

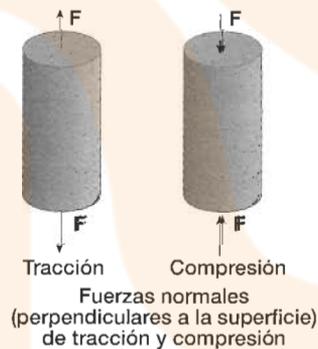
## Sugerencias Didácticas

- En esta Unidad se profundizan y amplían los contenidos de la Unidad 11 de nuestro texto de Primer Curso de Bachillerato. Se abordará el estudio de los diferentes tipos de ensayos que se llevan a cabo para determinar las propiedades de los materiales y se comenzará estableciendo una serie de criterios que hagan posible una clasificación sistemática de los mismos.
- En cada uno de los ensayos considerados se analizará no sólo su forma de realización sino también el significado de los resultados obtenidos, procurando relacionarlos con la aplicación a la que el material va a ser destinado.
- Cuando se trate de ensayos diferentes de una misma propiedad, conviene considerar en cada caso sus ventajas e inconvenientes, sopesando su posibilidad de aplicación en unas condiciones concretas.
- Se deberá hacer hincapié en el carácter destructivo de la mayor parte de estos ensayos, lo que implica la necesidad de realizar un muestreo cuidadoso, seleccionando estadísticamente aquellas piezas que hayan de someterse a la prueba en cuestión.
- Dado el uso frecuente de unidades SI y TT en los problemas de Tecnología, éstos se resolverán utilizando indistintamente ambos sistemas.

## SOLUCIONES a las Actividades propuestas

Pág.  
13

- Las fuerzas de *tracción* y de *compresión* son aquellas que actúan en dirección perpendicular a la superficie de los cuerpos materiales hacia fuera o hacia dentro, respectivamente, provocando un aumento o una disminución de sus dimensiones longitudinales. El efecto producido en ambos casos es una deformación del material.



*Tensión* ( $\sigma$ ) es la fuerza –de tracción o de compresión– aplicada por unidad de sección; es decir, si la sección inicial es  $S_0$ , la tensión viene dada por:

$$\sigma = \frac{F}{S_0}$$

Su unidad en el Sistema Internacional es el  $\text{N}/\text{m}^2 = \text{Pa}$ .

La tensión ( $\vec{\sigma}$ ) es una magnitud vectorial de la misma dirección y sentido que la fuerza aplicada a la superficie del material, aunque en muchos casos –como, por ejemplo, en el ensayo de tracción– únicamente interesa su módulo.

La tensión se puede descomponer en dos vectores: uno perpendicular a la superficie, que recibe el nombre de *tensión normal* ( $\vec{\sigma}_n$ ), y otro que es la proyección de  $\vec{\sigma}$  sobre la superficie, denominada *tensión tangencial* o *cortante* ( $\vec{\tau}$ ).

- En un diagrama tensión-deformación típico de un metal, obtenido en un ensayo de tracción, se pueden apreciar dos zonas claramente diferenciadas:

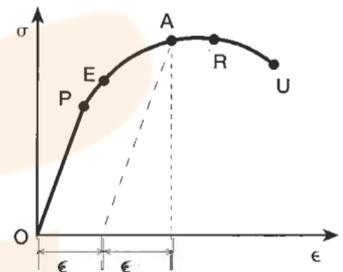


Diagrama tensión-deformación

- Zona elástica (OE):** la deformación experimentada por la probeta no es permanente; es decir, si en cualquier punto entre O y E se detiene el ensayo, la probeta recuperará su longitud inicial.
- Zona plástica (EU):** los alargamientos son permanentes, de manera que si el ensayo se detiene, por ejemplo, en el punto A, la probeta recupera la deformación elástica ( $\epsilon_e$ ), persistiendo al final una deformación remanente o plástica ( $\epsilon_p$ ). Si se reinicia de nuevo el ensayo, la nueva curva de tracción coincidirá prácticamente con la curva de descarga y, como se puede comprobar, la zona elástica se hace mayor. Con esta operación se consigue lo que se llama un *endurecimiento por deformación*.

Dentro de la zona elástica se distinguen dos partes diferentes:

- Zona proporcional (OP):** existe una relación de proporcionalidad entre la tensión y la deformación experimentada por la probeta, de tal forma que se cumple:

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

siendo  $E$  el módulo de Young o módulo de elasticidad longitudinal, medido en  $\text{N}/\text{m}^2$  en el Sistema Internacional.

