia de la relación entre tensiones y deformación específica.  $E = \sigma / \epsilon = \text{cte. Es la pendiente de la curva}$

Esta relación es la expresión analítica de la ley de Hooke.

## PROPIEDADES MECÁNICAS

**Elasticidad:** una deformación se llama elástica cuando desaparece completamente (recuperable) una vez que cesa la causa que la produjo.

**Plasticidad:** una deformación plástica es aquella que no desaparece (irreversible) con la anulación de la causa. La plasticidad de los materiales esta dada por su capacidad de poder deformarse sin por ello sufrir fractura. Un material es tanto más **dúctil** cuanto más extendido es su diagrama  $\sigma - \epsilon$  en el sentido del eje  $\epsilon$ .

A medida que aumenta la resistencia de los materiales disminuye la deformación específica y por lo tanto su ductilidad. Se dice entonces que el material va ganando en **fragilidad**.

## PROPIEDADES MECÁNICAS

**La maleabilidad** como propiedad de los materiales, específicamente metálicos, constituye en realidad una fase de la ductilidad.

**Tenacidad:** es la capacidad de un material para absorber simultáneamente esfuerzos y deformaciones de consideración sin llegar a la fractura.

**Rigidez:** es la capacidad de resistir una deformación elástica por efecto de una tensión.

**Fluencia:** en los materiales tenaces el período plástico comienza teóricamente a partir del punto **a** (límite de proporcionalidad), que constituye el final del período de proporcionalidad (recta de Hooke). En realidad, el material suele ser elástico, un poco más allá de dicho punto, hasta el punto **b** (límite de elasticidad).

## PROPIEDADES MECÁNICAS

**Propiedades elásticas:** El módulo de Elasticidad o módulo de Young, es la pendiente de la curva Esfuerzo-Deformación, en su región elástica. (Ley de Hooke).

$$\sigma = \epsilon \cdot E; \quad \epsilon = \Delta/l$$

Este módulo está íntimamente relacionado con la energía de enlace de los átomos.

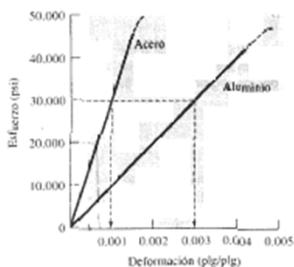
Una pendiente muy pronunciada en la gráfica fuerza distancia en la zona de equilibrio, indica que se requieren grandes fuerzas para separar los átomos y hacer que el material se deforme elásticamente (está relacionado con el punto de fusión).

El módulo es una medida de la rigidez del material y es proporcional al valor del módulo de elasticidad (E).

## PROPIEDADES MECÁNICAS

**TABLA 6-3** Propiedades elásticas y temperaturas de fusión ( $T_f$ ) de materiales seleccionados

Material	$T_f$ (°C)	E		$\mu$
		(psi)	(GPa)	
Pb	327	$2.0 \times 10^6$	(13.8)	0.45
Mg	650	$6.5 \times 10^6$	(44.8)	0.29
Al	660	$10.0 \times 10^6$	(69.0)	0.33
Cu	1085	$18.1 \times 10^6$	(124.8)	0.36
Fe	1538	$30.0 \times 10^6$	(206.9)	0.27
W	3410	$59.2 \times 10^6$	(408.3)	0.28
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2020	$55.0 \times 10^6$	(379.3)	0.26
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>		$44.0 \times 10^6$	(303.4)	0.24



**FIGURA 6-5** Comparación del comportamiento elástico del acero y del aluminio.

## PROPIEDADES MECÁNICAS

**Ductilidad** La **ductilidad** mide el grado de deformación que puede soportar un material sin romperse. Se puede medir la distancia entre las marcas calibradas en una probeta antes y después del ensayo. El **% de elongación** representa la distancia que la probeta se alarga plásticamente antes de la fractura:

$$\% \text{ de elongación} = \frac{l_f - l_0}{l_0} \times 100, \quad (6-6)$$

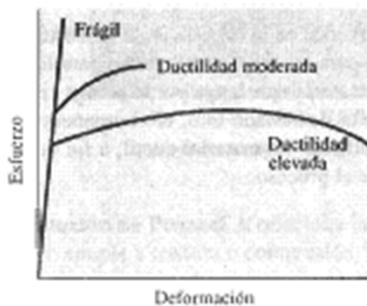
donde  $l_f$  es la distancia entre las marcas calibradas después de la ruptura del material.

