

1. Introducción.
2. Propiedades mecánicas.
3. Tipos de ensayos Clasificación.
4. Ensayos destructivos estáticos.
5. Ensayos destructivos dinámicos.
6. Ensayos destructivos tecnológicos.
7. Ensayos no destructivos.

1. Introducción

Para conocer la constitución y el comportamiento de un determinado material es necesario someterlo a procedimientos complejos de observación denominados **ensayos**.

A partir de ellos, podemos determinar las propiedades de los materiales, que se agrupan en tres grandes categorías: propiedades físicas, químicas y mecánicas.

- *Las propiedades físicas* tradicionales son la extensión y la impenetrabilidad, que son atributos propios del material. Otras se derivan del comportamiento de éste bajo la acción de agentes físicos externos como el calor, la electricidad, el magnetismo o la luz.
- *Las propiedades químicas* más importantes son la oxidación y la corrosión, sobre todo en los metales. El resto se relaciona con los procedimientos de obtención y los tratamientos superficiales.

2. Propiedades mecánicas.

Definen el comportamiento de los materiales frente a determinadas acciones mecánicas exteriores, como fuerzas o desplazamientos.

Las principales son:

- ~ **Cohesión:** es la resistencia que ofrecen los átomos de los materiales a separarse. Depende de las fuerzas intermoleculares que los mantienen unidos.
- ~ **Elasticidad:** es la capacidad de un cuerpo de recuperar su forma primitiva cuando cesa la carga que los deforma. Los metales poseen un límite de elasticidad, a partir del cual las deformaciones producidas son permanentes.
- ~ **Plasticidad:** es la capacidad que tienen algunos materiales sólidos a adquirir deformaciones permanentes sin llegar a la rotura.
- ~ **Ductilidad:** es la capacidad que poseen ciertos materiales de poder deformarse plásticamente frente a esfuerzos de tracción (estirarse en hilos).
- ~ **Maleabilidad:** es la capacidad que poseen ciertos materiales de poder deformarse plásticamente frente a esfuerzos de compresión (extenderse en láminas).
- ~ **Dureza:** es la resistencia que opone un cuerpo a ser rayado o penetrado por otro.

- ~ **Tenacidad:** es la capacidad de absorber energía frente a esfuerzos bruscos exteriores antes de romperse o deformarse.
Un material es tenaz cuando resulta ser elástico y plástico a la vez: la plasticidad le permite absorber la energía del choque y la elasticidad, emplear esta misma energía para producir un alargamiento recuperable.
- ~ **Fragilidad:** es la cualidad contraria a la tenacidad. Los materiales frágiles no suelen ofrecer resistencia al choque por tener el límite de elasticidad y el de rotura muy próximos, es decir, carecen de zona plástica.
- ~ **Fatiga:** es la resistencia a la rotura por un esfuerzo de magnitud o sentido variables.
- ~ **Resiliencia:** es la capacidad de un material de absorber energía en la zona elástica al someterlo a un esfuerzo de rotura. Más que una propiedad, sería el resultado de un ensayo.

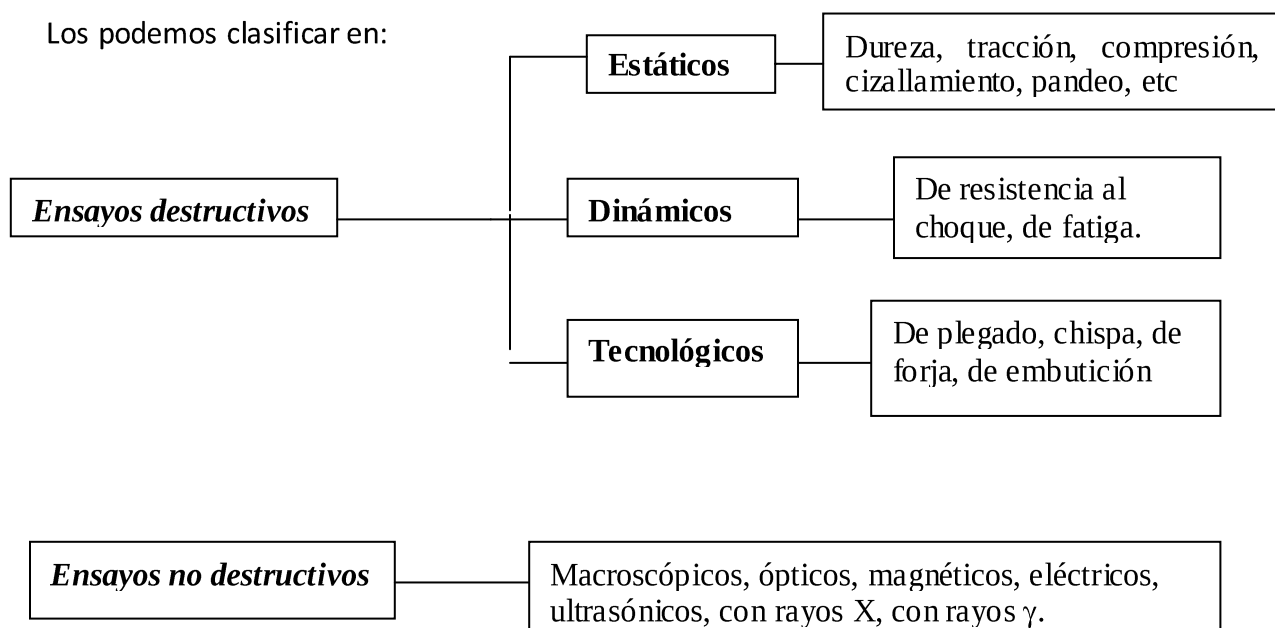
3. Tipos de ensayos. Clasificación.

Los ensayos de materiales son de suma importancia porque nos permiten elegir con seguridad el material idóneo para una determinada aplicación técnica.

Hay ensayos que tratan de averiguar el comportamiento del material frente a los requerimientos de *tipo físico*: esfuerzos de tracción, compresión, flexión, desgaste por rozamiento, dureza, etc.

Otros, en cambio, intentan conocer la *estructura interna del material*. A partir de ellos, se obtienen datos relacionados con la resistencia de éste frente a los agentes químicos, la dilatación, densidad, conductividad térmica, eléctrica o magnética, etc.

Los podemos clasificar en:



4. Ensayos destructivos estáticos.

Se trata de procedimientos de trabajo en los que la muestra de material analizada queda destruida.

4.1. Ensayos de dureza al rayado.

La dureza es la resistencia que ofrece un material a ser rayado o penetrado por otro.

Los primeros ensayos de dureza estaban basados en la resistencia que ofrecía un material a ser rayado. El método que fue ideado por **Mohs**, consiste en practicar una serie de rayas sobre el mineral objeto de ensayo con el filo de una serie de cuerpos de durezas distintas.

