

**PROPIEDADES MECANICAS DE MATERIALES INGENIERILES**

La caracterización de los materiales atendiendo a sus propiedades mecánicas es de suma importancia en el diseño, ya que nos permite elegir el material correcto según la función y esfuerzos a los que estará sometido. Para que dichas propiedades se puedan comparar convenientemente es necesario que el tamaño de las probetas, así como la forma en que se aplique la carga, estén estandarizadas. Es así como surgen distintas organizaciones para establecer dicha uniformidad; este es el caso de la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM), la Sociedad Americana de Normas (ASA) y el Departamento Nacional de Normas (NBS), por mencionar sólo algunos.

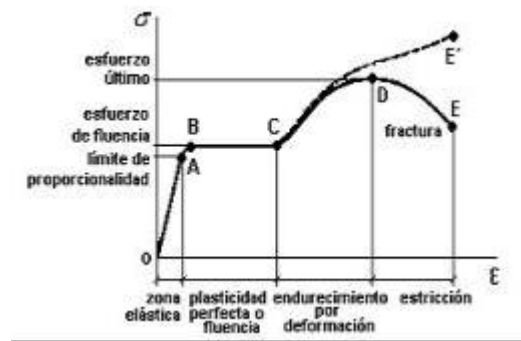
**Ensayo de tensión**

Una prueba de tensión proporciona información sobre el esfuerzo y la ductilidad de los materiales: esta información puede ser utilizada para comparar materiales mejorar aleaciones, control de calidad en los materiales y diseñar bajo ciertas circunstancias. La prueba de tensión estática tiene como finalidad determinar la curva esfuerzo - deformación de un material en el que se identifiquen el límite de proporcionalidad (punto A de la fig.1), esfuerzo de fluencia (punto B de la fig.1), esfuerzo último (punto D de la fig.1) y el esfuerzo de ruptura nominal (punto E de la fig.1) o también el esfuerzo de ruptura real (punto E' de la fig.1). Sin olvidar que la pendiente de la curva en la zona elástica define el módulo de elasticidad del material.

También podemos mediante esta prueba obtener el grado de ductilidad que presenta un material si calculamos los porcentajes de elongación o el de reducción de área. La relación lineal que existe entre la deformación unitaria y el esfuerzo dentro de la zona elástica fue enunciado en 1678 por Robert Hooke. Posteriormente Thomas Young en 1807 introduce la expresión matemática que define esta relación

agregándole la constante de proporcionalidad conocida como módulo de elasticidad o de Young. Esta expresión es conocida como la ley Hooke que para fines de aplicación sólo es válida cuando:

- La carga aplicada sea axial.
- La probeta sea homogénea y de sección constante.
- El esfuerzo no sobrepase el límite de proporcionalidad.



**Figura 1: Diagrama esfuerzo - deformación unitaria de una prueba de tensión**

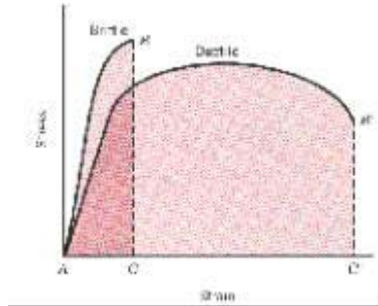
El esfuerzo (Ec. 1) está definido como la fuerza por unidad de área, la deformación unitaria como el incremento de longitud en una longitud calibrada bajo cierta carga (Ec. 2) y el módulo elástico como la pendiente de la curva hasta el límite de proporcionalidad (Ec. 3). Siguiendo estas definiciones podemos calcular el módulo de elasticidad de cualquier material si sabemos la deformación unitaria nominal y el área transversal a la dirección en que se aplica la carga axial mediante la ley de Hooke (Ec.4).

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\delta}{l_0} \quad (2)$$

La ductilidad es otra importante propiedad mecánica. Es la medida de el grado de deformación plástica que puede ser resistido hasta la fractura. Un material que

tiene muy poca o no tiene deformación plástica hasta la fractura es llamado frágil.



