

ENSAYOS DESTRUCTIVOS

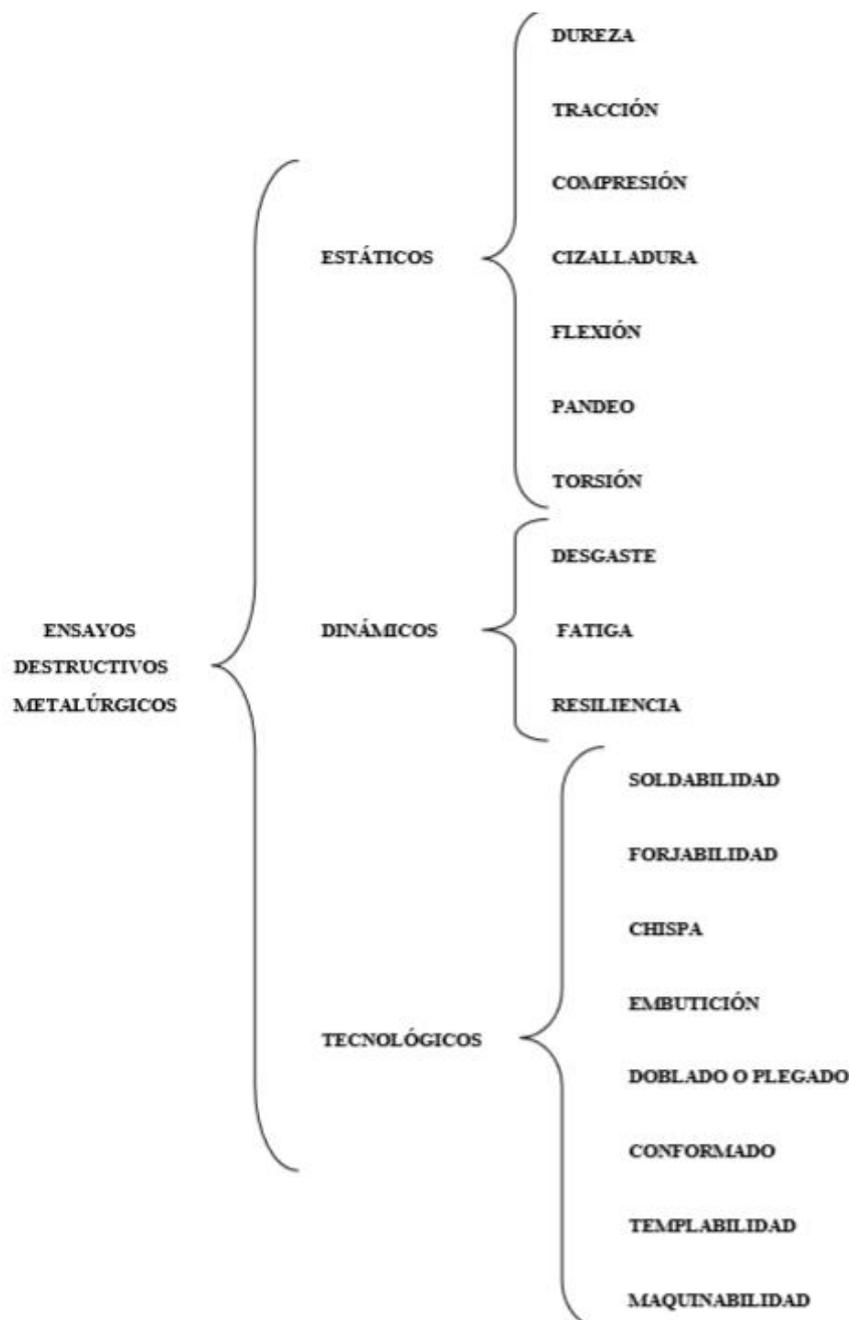
Los *ensayos de propiedades mecánicas* determinan como su propio nombre indica, las propiedades mecánicas de un material. Se les llama también **ensayos destructivos** precisamente porque al llevarlos a cabo el material sufre daños. Es por este motivo por lo que en ese tipo de ensayos donde se sabe que la pieza estudiada quedará dañada o inutilizada, se usan las llamadas **probetas**.

Una probeta es una porción del material a ensayar con una forma y unas dimensiones determinadas que se encuentran normalizadas y que sirve para una sola aplicación.

Los ensayos destructivos se clasifican en dos grandes grupos según cómo se aplique la carga en cada caso:

- **Ensayos estáticos:** cuando la carga se aplica gradualmente desde el valor 0 hasta el valor máximo, previa existencia de contacto.

- **Ensayos dinámicos:** cuando la carga se aplica con determinada velocidad sobre el cuerpo que la debe soportar.



ENSAYOS DE DUREZA

La **dureza** es la resistencia de un material a ser rayado o penetrado, por lo cual estamos midiendo la cohesión entre los átomos del material y está muy relacionada con la resistencia a la deformación y a la rotura, y cuanto más duro sea un material, más resistente será también.

Ensayo de dureza a la lima

El ensayo de dureza a la lima es uno de los procedimientos más simples y más extendidos para apreciar la dureza de los metales. Es poco preciso y no refleja la dureza en términos cuantitativos (no se puede expresar la dureza con números). Se realiza mediante una lima y si ésta no entra en el material ensayado su dureza será superior a **60 HRC** y se considera que el material está templado. Por el contrario, si la lima entra será inferior a **58 HRC** y no está templado

Escala de dureza Mohs

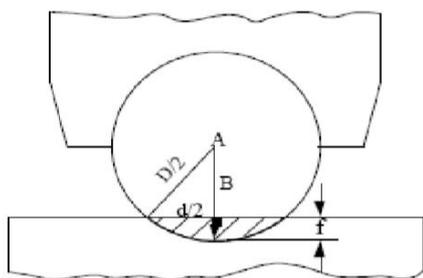
Friedrich Mohs (1822) propuso la escala de dureza MOHS y fue el primer método de estimación de durezas. Este método se basa en la propiedad que tienen los materiales de ser rayados por otro de mayor dureza. La escala está formada por diez minerales que se ordenan en una tabla. Los diez materiales de esa tabla tienen la propiedad de ser rayados por el siguiente en dicha tabla, pero no por el anterior. La dureza de una muestra se obtiene determinando qué mineral de la escala de Mohs lo raya. Así, la galena, que tiene una dureza de 2,5, puede rayar el yeso y es rayado por la calcita. La dureza de un mineral determina en gran medida su durabilidad.

El procedimiento para determinar la dureza de un material es muy sencillo, se intenta rayar el material que quieres estudiar con un material duro (diamante o corindón) y se continúa rayando con el resto de materiales que contiene la tabla siguiente, en orden descendente (materiales cada vez más blandos), hasta encontrar uno que no lo raye.

| MINERAL | DUREZA | REFERENCIAS |
|---------------------|--------|--|
| Diamante | 10 | Raya todos los materiales comunes (diamante industrial, disco de diamante, etc.) |
| Corindón | 9 | Discos de lija de corindón, corundum (óxido de aluminio, carburo de tungsteno, etc.) |
| Topacio | 8 | Papel de lija de 7 a 9 |
| Cuarzo | 7 | El acero de una lima, 6,5 , arena de sílice de 6 a 7, vidrio sin plomo 7 |
| Ortosa (Feldespato) | 6 | El cristal, 5,5 , piedra pómez, |
| Apatito | 5 | El acero de una navaja |
| Fluorita | 4 | El cristal de una ventana |
| Calcita | 3 | Se raya con una moneda de cobre |
| Yeso | 2 | Se raya con una uña |
| Talco | 1 | Se raya con una uña |

Ensayo Brinell

Este método fue desarrollado por un profesor que da nombre al ensayo en el año 1900. Es muy utilizado industrialmente y te permitirá determinar cuantitativamente la dureza de los metales basándose en la **huella producida por un penetrador esférico** de acero templado, pulido y sin defectos, de unas dimensiones determinadas, al comprimirlo bajo una carga estática y durante un tiempo determinado sobre el material que se pretende ensayar.