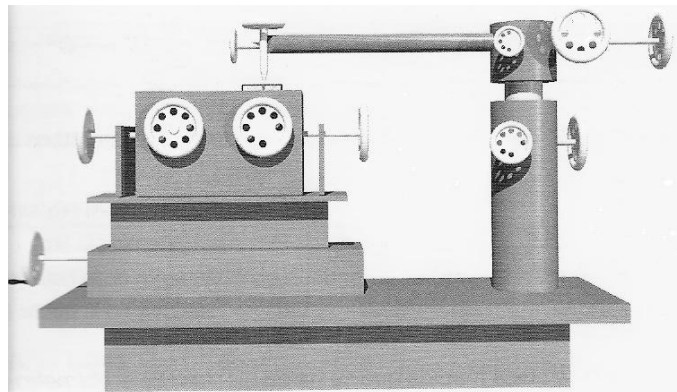
Para cuantificar la dureza, **Mohs** estableció una escala en la que cada mineral raya a los anteriores a él y es rayado por los que le siguen. El más blando es el talco y el más duro el diamante.

- | | |
|-------------|---------------|
| 1. Talco | 6. Feldespato |
| 2. Yeso | 7. Cuarzo |
| 3. Calcita | 8. Topacio |
| 4. Fluorita | 9. Corindón |
| 5. Apatito | 10. Diamante |

Para materiales metálicos, se emplea el **Método Martens**, que se basa en la anchura del surco que provoca una punta de diamante de forma piramidal cuando se desplaza sobre el metal objeto de ensayo, siendo la carga de aplicación constante.

Se utiliza un dispositivo denominado **Esclerómetro de Martens**. Para establecer la dureza del material (Δm) se determina la anchura (a) del surco producido en μ y se aplica la ecuación:

$$\Delta m = \frac{10000}{a^2}$$



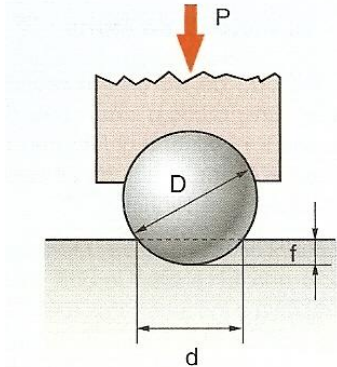
Una variante de este procedimiento es el **Método Turner**, que determina el valor de la dureza a partir de la masa en gramos que produce una huella de 10μ de anchura en el material objeto de ensayo.

4.2. Ensayos de dureza por penetración estática.

Consisten en averiguar la dureza de un material que es sometido a una presión determinada a partir de la huella que marca un penetrador: método Brinell, método Vickers y método₃ Rockwell.

a) Método Brinell

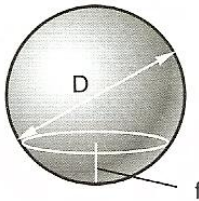
Emplea como penetrador una bola de acero extraduro de diámetro conocido. Al someter la bola a una carga determinada, se produce en el material una huella en forma de casquete esférico



D = diámetro de la esfera. (mm)
 f = profundidad de la huella (mm)
 d = diámetro de la huella (mm)

El valor de la dureza (**HB**) es el cociente entre la carga aplicada (**P o F**) en Kg y la superficie (**S**) de la huella en mm².

$$HB = \frac{P}{S}$$

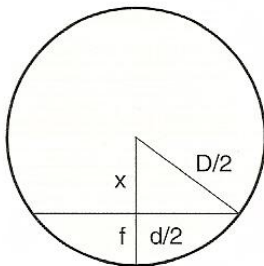


Sabemos que la superficie de un casquete esférico es:

$$S = \pi \cdot D \cdot f$$

Donde D es el diámetro de la esfera y f, la flecha del casquete.

Para determinar el valor de f a partir de los diámetros D y d, basta aplicar el teorema de Pitágoras.



En efecto según se aprecia en la figura adjunta:

$$f = \frac{D}{2} - x$$

Pero, a su vez,

$$x = \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} \Rightarrow f = \frac{D}{2} - \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2}$$

Agrupando y elevando al cuadrado los dos miembros queda:

$$\left(\frac{D}{2} - x\right)^2 = \left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2$$

$$\frac{D^2}{4} + f^2 - 2\frac{Df}{2} = \frac{D^2}{4} - \frac{d^2}{4}$$

$$f^2 - Df + \frac{d^2}{4} = 0$$

Resolviendo la ecuación de segundo grado, y quedándonos con la solución que resta, resulta:

$$f = \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2}$$

Sustituyendo en la superficie del casquete, resulta:

$$S = \frac{\pi D \sqrt{D^2 - d^2}}{2}$$

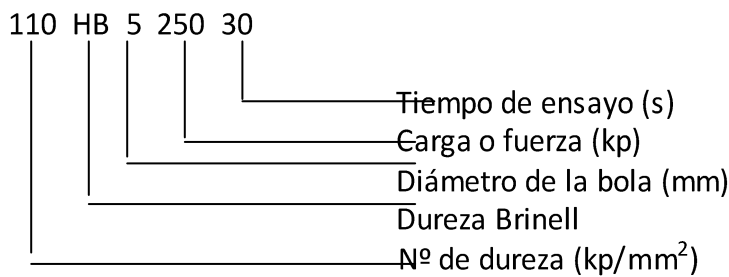
A su vez, sustituyendo S en la dureza y operando, queda:

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

La única medida que se ha de efectuar es el diámetro de la huella.

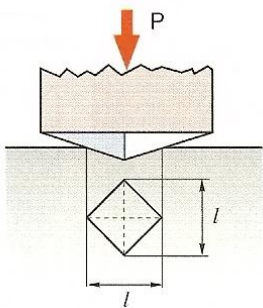
Este método presenta algunos inconvenientes de aplicación cuando se trabaja con materiales con espesor < 6 mm o para aquéllos cuya dureza es superior a 4000 kg/mm².

Se expresa de la siguiente forma:



b) *Método Vickers*

Este ensayo sustituye la bola de acero por una pirámide cuadrangular de diamante.



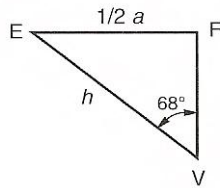
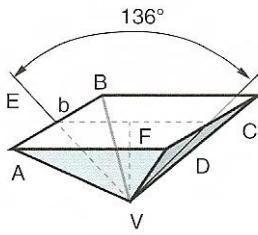
El proceso consiste en presionar la punta de la pirámide, con un ángulo entre caras de 136°, durante unos 20", con lo que queda marcada la huella en el material.

huella.

Al igual que en el método Brinell, la dureza (**HV**) es la relación entre la presión ejercida **P** y la superficie **S** de la

$$HV = \frac{P}{S}$$

La superficie de la huella será igual a cuatro veces la superficie de uno de los triángulos formados:



$$S_{\text{huella}} = 4 S_{\text{triángulo}} = 4 \cdot \frac{bh}{2} = 2bh$$

La base b de cualquiera de los triángulos que forman la huella es igual a la arista a. Para determinar la altura h utilizaremos cálculos trigonométricos.

Si nos fijamos en el triángulo VAB, vemos que su base b es el lado AB, que coincide con la arista de la huella, l, mientras que su altura h está representada por la línea VE.