**Schematic representations of tensile stress-strain behavior for brittle and ductile materials loaded to fracture**

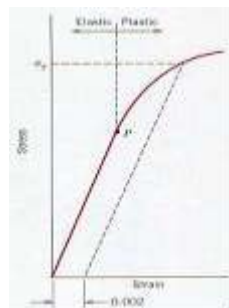
La ductilidad puede expresarse cuantitativamente como porcentaje de elongación y el de reducción de área.

El porcentaje de elongación y el de reducción de área se calculan mediante las ecuaciones (5) y (6) respectivamente.

$$\% \text{Elongación} = \frac{l_f - l_o}{l_o} \cdot 100 \quad (5)$$

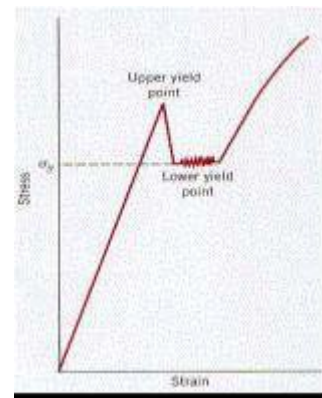
$$\%RA = \frac{A_o - A_f}{A_o} \cdot 100 \quad (6)$$

Para fines de cálculo al diseñar, el esfuerzo de cedencia aparente del material es el valor utilizado en la práctica común, debido a la dificultad para determinar exactamente el límite de proporcionalidad en la curva esfuerzo deformación.



**Figura 2: Método de corrimiento para determinar el esfuerzo de cedencia aparente**

El esfuerzo de cedencia aparente de un material (punto A de la fig. 2) se determina con el método de corrimiento, trazando una línea paralela a la curva en su zona elástica a partir de un 0.002 (0.2 %) de deformación unitaria, como se muestra en la figura 2.



La curva esfuerzo deformación para algunos aceros de bajo carbono presenta dos puntos de cedencia. Se espera que el material se deforme plásticamente en el esfuerzo de cedencia menor. Sin embargo, los átomos intersticiales agrupados alrededor de las dislocaciones interfieren con el deslizamiento y elevan el punto de fluencia. Solo después de aplicar el esfuerzo mayor se desliza la dislocación. Una vez iniciado el deslizamiento en el esfuerzo mayor, la dislocación se aparta de la agrupación de los átomos pequeños y continúa alejándose rápidamente a un esfuerzo menor.

Después de cedencia, el esfuerzo necesario para continuar la deformación plástica en letales se incrementa a el máximo, punto M, y decrece hasta la fractura, punto F. El esfuerzo de tensión corresponde a al máximo esfuerzo que puede ser sostenido por una estructura en tensión; si este esfuerzo es aplicado y mantenido, la

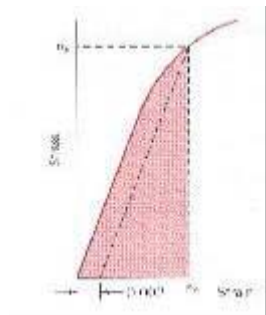
fractura sucederá. En este esfuerzo una pequeña restricción o encuellamiento comienza a formarse en algún punto y toda la subsecuente deformación es confinada a ese encuellamiento. La fractura ocurre en éste encuellamiento. El esfuerzo de fractura corresponde al esfuerzo registrado al momento de la fractura.

En materiales frágiles como el vidrio y los cerámicos, suele emplearse el esfuerzo de último para fines de diseño, dado que estos no desarrollan deformación plástica.

En diseño, el objetivo general para el producto es resistir esos esfuerzos sin un cambio significativo en su geometría.

En manufactura, el objetivo es diametralmente lo opuesto; aquí se necesitan aplicar esfuerzos que excedan la resistencia a la fluencia del material a fin de alterar su forma.