- Zona no proporcional (PE):** las deformaciones no son permanentes: si se detiene el ensayo y se deja de aplicar fuerza a la probeta, esta recobra su longitud inicial, pero no existe una relación de proporcionalidad entre la tensión y la deformación.

Dentro de la zona plástica se distinguen también dos zonas:

- **Zona de deformación plástica uniforme (ER):** la curva se hace más tendida, de tal forma que no es necesario un incremento de carga elevado para conseguir grandes alargamientos. La fuerza máxima dividida entre la sección inicial de la probeta determina la **resistencia a la tracción ( $\sigma_R$ )**, punto en el que finaliza la zona plástica de deformación uniforme.

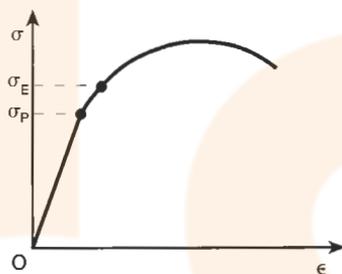
- **Zona de estricción o de deformación plástica localizada (RU):** la deformación se localiza en una determinada zona de la probeta, la tensión disminuye y la probeta termina por romper en esa zona.



Deformación localizada

3. • **Límite de proporcionalidad ( $\sigma_p$ )** es la tensión a partir de la cual las deformaciones dejan de ser proporcionales a las tensiones.

- **Límite de elasticidad ( $\sigma_E, \sigma_v$ ):** es la tensión a partir de la cual las deformaciones en la probeta dejan de ser reversibles. Su valor es muy próximo al límite de proporcionalidad (aunque en la figura se han separado considerablemente para mayor claridad) y por lo general no suele hacerse distinción entre uno y otro. Esta tensión resulta difícil de medir en la práctica, ya que para ello es preciso aplicar una tensión a la probeta y posteriormente retirarla, para comprobar si ha recuperado o no la longitud inicial.



Límites de proporcionalidad y de elasticidad

- En caso de que la probeta recupere su longitud primitiva, el límite de elasticidad será superior a la tensión aplicada, y se debe continuar el ensayo utilizando tensiones cada vez mayores.

- Si la probeta muestra una deformación permanente, la tensión aplicada será superior al límite de elasticidad. Una vez deformada plásticamente, la probeta queda inservible para este ensayo y se deberá continuar acotando inferior y superiormente el límite de elasticidad utilizando otras probetas del mismo material.

- **Alargamiento de rotura (A):** es el mayor alargamiento plástico alcanzado por la probeta (recuérdese que ésta experimenta alargamiento plástico y elástico) en el ensayo. Se mide en tanto por ciento mediante la siguiente expresión:

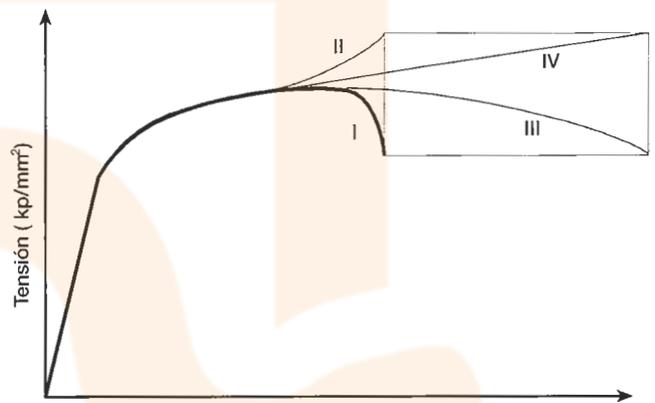
$$A(\%) = \frac{L_f - L_0}{L_0} \cdot 100$$

siendo  $L_f$  la longitud de la probeta después del ensayo, medida acoplando las dos partes en que queda dividida. Sin embargo, la deformación máxima que experimenta la probeta no es ésta, sino la que adquiere justo en el momento anterior a la rotura, ya que cuando ésta se produce la parte de la deformación elástica almacenada en la probeta se recupera.

4. En las **curvas de tracción aparente** se representa la tensión aparente ( $\sigma = F/S_0$ ) en función de la deformación aparente ( $\epsilon = \Delta L/L_0$ ), siendo  $S_0$  y  $L_0$  la sección y la longitud iniciales de la probeta.

