



LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES

TÉCNICOS EN EQUIPOS EN INSTALACIONES ELECTROMECÁNICAS

CURSO: 4º AÑO – DIVISIONES A Y B

PROFESOR: ING. JOSÉ E. PASSERINO

CURSO 2019



PROGRAMA DE LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES

UNIDAD 2: ENSAYOS TÍPICOS

- Equipos, técnicas, normas, probetas, métodos de ensayo de

- ⊕ Tracción
- ⊕ Compresión
- ⊕ Flexión
- ⊕ Plegado
- ⊕ Embutido
- ⊕ Torsión
- ⊕ Dureza
- ⊕ Impacto
- ⊕ Fatiga

- Informes de ensayo
- Diagramas

UNIDAD 3: OTROS ENSAYOS

- Ensayos con rayos X
- Tintas penetrantes
- Ensayos con rayos gamma
- Magnaflux
- Ensayos de resonancia
- Radiografías

TEMA 2: ENSAYOS TÍPICOS - UNIDAD 3: OTROS ENSAYOS

SUBTEMAS

- I. Tracción
- II. Compresión
- III. Flexión
- IV. Plegado
- V. Embutido
- VI. Torsión
- VII. Dureza
- VIII. Impacto
- IX. Fatiga

GENERALIDADES

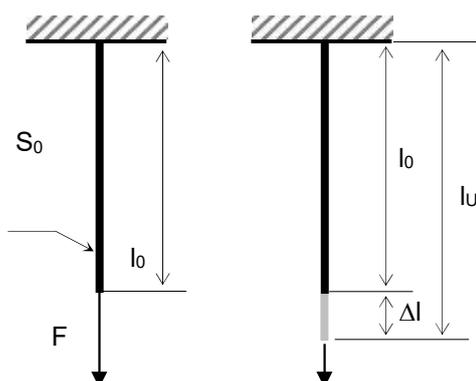
DISTINTOS ENSAYOS MECÁNICOS

Muy globalmente se pueden enunciar los siguientes ensayos para determinar las características de los materiales utilizados en la industria metal mecánica

- MECÁNICOS: Tracción – Compresión Corte – Flexión – Doblado – Dureza - etc.
- FÍSICOS: Granulometría de agregados – Viscosidad Cinemática – etc.
- METALGRÁFICOS: Estructura cristalina del material.
- NO DESTRUCTIVOS: Se interactúa con la pieza sin modificarla.
- ANÁLISIS QUÍMICOS: Determina la composición química de la sustancia.
- DIFRACTOMETRÍA RX: Para determinar corrosión

ENSAYO DE TRACCIÓN

En este ensayo se relacionan los esfuerzos aplicados a la pieza con la deformación sufrida por ella. La resultante de fuerzas que actúan sobre un cuerpo provoca siempre un cambio de sus dimensiones.



l_0 = Longitud inicial de la pieza.
 S_0 = Área inicial de la pieza.
 F = Fuerza que soporta la pieza
 l_u = Longitud final de la pieza.
 Δl = Variación de Longitud de la pieza.

$$l_u = l_0 + \Delta l$$

R es la tensión que soporta el material de la pieza y se define como el cociente entre la resultante de fuerzas **F** que la traccionan y el área inicial **S₀** de la misma.

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

R se mide en unidades de fuerzas sobre unidades de área. En el SIMELA la unidad de fuerza es el Newton [**N**] y la de área, el [**m²**]. La unidad de tensión derivada del cociente de estas dos unidades recibe el nombre de Pascal [**Pa**].

Por ser el **Pa** una unidad pequeña ($\approx 0,00001 \text{ kg/cm}^2 = 10^{-5} \text{ kg/cm}^2$ del Sistema Técnico) se adopta el Mega Pascal [**MPa**] $\rightarrow 1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa}$.

Al aplicar la fuerza **F** a la pieza, su longitud **l₀** aumenta en un valor Δl para alcanzar una longitud final **l_u**.

Se denomina alargamiento específico porcentual al cociente:

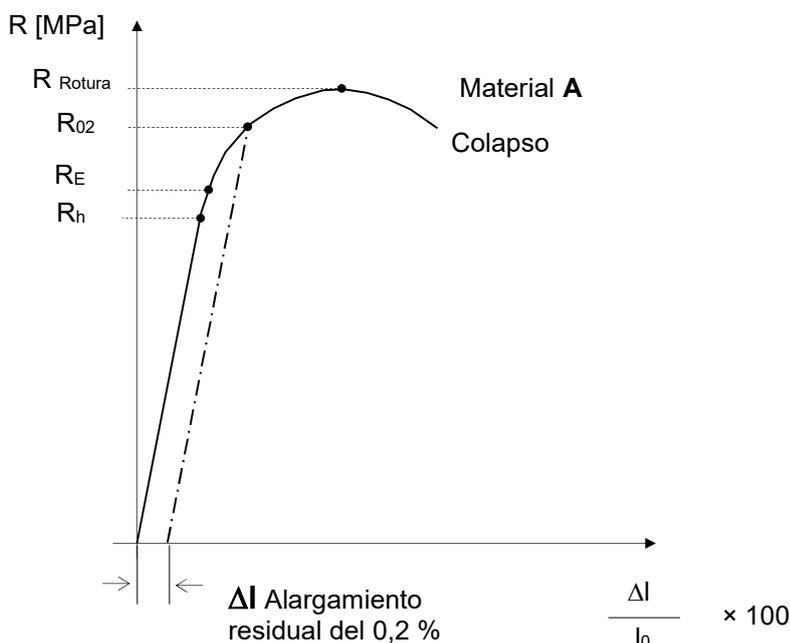
$$A \% = \frac{\Delta l}{l_0} \times 100$$

Del mismo modo se denomina estricción específica al cociente que relaciona el área inicial con el área final de la pieza ensayada:

$$Z \% = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100$$

Con las observaciones que surgen del ensayo se confeccionan diagramas, siendo el más común el denominado de **Tensión – Deformación** o bien **Esfuerzo – Deformación**. De estos diagramas se obtienen valores característicos del material con que está materializada la pieza. En los catálogos que describen a los distintos materiales, es común observar a parámetros característicos.

Un diagrama típico de *tensión* (o esfuerzo) - *deformación* es como muestra la figura:



La nomenclatura responde a la Norma IRAM – IAS U 500-102/1

R_h corresponde a la tensión máxima hasta donde el material se comporta como elástico perfecto (elástico lineal). Esto implica que cumple con la ley de Hooke: "La deformación producida en un material es directamente proporcional a la tensión a que este es sometido". Es por ello que en el gráfico se puede apreciar una sucesión de puntos que conforman una recta. Se observa que para esfuerzos *cero* o sea tensión nula la deformación (estiramiento en este caso) es cero. A medida que crece la fuerza, crece la tensión que soporta el material y por ende crece también su deformación. R_h es uno de los parámetros que aparecen en las características de un material normalizado.

R_E corresponde a la tensión máxima hasta donde el material se comporta elásticamente, aunque ya no existe linealidad entre la tensión y la deformación. Es por ello que comienza a curvarse levemente la gráfica indicando que para iguales deformaciones es necesaria una fuerza menor que dentro del período elástico lineal (la curva se "aplana" levemente)

Si se suspendiera el ensayo en este punto límite, el plotter mostraría que los puntos coinciden exactamente con los ya obtenidos, pero ahora en descenso. En otras palabras la curva volverá por la misma línea con que subió, permaneciendo constante la longitud de pieza. O sea no hay alargamientos remanentes.

En general es difícil determinar este punto R_E por lo que no figura en los catálogos de ingeniería como un parámetro.

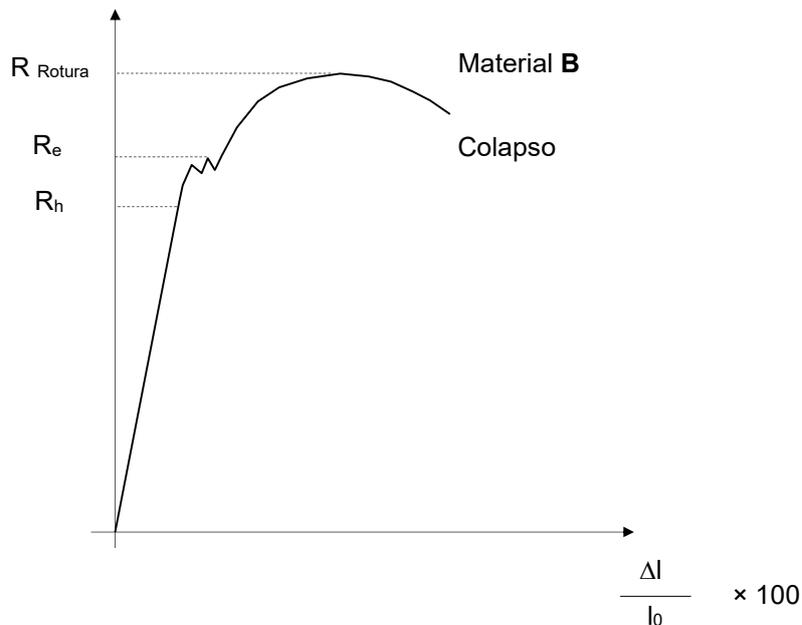
Al continuar agregándole carga para producir más tensión, el material comienza a sufrir deformaciones plásticas, es decir que a partir de R_E el material no recupera su longitud original, quedando con alargamientos remanentes.

Es por esa razón que se impone darle al material ensayado una deformación específica permanente del 0,20 % y leer en este instante la tensión necesaria para lograrla. A este valor de tensión se lo denomina como parámetro característico $R_{0.2}$. Se dice que éste es un límite convencional, que sirve para comparar distintos materiales.

Finalmente al seguir cargando la pieza se observa que la curva de la gráfica comienza a decaer, es decir que a pesar de disminuir la carga aplicada el material continúa deformándose hasta llegar al colapso, es decir su rotura material o bien a un alargamiento tal que nos indica que el material se ha tornado inservible para la utilidad prevista.

Al punto máximo de la curva se lo define como R_{Rotura} y corresponde a la tensión máxima que fue sometido el material.

En el caso de materiales ferrosos es común observar curvas del tipo indicado en la figura:

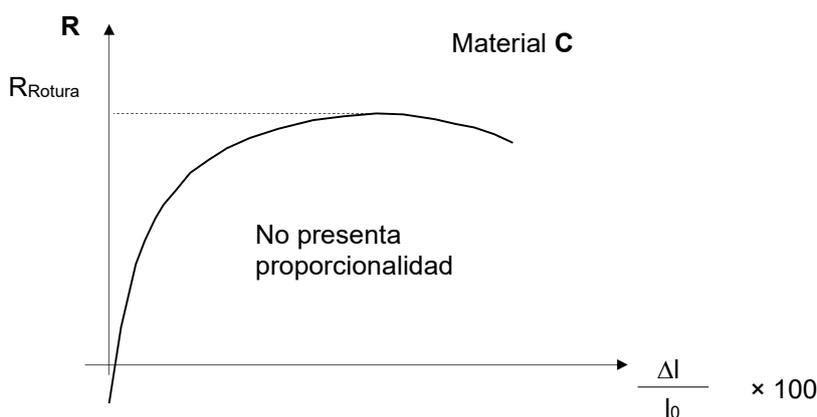


Aparece en este tipo de materiales una zona en donde hay un incremento de deformación con prácticamente ningún aumento de tensión. Se dice que aquí el material se escurre o que "fluye". En textos de origen español se habla de cedencia, por traducción de "to yield" del inglés.

Precisamente R_e corresponde al límite de Fluencia y es otro de los parámetros que aparecen en los catálogos de ingeniería.

Se observa que una vez pasado el límite de fluencia, el material comienza nuevamente a tomar carga o tensión y en forma no lineal aumenta su deformación en la medida que aumenta la tensión, hasta alcanzar el valor máximo de rotura R_{Rotura} que ya se definió anteriormente.