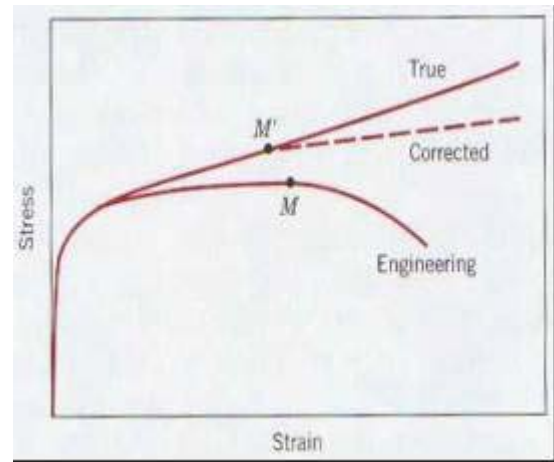
La resiliencia es la capacidad del material de absorber energía cuando es deformado elásticamente y entonces, quitando la carga, esta energía es liberada. Esta propiedad es asociada con el módulo de resiliencia. Un material resiliente son aquellos que tienen altos esfuerzos de cedencia y bajo módulo de elasticidad.



### Modulus resilience

La tenacidad es la medida de la habilidad que tiene un material para absorber energía hasta antes de la fractura y es identificada en el diagrama esfuerzo-deformación como el área bajo toda la curva.

La curva de esfuerzo-deformación ingenieril no representa una indicación precisa de los esfuerzos verdaderos y deformaciones verdaderas del material por que se basa en las dimensiones, área y longitud de calibre originales del espécimen. Estas dimensiones cambian continuamente en el curso del ensayo de tensión, y el esfuerzo real o verdadero en un momento dado es mucho mayor que el representado por la curva ingenieril.

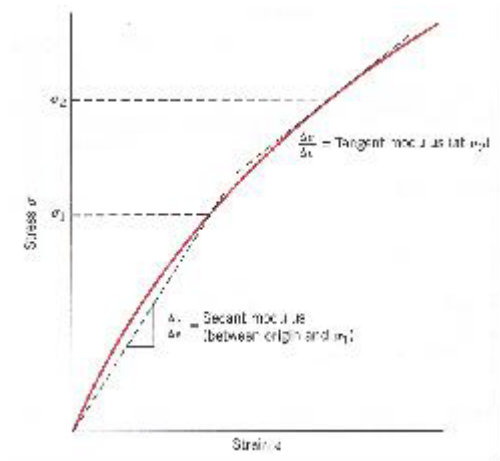


A comparison of typical tensile engineering stress-strain and true stress-strain behaviors. Necking begins at point M on the engineering curve, which corresponds to M' on the true curve. The corrected true stress-strain curve takes into account the complex stress state within the neck region.

Rara vez se necesitan el esfuerzo y la deformación reales, excepto en ciertos casos en el trabajado de metales. Tan pronto como se excede el punto de fluencia, el metal empieza a deformarse permanentemente. El componente falla debido a que no mantiene la forma original. Más aún, se desarrolla una diferencia importante entre las dos curvas sólo cuando se inicia la estricción. Pero cuando ocurre ésta, el componente ya está muy deformado y ya no satisface las condiciones requeridas para su uso.

Las propiedades de los plásticos respecto a la tensión se obtienen fundamentalmente de la misma manera que en el caso de los metales. También se obtiene el esfuerzo de cedencia, esfuerzo

máximo, módulo de Young, elongación. En muchos plásticos, y también en el hierro gris colado, la porción lineal inicial no existe y no se puede obtener un módulo elástico. La alternativa consiste en obtener el módulo tangente o el módulo secante. El módulo



**Schematic stress-strain diagram showing nonlinear elastic behavior, and how secant and tangent moduli are determined**

### Ensayo de dureza.

Una propiedad mecánica muy importante que debemos de considerar en los materiales es la dureza, la cual se describe como la capacidad de oposición que un material ofrece a ser deformado plásticamente (ejemplo, una pequeña indentación o un rayón) Las primeras pruebas de dureza fueron basadas en minerales naturales con una escala construida solamente en la habilidad que este tenía para rayar a otro más suave.

Una forma confiable y de alguna manera un poco arbitraria forma de determinar la dureza fue realizada, llama de la escala de Mohs, la cual determinaba como 1 al talco como la máxima suavidad y como 10 al diamante como el más duro.

