

MATERIA: TECNOLOGÍA INDUSTRIAL I.

BLOQUE III. MATERIALES.

TEMA 11B. ENSAYO Y MEDIDA DE LAS PROPIEDADES DE LOS MATERIALES.

ENSAYO Y MEDIDA DE LAS PROPIEDADES DE LOS MATERIALES.

ÍNDICE:

1. TIPOS DE ENSAYOS.
2. ENSAYO DE TRACCIÓN.
 - 2.1. Forma y dimensiones de la probeta.
 - 2.2. Resultados del ensayo.
 - 2.3. Curva de tracción verdadera.
 - 2.4. Tensión máxima de trabajo.
 - 2.5. Máquinas de tracción.
3. ENSAYOS DE DUREZA.
 - 3.1. Ensayos de dureza al rayado.
 - 3.1.1. Escala de Mohs.
 - 3.1.2. Dureza Martens.
 - 3.2. Ensayos de dureza a la penetración.
 - 3.2.1. Ensayo Brinell.
 - 3.2.2. Ensayo Vickers.
 - 3.2.3. Ensayo Rockwell.
4. ENSAYOS DE RESISTENCIA AL IMPACTO.
 - 4.1. Ensayo de tracción por choque.
 - 4.2. Ensayo de flexión por choque.
5. ENSAYO DE FATIGA.
6. ENSAYOS TECNOLÓGICOS.
 - 6.1. Ensayos tecnológicos en barras.
 - 6.2. Ensayos tecnológicos en chapas.
 - 6.3. Ensayos tecnológicos en tubos.
 - 6.4. Ensayos tecnológicos en alambres.
7. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (CONTROL DE DEFECTOS).
8. ACTIVIDADES DE SÍNTESIS.
9. RECURSOS WEB.
10. BIBLIOGRAFÍA.

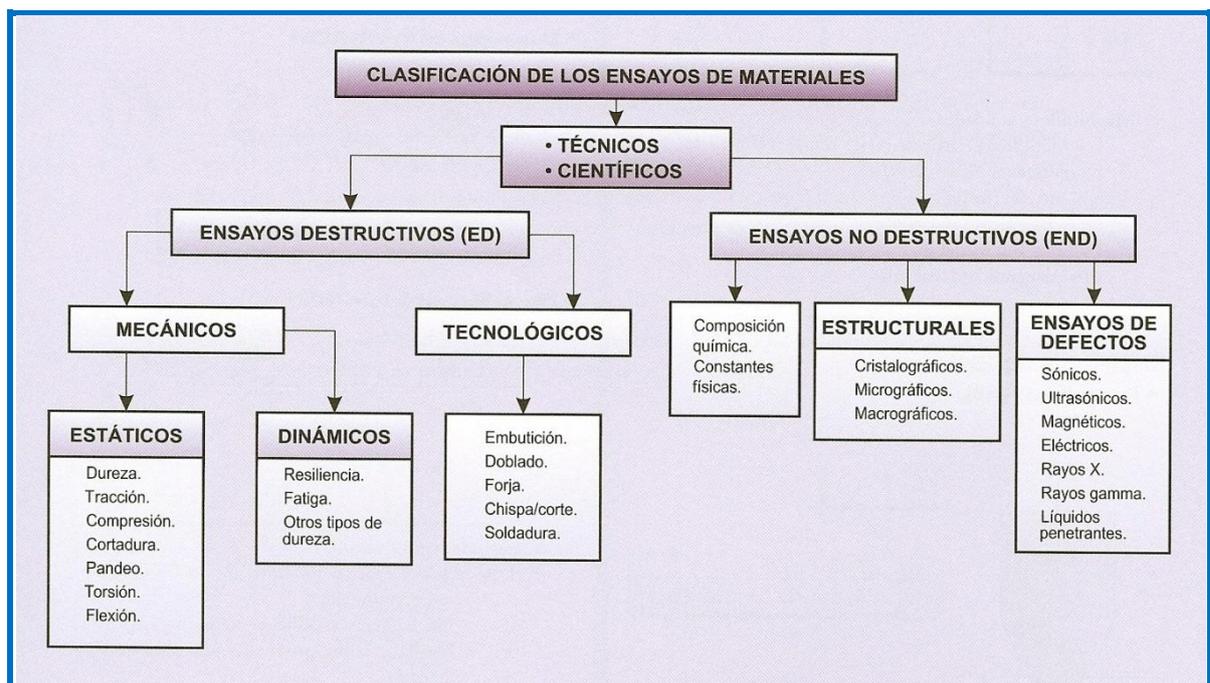


La civilización actual es esencialmente tecnológica. La industria, en todas sus vertientes, exige el uso de maquinaria de alta potencia y la utilización de materiales muy diversos con destinos muy diferentes. La construcción de puentes y viaductos; el diseño y construcción de edificios de grandes alturas y capacidad de poblamiento; la presencia de enormes grúas y excavadoras para el trazado y ejecución de autopistas; la puesta en el mercado de vehículos cada vez más seguros, veloces y potentes... son ejemplos de las exigencias de la modernidad. Conseguir estos objetivos de progreso supone conocer qué materiales son los más idóneos para su mejor utilización, cuáles son sus propiedades, cuál es su reacción ante las condiciones físico-químicas a las que van a ser expuestos... Pero no es solo eso. La tecnología genera, a su vez, residuos. ¿Pueden estos aprovecharse de forma rentable con el fin de generar nuevos productos o, simplemente, para proteger el entorno de una contaminación medioambiental?

Aquí encontrarás respuesta a muchas de estas cuestiones.

Las casas, los automóviles, los aviones... en general todas las estructuras y maquinaria que utilizamos en la actualidad están constituidos por diferentes materiales, elegidos por sus propiedades adecuadas para poder ser utilizados en una determinada aplicación. Actualmente el diseño tanto de la forma como de las secciones de estos elementos se debe realizar con criterios económicos; es decir, se debe emplear la menor cantidad posible de material, pero por otra parte se deben cumplir una serie de especificaciones de seguridad para que no se produzca ningún fallo mecánico en el elemento.

Por tanto, es de suma importancia el conocimiento de las propiedades de los materiales para realizar un diseño adecuado. Para la determinación de estas propiedades existen una serie de ensayos, la mayoría de ellos normalizados. En España el organismo normalizador es AENOR y las normas que dicta llevan el nombre de UNE (Una Norma Española). En esta Unidad nos referiremos a los ensayos más importantes que se pueden aplicar a un material para conocer sus propiedades.



1. TIPOS DE ENSAYOS

Los materiales suelen someterse a una gran variedad de ensayos para conocer sus propiedades. Se intenta de esta manera simular las condiciones a las que van a estar expuestos cuando entren en servicio.

La gran diversidad de ensayos existentes hace necesaria su clasificación, aunque en algunos casos resulta inevitable un cierto solapamiento entre ellos, que se traduce en una evidente falta de sistematización. Se pueden establecer las siguientes clasificaciones:

a) Según la rigurosidad del ensayo:

Ensayos científicos: se obtienen resultados que se refieren a los valores numéricos de ciertas magnitudes físicas. Son ensayos que permiten obtener valores precisos y reproducibles de las propiedades ensayadas, pues las condiciones a las que se somete el material se encuentran convenientemente normalizadas. Un ejemplo de ensayo científico es el ensayo de tracción, en el que se obtiene la resistencia a la tracción, expresada en kp/mm^2 .

Ensayos tecnológicos: se utilizan para comprobar si las propiedades de un determinado material o de una pieza son adecuadas para una cierta utilidad, o si dichas propiedades son las que se presuponen. Ejemplos de ensayos tecnológicos son las pruebas de caída, las de maleabilidad para un material de forja o la prueba de flexión alternativa en alambres, en la que se cuenta el número de veces que una pieza de alambre se puede doblar alternativamente sin que se rompa.

b) Según la naturaleza del ensayo:

Ensayos químicos: permiten conocer la composición, tanto cualitativa como cuantitativa, del material, la naturaleza del enlace químico o la estabilidad del material en presencia de líquidos o gases corrosivos.

Ensayos metalográficos: consisten en analizar la estructura interna del material mediante un microscopio.

Ensayos físicos: se cuantifican, por ejemplo, la densidad, el punto de fusión, el punto de ebullición, la conductividad eléctrica o térmica, etc.

Ensayos mecánicos, mediante los que se determina la resistencia del material cuando se somete a distintos esfuerzos. Entre estos ensayos se encuentran los de tracción, dureza, choque, fatiga o diversos ensayos tecnológicos. En ellos, precisamente, haremos hincapié a lo largo de este tema.

c) Según la utilidad de la pieza después de ser sometida al ensayo:

Ensayos destructivos: se produce la rotura o un daño sustancial en la estructura del material. Son ensayos destructivos, por ejemplo, los ensayos mecánicos de tracción o de dureza; los ensayos físicos, tales como la determinación de los puntos de fusión o de ebullición, o el ensayo químico frente a la corrosión.

Ensayos no destructivos: se analizan las grietas o defectos internos de una determinada pieza sin tener en cuenta las propiedades del material de que está compuesta y sin dañar su estructura. Como ejemplos de ensayos no destructivos se pueden citar los análisis por rayos X o por ultrasonidos. Estrictamente estos métodos no pertenecen al grupo de ensayo de materiales, ya que aquí únicamente se analizan los defectos en una pieza concreta. Por otra parte, existen ensayos cuya inclusión en uno cualquiera de estos dos tipos resulta dudosa, como, por ejemplo, el ensayo de estanqueidad en tubos, ya que no está claro si deteriora o no la estructura del material.

d) Según la velocidad de aplicación de las fuerzas:

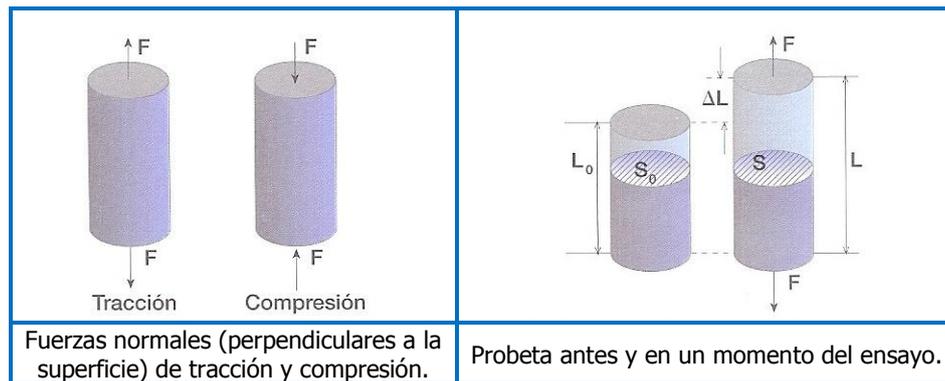
Ensayos estáticos: la velocidad de aplicación de las fuerzas al material no influye en el resultado del ensayo. En algunos de ellos, como en el de tracción, la velocidad de aplicación de la fuerza se mantiene por debajo de un cierto límite para que el ensayo sea estático.

Ensayos dinámicos: la velocidad de aplicación de las fuerzas juega un papel decisivo en el ensayo. Un ejemplo de este tipo es el ensayo de flexión por choque.

En el campo del estudio de la resistencia de materiales, a las fuerzas aplicadas a los materiales se las denomina también **cargas**.

2. ENSAYO DE TRACCIÓN

El ensayo de tracción está considerado como uno de los más importantes para la determinación de las propiedades mecánicas de cualquier material. Los datos obtenidos se pueden utilizar para comparar distintos materiales entre sí y para saber si una pieza de un cierto material podrá soportar unas determinadas condiciones de carga.



El ensayo consiste en someter una pieza de forma cilíndrica o prismática de dimensiones normalizadas -que se conoce con el nombre de probeta- a una fuerza normal de tracción que crece con el tiempo de una forma lenta y continua, para que no influya en el ensayo, el cual finaliza, por lo general, con la rotura de la probeta.