Como las caras de la huella forman un ángulo de 136°, el ángulo V en el triángulo VEF valdrá 68°. Aplicando la definición de seno, tenemos

(a=b):

$$\text{sen}68 = \frac{EF}{VE} \Rightarrow VE = \frac{EF}{\text{sen}68} \Rightarrow h = \frac{1/2 a}{0,9272} = \frac{a}{1,8544}$$

Sustituyendo los valores de b y h en la expresión de la superficie de la huella, se tiene:

$$S_{\text{huella}} = 2bh = 2a \frac{a}{1,8544} = \frac{2a^2}{1,8544}$$

Pero como el área de un cuadrado puede expresarse indistintamente como a² o como l²/2, la expresión de la huella en función del valor de su diagonal l es:

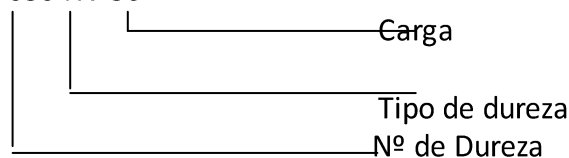
$$S_{\text{huella}} = \frac{2a^2}{1,8544} = \frac{l^2}{1,8544}$$

Si sustituimos en la expresión de S de la dureza HV, tenemos:

$$HV = 1,8544 \frac{P}{l^2}$$

HV= dureza Vickers (Kp/mm²)
 P = carga aplicada (Kp)
 l= diagonal de la huella (mm)

Si tenemos 630 HV 50



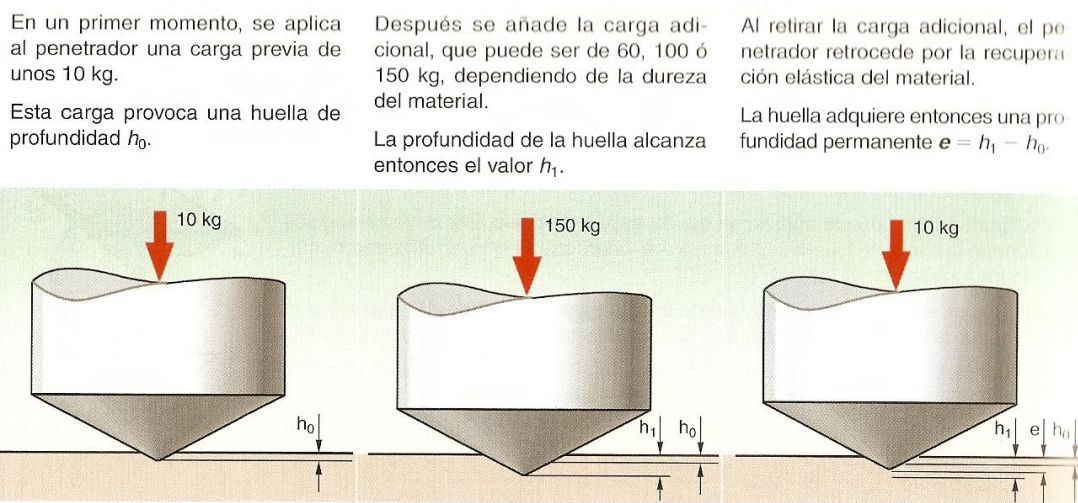
Con este método, pueden efectuarse ensayos sobre chapas de hasta 0,2 mm de espesor. Se aplica tanto a materiales blandos como muy duros, con valores de hasta 1000 kg/mm².

c) Método Rockwell

Permite determinar la dureza del material en función de su profundidad. El penetrador empleado depende del tipo de material.

Para los materiales duros, se utiliza un diamante de forma cónica, con un ángulo de 120° en el vértice y para los blandos una bola de acero.

El ensayo se realiza a tres tiempos:



La profundidad que corresponde a la deformación permanente e es la que mide la dureza Rockwell en una escala graduada. En dicha escala, cada valor de división corresponde a 2 μ .

El valor de la dureza HRC se obtiene restando a 100 el valor de la deformación permanente producida

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

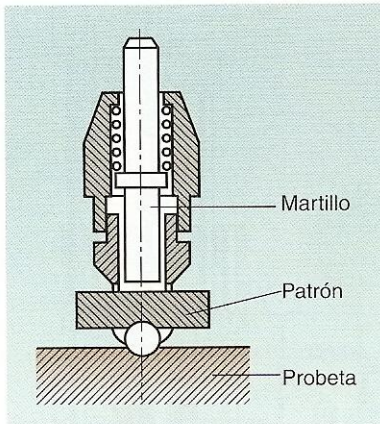
4.3. Ensayos de dureza dinámicos.

Tienen menor fiabilidad que los métodos estáticos.

a) Método de impacto

Consiste en lanzar una bola de acero de 5 mm de diámetro sobre la superficie del material objeto de medida, con un impulso capaz de dejar una huella permanente en su superficie.

A continuación, se mide el diámetro de la huella con ayuda de una lupa y se determina la dureza del material mediante unas tablas que acompañan al aparato.



El aparato más conocido es el de Poldi, que dispone de un yunque que se golpea de forma manual con la ayuda de un martillo. Dispone de una probeta patrón de dureza conocida que golpea la bola y ésta, a su vez, la superficie cuya dureza queremos medir.

Se producen dos huellas: una sobre la probeta patrón y otra sobre el material cuya dureza se desea determinar.

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

Donde:

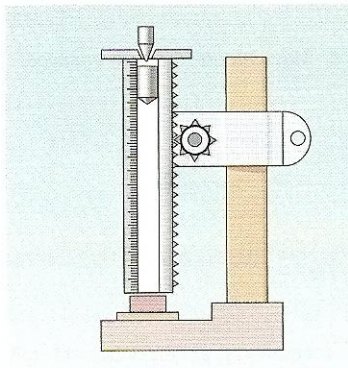
H = dureza del material.

S_p = superficie de la huella en la probeta patrón.

S = superficie de la huella en el material.

H_p = dureza de la probeta patrón.

b) Método de Retroceso o de Shore



Mide la dureza de un material en función de la altura que alcanza en el rebote un martillo que se deja caer desde una altura determinada. Con este método no queda impresa la huella.

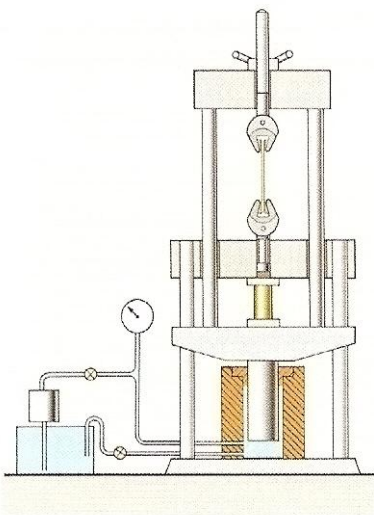
El aparato que se suele utilizar es el esclerómetro, que consta de un tubo de vidrio en cuyo interior puede deslizarse el martillo sin rozamiento.

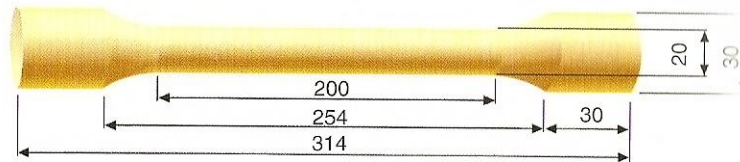
4.4. Ensayos de tracción.