D = diámetro de la bola d = diámetro de la huella

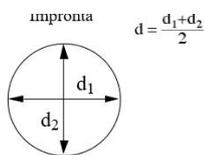
La huella que queda en el material ensayado tiene forma de *casquete esférico* y para determinar de modo cuantitativo la dureza tienes que medir el **diámetro** de esa huella con un microscopio y a continuación dividir la carga que ha actuado sobre la bola entre la superficie de esa huella. La mayoría de las veces no tendrás que aplicar la fórmula ya que actualmente, en la mayoría de los durómetros Brinell la dureza puede leerse directamente de la máquina sin aplicar ninguna ecuación.

$$HB = \frac{P}{S} \left[\frac{Kg}{mm^2} \right]$$

Carga efectuada

Superficie de la huella

Las esferas Brinell normalizadas deberán tener entre 1,25 mm y 10 mm de diámetro (serán de 10 mm y de 5 mm en los ensayos tipo) con una tolerancia de este valor no mayor a 0.005 mm en cualquier diámetro. Si es necesario utilizar esferas más pequeñas, se aplican otras tolerancias y se tienen que tener en cuenta algunas observaciones que suelen venir especificadas por el fabricante.



El procedimiento que debe llevarse a cabo para realizar con éxito el ensayo Brinell es el siguiente:

Se comprime la bola de acero templada, contra el material a ensayar con una fuerza P durante un tiempo establecido. Después de liberar la carga se mide el diámetro (d) de la huella con un dispositivo amplificador óptico. El diseño de la máquina de ensayo debe ser tal que no se produzcan movimientos laterales o balanceos de la probeta o de la esfera mientras se aplica la carga. El sistema de carga debe aplicarse con el máximo cuidado a medida que se aproxima al valor máximo de indentación. La dureza Brinell es un valor adimensional resultante de:

$$HBS = \frac{2P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Donde:

- P:** carga aplicada en kgf o Kp.*
- D:** diámetro de la bola de acero en mm.*
- d:** diámetro medio de la huella en mm.*

La fuerza P que se debe emplear en el ensayo no será la misma según el material de ensayo que tengas y el diámetro de la bola indentadora, y se calcula del siguiente modo:

$$P = K D^2$$

donde:

***P** es la carga a usar [Kp] **K** es una constante para cada material: 5 para el Aluminio, Magnesio y aleaciones; 10 para el Cobre y sus aleaciones; 30 para los aceros y el hierro; 2,5 para materiales blandos (estaño Sn, plomo Pb).*

***D** es el diámetro de la bola (penetrador) [mm]*

Algunas consideraciones que deberás tener en cuenta para la correcta realización del ensayo:

- que la superficie ensayada sea plana y normal al eje de aplicación de la carga.
- que la superficie esté limpia de óxidos, cascarillas y grasas.
- que la distancia del borde de la pieza al centro de la huella sea mayor que cuatro veces el diámetro de la huella.
- que el espesor del material sea mayor del doble del diámetro de la huella.
- que el material sea homogéneo, es decir, no tenga zonas descarburadas o cementadas.
- La prueba de dureza Brinell no se recomienda en materiales que tengan una dureza mayor de 630 HB

| DUREZA BRINELL DE ALGUNOS MATERIALES | |
|--------------------------------------|---------|
| Acero de herramientas templado | 500 |
| Acero dulce (0.80% de carbono) | 210 |
| Acero dulce (0.10% de carbono) | 110 |
| Bronce | 100 |
| Latón | 50 |
| Aluminio | 25 a 30 |

UF 6- CONTROL DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO: ED

Al medir la dureza Brinell de un material, es proporcional a la lista de las condiciones de la prueba, y se utilizan medidas métricas. La lista comienza con el número de dureza Brinell, sigue con el tipo de ensayo, seguida en el diámetro de la bola, la cantidad de fuerza aplicada, y la cantidad de tiempo.

XXX HB (D/P/t)

El pino es una madera muy blanda, se presentaría una lista como esta: 1,6 HB 10/100/30. Esto significa que la dureza Brinell de pino es de 1,6 cuando se impresionó con una bola de acero templado que es 10 milímetros (4 /10 de pulgada) de diámetro con un peso de 100 kilogramos (220 libras) durante 30 segundos.

Uso de HBS:

a) Determinar el %C de un acero. Solo valido para aceros al carbono.

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

b) Cálculo de la resistencia a la tracción.

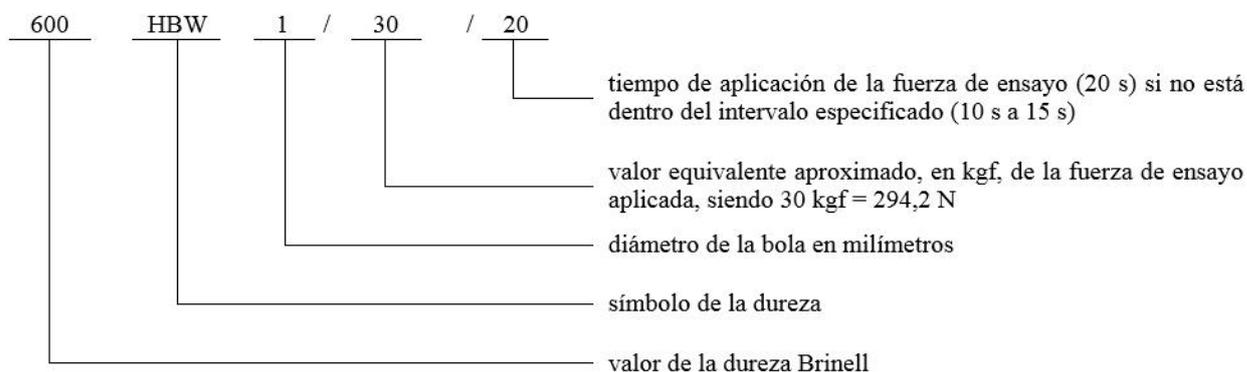
$$\sigma_r = 0,36 HBS \approx \frac{HBS}{3}$$

En el año 2006 se actualizó la Norma UNE-EN-ISO 6506 que regula los ensayos de dureza y se cambió :

- La forma de denominar la dureza: HBW en vez de HB
- La carga de vendrá en Newtons en vez de Kp
- La relación carga-diámetro es: **P=9,806 KD²**
- La nueva fórmula es:

$$HBW = 0,102 \times \frac{2F}{\pi D^2 \left(1 - \sqrt{1 - d^2 / D^2}\right)}$$

Designación de la dureza Brinell:



Ensayo Rockwell

El ensayo Brinell no es apto para medir la dureza de los aceros templados, debido a las deformaciones que experimentan las bolas, incluso siendo éstas de un material muy duro como es el carburo de wolframio. Por este motivo se ideó un estudio para determinar la dureza de un material midiendo la diferencia de **profundidad en la penetración**.