Durante el ensayo se mide el alargamiento (ΔL) que experimenta la probeta al estar sometida a la fuerza (F) de tracción. De esta forma se puede obtener un diagrama fuerza (F)-alargamiento (ΔL), aunque para que el resultado del ensayo dependa lo menos posible de las dimensiones de la probeta y que, por tanto, resulten comparables los ensayos realizados con probetas de diferentes tamaños, se utiliza el diagrama tensión-deformación:

• **Tensión (σ)** es la fuerza aplicada a la probeta por unidad de sección; es decir, si la sección inicial es S_0 la tensión viene dada por:

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

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

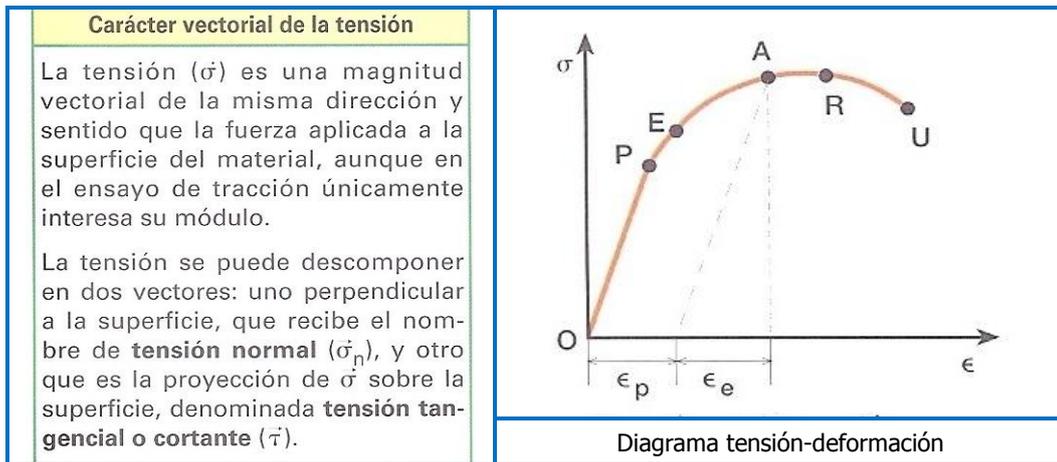
• **Deformación o alargamiento unitario (ϵ)** de la probeta en un instante del ensayo es el cociente entre el alargamiento ΔL experimentado y su longitud inicial:

$$\epsilon = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0}$$

La deformación es una magnitud adimensional, que se puede expresar en tanto por ciento:

$$\epsilon (\%) = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100$$

En la ilustración se muestra un diagrama tensión-deformación típico de un metal, obtenido en un ensayo de tracción, y en el que se pueden apreciar dos zonas:



- **Zona elástica (OE)**: la deformación experimentada por la probeta no es permanente; es decir, si en cualquier punto entre O y E se detiene el ensayo la probeta recuperará su longitud inicial.
- **Zona plástica (EU)**: los alargamientos son permanentes, de manera que si el ensayo se detiene, por ejemplo, en el punto A, la probeta recupera la deformación elástica (ϵ_e), persistiendo al final una deformación remanente o plástica (ϵ_p).

Si se reinicia de nuevo el ensayo, la nueva curva de tracción coincidirá prácticamente con la curva de descarga y, como se puede comprobar, la zona elástica se hace mayor. Con esta operación se consigue lo que se llama un **endurecimiento por deformación**.

Dentro de la zona elástica se distinguen dos partes diferentes:

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

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

siendo E el **módulo de Young** o **módulo de elasticidad longitudinal**, medido en N/m^2 en el Sistema Internacional.

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

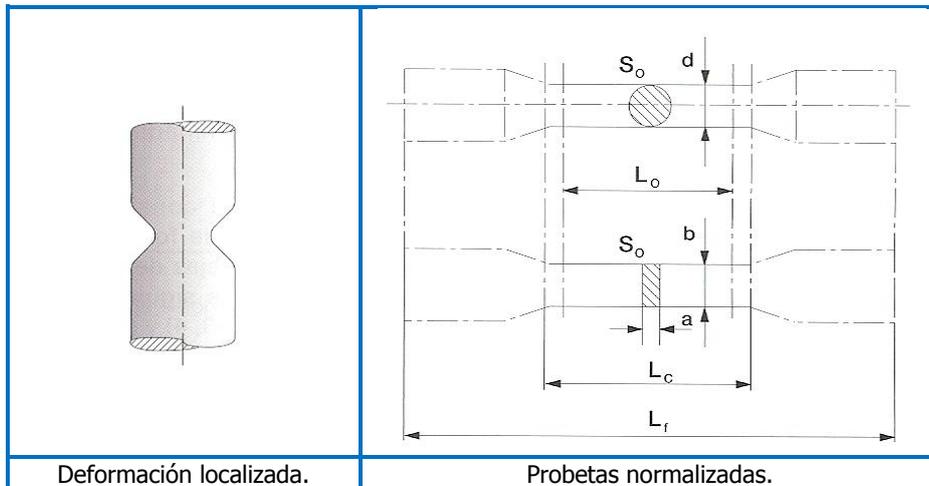
Dentro de la zona plástica se distinguen también dos zonas:

- **Zona de deformación plástica uniforme (ER)**: la curva se hace más tendida, de tal forma que no es necesario un incremento de carga elevado para conseguir grandes alargamientos. La fuerza máxima dividida entre la sección inicial de la probeta determina la **resistencia a la tracción** (σ_R), punto en el que finaliza la zona plástica de deformación uniforme.
- **Zona de estricción o de deformación plástica localizada (RU)**: la deformación se localiza en una determinada zona de la probeta, la tensión disminuye y la probeta termina por romper en esa zona.

2.1. Forma y dimensiones de la probeta

Las probetas utilizadas en el ensayo de tracción tienen una sección transversal circular o rectangular. La parte central de la probeta debe estar mecanizada, de tal forma que su sección sea constante; en caso de que el material sea frágil será preciso incluso pulir esta superficie.

Sobre la parte calibrada se marca con unas señales de referencia la longitud inicial (L_0) de la probeta. La longitud de la parte calibrada debe estar comprendida entre $L_0 + d/2$ y $L_0 + 2d$ (d = diámetro de la probeta) en el caso de probetas cilíndricas, y entre $L_0 + 1,5 \sqrt{S_0}$ y $L_0 + 2,5 \sqrt{S_0}$ si se trata de probetas rectangulares o cuadradas.



En los extremos de la probeta la sección aumenta para facilitar su sujeción a las mordazas de la máquina de tracción. Estas zonas de mayor sección reciben el nombre de **cabezas**. Para evitar zonas en las que se concentren las tensiones durante el ensayo, la sección de la probeta varía desde la parte calibrada a la cabeza de una forma suave y gradual.

Para que los ensayos con probetas de diferentes dimensiones sean comparables es preciso que la relación:

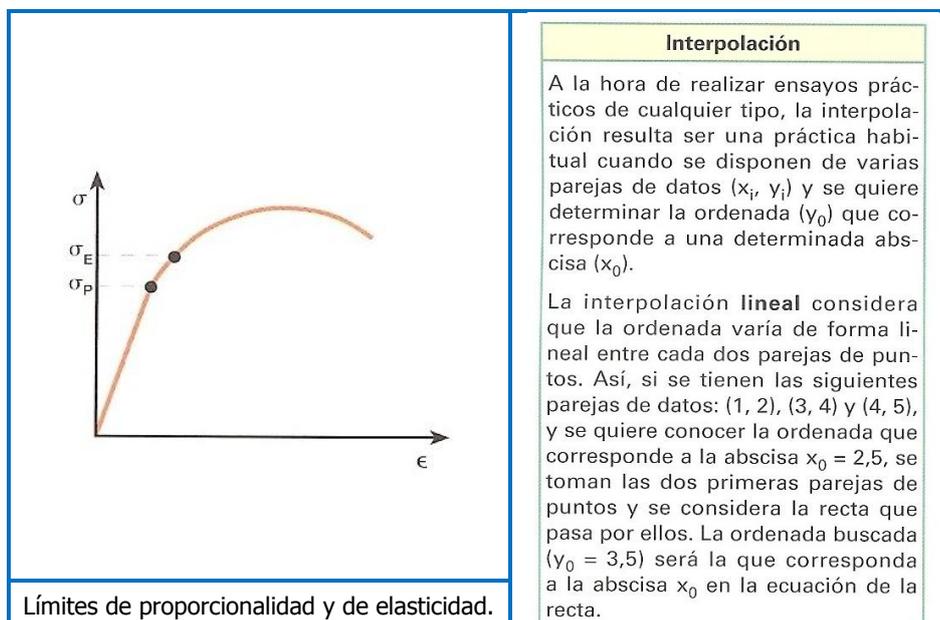
$$K = \frac{L_0}{\sqrt{S_0}} = \frac{L'_0}{\sqrt{S'_0}}$$

se mantenga constante.

2.2. Resultados del ensayo

Entre los datos que se obtienen en un ensayo de tracción, los más significativos son los siguientes.

- **Límite de proporcionalidad (σ_P):** es la tensión a partir de la cual las deformaciones dejan de ser proporcionales a las tensiones.



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

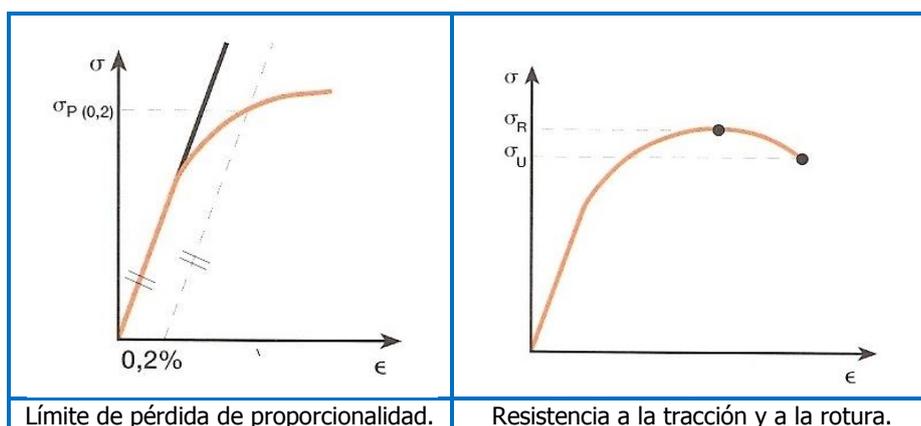
- En caso de que la probeta recupere su longitud primitiva, el límite de elasticidad será superior a la tensión aplicada, y se debe continuar el ensayo utilizando tensiones cada vez mayores.
- Si la probeta muestra una deformación permanente, la tensión aplicada será superior al límite de elasticidad. Una vez deformada plásticamente, la probeta queda inservible para este ensayo y se deberá continuar acotando inferior y superiormente el límite de elasticidad utilizando otras probetas del mismo material.

Para solventar esta dificultad técnica se utilizan dos nuevas tensiones denominadas **límite de deformación permanente** y **límite de pérdida de proporcionalidad**.

- **Límite de deformación permanente (σ_R):** es la tensión que provoca una deformación permanente igual a un determinado porcentaje de la longitud inicial; por regla general, este porcentaje es del 0,2%, indicándose mediante la notación $\sigma_{R(0,2)}$. Para determinar esta tensión se somete a la probeta a cargas crecientes que se mantienen durante unos 10 segundos y posteriormente se eliminan, midiéndose en cada caso la deformación permanente experimentada por la probeta. El valor $\sigma_{R(0,2)}$ se obtiene por interpolación.

- **Límite de pérdida de proporcionalidad (σ_P):** es la tensión que provoca un alargamiento no proporcional igual a un determinado porcentaje de la longitud inicial. El valor de la tensión se debe acompañar de un subíndice que indica el porcentaje considerado: el más frecuente es el 0,2%, lo que se indica con la notación $\sigma_{P(0,2)}$. Para obtener este valor de forma práctica es preciso considerar la intersección entre la curva de tracción y la recta paralela a la zona proporcional de la curva que corta el eje de abscisas por el porcentaje fijado.

- **Módulo de Young (E):** es la relación entre la tensión y la deformación en la zona de comportamiento proporcional, como se mencionó anteriormente.



- **Resistencia a la tracción (σ_R):** es la máxima tensión que soporta la probeta durante el ensayo.

- **Resistencia a la rotura (σ_U):** es la tensión soportada por la probeta en el momento de la rotura. Su valor es muy próximo al de la resistencia a la tracción siempre que en la probeta no se produzca estricción. Apenas tiene interés práctico, ya que una vez superada la resistencia a la tracción la probeta se considera rota, aunque no se haya producido de forma física la separación de la misma.