El ensayo de tracción consiste en someter a la probeta a una tensión o esfuerzo, en su eje longitudinal, que tiende a alargarla.

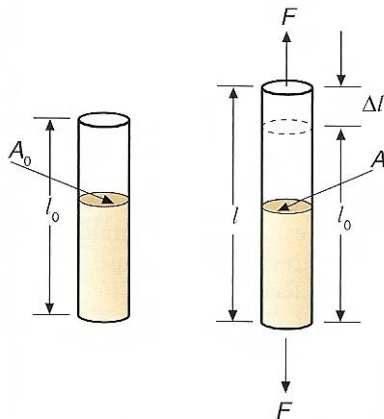
Las probetas empleadas suelen ser de sección circular uniforme y ensanchada en sus extremos, para poder fijarlas a la máquina universal de ensayos o a un sistema hidráulico, que son los encargados de ejercer el esfuerzo de tracción.

Su longitud está calibrada para medir las deformaciones producidas por el alargamiento, y se construyen todas iguales para poder comparar los resultados de probetas fabricadas con distintos materiales.





Para poder determinar la elasticidad del material, tenemos que conocer la **Relación entre esfuerzo y deformación.**



Consideremos una varilla cilíndrica de longitud l_0 y una sección A_0 , sometida a una fuerza de tensión uniaxial F de tracción. Definimos el **esfuerzo** σ como el cociente entre la fuerza de tensión uniaxial F y la sección transversal A_0 de la varilla.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} = \frac{P}{S_0}$$

σ = tensión unitaria (kp/mm^2) o en el S.I. N/m^2 ,
donde $1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ Pascal}$.

$F = P$ = tensión o fuerza aplicada.

$A_0 = S_0$ = sección inicial de la varilla.

Cuando se aplica a una varilla una fuerza de tensión uniaxial, se provoca un alargamiento de la varilla en la dirección de la fuerza. Este desplazamiento se llama **deformación o incremento unitario de longitud** (ε o **A**) y es el cociente entre el alargamiento provocado por la tensión aplicada y la longitud inicial de la probeta.

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

$\varepsilon = A$ = deformación o incremento unitario de longitud. (adimensional)

l = longitud durante el esfuerzo.

l_0 = longitud inicial de la muestra.

Δl = variación de la longitud de la muestra.

A la vez que la longitud de la barra se ve incrementada el diámetro inicial de la barra d_0 se verá disminuido hasta un diámetro d . Definimos contracción transversal como la diferencia entre los diámetros final e inicial $\delta_d = d - d_0$. Contracción transversal unitaria será el cociente de la contracción transversal entre el diámetro inicial:

$$\varepsilon_d = \frac{\partial_d}{d_0} = \frac{d - d_0}{d_0}$$

A la relación entre la contracción transversal unitaria y el alargamiento unitario se le denomina **Coefficiente de Poisson**:

$$\nu = \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon}$$

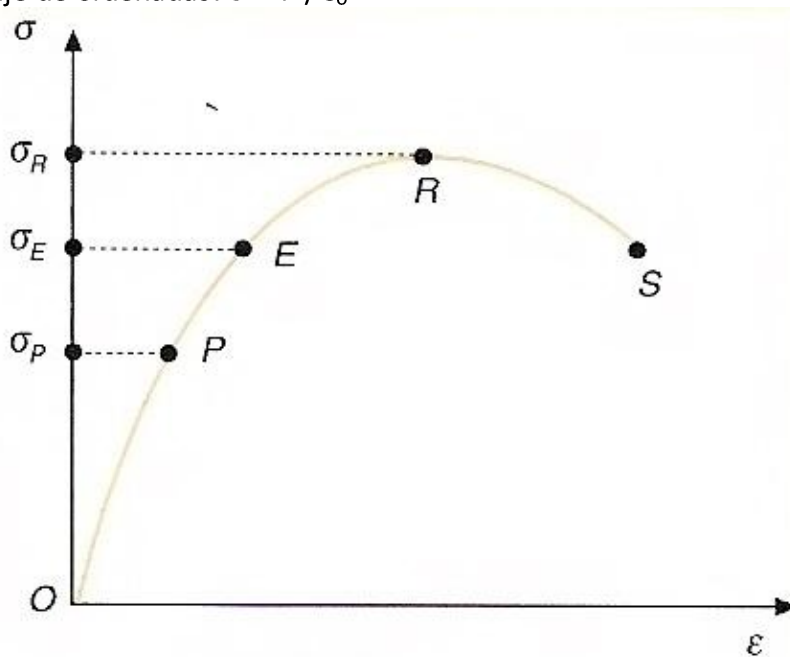
Este coeficiente es siempre inferior a 0,5 (acero y cobre 0,3 y en aluminio 0,13).

Análisis de un diagrama de tracción

Los resultados obtenidos en la realización de un ensayo de tracción se representan en una gráfica en la que una curva relaciona las tensiones de una sección transversal con las deformaciones relativas a la longitud inicial, llamadas alargamientos unitarios.

Eje de abscisas: $\varepsilon = \Delta l / l$

Eje de ordenadas: $\sigma = P / S_0$



Al estudiar este diagrama, podemos distinguir dos zonas fundamentales:

~ **Zona elástica (OE)**: se caracteriza porque al cesar las tensiones aplicadas, los materiales recuperan su longitud inicial, l_0 .

Dentro de esta zona, distinguiremos entre otras dos:

- **Zona de proporcionalidad (OP)**: se trata de una recta, por tanto, existe una proporcionalidad entre las tensiones aplicadas y los alargamientos unitarios. Es la zona donde deben trabajar los materiales.

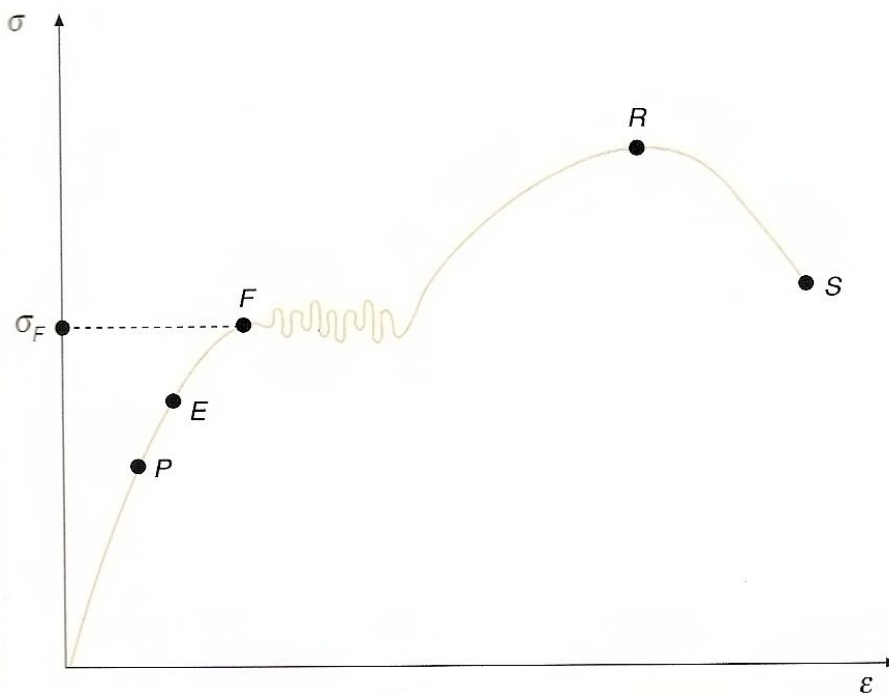
Matemáticamente se cumple: $\sigma = \text{cte} \cdot \varepsilon$