Sin embargo, a medida que transcurre el ensayo, la sección de la probeta va disminuyendo paulatinamente y su longitud aumentando, lo que nos permite definir en todo momento la tensión verdadera ( $\sigma_v = F/S$ ) y la deformación verdadera ( $\epsilon_v = \Delta L/L$ ), siendo  $S$  y  $L$  la sección y la longitud de la probeta en cada instante. La representación gráfica de la tensión verdadera en función de la deformación verdadera constituye la llamada **curva de tracción verdadera**.

En la figura se representan con los números I y II la curva de tracción aparente y la de la tracción verdadera en función de la deformación aparente, respectivamente. Como se puede comprobar, en la zona de estricción se produce un descenso de la curva I; es decir, la fuerza aplicada a la probeta disminuye, pero como también se reduce la sección de forma localizada, la tensión verdadera continúa aumentando.



Diagramas de tracción aparente y de tracción verdadera

En la curva III se representa la tensión aparente en función de la deformación verdadera. En ella se aprecia que en la zona de estricción la deformación verdadera se incrementa considerablemente, mientras que la deformación aparente apenas aumenta de valor, ya que en este punto del ensayo únicamente se produce deformación en una zona localizada de la probeta.

Por último, con el número IV se representa la curva de tracción verdadera ( $\sigma_v - \epsilon_v$ ). Esta curva apenas se utiliza, ya que es difícil de obtener en la práctica, pues para ello se debe conocer la sección de la probeta en cada instante del ensayo.

En muchos metales la tensión y deformación verdaderas están ligadas por la relación de Hollomon:

$$\sigma_v = K \cdot \epsilon_v^n$$

donde  $K$  y  $n$  son constantes características del material.

1. La dureza de un material se suele entender como la resistencia que ofrece a ser rayado o penetrado por una pieza de otro material diferente. Depende de la elasticidad del material y de su estructura cristalina. Así, en los metales puros la dureza aumenta proporcionalmente a la cohesión y al número de átomos por unidad de volumen. Y en las aleaciones aumenta con los tratamientos térmicos, o con el endurecimiento por deformación.

La dureza es una propiedad de gran importancia práctica, ya que está ligada al comportamiento de un material frente a la abrasión o desgaste y a la facilidad con que puede ser sometido a mecanizado.

La dureza es una propiedad que no está claramente definida, ni se puede medir de una forma absoluta, de manera que siempre es necesario hacer referencia al método de medida utilizado. A este respecto, se pueden mencionar dos tipos distintos de ensayos de dureza:

- Ensayos de dureza al rayado. Entre ellos se pueden citar la escala de Mohs y la dureza Martens.
- Ensayos de dureza a la penetración, tales como los Brinell, Vickers y Rockwell.

2. • El método de la escala de Mohs consiste en comparar el material que se pretende analizar con 10 minerales tomados como patrones, numerados del 1 al 10 en orden creciente de dureza, según la llamada *escala de Mohs*: talco (1), yeso (2), calcita (3), fluorita (4), apatito (5), feldespato (6), cuarzo (7), topacio (8), corindón (9) y diamante (10).

Un material es rayado por los que tienen un número superior y raya a los que poseen un número inferior. Por ejemplo, un material que sea rayado por el topacio y que a su vez raye al cuarzo posee una dureza comprendida entre 7 y 8.

- En el ensayo de Martens se emplea un cono de diamante con el que se raya la superficie del material cuya dureza se quiere medir. La dureza al rayado Martens es el inverso de la anchura de la raya obtenida cuando se aprieta con una fuerza determinada y constante el cono de diamante contra la superficie del material. Se utiliza precisamente el valor inverso de la anchura de la raya para que a los materiales más duros, en los que el cono deja una huella menor, les corresponda una mayor dureza, de manera similar a la escala de Mohs.

3. El ensayo Brinell presenta los siguientes inconvenientes:
  - No se puede realizar sobre superficies esféricas o cilíndricas.
  - Se cometen grandes errores en la medida del diámetro de la huella cuando la deformación es pequeña.
  - Únicamente es aplicable en el caso de materiales de durezas no muy altas. Esta condición viene impuesta por la propia dureza del penetrador, como se muestra en la tabla.

Clase de bola	Dureza Brinell máxima
Acero no endurecido por deformación	450 kp/mm <sup>2</sup>
Acero endurecido por deformación en frío	500 kp/mm <sup>2</sup>
Metal duro	700 kp/mm <sup>2</sup>

En comparación con la prueba Brinell, el ensayo Vickers presenta las siguientes ventajas:

- No es necesario sustituir el penetrador al variar la carga.
- Se puede utilizar en superficies curvas.
- El valor de la dureza es prácticamente independiente del valor de la carga.
- La prueba se puede realizar sobre materiales muy duros.

