

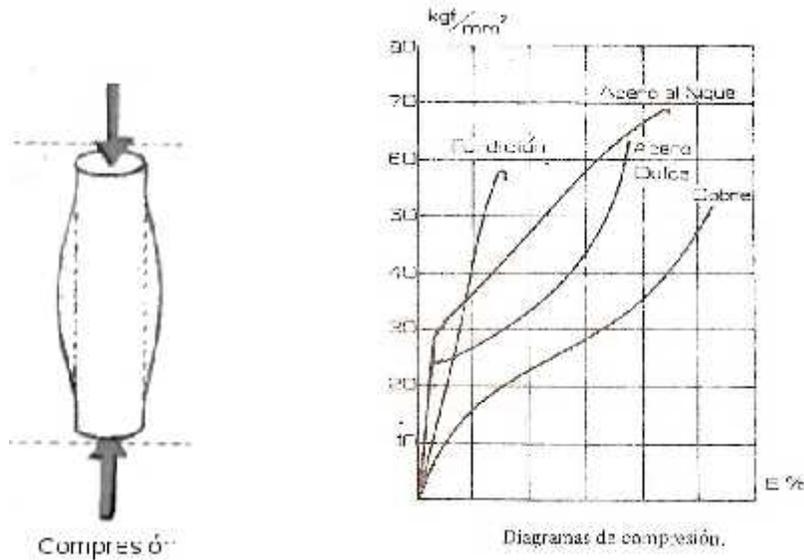
## ENSAYO DE COMPRESIÓN.

### INTRODUCCIÓN

Es un ensayo que consiste en aplicar una fuerza estática sobre el eje longitudinal con la intención de acortar o presionar la probeta. Es una prueba de poco uso en metales, mucho más usado para el hormigón.

El diagrama obtenido para metales es similar al del ensayo de tracción, consiguiendo una zona elástica al principio, y una zona plástica hacia el final, cada zona depende del tipo del material, al igual que la fractura. Generalizando los dos casos más comunes, para metales dúctiles obtenemos una zona elástica característica, dada por la ley de Hooke, y una zona plástica amplia sin aparición de fractura o rotura final. En cambio en el caso de los metales más frágiles, obtenemos una zona elástica de poca deformación, con una zona plástica prácticamente nula con la aparición de una carga de ruptura.

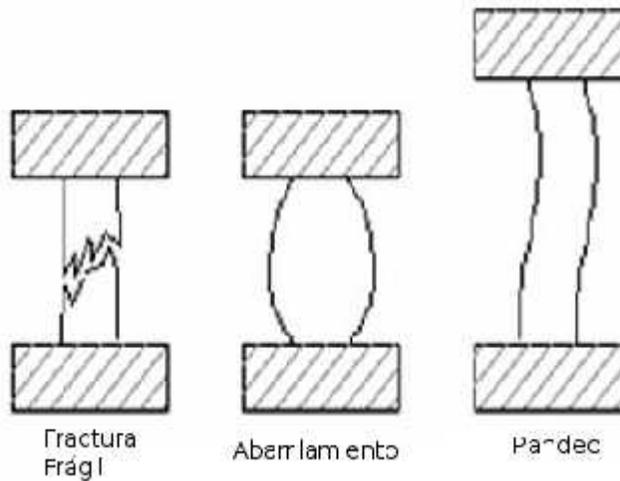
Debemos considerar que el diagrama obtenido de la máquina de ensayo es convencional, es decir, se refiere a la sección inicial, y no a las secciones instantáneas. Considerando las áreas momento a momento, el diagrama real cae por debajo del convencional, esto es más evidente para los metales de gran maleabilidad, ya que permiten un gran poder de deformación.



### PROBETAS PARA EL ENSAYO DE COMPRESIÓN.

La geometría de la probeta en este ensayo influye de gran manera en los resultados de la experiencia, es por ello que se deben tener en cuenta las normas acerca de ellas.

Los dos principales inconvenientes de este ensayo se producen por: el rozamiento sobre las bases y el fenómeno de pandeo. El primero se hace evidente en probetas cortas, donde la fricción en las caras genera un estado de tensión compuesto, que produce un aumento en la resistencia de la probeta. Este fenómeno se reduce hacia la sección transversal del centro de la probeta, lo que indica que mientras más larga sea la probeta, más se reduce el efecto del rozamiento. El efecto de pandeo o de flexionamiento lateral se origina en las probetas más largas o esbeltas, por lo que la longitud de la probeta estará limitada por este efecto.