El método ideado se llamó ensayo Rockwell y determina como ya sabes la resistencia de un material a ser penetrado. Consiste en hacer penetrar a un cuerpo indentador que se fuerza contra el material que se está ensayando.

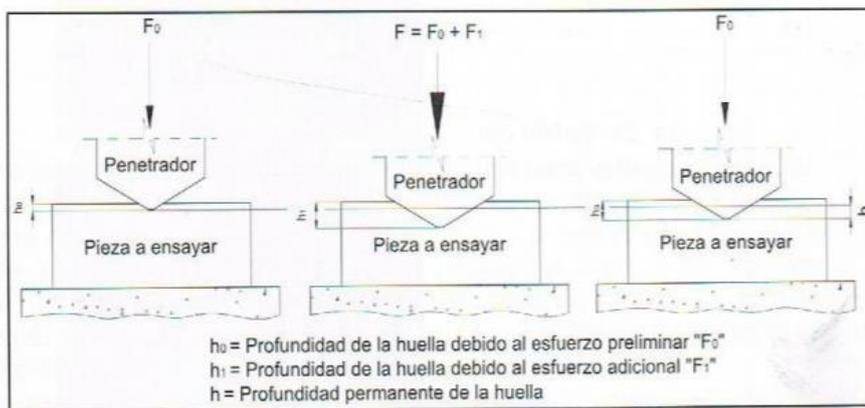
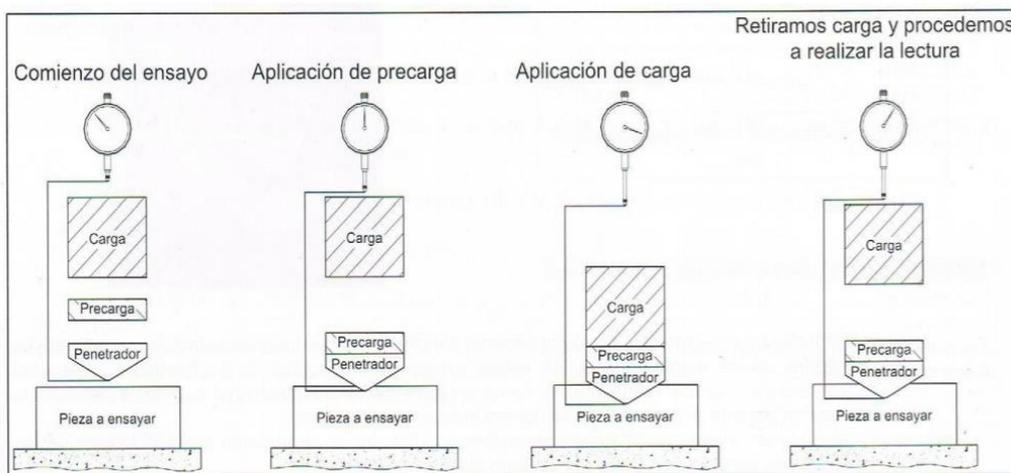
La penetración se hace en **dos partes**: primero con una carga pequeña y luego con una carga final mayor.

UF 6- CONTROL DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO: ED

Hay dos tipos de penetradores:

- Para los materiales duros se emplea como elemento de penetración un cono de diamante de ángulo $120^\circ \pm 30'$ y vértice redondeado formando un casquete esférico de radio 0,20 mm.
- Para los materiales semiduros y blandos se utiliza una bolita de acero de 1/16, 1/8, 1/4 y 1/2 pulgadas.

El cuerpo empleado para la penetración debes hacerlo incidir sobre la superficie de la pieza a ensayar con una precarga de 10 Kg para eliminar la deformación elástica y obtener un resultado mucho más preciso. La profundidad de penetración alcanzada constituye el valor de partida para la medición de la profundidad de la huella. Después se aumenta en 140 Kg la carga aplicada al cono (150 Kg), y en 90 Kg la aplicada a la bolita (100 Kg) y se aplica esa carga durante 15 seg., bajándose nuevamente al valor previo de 10 Kg. Se mide la profundidad de penetración que queda y en la escala del aparato se lee directamente la correspondiente dureza Rockwell C (HRC) como o la Rockwell B (HRB) bolita.



| Símbolo | Forma de cálculo |
|--|---|
| HRA HRC HRD | $Dureza_{Rockwell} = 100 - \frac{h}{0,002}$ |
| HRB HRE HRF HRG HRH HRK | $Dureza_{Rockwell} = 130 - \frac{h}{0,002}$ |
| HRN HRT | $Dureza_{Rockwell} = 100 - \frac{h}{0,001}$ |
| h = Profundidad de la huella permanente en mm. | |

| HB | Penetrador | Cargas (Kgf) | | Material |
|----|---------------|--------------|-------|--|
| | | Adicional | Total | |
| B | Bolilla 1/16" | 90 | 100 | Acero blando. Aleaciones de Cu y Al. Fundición maleable. |
| C | Cono | 140 | 150 | Acero de alta dureza. Fundición perlítica. |

UF 6- CONTROL DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO: ED

Los números de dureza Rockwell se expresan siempre con un símbolo de escala, que indica el penetrador y la carga utilizada. Por ejemplo, 60 HRC indica un valor de dureza Rockwell 60 medido en la escala C (utilizando el cono).

XXX HRS P/t

Penetrador de diamante: Este tipo de penetrador debe emplearse en pruebas de dureza para las escalas A, C y D. Consiste en un cono de diamante cuyo ángulo es de $120^{\circ} \pm 30'$ y su eje debe coincidir con la dirección de penetración con una tolerancia de $\pm 30'$. La punta es un casquete esférico con un radio de 0.2 mm.

Penetrador esférico de acero: Penetrador con forma de bola: 1/16 pulgadas de acero duro, llamado penetrador para la escala B. Pueden emplearse, también, bolas de 1/8, 1/2 y 1/4".

Condiciones del ensayo:

1. La superficie del material debe estar lisa, seca y libre de grasa, polvo etc.
2. El espesor de la probeta debe ser por lo menos diez veces la profundidad de la huella, y el ensayo no es válido si en la cara posterior a la del ensayo aparece una protuberancia.
3. Si se ensaya una pieza cilíndrica, el radio debe ser mayor en seis milímetros al del penetrador. Los valores de dureza resultan ligeramente inferiores a los valores reales.
4. La aplicación de la carga debe hacerse de manera perpendicular a la superficie de la probeta. Para realizar esto se usa una máquina consistente en un soporte rígido para colocar la probeta y un dispositivo que aplica las cargas a un penetrador en contacto con la pieza.

Ventajas del método Rockwell:

- Método rápido y preciso, no necesita de operarios especializados.
- Huellas más pequeñas que el método Brinell.
- Inconveniente tiene que si el material no asienta perfectamente, las medidas resultan falseadas.

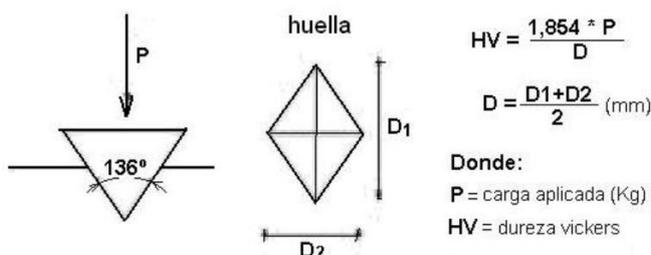
Ensayo Vickers

Este ensayo se introdujo en el año 1925 como una variante del ensayo Brinell.