La mayoría de los materiales no presentan una relación proporcional entre esfuerzo y deformación, es decir la gráfica muestra una curva como la indicada en la figura siguiente. Esto no implica que el material no tenga un comportamiento elástico y luego de cierta deformación, entre en período plástico.

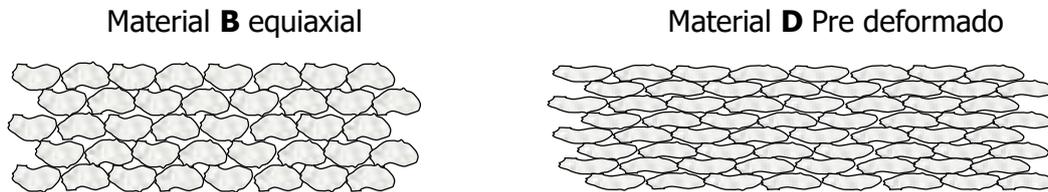


Otra relación que describe al comportamiento del material es el *alargamiento último* expresado en porcentaje

$$A_U \% = \frac{l_U - l_0}{l_0} \times 100$$

En algunos materiales al pasar por el periodo de fluencia y entrando en fase plástica, se produce un *endurecimiento por estiramiento* aumentando considerablemente su límite de proporcionalidad R_h a R_{h1} .

El material original **B** da lugar por el estiramiento al nuevo material **D**, ya que la estructura cristalina equiaxial sufre una pre-deformación.



Si al material **D** se le agrega calor suficiente se vuelve a pasar a la estructura equiaxial. La temperatura de *recristalización* T_R para el acero está en el orden de los 450 °C.

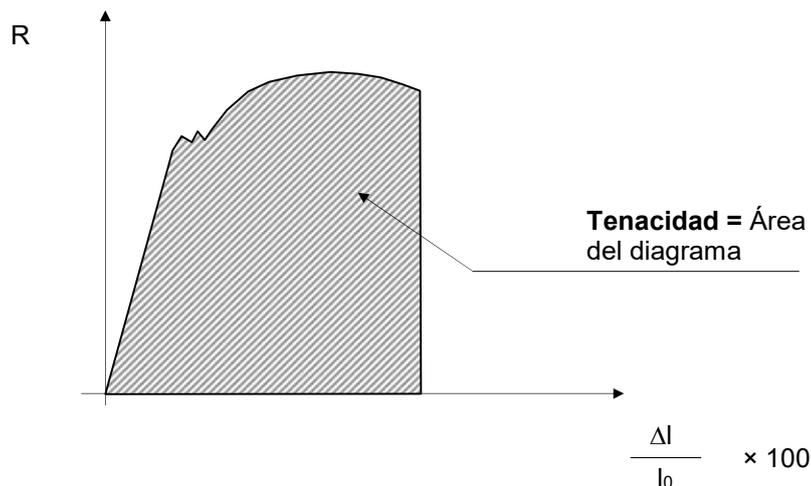
Existe una función que relaciona la temperatura T_R de recristalización con la temperatura T_F que es la temperatura de fusión del material. Esta relación es la siguiente para las temperaturas absolutas en **K** [kelvin]

$$T_R = k \cdot T_F$$

Donde **k** es una constante que vale **0,40**, y las temperaturas en Kelvin.

El área bajo la curva, que representa el trabajo de deformación, da la **Tenacidad** del material. Por lo que un material M_1 con mayor área bajo la curva que otro M_2 tendrá mayor tenacidad.

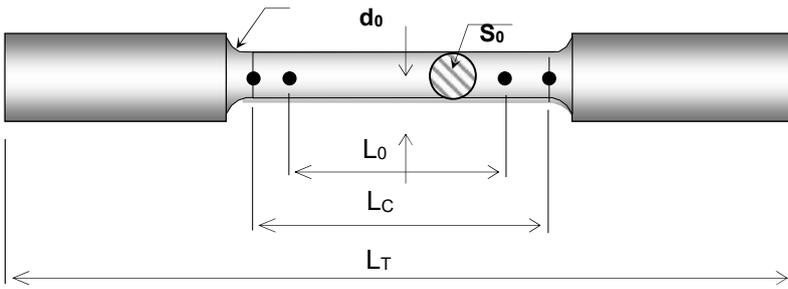
La **Resiliencia** es la propiedad de los materiales para soportar cargas dinámicas o de choques.



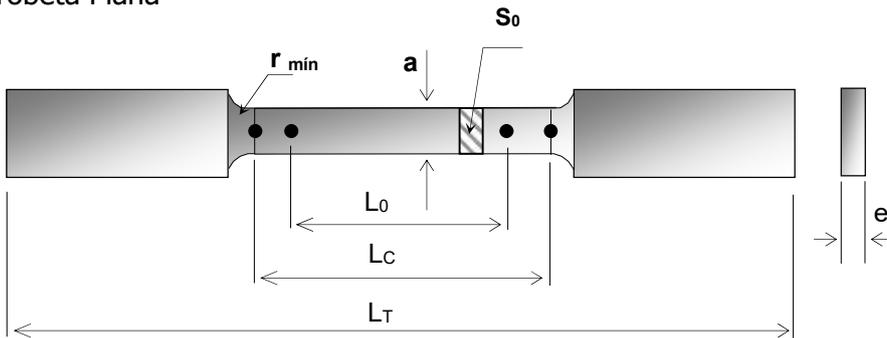
PROBETAS

Se describen dos tipos de probetas, la de revolución y la probeta plana. Estas están normalizadas. Se denomina testigo a piezas no normalizadas (muestras de tipo industrial)

Probeta de Revolución



Probeta Plana



Nomenclatura:

- L_C = Longitud Calibrada
- L_0 = Longitud inicial de la probeta
- L_T = Longitud Total (esta depende de la máquina de ensayo)
- d_0 = Diámetro Inicial de la probeta
- r = Radio de acordamiento
- e = espesor de la probeta plana

Ley de Homología:

Probeta de Revolución

$$L_0 = 5.65 \times \sqrt{S_0}$$

$$L_C = L_0 + 2 d_0$$

$$r_{\min} = d_0$$

$$d_{\max} = d_0 + 25\%d_0$$

Probeta Plana

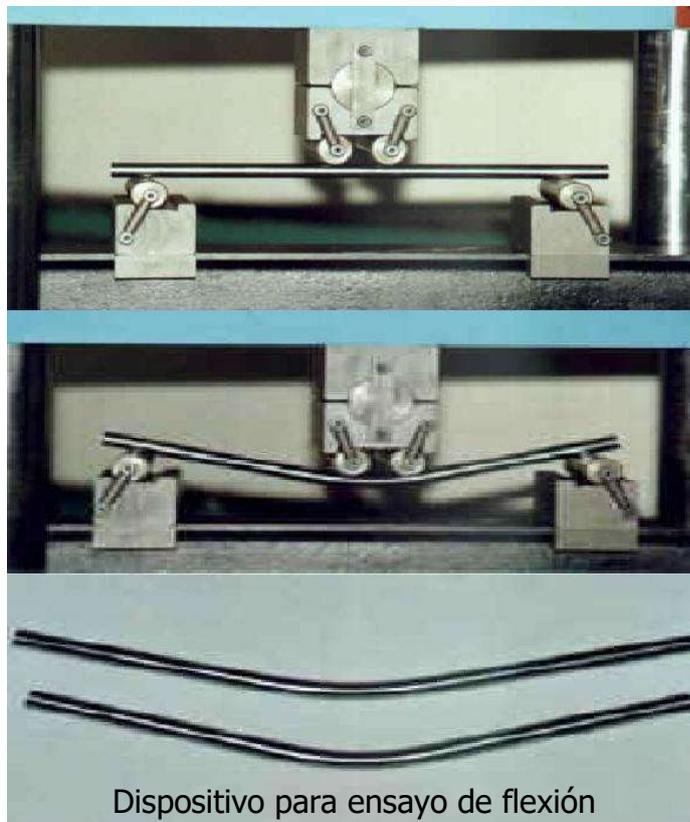
$$L_0 = 5.65 \times \sqrt{S_0}$$

$$L_C = L_0 + 2\sqrt{S_0}$$

$$r_{\min} = f(a)$$



Máquina Universal de Ensayos
UTN FRSF



Dispositivo para ensayo de flexión



Ensayo de Tracción - E.E.T N°455

Materiales metálicos - Acero IRAM 1010

Fecha Rec.: 17/08/2004
 Fecha Ens.: 17/08/2004
 Temperat.: 18°C
 Vel. Ensayo: 10 MPa/s

Shape: Rod
 Diameter: 12.69
 Gauge Length: 62.50
 Name: D-2507

Remarks:

[kN]

60

48

36

24

12

0

Calc. CP1, CP2
 CP Unit
 Pass-Fail Unit
 D-2507

Máxima Carga Máxima Tensión
 55.50 [kN] 439. [MPa]

LASE1-Stress Alarg. Rotura
 8.620 [mm] 380. [MPa] 40.2 [%]

Los resultados consignados se refieren exclusivamente a la muestra recibida, el INTI y el CEMRAF declinan toda responsabilidad por el uso indebido o incorrecto que se hiciera de este informe. Está prohibida la reproducción parcial del mismo.



Ensayo de Tracción - E.E.T. N° 455

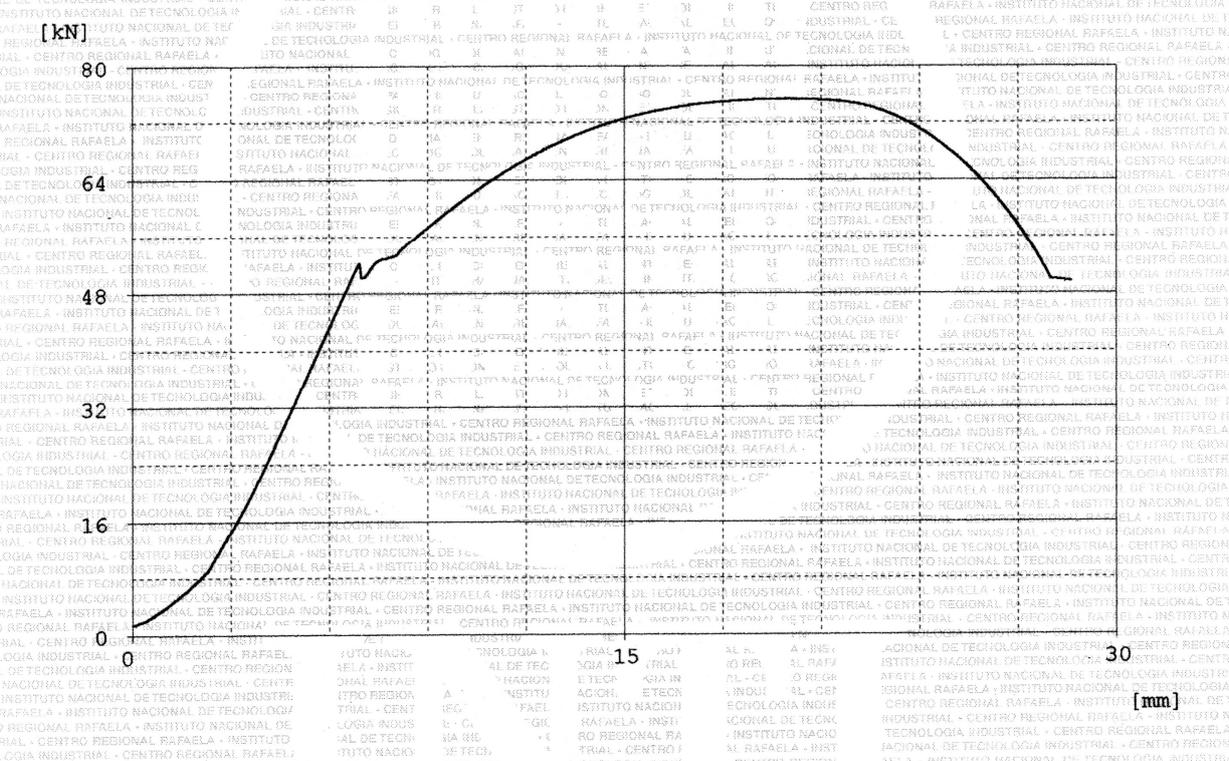
Materiales Metálicos - Acero IRAM 1020

Fecha Rec.: 17/08/2004
Fecha Ens.: 17/08/2004
Temperat.: 18°C
Vel. Ensayo: 10 MPa/s

Shape: Rod
Diameter: 12.45
Gauge Length: 62.50

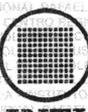
Name: D-2511

Remarks:



Calc	Máxima Carga	Máxima Tensión	LASE1-Stress	Alarg. Ruptura
CPI, CP2	75.30	618	6.910	30
CP Unit	[kN]	[MPa]	[MPa]	[mm]
Pass-Fail				
Unit				
D-2511	75.30	618	429	23.5

Los resultados consignados se refieren exclusivamente a la muestra recibida, el INTI y el CEMRAF declinan toda responsabilidad por el uso indebido o incorrecto que se hiciera de este informe. Está prohibida la reproducción parcial del mismo.



