

2 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES. ENSAYOS DE MEDIDA

OBJETIVOS DIDÁCTICOS

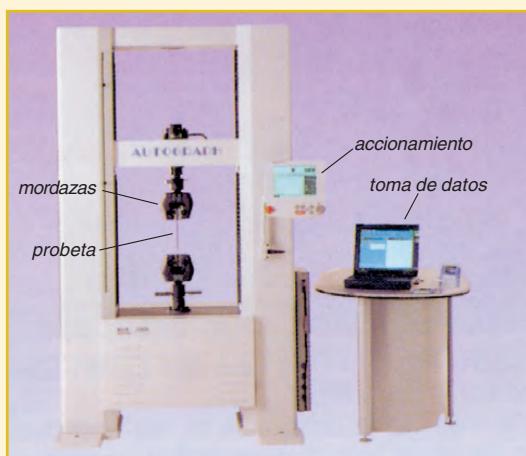
- Analizar las técnicas de ensayos mecánicos (tracción, compresión, flexión, resiliencia, fatiga...) destinadas a valorar las características constructivas de un producto.
- Observar probetas de ensayos metalográficos destinados a analizar la calidad y composición de diferentes materiales.
- Analizar las técnicas de ensayos no destructivos (líquidos penetrantes, partículas magnéticas, radiografía, ultrasonidos...) destinadas a conocer los defectos de un producto sin destruirlo.
- Analizar los procesos de realización de todos los ensayos, las máquinas y los útiles empleados, los datos obtenidos, las normas que los rigen...
- Describir la realización de los ensayos observando las normas de seguridad que los rigen para un correcto funcionamiento y resultado.
- Realizar ejercicios prácticos de cálculo con los datos obtenidos o simulados aplicando los conocimientos científicos de forma razonada.
- Diferenciar los distintos tipos de ensayos y elegir el más adecuado en función del estudio sobre el producto a fabricar.
- Incorporar en el lenguaje del alumnado un vocabulario técnico que le permita entender los conceptos y manejar los términos científicos de la U.D. con seguridad y de forma razonada.

CONOCIMIENTOS PREVIOS

- Tipos de materiales de uso industrial: características y aplicaciones.
- Propiedades fundamentales de los materiales (mecánicas, físicas, químicas y tecnológicas).
- Magnitudes físicas básicas: trabajo, fuerza, masa, potencia. Características y unidades.
- Esfuerzos típicos a los que puede estar sometido un material en situación de trabajo (tracción, compresión, flexión, torsión...).

CONTENIDOS DE LA UNIDAD DIDÁCTICA

- Introducción.
- Propiedades de los materiales. Revisión.
- Objeto y clasificación de los ensayos.
- Ensayos destructivos (ED) de tipo mecánico:
 - Ensayos de tracción, compresión, dureza, flexión, pandeo, torsión, cortadura, fatiga, resiliencia. Conceptos. Normas. Equipos. Técnicas operativas. Cálculos básicos.
 - Probetas, tipos, normas y técnicas de obtención.
- Ensayos tecnológicos: de la chispa, de plegado, de embutición, de forjado. Concepto. Características. Técnicas operativas.
- Ensayos no destructivos (END): eléctricos, líquidos penetrantes, partículas magnéticas, metalográficos, radiografía industrial (rayos X y gamma), ultrasonidos... Finalidad. Equipos empleados. Técnicas y operatorias. Aplicaciones.



Máquina de tracción.

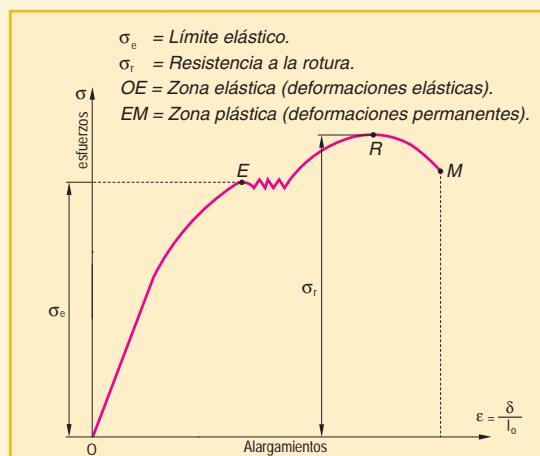


Diagrama de esfuerzos-deformaciones.



1. INTRODUCCIÓN

El perfeccionamiento técnico alcanzado en los últimos años exige materiales que resistan las duras condiciones de servicio que se les imponen (altas temperaturas, presión elevada, dureza o poco peso; ejemplo, la bicicleta de INDURAIN). Ello requiere un control (o ensayo) riguroso y frecuente de los mismos que permitan obtener información, tanto para mantener la calidad, como para introducir mejoras en los procesos de fabricación, lo que se traduce en una mayor seguridad y economía en la producción.

En general podemos agrupar los ensayos en dos grupos:

- **Ensayos destructivos** que inutilizan el material o la probeta empleada como muestra. Sirven para determinar características mecánicas y tecnológicas.
- **Ensayos no destructivos** que permiten el control de todas las piezas fabricadas al no existir rotura. Sirven para detectar defectos interiores, grietas y heterogeneidades.

Los **ensayos mecánicos, tecnológicos, físicos y químicos** a que pueden ser sometidos los materiales de uso industrial, en general, y los metálicos, en particular, merecen una atención especial para cualquier técnico, por la información que pueden proporcionar y las repercusiones en los métodos de fabricación del producto.

En esta U.D. se presentan y estudian los diferentes tipos de pruebas que se pueden realizar sobre un material metálico, se analizan los procesos seguidos, las máquinas y útiles empleados, los datos obtenidos y la influencia de estos datos en la elección del material más adecuado.

Partiendo de una revisión de las propiedades de los materiales estudiados en la U.D. 5 de *Tecnología Industrial I*, se pasan a analizar de forma práctica y sencilla

los ensayos de tracción, compresión, cortadura, torsión, dureza, resistencia, fatiga, tenacidad, resiliencia, análisis metalográfico, líquidos penetrantes, partículas magnéticas, rayos X y gamma, ultrasonidos y los ensayos químicos.

Se presentan también los tipos de probetas, las normas que las regulan y los procesos de obtención y preparación de las muestras en los ensayos más significativos (tracción, dureza, resiliencia, metalográficos...).

Se realizarán a la vez los cálculos necesarios derivados de los datos obtenidos en el ensayo, manejando las tablas de valores y equivalencias adecuadas.

2. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES: REVISIÓN

En la U.D. 5 de *Tecnología Industrial I*, se estudiaron las propiedades y características de los materiales. En el cuadro de la figura 1 presentamos un esquema de las más significativas y, a continuación, breve reseña de las más utilizadas para definir el estado de un material.

- **COHESIÓN.** Los átomos de un material se atraen entre sí. La fuerza que origina este fenómeno se llama cohesión.
- **ELASTICIDAD.** Es la capacidad que presentan ciertos materiales de deformarse por la acción de fuerzas exteriores y recobrar su forma primitiva al cesar estas fuerzas.
- **PLASTICIDAD.** Es la capacidad que tienen los materiales para adquirir deformaciones permanentes sin llegar a la rotura.
- **DUREZA.** Es la resistencia que oponen los cuerpos a dejarse rayar o penetrar por otros. La dureza de un cuerpo es directamente proporcional a su cohesión atómica.
- **RESISTENCIA A LA ROTURA.** Es el resultado de un ensayo, y se define como: "la carga específica (carga por unidad de sección) que es necesario aplicar a un material para producir su rotura".

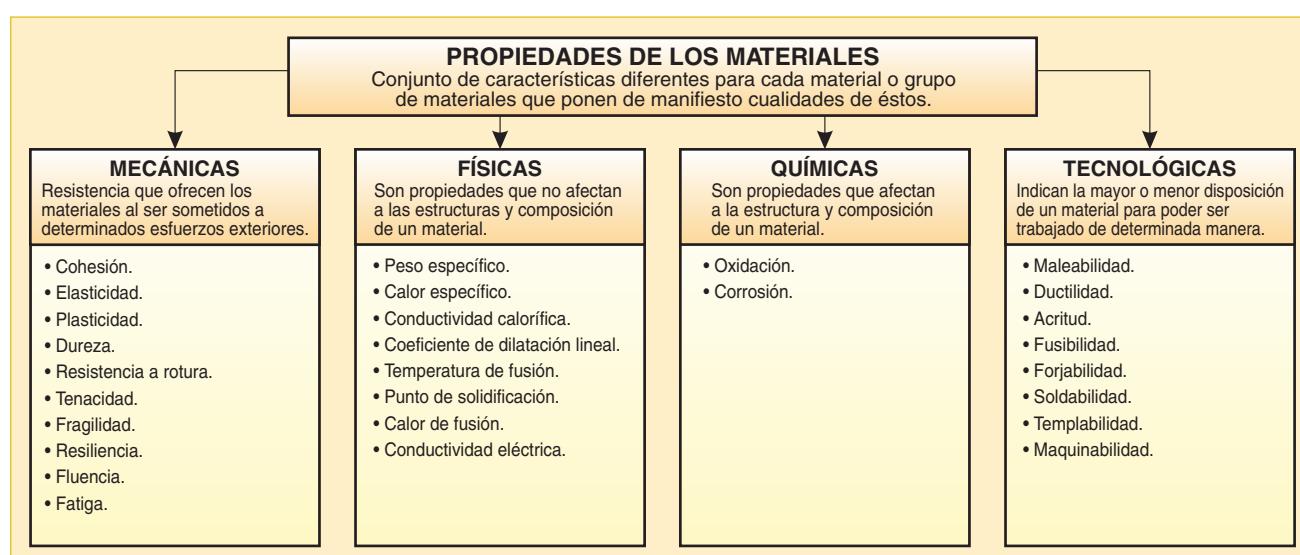


Fig. 1. Resumen de propiedades físicas de los materiales.





- **TENACIDAD.** Es la propiedad que tienen ciertos materiales de soportar, sin deformarse ni romperse, la acción de fuerzas exteriores. Se dice que un material es tanto más tenaz cuanto más energía absorbe antes de romperse. La tenacidad está relacionada con la cohesión atómica, en cuanto se refiere a esfuerzos de tracción, compresión y torsión.
- **FRAGILIDAD.** Es contraria a la tenacidad. Se dice que un material es frágil cuando rompe fácilmente por la acción de un choque.
- **RESILIENCIA.** Es en realidad el resultado de un ensayo, que consiste en romper una probeta del material a estudiar de un esfuerzo instantáneo. Se define como la energía absorbida por unidad de sección por un material al ser roto mediante un solo golpe.
- **FATIGA.** Al someterse un material a esfuerzos variables y repetidos con una determinada frecuencia, se rompe al transcurrir un cierto número de ciclos aunque el valor máximo de esos esfuerzos sea inferior a su límite elástico. A este comportamiento de los materiales se denomina **fatiga**, palabra que define intuitivamente el fenómeno.
- **MALEABILIDAD.** Es la capacidad que presenta un cuerpo para ser deformado mediante esfuerzos de compresión (aplastamiento), transformándose en láminas más o menos finas. Se puede realizar en frío o caliente.
- **DUCTILIDAD.** Es la capacidad que presenta un cuerpo para ser deformado mediante esfuerzos de tracción (alargamiento), transformándose en hilos.
- **MAQUINABILIDAD.** Es la propiedad de un material que indica la facilidad o dificultad que presenta éste para ser trabajado con herramientas cortantes arrancando pequeñas porciones llamadas virutas.
- **CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA.** Representa la mayor o menor facilidad que tienen los cuerpos para transportar la energía eléctrica por el seno de su masa.
- **RESISTIVIDAD ELÉCTRICA.** Es la resistencia que ofrece al paso de la corriente eléctrica un conductor por unidad de longitud y sección.

3. OBJETO Y CLASIFICACIÓN DE LOS ENSAYOS

En la actualidad existe una amplia gama de utilizaciones de los materiales, muchas de ellas de gran responsabilidad (por estar sometidas a temperaturas y presión elevadas, dureza, elasticidad, poco peso...); de ahí la necesidad de conocer con una gran exactitud las características de cada uno de ellos, tanto las referidas a composición, constitución y estructura, como su forma de comportarse ante cualquier agente externo, mecánico, químico, eléctrico...

Los **ensayos de materiales** tienen como objetivo poner de manifiesto, mediante un conjunto de métodos, en su mayoría normalizados, las propiedades de los materiales ensayados que en cada caso nos interesa conocer y cuya clasificación general se indica en el esquema de la **figura 2**.

La elección del material más adecuado para la construcción de un elemento mecánico exige el conocimiento previo de sus principales propiedades técnicas, como son:

- Características físicas y químicas.
- Aptitud para su conformación por deformación.
- Grado de homogeneidad de su estructura.
- Su resistencia mecánica.
- Su comportamiento en servicio.

Toda esta información nos la proporcionan los **ensayos de materiales** realizados sobre probetas normalizadas o sobre productos acabados.

Según el fin que se persiga, los ensayos pueden ser:

- Científicos.
- Técnicos.

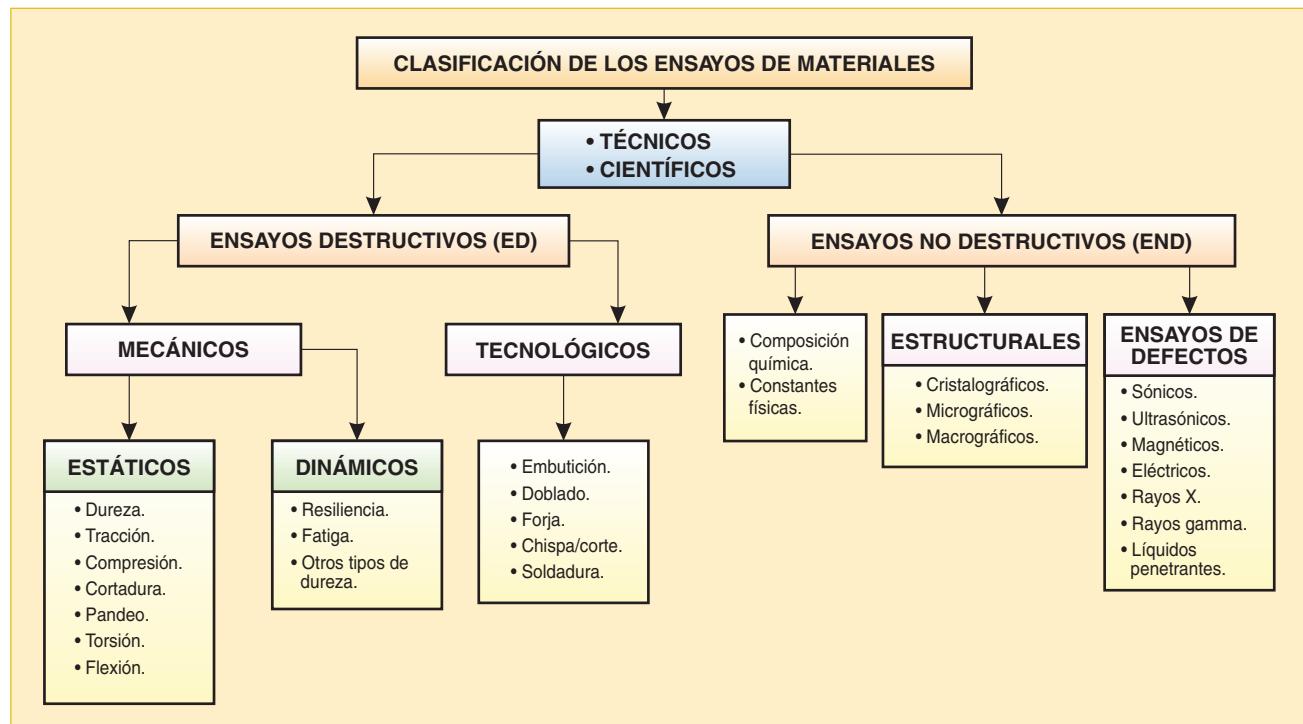


Fig. 2. Clasificación general de los ensayos de materiales.