Un tercer inconveniente de este ensayo es la forma de las bases, para evitar efectos de forma, se utilizan probetas de sección circular, las cuales no poseen aristas ni puntos angulosos.

Según la norma ASTM E9 las probetas se pueden clasificar en tres grupos:

- Probetas cortas: utilizadas para ensayos sobre metales que trabajaran bajo condiciones normales y a espesores reducidos.  $h=0,8$  a  $2 d$
- Probetas medianas: se seleccionan para ensayos de carácter general.  $h=3 d$
- Probetas largas: se usan especialmente para la determinación del módulo de elasticidad a la compresión.  $h=8$  a  $10 d$

Una condición importante de las probetas a ser ensayadas rigurosamente, es la planitud y paralelismo de las caras a ser comprimidas. Para que el ensayo sea lo más perfecto posible, las caras deben ser totalmente planas para apoyar plenamente sobre los platos de la máquina y deben ser paralelas para que el esfuerzo transmitido sea longitudinal y no produzca flexionamiento lateral. Para evitar problemas los platos de la máquina de ensayo son de superficie endurecida y cuentan con una rotula que se adapta a la forma de la probeta.

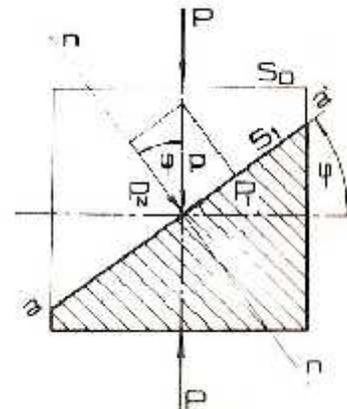
### FRACTURA POR COMPRESIÓN

Hay que dejar en claro que las fracturas no se dan en materiales de mucha maleabilidad, por lo que el análisis de fractura queda para los materiales con cierta fragilidad. En general las fracturas por compresión se dan en planos inclinados con respecto a la sección circular.

Las fracturas sobre planos inclinados son productos de las tensiones tangenciales internas que se producen dentro de la probeta, que para el caso alcanzan máximo valor en los planos a  $45^\circ$  respecto a la sección transversal. Demostración:

$$\tau_\varphi = \frac{P_T}{S_1} = \frac{P \cdot \text{sen}\varphi}{S_0 / \cos\varphi} = \frac{P}{S_0} \cdot \text{sen}\varphi \cdot \cos\varphi = \frac{\sigma}{2} \cdot \text{sen}2\varphi \rightarrow$$

$$|\tau_{\varphi \text{Max}}| = \frac{\sigma}{2}, \quad \text{para } 2\varphi = 90^\circ \rightarrow \varphi = 45^\circ$$



Cabe destacar que las fracturas en la realidad son entre  $50^\circ$  y  $60^\circ$  respecto a la sección transversal, debido al efecto de rozamiento sobre las bases de la probeta.

**DETERMINACIONES A EFECTUAR EN EL ENSAYO DE COMPRESIÓN**

1. Resistencia estática a la compresión

Se puede obtener sólo para metales con cierto nivel de fragilidad que produzcan ruptura durante el

ensayo. 
$$\sigma_{EC} = \frac{P_{Max}}{S_0}$$

2. Tensión al límite de proporcionalidad.

Es el valor más representativo de este ensayo ya que es el único que se puede obtener para describir

el comportamiento de los metales más maleables. 
$$\sigma_P = \frac{P_P}{S_0}$$

3. Tensión al límite del aplastamiento

Es un equivalente al límite a la fluencia del ensayo de tracción, se puede observar en algunos

metales maleables, pero no es muy utilizado. 
$$\sigma_f = \frac{P_f}{S_0}$$

4. Acortamiento de rotura

Equivalente al alargamiento por tracción

$$\delta_{\%} = \frac{h_0 - h}{h_0} \cdot 100$$

5. Ensanchamiento transversal

Correspondiente a la estricción en el ensayo de tracción

$$\rho_{\%} = \frac{S - S_0}{S_0} \cdot 100$$

6. Módulo de elasticidad

Se puede obtener el módulo de Hooke se ciertos materiales, el cual coincidirá con el obtenido en el