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

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

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

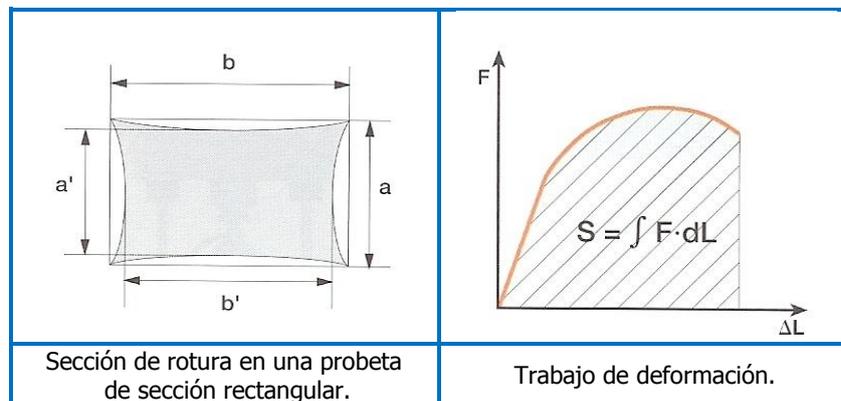
• **Estricción de rotura (Z):** es la disminución de sección que se produce después de la rotura, y que en tanto por ciento viene expresada por:

$$Z (\%) = \frac{S_0 - S_F}{S_0} \cdot 100$$

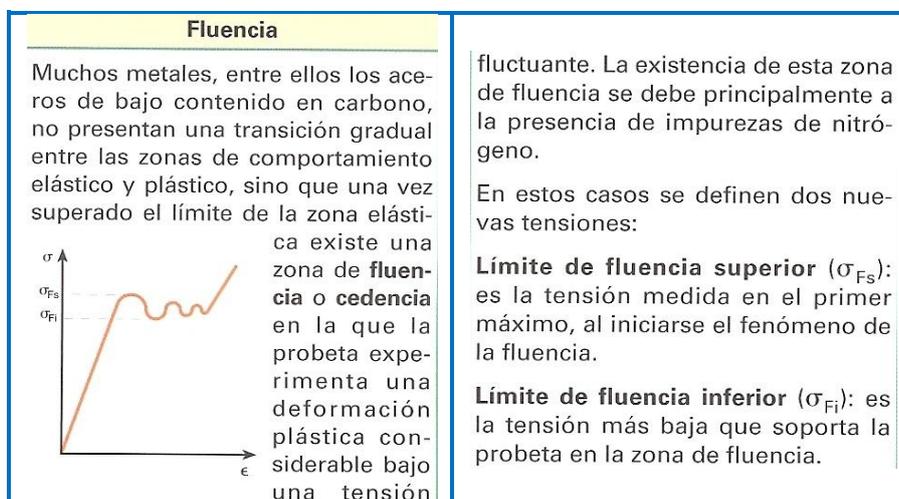
siendo S_F la sección más pequeña en la probeta. Para el cálculo de las estricciones de rotura en probetas rectangulares similares a las cilíndricas, la sección S_F se debe expresar de la forma:

$$S_F = a' \cdot b'$$

siendo a' y b' las dimensiones representadas en la figura.



• **Trabajo de deformación:** el área bajo la curva fuerza-alargamiento ($\int F \cdot dL$) representa el trabajo que es necesario desarrollar para conseguir la rotura de la probeta. También representa la capacidad que tiene el material para absorber trabajo. Este dato se determina pocas veces en los ensayos de tracción, aunque en algunos casos, como en la industria automovilística, resulta de suma importancia para conocer el comportamiento de las diferentes piezas de un vehículo frente a una colisión.



2.3. Curva de tracción verdadera

Para el cálculo de la tensión soportada por la probeta durante el ensayo se ha utilizado la siguiente fórmula:

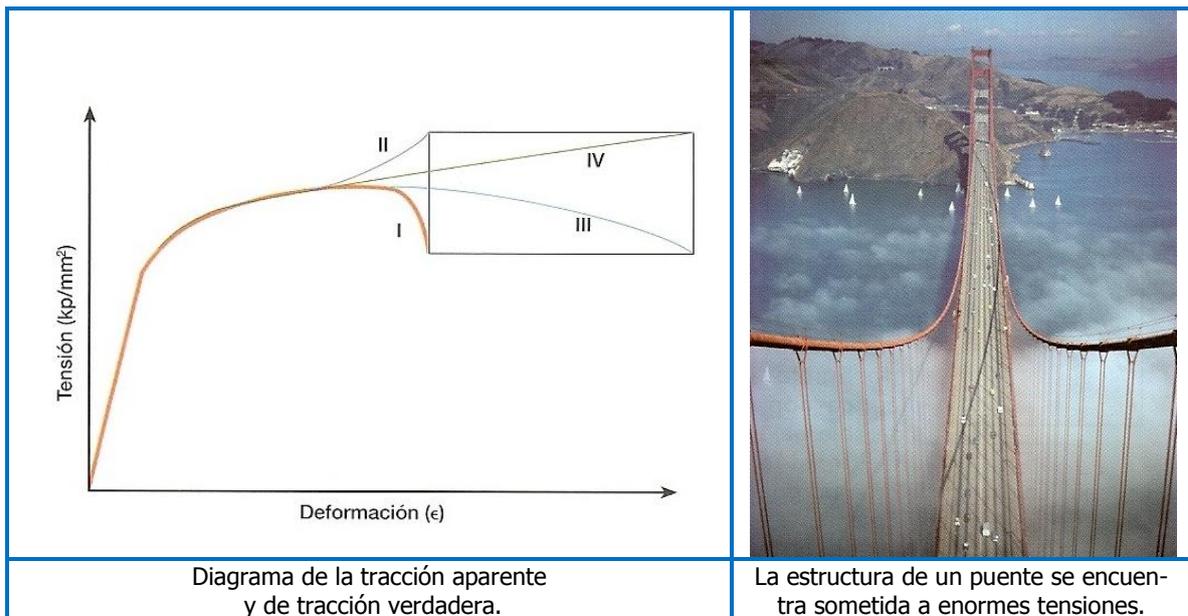
$$\sigma = \frac{F}{S_0}$$

siendo F la fuerza aplicada a la probeta y S_0 su sección inicial. Sin embargo, a medida que transcurre el ensayo, la sección de la probeta va disminuyendo paulatinamente y, por tanto, la tensión que realmente soporta (**tensión verdadera**) es:

$$\sigma_v = \frac{F}{S}$$

siendo S la sección de la probeta en cada instante, la cual alcanza su valor mínimo en la zona de estricción, S. Entonces, a la tensión σ se le da el nombre de **tensión aparente** para distinguirla de la **tensión verdadera**, σ_v .

En la ilustración siguiente se representa con el número I la curva de tracción considerada hasta ahora (curva de tracción aparente), y con el número II la curva $\sigma_v - \epsilon$. Como se puede comprobar, en la zona de estricción se produce un descenso de la curva I; es decir, la fuerza aplicada a la probeta disminuye, pero como también se reduce la sección de forma localizada, la tensión verdadera continúa aumentando.



Para el cálculo de la deformación sufrida por la probeta durante el ensayo se ha utilizado la siguiente fórmula:

$$\epsilon = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0}$$

siendo ΔL el incremento de longitud de la probeta desde el inicio del ensayo y L_0 su longitud inicial. A medida que transcurre el ensayo la longitud de la probeta se va incrementando paulatinamente y, por tanto, la deformación se deberá medir respecto a la longitud que presenta en cada momento y no frente a la longitud inicial. Así, la **deformación verdadera** en un punto, ϵ_v vendrá dada por:

$$\epsilon_v = \frac{\Delta L}{L}$$

siendo L la longitud de la probeta en cada momento del ensayo. A la deformación ϵ se le da, entonces, el

nombre de **deformación aparente**, para distinguirla de la deformación verdadera.

En la figura se representa con el número III la curva $\sigma - \epsilon_V$, en la que se aprecia que en la zona de estricción la deformación verdadera se incrementa considerablemente, mientras que la deformación aparente apenas aumenta de valor, ya que en este punto del ensayo únicamente se produce deformación en una zona localizada de la probeta.

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

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

$$\sigma_V = K \cdot \epsilon_V^n$$

donde K y n son constantes características del material.

2.4. Tensión máxima de trabajo

Cuando se diseña un elemento de una estructura es preciso conocer todas las fuerzas que se ejercen sobre él, para calcular su sección de tal forma que se encuentre dentro de la zona de proporcionalidad entre deformación y tensión. De este modo se asegura que la deformación sufrida por el material sea reversible y proporcional a la tensión soportada.

Sin embargo, en la realidad no se pueden valorar con exactitud las fuerzas a las que va a estar sometida una pieza. Pensemos, por ejemplo, en un tirante de un puente: además de soportar parte del peso del puente y de los automóviles y personas que circulen por él, en ocasiones se verá sometido a la fuerza del viento, al peso de la nieve en invierno, etc.

En casos como este se actúa de una de las dos formas siguientes:

- ✓ Mayorando las fuerzas a las que se puede encontrar sometida la pieza.
- ✓ Minorando la resistencia del material.

En el primero, las fuerzas que actúan sobre el elemento se multiplican por un coeficiente de seguridad mayor que la unidad. Este coeficiente viene determinado por la normativa de cada país para cada situación concreta, y así será diferente en el caso que el viento sea o no frecuente en la zona, si el elemento se va a utilizar en la construcción de un edificio público o privado, etc.

En el segundo caso se divide una tensión indicativa de la resistencia del material por otro coeficiente de seguridad mayor que la unidad. Esta tensión puede ser la de fluencia superior en el caso de aceros, la tensión de rotura si se trata de materiales frágiles, o la que indique la normativa en cada caso.

Siguiendo cualquiera de estos criterios se consigue que el diseño se realice en todos los casos dentro de los límites de seguridad exigibles.

2.5. Máquinas de tracción

Las máquinas utilizadas en el ensayo de tracción constan esencialmente de dos dispositivos: uno productor de carga y otro medidor de las cargas y desplazamientos registrados. La máquina debe cumplir las siguientes características:

- La aplicación de la fuerza de tracción tendrá lugar en la dirección del eje de la probeta.
- Debe ser posible regular la velocidad de aplicación de la carga, y el proceso de descarga se tiene que realizar también de forma progresiva.

El dispositivo productor de cargas puede ser de tipo mecánico, aunque lo usual es que sea neumático; en ambos casos existe un cabezal móvil y otro fijo.

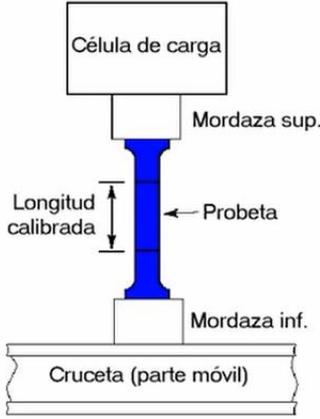
El sistema medidor de cargas y desplazamientos funciona en la actualidad electrónicamente. Estos sistemas electrónicos regulan la velocidad de aplicación de la carga y generan diagramas impresos de la curva de tracción.

Se realiza normalmente en una **Maquina Universal de Ensayos:**



Requisitos:

- ✓Alargamiento de la probeta a velocidad constante
- ✓Medida continua y simultanea de la fuerza y alargamiento



Célula de carga

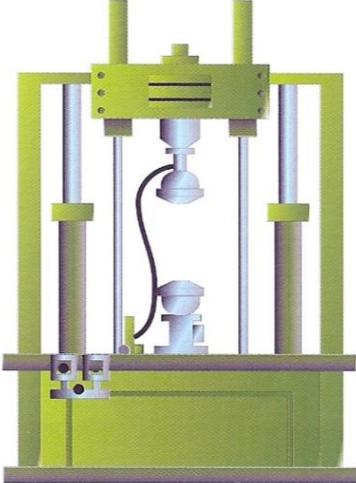
Mordaza sup.

Longitud calibrada

Probeta

Mordaza inf.

Cruceta (parte móvil)



En la tabla siguiente se muestran el límite elástico y la carga de rotura de distintos materiales, obteniéndose estos datos en un ensayo de tracción.