Ensayo de Tracción - E.E.T. N° 455

Materiales Metálicos - Acero IRAM 1045

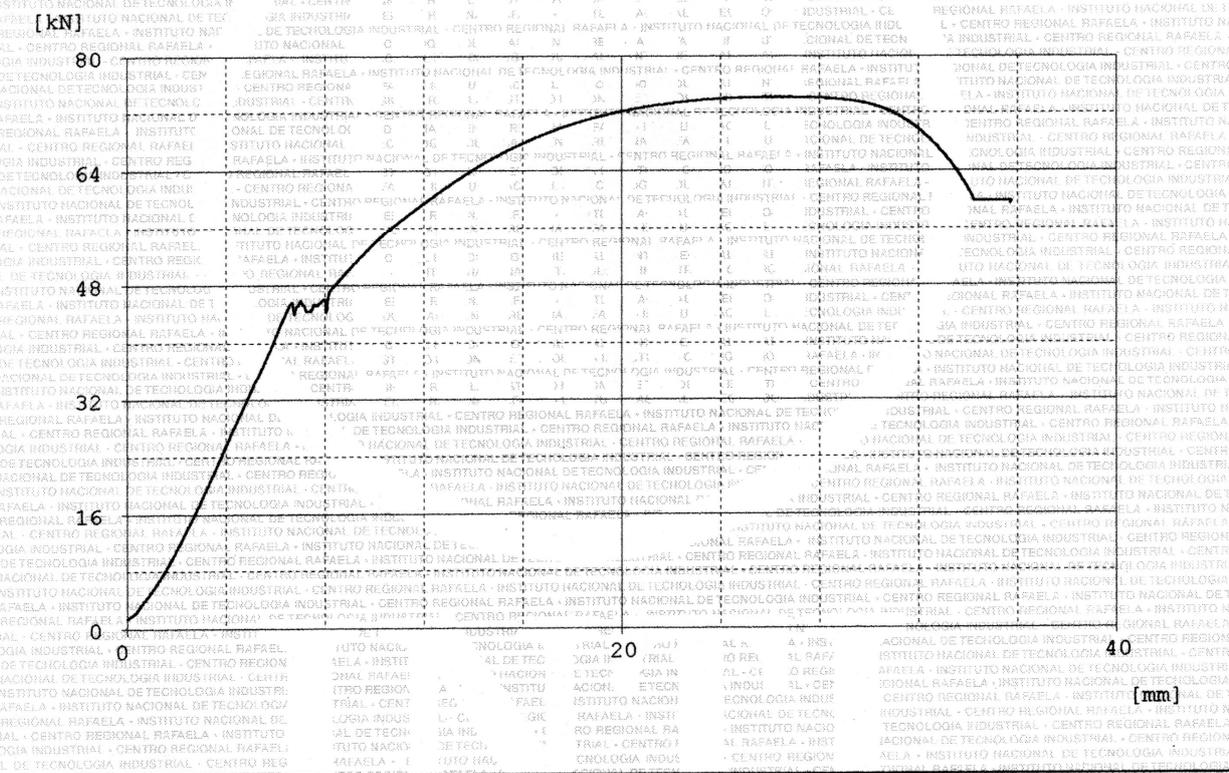
Fecha Rec.: 17/08/2004
 Fecha Ens.: 17/08/2004
 Temperat.: 18°C
 Vel. Ensayo: 10 MPa/s

Shape: Rod
 Diameter: 12.54

Gauge Length: 62.50

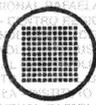
Name: D-2513

Remarks:



Calc. CP1, CP2 CP Unit Pass-Fail Unit	Máxima Carga [kN]	Máxima Tensión [MPa]	LASE1-Stress [MPa]	Alarg. Rotura [mm]
D-2513	74.20	601.	370.	28.6

Los resultados consignados se refieren exclusivamente a la muestra recibida, e INTI y el CEMRAF declinan toda responsabilidad por el uso indebido o incorrecto que se hiciera de este informe. Está prohibida la reproducción parcial del mismo.

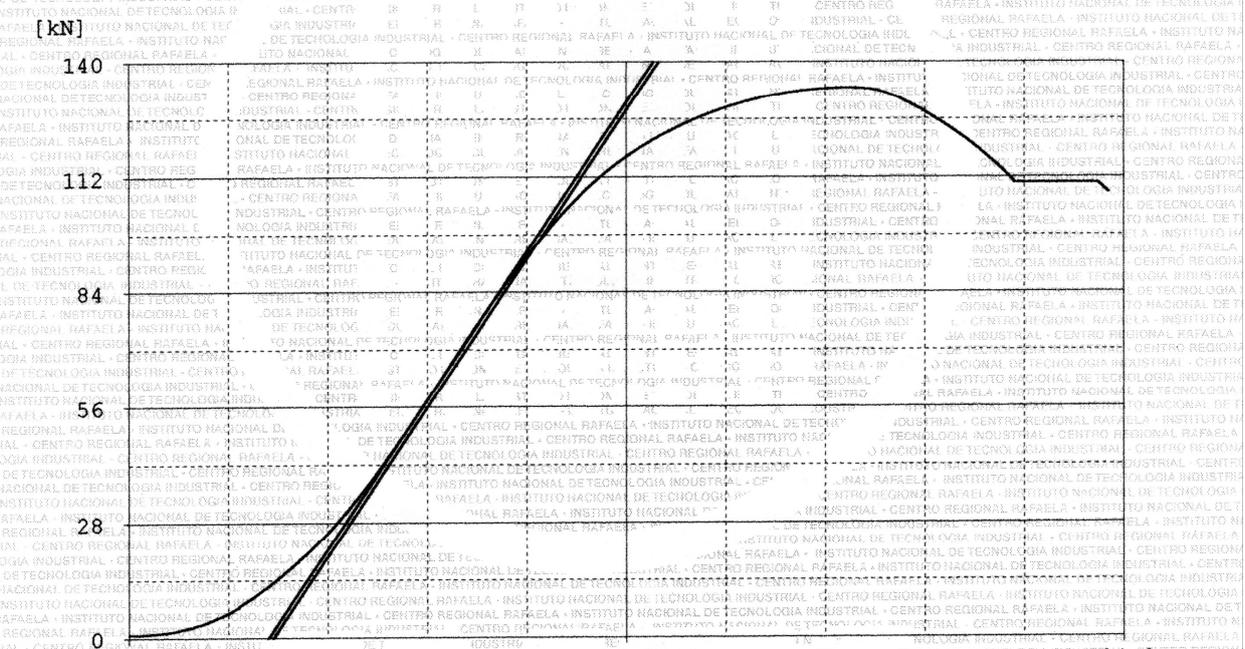


Ensayo de Tracción - E.E.T. N° 455

Materiales metálicos - Acero IRAM 4140

Fecha Rec.: 17/08/2004
 Fecha Ens.: 17/08/2004
 Temperat.: 18°C
 Vel. Ensayo: 5 MPa/s

Shape: Rod
 Diameter: 12.51
 Gauge Length: 62.50
 Name: D-2510
 Remarks:



Force [kN]	Displacement [mm]
140	12.0
112	12.0
84	12.0
56	12.0
28	12.0
0	24.0

Calc.	Máxima Carga	Tensión Rp 0,2	Alarg. Rotura
CP1, CP2	[kN]	[MPa]	[mm]
CP Unit	133.50	1087	12.6
Pass-Fail			
Unit			
D-2510	133.50	1087	12.6

Los resultados consignados se refieren exclusivamente a la muestra recibida, el INTI y el CEMRAF declinan toda responsabilidad por el uso indebido o incorrecto que se hiciera de este informe. Está prohibida la reproducción parcial del mismo.



Ensayo de Tracción - E.E.T. N° 455

Aluminio

Fecha Rec.: 17/08/2004

Fecha Ens.: 17/08/2004

Temperat.: 18°C

Vel. Ensayo: 5 MPa/s

Shape: Rod

Diameter: 12.56

Gauge Length: 62.50

Name: D-2509

Remarks:

[kN]

10

8

6

4

2

0.0

Calc. CP1, CP2

CP Unit

Pass-Fail

Unit

D-2509

Máxima Carga

Máxima Tensión

[kN]

[MPa]

9.10

73.

4.0

[mm]

Los resultados consignados se refieren exclusivamente a la muestra recibida, el INTI y el CEMRAF declinan toda responsabilidad por el uso indebido o incorrecto que se hiciera de este informe. Está prohibida la reproducción parcial del mismo.



Soporte para Probetas de un ensayo de impacto Charpy

El ensayo de impacto consiste en dejar caer un pesado péndulo, con una masa de 30 kg, situado a una altura de 1,00 m sobre la probeta a ensayar. En realidad se busca disponer de una energía inicial de 30 kgm o 294 Joules. Este péndulo a su paso golpea la probeta que tiene forma paralelepípeda ubicada en la base de la máquina.

La probeta posee un entalle estándar para facilitar el inicio de la fisura; este entalle recibe el nombre de V-Notch. Luego de golpear la probeta, el péndulo sigue su camino alcanzando una cierta altura que depende de la cantidad de energía disipada al golpear. Las probetas que fallan en forma frágil se rompen en dos mitades, en cambio aquellas con mayor ductilidad se doblan sin romperse. Este comportamiento es muy dependiente de la temperatura y la composición química, esto obliga a realizar el ensayo con probetas a distinta temperatura, para evaluar la existencia de una "temperatura de transición dúctil-frágil". Este ensayo se lleva a un gráfico como el mostrado en la Figura 3 en donde se puede apreciar un fuerte cambio en la energía disipada para algunos aceros de bajo carbono. Mientras que el níquel no muestra una variación notable.

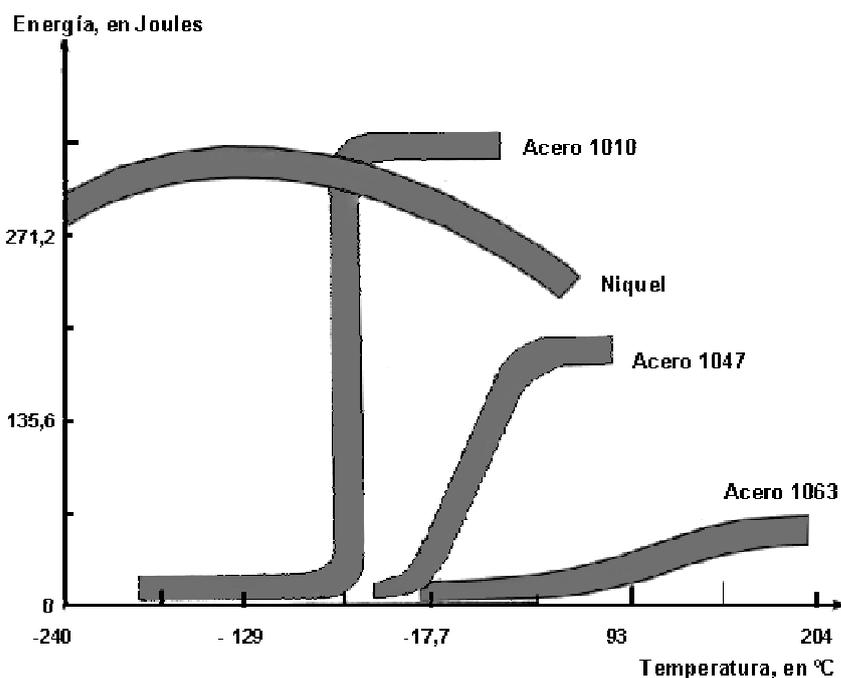


Figura 3 Resultados de pruebas de impacto para varias aleaciones, medidos a través de un intervalo de temperatura.