Numerosas técnicas para determinar la dureza de materiales en las cuales un pequeño indentador es forzado en la superficie de otro material, en las cuales se controla la fuerza y la velocidad de aplicación. La profundidad o tamaño de la indentación es medida, la cual va relacionada con el número de dureza; tan suave el material, mayor es la indentación al igual que

tangente es la pendiente de la tangente a la curva esfuerzo deformación que pasa por el origen. El módulo secante es la pendiente de la línea que une el origen con una deformación preestablecida en la curva esfuerzo-deformación.

el tamaño de la misma, y el número de dureza es menor.

La determinación de la dureza de un material es la prueba que más se lleva a cabo para la determinación de las propiedades mecánicas de un material por las siguientes razones:

- Son muy simples y de bajos costos. Normalmente no se requiere materiales externos para la preparación del material y los aparatos necesarios son de bajos costos.
- Las pruebas son no destructivas. El material ni es fracturado ni deformado a grandes escalas; solo una pequeña indentación es la máxima deformación.
- Otro tipo de características mecánicas del material pueden ser determinadas o estimadas de esta prueba, tal es el caso del esfuerzo de tensión.

### Pruebas de Dureza Rockwell.

Las Pruebas Rockwell constituyen el método más común para medir la dureza porque son muy simples de hacer y no requieren aptitudes especiales. Muchas escalas diferentes pueden ser utilizadas de entre una combinación de varios indentadores y diferentes cargas, las cuales permiten la prueba de, virtualmente, todos los metales y aleaciones, desde la más dura hasta la más suave. Los indentadores incluyen bolas esféricas endurecidas de diámetros de 1/16, 1/8, 1/4, y 1/2 pulgadas (1.588, 3.175, 6.35, y 12.70 mm), y un indentador de diamante cónico (Brale), que es usado para los materiales más duros.

Con este sistema, un número de dureza es determinado por la diferencia de profundidad de penetración resultante de la aplicación de una carga inicial menor seguida de una mayor; usar una carga menor mejora

la precisión de la prueba. En base a la magnitud de mayor y menor carga, existen dos tipos de pruebas: Rockwell y Rockwell superficial. Para la Rockwell, la menor carga es de 10 kg, donde las mayores son de 60, 100 y 150 kg. Cada escala es representada por una letra del alfabeto; algunas son enlistadas con su indentador correspondiente y su carga en las tablas que se presentan. Para las pruebas superficiales, la menor carga es de 3 kg; las posibles cargas mayores son de 15, 30 y 45 kg. Estas escalas son identificadas por un 15, 30 o 45 (dependiendo de la carga), seguido por N, T, W, X o Y, dependiendo del indentador. Las pruebas superficiales son frecuentemente desarrolladas en especímenes delgados.

Cuando se especifica Rockwell y dureza superficial de un material, el número de dureza y el símbolo de la escala debe de ser indicado. La escala es designada por el símbolo HR seguido por la apropiada identificación de la escala. Por ejemplo, 80 HRB representa una dureza de 80 en Rockwell en la escala B, y un 60 HR30W indica la dureza superficial de 60 en la escala de 30W.

Para cada escala, las durezas pueden clasificadas hasta 130; sin embargo, mientras los valores de dureza se elevan a 100 o caen bajo 20 en cualquier escala, se hacen imprecisos porque las escalas tienen cierta sobreposición, en esta situación, es mejor utilizar la siguiente escala de dureza o suavidad.

La imprecisión de algunas pruebas de dureza también se presenta cuando el espécimen a estudiar es muy delgado, o si la indentación es realizada muy cercana a una orilla de nuestro material, o también se presenta cuando una indentación es realizada muy cercana a la otra. El grosor de nuestro material a analizar debe de ser al menos diez veces la profundidad de la indentación, y al menos tres diámetros de indentación de separación de entre las mismas indentaciones. Además, el desarrollar esta prueba colocando varios materiales uno sobre el otro, no es recomendado en lo absoluto. También, la precisión de los resultados depende en que la indentación debe de ser realizada en una superficie plana y suave.

Los aparatos modernos para hacer las mediciones de dureza de Rockwell son automatizados y muy simples de usar; la dureza es obtenida directamente, y cada medición requiere unos pocos segundos.

Los aparatos de prueba modernos también permiten una variación en el tiempo de la aplicación de la carga. Esta variable también debe ser considerada al interpretar los datos de dureza.