Los **ensayos científicos** están destinados a:

- Conocer las propiedades de un nuevo material.
- Estudiar la influencia de la composición química.
- Poner a punto nuevos métodos de ensayo.
- Ensayar las piezas que han fallado en servicio para conocer las causas y evitarlas.

Los **ensayos técnicos** están destinados a controlar la producción de forma que se satisfagan ciertas normas perfectamente definidas. Se efectúan durante el proceso de fabricación en los laboratorios de fábrica y deben ser rápidos, sencillos y exactos.

Todos estos objetivos, tanto de los ensayos científicos como técnicos, se consiguen:

- Por métodos destructivos (ED). La probeta queda de algún modo dañada (rotura o huellas).
- Por métodos no destructivos (END). La probeta no sufre rotura.

Los procesos de realización, tanto en un caso como en el otro, incluyen trabajos de tipo:

- Químico.
- Físico – químico.
- Metalográfico.
- Mecánicos.

Por lo que se refiere a los **ensayos mecánicos**, en general son destructivos y sus objetivos son:

- Conocer las características elásticas y de resistencia de los materiales según el comportamiento de probetas normalizadas sometidas a esfuerzos.
- Determinar experimentalmente las tensiones que se desarrollan en piezas terminadas o prototipos cuando son sometidos a esfuerzos análogos a los soportados en servicio.

Por este procedimiento se puede decidir cambiar:

- La forma del elemento o pieza, diseñando otra más adecuada.
- El tipo de material de la pieza.
- Los tratamientos térmicos.

Según el tipo de esfuerzos a que están sometidas las probetas, los ensayos pueden ser:

- **Estáticos.** Son aquellos en los que la carga que se aplica es constante o progresivamente creciente.
- **Dinámicos.** Son aquellos en los que la carga es aplicada de forma brusca o es alternativamente variable con el tiempo.

4. ENSAYOS DESTRUCTIVOS (ED) DE TIPO MECÁNICO

Se trata de ensayos en los que la probeta muestra del material es analizada por procedimientos mecánicos que la inutilizan. Los ensayos pueden ser: estáticos (dureza, tracción, compresión, cortadura, pandeo, torsión y flexión) o dinámicos (otros tipos de dureza, resiliencia y fatiga).

4.1. Ensayos de dureza

La dureza, más que una propiedad de los materiales, es el resultado de un ensayo. En general podemos decir que la dureza es la resistencia superficial a la deformación

y, según el método que se emplee para medirla, podemos establecer la clasificación de la **figura 3**.



Fig. 3. Tipos de ensayos de dureza.

4.1.1. Ensayos de dureza al rayado

El proceso más antiguo para medir la dureza al rayado fue aplicado por el geólogo Friedrich Mohs (1773 – 1839) en 1820. Lo utilizó inicialmente en mineralogía y aún hoy sigue aplicándose. Industrialmente no tiene aplicación. La escala de Mohs está basada en los diez minerales de la **figura 4**.



Fig. 4. Dureza al rayado y escala de Mohs.

Para determinar la dureza de un material se intenta rayarlo con el cuerpo más duro que se conoce, que es el diamante, y se continúa probando con los siguientes materiales de la escala, de más duro a más blando, hasta llegar a un material que no es rayado por el cuerpo patrón de la escala, en cuyo caso se dice que el material tiene la dureza de este cuerpo o patrón.

- **Método Martens.** Utiliza un equipo con un cono de diamante cuyo ángulo de vértice es 90° y con el que hace una raya sobre el material cuya dureza queremos medir, desplazando el cono sobre la pieza y aplicando una carga constante. La anchura del surco se mide en micras (μ) y el valor de la dureza se calcula aplicando la ecuación:

$$\Delta_M = \frac{1.000}{a^2} \quad (\text{se expresa en } \mu)$$





- Método de rayado a la lima.** Se somete el material a la acción cortante de una lima de características determinadas, conservando el efecto cortante producido. Es un método muy rápido empleado en talleres para comprobar la dureza superficial después de un tratamiento térmico. La información proporcionada es aproximada y se puede afirmar que si una lima corriente no raya a un material, éste tendrá una dureza próxima a 60 HR_c.

4.1.2. Ensayos de dureza a la penetración

Los ensayos con penetrador permiten obtener la dureza de un material al someterlo a una carga determinada que origina una huella y por relaciones concretas nos permite calcular el valor de dicha dureza.

MÉTODO BRINELL

La prueba Brinell consiste en marcar sobre la superficie de la pieza a examinar una huella permanente, mediante un penetrador esférico de acero durísimo, al que se aplica una carga prefijada durante un tiempo concreto. El valor de la dureza HB es el cociente entre la carga (F) aplicada en kp y la superficie (S) de la huella en mm² (Figura 5).

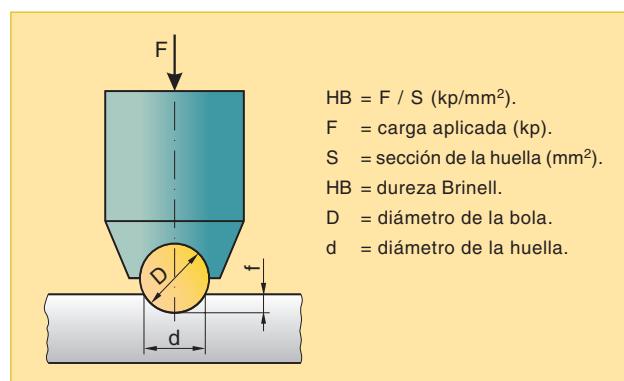


Fig. 5. Dureza Brinell.

Sabemos que la huella es un casquete esférico (Figura 6) en el que:

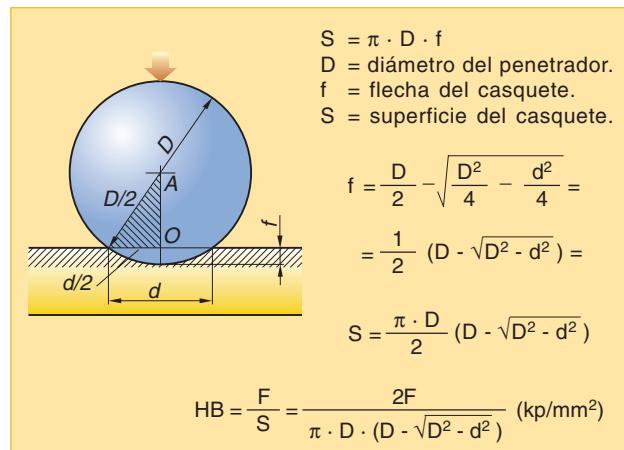


Fig. 6. Huella.

- Las **condiciones normales** del ensayo son:

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

$$F = 3000 \text{ kg.}$$

Tiempo de carga = 15 segundos.

Si las condiciones son distintas a las normales, debe añadirse al símbolo el diámetro de la bola, la carga y el tiempo. Ejemplo:

HB 5 / 750 / 20. Indica (bola 5 mm, carga 750 kg y tiempo 20 segundos).

- Carga a aplicar.** Depende del material a probar y del cuadrado del diámetro de la bola del penetrador. $F = K \cdot D^2$.

En la figura 7 se indican el valor de K para algunos materiales y el diámetro de la bola para determinados espesores.

Material	K	Espesor de la pieza (mm)	D
Materiales férricos (hierro y acero)	30	> 6	1; 2,5; 5; 10
Aleaciones ligeras	10	3 - 6	1; 2,5; 5
Bronce y latón	5	< 3	1; 2,5
Metales blandos (estaño - plomo)	2,5	< 2	1
Metales muy blandos	1,25		

Fig. 7. Valores de K y D.

Características del ensayo Brinell

- No es fiable en materiales muy duros y de poco espesor. Tiene limitaciones.
- No es recomendable para piezas cilíndricas y esféricas.
- No es recomendable para valores superiores a 500 HB si la bola del penetrador no es de carburo de wolframio.
- Para que el error del ensayo por deformación del material no sea muy grande, debe cumplirse:

$$\frac{D}{4} < d < \frac{D}{2}$$

- Las relaciones entre espesor de la pieza y el diámetro de la bola se indican en la figura 7.
- Permite por aproximación conocer el tipo de acero que se ensaya mediante la relación:

$$\% C = \frac{HB - 80}{141}$$

- Los valores de resistencia a tracción y la dureza de algunos materiales están tabulados según se indica en la figura 8.

Material	HB (kp/mm ²)	Material	Resistencia a la tracción (σ_t)
Acero al cromo	280	Acero al cromo	0,36 · HB
Fundición gris	180	Acero al Cr-Ni	0,34 · HB
Bronce	85	Aluminio	0,25 · HB
Latón	80	Aleaciones ligeras	0,28 · HB
Cinc	40	Cobre	0,55 · HB
Aluminio	16	Cinc	0,42 · HB
Estaño	14		
Plomo	7		

Fig. 8. Valores de dureza (HB) y resistencia a la tracción (σ_t).



- El tiempo de aplicación de la carga depende del material que se ensaya y oscila entre 10 segundos y 3 minutos. Cuanto más duro es el material, menor será el tiempo de aplicación (para aceros oscila entre 10 y 30 segundos).

Ejercicio 1

Para realizar un ensayo de dureza Brinell en un acero, se utiliza bola de diámetro $D = 8 \text{ mm}$, obteniéndose una huella de diámetro $d = 3 \text{ mm}$. Si la constante del ensayo es $K = 30$. Determinar:

- La carga utilizada.
- La dureza obtenida.
- El tanto por ciento de carbono del acero.
- La resistencia a la tracción del acero.
- Expresión del valor de la dureza Brinell si el tiempo de actuación es 12 segundos.

Solución

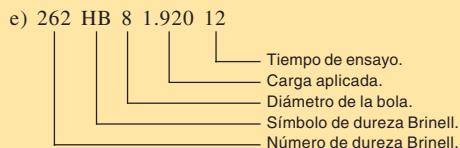
Datos: $D = 8 \text{ mm}$, $d = 3 \text{ mm}$ y $K = 30$

$$\text{a) } K = \frac{F}{D^2} \Rightarrow F = K \cdot D^2 = 30 \cdot 8^2 = 1.920 \text{ kp}$$

$$\text{b) } HB = \frac{2F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} = \frac{2 \cdot 1.920}{\pi \cdot 8 \cdot (8 - \sqrt{8^2 - 3^2})} = \frac{3.840}{14.6725} = 261,71 \text{ kp/mm}^2 \approx 262 \text{ kp/mm}^2$$

$$\text{c) } \% C = \frac{HB - 80}{141} = \frac{262 - 80}{141} = 1,2887 \% C$$

$$\text{d) } \sigma_r = 0,36 \text{ HB} = 0,36 \cdot 262 = 94,3 \text{ kp/mm}^2$$



MÉTODO VICKERS

El ensayo Vickers deriva directamente del método Brinell, pero sustituye el penetrador de bola por una punta piramidal de base cuadrada y ángulo en el vértice de 136° entre caras (Figura 9).

El valor de la dureza es: $Hv = F/S (\text{kp/mm}^2)$.

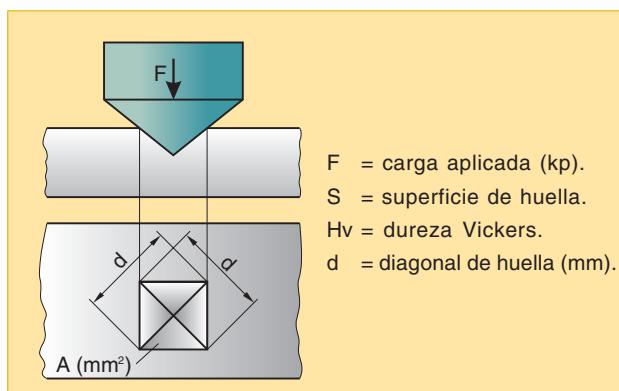


Fig. 9. Dureza Vickers.

La superficie $S = 4 \cdot \text{área de una cara}$. $S = 4 \cdot \frac{b}{2} \cdot OC$ (Figura 10).

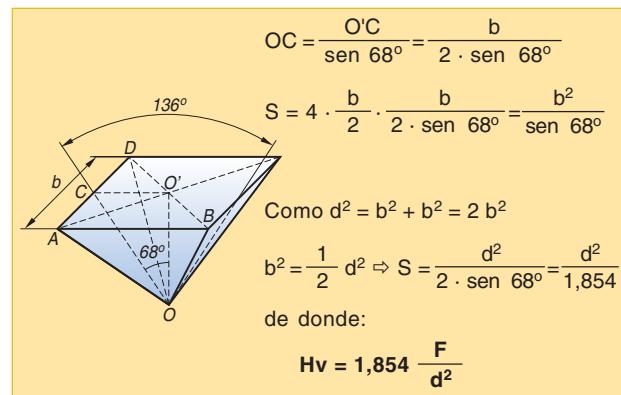


Fig. 10. Penetrador piramidal.

Características del ensayo Vickers

- Las **cargas aplicadas** son más pequeñas que en el método Brinell (oscilan entre 1 y 120 kp), suelen emplearse cargas de 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50, 100 y 120 kp. La más empleada es la de 30 kp.
- El **tiempo de aplicación** oscila entre 10 y 30 segundos, siendo 15 segundos el más empleado.
- Se **utiliza** tanto para materiales duros como en blandos y puede aplicarse en piezas muy delgadas ($e = 0,2 \text{ mm}$).
- Puede medir **dureza superficial** por la poca profundidad de la huella.
- La **expresión de la dureza** se indica por una expresión del tipo: 520 Hv 30/15 (520 número de dureza VICKERS, 30 kg de carga aplicada durante 15 segundos).

Ejercicio 2

Hemos templado un acero al carbono y para conocer su dureza utilizamos el método de Vickers. La carga aplicada ha sido de 30 kp y las diagonales de la huella miden $d_1 = 0,25 \text{ mm}$ y $d_2 = 0,26 \text{ mm}$. Calcular:

- El valor de la dureza del acero.
- Expresar el valor de la dureza Vickers si el tiempo es 15 segundos.

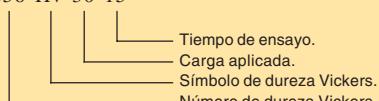
Solución

Datos: $F = 30 \text{ kp}$, $d_1 = 0,25 \text{ mm}$, $d_2 = 0,26 \text{ mm}$

$$\text{a) } d = \frac{d_1 + d_2}{2} = \frac{0,25 + 0,26}{2} = 0,255 \text{ mm}$$

$$\text{Hv} = \frac{F}{S} = \frac{F}{\frac{d^2}{2} \sin 68^\circ} = \frac{2F \sin 68^\circ}{d^2} = \frac{2 \cdot 30 \cdot \sin 68^\circ}{(0,255)^2} = \frac{55,631}{0,0650} = 855,53 \text{ kp/mm}^2 \approx 856 \text{ kp/mm}^2$$

$$\text{b) } 856 \text{ Hv } 30 \text{ 15}$$



MÉTODO ROCKWELL

El método Rockwell se diferencia de los anteriores en que la medida de la dureza se hace en función de la profundidad de la huella y no de su superficie.