La **resiliencia** es la magnitud que cuantifica la cantidad de energía que un material (p.ej. acero) puede absorber al romperse por efecto de un impacto, por unidad de superficie de rotura.

Para los materiales sometidos a impactos o variaciones bruscas de cargas, que pueden aparecer circunstancialmente, la falla se produce por lo general, por no aceptar deformaciones plásticas o por fragilidad, aun en metales dúctiles. En estos casos conviene analizar el comportamiento del material en experiencias de choque o impacto.

Los ensayos de choque determinan, pues, la fragilidad o capacidad de un material para absorber cargas instantáneas, por el trabajo necesario para introducir la fractura de la probeta de un solo choque, referido a la unidad de área, para obtener la llamada **resiliencia**.

Con este concepto no se consigue una propiedad definida del material, sino que se obtiene un índice comparativo de su plasticidad, en relación a las obtenidas en otros ensayos realizados en idénticas condiciones, por lo que deben considerarse los diferentes factores que inciden sobre ella. La resiliencia se diferencia de la tenacidad en que esta última cuantifica la cantidad de energía absorbida por unidad de superficie de rotura bajo la acción de un esfuerzo progresivo, y no por impacto.

La tenacidad corresponde al área bajo la curva de un ensayo de tracción entre la deformación nula y la deformación correspondiente al límite de rotura (resistencia última a la tracción). La resiliencia es la capacidad de absorber energía en el periodo elástico, y corresponde al área bajo la curva del ensayo de tracción entre la deformación nula y el límite de fluencia.

Medición de la Resiliencia de un Material

La **Resiliencia** de un material se mide mediante ensayo por el *Método Izod* o el *Péndulo de Charpy*, dando como resultado un valor indicativo de la fragilidad o la resistencia a los choques del material ensayado.

Un grado alto de resiliencia es característico de los aceros austeníticos (aceros con alto contenido de austenita).

En aceros al carbono, los aceros dulces (con menor contenido de carbono), tienen una mayor resiliencia que los aceros duros.

Unidad de Medida

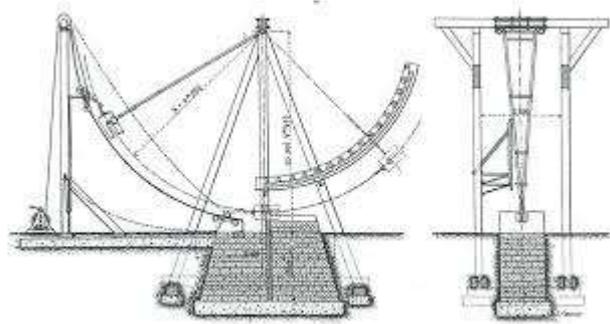
La **Resiliencia** se expresa en Joules por metro cuadrado: **J/m²** (Según Sistema Internacional de Unidades).

Otra unidad muy empleada en Ingeniería, es **kgf·m/cm²**; o kilopond-metro por centímetro cuadrado: **kp·m/cm²**

El ensayo lleva el nombre de George Augustin Charpy, ingeniero francés (1865-1945) que fue su creador



George A. Charpy

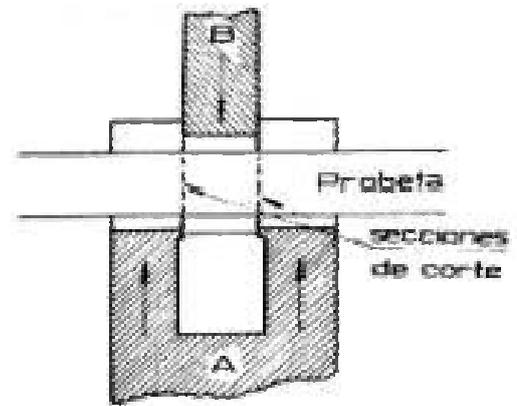


Original de la máquina de ensayo creada por Edwin Gilbert Izod, ingeniero inglés que se desempeñaba en Williams & Robinson Limited, empresa dedicada a la fabricación de turbinas a vapor. El desarrollo de esta máquina de ensayos data de 1905 cuando Izod era jefe de ingeniería de la empresa.

ENSAYO DE CORTE

El dispositivo utilizado (foto) se acopla a la máquina universal de ensayos. El cilindro baja y empuja la cuchilla B de la figura. La probeta a ensayar está sostenida por la pieza A de la misma figura.

Se mide la fuerza aplicada para lograr la rotura de la pieza.



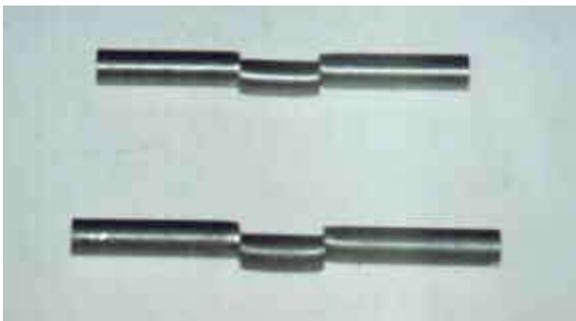
Probeta ensayada al esfuerzo de corte

Como la pieza cortante o cuchilla, va haciendo el corte de la probeta en dos secciones la tensión de corte se obtiene según la expresión:

$$\tau = P_{\text{Máx}} / 2.S_0 \text{ (kgf/cm}^2 \text{ o bien en MPa)}$$

Donde S_0 es el área inicial de la sección de la probeta y $P_{\text{Máx}}$ es la fuerza necesaria para la rotura.

La probeta se va deformando según se ve en la foto



Probeta ensayada al esfuerzo de corte

ENSAYOS DE DUREZA

INTRODUCCIÓN

La dureza es una condición de la superficie del material, no representa ninguna propiedad de la materia y está relacionada con las propiedades elásticas y plásticas del material. Si bien, es un término que nos da idea de solidez o firmeza, no existe una definición única acerca la dureza y se la suele definir arbitrariamente en relación al método particular que se utiliza para la determinación de su valor. De esta manera, algunas definiciones son

1. Resistencia a la indentación permanente bajo cargas estáticas o dinámicas (dureza por penetración)
2. Absorción de energía bajo cargas de impacto o dinámicas (dureza por rebote)
3. Resistencia a la abrasión (dureza por desgaste)
4. Resistencia al rayado (dureza por rayado).

Independientemente de las definiciones enumeradas, en general, se entiende por dureza la propiedad que tienen los materiales de resistir la penetración de un indentador bajo carga. En este sentido definiremos dureza como la resistencia de un material a la deformación plástica localizada.

Los diferentes métodos desarrollados para medir la dureza en general consisten en producir una deformación local, en el material que se ensaya, a través de un indentador.

Los valores obtenidos son siempre dependientes del método y las condiciones en las que se ensaya por lo que para que un valor de dureza sea útil y permita su comparación debe estar acompañado de la indicación del método utilizado y las condiciones del ensayo.

Los diferentes métodos utilizados para obtener los valores de dureza se pueden clasificar en dos grandes grupos según la forma de aplicación de la carga:

- Ensayos estáticos en los que la carga se aplica en forma estática o cuasi-estática. En este caso un indentador se presiona contra la superficie de ensayo con una carga que se aplica en forma relativamente lenta. En general la medida de dureza en este tipo de ensayo resulta del cociente de la carga aplicada y el área de la huella que deja el indentador en la superficie, como es el caso de los métodos Brinell, Vickers y Knoop, o bien es una medida de la profundidad de la indentación como en el ensayo Rockwell.
- Ensayos dinámicos en los que la carga se aplica en forma de impacto. En general el indentador es lanzado sobre la superficie a ensayar con energía conocida y el valor de dureza se obtiene a partir de la energía de rebote del penetrador luego de impactar en la muestra, como sucede en el método de Shore y en el de Leeb, ambos conocidos como métodos de dureza por rebote. Si bien se pueden clasificar en este grupo métodos como el de Poldi, o uno mucho más moderno como el UCI Ultrasonic Contact Impedance, los de rebote son los más representativos de los ensayos dinámicos de dureza. En los ensayos dinámicos los resultados obtenidos son dependientes de las propiedades elásticas del material que se ensaya y en general los valores son comparables entre materiales en los que dichas propiedades son iguales, o bien se requiere la calibración del instrumento antes de ensayar un material cuyo módulo elástico es desconocido.

En general se mide dureza cuando se ha establecido una correlación entre la dureza y alguna otra propiedad del material, como por ejemplo la resistencia a la abrasión o al desgaste, la resistencia a la tracción, etc. Sin embargo debe advertirse que dichas correlaciones son aplicables en forma muy cuidadosa sobre un rango acotado de materiales sobre los cuales se conoce, empíricamente, las condiciones en que se cumple la relación entre la propiedad buscada y el valor de la dureza.

En general se puede utilizar la medición de dureza para:

- evaluar la efectividad de un tratamiento térmico.
- evaluar la resistencia al desgaste de un material
- evaluar la maquinabilidad del material.
- obtener una idea de la resistencia a la tracción de un material.

Los ensayos de dureza son junto con el tracción son los más utilizados en la selección y control de calidad de los materiales.

El empleo de los ensayos de dureza como instrumento de clasificación y control de calidad en las líneas de producción ha sido favorecido gracias a la automatización de los ciclos de medición de los métodos tradicionales tales como el Rockwell o el Brinell. En este sentido existen aparatos que permiten ciclos automáticos de medición muy rápidos en los que prácticamente no se requiere la intervención del operador. Además el avance de la microelectrónica y el software embebido han permitido el desarrollo de instrumentos medidores de dureza portátiles muy fáciles y rápidos de utilizar, que permiten la medición de piezas y lugares en los que los métodos tradicionales no son aplicables.

DUREZA BRINELL

El ensayo de dureza Brinell consiste en presionar la superficie del material a ensayar con una bolilla de acero muy duro o carburo de tungsteno, produciéndose la impresión de un casquete esférico correspondiente a la porción de la esfera que penetra Fig. 1. Este ensayo se debe al trabajo del ingeniero sueco Johan August Brinell quien lo desarrolló en el año 1900

El valor de dureza, número de Brinell HB, resulta de dividir la carga aplicada P por la superficie del casquete, por lo que:

$$H_B = \frac{P}{\pi D h} \left[\frac{kg}{mm^2} \right] \quad [1]$$

La profundidad h del casquete impreso se mide directamente en la máquina, mientras la carga se mantiene aplicada de modo de asegurar un buen contacto entre la bolilla y el material.

Otra manera de determinar el número HB es partiendo del diámetro d de la impresión lo cual tiene la ventaja de que se pueden efectuar tantas mediciones como se estimen necesarias y en microscopios o aparatos especialmente diseñados para tal fin.

En este caso el valor del diámetro de la impresión resultará del promedio de dos lecturas realizadas a 90° entre sí. Considerando que

$$h = \frac{D}{2} - \alpha = \frac{D}{2} - \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} \quad [2]$$

Reemplazando la Ecuación 2 en la Ecuación 1 se obtiene una expresión para el número de Brinell en función del diámetro de la huella

$$HB = \frac{2P}{\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)} \quad [3]$$

En la práctica el número de Brinell se puede tomar directamente de una tabla ingresando con el valor del diámetro de la impronta.