En este ensayo, como cuerpo de penetración se utiliza una pirámide cuadrangular de diamante cuyas caras opuestas forman un ángulo de 136° , en lugar de una esfera de acero como ocurría en el ensayo Brinell.

La huella que se ve desde arriba una vez retirada la pirámide es un cuadrado. Este procedimiento es apropiado para aceros nitrurados y cementados en su capa externa, así como para piezas de paredes delgadas (con espesores mínimos de hasta 0,2 mm) de acero o metales no féreos.

La dureza Vickers (HV) se calcula partiendo de la fuerza en Newton y de la diagonal en mm^2 de la huella de la pirámide según la fórmula:



Este tipo de ensayo es recomendado para durezas superiores a 500 HB (en caso de ser inferior, se suele usar el ensayo de dureza Brinell). Este procedimiento es apropiado para aceros nitrurados y cementados en su capa externa, piezas de paredes delgadas de acero, metales no féreos, materiales templados o muy endurecidos, piezas delgadas con espesores mínimos hasta de 0,2 mm, etc. y puede usarse en superficies no planas.

| DUREZA VICKERS DE ALGUNOS MATERIALES | |
|--------------------------------------|-----------|
| MATERIAL | VALOR |
| Acero inoxidable 316L | 140HV30 |
| Acero inoxidable 347L | 180HV30 |
| Acero al carbono | 55-120HV5 |
| Hierro (mineral) | 30-80HV5 |

Por ejemplo: 440 HV 30, donde 440 es el número de dureza, HV da la escala de dureza (Vickers) y 30 indica que la carga utilizada en kg.

Ensayo Knoop

El test de dureza de Knoop es una prueba de **microdureza**, un examen realizado para determinar la dureza mecánica especialmente de materiales muy quebradizos o láminas finas, donde solo se pueden hacer hendiduras pequeñas para realizar la prueba.

El test consiste en presionar en un punto con un **diamante piramidal** sobre la superficie pulida del material a probar con una fuerza conocida, para un tiempo de empuje determinado, y la hendidura resultante se mide usando un microscopio.

Se emplea un penetrador de diamante piramidal de base rómbica de geometría con relación entre diagonales de 1:7. Sus ángulos entre aristas son $a = 130^\circ$ y $b = 172^\circ 30'$, de donde obtenemos:

$$HK = \frac{\text{carga(kgf)}}{\text{area de impresion(mm}^2\text{)}} = \frac{P}{C_p L^2}$$

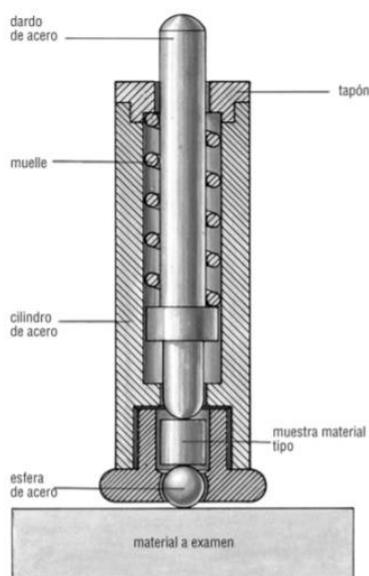
Donde: **L** es la longitud de la hendidura en su eje largo, **Cp** es el factor de corrección relativo a la forma de la hendidura, idealmente **0,070279** y **P** es la carga.

XXX HK P/t

Este ensayo no es muy utilizado debido a que no es más que una variante del ensayo de dureza Vickers. Su uso se restringe únicamente a casos en los que el hecho de aplicar la metodología Vickers supone el deterioro total o parcial de la pieza a ensayar. Por eso Knoop, se considera un ensayo no destructivo.

Ensayo Poldi

El ensayo Poldi es una variante de la dureza Brinell, que consiste en un equipo portátil, donde el impulso se comunica directamente a un **dardo de acero**, golpeado con un martillo aplicado directamente con la mano. Debemos colocar el material muestra (probeta de comparación o patrón cuya dureza es conocida) entre el dardo de acero y la bola. El efecto ha de ser lo suficientemente uniforme para servir de base a la medida. Se mide el diámetro de la huella marcada por una bola. Se diferencia del Brinell en que la presión no se efectúa progresivamente, sino instantáneamente por choque y que la carga que actúa es variable.



La bola que tiene el aparato se apoya por un lado sobre la pieza a ensayar y por el otro sobre la barra patrón. Al dar un golpe con el martillo, se marca una huella en cada una de las superficies. Si ambos materiales tienen la misma dureza, las huellas serán del mismo diámetro. Si la pieza a ensayar es más dura su huella será menor. Midiendo ambos diámetros podemos por medio de una tabla conocer la dureza Brinell del material que se ensaya. Es independiente del tiempo de carga.

Si H_p es la dureza del patrón y H de la pieza, y S_p es la superficie de la huella patrón y S la de la pieza a ensayar, se obtiene:

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

ENSAYO DE TRACCIÓN

Uno de los ensayos destructivos más importantes es el de tracción, ya que aporta gran información sobre la resistencia de los materiales, pudiendo emplearse estos datos tanto para el diseño de nuevas estructuras u objetos, así como para la comprobación de piezas ya realizadas. El método de ensayo está regulado por la norma UNE-EN 10002-1.

Podemos decir que un objeto está sometido a un esfuerzo de este tipo cuando las cargas que actúan sobre él tienden a estirarlo (fig. 1). El ensayo de tracción se realiza aplicando a una probeta un esfuerzo progresivamente creciente hasta conseguir su rotura, debiendo producirse en su parte central (fig. 2).

Fig.1 Elemento sometido a un esfuerzo de tracción.



Fig.2 Comportamiento de la probeta al aplicarle la carga progresivamente creciente.



Durante todo el ensayo se estarán comparando las fuerzas aplicadas a la probeta con los alargamientos que esta vaya sufriendo. Así lograremos un diagrama representativo del material que se ensaya.

Análisis del desarrollo en el ensayo de tracción

Si partimos de una probeta cilíndrica de sección inicial " S_0 ", a la cual se le aplica una fuerza de tracción " F ", dicho material estará sometido a ciertas particularidades; así:

- 1º Soportará una tensión normal unitaria derivada del esfuerzo que soporte en una sección perpendicular al eje de la probeta, y por lo tanto a la dirección de la fuerza (fig. 3).

$$\sigma = \frac{F}{S_0}; \text{ Se expresa habitualmente en } \frac{kp}{mm^2} \text{ ó } \frac{N}{m^2}$$

- 2º Esta probeta también sufrirá deformaciones generadas por la tensión anteriormente mencionada. Podremos hablar de un incremento de la longitud, que irá acompañado de una disminución de la sección.

- *Variación de la longitud:* si en una probeta descargada realizamos dos marcas a una determinada distancia " l_0 ", y seguidamente le aplicamos una carga, la separación entre los trazos aumentará, obteniendo una longitud " l " cuando la pieza está cargada con una fuerza " F " (fig. 4). De esta explicación podemos deducir que el incremento de longitud será igual

a: $\Delta l = l - l_0$. Por lo tanto, el alargamiento que habrá sufrido la probeta por unidad de longitud será: $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$. Tendremos presente que el resultado de este concepto será adimensional.