La prueba Rockwell consiste en hacer penetrar, en dos tiempos, en la capa superficial de la pieza un penetrador de forma prefijada y medir el aumento permanente de la profundidad de penetración.

La unidad de medida se toma igual a 0'002 mm (2μ), por lo que la dureza Rockwell viene expresada por un número que indica cuántas veces el aumento contiene a la unidad convencional de medida.

F_0 = carga inicial en kp.

F_1 = carga adicional en kp.

F = carga total en kp.

Características del ensayo

- Para materiales blandos ($HB < 200$) el **penetrador** es una bola de acero de diámetro = 1,5875 mm (HRb). Para materiales duros ($HB > 200$) es un cono de diamante de 120° en la punta (HRc).
- Los valores de las **cargas** son:

Denominación	Penetrador	Carga (kp)		
		Inicial F_0	Adicional F_1	Total F
Rockwell B HRb	Bola de acero	10	90	100
Rockwell HRC	Cono de diamante	10	140	150

- El valor de las **penetraciones** según la carga es:
 - Profundidad con carga inicial F_0 vale h_0 .
 - Profundidad con carga $F_0 + F_1$ vale $h_{\text{máx}}$.
 - Profundidad permanente con carga F_0 al retirar la carga F_1 h_p .

Realización de la prueba

En cualquiera de los casos HRb o HRC la prueba consta de tres fases:

- Aplicación de la carga adicional $F_0 = 10$ kp para asentar el conjunto. Marca la huella h_0 .
- Aplicación de la carga suplementaria F_1 que origina la huella $h_{\text{máx}}$.
- Eliminar la carga F_1 . Reacción elástica del material que eleva al penetrador una cierta cantidad quedando la huella permanente.

El número que se lee sobre la escala del equipo después de retirar la carga F_1 marca la dureza Rockwell correspondiente al valor de la profundidad de huella permanente e . Cada unidad $e = 0,002$ mm.

$$\text{HRC} = 100 - e$$

$$\text{HRB} = 130 - e$$

En la figura 11 se muestran los sucesivos pasos a seguir para la realización de la prueba.

En los trabajos de dureza sobre materiales existen tablas de conversión que nos permiten pasar de un valor a otro con facilidad, pues son de sencillo manejo. De la misma forma existen escalas de relación como la indicada en la figura 12.

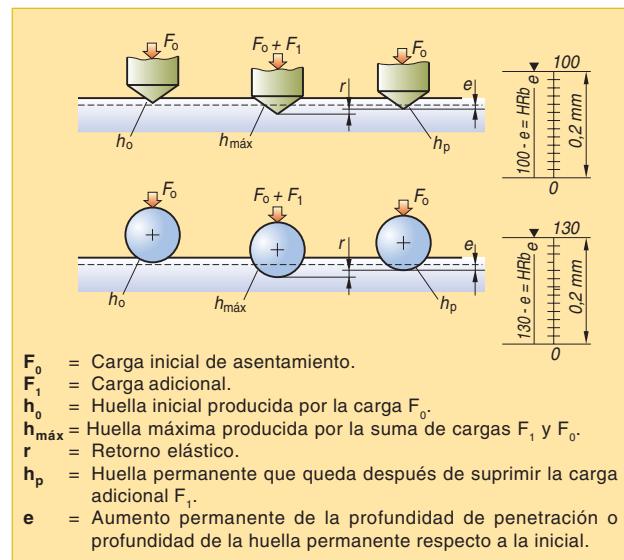


Fig. 11. Proceso de dureza HRc y HRb.

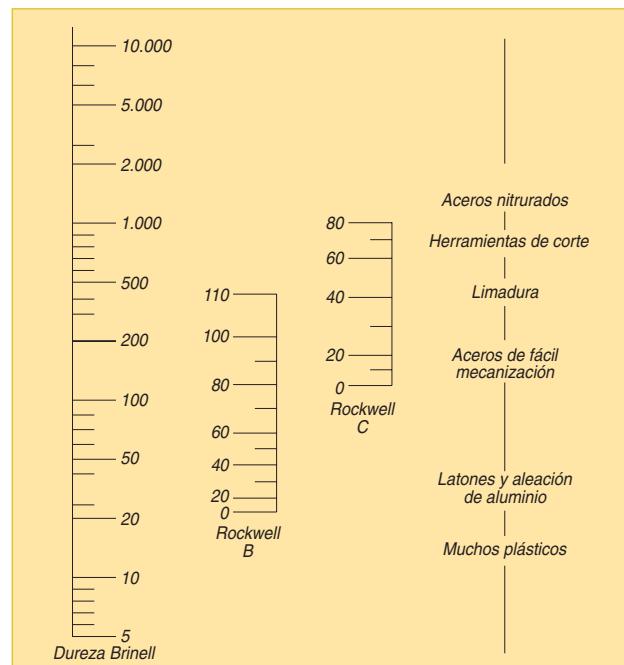


Fig. 12. Escalas de comparación HB - HRB - HRC.

Ejercicio 3

En un ensayo de dureza Rockwell cono, (HRC) al aplicar la carga de 10 kg el penetrador avanza 5 m. Al aplicar la carga de 140 kg avanza 87 m, y al retirar los 140 kg retrocede 3 m. Calcula la dureza HR_C de ensayo.

Solución

Datos: $F_0 = 10$ kg; $F_1 = 140$ kg; $e_1 = 5$ μ ; $e_2 = 87$ μ

Al aplicar la carga inicial $e_1 = 5$ m, esta penetración se desprecia y se pone la escala a cero.

La penetración será: $e_2 - e_1 = 87 - 5 = 82$ μ .

Como cada raya equivale a 2 μ (0,002 mm).

$$e = 41$$

$$\text{HRC} = 100 - e = 100 - 41 = \text{HRC} = 58$$



4.1.3. Ensayos dinámicos de dureza

En comparación con los ensayos estudiados, presentan la ventaja de la rapidez, comodidad y utilidad, ya que se pueden hacer en cualquier lugar por utilizar equipos portátiles. Por el contrario, su desventaja es la menor fiabilidad.

MÉTODO SHORE (HS)

Se basa en la reacción elástica del material sometido a la acción de un percusor que, después de chocar con la probeta a ensayar, rebota hasta una cierta altura (Figura 13). El número de dureza HS se deduce de la altura alcanzada en el rebote.

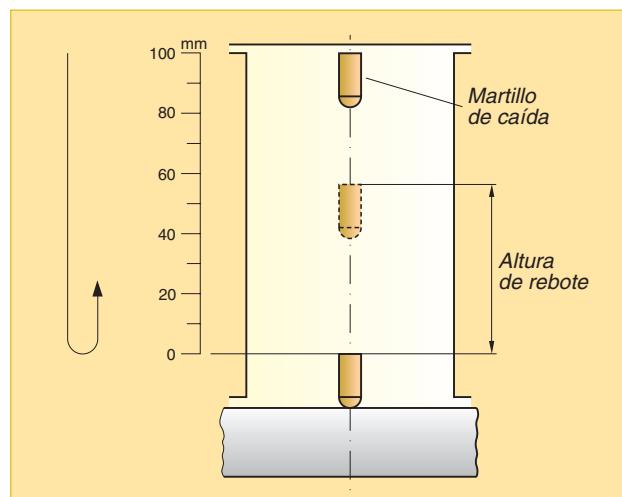


Fig. 13. Dureza Shore. Principio del ensayo.

Características del ensayo

- No es de gran precisión, pero es muy rápido.
- El equipo es fácil de manejar, poco voluminoso y de coste reducido.
- Apenas produce deformación en la probeta (no deja huella).
- Es muy apto para controlar grandes series y mecanizados al no dañar las piezas ni eliminar posibles capas superficiales tratadas.
- Por aproximación experimentada pueden calcularse los valores de otras durezas:
 - Para fundición gris: un grado HS \approx 5,25 HB.
 - Para aceros de contenido medio de carbono: un grado HS \approx 6,65 HB.
- Al no producir deformaciones, permiten aplicarse a todo tipo de materiales.

MÉTODO POLDI

Es un método de impacto que consiste en lanzar una bola de acero de 5 mm de diámetro sobre una probeta del material objeto de medida, de manera que el impulso produzca una huella permanente.

El equipo empleado es el representado en la figura 14. La dureza se calcula midiendo la huella con una lupa y trasladando el valor a unas tablas que acompañan el equipo.

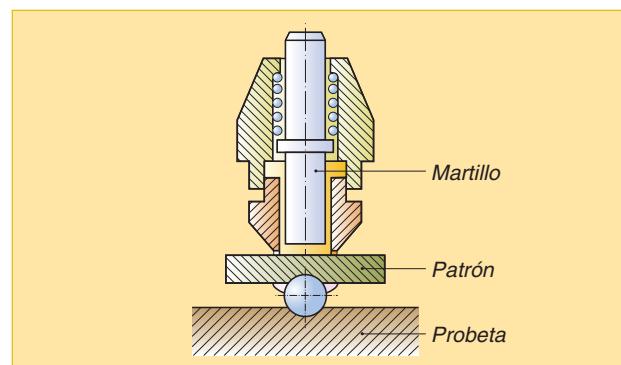


Fig. 14. Método de impacto de POLDI.

Otra forma de calcular la dureza es:

$$H = \frac{S_p}{S} H_p$$

H = dureza del material.
 S_p = superficie de la huella patrón.
 S = superficie de la huella en material.
 H_p = dureza de probeta patrón.

Ejercicio 4

En un ensayo de dureza por el método POLDI la probeta patrón tiene una dureza de 350 HB. El ensayo ha sido realizado con una esfera de diámetro 8 mm y se obtiene una huella de 3 mm de diámetro en la probeta patrón y 2,5 mm de diámetro en la probeta problema. Determinar el valor de la dureza del material ensayado.

Solución

Datos: $D = 8 \text{ mm}$; $d = 3 \text{ mm}$; $H_p = 350 \text{ HB}$; $d_1 = 3 \text{ mm}$ (huella patrón); $d_2 = 2,5 \text{ mm}$ (huella problema)

$$H = \frac{S_p}{S} H_p$$

$$S_p = \pi \cdot \frac{D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2}) = \pi \cdot \frac{8}{2} (8 - \sqrt{8^2 - 3^2})$$

$$S = \pi \cdot \frac{D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2}) = \pi \cdot \frac{8}{2} (8 - \sqrt{8^2 - 2,5^2})$$

$$H = \frac{350 \text{ HB} \cdot \pi \cdot \frac{8}{2} (8 - \sqrt{8^2 - 3^2})}{\pi \cdot \frac{8}{2} (8 - \sqrt{8^2 - 2,5^2})} = 509,98 \text{ HB}$$

$$H = 510 \text{ HB}$$

4.2. Ensayos destructivos de tipo mecánico y estáticos

Las acciones exteriores que pueden actuar sobre un cuerpo pueden ser de diversos tipos, destacando los siguientes:

- Tracción.
- Compresión.
- Cortadura o cizalladura.
- Flexión.
- Pandeo.
- Torsión.

Generalmente no suelen presentarse aislados. Es frecuente observar combinaciones de varios de ellos (compresión – flexión, tracción – flexión...).

ESFUERZO O TENSIÓN

Entendemos aquí **esfuerzo o tensión** como aquellas fuerzas imaginarias que aparecen en el interior de piezas



o elementos cuando están sometidos a cargas exteriores. Estos esfuerzos nos permiten observar posibles comportamientos resistentes en piezas u órganos de máquinas, o bien diseñar sus dimensiones con unos criterios concretos para que trabaje de forma predeterminada.

El valor de la intensidad depende de la carga P aplicada y de la sección A_0 sobre la que actúa.

$$\sigma = \frac{P}{A_0}$$

σ = tensión unitaria (N/mm^2)
 P = carga aplicada (N)
 A_0 = sección inicial (mm^2)

DEFORMACIÓN

Entendemos por **deformación** la variación de dimensiones iniciales que sufre una pieza por efecto de las fuerzas aplicadas. Supongamos una barra de longitud inicial L_0 (Figura 15) sobre la que aplicamos en sus extremos una fuerza P , igual y opuesta (tracción), que tiende a estirarla. Debido a estas dos fuerzas P , la barra sufre un alargamiento δ y su longitud final será:

$$L = L_0 + \delta \text{ (en mm)}$$

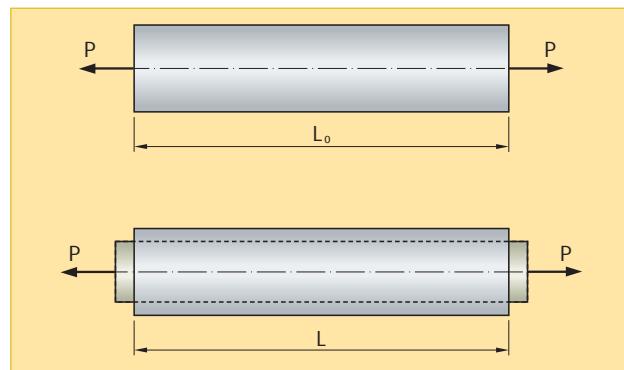


Fig. 15. Deformación.

A la deformación por unidad de longitud la denominamos deformación unitaria. Su valor será:

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

ϵ = deformación unitaria.
 δ = alargamiento (mm).
 L_0 = longitud inicial (mm).
 ϵ es adimensional: no tiene unidades.

RESISTENCIA Y RIGIDEZ

Una pieza u órgano de máquina puede no resistir unas cargas o fuerzas exteriores (es o no **resistente**). Además de resistir, el cuerpo puede o no deformarse. Estudiaremos esta deformación para observar que no sobrepase unos valores admisibles determinados en el diseño. Estaremos hablando entonces de que dicha pieza tiene poca o mucha **rigidez**.

La “resistencia conveniente” permite que una pieza u órgano trabaje sin romperse, y si además no se deforma de manera excesiva, diremos que tiene la “rigidez adecuada”.

4.2.1. Ensayo de tracción

Consiste en someter una probeta del material a ensayar a un esfuerzo perpendicular a la sección transversal del cuerpo, que tiende a alargar las fibras produciendo una deformación. La deformación puede ser **elástica** si el cuerpo deformado recupera las dimensiones iniciales al cesar las cargas que la originaban. O, por el contrario, la deformación puede ser **plástica** si al eliminar las cargas exteriores el cuerpo queda deformado de manera permanente (Figura 16).

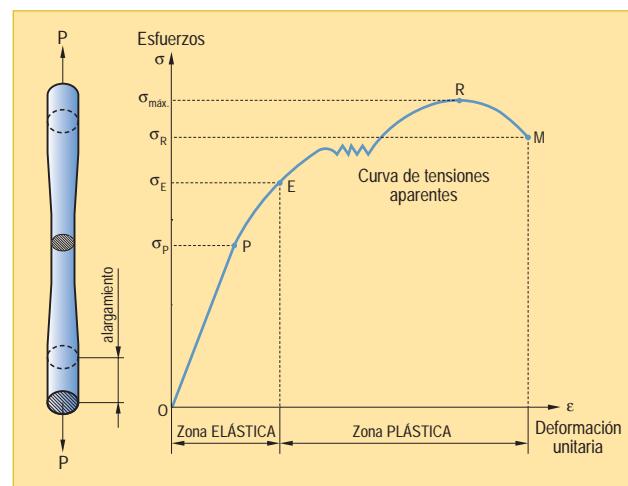


Fig. 16. Diagrama carga-deformación.