El ensayo Rockwell, por su parte, es el más utilizado, debido a su rapidez de medida y al pequeño tamaño de las huellas que ocasiona; sin embargo, su exactitud es menor que la de los dos ensayos anteriores.

Pág.  
20

1. Los ensayos de resistencia al impacto se realizan usualmente mediante dos tipos de pruebas:
  - Tracción por choque.
  - Flexión por choque.

Los ensayos de flexión por choque (ensayos de resiliencia o ensayos Charpy) son los que se utilizan preferentemente, debido a que la preparación de las probetas resulta mucho más económica.

2. • La tenacidad es la propiedad inversa a la fragilidad y se define como la capacidad que tiene un material para almacenar energía en forma, por lo general, de deformación plástica antes de romperse.

Un material muy tenaz se deformará en gran medida antes de producirse su rotura; en cambio, un material frágil o poco tenaz, apenas experimentará deformación alguna.

- Recibe el nombre de ductilidad la capacidad de deformación plástica que poseen algunos materiales (metales, por lo general) para poder ser estirados en alambres; es decir, la capacidad de experimentar alargamientos cuando se someten a fuerzas de tracción.

En general, los materiales muy dúctiles, en los que se producen alargamientos elevados antes de llegar a la rotura, suelen ser más tenaces que aquéllos cuyo alargamiento es menor.

Pág.  
25

1. Por lo general, los ensayos científicos y tecnológicos, al contrario que los no destructivos, suponen una alteración profunda de las propiedades mecánicas de la pieza, que queda, así, inutilizada para una posible aplicación posterior.

Por otra parte, los ensayos científicos permiten obtener valores precisos y reproducibles de las propiedades ensayadas, pues las condiciones a las que se somete el material se encuentran convenientemente normalizadas, mientras que los ensayos tecnológicos se utilizan para comprobar si las propiedades de un determinado material o de una pieza son adecuadas para una cierta utilidad, o si éstas son las que se presuponen.

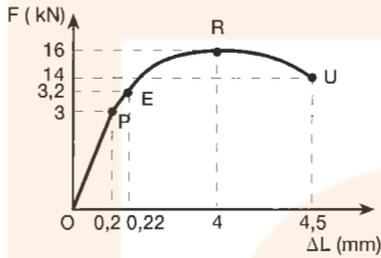
2. El rollo de alambre es un producto terminado, y no puede someterse a ensayos científicos o tecnológicos, pues ello implicaría inutilizar la pieza de alambre para su venta posterior. Lo único que el comprador podría hacer sería efectuar ensayos no destructivos de control de defectos.
3. Los rayos X producen alteraciones en las células de los organismos vivos. Por lo tanto, al efectuar pruebas de rayos X con seres humanos no puede entenderse propiamente que se trate de ensayos no destructivos.

**SOLUCIONES a las Actividades de Síntesis**

1. Citaremos algunos ensayos, a modo de ejemplo:

- Ensayos de tracción y de dureza: científicos, mecánicos, destructivos, estáticos.
- Ensayos de tracción por choque: científicos, mecánicos, destructivos, estáticos.
- Ensayo de flexión por choque: científico, mecánico, destructivo, dinámico.

2. Conociendo los valores de las distintas fuerzas aplicadas y la sección inicial de la probeta se puede calcular en cualquier instante la tensión aparente. Por otra parte, la deformación aparente correspondiente a cada fuerza de tracción se calcula conociendo el alargamiento y la longitud inicial. Representando, a continuación, la tensión aparente en función de la deformación aparente se obtiene el diagrama pedido.