ensayo de tracción 
$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

## ENSAYO DE FLEXIÓN

### 1 GENERALIDADES

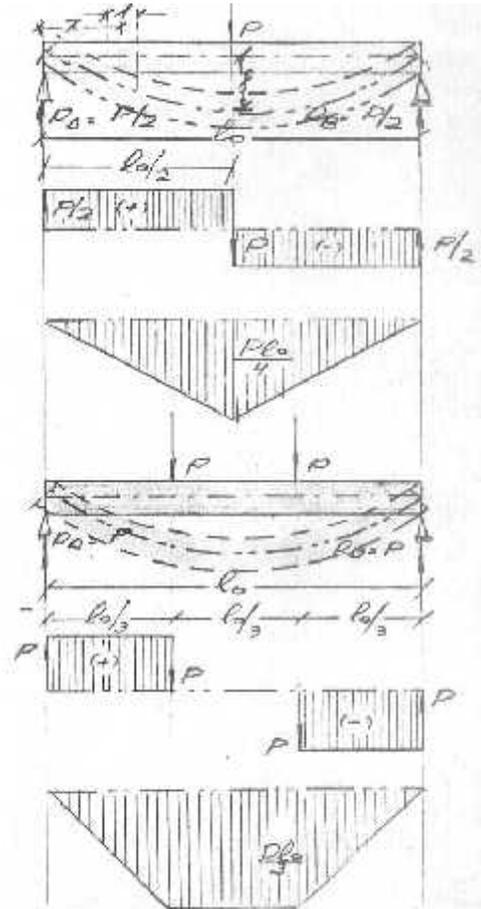
Si las fuerzas actúan sobre una pieza de material de manera tal que tiendan a producir esfuerzos de compresión sobre una parte de la sección transversal y de tracción sobre la parte restante, se dice que dicha pieza está sometida a flexión. En las estructuras y máquinas en servicio la flexión puede ir acompañada de corte, el cual está presente casi siempre en vigas cuya  $h \geq l_0/10$ .

Los ensayos de flexión son menos empleados que los de tracción pues los valores de resistencia deducidos de este último pueden ser aplicados en los cálculos de estructuras que trabajan a flexión: sin embargo, en casos especiales es conveniente obtener los coeficientes que entran en los cálculos, directamente de los obtenidos en este ensayo.

Las figuras ilustran vigas sometidas a esfuerzos transversales (perpendiculares a su eje longitudinal) actuando en su plano de simetría, los cuales provocarán una deformación de trazado circular en dicho plano.

El efecto flexionante en cualquier sección se expresa como el momento flector "M", el cual es la suma de los momentos de todas las fuerzas que actúan a la izquierda de ella (o a la derecha). Usualmente la flexión va acompañada de los esfuerzos de corte, el cual para una sección se considera como la suma algebraica de todas las fuerzas transversales actuantes a la izquierda de ella (o a la derecha cambiada de signo). Las variaciones del momento flector y del esfuerzo de corte a lo largo de una viga se llaman "diagramas".

Para el primer esquema de cargas se tiene la "flexión práctica" y para el segundo la "flexión pura", ya que en el tercio medio los esfuerzos de corte son nulos.



### 2 DISTRIBUCIÓN DE LOS ESFUERZOS EN LAS SECCIONES TRANSVERSALES

Por efecto del flexionamiento que producen las cargas vistas, las fibras inferiores sufren un alargamiento y las superiores sufren un acortamiento, poniendo de manifiesto las tensiones de tracción y compresión e induciendo que en algunos puntos de la sección transversal, las tensiones serán nulas; dichos puntos determinan una recta que generalmente se supone coincidente con el eje medio de la sección y a la que se llama "eje neutro".

La teoría de flexión supone que una sección plana sometida a la acción de un momento flector, permanece plana; pero sufre una rotación alrededor de su eje neutro, con respecto a una vecina, convergiendo todas sobre un centro de rotación.