- *Zona de no proporcionalidad (PE)*: el material se comporta de forma elástica, pero las deformaciones y tensiones no están relacionadas matemáticamente. No es una zona aconsejable para trabajar los materiales.
- ~ *Zona plástica (ES)*: se ha rebasado la tensión del límite elástico σ_E , de tal forma que aunque dejemos de aplicar tensiones de tracción, el material ya no recupera su longitud inicial, es decir, su longitud será algo mayor que l_0 . Diremos que el material ha sufrido deformaciones permanentes.

Dentro de esta zona distinguiremos otras dos:

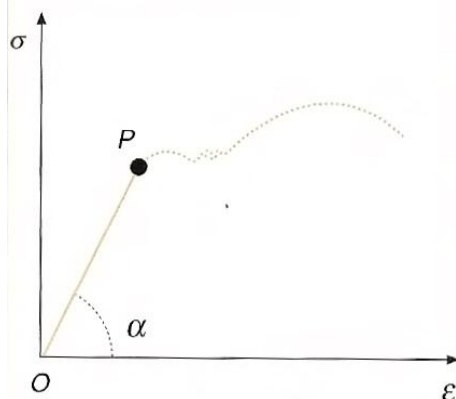
- *Zona límite de rotura (ER)*: aquí a pequeñas variaciones de tensión se producen grandes alargamientos. En esta zona las deformaciones son permanentes. El límite de esta zona es el punto **R**, llamado **límite de rotura**, y a la tensión aplicada en dicho punto se la denomina **tensión de rotura**. A partir de este punto el material se considera roto, aunque no se haya producido la fractura visual.
- *Zona de rotura (RS)*: superado el punto **R**, aunque se mantenga constante o baje ligeramente la tensión aplicada, el material sigue alargándose progresivamente hasta que se produce la rotura física total en el punto **S**.

Este comportamiento de los materiales se puede generalizar. No obstante, existen algunas excepciones entre las que se encuentra el acero, cuya gráfica del ensayo de tracción presenta una zona localizada por encima del límite elástico, donde se produce un alargamiento muy rápido sin que varíe la tensión aplicada. Este fenómeno se conoce como **fluencia**, ya que el material fluye sin causa aparente. El punto donde comienza dicho fenómeno se llama **límite de fluencia (F)** y la tensión aplicada en dicho punto **tensión de fluencia**.



LEY DE HOOKE

Las deformaciones producidas en un elemento sólido elástico son proporcionales a las fuerzas que las producen.



Matemáticamente, se puede enunciar:

$$\text{Fuerza / deformación} = \text{cte} = \tan \alpha$$

Si lo aplicamos en el diagrama $\sigma - \varepsilon$, obtenemos:

$$E = \text{cte} = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

En esta representación, el valor de la $\tan \alpha$ se conoce como **módulo elástico o módulo de YOUNG (E)**, que representa la pendiente de la curva esfuerzo deformación en la región elástica.

Es un parámetro característico de cada material, y se mide en las mismas unidades que σ .

De esta forma, podemos definir la **ley de hooke** en la tracción como: *los alargamientos unitarios (deformaciones) son proporcionales a las tensiones que los producen (fuerzas), siendo la constante de proporcionalidad el módulo de YOUNG.*

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \sigma = \frac{F}{A_0} = \frac{P}{S_0} \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad E = \frac{Pl_0}{S_0 \Delta l}$$

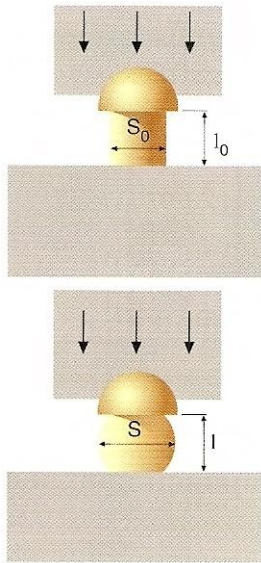
Solo es aplicable en la zona de proporcionalidad, ya que rebasado dicho límite el comportamiento no es lineal.

Se define la **tensión máxima de trabajo** σ_t como el límite de carga al que podemos someter una pieza o elemento simple de estructura. Cuantitativamente, el valor de esta tensión es inferior a la tensión correspondiente al límite de proporcionalidad.

Es el cociente que resulta de dividir la tensión de fluencia por el factor de seguridad (n). n puede tomar valores entre 1,2 y 4,0.

$$\sigma_t = \frac{\sigma_f}{n}$$

4.5. Ensayos de compresión



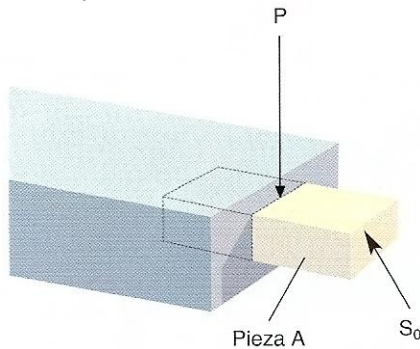
Tratan de averiguar el comportamiento de los materiales frente a los esfuerzos de compresión y se aplican con tensiones progresivamente crecientes hasta conseguir la rotura o aplastamiento, según el tipo de material sobre el que se ensaya.

Los parámetros que deben considerarse en estos ensayos son los mismos que en los ensayos de tracción, pero teniendo en cuenta que de signo contrario.

$$\sigma = -\frac{P}{S_0}$$

4.6.

4.7. Ensayo de cizallamiento.

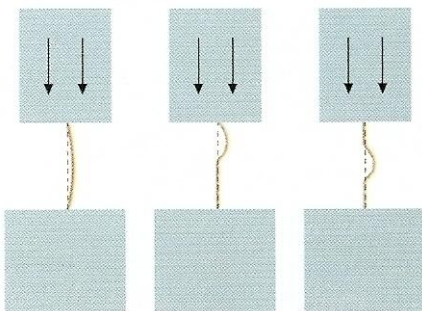


Tratan de determinar el comportamiento de un material sometido a un esfuerzo cortante.

Si una pieza A tiene una parte empotrada y una parte saliente, al aplicar un esfuerzo P lo más cerca posible de la línea de separación entre ambas, la parte saliente tenderá a deslizarse. El esfuerzo τ del material, que se opone a este deslizamiento, viene dado por:

$$\tau = -\frac{P}{S_0}$$

4.8. Ensayo de pandeo.



Si sometemos una probeta de gran longitud y poca sección a un esfuerzo de compresión en la dirección de su eje, veremos que no se producirá aplastamiento, sino que se dobla lateralmente. Esta flexión lateral recibe el nombre de **pandeo**.