En el diagrama destacaremos:

- Punto E, llamado límite elástico.
- Zonas elástica y plástica.
- σ_e , llamado límite de elasticidad.
- σ_f , llamado punto de fluencia.
- σ_r , llamado esfuerzo de rotura.

Los esfuerzos correspondientes a σ_e , σ_f y σ_r , definen las características resistentes de los materiales.

El valor del límite elástico: $E = \frac{\sigma}{\epsilon} \text{ (N/mm}^2\text{)}$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{P/A_0}{\delta/L_0} = \frac{P \cdot L_0}{A_0 \cdot \delta} = E$$

E, es el módulo de elasticidad o de Young.

La constante de proporcionalidad entre esfuerzos y deformaciones unitarias en la zona elástica puede calcularse en función de la $\operatorname{tg} \alpha$. El límite de proporcionalidad (σ_p) será el punto en el que la relación alargamiento y carga aplicada dejan de ser proporcionales.

El ensayo nos permite calcular los valores de σ , E y δ y se realiza en una máquina de ensayo (Figura 19) partiendo de una probeta de sección A_0 (mm^2), longitud L_0 (mm) y carga exterior variable $P(N)$.

Para garantizar que una pieza u órgano de máquina soportará los esfuerzos a los que pueda estar sometido, se realizan los cálculos introduciendo un **coeficiente de seguridad** (n) que depende de la relación entre los coeficientes de fluencia o de resistencia obtenidos en el





ensayo de tracción y el **esfuerzo de trabajo** (σ_t) utilizado en los cálculos de diseño.

$$n = \frac{\sigma_f}{\sigma_t} \quad (\text{para materiales dúctiles})$$

$$n = \frac{\sigma_r}{\sigma_t} \quad (\text{para materiales frágiles})$$

ESTUDIO DEL DIAGRAMA ESFUERZO-DEFORMACIÓN

Los resultados del ensayo de tracción quedan reflejadas en un diagrama en el que los valores de deformación (alargamiento) producidos se representan en el eje de abcisas (ε), y las tensiones de tracción (σ) aplicadas en el eje de ordenadas (Figura 17).

- **Cada material** presenta un diagrama de tracción propio. En estos diagramas hemos visto:

ε = Alargamiento unitario.

σ = Tensión unitaria al aplicar la carga P .

A_0 = Sección inicial de la probeta.

δ = Alargamiento (incremento de longitud).

- La parte **OE** corresponde al **límite elástico**. Aquí, los alargamientos son proporcionales a los esfuerzos. Al cesar la tensión aplicada la probeta recupera su forma primitiva y la longitud inicial.
- La parte **EC** indica un periodo **elástico – plástico** en la que las deformaciones y los esfuerzos aplicados no son proporcionales.
- La parte **CR** representa un periodo **plástico**. Entre ambos puntos se producen las deformaciones permanentes, ya que al cesar la tensión aplicada la probeta sigue deformada y no recupera su forma inicial.
- La parte **CR** marca la zona **límite de rotura**. En ella pequeñas variaciones de tensión aplicada producen grandes deformaciones y son permanentes. El **punto R** marca el límite de rotura y a la tensión aplicada la llamamos **tensión de rotura**. A partir de R el material se considera roto y un pequeño esfuerzo produce dicha rotura.
- La parte **RM** es la **zona de rotura**. Al superar el punto R, aunque la tensión se mantenga constante o baje ligeramente, el material sigue deformándose progresivamente hasta que se rompe en el punto M.
- Este comportamiento de los materiales se puede generalizar, aunque para el acero el diagrama esfuerzos-deformaciones del ensayo de tracción presenta una característica peculiar en la zona próxima al límite elástico. Si observamos la figura 17, veremos que superado el punto E y sin apenas variar la tensión aplicada, se produce un alargamiento muy rápido. Este fenómeno es conocido como **fluencia**, siendo σ_f el **límite de fluencia** y la tensión aplicada, **tensión de fluencia**.

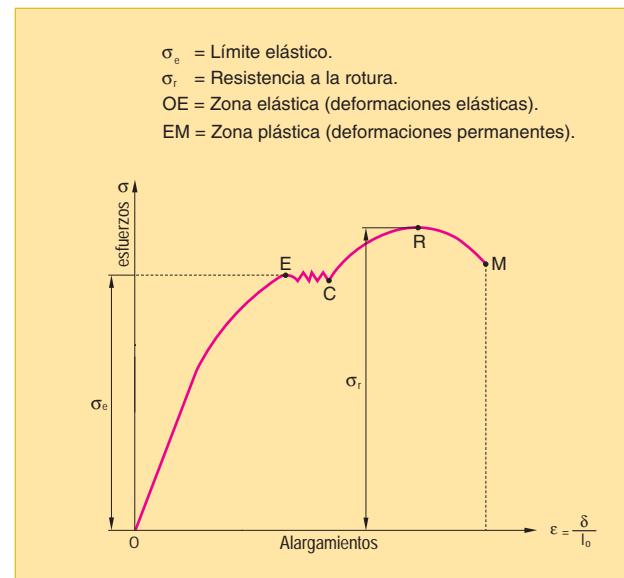


Fig. 17. Diagrama de tracción del acero. Zona de fluencia.

- Despues de la zona ER (periodo plástico), si seguimos incrementando la tensión, el material rompe en M, pero la probeta previamente sufrió una contracción que se conoce con el nombre de **estricción** (Figura 18). Al aumentar la estricción, disminuye el esfuerzo de rotura y ésta llega a producirse a una tensión inferior (punto M) a la máxima soportada.

$$e = \frac{A_0 - A_u}{A_0} \cdot 100$$

e = Estriccion en %.
 A_0 = Sección inicial.
 A_u = Sección última.

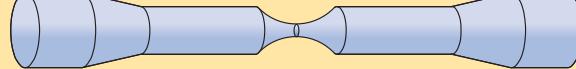


Fig. 18. Estriccion en una probeta de tracción.

MÁQUINAS DE ENSAYO Y PROBETAS TIPO

Las **máquinas de ensayo** son de tipo mecánico o hidráulico y están provistas de mordazas para sujetar las probetas y elementos de accionamiento para someterlas a esfuerzos crecientes de tracción. La máquina (Figura 19) dispone de dispositivos que recogen los datos, y relaciona las tensiones y deformaciones en diagramas σ - ε como los estudiados.

- Las **probetas empleadas** en el ensayo de tracción están normalizadas, siendo de dos tipos según se indica en la figura 20:
 - Cilíndricas.
 - Prismáticas.



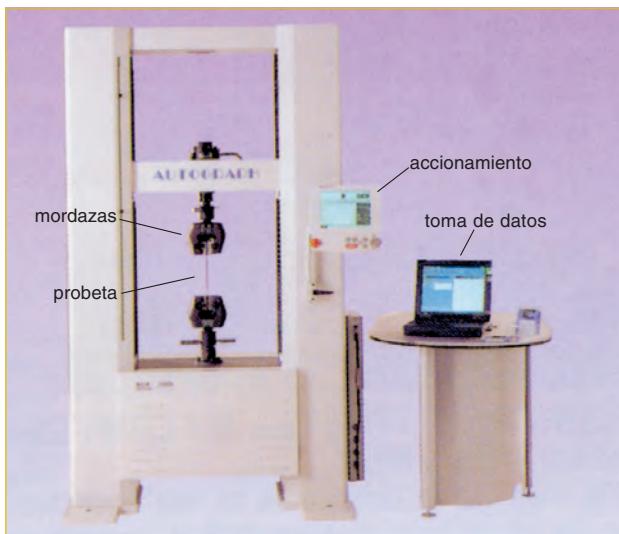


Fig. 19. Máquina de tracción.

La norma UNE 7010 recomienda para la cilíndrica las siguientes dimensiones:

A_o = Sección de 150 mm².

D = 13,8 mm (diámetro).

L_o = 100 mm (longitud entre puntos).

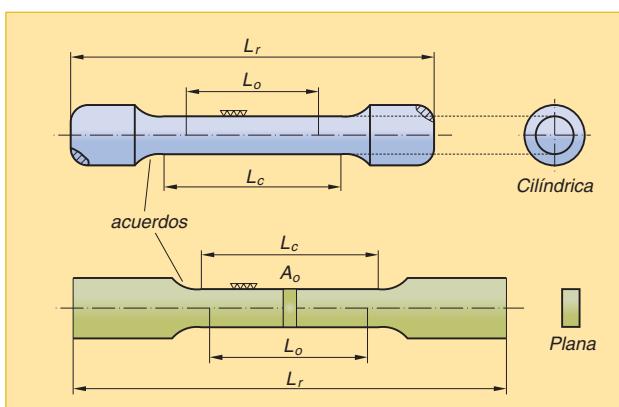


Fig. 20. Modelos de probetas de tracción.

Ejercicio 5

Una probeta normal española tiene 13,8 mm de diámetro y 100 mm de distancia entre puntos. En un ensayo de tracción comenzó a fluir con una carga de 32.250 N, produciéndose su rotura a los 59.500 N. El alargamiento sufrido en ese instante fue de 18 mm y el diámetro en la sección de rotura de 10 mm. Calcula:

- El límite de fluencia.
- La tensión nominal de rotura.
- Tensión real.
- Alargamiento en %.
- Estricción en %.

Solución

- Límite de fluencia.

$$\sigma_f = \frac{P}{A_o} = \frac{32.250}{\pi \cdot D^2} = \frac{4 \cdot 32.250}{\pi \cdot 13,8^2} = 215,61$$

$$\sigma_f = 215,61 \text{ N/mm}^2$$

- b) La tensión nominal de rotura.

$$\sigma_r = \frac{P_r}{A_o} = \frac{59.500}{\pi \cdot D^2} = \frac{4 \cdot 59.500}{\pi \cdot 13,8^2} = 397,80 \text{ N/mm}^2$$

- c) La tensión real de rotura tendrá en cuenta la sección de rotura A'_o ($d = 10 \text{ mm}$).

$$\sigma_{r'} = \frac{P_r}{A'_o} = \frac{59.500}{\pi \cdot 10^2} = \frac{4 \cdot 59.500}{\pi \cdot 10^2} = 757,57 \text{ N/mm}^2$$

- d) El alargamiento en % será:

$$\delta \% = \frac{\Delta L}{L_o} \cdot 100 = \frac{18}{100} \cdot 100 = 18\%$$

ΔL = Alargamiento total sufrido = 18 mm

L_o = Longitud inicial = 100 mm

- e) El valor de la estricción será:

$$e = \frac{A_o - A_u}{A_o} \quad d = \text{diámetro inicial} = 13,8 \text{ mm}$$

$$d' = \text{diámetro último} = 10 \text{ mm}$$

$$e = \frac{\pi \cdot d^2 - \pi \cdot d'^2}{\pi \cdot d^2} \cdot 100 = \frac{d^2 - d'^2}{d^2} \cdot 100 = \frac{13,8^2 - 10^2}{13,8^2} \cdot 100 =$$

$$e = 47,49\%$$

4.2.2. Ensayo de compresión

Estudia el comportamiento de un material al ser sometido a una carga progresivamente creciente de compresión. Se realiza en una máquina universal igual que la de tracción (Figura 19) y persigue el aplastamiento o rotura según el material ensayado. Las probetas son cilíndricas en los metales (Figura 22), con una altura igual al diámetro para evitar la flexión. En los materiales no metálicos las probetas son cúbicas. Este ensayo tiene menor aplicación que el de tracción por dar resultados muy parecidos.

Todas las características de este ensayo, tanto de resistencia como de deformación, son iguales a las expuestas para tracción, pero de signo contrario. Así, tenemos:

- La tensión unitaria: $\sigma = -\frac{P}{A_o}$
 - Contracción total: $\Delta L = L - L_o (< 0)$
 - Contracción unitaria: $\epsilon = \frac{\Delta L}{L_o}$
 - Variación de sección: $\Delta S = S - S_o (> 0)$
- L_o = longitud inicial
 S_o = sección inicial

DIAGRAMA DE COMPRESIÓN

Representando en abcisas los aplastamientos y en ordenadas las tensiones ejercidas, obtenemos un diagrama similar al de tracción (Figura 17), no estando definidos de forma tan clara el límite de fluencia y la carga de rotura.

El diagrama de la figura 21 corresponde a un acero y centrándonos en la zona de compresión se observa:

- **La recta OE'** es semejante a la OE de tracción y pone de manifiesto que los aplastamientos unitarios son proporcionales a las tensiones. En E' se



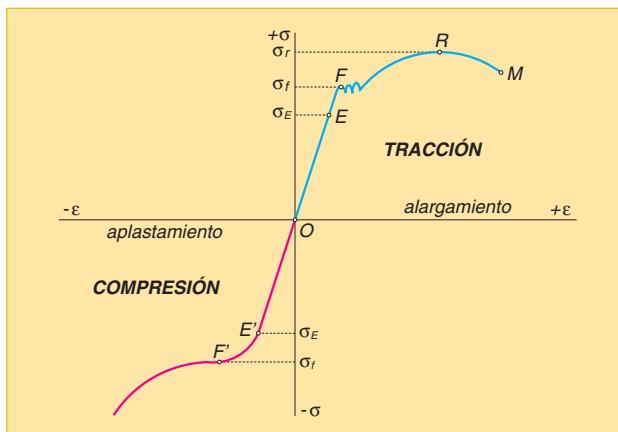


Fig. 21. Diagrama esfuerzo-deformación en el ensayo de compresión.

produce una ligera curvatura y un cambio brusco en los aplastamientos sin apenas aumento de las tensiones. El punto F' homólogo de F en tracción define el límite de fluencia al aplastamiento (tensión por encima de la cual los aplastamientos son permanentes).

A partir de F' , empieza a ponerse de manifiesto el aumento de sección de la probeta que, como se observa en la figura 22, adopta la forma de tonel.

- En los **materiales plásticos** (cobre, latón, hierro dulce...) no existe una verdadera carga de rotura por compresión ya que se aplastan sin romperse.
- En los **materiales frágiles** (como la fundición, hormigón, acero templado...) rompen sin deformación previa.

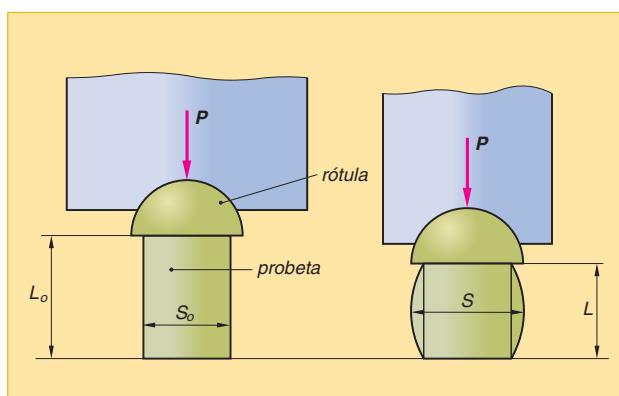


Fig. 22. Probeta sometida a compresión.

Ejercicio 6

Sometemos a compresión una probeta de 10 mm de diámetro aplicando una carga de 5.000 N. Calcula el valor de la tensión unitaria que soporta.