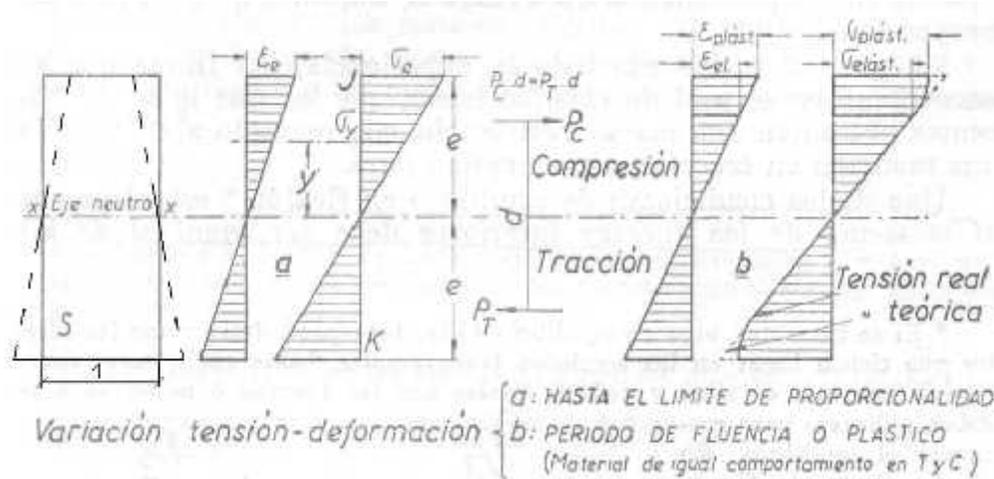
Si se considera un tramo de viga de longitud unitaria, una fibra genérica experimenta una deformación " $\epsilon_y$ " y como dentro del periodo proporcional es según la ley de Hooke:  $\sigma_y = E * \epsilon_y$ , el mismo tipo de diagrama lineal indicará las tensiones que experimenta esa sección.

Las condiciones generales de equilibrio establecen que:

- a) algebraica de fuerzas longitudinales = 0;  $P_T - P_C = 0$
- b) algebraica de fuerzas verticales = 0 ;  $R_A - P + R_B = 0$
- c) algebraica de los momentos flectores sea = 0, o sea que el momento de las fuerzas exteriores aplicadas a la probeta, debe ser igual al momento de las fuerzas interiores que actúan en una sección transversal.

$$R_A * x - P_T * d = 0$$

$$P_C * d = P_T * d$$



Es decir que supuesto el material con igual comportamiento bajo ambos esfuerzos, las resultantes de los mismos equidistan del eje neutro; en cambio, en la generalidad de los casos en que no se cumple esta condición, el eje se desplaza hacia la zona más resistente para mantener la igualdad de las resultantes de los esfuerzos internos y por lo tanto la de sus momentos. Una vez pasada la proporcionalidad y por el hecho comprobado experimentalmente que las secciones transversales se mantienen prácticamente planas, la variación sigue siendo lineal; en cambio el diagrama de "σ" tiende a curvarse en los extremos, o sea que las fibras que entran en periodo plástico sufren menores incrementos de tensiones para iguales aumentos de las deformaciones.

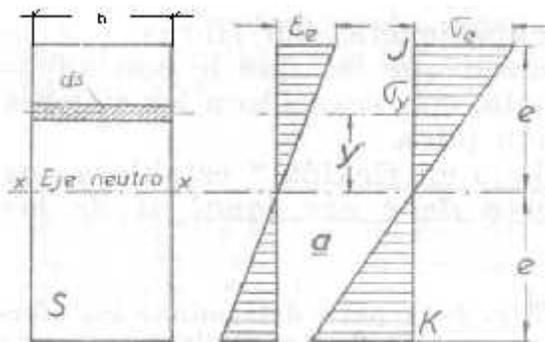
### 3 CÁLCULO DE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN:

Se efectúa determinando el momento que producen las fibras interiores respecto al eje neutro, en una sección, que se oponen al momento flector originado por las cargas exteriores aplicadas al material.