En algunos materiales la penetración de la bolilla origina una craterización Fig. 2.a y en otros una depresión Fig. 2.b.

En estos casos los valores obtenidos a partir de la medición de h no coinciden con los obtenidos en función de d , ya que la profundidad h medida no corresponde al casquete cuyo diámetro es d , sino al de diámetro d_1 , cuya determinación exacta en forma práctica es dificultosa. Por todo esto se ha generalizado la determinación de HB a partir de d , ya que ofrece mayor seguridad de una determinación correcta. Ya sea en la, determinación de h o en la de d , se requiere una precisión mínima de 0,01mm.

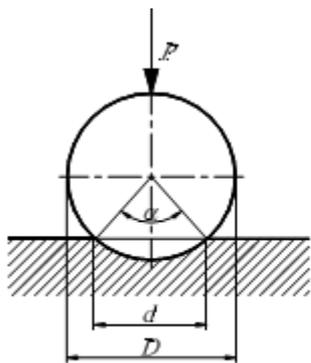


Figura 1. Esquema básico de un ensayo de dureza Brinell

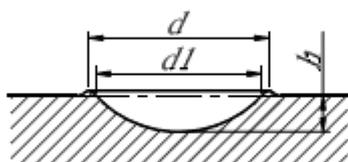


Figura 2.a. Craterización en la indentación

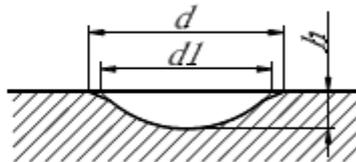


Figura 2.b Depresión en la indentación

Puede resultar conveniente obtener el valor de dureza a partir de la penetración h mediada durante el ensayo y luego comparar este valor con el que resulta de las mediciones de d . En caso que los resultados sean muy disímiles, el operador deberá decidir acerca de cuál método es el que el arroja el resultado más exacto, en base a su experiencia y al conocimiento del equipamiento utilizado. Algunos durómetros modernos están dotados de sistemas electrónicos encargados de producir la indentación y determinar el valor de dureza automáticamente. Estos sistemas proveen el valor de dureza en forma directa, sin necesidad de realizar mediciones ni utilizar tablas. La determinación automática de la dureza se puede hacer de dos maneras: a través de sensores electrónicos que miden directamente la profundidad de penetración h , o bien mediante la determinación de las dimensiones de la huella a través de un microscopio de 20X o 40X incorporado en el aparato. Estos sistemas automáticos permiten ciclos de medición muy rápidos, lo que los hace aptos para formar parte de una línea de producción en la que se requiere medir dureza en un alto número de piezas.

PENETRADORES

Como penetrador normal del método Brinell puede considerarse la bolilla de 10 mm de acero muy duro $HB = 630$ pudiendo emplearse, en probetas de menor espesor, penetradores de 5 y 2,5 mm, aceptándose en cualquier caso una tolerancia de $\pm 0,005D$.

También se emplean penetradores de 1,25 y 0,625 mm de carburo de tungsteno que permiten ensayar materiales más duros, aunque los ensayos no son comparables con los realizados con los otros tipos de bolillas.

Existen diversos criterios para determinar la bolilla a utilizar en un ensayo. Las normas IRAM especifican que en ningún caso se ensayarán probetas cuyo espesor sea menor que el diámetro del penetrador D , mientras que las ASTM indican que no debe ser menor de 10 veces la profundidad de penetración.

La norma ASTM especifica la dureza mínima requerida para satisfacer la condición $e < 10h$ para un espesor de probeta determinado y distintas condiciones de carga, como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Relaciones entre dureza, espesor de la probeta y carga a aplicar

Espesor de la probeta e [pulgadas]	Dureza Brinell mínima para la cual un ensayo Brinell puede ofrecer seguridad		
	Carga de 500 kg	Carga de 1500 kg	Carga de 3000 kg
1/16	100	301	602
1/8	50	150	301
3/16	33	100	201
¼	25	75	150
5/16	20	60	120
3/8	17	50	100

Según ASTM E10 [2]

En la tabla 4 se expresa un criterio algo más práctico, que permite seleccionar el diámetro de la bolilla en función del espesor de la probeta.

Tabla 4: Criterio para seleccionar el diámetro del penetrador

Espesor de la probeta e [mm]	$e > 6$	$3 < e < 6$	$e < 3$
Diámetro de la bolilla D [mm]	10	5	2,5

Cargas empleadas

De acuerdo a las normas ASTM las cargas estándar son las de 3000, 1500 y 500 kg, por lo que considerando que el penetrador normal es el de 10 mm, la relación $0,25D < d < 0,5D$ se cumple para metales cuya dureza Brinell se encuentra comprendida entre los valores indicados en la tabla 5.

Tabla 5. Valores de C según los criterios de la norma ASTM E10

Bolilla Ø10 mm	Carga 3000 kg para durezas de 160 a 600
	Carga 1500 kg para durezas de 80 a 300
	Carga 500 kg para durezas de 26 a 100

Por otra parte, de acuerdo con los distintos diámetros de los penetradores y constantes de ensayo, tomadas en base a la naturaleza del material, se han confeccionado tablas como la tabla 6 que permite conocer directamente la carga a emplear para cada material y espesor de probeta.

Tabla 6. Carga en función del \varnothing penetrador y la naturaleza del material a ensayar

Diámetro de la bolilla [mm]	Materiales, Constantes de Ensayo y Cargas [kg]			
	Aceros y fundición $C = 30$	Aleaciones de Cu y Al $C = 10$	Cobre y aluminio $C = 5$	Plomo, estaño y aleaciones $C = 2,5$
10	3000	1000	500	250
5	750	250	125	62,5
2,5	187,5	62,5	31,2	15,6
1,25	46,9	15,6	7,81	3,91
0,625	11,7	3,91	1,953	0,977

Notar que para cada una de las combinaciones posibles se cumple $C = P/D^2$

Valores típicos de durezas Brinell

- Acero (blando): 125 HB
- Acero de herramientas: 500 HB
- Acero inoxidable: 250 HB
- Aluminio: 100 HB
- Cobre: 80 HB
- Madera: entre 1 HB y 7 HB
- Vidrio: 482 HB

Tiempo de aplicación de la carga

En ensayos normales la carga máxima se alcanza en un lapso de 15 s y se mantiene, al menos, durante otros 15 s para aceros y 30 s para metales más dúctiles.

Sin embargo a menudo la carga máxima se retiene durante un intervalo de 30 s para los metales ferrosos y un intervalo de 60 s para los otros metales. Los aparatos de ciclo automático permiten realizar ensayos a alta velocidad, por lo que el tiempo de transición de la carga y el tiempo en que se retiene la misma pueden ser mucho menores a los mencionados. Sin embargo, estos tiempos tienen influencia en el valor de dureza obtenido. Si la velocidad de aplicación de la carga es muy alta, es decir el tiempo de crecimiento de la carga es muy corto, se puede producir una sobrecarga (la carga sobrepasa el valor de ensayo antes de estabilizarse) que producirá una huella de mayor diámetro. Por otro lado si el tiempo que se retiene la carga es insuficiente para que el material complete el flujo plástico, el tamaño de la huella será menor. En este sentido se ha observado que para la mayoría de los materiales el flujo plástico es rápido en los primeros 30 s, siendo bastante más lento en el intervalo de 30 a 120 s

Indicación del valor de dureza

La indicación del valor de dureza Brinell debe ir acompañado de la indicación de las condiciones de ensayo tales como diámetro del penetrador, carga aplicada y tiempo de aplicación, de la siguiente manera

$$HB_{\text{param1} / \text{param2} / \text{param3}} = \begin{cases} HB = \text{dureza Brinell} \\ \text{parametro1} = \text{diametro de la bolilla } D \text{ [mm]} \\ \text{parametro2} = c \text{ arg a aplicada } P \text{ [kg]} \\ \text{parametro3} = \text{tiempo de aplicacion de la } c \text{ arg a } [s] \end{cases}$$

Para distinguir los ensayos que utilizan penetrador de acero de los que utilizan penetrador de carburo de tungsteno se suele indicar con HBS a los primeros y con HBW a los segundos.

Consideraciones

Para tener una buena medición es conveniente contemplar las siguientes recomendaciones:

- Las caras de la probeta deben ser lo más planas y paralelas posible; deben estar pulidas y durante su preparación se debe evitar cualquier tipo de calentamiento que pueda introducir tensiones.
- La carga debe actuar en forma normal a la cara de la probeta, la cual no deberá moverse durante el ensayo.
- El centro de la impresión debe distar al menos $2d$ del borde la probeta y $3d$ de otra impresión, para evitar así los efectos del endurecimiento localizado producido en las adyacencias de la penetración.
- Luego del ensayo no deben quedar marcas en la cara opuesta de la probeta.
- Si la pieza a ensayar presenta una superficie curva la impresión no será circular, por esta razón el radio de curvatura no debe ser inferior a los 25 mm y el diámetro d puede tomarse como el promedio de mediciones en varias direcciones.
- Si las propiedades de una probeta plana no son uniformes debido a la dirección de rolado o la a los esfuerzos inducidos por el enfriamiento, resultará una huella no circular, en este caso el valor de dureza Brinell puede obtenerse a partir del diámetro d que resulta del promedio de 4 mediciones a 45°

Alcance y aplicabilidad del método Brinell

Para materiales cuya dureza Brinell es superior a los 400 se recomienda utilizar penetradores duros (de carburos metálicos). A partir de estos valores de dureza la deformación en el penetrador comienza a ser importante, y esta debe ser menor de $\pm 0,005D$. Por esta razón el empleo de este método está limitado a una dureza máxima de $HB = 600$. De esta manera se puede decir que a partir de los 400 Brinell es recomendable determinar la dureza a través de métodos como el Rockwell o Vickers. Por último es claro que el método no es aplicable a piezas de espesor delgado ya que la penetración usual puede ser mayor que dicho espesor. Tampoco es aplicable a superficies cementadas, nitruradas, o recubiertas ya que la profundidad de penetración puede ser mayor al espesor que alcanza el tratamiento en la superficie. Es un método conveniente en materiales poco homogéneos tales como las fundiciones materiales de grano grueso y piezas forjadas, debido a que el tamaño de la impronta permite obtener un mejor promedio de la dureza en la zona. Además si se utiliza la profundidad h de la impronta para la determinación de la dureza, la superficie a ensayar no requiere demasiada preparación. Como regla general: cuanto mayor es la huella menor es el requerimiento de preparación superficial