Un segundo método para medir la ductilidad es calcular el cambio porcentual en el área de la sección transversal en el punto de fractura antes y después del ensayo. El **% de reducción en área** expresa el adelgazamiento sufrido por el material durante la prueba:

$$\% \text{ de reducción en área} = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100, \quad (6-7)$$

donde  $A_f$  es el área de la sección transversal en la superficie de la fractura.

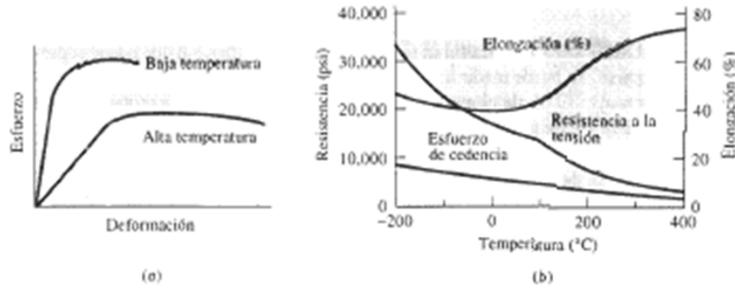
## PROPIEDADES MECÁNICAS



**FIGURA 6-7** Comportamiento mecánico en el ensayo de tensión de materiales frágiles, en comparación con materiales más dúctiles.

## PROPIEDADES MECÁNICAS

**Efecto de la temperatura** Las propiedades a la tensión dependen de la temperatura (figura 6-6). El esfuerzo de cedencia, la resistencia a la tensión y el módulo de elasticidad disminuyen a temperaturas más altas, en tanto que, por lo general, la ductilidad se incrementa. Un fabricante quizá desee deformar un material a una alta temperatura (lo que se llama comúnmente *trabajo en caliente*) para aprovechar esa mayor ductilidad y los menores esfuerzos requeridos.



**FIGURA 6-6** Efecto de la temperatura (a) en la curva esfuerzo deformación y (b) sobre las propiedades a tensión de una aleación de aluminio.

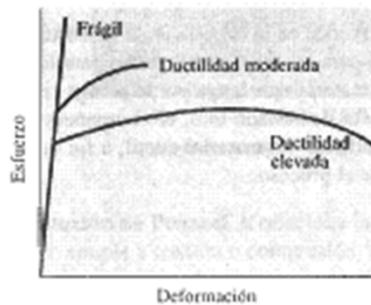
## PROPIEDADES MECÁNICAS

### ENSAYE DE FLEXIÓN PARA MATERIALES FRÁGILES

En los materiales dúctiles la curva esfuerzo-deformación generalmente pasa por un valor máximo. Este esfuerzo máximo es la resistencia del material a la tensión

La falla ocurre a un esfuerzo menor después de que el encuellamiento ha reducido el área de la sección transversal que soporta la carga.

En materiales muy frágiles, incluyendo muchos cerámicos, el esfuerzo de cedencia, la resistencia a la tensión y el punto de ruptura tienen un mismo valor.



**FIGURA 6-7** Comportamiento mecánico en el ensayo de tensión de materiales frágiles, en comparación con materiales más dúctiles.

## PROPIEDADES MECÁNICAS

En muchos materiales frágiles no se puede efectuar con facilidad el ensayo de tensión debido a la presencia de defectos de superficie.

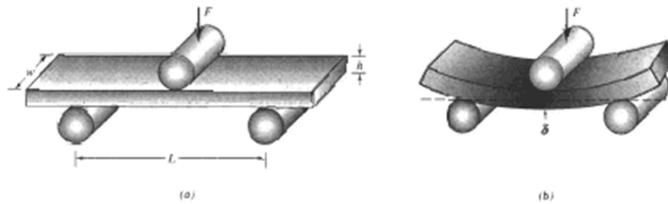
A menudo con solo colocar el material frágil en la mordaza de la máquina este se rompe.

La carga se aplica en tres puntos causando flexiones al actuar una fuerza que provoca tensión en tres puntos sobre la superficie de la muestra. La resistencia a la flexión o módulo de ruptura será:

$$\text{Resistencia a la flexión} = \frac{3FL}{2wh^2}$$

El esfuerzo se es en función de deflexiones, en vez de deformaciones, como es el caso de los metales.

El módulo de elasticidad en este caso será:  $\text{Módulo elasticidad} = \frac{L^3 F}{4wh^3 \delta}$



**FIGURA 6-8** (a) Ensayo de flexión utilizado para medir la resistencia de materiales frágiles. y (b) deflexión  $\delta$  obtenida durante la flexión de la probeta.