Para el punto P se cumple:

$$\sigma = \frac{F}{S_0} = \frac{3 \cdot 10^3 \text{ N}}{\pi \cdot \left(\frac{10^{-2} \text{ m}}{2}\right)^2} = 3,82 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$$

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{0,2 \text{ mm}}{100 \text{ mm}} = 2 \cdot 10^{-3}$$

Por lo tanto, el módulo de Young valdrá:

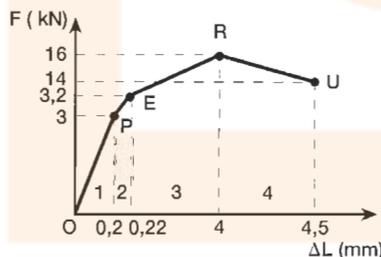
$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{3,82 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2}{2 \cdot 10^{-3}} = \boxed{1,91 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2}$$

En cuanto al alargamiento a rotura, su valor será:

$$A(\%) = \frac{L_F - L_0}{L_0} \cdot 100 = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100 = \frac{4,5 \text{ mm}}{100 \text{ mm}} \cdot 100 = \boxed{4,5 \%$$

3. El trabajo de deformación viene dado por el área comprendida bajo la curva  $F-\Delta L$ .

Suponiendo rectilíneos los tramos PE, ER y RU, esta superficie se puede considerar descompuesta en un triángulo y tres trapecios. De esta forma, el trabajo de deformación se calculará como la suma de los trabajos representados por las áreas de cada una de las figuras citadas.



$$W_1 = \frac{1}{2} \cdot 3 \cdot 10^3 \text{ N} \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 0,3 \text{ J}$$

$$W_2 = \frac{1}{2} \cdot (3 + 3,2) \cdot 10^3 \text{ N} \cdot (0,22 - 0,2) \cdot 10^{-3} \text{ m} = 0,062 \text{ J}$$

$$W_3 = \frac{1}{2} \cdot (3,2 + 16) \cdot 10^3 \text{ N} \cdot (4 - 0,22) \cdot 10^{-3} \text{ m} = 36,288 \text{ J}$$

$$W_4 = \frac{1}{2} \cdot (16 + 14) \cdot 10^3 \text{ N} \cdot (4,5 - 4) \cdot 10^{-3} \text{ m} = 7,5 \text{ J}$$

El trabajo total será:

$$W = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 = 0,3 \text{ J} + 0,062 \text{ J} + 36,288 \text{ J} + 7,5 \text{ J} = \boxed{44,15 \text{ J}}$$

4. El valor del módulo de Young, en unidades internacionales, es:

$$E = 2 \frac{\text{MN}}{\text{cm}^2} \cdot \frac{10^6 \text{ N}}{1 \text{ MN}} \cdot \frac{10^4 \text{ cm}^2}{1 \text{ m}^2} = 2 \cdot 10^{10} \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 20 \text{ GPa}$$

Como  $S_0 = 1 \text{ cm}^2$ , la tensión aplicada valdrá:

$$\sigma = \frac{F}{S_0} = \frac{8 \cdot 10^3 \text{ N}}{10^{-4} \text{ m}^2} = 8 \cdot 10^7 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 8 \cdot 10^7 \text{ Pa}$$

Esta tensión es inferior a la que corresponde al límite de proporcionalidad. Por lo tanto, en el punto considerado existirá proporcionalidad directa entre la tensión y la deformación, lo que permite calcular el alargamiento unitario:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{8 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2}{2 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2} = 4 \cdot 10^{-3} = \boxed{0,4 \%$$

El alargamiento que experimenta la barra se puede obtener fácilmente:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \Rightarrow 4 \cdot 10^{-3} = \frac{\Delta L}{10 \text{ cm}} \Rightarrow \boxed{\Delta L = 0,04 \text{ cm}}$$

Si la carga aplicada fuese de 80 kN, la tensión correspondiente sería:

$$\sigma = \frac{F}{S_0} = \frac{8 \cdot 10^4 \text{ N}}{10^{-4} \text{ m}^2} = 8 \cdot 10^8 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 800 \text{ MPa}$$

superior al límite de proporcionalidad. **Por lo tanto, el alargamiento unitario sería superior a  $\sigma/E$ .**

5. El alargamiento unitario que experimenta la barra es:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{0,5 \text{ mm}}{400 \text{ mm}} = 1,25 \cdot 10^{-3}$$

Para producir este alargamiento es necesaria una tensión:

$$\sigma = E \cdot \epsilon = 2,1 \cdot 10^6 \text{ kp/cm}^2 \cdot 1,25 \cdot 10^{-3} = 2,625 \cdot 10^3 \text{ kp/cm}^2$$

Por lo tanto, conociendo la fuerza aplicada se puede calcular la sección de la barra:

$$S = \frac{F}{\sigma} = \frac{8 \text{ 500 kp}}{2,625 \cdot 10^3 \text{ kp/cm}^2} = 3,238 \text{ cm}^2$$

y, a partir de ella, el diámetro:

$$S = \frac{\pi D^2}{4} \Rightarrow D = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3,238 \text{ cm}^2}{\pi}} = \boxed{2,03 \text{ cm}}$$