CUADRO 7.7. Tabla de dureza Brinell

Diámetro de la impresión d_{10} : ó $2 \times d_2$ ó $4 \times d_{2,5}$	Dureza Brinell, para P (kg) =				Diámetro de la impresión d_{10} : ó $2 \times d_2$ ó $4 \times d_{2,5}$	Dureza Brinell, para P (kg) =			
	$30 D^2$	$10 D^2$	$5 D^2$	$2,5 D^2$		$30 D^2$	$10 D^2$	$5 D^2$	$2,5 D^2$
2,00	945	315	158	79	2,45	627	209	101	52
2,01	936	312	156	78	2,46	621	207	104	52
2,02	926	309	154	77	2,47	616	205	103	51
2,03	917	306	153	76	2,48	611	204	102	51
2,04	908	303	151	76	2,49	606	202	101	51
2,05	899	300	150	75	2,50	601	200	100	50
2,06	890	297	148	74	2,51	597	199	99	50
2,07	882	294	147	73	2,52	592	197	99	49
2,08	873	291	146	73	2,53	587	196	98	49
2,09	865	288	144	72	2,54	582	194	97	49
2,10	856	285	143	71	2,55	578	193	96	48
2,11	848	283	141	71	2,56	573	191	96	48
2,12	840	280	140	70	2,57	569	190	95	47
2,13	832	277	139	69	2,58	564	188	94	47
2,14	824	275	137	69	2,59	560	187	93	47
2,15	817	272	136	68	2,60	555	185	93	46
2,16	809	272	135	67	2,60	551	184	92	46
2,17	802	267	134	67	2,62	547	182	91	46
2,18	794	265	132	66	2,63	543	181	90	45
2,19	787	262	131	66	2,64	538	179	90	45
2,20	780	260	130	65	2,65	534	178	89	45
2,21	772	257	129	64	2,66	530	177	88	44
2,22	765	255	128	64	2,67	526	175	88	44
2,23	758	253	126	63	2,68	522	174	87	43
2,24	752	251	125	63	2,69	518	173	86	43
2,25	745	248	124	62	2,70	514	171	86	43
2,26	738	246	123	62	2,71	510	170	85	43
2,27	732	244	122	61	2,72	507	169	84	42
2,28	725	242	121	60	2,73	503	168	84	42
2,29	719	240	120	60	2,74	499	166	83	42
2,30	712	237	119	59	2,75	495	165	83	41
2,31	706	235	118	59	2,76	492	164	82	41
2,32	700	233	117	58	2,77	488	163	81	41
2,33	694	231	116	58	2,78	485	162	81	40
2,34	688	229	115	57	2,79	481	160	80	40
2,35	682	227	114	57	2,80	477	159	80	40
2,36	676	225	113	56	2,81	474	158	79	39
2,37	670	223	112	56	2,82	471	157	78	39
2,38	665	222	111	55	2,83	467	156	78	39
2,39	659	220	110	55	2,84	464	155	77	39
2,40	653	218	109	54	2,85	461	154	77	38
2,41	648	216	108	54	2,86	457	152	76	38
2,42	643	214	107	54	2,87	454	151	76	38
2,43	637	212	106	53	2,88	451	150	75	38
2,44	632	211	105	53	2,89	448	149	75	37

CUADRO 7.8. Tabla de dureza Brinell

Diámetro de la impresión $d_{1,0}$: ó $2 \times d_s$ ó $4 \times d_{2,5}$	Dureza Brinell, para P (kg) =				Diámetro de la impresión $d_{1,0}$: ó $2 \times d_s$ ó $4 \times d_{2,5}$	Dureza Brinell, para P (kg) =			
	$30 D^2$	$10 D^2$	$5 D^2$	$2,5 D^2$		$30 D^2$	$10 D^2$	$5 D^2$	$2,5 D^2$
2,90	444	148	74	37	3,35	331	110	55	28
2,91	441	147	74	37	3,36	329	110	55	27
2,92	438	146	73	37	3,37	326	109	54	27
2,93	435	145	72	36	3,38	325	108	54	27
2,94	432	144	72	36	3,39	323	108	54	27
2,95	429	143	72	36	3,40	321	107	53	27
2,96	426	142	71	36	3,41	319	106	53	27
2,97	423	141	71	35	3,42	317	106	53	26
2,98	420	140	70	35	3,43	315	105	52	26
2,99	417	139	70	35	3,44	313	104	52	26
3,00	415	138	69	35	3,45	311	104	52	26
3,01	412	137	69	34	3,46	309	103	52	26
3,02	409	136	68	34	3,47	307	102	51	26
3,03	406	135	68	34	3,48	306	102	51	25
3,04	404	135	67	34	3,49	304	101	51	25
3,05	401	134	67	33	3,50	302	101	50	25
3,06	398	133	66	33	3,51	300	100	50	25
3,07	395	132	66	33	3,52	298	99	50	24,9
3,08	393	131	65	33	3,53	297	99	49	24,7
3,09	390	130	65	33	3,54	295	98	49	24,6
3,10	388	129	65	32	3,55	293	98	49	24,4
3,11	385	128	64	32	3,56	292	97	49	24,3
3,12	383	128	64	32	3,57	290	97	48	24,2
3,13	380	127	63	32	3,58	288	96	48	24,0
3,14	378	126	63	31	3,59	286	95	48	23,9
3,15	375	125	63	31	3,60	285	95	47	23,7
3,16	373	124	62	31	3,61	283	94	47	23,6
3,17	370	123	62	31	3,62	282	94	47	23,5
3,18	368	123	61	31	3,63	280	93	47	23,3
3,19	366	122	61	30	3,64	278	93	46	23,2
3,20	363	121	61	30	3,65	277	92	46	23,1
3,21	361	120	60	30	3,66	275	92	46	22,9
3,22	359	120	60	30	3,67	274	91	46	22,8
3,23	356	119	59	30	3,68	272	91	45	22,7
3,24	354	119	59	30	3,69	271	90	45	22,6
3,25	352	117	59	29	3,70	269	90	45	22,4
3,26	350	117	58	29	3,71	268	89	45	22,3
3,27	347	116	58	29	3,72	266	89	44	22,2
3,28	345	115	58	29	3,73	265	88	44	22,1
3,29	343	114	57	29	3,74	263	88	44	21,9
3,30	341	114	57	28	3,75	262	87	44	21,8
3,31	339	113	56	28	3,76	260	87	43	21,7
3,32	337	112	56	28	3,77	259	86	43	21,6
3,33	335	112	56	28	3,78	257	86	43	21,5
3,34	333	111	55	28	3,79	256	85	43	21,3

CUADRO 7.9. Tabla de dureza Brinell

Diámetro de la impresión d_{10} : ó $2 \times d_5$ ó $4 \times d_{2,5}$	Dureza Brinell, para P (kg) =				Diámetro de la impresión d_{10} : ó $2 \times d_5$ ó $4 \times d_{2,5}$	Dureza Brinell, para P (kg) =			
	$30 D^3$	$10 D^3$	$5 D^3$	$2,5 D^3$		$30 D^2$	$10 D^2$	$5 D^2$	$2,5 D^2$
3,80	255	85	42	21,2	4,25	201	67	34	16,8
3,81	253	84	42	21,1	4,26	200	67	33	16,7
3,82	252	84	42	21,0	4,27	199	66	33	16,6
3,83	250	83	42	20,9	4,28	198	66	33	16,5
3,84	249	83	42	20,8	4,29	198	66	33	16,5
3,85	248	83	41	20,6	4,30	197	66	33	16,4
3,86	246	82	41	20,5	4,31	196	65	33	16,3
3,87	245	82	41	20,4	4,32	195	65	32	16,2
3,88	244	81	41	20,3	4,33	194	65	32	16,1
3,89	242	81	40	20,2	4,34	193	64	32	16,1
3,90	241	80	40	20,1	4,35	192	64	32	16,0
3,91	240	80	40	20,0	4,36	191	64	32	15,9
3,92	239	80	40	19,9	4,37	190	63	32	15,8
3,93	237	79	40	19,8	4,38	189	63	32	15,8
3,94	236	79	39	19,7	4,39	188	63	31	15,7
3,95	235	78	39	19,6	4,40	187	62	31	15,6
3,96	234	78	39	19,5	4,41	186	62	31	15,5
3,97	232	77	39	19,4	4,42	185	62	31	15,5
3,98	231	77	39	19,3	4,43	185	62	31	15,4
3,99	230	77	38	19,2	4,44	184	61	31	15,3
4,00	229	76	38	19,1	4,45	183	61	30	15,2
4,01	228	76	38	19,0	4,46	182	61	30	15,2
4,02	226	75	38	18,9	4,47	181	60	30	15,1
4,03	225	75	38	18,8	4,48	180	60	30	15,0
4,04	224	75	37	18,7	4,49	179	60	30	15,0
4,05	223	74	37	18,6	4,50	179	60	30	14,9
4,06	222	74	37	18,5	4,51	178	59	30	14,8
4,07	221	74	37	18,4	4,52	177	59	29	14,7
4,08	219	73	37	18,3	4,53	176	59	29	14,7
4,09	218	73	36	18,2	4,54	175	58	29	14,6
4,10	217	72	36	18,1	4,55	174	58	29	14,5
4,11	216	72	36	18,0	4,56	174	58	29	14,5
4,12	215	72	36	17,9	4,57	173	58	29	14,4
4,13	214	71	36	17,8	4,58	172	57	29	14,3
4,14	213	71	35	17,7	4,59	171	57	29	14,3
4,15	212	71	35	17,6	4,60	170	57	28	14,2
4,16	211	70	35	17,6	4,61	170	57	28	14,1
4,17	210	70	35	17,5	4,62	169	56	28	14,1
4,18	209	70	35	17,4	4,63	168	56	28	14,0
4,19	208	69	35	17,3	4,64	167	56	28	13,9
4,20	207	69	34	17,2	4,65	167	56	28	13,9
4,21	205	68	34	17,1	4,66	166	55	28	13,8
4,22	204	68	34	17,0	4,67	165	55	28	13,8
4,23	203	68	34	17,0	4,68	164	55	27	13,7
4,24	202	67	34	16,9	4,69	164	55	27	13,6

CUADRO 7.10. Tabla de dureza Brinell

Diámetro de la impresión $d_{1,0} \hat{=} 2 \times d_2$ ó $4 \times d_{1,1}$	Dureza Brinell, para P (kg) =				Diámetro de la impresión $d_{1,0} \hat{=} 2 \times d_2$ ó $d_{2,1} \hat{=} 4$	Dureza Brinell, para P (kg) =			
	$30 D^2$	$10 D^2$	$5 D^2$	$2,5 D^2$		$30 D_2$	$10 D_2$	$5 D_2$	$2,5 D_2$
4,70	163	54	27	13,6	5,10	137	46	22,8	11,4
4,71	162	54	27	13,5	5,11	136	45	22,7	11,3
4,72	161	54	27	13,5	5,12	135	45	22,6	11,3
4,73	161	54	27	13,4	5,13	135	45	22,5	11,2
4,74	160	53	27	13,3	5,14	134	45	22,4	11,2
4,75	159	53	27	13,3	5,15	134	45	22,3	11,2
4,76	158	53	26	13,2	5,16	133	44	22,2	11,1
4,77	158	53	26	13,1	5,17	133	44	21,1	11,1
4,78	157	52	26	13,1	5,18	132	44	22,0	11,0
4,79	156	52	26	13,0	5,19	132	44	21,9	11,0
4,80	156	52	26	13,0	5,20	131	44	21,8	10,9
4,81	155	52	26	12,9	5,21	130	43	21,7	10,9
4,82	154	51	26	12,9	5,22	130	43	21,6	10,8
4,83	154	51	26	12,8	5,23	129	43	21,6	10,8
4,84	153	51	26	12,7	5,24	129	43	21,5	10,7
4,85	152	51	25	12,7	5,25	128	43	21,4	10,7
4,86	152	51	25	12,6	2,26	128	43	21,3	10,6
4,87	151	50	25	12,6	5,27	127	42	21,2	10,6
4,88	150	50	25	12,5	5,28	127	42	21,1	10,6
4,89	150	50	24,9	12,5	5,29	126	42	21,0	10,5
4,90	149	50	24,8	12,4	5,30	126	42	20,9	10,5
4,91	148	49	24,7	12,4	5,31	125	42	20,9	10,4
4,92	148	49	24,6	12,3	5,32	125	42	20,8	10,4
4,93	147	49	24,5	12,2	5,33	124	41	20,7	10,3
4,94	146	49	24,4	12,2	5,34	124	41	20,6	10,3
4,95	146	49	24,3	12,1	5,35	123	41	20,5	10,3
4,96	145	48	24,2	12,1	5,36	123	41	20,4	10,2
4,97	144	48	24,1	12,0	5,37	122	41	20,3	10,2
4,98	144	48	24,0	12,0	5,38	122	41	20,3	10,1
4,99	143	48	23,9	11,9	5,39	121	40	20,2	10,1
5,00	143	48	23,8	11,9	5,40	121	40	20,1	10,1
5,01	142	47	23,7	11,8	5,41	120	40	20,0	10,0
5,02	141	47	23,6	11,8	5,42	120	40	19,9	9,97
5,03	141	47	23,5	11,7	5,43	119	40	19,9	9,94
5,04	140	47	23,4	11,7	5,44	119	40	19,8	9,90
5,05	140	47	23,3	11,6	5,45	118	39	19,7	9,86
5,06	139	46	23,2	11,6	5,46	118	39	19,6	9,82
5,07	138	46	23,1	11,5	5,47	117	39	19,5	9,78
5,08	138	46	23,0	11,5	5,48	117	39	19,5	9,73
5,09	137	46	22,9	11,4	5,49	116	39	19,4	9,70

Dureza Brinell de Taller o Método de Poldi

El aparato Brinell portátil se basa en el mismo criterio que el Brinell ya visto, con la diferencia que la carga en este caso se aplica en forma dinámica a través de un golpe con martillo como se indica en la figura.