Si se tiene una sección transversal de área "S", de forma rectangular, en una franja "ds" situada a una distancia "y" del eje neutro, actuará "σy" producida por una "dp", tal que:  $dp = \sigma_y * ds$

El momento respecto al eje neutro es:  $dM = dp * y = \sigma_y * ds * y$

Del diagrama de tensiones en periodo proporcional es:  $\sigma_y / \sigma_e = y / e \therefore \sigma_y = (y * \sigma_e / e) \therefore dM = (\sigma_e / e) * y^2 * ds$



Si hacemos la sumatoria:  $M_{int} = \int_{-e}^e \frac{\sigma_e}{e} * y^2 * ds$

Para una sección dada es:  $\sigma_e/e = cte \therefore M_{int} = \frac{\sigma_e}{e} \int_{-e}^e y^2 * ds$

A  $\int_{-e}^e y^2 * ds$  se lo llama momento de inercia normal de la sección respecto del eje neutro, y se lo designa con "Jx" ya que está referido a dicho eje,  $M_{INT} = (\sigma_e/e) * Jx$

Como se vio, el momento de las fuerzas interiores tiene que ser igual al que produce con respecto a la misma sección, la carga aplicada sobre el material, para que el sistema se encuentre en equilibrio. Si lo llamamos "Mf" será:

$$M_{INT} = M_f = (\sigma_e/e) * Jx \quad \boxed{\sigma_e = e * M_f / Jx} \quad (1)$$

∴

A "Jx / e" se lo conoce como módulo resistente "Wx" ∴  $\boxed{\sigma_e = M_f / Wx} \quad (2)$

Esta es la llamada "fórmula de Navier" y de acuerdo a la deducción puede aplicarse en flexión pura y cuando deformaciones y tensiones varíen en forma lineal.

Con (1) se puede calcular en cualquier sección el valor de la tensión en distintos puntos de ella, en función de sus distancias al eje neutro

$$\boxed{\sigma_y = y * M_f / Jx}$$

Esta expresión confirma el diagrama visto ya que para  $y = 0$  es  $\sigma_y = 0$  y para  $y = e$  es  $\sigma_y = \sigma_e$

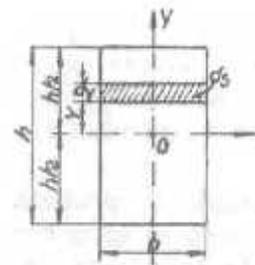
Por convención el momento flector será positivo cuando la viga se flexione hacia abajo, o sea cuando los esfuerzos de tracción se encuentren debajo del eje neutro.

**3-a Cálculo del momento de inercia en sección rectangular:**

$$Jy = \frac{b^3 h}{12} \text{ y } Jx = \frac{bh^3}{12}$$

$$Jp = Jx + Jy = \frac{bh}{12} (h^2 + b^2)$$

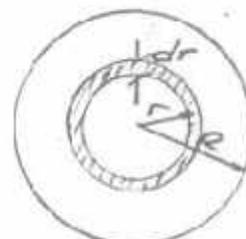
Jx = momento de inercia con respecto al eje x  
 Jy = momento de inercia con respecto al eje y  
 Jp = momento de inercia polar respecto a un polo o eje de giro



**3-b Cálculo del momento de inercia en sección circular:**

Para la probeta de sección circular, que es la más usada en metales es:

$$Jp = \frac{\pi D^4}{32} \text{ y el momento de inercia normal por simetría es:}$$



$$J_P = J_x + J_y = 2J_x \therefore J_x = \frac{J_P}{2} = \frac{\pi D^4}{64} = J_x$$

### 3-c Cálculo del módulo de elasticidad:

Por estar sometido el material a una carga de intensidad creciente el eje neutro se va flexionando, llamándose "flecha" a la distancia vertical entre la posición inicial de dicho eje, o sea descargado, y las posiciones instantáneas que por efecto de la carga va tomando, medidas en el lugar de mayor flexionamiento de la probeta.

Si en el periodo elástico o proporcional se determinan flechas y las cargas correspondientes a cada una de ellas (no menos de 5 determinaciones), tomando los valores promedios se podrá calcular el módulo de elasticidad.

Para una viga simplemente apoyada con una carga concentrada en su sección media es:

$$f = \frac{1 * P * l_0^3}{48 * E * J_x} \therefore E = \frac{1 * P_{PROM} * l_0^3}{48 * f_{PROM} * J_x} \quad (4)$$

Para una viga simplemente apoyada con cargas concentradas actuantes a los tercios de la luz es:

$$f = \frac{23 * P * l_0^3}{648 * E * J_x}$$

Las cargas se indican en el cuadrante del registrador de esfuerzos y las flechas mediante un flexímetro fijado a la viga de flexión (perfil doble T).