Material	σ_v (MN/m ²)	σ_r (MN/m ²)
Diamante	50 000	–
Alúmina	5 000	–
Carburo de titanio	4 000	–
Cobalto y aleaciones	180-2 000	500-2 500
Acero bajo contenido en carbono	500-1 960	680-2 400
Aleaciones de níquel	200-1 600	400-2 000
Níquel	70	1 510
Titanio y aleaciones	180-1 320	300-1 400
Hierro dulce	220-1 030	400-1 200
Aleaciones de cobre	60-960	250-1 000
Cobre	60	400
Aleaciones de aluminio	100-627	300-700
Aluminio	40	200

Material	σ_v (MN/m ²)	σ_r (MN/m ²)
Aleaciones de cinc	160-421	200-500
Hierro	50	200
Aleaciones de Mg	80-300	125-380
GFRP	–	100-300
Oro	40	220
PMMA	60-110	110
Nailon	49-87	100
Poliestireno	34-70	40-70
Plata	55	300
Maderas comunes (II fibras)	–	35-55
PVC	45-48	–
Polipropileno	19-36	33-36
Maderas comunes (I fibras)	–	4-10

ACTIVIDADES:

1. ¿Qué semejanzas y diferencias existen entre las fuerzas de tracción y las de compresión que actúan sobre un material? ¿Qué efectos producen? ¿A qué se llama tensión? ¿En qué unidades se mide?
2. ¿Qué zonas se distinguen en un diagrama tensión-deformación típico de un metal? Explica las características de cada una de ellas.
3. ¿Qué diferencia existe entre el límite de proporcionalidad y el de elasticidad? ¿Qué es el alargamiento de rotura? Explica claramente estos conceptos.
4. ¿Qué diferencias aparecen en el trazado de las curvas de tracción aparente y de tracción verdadera? ¿A qué se deben estas diferencias?

3. ENSAYOS DE DUREZA

La propiedad mecánica de la dureza no está claramente definida, aunque por dureza se suele entender la resistencia que ofrece un material a ser rayado o penetrado por una pieza de otro material diferente. Tampoco existe una medida absoluta de la dureza, por lo que es necesario siempre hacer referencia al método de medida utilizado. De esta forma, se pueden mencionar dos tipos distintos de ensayos de dureza:

- Ensayos de dureza al rayado.
- Ensayos de dureza a la penetración.

La dureza depende de la elasticidad del material y de su estructura cristalina. En los metales puros la dureza aumenta proporcionalmente a la cohesión y al número de átomos por unidad de volumen. En las aleaciones la dureza aumenta con los tratamientos térmicos, o con el endurecimiento por deformación.

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

3.1. Ensayos de dureza al rayado

Entre los ensayos de dureza al rayado se pueden citar la escala de Mohs y la dureza Martens.

3.1.1. Escala de Mohs

El método más antiguo para medir la dureza, y que aún se usa en Mineralogía, fue establecido por el alemán Friedrich Mohs (1.773-1.837) en el año 1.820. En él se compara el material que se pretende analizar con 10 minerales tomados como patrones, numerados del 1 al 10 en orden creciente de dureza, según la llamada **escala de Mohs**: talco (1), yeso (2), calcita (3), fluorita (4), apatito (5), feldespato (6), cuarzo (7), topacio (8), corindón (9) y diamante (10).

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

Se trata de un método de medida bastante impreciso, que presenta el inconveniente de que no puede utilizarse para medir la dureza de los metales.

Inconvenientes de la escala de Mohs.

Quizá el mayor inconveniente de la escala de Mohs radique en que no es una escala lineal. En efecto, la diferencia de dureza entre el corindón (9) y el diamante (10) es mayor que la existente entre el talco (1) y el yeso (2).

3.1.2. Dureza Martens

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

3.2. Ensayos de dureza a la penetración

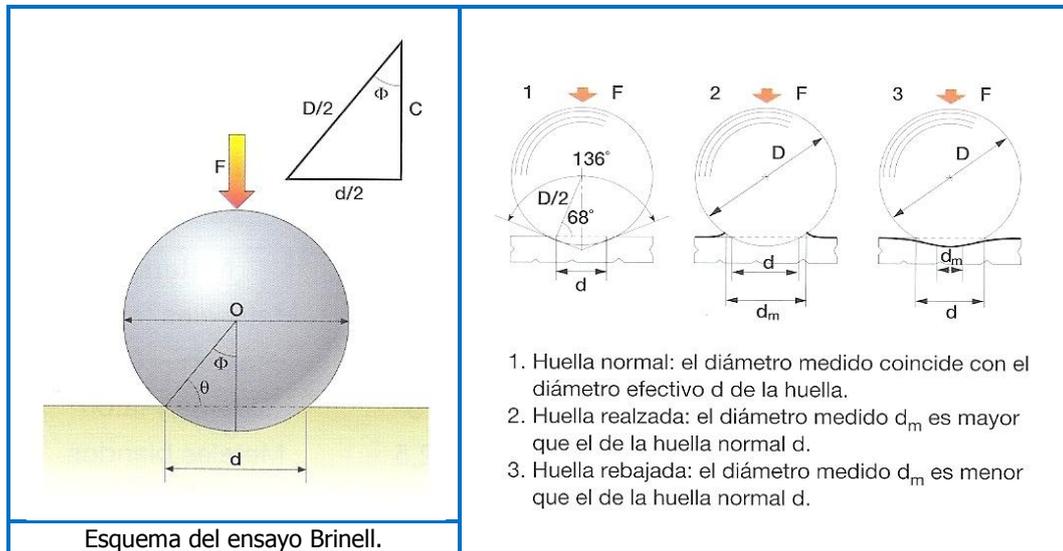
En estos ensayos se mide la resistencia que ofrece un material a ser penetrado por una pieza de otro material diferente, llamada **penetrador**, el cual se empuja con una fuerza controlada y durante un tiempo fijo contra la superficie del material cuya dureza se quiere determinar. La velocidad de aplicación de la carga debe ser lenta para que no ejerza influencia en la medida.

El valor de la dureza se obtiene dividiendo la fuerza aplicada al penetrador entre la superficie de la huella que este deja en el material, la cual, para una misma fuerza de empuje, será tanto menor cuanto mayor sea la dureza correspondiente.

Este es, a grandes rasgos, el fundamento de los ensayos Brinell, Vickers y Rockwell, en los que se utilizan distintos tipos de penetradores.

3.2.1. Ensayo Brinell

En el ensayo ideado por el ingeniero sueco Johann August Brinell (1.849-1.925) en los años 1.900, el penetrador es una esfera de acero templado, de gran dureza, de diámetro (D) que oscila entre 1 y 10 mm, y a la que se aplica una carga preestablecida de valor comprendido entre 3.000 y 1,25 kp durante un intervalo de tiempo que suele ser de 15 segundos.



La dureza, medida según el ensayo Brinell (HB), se calcula dividiendo el valor de la fuerza aplicada al penetrador entre la superficie de la huella que este produce en el material:

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

La fuerza se suele expresar en kp y la superficie en mm². Por tanto, la unidad de dureza Brinell será el kp/mm².

La huella producida por el penetrador tiene la forma de un casquete esférico, cuya superficie será:

$$S = \frac{\pi \cdot D^2}{2} \cdot (1 - \cos \Phi)$$

Del triángulo rectángulo de la figura se deduce que:

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

y por tanto:

$$\cos \Phi = \frac{\sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2}}{\frac{D}{2}} = \frac{\sqrt{D^2 - d^2}}{D}$$

De este modo, la superficie del casquete esférico será:

$$S = \frac{\pi \cdot D^2}{2} \cdot (1 - \cos \Phi) = \frac{\pi \cdot D^2}{2} \cdot \left(1 - \frac{\sqrt{D^2 - d^2}}{D}\right) = \frac{\pi \cdot D}{2} \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})$$

Y el valor de la dureza Brinell vendrá dado por:

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

Para medir el diámetro, d , de la huella se utiliza una lupa microscópica. Es necesario que la huella no presente realces ni rebajes en sus bordes, pues de lo contrario se obtendrían valores falsos en la medición. Para conseguirlo, se ha comprobado experimentalmente que el diámetro de la huella ha de cumplir la condición $0,25 D < d < 0,5 D$.

Por otra parte, según se observa en la tabla siguiente, el diámetro de la bola debe elegirse adecuadamente en función del espesor de la pieza sometida al ensayo, para conseguir que la deformación plástica que experimenta el material no se extienda a todo el espesor de la pieza.

Esesor de la pieza (mm)	Diámetro de la bola (mm)	K	Material
> 6	1; 2,5; 5; 10	30	Materiales férricos
3-6	1; 2,5; 5	10	Aleaciones ligeras
2-3	1; 2,5	5	Bronce y latón
< 2	1	2,5	Metales blandos
		1,25	Metales muy blandos
		0,5	Metales extremadamente blandos

Diámetro de la bola para distintos espesores de la pieza. Valor de K en distintos materiales

Para que las huellas obtenidas con bolas de diferente diámetro sean semejantes y que, por tanto, las durezas obtenidas resulten comparables, se debe cumplir la relación de proporcionalidad:

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

donde K puede tomar distintos valores, recogidos en la tabla superior derecha.

El tiempo de aplicación de la carga suele ser de 15 segundos, aunque si se trata de materiales blandos este tiempo puede hacerse mayor.

Mediante el ensayo Brinell y utilizando un coeficiente de proporcionalidad característico de cada material (véase la tabla inferior de la derecha) se puede calcular de forma aproximada su correspondiente resistencia a la tracción.

Material	HB (kp/mm ²)	Material	Resistencia a tracción (kp/mm ²)
Acero al Cr templado y revenido	280	Acero al carbono	0,35 · HB
Aluminio puro	16	Acero al Cr-Ni	0,34 · HB
Bronce fundido	85	Aluminio fundido	0,25 · HB
Fundición gris	180	Aleaciones ligeras de fundición	0,28 · HB
Latón fundido	80	Cobre y aleaciones	0,55 · HB
Plomo	7	Cinc	0,42 · HB
Estaño	14		
Cinc	40		

Dureza Brinell de algunos materiales. Resistencia a tracción en algunos materiales en función de su dureza.

La dureza Brinell de algunos materiales aparece recogida en la tabla superior izquierda.

La prueba Brinell presenta los siguientes inconvenientes:

- No se puede realizar sobre superficies esféricas o cilíndricas.
- Se cometen grandes errores en la medida del diámetro de la huella cuando la deformación es pequeña.
- Únicamente es aplicable en el caso de materiales de durezas no muy altas, que sean inferiores a la del penetrador.

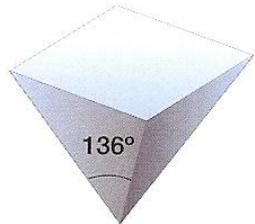
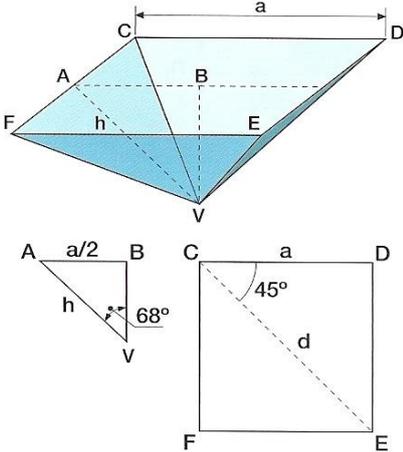
Expresión del valor de la dureza Brinell	
La dureza Brinell se expresa de la siguiente forma:	
250 HB 10 500 30	
lo que significa que el material tiene 250 kp/mm ² de dureza Brinell, que el ensayo se ha realizado con una bola de diámetro 10 mm y con una carga de 500 kp durante 30 segundos.	

Espesor	Diámetro	Carga en kp (aplicación: 15 segundos; permanencia: 15 segundos)					
		Mat. férricos	Al. ligeras	Bronce y latón	Met. blandos	Metales muy blandos	
(mm)	(mm)	30 D ²	10 D ²	5 D ²	2,5 D ²	1,25 D ²	0,5 D ²
> 6	10	3 000	1 000	500	250	125	50
3-6	5	750	250	125	62,5	31,2	12,5
2-3	2,5	187,5	62,5	31,2	15,6	7,8	3,1
< 2	1	30	10	5	2,5	1,25	0,5

Resumen de datos en la prueba Brinell.

3.2.2. Ensayo Vickers

En este ensayo de dureza se utiliza como penetrador un diamante, tallado en forma de pirámide de base cuadrada con un ángulo de 136° entre dos caras opuestas. Este ángulo coincide con el valor 2θ del ensayo Brinell para la relación d/D = 0,375 (valor medio entre 0,5 y 0,25) con el fin de que las durezas Brinell y Vickers coincidan. En realidad coinciden hasta aproximadamente el valor 300, y de ahí en adelante la dureza Vickers es siempre superior a la Brinell, puesto que la deformación de la bola falsea los resultados.