- **Variación del diámetro:** en la sección de la probeta se producen situaciones inversas que en el caso anterior. Si partimos de una sección "S₀" y aplicamos una fuerza "F" a la probeta, el diámetro sufrirá una reducción o contracción transversal (fig. 5). Así el $\Delta d = d - d_0$ y la contracción transversal unitaria es $\varepsilon_d = \frac{d - d_0}{d_0} = \frac{\Delta d}{d_0}$. Si nos fijamos detenidamente, el valor de estas dimensiones es negativo, ya que el esfuerzo se traducirá en una disminución del diámetro.

La relación entre la contracción transversal y la longitudinal recibe el nombre de coeficiente de Poisson: $\mu = \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon}$. La inversa de este concepto se conoce por el nombre de coeficiente de contracción transversal: $m = \frac{1}{\mu}$.

Fig.3 Sección que soporta el esfuerzo.

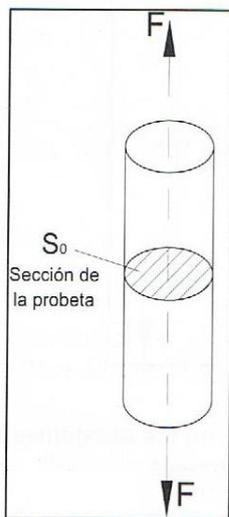


Fig.4 Variación de la longitud.

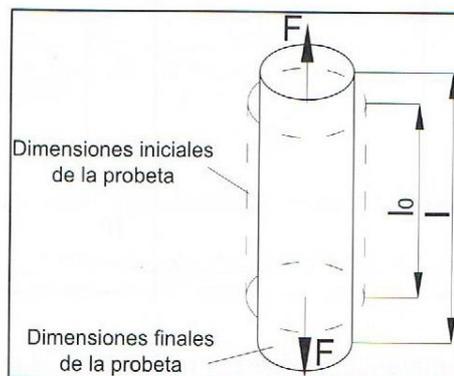


Fig.5 Variación de la sección.

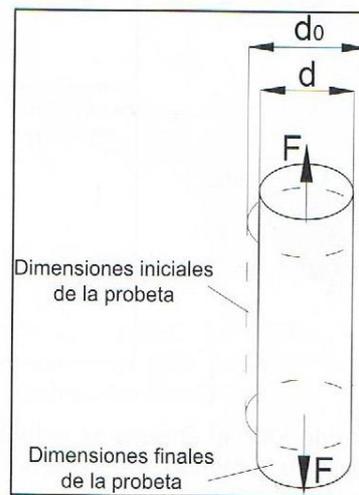


Diagrama de tracción (esfuerzos-deformaciones)

Este diagrama estará representado mediante dos ejes. En el de ordenadas se indicarán las tensiones (σ) y en el de abscisas los alargamientos unitarios (ε).

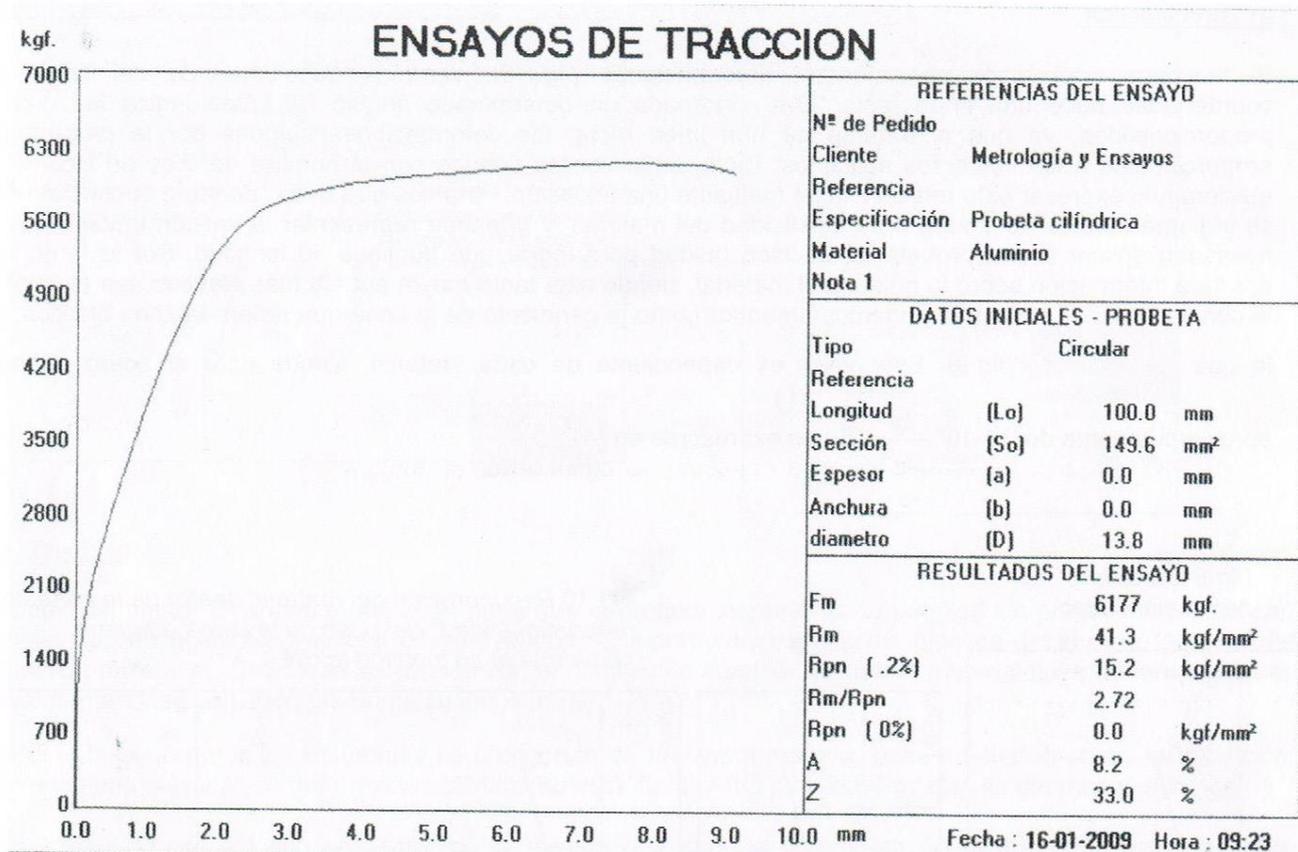
Las máquinas de ensayos arrojan los valores de las fuerzas aplicadas y de los incrementos de longitud sufridos por la probeta. Con ellos se podrá configurar el comúnmente llamado "diagrama de máquina" (fig.6), que posteriormente se traducirá a los parámetros anteriormente citados " σ " y " ε ".

Hoy en día, las máquinas de tracción van acompañadas de un sistema informático que proporcionan directamente el diagrama de tracción.

Sin duda, el gráfico más representativo a la hora de realizar su estudio y análisis es el del acero extrasuave, ya que se compone de una serie de periodos bien diferenciados, de los que se pueden obtener varias conclusiones.

Podemos decir que al aplicar fuerza sobre los materiales todos se comportan, en mayor o menor proporción, de forma elástica, para seguidamente pasar a un estado plástico que generará deformaciones permanentes.