## 4 PROBETAS

Las probetas para ensayo de flexión son de sección circular o rectangular, según el material a ensayar. La luz entre apoyos no debe ser reducida para que los esfuerzos de corte no adquieran valores importantes que influyan en los resultados, en cambio, cuando esa luz es grande (en sección rectangular) existe peligro de que la probeta sufra flexión lateral (torsión). Se recomienda tomar como  $l_0 \geq 12d_0$  ó  $l_0 \geq 12h$

En cuanto a la forma de obtención, son:

- a) *Probetas fundidas con la pieza.*
- b) *Probetas fundidas separadamente de la pieza.*

En cuanto al mecanizado:

- a) *Probetas sin mecanizar o en bruto.*
- b) *Probetas mecanizadas o trabajadas.*

En general no deben poseer sopladuras ni rebabas que perturben el ensayo.

La norma IRAM 510 (ensayo de flexión para fundiciones de hierro), designa a las probetas con letras:

TIPO	$d_0$ (mm)	$l_0$ (mm)	$l_1$ (mm)
A	22 ± 1,5	300	375
B	30 ± 2,5	450	525
C	50 ± 2,5	600	675

Estos diámetros son valores para probetas en bruto o trabajadas, según sea la forma de obtención. Para obtención de las trabajadas podrán utilizarse piezas cuyo diámetro no exceda de: "A"-26 mm; "B"-34 mm; "C"-56 mm.

Los diámetros se medirán tomando dos direcciones ortogonales y calculando el promedio, con una precisión de 0,1mm.

La carga se aplicará en forma gradual y uniforme, de modo que la rotura se produzca en un tiempo de:

"A"-  $t > 15$  seg; "B"-  $t > 30$  seg; "C"-  $t > 45$  seg

## 5 DETERMINACIONES A REALIZAR EN EL ENSAYO

Conviene especificar:

1) Antes del ensayo:

- a) Norma a consultar
- b) Accesorios de la máquina de ensayo y escala de cargas
- c) Material
- d) Dimensiones  $d_0$ ,  $l_0$ ,  $l_t$ , y croquis de la misma

2) Durante el ensayo:

- a) En período elástico  $P_i$  - $f_i$  (5 valores),  $P_{MÁX}$ ,  $f_{MÁX}$
- b) Tipo de fractura con croquis.

3) Después del ensayo:

$$E = \frac{1 * P_{PROM} * l_0^3}{48 * f_{PROM} * Jx} \text{ donde } P_{PROM} \text{ y } f_{PROM} \text{ son los valores promediados de las determinaciones}$$

$$\sigma_{EF} = \frac{M_{MÁX}}{Wx} = \frac{\frac{P_{MÁX} * l_0}{4}}{\frac{\pi * d_0^3}{32}} = 2,5465 \frac{P_{MÁX} * l_0}{d_0^3}$$

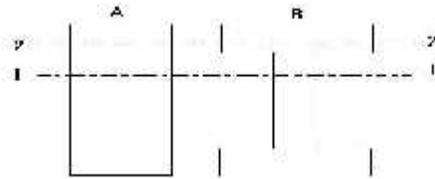
Como datos complementarios la norma DIN 50110 define: Factor de flexión =  $\sigma_{EF}/\sigma_{ET}$  (1,8 - 2,2)  
Rigidez de flexión =  $\sigma_{EF}/f_{MÁX}$  (6 - 9)

## 6 ANÁLISIS DE LOS VALORES DEDUCIDOS DEL ENSAYO DE FLEXIÓN

a) Si el ensayo se efectúa según el esquema de viga simplemente apoyada con una carga concentrada, el módulo "E" deducido en (4) no coincide con el calculado en ensayo de tracción; ello se debe a que en la deducción teórica de la ecuación no se ha tenido en cuenta el efecto del esfuerzo de corte y por ello el valor de "E" deducido por flexión es un poco menor que el obtenido por tracción, y esa diferencia dependerá de la luz entre apoyos y de las dimensiones de la probeta.

b) La deducción de la expresión (3) de " $\sigma_y$ " supone que las distintas fibras no sufren acción recíproca entre sí, o sea que cada fibra trabaja independientemente, con una tensión proporcional a su distancia al eje neutro, sin influencia de las deformaciones de las fibras adyacentes.