		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Expresión del valor de la dureza de Vickers</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>La dureza Vickers se expresa de la siguiente forma:</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">315 HV 30</td> </tr> <tr> <td>lo que significa que el material tiene 315 kp/mm² de dureza Vickers y que el ensayo se ha realizado con una carga de 30 kp.</td> </tr> </tbody> </table>	Expresión del valor de la dureza de Vickers	La dureza Vickers se expresa de la siguiente forma:	315 HV 30	lo que significa que el material tiene 315 kp/mm ² de dureza Vickers y que el ensayo se ha realizado con una carga de 30 kp.
Expresión del valor de la dureza de Vickers						
La dureza Vickers se expresa de la siguiente forma:						
315 HV 30						
lo que significa que el material tiene 315 kp/mm ² de dureza Vickers y que el ensayo se ha realizado con una carga de 30 kp.						
Penetrador en el ensayo Vickers.	Esquema del ensayo Vickers.					

La dureza Vickers se calcula, de forma parecida a la Brinell, dividiendo la fuerza con la que se aprieta el penetrador entre el área de la huella que este deja en el material:

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

La fuerza se suele expresar en kp y la superficie en mm² y, por tanto, la unidad de dureza Vickers será el kp/mm².

La huella que el penetrador deja en el material tendrá forma de pirámide y su superficie será igual a la de los cuatro triángulos que constituyen sus caras:

$$S = 4 \cdot \frac{a \cdot h}{2} = 2a \cdot h$$

siendo **h** la altura de cada uno de esos triángulos y **a** la longitud de su base.

En la figura anterior, se aprecia que:

$$a = d \cdot \cos 45^\circ = d \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \quad (d = \text{diagonal de la base de la pirámide}).$$

Por otra parte, como:

$$\text{sen } 68^\circ = \frac{a/2}{h}$$

se cumple:

$$h = \frac{a}{2 \cdot \text{sen } 68^\circ} = \frac{d\sqrt{2}}{4 \cdot \text{sen } 68^\circ}$$

Por consiguiente, la superficie de la huella valdrá:

$$S = 2a \cdot h = 2d \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \frac{d\sqrt{2}}{4 \cdot \text{sen } 68^\circ} = \frac{d^2}{2 \cdot \text{sen } 68^\circ} = \frac{d^2}{1,8544}$$

Por tanto, la dureza Vickers responde a la expresión:

$$\mathbf{HV} = \frac{\mathbf{F}}{\mathbf{S}} = \mathbf{1,8544} \cdot \frac{\mathbf{F}}{\mathbf{d^2}}$$

La diagonal de la huella se mide utilizando un microscopio. En caso de que la carga no se aplique en dirección exactamente vertical, la forma de la huella no será estrictamente cuadrada, siendo necesario medir las dos diagonales y utilizar el valor medio en la expresión anterior.

Los resultados obtenidos en un ensayo Vickers son siempre comparables sea cual fuere la carga que se utilice, ya que la forma de la huella es siempre la misma. Las cargas que se emplean pueden variar desde 1 a 120 kp, aunque lo más frecuente es que sean de 30 kp. Para que no se produzcan deformaciones en la cara opuesta a la de la prueba es necesario que se cumpla:

$$s > 8h \cdot \cos 68^\circ \Rightarrow s > 8 \cdot \frac{d}{7}$$

siendo **s** el espesor de la pieza y **h · cos 68°** la profundidad de la huella. Para mayor seguridad se debe procurar que:

$$s > 1,2 \cdot d$$

Y los espesores pueden ser mucho más pequeños que los del ensayo Brinell.

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

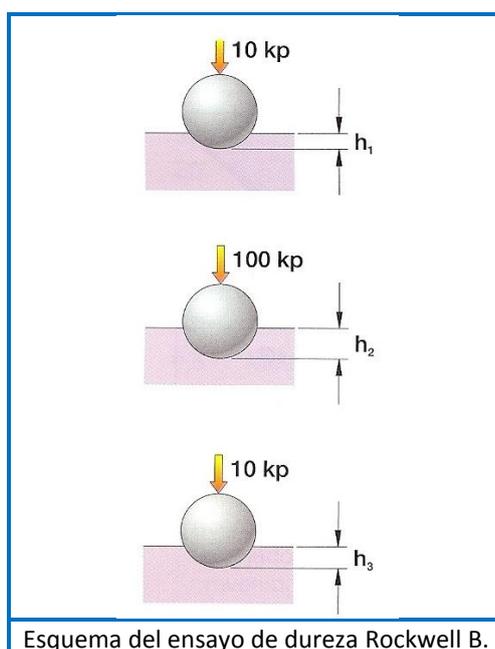
- No es necesario sustituir el penetrador al variar la carga.
- Se puede utilizar en superficies curvas.

- El valor de la dureza es prácticamente independiente del valor de la carga.
- La prueba se puede realizar sobre materiales muy duros.

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 1.075 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).



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 si se trata 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.

Un ensayo sencillo de dureza.

En los talleres, para comprobar la dureza de una pieza metálica después de haber sido sometida a un tratamiento térmico, se suele utilizar la lima. Si esta no entra, se considera que la dureza del material ensayado es superior a 60 HRC.

ACTIVIDADES:

1. ¿Qué entiendes por dureza de un material? ¿De qué factores depende? ¿Qué importancia práctica presenta su conocimiento? ¿Cómo se puede medir?
2. ¿Qué diferencias existen entre la escala de Mohs y la dureza Martens?
3. ¿Qué ventajas e inconvenientes, comparativamente hablando, presentan los ensayos Brinell, Vickers y Rockwell?

4. ENSAYOS DE RESISTENCIA AL IMPACTO

En estos ensayos las cargas aplicadas actúan casi instantáneamente para medir la resistencia al choque o la tenacidad de los materiales.

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

Un material muy tenaz se deformará en gran medida antes de producirse su rotura; en cambio, un material frágil, o poco tenaz, apenas experimentará deformación alguna. En general, los materiales muy dúctiles, en los que se producen alargamientos elevados antes de llegar a la rotura, suelen ser más tenaces que aquellos cuyo alargamiento es menor.

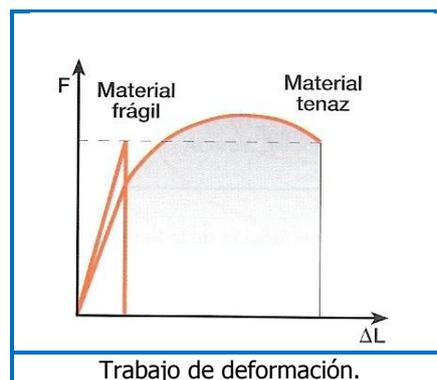
Los ensayos de resistencia al impacto pueden ser de dos tipos:

- Tracción por choque.
- Flexión por choque.

4.1. Ensayo de tracción por choque

Una forma de medir la tenacidad de los materiales consiste en realizar un ensayo de tracción simple en el que la velocidad de aplicación de la fuerza sea alta. El área comprendida entre la curva de esfuerzos y el eje de abscisas representa el trabajo necesario para romper a tracción el material, y este trabajo dividido por el volumen de la probeta utilizada en el ensayo proporciona una medida de su tenacidad al impacto.

En la figura se representan las curvas de esfuerzos-alargamientos de dos materiales, uno frágil y otro tenaz, que rompen bajo una misma fuerza.



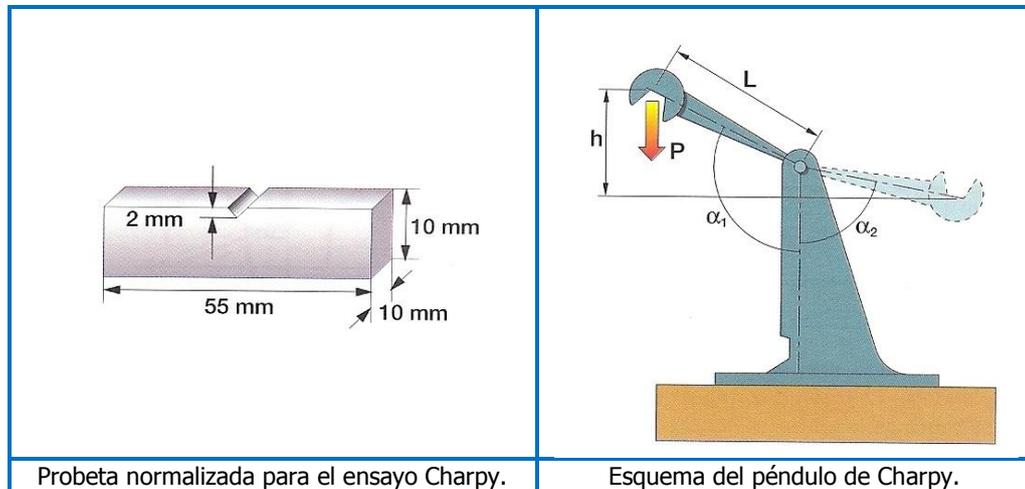
Este tipo de ensayos es poco frecuente, ya que la preparación de las probetas resulta más cara que en el caso de los ensayos de flexión por choque.

4.2. Ensayo de flexión por choque

Entre los ensayos de flexión por choque, el más utilizado es el **ensayo de resiliencia**, conocido también como **ensayo Charpy**, en el que se dispone, por lo general, de una probeta de sección cuadrada (10 x 10 mm) y de 55 mm de longitud, en cuya parte central se ha realizado una entalla de 2 mm de profundidad en forma de U o de V, con un fondo cilíndrico de 0,25 mm de radio.

El ensayo consiste en golpear la probeta por el lado opuesto a la entalla con un péndulo que se deja caer libremente desde una cierta altura.

La **resiliencia** (KCU o KCV, según cuál sea la forma de la entalla) se calcula dividiendo la energía consumida por el material en la rotura [diferencia de energías potenciales en las posiciones inicial y final de la bola: $W = P \cdot h = P \cdot L \cdot (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1)$] entre la sección de la probeta por su parte entallada ($S_0 = 80 \text{ mm}^2$):



$$KCV = \frac{W}{S_0} = \frac{P \cdot L \cdot (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1)}{S_0}$$

La unidad de la resiliencia en el Sistema Internacional es el J/m².

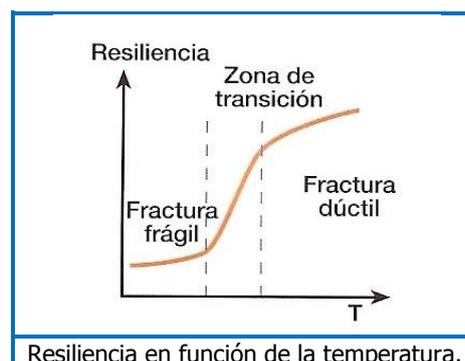
Los péndulos Charpy están normalizados: en la posición inicial disponen de una energía de 300 J Y en el momento del impacto con la probeta se mueven a una velocidad cercana a los 5 m/s.

El valor de la resiliencia no quedará definido si la probeta no llega a romperse totalmente; en ese caso se debe indicar esta circunstancia en los resultados obtenidos al realizar el ensayo.

Un material tenaz experimenta una gran deformación plástica antes de romper; por tanto, absorberá una parte importante de la energía del péndulo y tendrá una alta resiliencia. Por el contrario, los materiales de resiliencia baja son frágiles y apenas se deforman antes de la rotura.

Las condiciones de este ensayo son completamente distintas a las de los ensayos realizados bajo cargas estáticas, en los que la carga se incrementa de forma lenta. Esto se traduce en que algunos materiales se comporten de diferente modo en cada caso y presenten una rotura dúctil en el ensayo de tracción y una rotura frágil en el de flexión. La entalla y la alta velocidad de aplicación de la carga actúan en este sentido.

En muchos metales existe un intervalo de temperaturas, conocido como **zona de transición**, en el que al disminuir la temperatura se produce una disminución considerable de la resiliencia.



El conocimiento de este intervalo de temperaturas es muy importante, ya que puede ocurrir que un elemento calculado para soportar unas determinadas solicitaciones mecánicas se fracture de forma frágil sin apenas experimentar deformación cuando se encuentra sometido a condiciones de temperatura anormalmente baja. Por esta razón, los materiales se deberán trabajar a una temperatura suficientemente alejada de la zona de transición.

En la **fractura dúctil** se produce una importante deformación plástica en la zona de rotura y las superficies a que da lugar son mates, debido a la irregularidad de la deformación plástica.