Fig.6 Gráfico de tracción obtenido de una máquina universal de ensayos

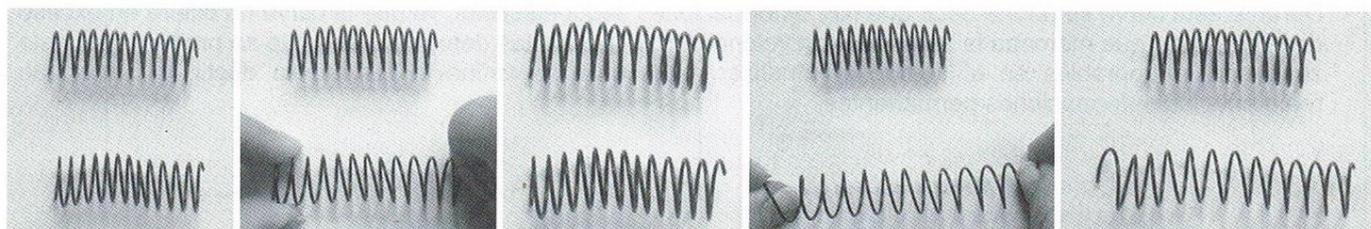


Para entender esta propiedad aclararemos el concepto de elasticidad y plasticidad:

- Podemos definir elasticidad como la propiedad general de los cuerpos sólidos, en virtud de la cual recobran más o menos completamente su extensión y forma, tan pronto como cesa la acción de la fuerza que las deformaba.
- Entendemos por plasticidad de un material el cambio de extensión y forma que adquiere carácter permanente e irreversible, aun cuando cesa la acción de la fuerza que lo generaba.

Todos de pequeños hemos jugado con las espirales metálicas de las libretas; comenzábamos aplicando una leve tracción, observando cómo al cesar dicho esfuerzo el muelle recuperaba su forma primitiva. Esta secuencia se solía repetir incrementando el esfuerzo aplicado, hasta que veíamos que se producía una deformación permanente en el objeto, quedando su longitud final superior a la de partida (fig. 7). Extrapolando este suceso a la teoría anteriormente citada, podemos ver una clara coincidencia de conceptos, distinguiendo entre una deformación elástica y una plástica:

Fig.7 En esta secuencia de imágenes observamos el estado de un material bajo la aplicación de distintos esfuerzos. Así, podemos ver una conducta elástica tras la aplicación de una determinada carga, y el comportamiento plástico que genera deformaciones permanentes al aumentar el valor de la fuerza aplicada.



a) Zona elástica

Si estudiamos el diagrama esfuerzos-deformaciones (*fig. 8*), veremos que partiendo del origen de coordenadas nace una línea recta "O-A", inclinada un determinado ángulo "α". Esta indica la zona de proporcionalidad, ya que al tratarse de una línea recta, las deformaciones sufridas por la probeta son proporcionales a los esfuerzos aplicados. Dicha definición se conoce con el nombre de "Ley de Hooke". Si quisiéramos expresar esta relación lineal mediante una ecuación, diríamos que $\sigma = E\varepsilon$, donde a la constante "E" se le llama módulo de Young o de elasticidad del material, y pretende representar la tensión unitaria que es necesario aplicar a una probeta de sección unidad para lograr que duplique su longitud. Por lo tanto, nos aportará información sobre la rigidez del material, siendo esta tanto mayor cuanto más elevado sea el valor de la constante "E". También la podemos entender como la pendiente de la línea que refiere la zona elástica, por lo que

lo que $\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sigma}{\varepsilon} = E$ (*fig.9*). Este valor es dependiente de cada material, siendo para el acero ordinario

aproximadamente de $2,1 \times 10^6 \frac{kp}{cm^2}$. Suele expresarse en $\frac{kp}{cm^2}$ ó $\frac{N}{m^2}$

Fig.8 Zona de proporcionalidad.

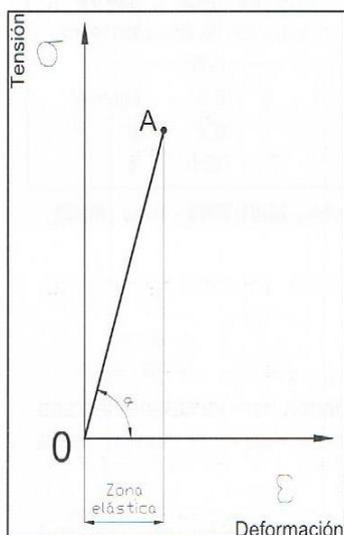


Fig.9

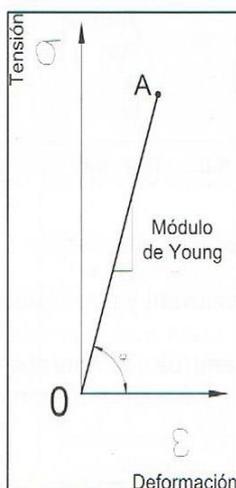
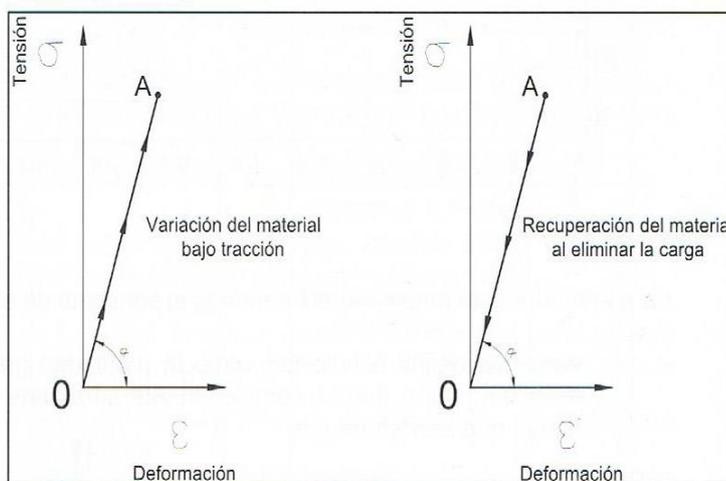


Fig.10 Recuperación del material dentro de la zona de proporcionalidad. Después de la carga adquiere nuevamente su longitud inicial.



En esta primera zona, el material se comporta como si fuera un resorte, ya que al retirar la carga recupera su forma inicial (*fig. 10*). La inclinación de esta recta marcará la elasticidad y el grado de recuperación del material; por lo que una vez superada esta zona elástica, si retiramos la carga, el material recuperará parte de su longitud, pero las deformaciones ya serán permanentes (*fig.11*). Aunque con diversos valores, este suceso ocurre en todos los materiales.

El punto "A" recibe el nombre de límite de proporcionalidad (σ_p), ya que si nos fijamos detenidamente (*fig.12*), a partir de este lugar la línea deja de ser recta para convertirse en una pequeña curva "A-B"; por ello, la relación lineal anteriormente mencionada desaparece, dejando de ser proporcionales los esfuerzos ejercidos a las deformaciones sufridas en la probeta. Si la superficie de la muestra tuviese un buen acabado superficial, podríamos ver cómo aparecen unas líneas inclinadas a 45°, las cuales reciben el nombre de "Líneas de Luder". Durante esta curva se podría decir que hay deformaciones pseudoelásticas, ya que la curva no difiere en exceso de la dirección que marcaba la zona de proporcionalidad; e incluso las deformaciones que se producen en esta zona son recuperables en el tiempo. Al finalizar esta curva se define la resistencia dúctil, y comienzan realmente las deformaciones permanentes.

Fig.11 Recuperación parcial de las deformaciones producidas.