El aparato se compone de un cilindro hueco en cuya parte inferior se encuentra la bolilla y en su parte superior se encuentra el percutor, que al ser golpeado le transmite la carga al cubo patrón de dureza conocida y este a la bolilla que provoca la impresión sobre el material. Por efecto del golpe el penetrador produce dos impresiones, una en el material a ensayar y otra en el cubo patrón. A partir de los diámetros de ambas improntas y mediante tablas que acompañan al aparato se puede determinar la dureza.

Utilizando la fórmula de Brinell y dado que la carga que actúa sobre el elemento patrón es la misma que actúa sobre la superficie a ensayar, la dureza de la pieza a ensayar resulta:

$$HB_p = HB_v \frac{D - \sqrt{D^2 - d_v^2}}{D - \sqrt{D^2 - d_p^2}}$$

Donde HB_v es la dureza del cubo patrón, d_v es el diámetro de la impronta en el cubo patrón y d_p el diámetro de la impronta en la pieza. De esta manera queda probado que aunque la carga puede variar de un ensayo a otro, debido al modo de aplicación, el valor de dureza es independiente de la misma.

La gran diferencia que existe entre la dureza Brinell convencional y la Brinell de taller es el modo de aplicación de la carga. En la dureza Brinell convencional la carga se aplica en forma estática, es decir en forma comparativamente lenta respecto del método Brinell de taller, lo que da lugar a un mayor flujo plástico en el material.

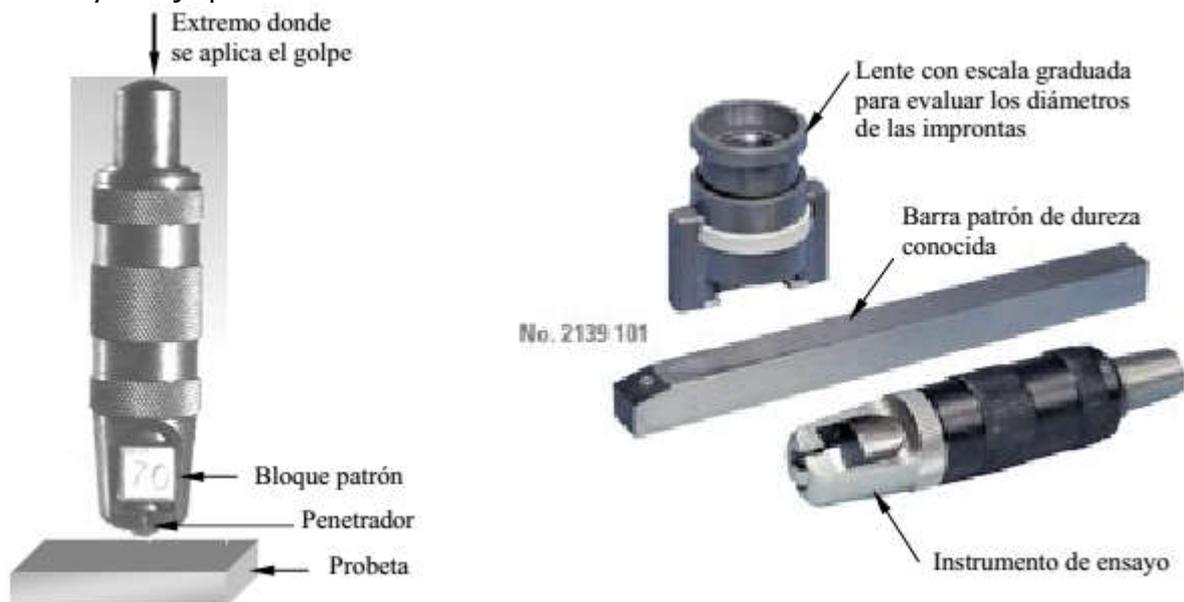


Figura 21. Dispositivo para ensayo de dureza Poldi

DUREZA VICKERS

La determinación de la dureza Vickers es similar a la Brinell ya que se obtiene del cociente de la carga aplicada por la superficie de la impronta. Sin embargo en este caso se utiliza una carga pequeña y el penetrador es un diamante en forma de pirámide, como se muestra en la Fig 9.

De esta manera el valor de dureza Vickers resulta:

$$HV = \frac{P}{8l^2} 2 \operatorname{sen}\left(\frac{136}{2}\right)$$

Dado que $l^2 = \frac{1}{2}d^2$ se puede obtener una expresión en función de la diagonal d , la cual resulta:

$$HV = \frac{1,854 P}{d^2}$$

También es posible expresar el número Vickers en función de la profundidad de penetración h de la siguiente manera

$$HV = \frac{P}{4h^2 \tan\left(\frac{136}{2}\right) \sqrt{1 + \tan^2\left(\frac{136}{2}\right)}}$$

Ya sea en la determinación de d o h se requiere una exactitud de 0,001 mm y el valor de d resultará del promedio de ambas diagonales. Las cargas pueden variar de 1 a 100 kg según el espesor y tipo de material. En general las máquinas estándar proveen cargas de 1, 2.5, 5, 10, 20, 30, 50, 100 y 120 kg de las cuales las de 30 y 50 kg son las más usadas. De esta manera para indicar las condiciones de ensayo solo es necesario indicar la carga, así HV30 significa dureza Vickers con una carga de 30 kg.

Coincidencia Vickers – Brinell

El ángulo del penetrador Vickers se adoptó de tal manera que los números Vickers coincidan con los Brinell.

Para relacionar el método Vickers con el Brinell es necesario considerar la condición de semejanza y los límites a partir de los cuales la bolilla no experimenta deformaciones y se obtienen impresiones nítidas. De esta manera resulta una impronta en el que las tangentes a la bola forman un ángulo de 136°, que resulta el ángulo adoptado para la construcción del penetrador piramidal, véase Fig. 10. Sin embargo la coincidencia entre los valores de dureza que arrojan ambos métodos solo se cumple hasta aproximadamente 350 unidades como se ve en tabla 9. Esto se debe a que para valores mayores la deformación que sufre la bolilla utilizada en el ensayo Brinell modifica en parte el valor de dureza obtenido. De aquí se desprende que el ensayo Vickers es más exacto, debido a la menor deformación del penetrador, para durezas que sobrepasan los 500 Brinell.

Consideraciones

En general es necesario seguir las mismas consideraciones mencionadas para los ensayos Brinell y Rockwell, debiendo tenerse especialmente presente que la superficie a ensayar debe estar casi pulida. La carga debe actuar durante 10 s aunque en algunos casos puede llegar hasta 30 s. En aceros dulces los valores HV pueden variar de 120 a 170, mientras que en aceros tratados térmicamente puede variar entre 800 y 1000.

En general el espesor mínimo de la probeta debe ser de 1,5 veces la longitud de la diagonal de la impresión o lo que es lo mismo 7 veces la profundidad h de penetración. Un criterio similar expresa que como regla general el espesor debe ser al menos de $10h$.

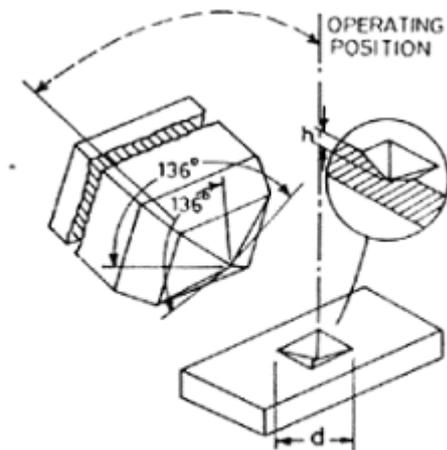


Figura 9. Penetrador Vickers

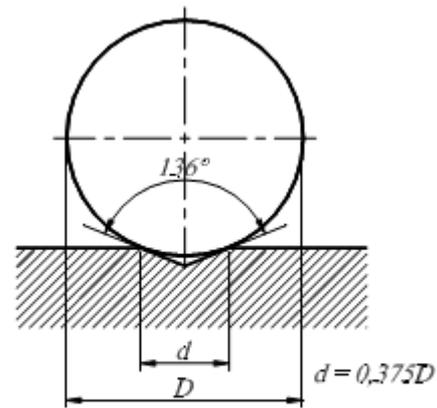


Figura 10. Angulo de las tangentes a la bola para la relación $d = 0,375D$

En algunos casos el espesor de penetración puede ser tan solo de 0,065 mm por lo que el método es aplicable a piezas de poco espesor.

ENSAYOS DE MICRODUREZA

En este tipo de ensayos la penetración es del orden algunos micrones, por lo que pueden ensayarse chapas y láminas extremadamente delgadas, o superficies tratadas en las que el espesor del tratamiento es muy delgado como es el caso de las superficies carburadas o nitruradas, así como también los recubrimientos por electrodeposición.

En los ensayos de microdureza se utilizan aparatos que aplican cargas que pueden variar de 0,01 kg a 2 kg. En la figura se puede ver un aparato de microdureza dureza Vickers que aplica cargas que pueden variar de 0,01 a 1 kg y posee un microscopio analógico (existe otra versión con microscopio digital) que permite medir la diagonal de la impronta en el mismo aparato. También existen aparatos con los que se puede hacer micro y macro Vickers, con cargas que pueden variar desde 0,3 a 30 kg. En la figura se muestra otro aparato utilizado en microdureza, el aparato Tukon.

Este aparato es completamente automático al hacer la penetración. El aparato de la figura admite tanto la microdureza Vickers como la Knoop.

Microdureza Vickers

Se emplea el penetrador piramidal Vickers y la dureza se determina por la Eq. 15, solo que en este caso, por la gran sensibilidad del método, la constante se toma con mayor exactitud:

$$2 \operatorname{sen}(68^\circ) = 1,85436$$

Aplicando cargas de 0,3 kg la profundidad de penetración puede ser de 3 o 4 μ en los materiales más duros, por lo que se puede ensayar piezas con espesores de 30 a 40 μ . Con menores cargas los espesores ensayar pueden ser de 10 o 20 μ .



Figura 11. Aparato para microdureza Vickers modelo 402-MVD de Foundrax-Wolpert



- Dureza Vickers/Knoop desde HV0,005 a HV50
- Sistema electrónico de control a lazo cerrado
- Identador montado sobre celdas de carga
- Posicionador X Y
- Panel de control con "jog" de alta velocidad, foco ultra fino y control de luz

Figura 12. Aparato Tukon Modelo 2100 de Foundrax-Wolpert

Dureza Rockwell

De manera similar al ensayo Brinell, el ensayo de dureza Rockwell se basa en la determinación de la profundidad de la penetración de un cuerpo de dureza prefijada dentro del material en estudio. Pero aquí se trata de dos tipos de penetradores: esferas de acero para metales blandos y un cono de diamante para metales duros. En ambos casos la penetración se realiza bajo cargas determinadas y únicas para cada tipo de penetrador.

Los dos ensayos Rockwell más corrientes son los designados con HR_B , dureza Rockwell B, para el cual se emplea como penetrador una bolilla esférica de $1/16''$ de diámetro y una carga de 100 daN y en dureza HR_C , el penetrador es un cono de diamante de 120° , con punta redondeada, al que se aplica una carga de 150 daN.