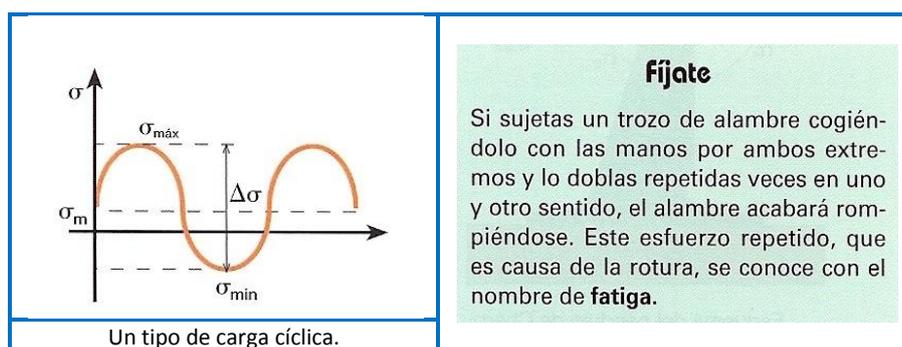
En la **fractura frágil** el material se separa por un plano perpendicular a la dirección de aplicación de la carga sin apenas deformación plástica. Las superficies que origina este tipo de fractura son brillantes.

ACTIVIDADES:

1. ¿Qué ensayos de resistencia al impacto conoces? ¿Cuáles se utilizan preferentemente? ¿Por qué?
2. ¿Qué diferencia existe entre tenacidad y ductilidad? Explica claramente tu respuesta, ayudándote de ejemplos si lo juzgas conveniente.

5. ENSAYO DE FATIGA

Se entiende por fatiga la situación en la que se encuentran algunas piezas de motores, puentes, ejes, etc. sometidas a cargas cíclicas cuya intensidad posee un valor inferior al crítico de rotura del material. Los ciclos de carga pueden ser muy diferentes, aunque los datos que más interesan son los de la amplitud del ciclo ($\Delta \sigma = \sigma_{\text{máx}} - \sigma_{\text{mín}}$) y la tensión media $\sigma_m = \left(\frac{\sigma_{\text{máx}} + \sigma_{\text{mín}}}{2} \right)$.



Existen dos tipos de fatiga:

- **Fatiga en elementos sin defectos**, como, por ejemplo, la que tiene lugar en bielas, ejes, etc. El comportamiento frente a la fatiga de estos elementos presenta dos etapas: la de nucleación de fisuras y la de crecimiento de estas fisuras hasta alcanzar un tamaño crítico que dará origen a la rotura frágil.
- **Fatiga en elementos con defectos**, como, por ejemplo, la que se produce en puentes, barcos, aviones, etc. En estos elementos, que se fabrican uniendo varias piezas, resulta imposible garantizar la ausencia de defectos, ya que al menos en las uniones es inevitable que existan fisuras. En este caso la duración del elemento está limitada por la velocidad de crecimiento de las fisuras; por este motivo se hace necesario realizar análisis no destructivos periódicos (líquidos penetrantes, ultrasonidos, radiografías...).

Cuando una pieza se encuentra sometida a un proceso de fatiga, las grietas de pequeñas dimensiones existentes en el material van aumentando progresivamente de tamaño hasta que llega un momento en que se produce la rotura.

En la figura se muestra el aspecto de una rotura por fatiga, en la que se puede distinguir el defecto inicial, ya presente o nucleado; la zona de crecimiento de la fisura por efecto del fenómeno de fatiga, en la que aparecen en ocasiones unas líneas más o menos concéntricas (líneas de detención) que se deben a un endurecimiento estructural localizado del material, y la zona de rotura final súbita y sin apenas deformación.

El ensayo de fatiga más habitual es aquel en que se somete una probeta de dimensiones normalizadas a un **esfuerzo de flexión rotativa**.

El esquema de la figura representa un ensayo de fatiga por flexión rotativa. La probeta se somete en su zona central calibrada a un esfuerzo de flexión constante producido por los dos pesos P. Si mediante un motor eléctrico se hace girar a la probeta, esta experimenta un proceso cíclico, de tal forma que su parte superior, que inicialmente estaba sometida a un esfuerzo de compresión, al girar media vuelta y situarse en la parte inferior, el esfuerzo que actúa sobre ella es de tracción.

<p>Fisura inicial</p> <p>Zona de rotura por fatiga</p> <p>Zona de rotura final</p>	<p>Zona sometida a esfuerzos de compresión.</p> <p>M</p> <p>M</p> <p>Zona sometida a esfuerzos de tracción.</p>	<p>Zona sometida a flexión rotativa</p> <p>P</p> <p>P</p>
Aspecto de una rotura por fatiga.	Elemento sometido a un esfuerzo de flexión	Esquema de un ensayo de flexión rotativa.

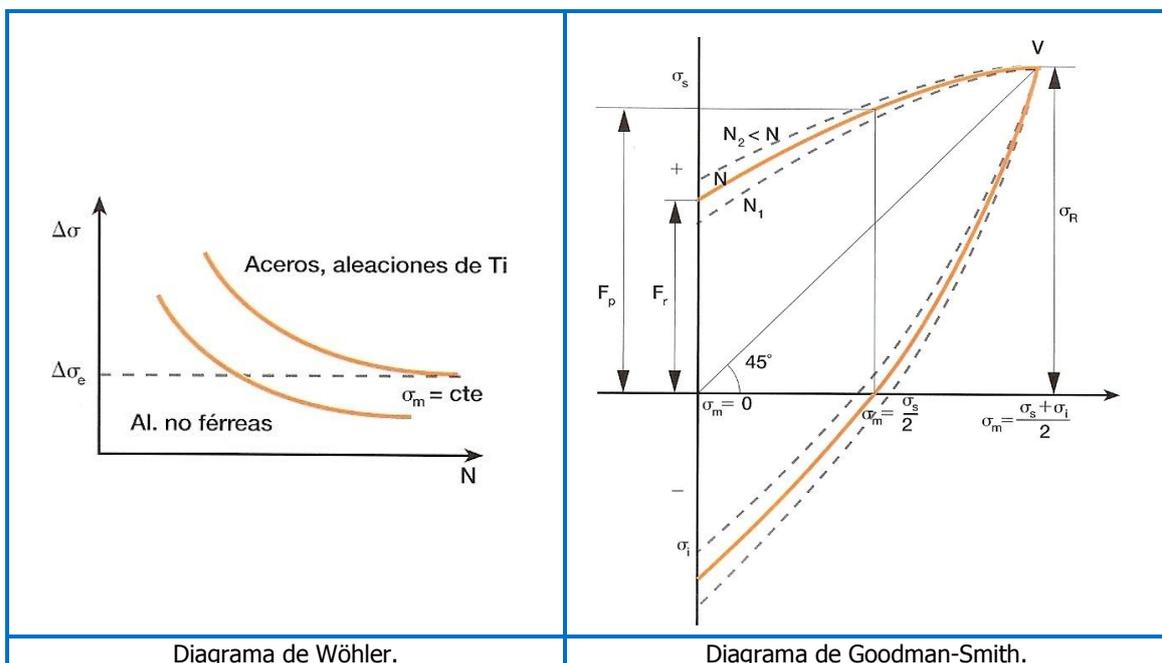
Como resultado del ensayo, se determina el número de ciclos que la probeta es capaz de soportar para distintas amplitudes de carga (conseguidas modificando el valor de los pesos) antes de producirse la rotura manteniendo constante el valor de la tensión media o el de la tensión mínima.

En la figura del margen se representa la curva obtenida en un ensayo de fatiga, denominada también **diagrama de Wöhler**. Como se puede apreciar, cuanto mayor sea la amplitud del ciclo de carga menor es el número de ciclos que se realizan antes de la rotura.

En los aceros y en las aleaciones de titanio existe un valor de $\Delta\sigma$ por debajo del cual no se produce rotura por fatiga. A este valor se le denomina **límite de fatiga** ($\Delta\sigma_e$) y suele oscilar entre 0,4 y 0,5 veces la carga de rotura del material. Las aleaciones no férricas no presentan, por lo general, este límite de fatiga y entonces su valor se suele definir como la amplitud de tensión que no provoca la rotura tras haber descrito 10 ó 100 millones de ciclos.

En componentes no agrietados la fatiga de alto número de ciclos, es decir, la que no produce deformaciones plásticas en el material, se rige por la siguiente ecuación:

$$\Delta\sigma \cdot N^a = b ; \quad \text{siendo } N \text{ el número de ciclos y } a \text{ y } b \text{ constantes del material.}$$



Parece lógico pensar que, para el mismo número de ciclos, cuanto mayor sea el valor absoluto de la tensión media aplicada menor será la amplitud de ciclo que podrá soportar el material. Esto se pone de manifiesto en el **diagrama de Goodman-Smith**, en el que se representan, en función de la tensión media, las tensiones máxima y mínima que provocan la rotura del material en un determinado número de ciclos.

Cuando el valor de la tensión media coincide con el de la tensión de resistencia a la tracción (punto V en la figura), cualquier amplitud de ciclo que se aplique al material, por pequeña que sea, provocará de inmediato su rotura.

Cuando la tensión media sea cero la amplitud del ciclo será máxima (para cualquier número de ciclos); y a medida que esta tensión media vaya aumentando aproximándose al valor de la resistencia a la tracción, la amplitud del ciclo se reducirá.

La curva se traza para un determinado número de ciclos, N. Para un número de ciclos inferior (N_2) la curva se ensancha; es decir, si la tensión media es la misma, para que el material rompa tras haber descrito un número menor de ciclos deberá estar sometido a una amplitud de ciclo de carga mayor. Lógicamente, si el número de ciclos (N_1) es mayor ($N_1 > N$) sucede lo contrario: la curva se hace más estrecha.

Muchas veces, a efectos de cálculo, se aproxima la curva de Goodman a una recta y, de esta forma, si $\Delta \sigma_0$ es la amplitud de carga cuando la tensión media es nula para un número de ciclos N y σ_R es la resistencia a la tracción, la amplitud de carga que ocasiona la rotura al cabo de N ciclos vendrá dada en función de σ_m por la expresión:

$$\Delta \sigma = \Delta \sigma_0 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_R} \right)$$

Naturaleza probabilística de la fatiga. El fenómeno de la fatiga es de naturaleza estadística, de tal forma que varias probetas idénticas sometidas a una misma carga cíclica pueden soportar distintos números de ciclos. Por esta razón se realizan varios ensayos en las mismas condiciones para conocer cuál es la distribución estadística que siguen los datos.

Así, al hablar de fatiga se hace pensando en la probabilidad de que una probeta sometida a unas determinadas condiciones de carga alcance un cierto número de ciclos sin romper.

6. ENSAYOS TECNOLÓGICOS

Los ensayos tecnológicos se utilizan para comprobar si un material es útil o no para una aplicación en concreto cuando por medio de los ensayos científicos descritos hasta ahora no sea posible realizar estas comprobaciones o resulten demasiado caras.

Los ensayos tecnológicos solo permiten determinar si el material es o no útil para un determinado propósito, a diferencia de los ensayos científicos, en los que se obtienen valores numéricos de propiedades de los materiales que se pueden utilizar posteriormente para el cálculo y diseño de piezas para maquinaria y elementos estructurales.

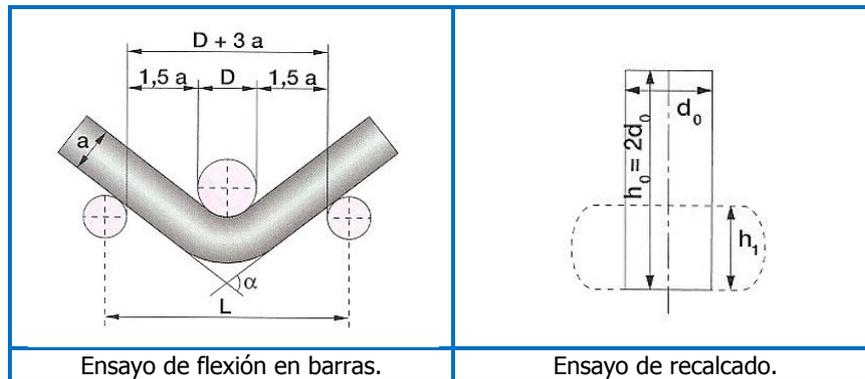
Los ensayos tecnológicos se empezaron a utilizar prácticamente desde el momento en que comenzó la obtención y transformación de materiales; y su número es muy elevado, pues con ellos se pretende representar las condiciones que va a sufrir el material en su vida de servicio. Dependen de la forma geométrica de la pieza que se va a ensayar.