### **Pruebas de Dureza Brinell.**

En las pruebas Brinell, al igual que en las mediciones de Rockwell, una pequeña esfera rígida es forzada en la superficie del material que se va a probar. El diámetro de la esfera es de 10.00 mm (0.394 mm). Las cargas estándar oscilan entre 500 y 3000 kg, en incrementos de 500 kg; durante una prueba, la carga es mantenida constante por un tiempo especificado (entre 10 y 30 segundos). Los materiales más duros requieren mayores aplicaciones de carga. El número de dureza Brinell (HB), es una función de la magnitud de la carga y el diámetro de la indentación resultante. Este diámetro es medido con microscopios especiales de bajo poder, utilizando una escala que es grabada en el ocular. El diámetro medido es después convertido a su HB apropiado, usando una tabla numérica; solo es utilizada una escala con esta técnica.

La espesor máximo del espécimen, así como suposición de indentación (relativo a las orillas del espécimen) y los requerimientos mínimos de indentación son los mismos que para las pruebas Rockwell. Así mismo, una indentación bien definida es requerida; lo cual requiere una superficie plana y suave en donde se realiza la indentación.

### **Pruebas de Micro Durezas Vickers y Knoop**

Otras dos técnicas de pruebas de dureza son las de Knoop y Vicker (también llamada pruebas de pirámides de diamante). Para cada prueba, una pequeña pirámide de dimante es utilizado como indentador, el cual es forzado sobre la superficie de nuestro material a analizar. Las cargas aplicadas son

mucho mas pequeñas en comparación que en las de Rockwell y Brinell, las cuales van del orden de 1 a 1000gr. La indentación realizada es observada y medida bajo un microscopio; después esta medida es convertida en el número de dureza. Para asegurar una buena realización de la prueba, el material tuvo que haber sido previamente lijado y pulido lo mejor posible. Los números de Knoop y Vickers fueron designados como HK y HV respectivamente, y las escalas de dureza para las dos pruebas son aproximadamente iguales. Esto se debe a que ambas técnicas de medición de dureza se basan en la medición microscópica de la indentación realizada, con la diferencia de cargas aplicadas y el tamaño de indentador. Estas pruebas son esencialmente utilizadas en especímenes pequeños, o en donde se desea saber la dureza en una región determinada, o mejor aun las pruebas de Knoop son realizadas en materiales frágiles tales como cerámicos.

Existen algunas otras técnicas de pruebas de dureza que se aplican comúnmente, tales como pruebas ultrasónicas, pruebas dinámicas, durómetros (para materiales plásticos y elastómeros), y las pruebas de ralladuras en los materiales.

### **Conversión de Dureza**

La facilidad para convertir la dureza que es medida en una escala a otra es lo más deseable. Sin embargo, como la dureza no es una propiedad bien definida del material, y como las diferencias experimentales entre las diferentes técnicas, no ha sido ideado un esquema de conversión comprensible. La conversión de datos de dureza ha sido determinada experimentalmente y se ha encontrado una dependencia con el tipo de material y sus características. La conversión de datos más confiable que existe es para los aceros, algunas de los cuales son presentados en la siguiente tabla, para Knoop, Brinell y para dos escalas Rockwell; también se incluye la escala de Mohs. Una conversión detallada de las tablas para otros materiales y aleaciones están contenidas en los estándares E140, de la ASTM, "Standard Hardness Conversion Tables for Metals". Se debe tener mucho cuidado en la extrapolación de conversión de datos de un sistema de aleaciones a otro.

### **Correlación entre dureza y esfuerzo de cedencia.**

Las dos características mecánicas dureza y esfuerzo de cedencia son indicadores de la deformación plástica de los materiales. En consecuencia, están fuertemente relacionados proporcionalmente. Como regla de dedo para la mayoría de los metales, la dureza HB y el esfuerzo de cedencia están relacionados de acuerdo a