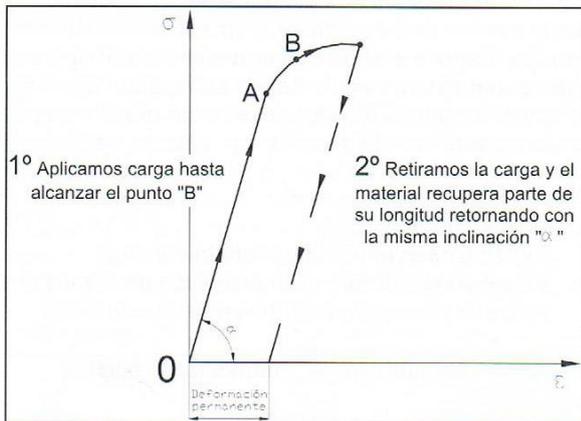
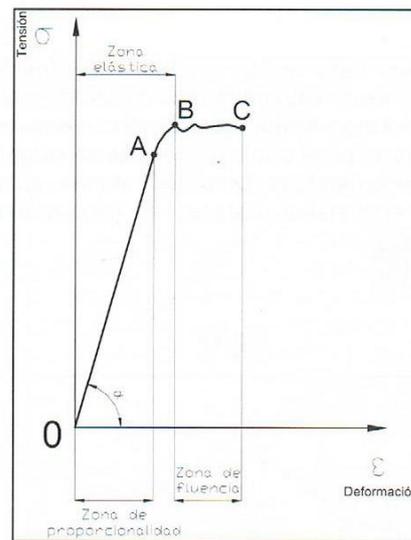


Fig.12 Zona elástica y zona plástica.



b) Zona plástica

A partir del punto "B" aparece una zona en la que la probeta incrementa su longitud sin prácticamente aplicar ningún tipo de esfuerzo o incluso disminuyéndolo, comportándose de forma plástica debido a la pérdida de cohesión molecular. Esta zona se conoce con el nombre de fluencia, ya que el material fluye de forma natural incrementándose considerablemente su longitud (fig. 12).

En esta fase no todos los materiales se comportan de la misma manera, pues en ciertos casos la transición entre la zona elástica y la deformación plástica no está claramente definida. Por ello, se diferencia entre:

- Límite elástico aparente: es la tensión que soporta la probeta en la transición entre la zona elástica y la plástica.
- Límite elástico convencional o práctico: es la tensión que después de ser aplicada genera una deformación permanente del 0,2% de su longitud inicial (fig. 13).

Este valor es de suma importancia, ya que cualquier objeto nunca podrá superarlo para trabajar en condiciones de seguridad. De hecho, no podrá ni aproximarse a dicho valor, pues la tensión de trabajo, o también llamada admisible, en cualquier estructura será igual a: $\sigma_{adm} = \frac{\sigma_e}{n}$ siendo " σ_e " la tensión elástica y "n" un coeficiente de seguridad que dependerá de la responsabilidad de la pieza y del trabajo a desarrollar, teniendo siempre presente que su valor será superior a "1". Como ejemplo se puede hablar de los cables de elevación de cargas en las grúas, ya que deberán poseer un coeficiente de seguridad igual a "4", por lo que $\sigma_{adm} = \frac{\sigma_e}{4}$. En la figura 14 se observa gráficamente la zona de tensiones en las que trabajaría el material.

Fig.13 Determinación gráfica del límite elástico convencional.

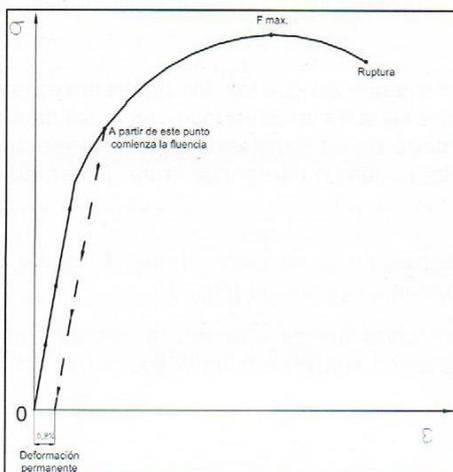
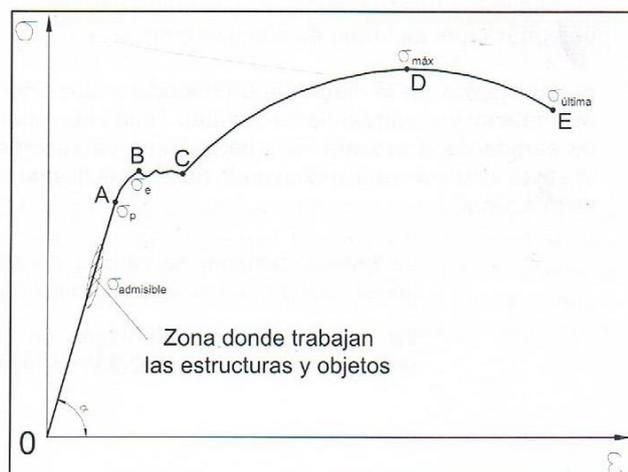


Fig.14 Zona admisible de trabajo considerando el coeficiente de seguridad.



Al finalizar esta zona, el material comienza a sufrir una transformación; pues si conociésemos su comportamiento estructural nos daríamos cuenta de que, a medida que se deforma, va sufriendo variación en su estructura cristalina, adquiriendo un endurecimiento que se traduce en una mayor resistencia. Esto se pone de manifiesto en el punto "C", donde se exige mayor esfuerzo para seguir aumentando su longitud (fig. 15). Así iríamos recorriendo la curva "C-D" donde, en el punto "D" encontraríamos el valor de la carga máxima capaz de soportar el material. Este es el valor que suelen dar las casas comerciales, y su cálculo sería igual a:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{F_{m\acute{a}x}}{S_0}$$

Fig.15

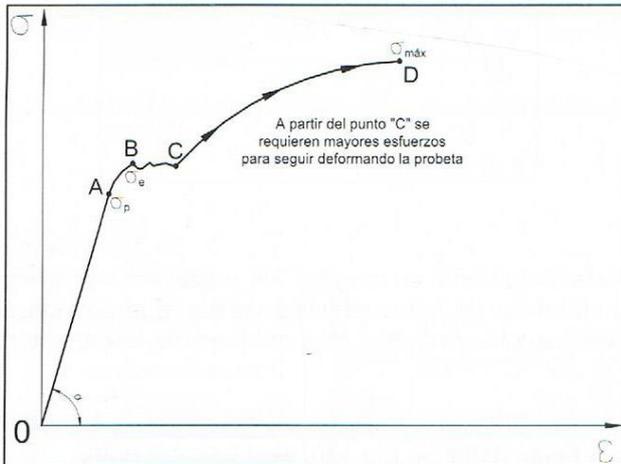
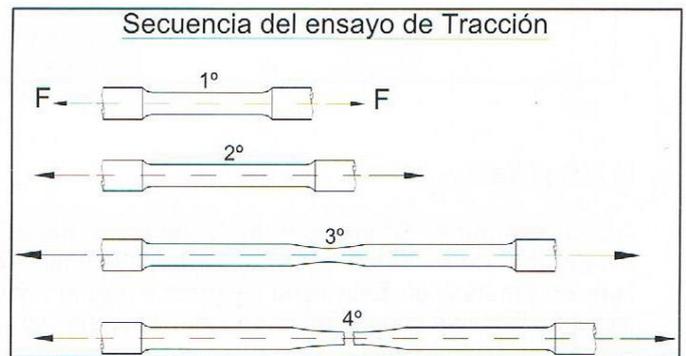


Fig.16 Observamos una probeta con sus dimensiones iniciales y la evolución de la misma al aplicarle una carga progresivamente creciente.