6. La fuerza de tracción mayorada es:

$$F = 1,2 \cdot 100 \text{ kN} = 120 \text{ kN} = 1,2 \cdot 10^5 \text{ N}$$

y el límite elástico minorado:

$$\sigma_E = \frac{500 \text{ MN/m}^2}{1,1} = 455 \text{ MN/m}^2 = 4,55 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$$

Por lo tanto, la sección mínima valdrá:

$$S_{\min} = \frac{F}{\sigma_E} = \frac{1,2 \cdot 10^5 \text{ N}}{4,55 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2} = 2,64 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 = \boxed{2,64 \text{ cm}^2}$$

El valor del módulo de Young, en unidades internacionales, es:

$$E = 2 \frac{\text{MN}}{\text{cm}^2} \cdot \frac{10^6 \text{ N}}{1 \text{ MN}} \cdot \frac{10^4 \text{ cm}^2}{1 \text{ m}^2} = 2 \cdot 10^{10} \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 20 \text{ GPa}$$

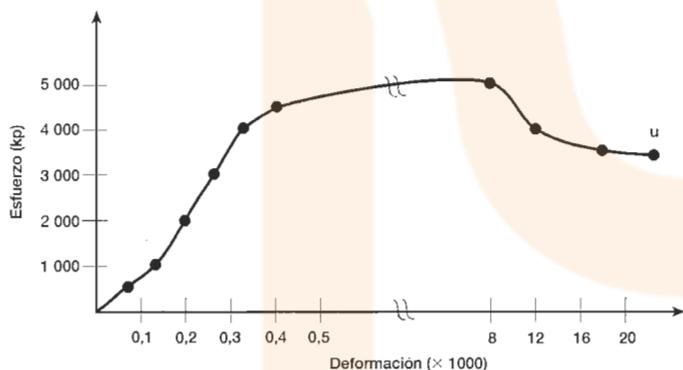
de manera que la deformación unitaria será:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{2,64 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2}{2 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2} = 0,019 = \boxed{1,9\%}$$

7. a) Construimos, en primer lugar, la siguiente tabla de valores:

Esfuerzo (kp/cm <sup>2</sup> )	Longitud de medida (mm)	Alargamiento (mm)	Deformación	Deformación x 1000
0	150	0	0	0
500	150,01	0,01	0,00007	0,07
1 000	150,02	0,02	0,00013	0,13
2 000	150,03	0,03	0,00020	0,20
3 000	150,04	0,04	0,00027	0,27
4 000	150,05	0,05	0,00033	0,33
4 500	150,06	0,06	0,00040	0,40
5 000	151,28	1,28	0,00853	8,53
4 000	151,87	1,87	0,01247	12,47
3 750 (rotura)	153,28	3,28	0,02187	21,87

Con ella se puede dibujar la gráfica esfuerzo-deformación pedida:



b) El valor del módulo de elasticidad, o módulo de Young, se calcula considerando la zona de comportamiento elástico de la probeta (0-1000 kp/cm<sup>2</sup>):

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{10^3 \text{ kp/cm}^2}{1,3 \cdot 10^{-4}} = \boxed{7,5 \cdot 10^6 \text{ kp/cm}^2}$$

c) En cuanto al alargamiento a rotura, su valor será:

$$A(\%) = \frac{L_F - L_0}{L_0} \cdot 100 = \frac{3,28 \text{ mm}}{150 \text{ mm}} \cdot 100 = \boxed{2,19\%}$$

8. La dureza del yeso en la escala de Mohs es 2. Por lo tanto, dicho elemento rayará al yeso, pues su dureza es mayor.
9. Para determinar el límite elástico de un material se realiza un ensayo de tracción (véanse páginas 8-13 del texto).

El ensayo de flexión es complementario del de tracción y se emplea en estructuras frágiles (madera, hormigón, fundición...) para determinar el módulo de Young y el límite de elasticidad en función de la fecha de la probeta que se ensaya.

El ensayo de Rockwell se utiliza para determinar la dureza del material y el de resiliencia para obtener su tenacidad (resistencia al choque).