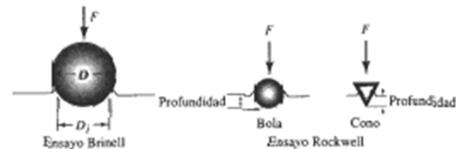
## PROPIEDADES MECÁNICAS

**El ensayo de dureza:** Mide la resistencia de la superficie de un material a la penetración por un objeto duro (Rockwell, Brinell).

**Ensayo de dureza Rockwell:** una esfera de acero duro (10 mm de diámetro, D) se oprime sobre la superficie del material y se mide el diámetro ( $D_i$ ) de la impresión generada. El índice de dureza (HB) es:

$$HB = \frac{F}{(\pi/2)D(D - \sqrt{D^2 - D_i^2})}$$

**Ensayo de dureza Rockwell,** utiliza una pequeña bola de acero, para materiales blandos o una punta de diamante, para materiales duros. La profundidad de penetración la mide directamente el instrumento.



**FIGURA 6-11** Ensayos de dureza Brinell y Rockwell.

## PROPIEDADES MECÁNICAS

**TABLA 6-5** Comparación de ensayos de dureza típicos

Ensayo	Penetrador	Carga	Aplicación
Brinell	Bola de 10 mm	3000 kg	Hierro y acero fundidos
Brinell	Bola de 10 mm	500 kg	Aleaciones no ferrosas
Rockwell A	Cono de diamante	60 kg	Materiales muy duros
Rockwell B	Bola de 1/16 plg	100 kg	Latón, acero de baja resistencia
Rockwell C	Cono de diamante	150 kg	Acero de alta resistencia
Rockwell D	Cono de diamante	100 kg	Acero de alta resistencia
Rockwell E	Bola de 1/8 plg	100 kg	Materiales muy suaves
Rockwell F	Bola de 1/16 plg	60 kg	Aluminio, materiales suaves
Vickers	Pirámide de diamante	10 kg	Materiales duros
Knoop	Pirámide de diamante	500 g	Todos los materiales

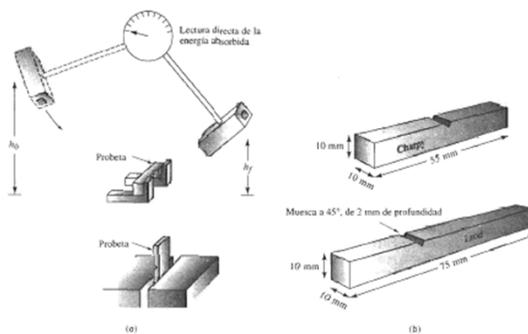
## PROPIEDADES MECÁNICAS

**Ensayo de impacto** (mide la tenacidad del material): El material se somete a un golpe súbito e intenso, donde la velocidad de aplicación del esfuerzo es extremadamente grande. La probeta **puede o no tener una muesca** (mide la propagación de grietas). Evalúa la fragilidad del material.

Un péndulo pesado inicia su movimiento desde una altura  $h_0$ , describe un arco y posteriormente golpea y rompe la muestra, llegando a una altura menor. La diferencia de alturas mide la energía potencial utilizada.

Ensayo Charpy (Lb-pié)

Ensayo Izod (Lb-pié/pulg)



**FIGURA 6-12** El ensayo de impacto: (a) Los ensayos Charpy e Izod, y (b) dimensiones de las probetas típicas.

## PROPIEDADES MECÁNICAS

**Ensayo de fatiga:** Es la aplicación cíclica de un esfuerzo inferior al esfuerzo de cedencia del material que ocurre como resultado de **rotación, flexión o vibración**.

Aún cuando el esfuerzo esté por debajo del límite elástico, el material puede fallar después de numerosas aplicaciones de dicho esfuerzo. Esta falla se conoce como **FATIGA**;

- Inicio de una grieta minúscula sobre la superficie.
- Propagación de la grieta
- Fractura del material (sección transversal muy pequeña)

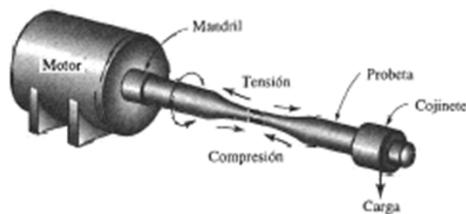


FIGURA 6-18 Ensayo de fatiga de viga en voladizo rotatorio.