$$\text{TS(MPa)}=3.45 \times \text{HB}$$

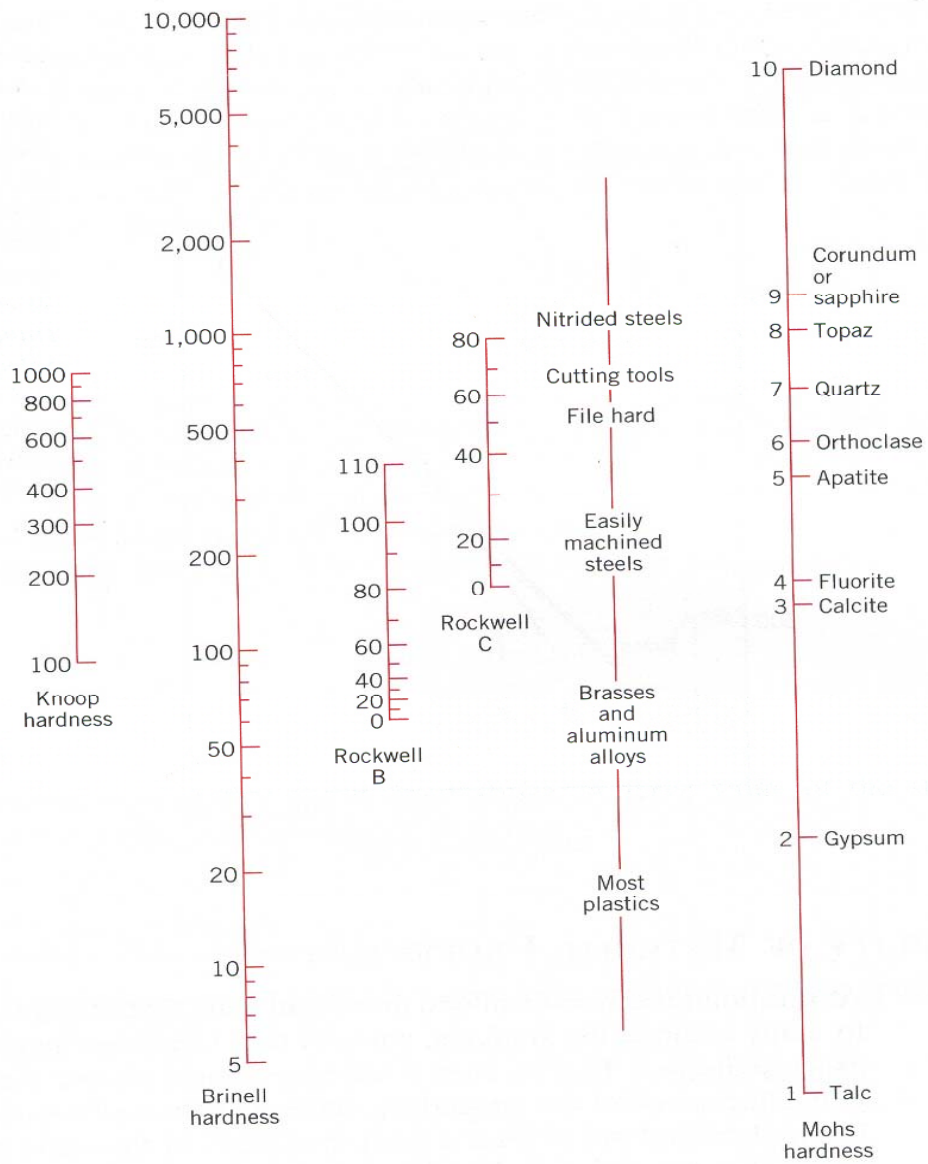
$$\text{TS (psi)}= 500 \times \text{HB}$$

### **Referencias.**

**Callister, William; *Engineering and Science of materials*. Edit Wiley an sons 1998.**

**Askeland, Donald; *La ciencia e ingeniería de materials*. Edit Iberoamerica, 1990.**

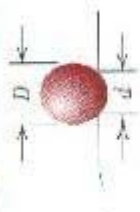
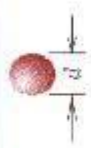