10. a) En la parte expositiva del texto (página 15) se dedujo que la dureza Brinell de un material se calcula mediante la expresión:

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

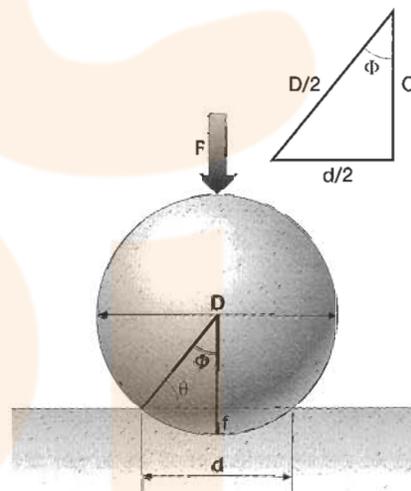
siendo  $D$  el diámetro de la esfera,  $d$  el de la huella y  $F$  la carga aplicada, cuyo valor es:

$$F = K \cdot D^2 = 30 \cdot 5^2 = 750 \text{ kp}$$

Por lo tanto, en este caso se cumplirá:

$$HB = \frac{2 \cdot 750 \text{ kp}}{\pi \cdot 5 \text{ mm} \cdot (5 \text{ mm} - \sqrt{(5 \text{ mm})^2 - (2,3 \text{ mm})^2})} = \boxed{170,4 \text{ kp/mm}^2}$$

b) En la figura se aprecia que la profundidad,  $f$ , de la huella es:



$$f = \frac{D}{2} - C = \frac{D}{2} - \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} = \frac{5 \text{ mm}}{2} - \sqrt{\left(\frac{5 \text{ mm}}{2}\right)^2 - \left(\frac{2,3 \text{ mm}}{2}\right)^2} = \boxed{0,28 \text{ mm}}$$

11. a) Estos resultados se refieren a la dureza Brinell del material, que se calcula dividiendo el valor de la fuerza aplicada al penetrador entre la superficie de la huella que éste produce en el material:  $HB = F/S$ .

Como la fuerza se suele expresar en kp y la superficie en mm<sup>2</sup>, la unidad de dureza Brinell será el kp/mm<sup>2</sup>. El ensayo Brinell para la determinación de la dureza aparece explicado en las páginas 15-16 del texto.

b) En los engranajes de acero interesa que la dureza exterior sea elevada, con objeto de reducir al máximo el desgaste de la rueda dentada o piñón, y evitar así su continua sustitución.

Por el contrario, la dureza interior debe ser más pequeña,

para conseguir una mejor amortiguación de los choques que se producen al engranar la rueda y el piñón, y disminuir de esta forma las posibilidades de rotura del engranaje.

Es necesario recordar que cuanto mayor sea la dureza de un acero, tanto más frágil será (disminuye su tenacidad; resiste peor los choques y los golpes). Por eso, aunque interesa que el acero de los engranajes sea duro exteriormente, hay que tener en cuenta que debe soportar los choques e impactos de los continuos engranes. Por ese motivo, es conveniente someterlo a un proceso de temple superficial, que aumenta no sólo su dureza sino también la resistencia al rozamiento; y que se consigue utilizando un soplete oxia-cetilénico, o bien por inducción, enfriando a continuación rápidamente por medio de un chorro de agua a presión.

12. La dureza del material es:

$$HB = \frac{2 \cdot 3000 \text{ kp}}{\pi \cdot 10 \text{ mm} \cdot \left(10 \text{ mm} - \sqrt{(10 \text{ mm})^2 - (5 \text{ mm})^2}\right)} = 142,5 \text{ kp/mm}^2$$

Para que los resultados sean comparables se debe cumplir la relación de proporcionalidad:

$$F = K \cdot D^2$$

• En el primer caso:

$$3000 \text{ kp} = K \cdot (10 \text{ mm})^2 \Rightarrow K = 30 \text{ kp/mm}^2$$

• En el segundo:

$$750 \text{ kp} = K \cdot (5 \text{ mm})^2 \Rightarrow K = 30 \text{ kp/mm}^2$$

Como el valor de  $K$  es el mismo, en el segundo ensayo se obtendría el mismo valor para la dureza. El diámetro de la huella se calcula aplicando la expresión:

$$HB = \frac{2F}{\pi \cdot D \cdot \left(D - \sqrt{D^2 - d^2}\right)} \Rightarrow 142,5 \text{ kp/mm}^2 = \frac{2 \cdot 750 \text{ kp}}{\pi \cdot 5 \text{ mm} \cdot \left(5 \text{ mm} - \sqrt{(5 \text{ mm})^2 - d^2}\right)}$$