Solución

Si $d = 10 \text{ mm}$ y $P = 5.000 \text{ N}$

Aplicando directamente la fórmula de la tensión unitaria, tendremos:

$$\sigma = -\frac{5.000}{\pi \cdot 10^2} = -63,7 \text{ N/mm}^2$$

$$S_o = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

$$\sigma = -\frac{P}{A_o}$$

4.2.3. Ensayo de cizalladura o cortadura

La cortadura es el esfuerzo que soporta una pieza cuando sobre ella actúan fuerzas contrarias y situadas en planos contiguos (Figura 23) que tienden a hacer deslizar entre sí las secciones en que actúan.

$$\begin{aligned}\tau &= P/A_o (\text{N/mm}^2) \\ \tau &= \text{esfuerzo de trabajo} \\ P &= \text{tensión aplicada (N)} \\ A_o &= \text{sección inicial de la probeta (en mm}^2)\end{aligned}$$



Fig. 23. Cortadura.

En una sección inclinada de una barra sometida a un esfuerzo P de tracción aparecen:

- **Esfuerzos normales** τ_{n1} , perpendiculares a la sección, y que intentan arrancar los dos trozos en que dicha sección divide a la barra.
- **Esfuerzos cortantes** τ_1 , paralelos a la sección, los cuales fuerzan el deslizamiento de una cara de la sección sobre la otra cara. Es necesario definir un **esfuerzo cortante de trabajo** que asegure que el material trabaja lejos de esfuerzos que provocan el fallo.

Si:

$$\begin{aligned}\tau_t &= \text{esfuerzo de trabajo} \\ n &= \text{coeficiente de seguridad} \\ \tau_f &= \text{esfuerzo cortante de fluencia} \\ \tau_r &= \text{esfuerzo cortante de rodadura}\end{aligned}$$

Podemos decir, igual que en el caso de la tracción:

$$\begin{aligned}\tau_t &= \tau_f/n && (\text{para materiales dúctiles}) \\ \tau_t &= \tau_r/n && (\text{para materiales frágiles}) \\ \tau_t &= (0,5/0,6) \sigma_t\end{aligned}$$

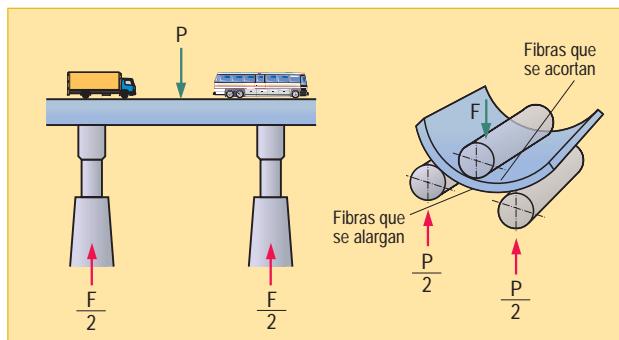
4.2.4. Ensayo de flexión

La flexión es la fuerza que actúa sobre una pieza de forma tal que tiende a doblarla, alargando unas fibras y acortando otras (Figura 24). La tensión de trabajo en flexión σ_t viene dada por la fórmula:

$$\sigma_t = \frac{M_f}{W_{xx}}$$

σ_t = tensión de trabajo (N/mm^2)
 M_f = momento flector de la sección
 W_{xx} = momento resistente de la sección

- M_f es el momento resultante (producto de fuerza por distancia) $M_f = F \cdot I$, con respecto a dicha sección de los momentos producidos por las fuerzas situadas a izquierda y derecha de la sección, incluidas las reacciones (Figura 24).
- W_{xx} depende de la sección de la viga y es un dato que proporciona el fabricante.

Fig. 24. Flexión y cálculo de M_f .

4.2.5. Ensayo de pandeo

El pandeo es el esfuerzo combinado de flexión y compresión que se presenta en piezas sometidas a carga axial, cuando su sección transversal es pequeña en relación a la altura o longitud (Figura 25). No se produce aplastamiento; la pieza se dobla lateralmente.

Es un ensayo de aplicación para analizar las deformaciones en vigas, barras o columnas cargadas. Tiene gran utilidad en construcción para observar cómo responden las vigas de edificios y naves industriales.

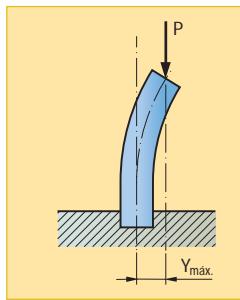


Fig. 25. Pandeo.

4.2.6. Ensayo de torsión

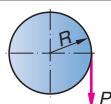
La torsión se presenta cuando las fuerzas o cargas externas tienden a retorcer las piezas (Figura 26). Es un esfuerzo muy común al que están sometidos todo tipo de árboles en las máquinas. El momento torsor M_t es el producto de la fuerza por el brazo de palanca con el que actúa. El tipo de esfuerzo no se produce, como en los casos anteriores, por tensiones normales de tracción o compresión, sino que da lugar a tensiones cortantes y su valor es:

$$\tau = \frac{M_o}{W_o}$$

τ = torsión cortante en N/mm²

M_o = momento torsor en N

W_o = módulo resistente en cm³



$$M_t = P \cdot R$$

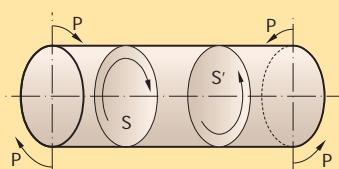


Fig. 26. Ensayo de torsión.

En la figura 27 se muestra una aplicación en la que se indica cómo se produce la torsión.

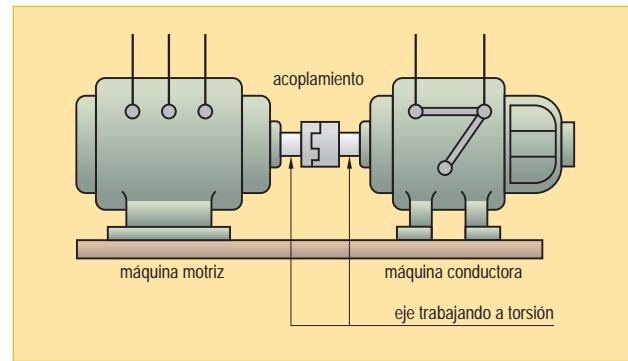


Fig. 27. Aplicación de torsión.

4.3. Ensayos destructivos dinámicos

Las piezas y órganos de máquinas o sus estructuras, además de a cargas estáticas, están sometidas a vibraciones, rozamientos, cambio de sentido, choques... Para conocer cómo se comportan a otras solicitudes, es necesario someterlos a **ensayos dinámicos** que nos aporten información. Los más típicos son: ensayo de **resiliencia** (resistencia a choque) y el de **fatiga**.

4.3.1. Ensayo de resistencia a choque

Permite determinar la energía absorbida en la rotura de una probeta normalizada producida por un golpe seco de un martillo en su caída (Figura 28).

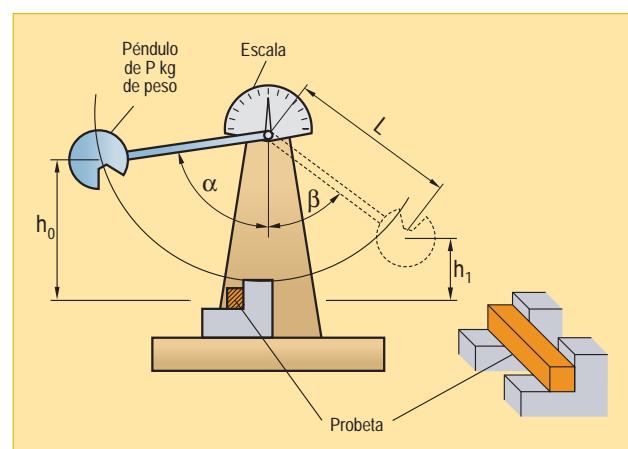


Fig. 28. Péndulo de Charpy y probeta de ensayo.

Características del ensayo

- Se coloca la probeta en el lugar adecuado y se levanta el martillo hasta h_0 respecto de la probeta y formando un ángulo α .
- El martillo se deja caer para que por choque rompa la probeta y llegue hasta h_1 formando un ángulo β . El martillo consume parte de la energía en romper la probeta y el resto en alcanzar la altura h_1 .





La energía será:

$$W = P(h_o - h_i) = P \cdot L (\cos \beta - \cos \alpha)$$

P = peso del péndulo (kg)

L = longitud del péndulo (m)

W = energía empleada en la rotura (kgm)

α y β = ángulos formados por el péndulo

El valor de la resiliencia ρ del material se define como el trabajo de rotura por unidad de superficie A:

$$\rho = \frac{W}{A}$$

ρ = resiliencia del material (kgm/cm^3)
 W = energía empleada en la rotura (kgm)
 A = sección de la probeta (cm^2)

- El ensayo permite analizar si un material es frágil o tenaz. Los materiales tenaces absorberán más energía en la rotura que los frágiles, por lo que su resiliencia será mayor en los tenaces.

4.3.2. Ensayo de fatiga

El ensayo de fatiga permite medir la resistencia que presenta un material a esfuerzos repetidos que, siendo variables en sentido y magnitud, e inferiores a los de rotura o límite elástico, pueden provocar su rotura.

La mayor parte de mecanismos y órganos de máquinas están sometidos a esfuerzos variables, que se repiten con cierta frecuencia (ejes, árboles, ruedas, bielas, cojinetes, engranajes...).

El procedimiento más lógico para conocer el comportamiento de piezas en servicio es someterlas a un ensayo de duración en condiciones lo más similares posibles a las que tenga que trabajar. Este ensayo que tiene en consideración la acción de las cargas y el efecto que producen en el tiempo recibe el nombre de **ensayo de fatiga**.

Wöhler fue pionero en el estudio de este ensayo y enunció las siguientes leyes:

1. Las piezas metálicas pueden romperse bajo esfuerzos unitarios inferiores a su carga de rotura, e incluso a su límite elástico si el esfuerzo se repite un número suficiente de veces.
2. La rotura no tiene lugar cualquiera que sea el número de solicitudes, si la diferencia entre el esfuerzo máximo y mínimo es inferior a cierto valor límite, función del esfuerzo medio. Dicho valor límite recibe el nombre de **límite de fatiga**.

Límite de fatiga es el máximo valor de tensión a que podemos someter un material sin romperse, independientemente del número de veces que se repita la acción.

- Los esfuerzos que producen fatiga pueden ser: tracción, compresión, torsión, flexión y generalmente combinaciones de éstos, pudiendo variar éstos en módulo y sentido, o en ambos a la vez.

- La **rotura por fatiga** comienza junto a un defecto donde, a causa de una sobretensión, se origina una fisura que se propaga hasta que su tamaño es tal que el resto de la sección no es capaz de resistir el esfuerzo, sobreviniendo la rotura bruscamente sin manifestación externa.

El proceso de fatiga presenta tres procesos:

- a) **Incubación**. En algunos puntos se producen deformaciones plásticas y por tanto acritud, cosa no perjudicial e incluso beneficiosa mientras no existan fisuras.
- b) **Dañado**. En algunos puntos de la fase anterior se genera acritud con desarticulación cristalina y aparecen fisuras, propagándose a través del metal.
- c) **Rotura**. Al llegar la fisura a una posición determinada, la sección útil no resiste el esfuerzo y sobreviene la rotura.

El período ideal para el trabajo de los materiales es el de incubación.

Los factores que influyen en el límite de fatiga son:

- Frecuencia de los ciclos de carga.
- Temperatura.
- Acritud previa.
- Fatiga previa.
- Dureza superficial (cementación, nitruración).
- Estado de la superficie (mecanizados...).
- Inclusiones o grietas.

Los ciclos de trabajo más simples son los indicados en la figura 29.

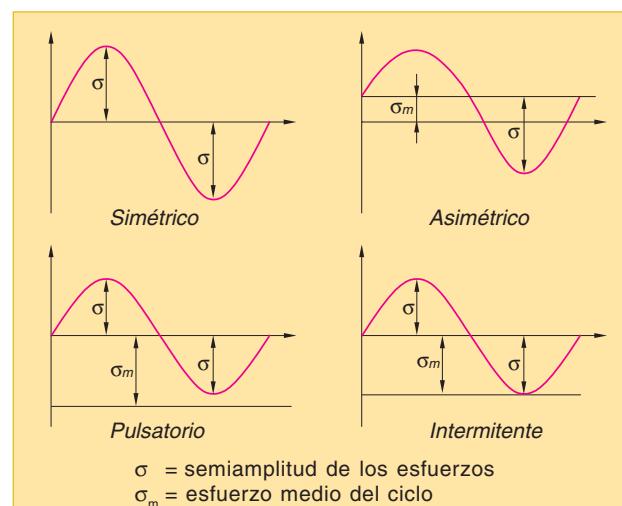


Fig. 29. Ciclos de fatiga.

Para conocer la influencia que ejercen los valores de las tensiones variables según el número de ciclos que soportan hasta su rotura se utiliza la curva de Wöhler, representando en ordenadas valores de esfuerzos (σ) y en abcisas el número de ciclos hasta producir su rotura (Figura 30).



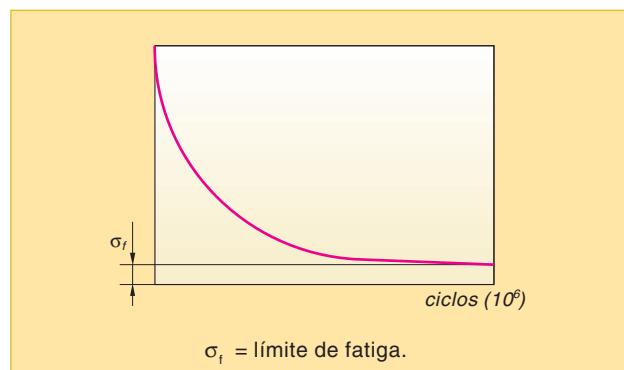


Fig. 30. Curva de Wöhler.

4.4. Ensayos tecnológicos

Son ensayos con menor rigor científico que los mecánicos y que permiten, en un momento dado, conocer determinadas cualidades de un material de forma aproximada pero rápida (comportamiento ante un tipo de esfuerzo, composición o proceso de transformación).

4.4.1. Ensayo de la chispa

Es un ensayo que permite, por comparación con probetas patrón, conocer las **características de composición** de un acero, analizando el haz de chispas producidas por la acción de una muela de esmeril sobre la probeta (Figura 31).

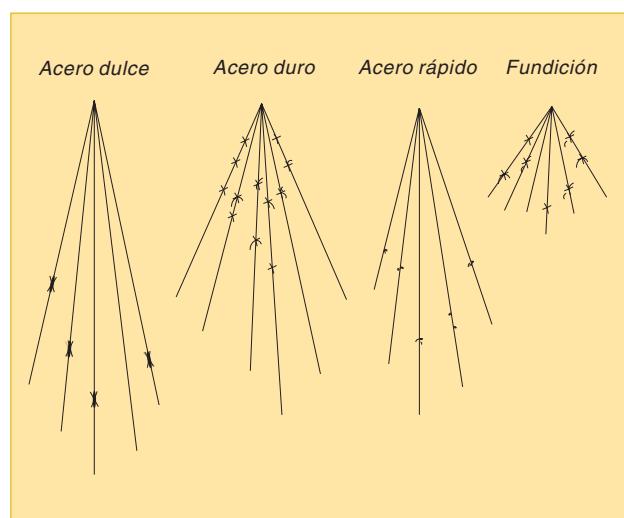


Fig. 31. Tipos de chispas de materiales.