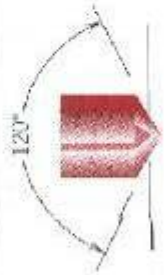


**<http://www.ccsi-inc.com/new/t-rockwell1.htm>**







**Table 6.4** Hardness Testing Techniques

Test	Indenter	Shape of Indentation		Formula for Hardness Number <sup>a</sup>
		Side View	Top View	
Brinell	10-mm sphere of steel or tungsten carbide			$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
Vickers microhardness	Diamond pyramid			$HV = 1.854P/d^2$
Knoop microhardness	Diamond pyramid			$HK = 14.2P/l^2$
Rockwell and Superficial Rockwell	Diamond concave 1/16, 1/32, 1/64 in. diameter steel spheres		 	60 kg } Rockwell 100 kg } 150 kg } 15 kg } Superficial Rockwell 30 kg } 45 kg }

<sup>a</sup> For the hardness formulas given,  $P$  (the applied load) is in kg, while  $D$ ,  $d$ ,  $d_1$ , and  $l$  are all in mm.  
**Source:** Adapted from H. W. Hayden, W. G. Moffatt, and J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol. III, *Mechanical Behavior*. Copyright © 1965 by John Wiley & Sons, New York. Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Inc.

**Comparison of several hardness scales**

ROCKWELL (S) SUPERFICIAL SCALE APPLICATIONS			
Scale Symbol	Penetrator	Major (Minor) Load	Typical Application
15N	Brale	15 kgf	Superficial scale is ideal for testing materials that do not
		(3 kgf)	
30N	Brale	30 kgf	· strip metal
		(3 kgf)	
45N	Brale	45 kgf	· small rounds
		(3 kgf)	
15T	1/16" Ball	15 kgf	· lightly carburized steel
		(3 kgf)	
30T	1/16" Ball	30 kgf	· tin plate
		(3 kgf)	
45T	1/16" Ball	45 kgf	
		(3 kgf)	
15W	1/8" Ball	15 kgf	
		(3 kgf)	
30W	1/8" Ball	30 kgf	
		(3 kgf)	
45W	1/8" Ball	45 kgf	
		(3 kgf)	
15X	1/4" Ball	15 kgf	
		(3 kgf)	
30X	1/4" Ball	30 kgf	
		(3 kgf)	
45X	1/4" Ball	45 kgf	
		(3 kgf)	
15Y	1/2" Ball	15 kgf	
		(3 kgf)	
30Y	1/2" Ball	30 kgf	
		(3 kgf)	
45Y	1/2" Ball	45 kgf	
		(3 kg)	

ROCKWELL (R) REGULAR SCALE APPLICATIONS			
Scale	Penetrator	Major	Typical Application
Symbol		(Minor)	
		Load	
A	Brale	60 kgf	· cemented carbides
		(10 kgf)	· thin steel
			· shallow case hardened steel
B	1/16" Ball	100 kgf	· cooper alloys
		(10 kgf)	· soft steel
			· aluminium alloys
			· malleable iron
C	Brale	150 kgf	· steel
		(10 kgf)	· hard cast iron
			· perlitic malleable iron
			· titanium
			· deep case hardened steel
D	Brale	100 kgf	· thin steel
		(10 kgf)	· medium case hardened steel
			· perlitic malleable iron
E	1/8" Ball	100 kgf	· cast iron
		(10 kgf)	· aluminium alloys
			· magnesium alloys
			· bearing metals
F	1/16" Ball	60 kgf	· annealed copper alloys
		(10 kgf)	· thin soft sheet metal
G	1/16" Ball	150 kgf	· phosphor bronze
		(10 kgf)	· beryllium
			· cooper
			· malleable iron
			(G92+ will damage penetrator)
H	1/8" Ball	60 kgf	· zinc
		(10 kgf)	· lead
			· aluminum
K	1/8" Ball	150 kgf	· bearing metals
		(10 kgf)	· relatively soft
L	1/4" Ball	60 kgf	· thin materials
		(10 kgf)	· plastics (refer to ASTM D 785)
M	1/4" Ball	100 kgf	Use the smallest ball and highest force that do not give "anvil" effect
		(10 kgf)	
P	1/4" Ball	150 kgf	
		(10 kgf)	
R	1/2" Ball	60 kgf	
		(10 kgf)	
S	1/2" Ball	100 kgf	
		(10 kgf)	
V	1/2" Ball	150 kgf	
		(10 kgf)	