La resistencia al pandeo R_p depende del modo de sujetar la barra, del momento de inercia I , de la sección S , de la longitud l y del módulo de elasticidad E .

$$R_p = \frac{\pi^2 E I}{l}$$

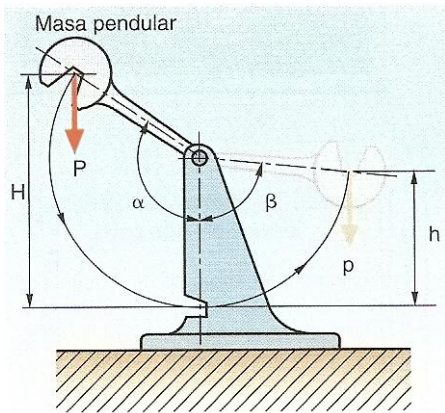
5. ENSAYOS DESTRUCTIVOS DINÁMICOS.

5.1. Ensayo de resistencia al choque

En este tipo de ensayos, se utiliza una probeta provista de una entalladura que es sometida a la acción de una carga de rotura por medio de un martillo que se desplaza en una trayectoria circular.

La energía absorbida por la probeta en su rotura se denomina **resiliencia**, se representa por la letra ρ y se mide en kgm/cm^2 .

El ensayo más común se realiza con el **péndulo de Charpy** que dispone de tres martillos de diferente masa que desarrollan una energía de 10, 30 y 300 kgm .



La probeta se coloca en el lugar previsto y el martillo se levanta hasta una determinada altura H respecto de la probeta, de modo que forme un ángulo α con la vertical.

El martillo se deja caer bruscamente para que choque contra la probeta y la rompa. Aquél continuará su movimiento ascendente hasta alcanzar una altura h y formar un ángulo β con la vertical.

El martillo habrá consumido parte de su energía al romper la probeta y emplea el resto en continuar su desplazamiento hasta detenerse. Por tanto, la energía \mathfrak{S}

$$\mathfrak{S} = P(H - l) - P(l \cos \alpha) - P(l \cos \beta)$$

consumida en el choque será:

\mathfrak{S} = energía empleada en la rotura (Kgm)

P = peso del péndulo (kg)

l = longitud del péndulo (m)

α, β = ángulos que forman el péndulo con la vertical.

En la práctica, los péndulos disponen de tablas en las que se da la energía \mathfrak{S} empleada en la rotura en función del ángulo β descrito por el péndulo. La resiliencia ρ del material se obtiene a partir de la expresión:

$$\rho = \frac{\mathfrak{S}}{S}$$

ρ = resiliencia del material (Kgm/cm^2)

\mathfrak{S} = energía empleada en la rotura (Kgm)

S = sección de la probeta (cm^2)

5.2. Ensayo de fatiga.

Este ensayo mide la capacidad de resistencia a esfuerzos repetitivos, variables en magnitud y sentido, inferiores a los de rotura e incluso al límite elástico.

Las dos leyes fundamentales en este sentido fueron enunciadas por Wohler:

1. Las piezas metálicas pueden romperse bajo tensiones inferiores a su carga de rotura e incluso al límite elástico, si el esfuerzo se repite un número de veces suficiente.
2. La rotura no tiene lugar si la diferencia entre la tensión máxima y mínima es inferior a un cierto límite denominado límite de fatiga, (que es el máximo valor de tensión a que podemos someter un material sin romperse, sea cual fuere el número de veces que se repite la acción)

6. Ensayos destructivos tecnológicos.

Este tipo de ensayos busca obtener resultados cualitativos. Son ensayos generalmente muy rápidos de realizar e informan de manera aproximada del comportamiento del material ante un determinado proceso tecnológico, de cuál es su composición, etc.

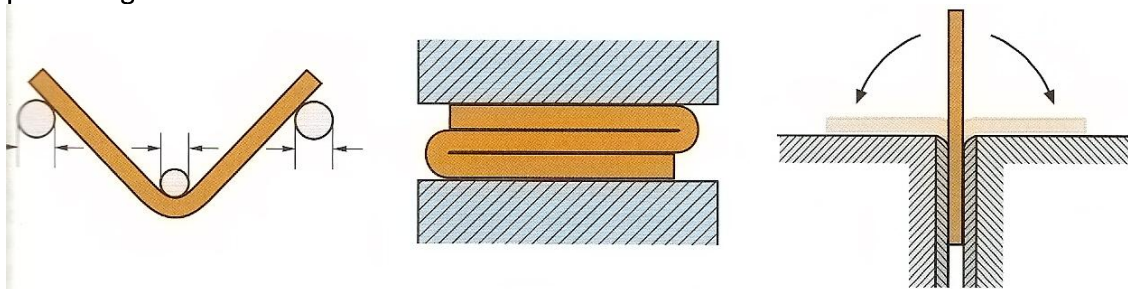
6.1. Ensayo de chispa.

Se trata de un ensayo para tener conocimiento del tipo de acero que se va a trabajar, para saber qué elementos de aleación tiene.

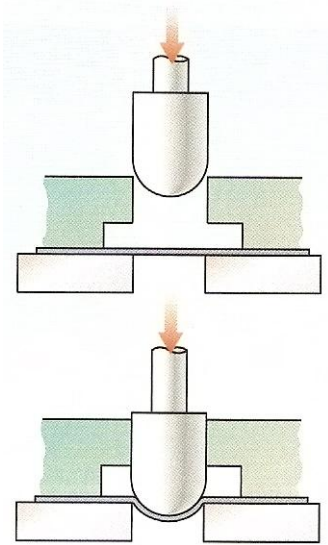
Consiste en presionar el metal que se va a ensayar contra una piedra de esmeril que gira a una velocidad de 400 r.p.m. Al entrar el metal en contacto con el abrasivo se produce un haz de chispas que será distinto para cada tipo de material.

6.2. Ensayo de plegado.

Nos permiten conocer la plasticidad del material. La probeta se somete a un plegado simple, doble o doblado alternativo para observar en la parte exterior del doblado la aparición de posibles grietas.

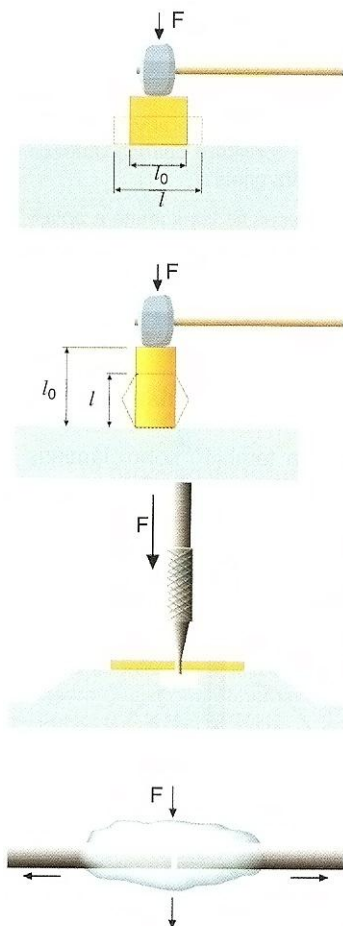


6.3. Ensayos de embutición.



En la embutición se da forma a una chapa por aplastamiento sobre una matriz. Este proceso genera esfuerzos de tracción, pero también hay fluencia del material, es decir, desplazamiento de éste como consecuencia de la compresión a la que se le somete. Interesa saber la resistencia del material hasta la rotura.