Por la acción del rozamiento de la probeta sobre la rueda de esmeril, y en presencia del oxígeno del aire, se quema el carbono y otros componentes dando lugar a chispas de forma, color y brillo distintas según el tipo y naturaleza del material.

Además de probetas patrón para la comparación, requiere de amplia experiencia que permita ver las similitudes de las chispas.

4.4.2. Ensayo de plegado

Este ensayo permite analizar la **maquinabilidad** y **ductilidad** de los materiales. Puede realizarse en frío o en caliente y consiste en deformar plásticamente una probeta rectilínea de sección llena mediante un esfuerzo de flexión sin interrupción (Figura 32).

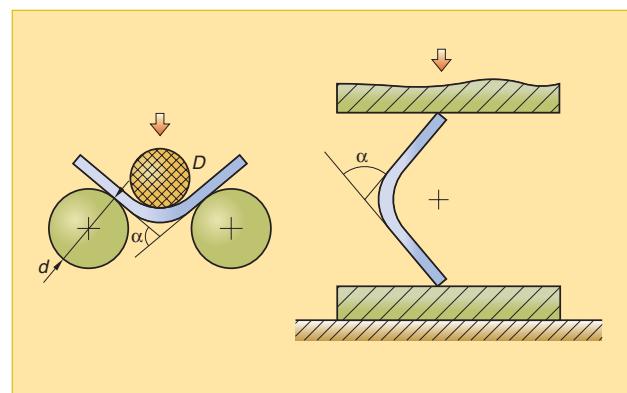


Fig. 32. Ensayo de plegado.

La prueba se considera favorable cuando no se aprecian grietas en la superficie estirada de la pieza.

Generalmente se realiza en la máquina universal de ensayos.

4.4.3. Ensayo de embutición

El ensayo de **embutición** tiene por objeto determinar la idoneidad de un material para ser deformado en profundidad.

La prueba se realiza según el procedimiento Erichsen, que consiste en practicar una impresión profunda en la chapa de examen mediante un punzón de forma y dimensiones determinadas. La prueba se prolonga hasta que se produce una grieta que abarque todo el espesor de la chapa (Figura 33). La profundidad de tal impresión, expresada en mm, recibe el nombre de índice de Erichsen y expresa la aptitud de la chapa en examen para ser embutida.

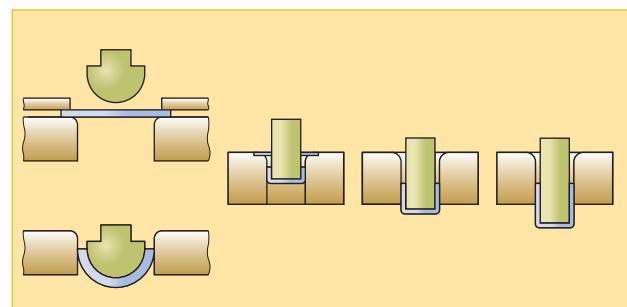


Fig. 33. Ensayo de embutición.

4.4.4. Ensayos de forja

Las pruebas de forja tienen por objeto conocer las condiciones de un metal para ser trabajado plásticamente



(puede realizarse en frío desde -80 °C o en caliente hasta 1.200 °C). Los más característicos son: el extendido, el recalcado y el mandrilado (Figura 34).

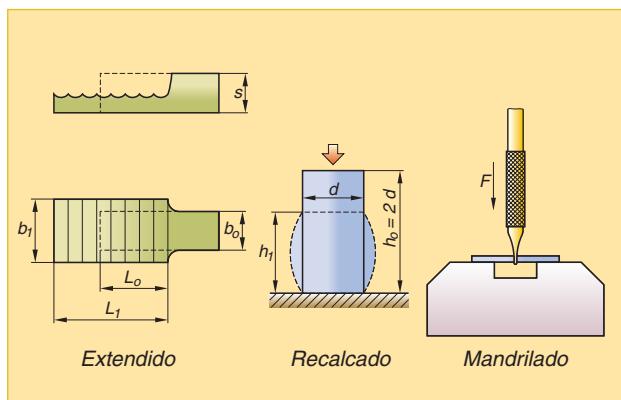


Fig. 34. Pruebas de forjado.

- **Extendido.** Permite, previo calentamiento, conseguir estirar y ensanchar a base de golpes una probeta del material en estudio.
- **Recalcado.** Consiste en acortar por aplastamiento a base de golpes una probeta hasta que aparezcan grietas laterales.
- **Mandrilado.** Permite analizar la capacidad de perforación de un material al perforarlo (previo calentamiento) con un punzón hasta la aparición de grietas.

5. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (END)

Estos ensayos permiten analizar las piezas sin destruirlas ni deteriorarlas. Persiguen fundamentalmente detectar fallos internos como grietas, inclusiones, poros, segregaciones...

5.1. Ensayos magnéticos

Se realizan con el magnetoscopio, que es un aparato formado por un electroimán dispuesto de forma que pueda situarse la pieza que se desea examinar entre sus expansiones polares. Al hacer circular una corriente, se crea un campo magnético cuyas líneas de fuerza van de uno a otro polo a través de la pieza interpuesta (Figura 35).

- Si no existe defecto (el material es de estructura homogénea), las líneas de fuerza, al encontrar una misma permeabilidad magnética se disponen en forma uniforme, paralelas y equidistantes. Esto se observa rociando con un líquido aceitoso con pequeñas limaduras de hierro en suspensión la parte a examinar y dichas partículas se disponen uniformemente sobre la superficie orientándose según las líneas de fuerza.
- Si existe un defecto que altera la homogeneidad de la estructura, existirá variación de la permeabilidad

magnética que desviará las líneas de fuerza concentrándolas hacia la zona más permeable. Se apreciará una mayor concentración de las limaduras de hierro allá donde se desviaron las líneas de fuerza, es decir, sobre el defecto.

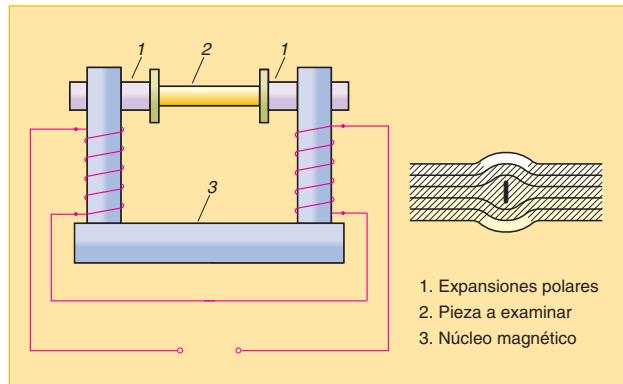


Fig. 35. Magnetoscopio y defecto detectado.

5.2. Ensayos eléctricos

La resistencia de un material es directamente proporcional a la resistividad y su longitud inversamente proporcional a su sección.

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

R = resistencia del material (Ω)

ρ = resistividad ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)

L = longitud del conductor (m)

S = sección del conductor (mm^2)

Los ensayos eléctricos están basados en las alteraciones que sufren las características eléctricas de un material (resistencia, resistividad...) por la variación de longitud o sección debida a alguna impureza, grieta, poro o discontinuidad. Si tenemos un material con una grieta o poro interno, en esa zona tendrá menor sección, por lo que aumentará R. De igual forma variará el valor de ρ , por lo que también lo hará R.

El ensayo se realiza del modo siguiente (Figura 36).

- Unimos dos contactos (1 y 2) a una batería de baja tensión y cerramos el circuito eléctrico a través del material objeto de estudio, estableciendo un campo magnético uniforme.

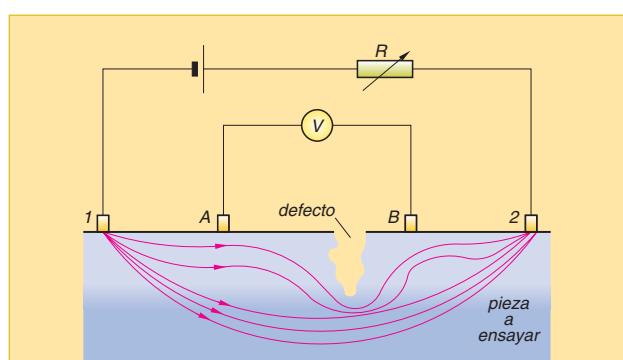


Fig. 36. Ensayo eléctrico.



- Entre estos contactos colocamos otros dos (A y B) a una distancia fija y los unimos a un microvoltímetro que desplazamos a lo largo del material a ensayar. Si no existen irregularidades, el microvoltímetro no indicará variación de tensión. Si existe alguna grieta, poro... o cualquier discontinuidad, existirá una variación de tensión que marcará el equipo.

5.3. Ensayos por líquidos penetrantes

Es un método que se emplea para detectar discontinuidades abiertas en la superficie en cuerpos sólidos y no porosos (metales básicamente). El líquido penetrante que se aplica sobre la superficie a examinar penetra en la discontinuidad o defecto y una vez que se elimina el exceso nos marca la presencia del defecto (Figura 37).

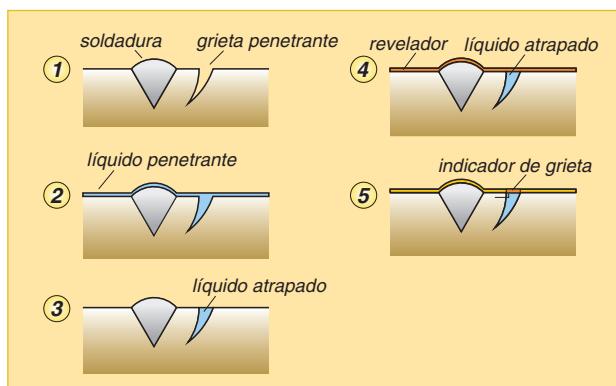


Fig. 37. Ensayo por líquidos penetrantes.

Las fases para desarrollar el método son:

1. Limpieza y preparación de la zona a inspeccionar.
2. Depositar el líquido penetrante en la zona.
3. Eliminar el líquido sobrante de la superficie.
4. Aplicar el revelador sobre la superficie seca.
5. Inspeccionar. El líquido penetrante se fija al revelador y causa un cambio de color que permite observar el defecto.

5.4. Ensayos estructurales

Ya veímos en la U.D. 1 que la estructura de los materiales podría observarse por procedimientos micrográficos y macrográficos.

5.4.1. Ensayos micrográficos

La práctica de los ensayos micrográficos sigue las siguientes operaciones (Figura 38):

- Toma de muestras. Corte.
- Montaje de las probetas.
- Preparación mecánica (desbaste y pulido).
- Ataque con reactivo.
- Observación en microscopio.

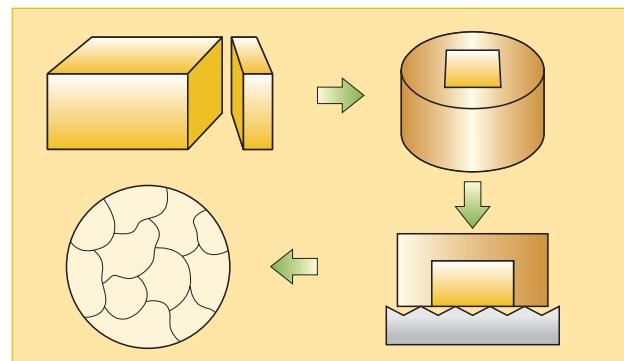


Fig. 38. Proceso micrográfico - METALOG.

TOMA DE MUESTRAS: CORTE

El corte debe permitir obtener una superficie plana y con la menor deformación posible. El método de corte más adecuado es el que se realiza con abrasivo en húmedo, ya que es el que provoca la menor cantidad de daño (Figura 39).

La muestra que se tome debe representar de forma adecuada las características del metal de origen que se está cortando.



Fig. 39. Corte y máquina de cortar.

MONTAJE DE LAS PROBETAS

Para facilitar la manipulación posterior, las muestras se funden con unas resinas de distintos tipos, generalmente transparentes (PVC, baquelitas, resinas...), que permiten mejorar los resultados de pulido y desbaste (Figura 40).

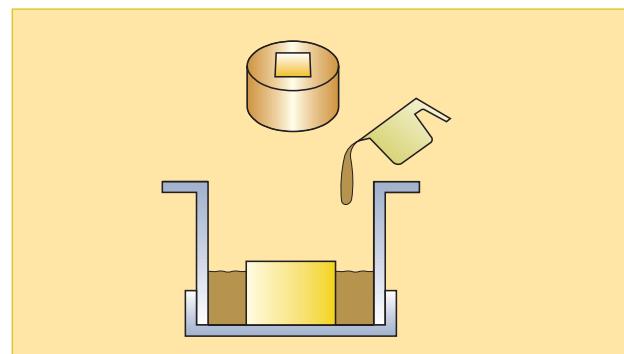


Fig. 40. Montaje de probetas y resinas.





PREPARACIÓN MECÁNICA

La preparación mecánica consta de dos fases:

- Desbaste.
- Pulido.

En el desbaste, con una lima o en una máquina con papel abrasivo de grano grueso, se eliminan las rebabas procedentes del corte que pueden existir en los bordes. Posteriormente se pasa la probeta por lijas de diferente grosor de grano (del 1 al 00..., figura 41) para pulirla.

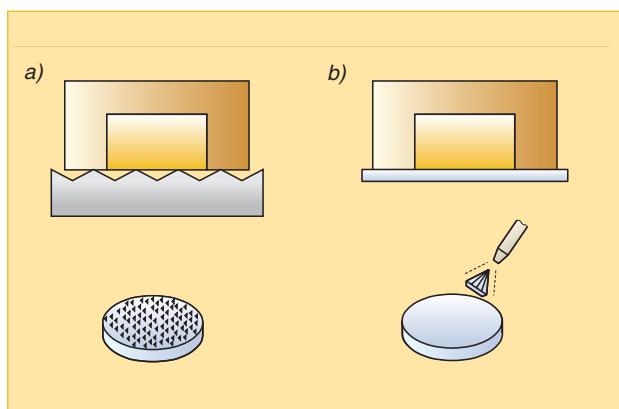


Fig. 41. a) Desbaste. b) Pulido.

El pulido mecánico puede hacerse en máquina de discos que pueden pulir varias probetas a la vez, dejándolas con una superficie tan lisa que parece un espejo, gracias a la utilización de pastas abrasivas y paños de terciopelo que favorecen, con las altas velocidades, una dispersión muy homogénea (Figura 42).



Fig. 42. Pulidoras mecánicas.

ATAQUE DE LA PROBETA

Como paso previo al ataque con distintos tipos de reactivos, las probetas deben limpiarse y desengrasarse correctamente con un intenso lavado y posterior secado con alcohol o acetona.

Para el ataque, se somete la pieza a la acción de un reactivo (específico para cada material), sumergiendo la probeta con la superficie pulida hacia abajo,

sujetándola con unas pinzas y sin que llegue a tocar el fondo del recipiente. El tiempo de ataque varía desde unos segundos a 15 minutos y depende del reactivo y de la muestra. Se saca la probeta del reactivo cuando se aprecie la aparición de granos.

En el cuadro de la figura 43 se muestran los tipos de reactivos metalográficos más empleados.