Una vez superada esta fuerza, se puede apreciar en el centro de la probeta una contracción muy acentuada llamada estricción (fig. 16). Esta implica una disminución de la sección capaz de soportar las cargas a las que está sometida, y derivándose en un alargamiento que requiriere un menor esfuerzo del anteriormente soportado, zona "D-E" (fig. 17). Por ello, la rotura tiene lugar bajo una tensión última inferior a la máxima resistida, observándose la fractura de la probeta en el punto "E" del diagrama. El valor de dicha tensión sería

igual a:
$$\sigma_u = \frac{F_{\text{ultima}}}{S_0}$$

Una vez terminado el ensayo, y con la probeta rota, podríamos calcular:

- Elongación o Alargamiento de rotura, "δ" →
$$\delta = \frac{l_{\text{final}} - l_{\text{inicial}}}{l_{\text{inicial}}} \times 100$$
- Estricción de rotura, "ψ" →
$$\psi = \frac{S_{\text{inicial}} - S_{\text{final}}}{S_{\text{inicial}}} \times 100$$

Tendremos presente que ambos conceptos se expresan en %. Nos van a proporcionar información sobre la ductilidad del material ensayado, entendiendo ductilidad como la propiedad de un metal para adquirir grandes deformaciones en forma de alambre o hilos.

Si nos fijamos en el diagrama de tracción, solamente se están teniendo en cuenta dos parámetros: la tensión del material y el alargamiento unitario. Todas las representaciones se realizan basándose en la sección inicial o de partida de la probeta "S₀"; pero, como ya sabemos, el diámetro no es constante durante la ejecución del ensayo, sino que va disminuyendo durante el mismo. Por lo tanto, podemos diferenciar entre un esfuerzo real y uno nominal.

- La tensión nominal se calcula considerando constante la sección y tomando como valor la inicial, por lo que los valores obtenidos no se ajustan a la realidad (fig. 17).
- La tensión real sería teniendo en cuenta para cada fuerza aplicada la sección real de la probeta. La gráfica de tracción se representa de forma aproximada en la figura 18.

Fig.17 Gráfico de tracción de un acero extrasuave basándose en la tensión nominal.

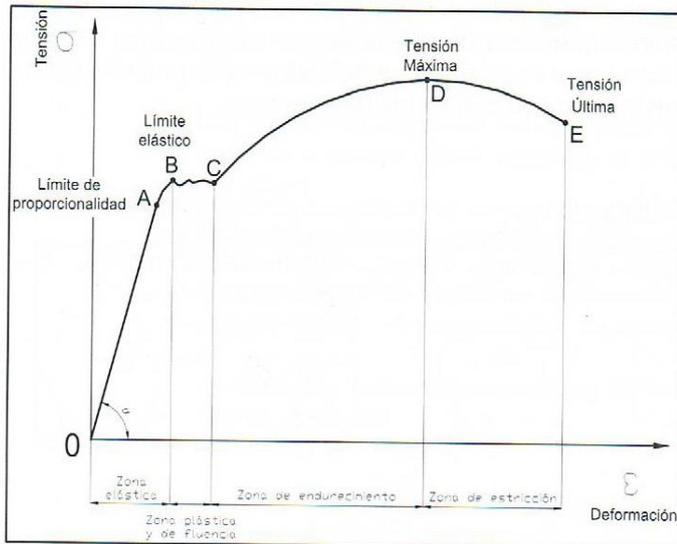
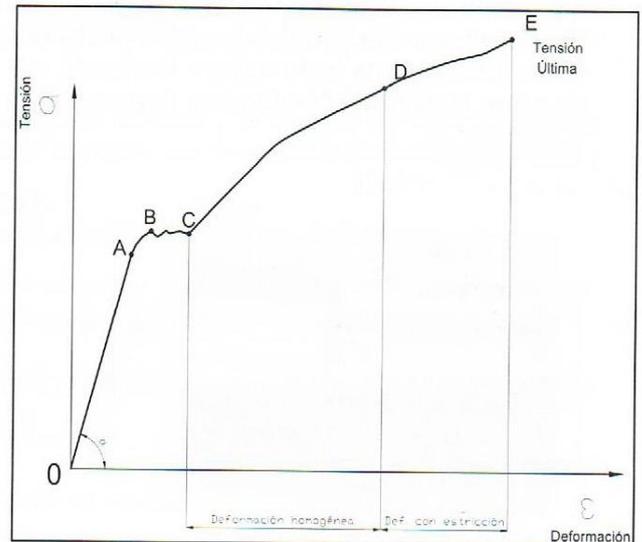


Fig.18 Gráfico de tracción teniendo en cuenta la tensión real que sufre el elemento.



Como conclusión de lo dicho debemos darnos cuenta de que la tensión real que soporta la probeta es mayor que la nominal, pues con una menor sección el material soporta un mayor esfuerzo. Evidentemente, sería inviable representar gráficamente los esfuerzos reales, ya que se tendría que determinar la sección real en cada esfuerzo. Por ello, los diagramas habituales están basados en la sección inicial, y son suficientemente prácticos, arrojando resultados válidos y, si cabe, más seguros para ser empleados en los cálculos o verificaciones necesarias.

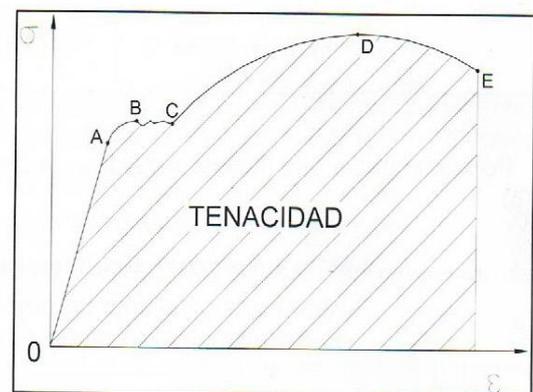
Tenacidad del material

Podemos entender la tenacidad de un material como la cantidad de energía que es capaz de absorber un material hasta romperse. Esta energía aplicada a la probeta es transformada en energía de deformación y, finalmente, empleada en rotura.

Si hablamos de este concepto por unidad de volumen del material, nos estaremos refiriendo al conocido como "módulo de tenacidad".

Para hallarlo solamente tendremos que calcular el valor del área comprendida entre el gráfico de tracción y el eje de abscisas (fig. 19).

Fig.19 Representación gráfica de la tenacidad.



Particularidades del ensayo de tracción

En la realización práctica del ensayo se tendrán en cuenta ciertas particularidades. Para que los resultados obtenidos en el ensayo de tracción puedan ser comparables, las dimensiones de las probetas serán semejantes; y la temperatura a la que se realiza el ensayo junto con la velocidad de aplicación de las cargas, serán parámetros controlados.

Forma y características de las probetas

La forma y dimensiones que poseerán las probetas ensayadas dependerán del producto metálico que se emplee para extraerlas. Partiendo del material base se suele realizar un mecanizado para lograr las dimensiones, forma y características adecuadas para las muestras. Esta operación se efectuará sin alterar la temperatura del material, evitando la aparición de acritud. No obstante, ciertos elementos como pueden ser las barras, los cables, etc., que poseen una sección constante, pueden ensayarse directamente sin requerir un mecanizado. Esto también sucede con las piezas obtenidas mediante moldeo.