6.1. Ensayos tecnológicos en barras

- **Ensayo de flexión y plegado.** Se pretende comprobar con este ensayo la flexibilidad del material. Una barra prismática o cilíndrica de dimensiones normalizadas se somete en su parte central a una fuerza que la hace doblarse. El ensayo finaliza cuando la barra alcance el ángulo de curvatura previsto, o en su parte de tracción (opuesta a la de aplicación de la fuerza) aparezcan las primeras fisuras. Este ensayo puede realizarse tanto a temperatura ambiente como a altas temperaturas.

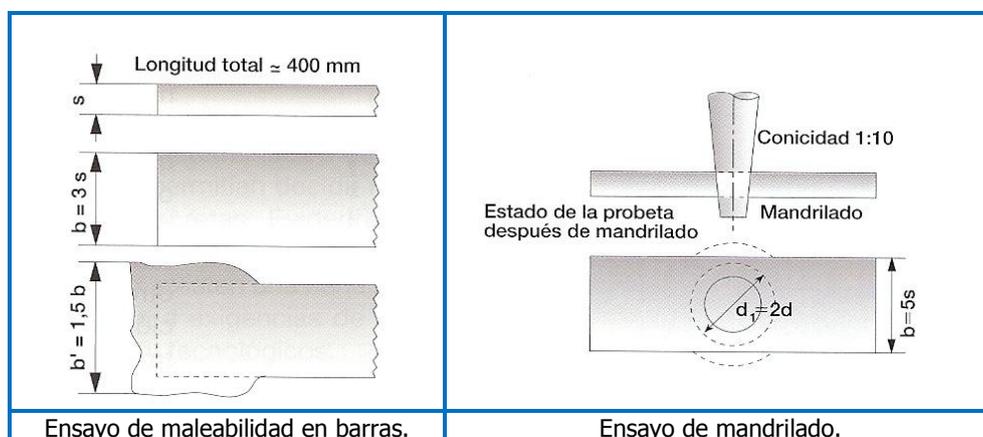
- **Ensayo de recalcado.** Se lleva a cabo para comprobar el comportamiento del material bajo esfuerzos de compresión (ensayo estático) o de choque (ensayo dinámico). Se utiliza para ello una barra cilíndrica,

cuya altura suele ser igual al doble de su diámetro, y a la que se aplica una fuerza de compresión hasta que su altura se reduce a $1/3$ de la inicial ($1/3 \cdot h_0$), o hasta que aparezcan las primeras fisuras. En este último caso se define el *grado de recalado* como: $(h_0 - h_1)/h_0$, siendo h_1 la altura en el momento en que empiezan a producirse las fisuras.



- **Ensayo de maleabilidad.** Para este ensayo, que únicamente se suele realizar a temperaturas altas, se utilizan probetas planas de unos 40 cm de longitud y con un espesor, s , igual a $1/3$ de su anchura (b). Con un martillo mecánico o de mano se golpea la probeta cuando está al rojo, hasta que la anchura alcanzada (b') sea una vez y media la anchura inicial ($b' \approx 1,5 \cdot b$). También se puede aplanar a probeta hasta que aparezcan las primeras fisuras y determinar en ese momento el incremento de anchura: $(b' - b)/b$.

- **Ensayo de mandrilado.** Se utiliza una probeta plana con una anchura unas cinco veces mayor que el espesor y se realiza una perforación cilíndrica cuyo diámetro (d) sea el doble que el espesor (s). Por la perforación se introduce un punzón hasta que el diámetro (d_1) sea el doble que el primitivo (d), o hasta que aparezcan fisuras; y entonces se define el *grado de ensanchamiento* como: $(d_1 - d)/d$. El ensayo se realiza únicamente a temperaturas elevadas.

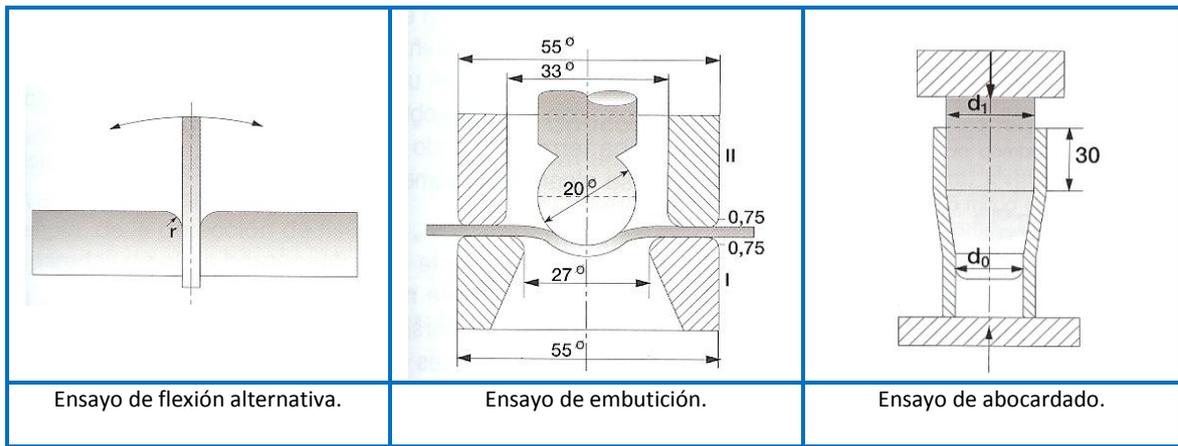


6.2. Ensayos tecnológicos en chapas

- **Ensayo de flexión alternativa.** Una chapa de unos 10 a 30 mm de ancho se sujeta entre dos mordazas y se dobla 90° alternativamente a uno y otro lado hasta que aparezca la primera fisura o se produzca la rotura.

- **Ensayo de embutición.** Este ensayo se emplea para conocer el comportamiento del material cuando se somete a un proceso de embutición profunda. Consiste en estampar una bola o cilindro con un extremo esférico sobre una chapa sujeta por todos sus lados.

El desplazamiento máximo de la bola hasta que se produce la primera fisura es una medida de la aptitud del material frente al proceso de embutición.



6.3. Ensayos tecnológicos en tubos

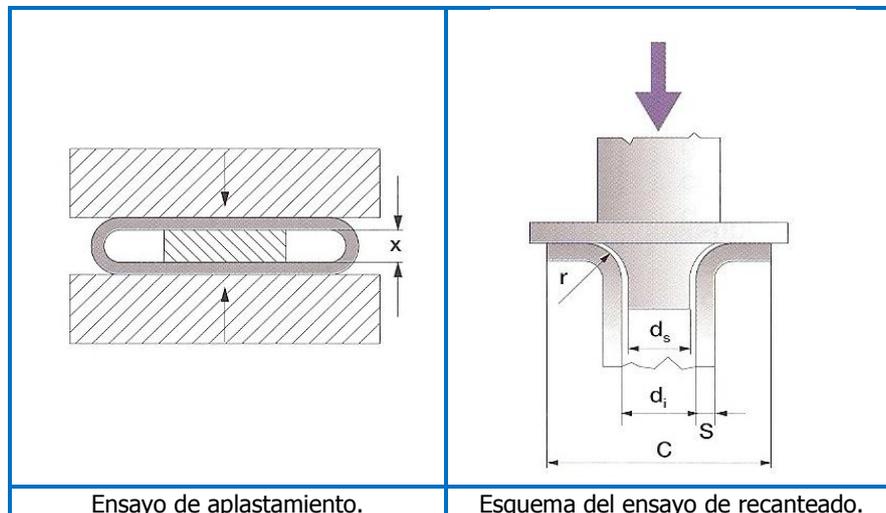
- **Ensayo de ensanchamiento o abocardado.** En el interior del tubo que se va a ensayar se introduce mediante golpes o a presión un cono engrasado, después de lo cual no deben aparecer fisuras en las paredes del tubo.

Los dos extremos del cono están provistos de prolongaciones cilíndricas, cuyos diámetros estarán relacionados con el diámetro del tubo. El ensanchamiento que sufre este se calcula mediante la expresión: $(d_1 - d_0)/d_0$.

- **Ensayo de aplastamiento.** Se realiza comprimiendo un trozo de tubo de 50 cm de largo entre dos placas paralelas, de tal modo que la sección circular que presentaba al comienzo se convierta en otra de lados paralelos. Con el fin de que, a causa de la compresión, las paredes del tubo no se aplasten por completo, entrando en contacto una con otra, se introduce en su interior una pieza de sección rectangular. De esta forma se determina si el trozo de tubo puede comprimirse hasta aprisionar la pieza de sección rectangular sin que aparezcan fisuras, o hasta qué punto puede llegar la compresión sin que estas comiencen a producirse.

- **Ensayo de estanqueidad.** Se introduce en el interior del tubo un fluido líquido (agua, aceite o líquidos especiales), a una presión entre 1,25 y 1,5 veces superior a la que va a tener que soportar el tubo en servicio. Durante el ensayo no se deben poner de manifiesto defectos de estanqueidad, ni siquiera martilleando la superficie del tubo en varios puntos.

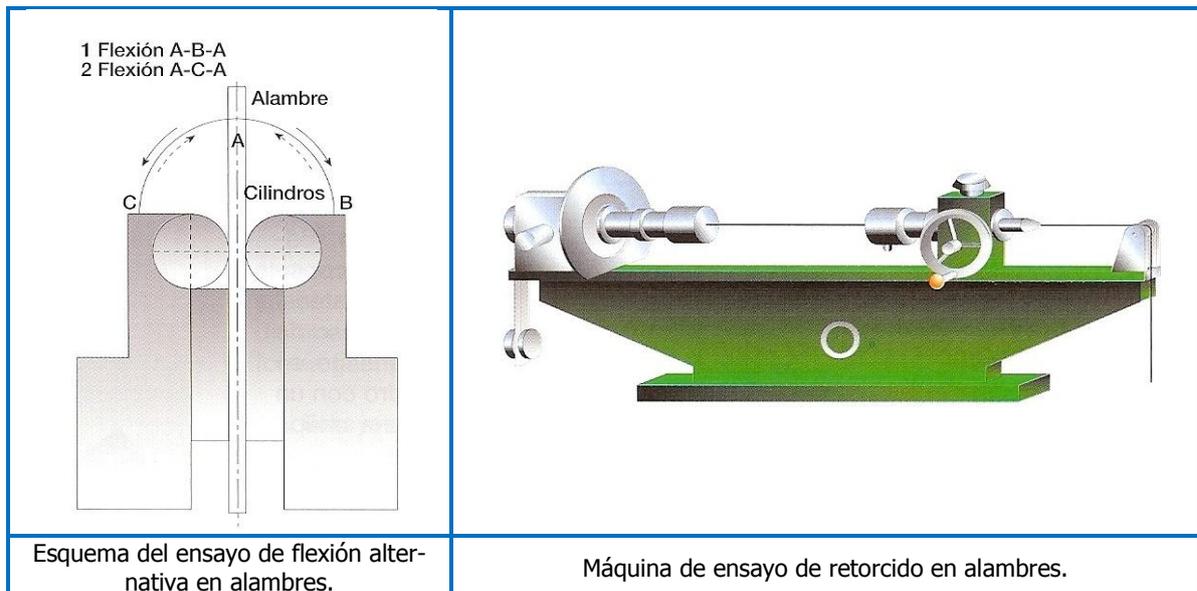
- **Ensayo de recantado o abocardado plano.** La prueba consiste en doblar el extremo de un tubo a temperatura alta, de manera que se forme un anillo perpendicular a su eje. El ensayo finaliza cuando el diámetro del anillo (c) alcanza el valor previsto. La prueba se considera positiva si no aparecen grietas o fisuras en la zona deformada.



6.4. Ensayos tecnológicos en alambres

- **Ensayo de flexión alternativa.** Se utiliza para determinar el comportamiento de un alambre bajo esfuerzos plásticos de flexión. El alambre se sujeta entre dos mordazas y se dobla 90° alternativamente en uno y otro sentido sobre unos cilindros, con el fin de obtener una flexión uniforme. La prueba termina cuando se produce la rotura del alambre o se alcanza un número de ciclos determinado.