Empleo	Reactivos	Composición	
Cobre	Agua oxigenada amoniacal	NH ₄ OH H ₂ O ₂ H ₂ O	85 cc 4 cc 1 cc
Aluminio	Reactivos Vilella	HF concentrado HNO ₃ Glicerina	20 cc 10 cc 30 cc
Cinc	Palmerton	Ácido crómico Sulfato sódico Agua	200 g 15 g 1.000 g
Níquel	Solución acetonítrica	HNO ₃ Alcohol acético	50 cc 50 cc
Magnesio	Ácido acético 10 %	Ácido acético Agua	10 cc 90 cc
Ataque aceros y fundiciones (20 a 50 segundos)	Nital	HNO ₃ Alcohol etílico	5 cc 95 cc
Fundiciones y resalte de la perlita	Picral	Ácido picrico Alcohol etílico	40 g 1.000 cc
Aceros al cromo-wolframio coloreando la ferrita (2 a 10 minutos e hirviendo)	Reactivos Murakami	Ferrocianuro potásico Hidróxido potásico Agua	6 g 10 g 100 g
Coloración cementita y diferenciación de la ferrita	Picrato de sosa	Ácido picrico Hidróxido sódico Agua	2 g 25 g 100 g

Fig. 43. Tipos de reactivos según materiales.

OBSERVACIÓN DE LA MUESTRA

La muestra preparada puede observarse al microscopio en dos momentos diferentes:

- Después de realizarse el pulido y sin ataque con reactivo; puede observarse la presencia de inclusiones, grietas, porosidades...
- Después del pulido y ataque con reactivo; es el examen más real y en él se pone de manifiesto el tipo de estructura que estamos estudiando.

Para la observación microscópica correcta, debemos hacer un recorrido por toda la superficie de la probeta examinando con especial interés las estructuras de los bordes. El proceso se inicia con pocos aumentos en el microscopio y se van aumentando para lograr resolver los detalles finos.

En la figura 44 se muestra un detalle de la forma de trabajar con un microscopio metalográfico y una micrografía de acero obtenida en microscopio.



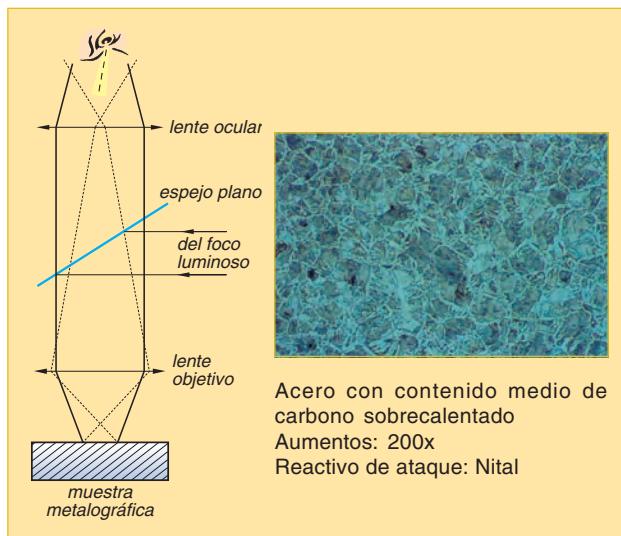


Fig. 44. Microscopio metalográfico y micrografía de materiales.
(Cortesía Struers. Grupo IZASA).

5.4.2. Ensayos macroscópicos

Permiten la localización de grietas, porosidades o rechupes a simple vista o con ampliación de hasta 15 aumentos, ya que los defectos son superficiales.

El análisis macroscópico permite conocer:

- La forma estructural.
- La homogeneidad de la estructura.
- El efecto de tratamientos térmicos realizados.
- Efectos de elaboraciones mecánicas.
- Eventuales defectos: fisuras, grietas...
- Eventual disposición de fibras debido a elaboraciones plásticas.

El examen macroscópico puede realizarse:

- Sobre una fractura de la pieza provocada intencionadamente en la zona objeto de estudio.
- Sobre una sección convenientemente pulida y atacada con reactivos adecuados.

5.5. Ensayos de rayos X

Los **rayos X** son vibraciones electromagnéticas invisibles que se propagan a la velocidad de la luz, pero con una longitud de onda muy corta.

Características de los rayos X

- Se propagan en línea recta (no se desvían ni por campos eléctricos ni magnéticos).
- Poseen gran poder de penetración (atraviesan los cuerpos opacos sin reflejarse ni refractarse).
- La capacidad de penetración es tanto mayor cuanto menor es su longitud de onda, o cuanto mayor es su frecuencia.

$$\lambda = \frac{k}{f}$$

$$\begin{aligned}\lambda &= \text{longitud de onda (mm)} \\ k &= \text{contraste de proporcionalidad} \\ f &= \text{frecuencia (Hz)}\end{aligned}$$

- La longitud de onda depende de la velocidad de los electrones y del grado de vacío que se haga en el tubo.
- Los rayos de menor longitud de onda son muy penetrantes y se denominan **rayos duros**.
- Para conseguir rayos penetrantes es necesario un vacío muy elevado y una tensión anódica alta (100 – 300 kV).

Equipo de rayos X. Constitución

Un equipo de rayos X, sea del tipo que sea, está constituido según se aprecia en la figura 45 por:

- Una ampolla de vidrio especial en la que existe un vacío muy avanzado (3).
- Dos electrodos de cobre (cátodo y ánodo, 1 y 5).
- El cátodo en forma de vaso tiene un filamento de volframio (o tungsteno) alimentado por una corriente independiente de baja tensión (2).
- El anticáñamo de volframio (4) situado en el interior genera los rayos X, que son enviados hacia la pieza a inspeccionar.

Realización del ensayo

La probeta (7) que se desea examinar se apoya sobre una placa fotográfica (9) situada sobre una pantalla de plomo (8) que absorbe las radiaciones (Figura 45).

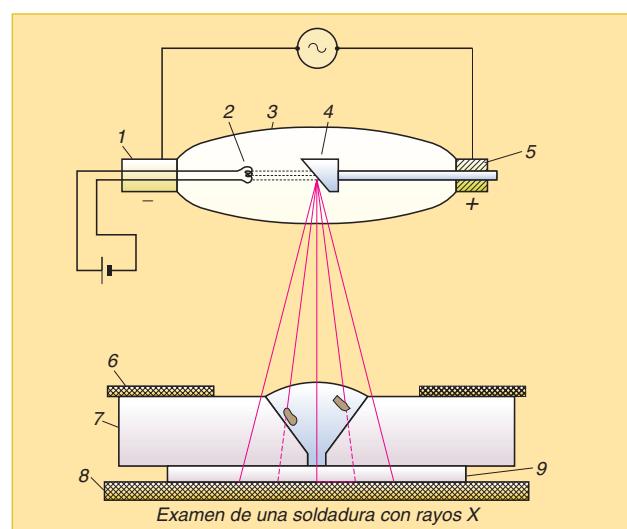


Fig. 45. Equipo de rayos X y ensayo.

Sobre la parte superior de la probeta se dispone otra pantalla de plomo (6) perfilada de manera que absorba las radiaciones que no interesan la zona que se va a examinar, y que son nocivas para el operador.

Los rayos penetran en el material y llegan a la placa fotográfica con distinta intensidad según el mayor o menor debilitamiento sufrido al atravesar la probeta.

- Si la probeta es de espesor uniforme, no existen defectos y la estructura es homogénea; la placa se impresionará toda por igual.





- Si existe un defecto existirá una absorción distinta de radiaciones, por lo que, correspondiéndose con el defecto, la placa mostrará una zona más clara o más oscura según el tipo o magnitud del defecto.

Tipos de defectos detectables

- Los rayos que atraviesan una **cavidad** se debilitan menos, impresionando más la placa, que presentará una zona más oscura.
- Si el defecto es una **inclusión metálica**, de mayor densidad que el material, los rayos se debilitan más, y la placa, al quedar menos impresionada, presentará una zona más clara.
- Los defectos de más fácil detección son aquellos cuya máxima dimensión está orientada en la dirección de propagación del rayo X. Por el contrario son de difícil detección los de poco espesor, y dispuestos perpendicularmente a la dirección de las radiaciones (esto obliga a realizar el examen en distintas direcciones).

Son difíciles de controlar piezas de sección variable.

5.6. Ensayos de rayos γ

Los rayos γ son radiaciones electromagnéticas similares a los rayos X, pero de una longitud de onda extraordinariamente corta (del orden de 10^{-10} mm).

Características de los rayos γ

- Son extraordinariamente penetrantes (pueden compararse con los rayos X más duros).
- Se propagan en línea recta igual que los rayos X y no se desvían por campos magnéticos o eléctricos.
- Difieren de los rayos X por su menor longitud de onda y mayor penetración (mientras que los rayos X actúan con fiabilidad en espesores hasta 10 mm, los rayos γ pueden llegar hasta espesores de 250 mm).
- Las fuentes radiactivas empleadas industrialmente son el radio y algunos isótopos artificiales como el iridio, cobalto y cesio.
- El proceso de ensayo es similar al explicado para los rayos X con las variaciones de preparación por ser equipos diferentes. La pieza a inspeccionar se somete a la radiación de rayos γ, y después de ser atravesada por éstos, impresionan una placa fotográfica en la que aparecerán los defectos existentes.

Ventajas de los rayos γ frente a los rayos X

- Los equipos de rayos γ son de menores dimensiones, lo que permite el reconocimiento en zonas de difícil acceso para los rayos X.
- Su poder de penetración permite aplicarlos a piezas de mayores espesores.
- Son muy aptos para reconocer defectos en tubos ya instalados, pues se puede disponer la fuente en el centro del tubo y la película en su exterior.

Inconvenientes de los rayos γ

- El mayor peligro al utilizar isótopos radiactivos.
- El mayor tiempo de exposición que los rayos X.
- Menor contraste por poseer los rayos γ menor longitud de onda que los rayos X, lo que dificulta su interpretación.
- Menor nitidez de contornos en la imagen.
- Velado de la placa en menoscabo del contraste debido a la formación de radiaciones difusas motivadas por la mayor exposición.

5.7. Ensayos de ultrasonidos

La verificación de materiales por ultrasonidos utiliza la propagación del sonido, tanto en sólidos como en líquidos, para realizar un control no destructivo de cualquier material que sea susceptible de ser atravesado por éstos.

Las ondas sonoras son fenómenos vibratorios que se transmiten a través de un medio elástico pero no en el vacío. El valor de la frecuencia de propagación o frecuencia depende de la longitud de propagación y de la velocidad. Su valor se expresa por:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

f = frecuencia (en ciclos por segundo)

c = velocidad de propagación (m/s)

λ = longitud de propagación

Las ondas cuya frecuencia es superior a 20.000 Hz y no son perceptibles por el oído humano se llaman **ultrasonidos**.

Generación de las ondas ultrasónicas

En ultrasonidos empleamos un mismo elemento para generar y recibir las ondas. Este elemento recibe el nombre de **palpador**. Existen distintos tipos con diferentes diámetros y frecuencias, con miras a efectuar los diferentes tipos de control antes mencionados (Figura 46).



Fig. 46. Diferentes palpadores para ultrasonidos.

Para que el palpador pueda cumplir las dos funciones de emisor y receptor de las ondas, dispone de un cristal piezoelectrónico, que tiene la propiedad de deformarse al recibir una presión mecánica externa produciendo un voltaje eléctrico en sus caras, y a la inversa, al aplicar un potencial eléctrico a sus caras, este material cambia de tamaño produciendo una onda de presión.





El control de una pieza por ultrasonidos puede realizarse:

- Midiendo el tiempo empleado por el ultrasonido en recorrer la pieza en examen.
- Midiendo la intensidad ultrasónica del haz saliente de la pieza.

Generalmente se emplea el segundo método que da resultados más concisos. Puede hacerse:

1. **Método de intensidad.** En este método se mide la intensidad del ultrasonido después de atravesar la pieza a verificar. Puede hacerse:

- **Por transmisión.** Un generador de alta frecuencia produce un alto voltaje que excita el cristal del palpador y genera el ultrasonido que es recibido por el receptor situado en la parte opuesta (Figura 47 a.). Entre ambos palpadores se sitúa la pieza. La onda recibida por el receptor se convierte en una señal eléctrica que se amplifica y se lee en el equipo de medida.
- **Por reflexión.** El proceso es idéntico, pero en lugar de estar emisor y receptor enfrentados, la señal reflejada por el emisor al encontrar un defecto la recoge el receptor, según se indica en la figura 47 b.

El método actualmente tiene escasa aplicación por el inconveniente de los dos palpadores.

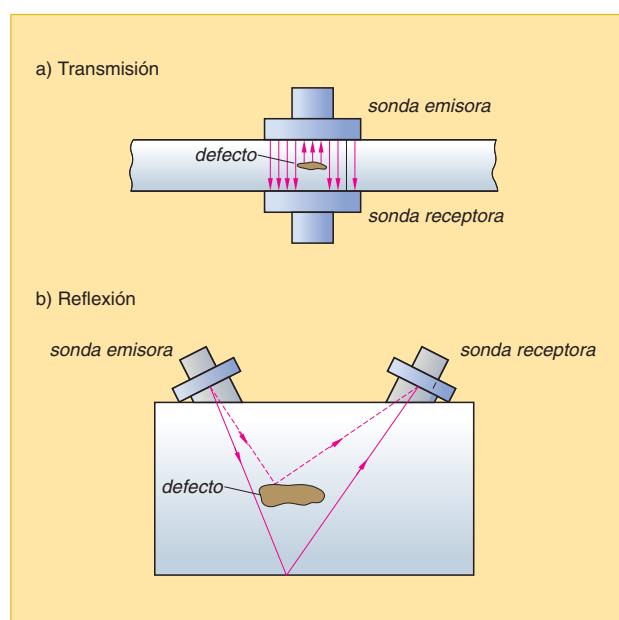
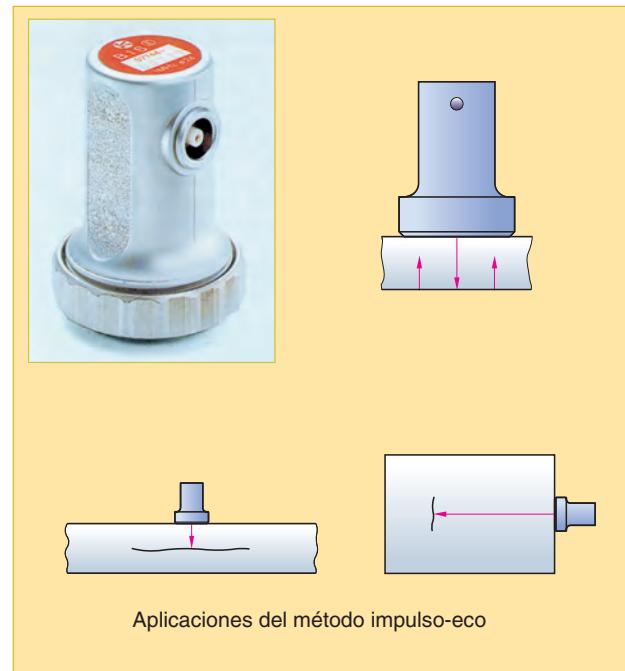


Fig. 47. Método de intensidad.

2. **Método de impulso – eco.** El gran inconveniente del método de intensidad es la necesidad de utilizar dos palpadores y los posibles desajustes que se pueden dar.

El método impulso – eco utiliza un solo palpador y en él se realizan las funciones de emisión y recepción (Figura 48).



Aplicaciones del método impulso-eco

Fig. 48. Palpador y aplicaciones impulso - eco.