El esfuerzo máximo que actúa sobre la probeta está dado por:

$$\sigma = \frac{10,18lF}{d^3}$$

l = longitud de la barra

F= Fuerza aplicada

d = Diámetro de la barra

## PROPIEDADES MECÁNICAS

Resultados del ensayo de fatiga:

- 1.- Indica el número de ciclos que resistirá la pieza o la carga máxima permisible que se puede aplicar (previene la falla del componente).
- 2.- Define criterios de diseño, considerando el esfuerzo límite para fatiga (50% de probabilidad de que la falla ocurra)
- 3.- La vida a fatiga indica cuánto resiste el material a un esfuerzo particular
- 4.- La resistencia a la fatiga es el esfuerzo máximo con el cual no ocurrirá fatiga en un número particular de ciclos.

$$\text{Relación de fatiga} = \frac{\text{Esfuerzo límite para fatiga}}{\text{Resistencia a la tensión}} = 0,5$$

## PROPIEDADES MECÁNICAS

### RESUMEN

El comportamiento mecánico de los materiales se describe a través de sus propiedades mecánicas que son el resultado de ensayos simples e idealizados. Están diseñados para representar distintos tipos de condiciones de carga. Las propiedades de un material reportados en distintos manuales, son el resultado de estas pruebas. Luego se debe recordar siempre que estos valores reportados, son valores promedio, obtenidos a partir de pruebas ideales, por lo tanto deben ser utilizados con precaución.

El ensayo de tensión describe la resistencia del material a un esfuerzo aplicado LENTAMENTE. Entre las propiedades importantes están el esfuerzo a la cedencia (cuando el material empieza a deformarse permanentemente), el módulo de elasticidad (pendiente en la región elástica de la curva esfuerzo-deformación), la resistencia a la tensión (esfuerzo correspondiente a la carga máxima aplicada), el porcentaje de elongación y el porcentaje de reducción de área (miden la ductilidad del material).

El ensayo de flexión se utiliza para determinar las propiedades a tensión de los materiales frágiles y se obtiene el módulo de elasticidad en flexión y la resistencia a la flexión.

## PROPIEDADES MECÁNICAS

El ensayo de dureza mide la resistencia de un material a la penetración y da una medida de su resistencia al desgaste y la abrasión (Rockwell y Brinell)

El ensayo de impacto describe la respuesta de un material a una carga aplicada rápidamente (Charpy, Izod). Mide la energía requerida para fracturar la probeta.

La tenacidad a la fractura describe la facilidad con la cual se propaga una grieta o defecto.

El ensayo de fatiga permite comprender el comportamiento de un material cuando se aplica un esfuerzo cíclico. Propiedades importantes son el esfuerzo límite a la fatiga (esfuerzo bajo el cual nunca ocurrirá la ruptura), resistencia a la fatiga (esfuerzo máximo para que falle la pieza, después de un número determinado de ciclos) y la vida en fatiga (número de ciclos que resistirá un material a un esfuerzo dado).

### Taller: Diseño de una varilla en suspensión

Una varilla de suspensión debe resistir una fuerza aplicada de 45000 libras. Para garantizar un factor de seguridad suficiente, el esfuerzo máximo que soporta la varilla es de 25000 libras/pulgada<sup>2</sup>. La varilla debe tener por lo menos 150 pulgadas de largo, pero debe deformarse elásticamente más de 0,25 pulgadas al aplicar la fuerza. Diseñe la varilla apropiada.

a) De la tabla que se indica, ¿Qué material utilizaría?.

b) ¿Cuál sería el diámetro de la varilla si el factor de seguridad es 1,5?

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

$$\sigma = F/A \Rightarrow \sigma = \varepsilon \cdot E$$

Material	$T_m$ (°C)	E		$\mu$
		(psi)	(GPa)	
Pb	327	$2.0 \times 10^6$	(13.8)	0.45
Mg	650	$6.5 \times 10^6$	(44.8)	0.29
Al	660	$10.0 \times 10^6$	(69.0)	0.33
Cu	1085	$18.1 \times 10^6$	(124.8)	0.36
Fe	1538	$30.0 \times 10^6$	(206.9)	0.27
W	3410	$59.2 \times 10^6$	(408.3)	0.28
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2020	$55.0 \times 10^6$	(379.3)	0.26
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>		$44.0 \times 10^6$	(303.4)	0.24

$$\text{Factor de seguridad } n = \frac{\text{Resistencia verdadera}}{\text{Resistencia requerida}}$$