6.4. Ensayos de forja.



Los más empleados son:

- *Platinado*: permite determinar el grado de forjabilidad de un material. La pletina utilizada se calienta hasta la temperatura de forjado y se somete a un ensanchamiento a base de ser golpeada con el martillo de forja hasta que aparece la primera grieta.
- *Recalcado*: se lleva a cabo para determinar la calidad de los materiales empleados para la fabricación de remaches. En este caso se golpea la probeta hasta que aparece la primera grieta lateral.
- *Mandrilado*: mide la capacidad de perforación de un material.
- *Soldadura*: permite comprobar la resistencia de una soldadura. Se corta una barra en dos partes, se sueldan posteriormente y se somete la soldadura a ensayos.

7. Ensayos no destructivos.

Son aquellos en los que no hay destrucción ni deterioro del material objeto de estudio. No se emplean probetas, sino que se aplican a las piezas acabadas con el fin de descubrir si existe en ellas algún defecto de cualquier tipo, tanto en su superficie como en su interior.

7.1. Ensayos macroscópicos.

Estudian las irregularidades de las piezas a simple vista o mediante ampliaciones que llegan hasta 15 aumentos. Se utilizan para localizar grietas superficiales, porosidades y para determinar descarbonaciones y cementaciones.

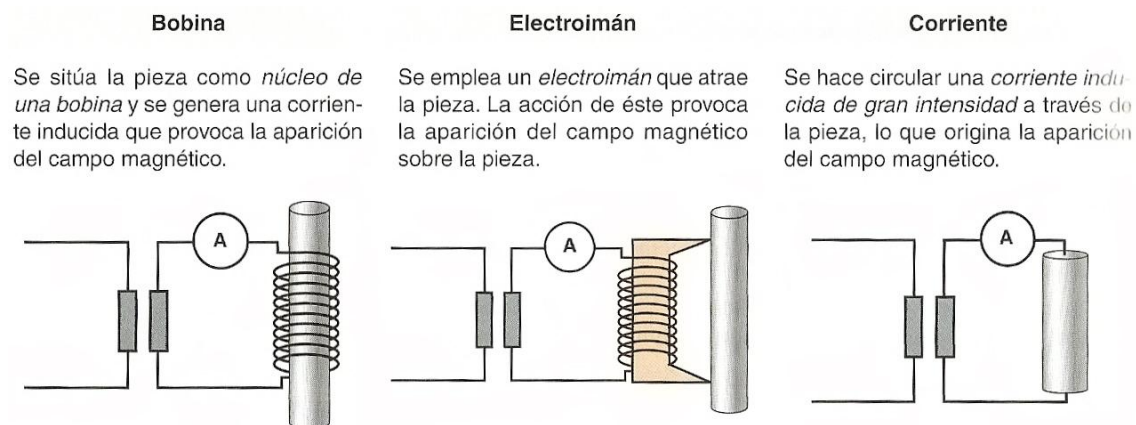
7.2. Ensayos ópticos.

Estudian irregularidades a través de ampliaciones a más de 15 aumentos. Estos ensayos suministran información acerca de los constituyentes de las aleaciones, el tamaño y la forma del grano, las porosidades, las grietas microscópicas y la corrosión intergranular.

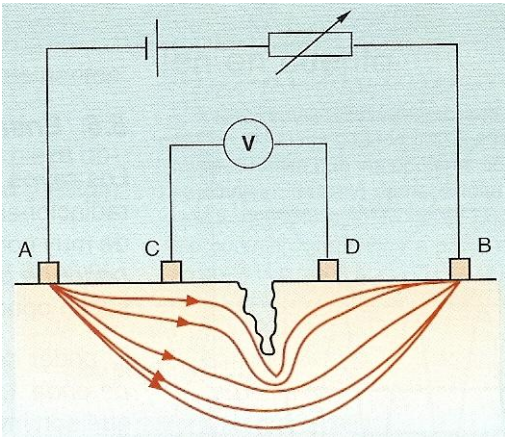
7.3. Ensayos magnéticos.

Están basados en la variación de las propiedades magnéticas del material cuando existe en él alguna perturbación estructural. Pueden ser:

- *Ensayos magnetoscópicos*: son aplicables a materiales ferromagnéticos, es decir, a los que son buenos conductores de los campos magnéticos. Se basan en las variaciones de las líneas de fuerza del campo magnético que se producen cuando existen defectos de continuidad, como grietas etc.
- *Ensayos analíticos*: también se emplean a materiales ferromagnéticos. Se utilizan para detectar defectos de continuidad en las piezas y también para determinar la composición de una aleación.



7.4. Ensayos eléctricos.



Están basados en la variación de resistencia que se produce en un material conductor cuando contiene alguna impureza.

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

R = resistencia del material (Ω).

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

l = longitud del conductor (m)

S = sección del conductor (mm^2)

Cualquier variación de longitud o sección debida a alguna perturbación de continuidad se manifestará con una variación de su resistencia.

7.5. Ensayos ultrasónicos.

Las ondas sonoras se propagan en línea recta en un medio material, pero no en el vacío. Si se producen con una frecuencia superior a los 20000 Hz no son perceptibles por el oído humano y se denominan ultrasonidos.

Se basan en la diferencia de transmisión de los ultrasonidos a través de un material cuando éste presenta fallos en su estructura. Las ondas más empleadas en estos ensayos presentan una frecuencia comprendida entre 105 y 107 kHz, y pueden atravesar capas de acero de varios metros de espesor.

Ensayo por transmisión

Se emplea en planchas de pequeño espesor y consta de un *sistema emisor* de ultrasonidos y un *sistema receptor* situado en la parte opuesta.

El material se sitúa entre el emisor y el receptor, y es sometido a la acción de los ultrasonidos.

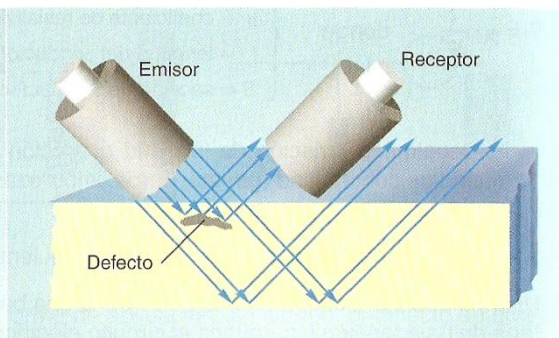
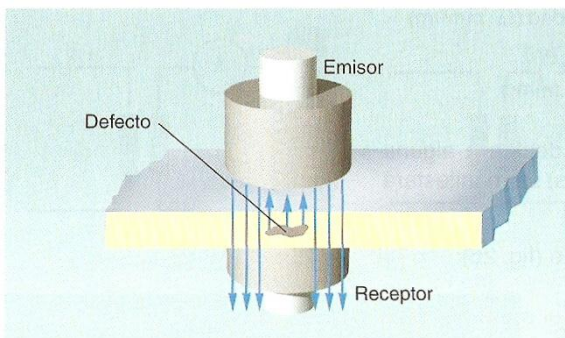
Cuando las ondas encuentran un defecto de continuidad en el material, no se propagan y el sistema receptor transforma la señal recibida en otra señal óptica o eléctrica.