Realización de la prueba de ultrasonidos

En general el proceso consiste en recorrer con el palpador en todos los sentidos la superficie de la pieza. En la mayoría de los casos el equipo acusa:

- Un pico correspondiente al impulso de emisión.
- Una sucesión de pequeños picos debidos a imperfecciones superficiales de las caras.
- Eventualmente, un pico debido al eco de un defecto.
- Un pico debido al eco de fondo (Figura 49).

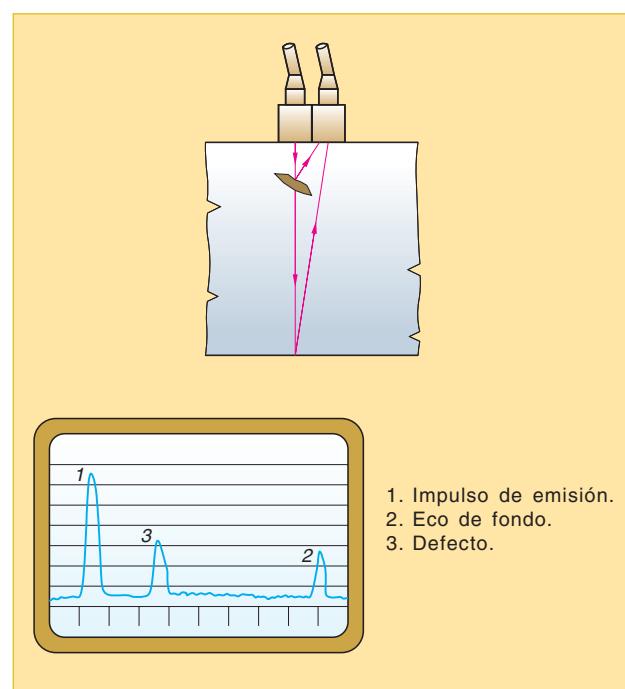


Fig. 49. Análisis de pieza defectuosa.



ACTIVIDADES DE ANÁLISIS - AMPLIACIÓN - INVESTIGACIÓN

VOCABULARIO

A lo largo del texto de la unidad aparecen los vocablos de la lista siguiente. En grupos, tratar de buscar su significado y trasladarlos al *diccionario tecnológico*.

Ensayo.	Microdureza.
Escala de Mohs.	Resistencia.
Elasticidad.	Rigidez.
Dureza.	Diagrama esfuerzo-deformación.
Ductibilidad.	Probeta de ensayo.
Propiedades.	Contracción unitaria.
Maleabilidad.	Tensión unitaria.
Fatiga.	Cortadura.
Cohesión.	Torsión.
Tenacidad.	Pandeo.
Fragilidad.	Flexión.
Resiliencia.	Momento flector.
Resistencia a rotura.	Micrografía.
Conductividad eléctrica.	Microscopía.
Resistividad eléctrica.	Ultrasonidos.
Ensayo Brinell.	Palpador.
Ensayo Vickers.	Rayos X.
Ensayaor Rockwell.	Rayos γ.
Tracción.	Péndulo de Charpy.
Compresión.	Plegado.
Estricción.	Microfotografía.
Alargamiento.	Límite de fatiga.
Límite de rotura.	Ensayos tecnológicos.
Límite elástico.	Embutición.
Límite de fluencia.	Forja.
Tensión o esfuerzo.	Recalcado.
Deformación.	Mandrilado.

ANALIZA Y REFLEXIONA

1. Compara los ensayos de dureza a la penetración HB, HV y HRb – HRC y analiza las diferencias entre ellos. Reflexiona qué tipo de ensayo elegirías según los materiales siguientes:
 - Acero y piezas delgadas.
 - Aleación ligera y piezas planas.
 - Acero y piezas hidráulicas.Enumera las ventajas de unos sobre otros.
2. Un grupo de alumnos analiza el ensayo de tracción y otro los de dureza a la penetración. Dividida la clase en grupos de manera que exista el mismo número de los que trabajan el ensayo de tracción que los de dureza, todos tratarán de obtener el mayor número de datos del ensayo para contrastar con un grupo contrario y reflexionar sobre las ventajas e inconvenientes de realizar un ensayo de tracción o de dureza.
3. Analiza las siguientes propiedades de los materiales: cohesión, elasticidad y plasticidad. Reflexiona sobre este estudio y define qué tipo de ensayo valora mejor cada propiedad y por qué. Contrastá las opiniones con otros compañeros.

4. Una probeta normalizada española tiene una distancia entre puntos de 100 mm y su diámetro es de 13,8 mm, si le aplicamos una carga de 15.000 N los puntos se encuentran separados 104 mm. Calcula:

- a) La tensión unitaria (σ).
- b) El alargamiento (δ).
- c) La deformación unitaria (ϵ).

Solución:

$$a) A_o = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 13,8^2}{4} = 149,57 \text{ mm}^2$$
$$\sigma = \frac{P}{A_o} = \frac{1.500 \text{ N}}{149,57 \text{ mm}^2} = 100,28 \text{ N/mm}^2$$

$$b) \text{ Si } L_o = 100 \text{ y } L = 104 \text{ mm}$$

$$\delta = L - L_o = 104 - 100 = 4 \text{ mm}$$

$$c) \text{ Si } \delta = 4 \text{ mm}$$

$$\epsilon = \frac{\delta}{L_o} = \frac{4}{100} = 0,04$$

5. Una probeta de acero de 10 mm de diámetro está sometida a un esfuerzo de cortadura de 325 N en el momento de su rotura. Calcula el valor de la tensión unitaria de rotura.

Solución:

$$\text{Si } d = 10 \text{ mm y } P = 325 \text{ N y } \tau = \frac{P}{A_o} \text{ tendremos:}$$
$$\tau = \frac{325}{3,14 \cdot 10^2} = 4,14 \text{ N/mm}^2$$

6. Analiza el diagrama esfuerzos – deformaciones del ensayo de tracción y reflexiona con tus compañeros sobre las siguientes cuestiones:

- Qué diferencias existen entre el límite elástico y el de proporcionalidad.
- Qué diferencias existen entre el límite de fluencia y el de rotura.
- Cómo será el límite elástico de un material muy poco dúctil.

7. Analiza objetos de máquinas sometidos a esfuerzos de tracción y fatiga. Haz un listado de 5 elementos de cada tipo y reflexiona las consecuencias que originará una elección del material inadecuado.

8. En el diagrama esfuerzos – deformaciones del ensayo de tracción, analiza las zonas elástica y plástica. Explica:

- Ambos conceptos y las diferencias entre ellos.
- Los conceptos de tensión y deformación.
- Qué sucede en cada zona.

Contrasta este diagrama con el de compresión y explica las diferencias más significativas.

9. Analiza el ensayo de resiliencia y reflexiona:

- Define qué es la resiliencia.

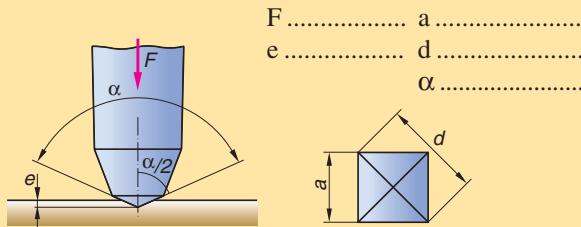
- Para qué se utiliza este ensayo.
 - Con qué máquina se lleva a cabo.
10. Elige dos tipos de alambres de materiales diferentes. Somételas a esfuerzos alternativos de igual fuerza y analiza cuál rompe antes y cómo se produce la rotura. Observa objetos en los que haya piezas de esos materiales y reflexiona sobre las funciones que cumplen.

AMPLÍA Y PROFUNDIZA

1. Se trata de buscar información en páginas web, textos de ampliación, enciclopedias técnicas, catálogos de casas comerciales, revistas técnicas... que permita completar al máximo la tabla de la figura siguiente.

Tipos de ensayo	Métodos	Características
Al rayado	Mohs Martens Lima	
A la penetración	Brinell (HB) Vickers (HV) Rockwell (HR b/c)	
Dinámicos	Shore Poldi	

2. Para realizar un ensayo de dureza Brinell en un acero se utiliza un penetrador de bola de 10 mm de diámetro. Habiéndose obtenido una huella de diámetro 5 mm, la carga aplicada ha sido de 3.000 kp y el tiempo de aplicación de 12 segundos. Calcula:
 - a) La dureza Brinell de dicho material.
 - b) Porcentaje de carbono que contiene el acero.
 - c) Resistencia a la tracción.
 - d) Expresión del valor de la dureza Brinell.
3. Un alambre de acero en el que $E = 210 \text{ GN/m}^2$ con 5 mm de diámetro y 1 m de longitud está sometido a una carga de tracción de 10^3 N . Calcula:
 - a) Esfuerzo unitario.
 - b) Alargamiento unitario y total.
 - c) Límite elástico si las deformaciones permanentes comienzan para un alargamiento total de 1,85 mm.
 - d) Coeficiente de trabajo, si se adopta como tal $2/3$ del límite elástico.
4. En la representación gráfica se indica un método de ensayo de material. Deberás puntualizar:
 - a) Tipo de ensayo de que se trata.
 - b) Tipo de penetrador utilizado y características que lo definen.
 - c) Describe la nomenclatura:



5. En un ensayo de resiliencia en el péndulo de Charpy, la maza del péndulo, que pesa 20 kg, cae desde 1 m de altura y rompe una probeta de sección $5 \times 10 \text{ mm}^2$ y sube hasta 70 cm de altura. Calcula la energía de rotura y la resiliencia del material.

6. Se tiene una probeta de acero de 7,84 mm de diámetro. Sobre ella se determinan dos puntos separados por una distancia de 39,2 mm, sometiéndola a esfuerzos crecientes hasta su rotura. Efectuadas las oportunas medidas se tiene que la longitud final entre dichos puntos es de 45,3 mm y el diámetro en la zona de rotura de 5,30 mm. Las cargas aplicadas fueron de 3.690 N para el límite elástico y de 4.650 N en el momento de la rotura. Calcula:

- a) Alargamiento
- b) Estricción
- c) Límite elástico (σ_e)
- d) Esfuerzo de rotura (σ_r)

7. Una probeta normal española ($d = 13,8 \text{ mm}$ y distancia entre puntos 100 mm), al estar sometida a tracción, comienza a fluir con 3.950 N, produciéndose la rotura a los 6.230 N. La probeta quedó con una longitud de 119,2 mm y el $d = 9,8 \text{ mm}$ en la sección de rotura. Calcula:

- a) Límite de fluencia
- b) Esfuerzo de rotura
- c) Tensión real de rotura
- d) Alargamiento en %
- e) Estricción en %

SABÍAS QUE...

- En cualquier proceso de fabricación los ensayos de materiales se emplean para analizar si el material cumple con los requisitos básicos que permitan obtener piezas con las propiedades y características que la aplicación técnica a la que se destinará requiere. Los ensayos aportan seguridad en la elección del material.
- Uno de los inconvenientes que presentan los ensayos de dureza Brinell y Vickers es la necesidad de disponer de dispositivos fiables para medir las dimensiones de las huellas. Generalmente la medida de las huellas se realiza con un equipo de comparación óptica, aunque suelen emplearse útiles de medida directa (regla graduada, pie de rey...).
- Los valores de dureza HB y HV son coincidentes hasta niveles de 300 HB, pero a partir de ahí existen discrepancias crecientes que se acentúan por encima de los 600 HB debido a que la bola del penetrador del ensayo Brinell se deforma bastante mientras que la pirámide Vickers apenas sufre una ligera torsión.
- El método Rockwell supera el mayor inconveniente de los métodos Brinell y Vickers (que es la difícil medida del valor de dureza), lo que les hace más lentos. Se emplea más el método Rockwell porque es válido tanto para trabajar en materiales duros o blandos, aunque no sea tan preciso como los otros.
- Está establecido un límite elástico convencional por convenio cuyo valor está calculado para el esfuerzo que, aplicado a la probeta durante 10 segundos, produce en ella una deformación permanente superior al 0,2 % de su longitud inicial.
- El valor de la dureza Martens de los materiales metálicos más comunes es:

$$\Delta_M \text{ del plomo} = 16,8 \quad \Delta_M \text{ del cobre} = 37 \\ \Delta_M \text{ del acero dulce} = 73 \quad \Delta_M \text{ de acero al carbono} = 145$$

- La dureza Brinell fue ideada por el ingeniero sueco Brinell en 1900. La dureza Rockwell fue descubierta en 1924 y la dureza Vickers se desarrolló en 1925 por los ingenieros Smith y Sandland y debe su nombre a la casa Vickers, que fue quien desarrolló el primer equipo para medirla.
- Los rayos X fueron descubiertos en 1895 por W. Conrad Roentgen, físico alemán que recibió el primer Nobel de Física por dicho descubrimiento. En honor a él se da el nombre de roentgen a una medida física que calcula la intensidad de las radiaciones de alta frecuencia (rayos X y rayos γ).

AUTOEVALUACIÓN

Contesta al siguiente cuestionario de autoevaluación. Marca la respuesta válida con una cruz delante de la letra correspondiente.

1. Una deformación es elástica cuando:
 - a) Los átomos realizan nuevos enlaces.
 - b) Los átomos no rompen los enlaces primitivos.
 - c) Los átomos recuperan su estado primitivo.
 - d) Las fuerzas de cohesión se rompen.
2. Al fenómeno mediante el cual se sigue deformando con material después de haber cesado la fuerza que lo deforma, se denomina:
 - a) Fatiga.
 - b) Deformación plástica.
 - c) Fluencia viscosa.
 - d) Elasticidad.
3. El ensayo de dureza nos permite analizar en un material su:
 - a) Elasticidad.
 - b) Plasticidad.
 - c) Cohesión.
 - d) Fragilidad.
4. El ensayo de tracción proporciona un diagrama esfuerzos – deformaciones en el que hay diferentes zonas. La zona en la que las deformaciones son proporcionales a las tensiones aplicadas se conoce con el nombre de:
 - a) Zona de rotura.
 - b) Zona de fluencia.
 - c) Zona plástica.
 - d) Zona elástica.
5. Uno de los siguientes ensayos es técnico. Al realizarlo la pieza es destruida (ED), pertenece al grupo de los mecánicos y es estático. Indica cuál es:
 - a) Cortadura.
 - b) Fatiga.
 - c) Embutición.
 - d) Micrografía.
6. La constante K (propia de cada material) determina el valor de la carga en uno de los ensayos de dureza. ¿En cuál crees que es?
 - a) Rockwell B (HRb).
 - b) Rockwell C (HRc).
 - c) Brinell (HB).
 - d) Vickers (Hv).
7. La definición correcta de tensión o esfuerzo unitario queda expresada por:
 - a) La sección del elemento a considerar multiplicada por la fuerza que lo separa de la sección.
 - b) El esfuerzo que tiene que soportar cada unidad de superficie de la sección de la pieza considerada.
 - c) La potencia desarrollada en la unidad de tiempo.
 - d) No es correcta ninguna de las definiciones expuestas.
8. Un material por debajo del límite de fluencia (σ_f) se comporta como:
 - a) Plástico.
 - b) Dúctil.
 - c) Elástico.
 - d) Roto.
9. Los ultrasonidos son ensayos que pertenecen al grupo de:
 - a) Ensayos destructivos (ED).
 - b) Ensayos químicos.
 - c) Ensayos mecánicos – dinámicos.
 - d) Ensayos no destructivos (END).
10. La resiliencia o ensayo de resistencia al choque es un ensayo:
 - a) Destructivo de tipo mecánico.
 - b) Destructivo de tipo dinámico.
 - c) Destructivo tecnológico.
 - d) No destructivo magnético.