- **Ensayo de retorcido.** La prueba consiste en determinar el grado de torsión de un alambre midiendo el número de vueltas, es decir, de torsiones de 360°, que se le pueden comunicar antes de que se produzca la rotura. Para que el alambre se mantenga estirado durante el ensayo, se le tracciona con una fuerza pequeña (1 % de su carga de rotura). Además, ha de estar adecuadamente dimensionado, de modo que el diámetro y la longitud guarden entre sí una determinada relación. El alambre se fija mediante dos cabezas de sujeción: una de ellas será la que le comunica el esfuerzo de torsión, mientras que la otra, que no gira, debe tener la posibilidad de moverse longitudinalmente en la dirección del eje del alambre, ya que este se acortará a medida que la prueba avanza.



7. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (CONTROL DE DEFECTOS)

Todas las pruebas y los ensayos con materiales que se describieron en los apartados precedentes tenían como finalidad la determinación de ciertas características, cuyos valores, una vez conocidos, permitían decidir responsablemente sobre su aplicación a situaciones concretas. Evidentemente, entre el estudio y valoración de tales características y la oferta en el mercado de un determinado producto ya manufacturado, existen una serie de procesos intermedios que también han de someterse a exigencias de calidad mediante los correspondientes ensayos científicos y tecnológicos.

Ahora bien, una vez que se ha terminado la fabricación de un producto, ¿puede asegurarse que este cumple con todas las exigencias de calidad sin someterlo a algún tipo de control?

La respuesta, lógicamente, es negativa. Pues del mismo modo que deben controlarse las propiedades de los materiales utilizados y el desarrollo de los propios procesos de fabricación, también el producto manufacturado debe someterse a una serie de pruebas y ensayos que garanticen la no existencia de defectos o, al menos, que esos defectos sean mínimos y sin incidencia alguna en la calidad deseada. Son los llamados **ensayos de control de defectos**.

Estos ensayos pretenden detectar las imperfecciones existentes en piezas terminadas y, por eso, no deben dejar en ellas huella alguna; de ahí que también se designen con el nombre de **ensayos no destructivos**. Muchos de estos productos no solo deben someterse a estas pruebas una vez finalizada su fabricación y lanzada su oferta al mercado, sino que también (y así se da en ocasiones muy diversas) el control ha de perpetuarse mientras estén en servicio para asegurar su correcto funcionamiento. Tal es el

caso, por ejemplo, de la detección de fisuras en tuberías de gasoductos y oleoductos, en paredes de altos hornos, etc.

Los métodos más utilizados en la actualidad para control de defectos, sin destrucción del producto, son los siguientes:

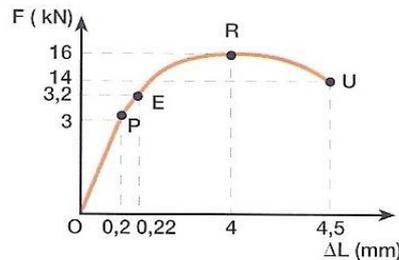
- **Ensayos macroscópicos**, utilizando líquidos penetrantes, para localizar poros, grietas superficiales, etc.
- **Ensayos ópticos**, mediante el microscopio metalográfico, para suministrar información acerca de grietas, poros, tamaño y forma de grano, corrosión, etc.
- **Ensayos magnéticos**, utilizados para detectar defectos de continuidad (grietas, sopladuras, etc.), así como su estado superficial.
- **Ensayos eléctricos**, basados en la variación de la resistencia eléctrica como consecuencia de grietas, poros, impurezas, etc. Se utilizan frecuentemente para la detección de defectos en las vías de ferrocarril.
- **Ensayos con ultrasonidos** de 105 a 107 kHz de frecuencia. Detectan defectos de continuidad en los materiales, así como la profundidad a que se encuentran.
- **Ensayos con rayos X y γ** . Se obtienen radiografías y gammagrafías de las piezas ensayadas, que ponen de manifiesto cualquier irregularidad. Los rayos X se emplean para espesores de hasta 10 cm, y los rayos γ de hasta 25 cm.

ACTIVIDADES:

1. ¿Qué analogías y qué diferencias se dan entre la realidad de los ensayos científicos, tecnológicos y los que no suponen destrucción del producto?
2. ¿Sería correcto, cuando se pretenda comprar un rollo de alambre, elegir una muestra hacia la mitad del rollo y someterla a pruebas de torsión o de flexión alternativa? ¿Por qué?
3. ¿Podrían entenderse las pruebas de rayos X con seres humanos como ejemplos de ensayos no destructivos? ¿Por qué?

8. ACTIVIDADES DE SÍNTESIS

1. Clasifica todos los ensayos descritos de acuerdo con los criterios expuestos en el apartado primero.
2. En un ensayo de tracción, con una probeta cilíndrica de diámetro 10 mm y de longitud 100 mm, se ha obtenido como resultado el diagrama fuerza alargamiento de la figura.



A partir de él construye el diagrama tensión-formación. ¿Cuál será el módulo de Young de la probeta? Deduce consecuencias acerca del alargamiento a rotura.

3. ¿Cuánto valdrá el trabajo de deformación en el ensayo de tracción anterior? Supón que entre los puntos consecutivos la curva es una línea recta (interpolación lineal). Resultado: $W = 44,15 \text{ J}$

4. ¿Cuál será el alargamiento soportado por una barra cuadrada de 1 cm de lado y 10 cm de longitud, si está sometida a una fuerza de tracción de 8 kN, siendo su módulo de Young 2 MN/cm^2 y su límite de proporcionalidad 100 MPa? Si la carga fuera de 80 kN, ¿qué podrías decir del alargamiento? Resultado: $\epsilon = 0,4\%$; $\Delta L = 0,04 \text{ cm}$; $\epsilon > \sigma/E$

5. Una barra cilíndrica de acero, con un límite elástico de 5.000 kp/cm^2 , es sometida a una fuerza de tracción de 8.500 kp. Sabiendo que la longitud de la barra es de 400 mm, y su módulo de elasticidad de $2,1 \cdot 10^6 \text{ kp/cm}^2$, calcula el diámetro de la barra para que su alargamiento total no supere las 50 centésimas de milímetro. Resultado: $D = 2,03 \text{ cm}$

6. ¿Cuál será la sección mínima de un elemento cilíndrico destinado a soportar una carga de 100 kN de tracción, si su límite elástico es 500 MN/m^2 , el coeficiente de mayoración de cargas es 1,2 y el de minoración de resistencia del material 1,1? Si el módulo de Young del material es 2 MN/cm^2 , ¿cuál será su deformación unitaria? Resultado: $S_{\min} = 2,64 \text{ cm}^2$; $\epsilon = 1,9\%$

7. Realizamos un ensayo de tracción con una probeta de 15 mm de diámetro y longitud de referencia de medida de 150 mm. Los datos obtenidos se recogen en la tabla adjunta.

Sabiendo que en el momento de la ruptura el diámetro es de 14,3 mm, calcula:

- a) El diagrama esfuerzo-deformación.
- b) El módulo de elasticidad.
- c) El alargamiento de rotura.

Resultados:

- b) $E = 7,5 \cdot 10^6 \text{ kp/cm}^2$
- c) $A(\%) = 2,19\%$

Esfuerzo (kp/cm ²)	Longitud de medida (mm)
0	150
500	150,01
1 000	150,02
2 000	150,03
3 000	150,04
4 000	150,05
4 500	150,06
5 000	151,28
4 000	151,87
3 750 (rotura)	153,28

8. Un elemento que tiene una dureza entre 5 y 6 en la escala de Mohs, ¿rayará al yeso?
9. Se quiere determinar el límite elástico de un material. ¿Qué ensayo habría que emplear?
 - a) Ensayo de Rockwell.

- b) Ensayo de resiliencia.
- c) Ensayo de flexión.
- d) Ensayo de tracción.

Señala razonadamente la respuesta correcta.

10. Para determinar la dureza Brinell de un material se ha utilizado una bola de 5 mm de diámetro y se ha elegido una constante $K = 30$, obteniéndose una huella de 2,3 mm de diámetro. Calcula:

- a) Dureza Brinell del material.
- b) Profundidad de la huella.

Resultados: a) $HB = 170,4 \text{ kp/mm}^2$; b) 0,28 mm

11. Se ha fabricado un engranaje de acero que posteriormente ha sido verificado en laboratorio. En uno de los ensayos efectuados se midió la dureza en la superficie y en el núcleo de la pieza, siendo sus resultados de 500 HB y de 200 HB, respectivamente.

- a) Indica en qué unidades vienen expresados dichos valores y en qué consiste (brevemente) el método de ensayo utilizado.
- b) Explica, en función de su aplicación posterior, qué se persigue con la obtención de diferentes durezas en la pieza fabricada.

12. En un ensayo de dureza Brinell se aplica una carga de 3000 kp al penetrador, cuyo diámetro es 10 mm. Si el diámetro de la huella es de 5 mm, ¿cuál es la dureza del material? ¿Se obtendría el mismo valor de dureza si el diámetro del penetrador fuese de 5 mm y la carga de 750 kp? ¿Cuál sería el diámetro de la huella en este caso?

Resultado: $HD = 142,5 \text{ kp/mm}^2$; sí; $d = 2,5 \text{ mm}$

13. En un ensayo Brinell de una chapa de acero aleado de 8 mm, se obtuvo una huella de 4 mm de diámetro. Utilizando la tabla adjunta, halla:

- a) Dureza del acero, constante del ensayo y diámetro de la bola.
- b) Resistencia aproximada a la rotura por tracción, en N/m^2 .

		Carga P en kp (15s/15s)		
Espesor (mm)	Diámetro D (mm)	Aceros al C (30D ²)	Aceros aleados (10D ²)	Bronce (5D ²)
> 6	10	3000	1000	500
3-6	5	750	250	125
< 3	2,5	187,5	62,5	31,2
Coeficiente de σ_R		0,36	0,34	0,23

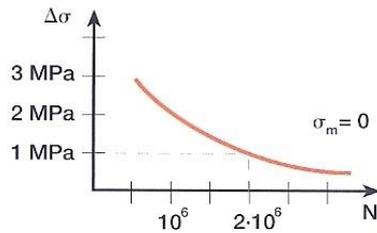
Resultado: a) $HB = 76,3 \text{ kp/mm}^2$; $K = 10 \text{ kp/mm}^2$; $D = 10 \text{ mm}$; b) $\sigma_R = 26 \text{ kp/mm}^2$

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

Resultado: $HRB = 63$

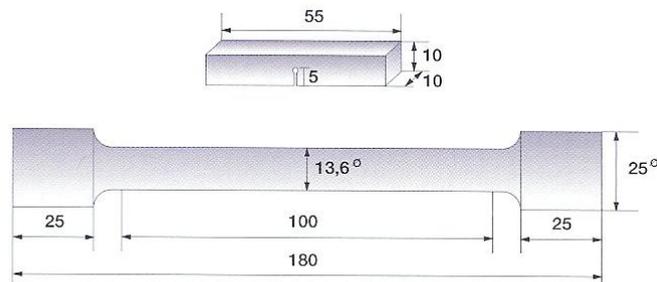
15. En un ensayo Rockwell B, ¿la profundidad de la huella después de retirar el penetrador será igual que la profundidad h_3 ? Razona la respuesta.

16. En la figura se representa el diagrama de Wöhler de un material obtenido en un ensayo de fatiga con una tensión media igual a cero. ¿Cómo variará la curva si se repite el ensayo aplicando a la probeta una carga de tracción?



17. El trabajo de deformación en un ensayo estático de tracción, ¿será mayor o menor que el medido en un ensayo de tracción por choque? Razona la respuesta.

18. La figura representa los croquis de dos probetas para ensayos de propiedades de materiales. Identifica y explica tales ensayos, así como las propiedades que permiten determinar.



19. En un ensayo con el péndulo Charpy, la maza de 20 kg cayó sobre una probeta de 80 mm^2 de sección desde una altura de 1 m y se elevó 60 cm después de la rotura. Obtén el resultado del ensayo.

Resultado: $KCV = 10^6 \text{ J/m}^2$

20. Razona si las siguientes afirmaciones son ciertas o falsas:

- La mayor deformación elástica en un ensayo de tracción se produce cuando la tensión alcanza el límite elástico del material.
- En los materiales tenaces la altura de la bola, una vez rota la probeta en el ensayo Charpy, es mayor que en los materiales frágiles.
- Las velocidades altas de aplicación de las cargas disminuyen la resiliencia de los materiales.
- Todas las propiedades de un material se mantienen constantes con la temperatura.
- Se evitará en todo momento la rotura de un material si en él la tensión, aunque sea cíclica, no sobrepasa su resistencia a la tracción.