Ensayo por reflexión

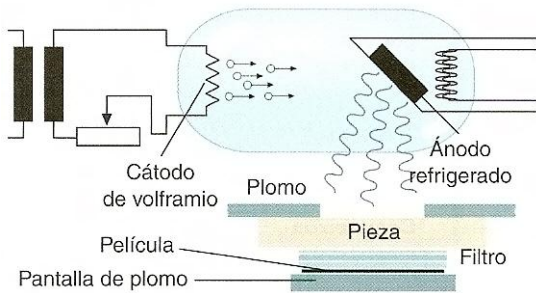
Se usa en piezas de mayor espesor y también dispone de sistemas emisor y receptor, que se sitúan al mismo lado de la pieza.

Cuando las ondas encuentran algún defecto estructural, son reflejadas y captadas por el receptor, que se encarga de convertirlas en señal óptica o eléctrica.

La sensibilidad del aparato depende de la frecuencia de su empleo y es capaz de detectar la profundidad del defecto con gran precisión.



7.6. Ensayos con rayos X



Los rayos X son unas radiaciones que se transmiten en forma de ondas electromagnéticas de muy corta longitud de onda. Esta característica le confiere un gran poder de penetración, por lo que pueden atravesar materiales que resultan opacos para otro tipo de radiaciones.

El ensayo consiste en lanzar una radiación de rayos X a través del material objeto de ensayo. Esta radiación después de atravesar la pieza, debe impresionar una película fotográfica, con lo que se obtiene una radiografía de la pieza.

- Si la pieza no presenta ninguna irregularidad, la radiación se transmite por igual en toda la pieza. La radiografía será uniforme.
- Si existe alguna grieta, oquedad o inclusión de un material distinto, la radiación será absorbida con menor o mayor intensidad en función de la densidad de la irregularidad. La radiografía queda entonces impresionada en distintas tonalidades y puede detectarse la irregularidad.

7.7. Ensayos con rayos gamma.

Los rayos gamma son radiaciones electromagnéticas del mismo tipo que los rayos X, pero de una longitud de onda mucho menor, por lo que su poder de penetración será mucho mayor.

El proceso de ensayo es similar al realizado con rayos X.

COMPARACIÓN ENTRE LAS DISTINTAS ESCALAS DE DUREZA

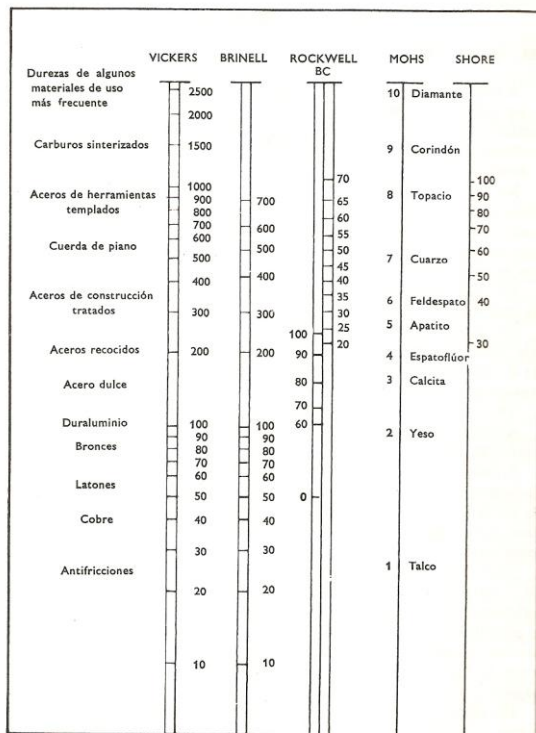


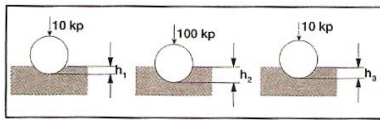
FIGURA 436
Esquema comparativo de las diferentes escalas de dureza.

ENSAYO ROCKWELL

3.2.3. Ensayo Rockwell

Es el ensayo 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. En el ensayo Rockwell lo que se mide es la profundidad de la huella, a diferencia de los Brinell y Vickers, que miden el área de la huella producida.

- Para materiales blandos (entre 60 y 150 HV) se utiliza un penetrador de acero de forma esférica de 1,59 mm de diámetro, y así se obtiene la escala de dureza **Rockwell B** (HRB).
- Para materiales duros (entre 235 y 1075 HV) se emplea un cono de diamante con un ángulo de 120° redondeado en su punta con un casquete esférico de radio igual a 0,2 mm, obteniéndose así la escala de dureza **Rockwell C** (HRC).



Esquema ensayo dureza Rockwell B.

Los distintos pasos de que consta el ensayo Rockwell son:

1. En ambas escalas de dureza se aplica inicialmente una precarga de 10 kp, con lo que el penetrador originará una huella de profundidad h_1 .

2. A continuación se aplica al penetrador el resto de la carga (90 kp en el caso de la escala HRB y 140 kp en el caso de la escala HRC), produciéndose una huella de profundidad h_2 .

3. Transcurridos unos segundos, se reduce la carga hasta alcanzar el valor de la precarga. La profundidad de la huella, h_3 , será mayor que h_1 , puesto que en el paso intermedio se habrán producido en el material deformaciones plásticas que no se recuperan. La máquina del ensayo Rockwell mide la diferencia $e = h_3 - h_1$, y para expresar la dureza de tal forma que los materiales más duros tengan una dureza Rockwell mayor, se efectúa la siguiente operación:

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

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

Las máquinas de ensayo de dureza ofrecen la medida de e en múltiplos de 0,002 mm y el máximo valor de e es el correspondiente a una profundidad de penetración de 0,2 mm.

EJEMPLO:

En un ensayo de dureza Rockwell B, la profundidad h_1 cuando se aplica la precarga es de 0,01mm y la profundidad h_3 cuando se mantiene la precarga después de haber aplicado la totalidad de la carga es de 0,144mm. ¿Cuál será la dureza del material?

Sol.

En un ensayo Rockwell B se cumple:

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

$$e = h_3 - h_1 = 0,144\text{mm} - 0,01\text{mm} = 0,134\text{mm}$$

El valor de e se mide en múltiplos de 2 micras (0,002mm) por lo que:

$$e = \frac{0,134}{0,002} = 67$$

Sustituyendo:

$$\text{HRB} = 130 - e = 130 - 67 = 63$$

Luego la dureza del material es HRB = 63.