De aquí resulta:  $d = 2,5 \text{ mm}$

13. a) Observando los datos de la tabla, se aprecia que para un espesor de 8 mm de la chapa de acero aleado, el diámetro de la bola utilizada en el ensayo ha de ser:

$$D = 10 \text{ mm}$$

y la constante del ensayo:  $K = 10 \text{ kp/mm}^2$

Como  $F = K \cdot D^2 = 10 \text{ kp/mm}^2 \cdot (10 \text{ mm})^2 = 1000 \text{ kp}$ , la dureza del acero será:

$$HB = \frac{2F}{\pi \cdot D \cdot \left(D - \sqrt{D^2 - d^2}\right)} = \frac{2 \cdot 1000 \text{ kp}}{\pi \cdot 10 \text{ mm} \cdot \left(10 \text{ mm} - \sqrt{(10 \text{ mm})^2 - (4 \text{ mm})^2}\right)} = 76,3 \text{ kp/mm}^2 = 76,3 \text{ HB}$$

b) Como para este tipo de aceros el coeficiente de  $\sigma_R$  es 0,34, la resistencia aproximada a la rotura por tracción valdrá:

$$\sigma_R = 0,34 \cdot 76,3 \text{ kp/mm}^2 = 26 \text{ kp/mm}^2$$

14. Como  $h_1 = 0,01 \text{ mm}$  y  $h_3 = 0,144 \text{ mm}$ , se cumplirá que:

$$h_3 - h_1 = 0,134 \text{ mm}$$

y el valor de  $e$  será:

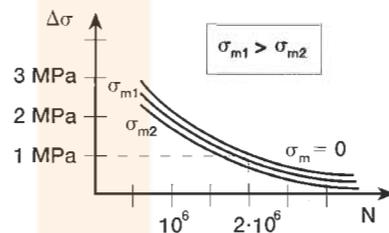
$$e = 0,134 \text{ mm} \cdot \frac{1 \text{ unidad } e}{0,002 \text{ m}} = 67$$

Por lo tanto, la dureza Rockwell B valdrá:

$$HRB = 130 - e = 130 - 67 = 63$$

15. Evidentemente, es necesario tener en cuenta que parte de la deformación  $h_3$  corresponde a deformación elástica recuperable.

16. Si se aplica una carga de tracción, la tensión media será distinta de cero y, por lo tanto, para la misma amplitud de tensiones,  $\Delta\sigma$ , el número de ciclos que puede soportar el material sin que se produzca la fractura será menor. En el diagrama de Wöhler de la figura se representan de una forma gráfica estas variaciones.



17. En un ensayo estático de tracción el trabajo de deformación es mayor, ya que al realizar este tipo de ensayos se da tiempo suficiente para que se produzcan deformaciones plásticas. En cambio, en un ensayo de tracción por choque la carga se aplica muy rápidamente, lo que no permite que aparezcan deformaciones plásticas.

18. La probeta de la parte superior se emplea en ensayos de resiliencia (ensayos Charpy), y la de la parte inferior en ensayos de tracción. La explicación de estos ensayos, así como las propiedades que permiten determinar, figuran en la parte positiva del texto.

19. La energía consumida por el material en la rotura será igual a la diferencia entre las energías potenciales gravitatorias de la maza al comienzo y al final:

$$W = P \cdot (h_1 - h_2) = m \cdot g \cdot (h_1 - h_2) = 20 \text{ kg} \cdot 10 \text{ m/s}^2 \cdot (1 \text{ m} - 0,6 \text{ m}) = 80 \text{ J}$$

El valor de la resiliencia será:

$$KCV = \frac{W}{S_0} = \frac{80 \text{ J}}{80 \text{ mm}^2 \cdot \frac{1 \text{ m}^2}{10^6 \text{ mm}^2}} = 10^6 \text{ J/m}^2$$

20. a) Cierta. No hay más que fijarse en el concepto de límite elástico de un material.

b) Falsa. Los materiales tenaces absorben mayor cantidad de energía al producirse su fractura. Por eso, la altura que alcanza la bola, una vez rota la probeta de un material tenaz, es menor que si se trata de un material frágil.

c) Cierta. La resiliencia de los materiales disminuye si la velocidad de aplicación de las cargas es elevada.

d) Falsa. La mayor parte de las propiedades de los materiales varían con la temperatura.

e) Falsa. Si la temperatura es muy baja, un material puede romper por fatiga o también por fractura frágil.