El detalle de todas las posibilidades de dureza Rockwell está dado en el Cuadro 7.11, donde se consignan también las cargas y los penetradores para la determinación de la dureza superficial en piezas con tratamiento superficial, consistente en un recubrimiento metálico o en un tratamiento térmico.

A continuación se transcriben los lineamientos de la norma IRAM 105 referentes al ensayo de dureza Rockwell.

Método de ensayo de dureza Rockwell para materiales metálicos

Ensayo de dureza Rockwell

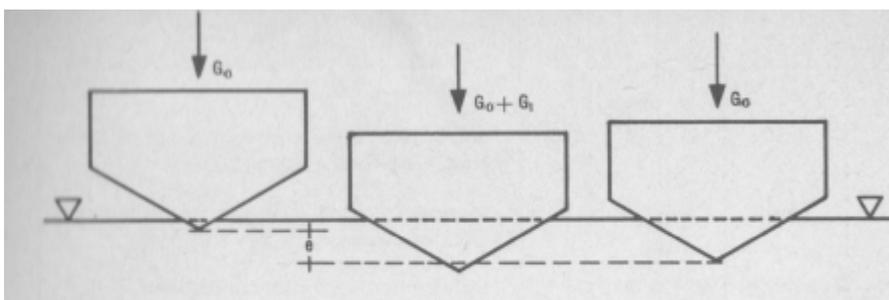
Es un método que permite determinar la dureza de materiales metálicos —considerada como resistencia a la penetración— y que consiste en apretar gradualmente sobre ellos, mediante una carga inicial G_0 , un cuerpo esférico o cónico llamado penetrador, aumentarla por la adición de otra carga G_1 mayor que G_0 y medir, después de suprimida G_1 , el incremento e de la penetración inicial.

Ensayo de dureza Rockwell normal

Es, a los fines de esta norma, el ensayo realizado con alguna de las siguientes escalas: A, B, C, D, E, F, G, H; se emplea para materiales de diversa dureza y el incremento de penetración e se mide en una escala cuya unidad fijada arbitrariamente es 0,002 mm.

Ensayo de dureza Rockwell superficial

Es, a los fines de esta norma, el ensayo realizado con alguna de las siguientes escalas: N, T, W, X, e Y; se emplea para acero carburizado, alambres y chapas de pequeño espesor, calibres de precisión, aceros cianurados, etc. Y el incremento de penetración e se mide en una escala cuya unidad fijada arbitrariamente es de 0,001 mm.



Carga inicial

Es la carga que tiene por objeto asegurar una perfecta sujeción de la pieza que se ensaya y un buen contacto del penetrador.

Carga adicional

Es la carga que permite obtener el incremento de penetración y, por lo tanto, la dureza de la pieza que se ensaya una vez que se ha suprimido aquélla.

Carga total

Es la suma de la carga inicial y adicional

Número de dureza Rockwell (HR)

Es el número que expresa la dureza Rockwell y cuyo valor es:

$$\mathbf{HR = C - e}$$
 siendo

C: el número cien o ciento treinta, según que el tipo de penetrador usado sea cónico o esférico respectivamente.

e: el incremento de la penetración inicial, medido en una escala cuya unidad fijada arbitrariamente es 0,002 mm para la dureza Rockwell normal y 0,001 mm para la dureza Rockwell superficial.

Penetrador: Es la pieza que ejerce la presión sobre los materiales metálicos.

Penetrador cónico normal: Es un cono con punta de diamante de las siguientes características:

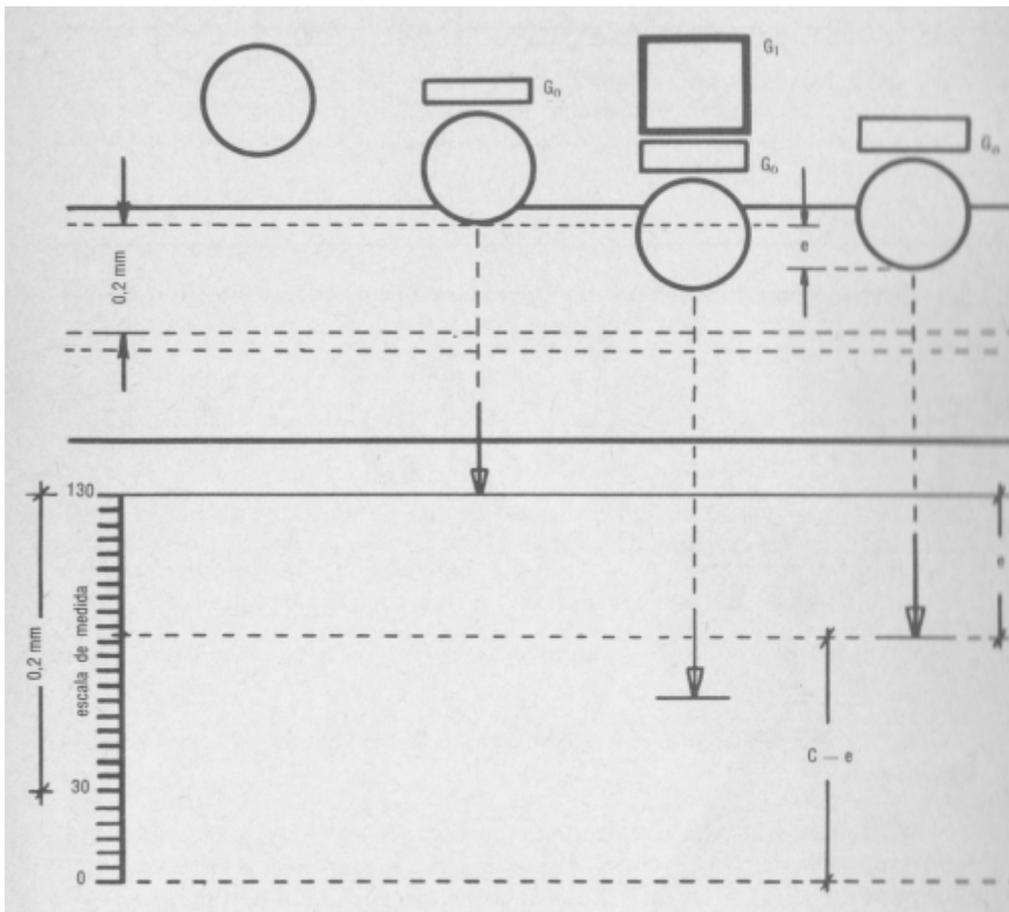
Ángulo del cono de diamante	$120^\circ \pm 0,1^\circ$
Radio de la punta de diamante	$0,2 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$

Penetrador esférico: Es una bolilla de 1,5875 mm (1/16") de diámetro. Para la determinación de la dureza Rockwell y Rockwell superficial de metales blandos, se pueden usar bolillas de diámetro mayor: 1/8", 1/4" y 1/2".

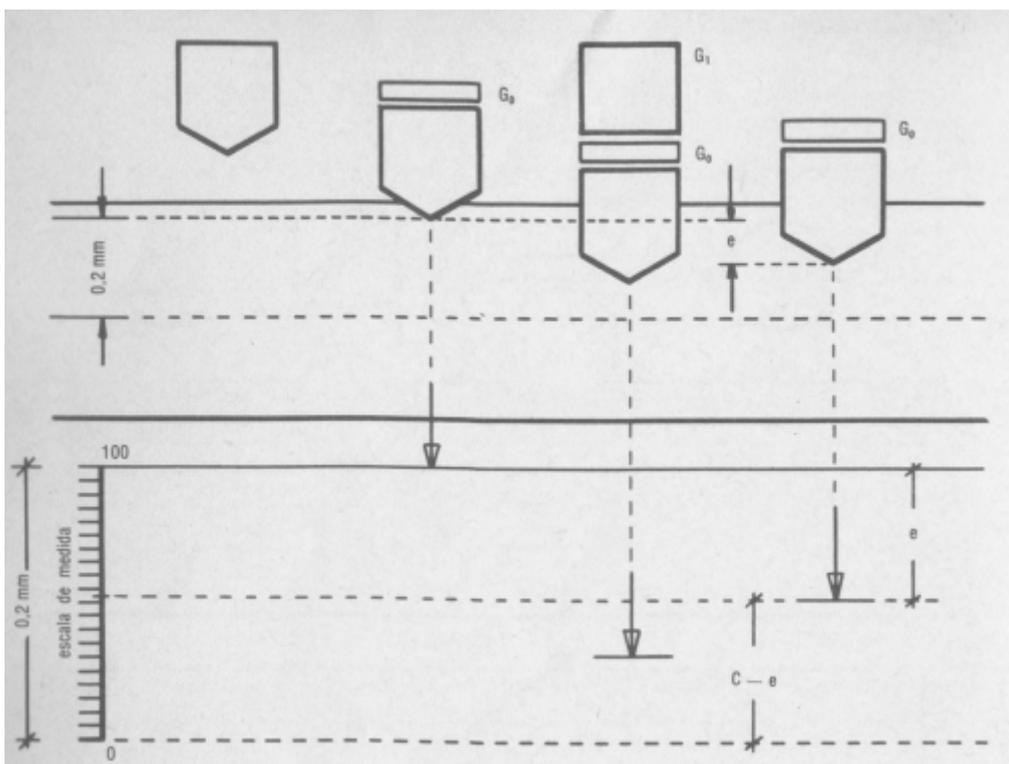
Procedimiento

1. Se elige el penetrador y se lo coloca en el aparato para determinar la dureza
2. Se ubica la probeta sobre el soporte inferior del aparato, maniobrando con el volante hasta poner en contacto la superficie de la probeta con el penetrador.
3. Se continúa luego girando suavemente hasta poner en coincidencia la aguja chica del dial con el punto **set** del índice. De este modo queda aplicada sobre la probeta una carga inicial $G_0 = 10 \text{ daN}$
4. Se baja entonces la palanca que libera la carga restante G_1 que será de 90 daN para Rockwell B y 140 daN para Rockwell C.
5. Se observa la aguja grande hasta el instante en que se detiene. En ese momento se retira la carga G_1 levantando la palanca, quedando aplicada solamente la carga G_0 .
6. Se lee directamente en el dial el número de la dureza, teniendo cuidado de ubicar la escala correspondiente, "B" o "C".

Gráfica para Rockwell B



Gráfica para Rockwell C



Condiciones generales del ensayo:

La superficie a ensayar debe ser plana y lisa y estar libre de cuerpos extraños como aceites, pinturas o barnices. Después del ensayo no deben quedar marcas en la cara de la probeta opuesta a la que se aplicó el penetrador. Para ello su espesor mínimo será 18.e

La pieza o probeta debe apoyar perfectamente en el soporte y la carga tiene que actuar perpendicularmente a la superficie a ensayar. El borde de una impresión debe distar por lo menos 3 mm del borde de la pieza o probeta, o del borde de otra impresión.

Se tomará como valor de dureza el valor medio de tres determinaciones tomadas en puntos vecinos.

Fórmulas para el cálculo

El dial está dividido en 100 partes, para una penetración total de 0,2 mm, por lo tanto cada unidad de la escala es igual a 0,002 mm. A mayor penetración corresponde una lectura menor en el dial.

Las expresiones de dureza que se leen directamente en el dial son:

Dureza Rockwell normal

$$HR_A = 100 - e$$

$$HR_B = 130 - e$$

$$HR_C = 100 - e$$

$$HR_D = 100 - e$$

$$HR_E = 130 - e$$

$$HR_F = 130 - e$$

$$HR_G = 130 - e$$

Dureza Rockwell Superficial

$$HR_N = 100 - e$$

$$HR_T = 130 - e$$

$$HR_W = 130 - e$$

$$HR_X = 130 - e$$

$$HR_Y = 130 - e$$

El número obtenido se antepone al símbolo correspondiente. Si por ejemplo, el número de dureza es 44 para Rockwell C, la designación será:

44HR_C