En realidad, el fenómeno es más complejo: cada fibra sufre una tensión proporcional a su distancia al eje neutro y por lo tanto, una deformación,  $\epsilon = \sigma/E$ ; esta deformación trae aparejada una contracción transversal,  $\epsilon_q = \epsilon/\eta$ , y como la fibra situada inmediatamente debajo de la considerada sufre una tensión menor (porque lo es su distancia al eje neutro) su contracción transversal también será menor, y como está íntimamente ligada a la fibra superior considerada, impedirá la libre deformación de ésta. Como deformaciones y tensiones están relacionadas, la tensión de la fibra considerada también será alterada.

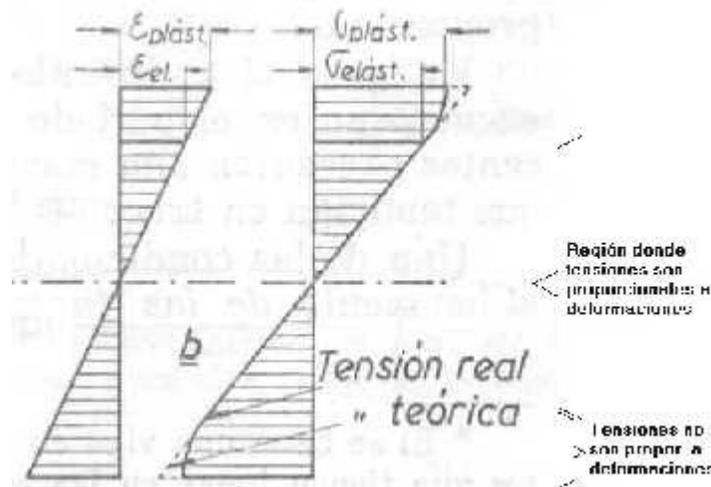


En este fenómeno influye la forma de la probeta: en (A) las fibra del nivel "2-2" sufrirán más que en (B) la influencia de las fibras "1-1" que se encuentran abajo, como se deduce de las formas de las probetas. Esta influencia hace que las flechas y resistencias obtenidas por cálculo no sean iguales a las experimentales.

c) En ensayos de flexión para conocer la tensión máxima de rotura, debe distinguirse entre materiales plásticos y frágiles. En el caso de los plásticos (ejemplo: aceros suaves) en el momento de la rotura las fibras que sufren mayores tensiones, o sea, las más alejadas del eje neutro, habrán pasado el límite de proporcionalidad y se encontrarán en la región del diagrama de las grandes deformaciones. Por lo tanto, aunque el diagrama de éstas sea rectilíneo, el de las tensiones toma la forma ya vista; de ahí que en la rotura no se verifican las hipótesis que sirvieron de base para establecer (1)  $\sigma_e = e \cdot Mf / J_x$ , y los valores obtenidos por flexión no coinciden con los obtenidos en los ensayos de tracción.

Con materiales frágiles la rotura se produce sin grandes deformaciones y por lo tanto sí valen las hipótesis planteadas para deducir (1), hasta alcanzar la rotura.

d) Otro fenómeno que puede influir sobre el resultado es el rozamiento de la probeta sobre sus apoyos; al deformarse la pieza debe poder deslizarse libremente sobre los apoyos, ya que si existe rozamiento se introducen fuerzas suplementarias no previstas en el cálculo.



## ENSAYO DE CHOQUE

### 1 GENERALIDADES

Los ensayos estáticos y los de fatiga no abarcan todas las situaciones que se presentan en la práctica. A veces es necesario determinar la resistencia de los materiales frente a sollicitaciones de tipo instantáneo, como es el choque que origina una masa al caer desde cierta altura, produciéndose un impacto localizado en esa zona restringida del cuerpo contra la cual se produjo el impacto.

El objeto del ensayo de choque o impacto es determinar la capacidad del material para absorber y disipar la energía generada por el choque, buscando conocer qué valor es necesario para romper el material en condiciones definidas.

El ensayo de choque no reproduce las condiciones de las cargas de impacto en servicio, sino que constituye de por sí un ensayo que da la resistencia de una probeta, generalmente entallada, fracturada por una carga que actúa bruscamente.

Es por lo tanto un ensayo diferente de los otros ensayos mecánicos “que da un índice de fragilidad de los materiales”, por ejemplo aceros, cuando se sospecha la presencia de elementos fragilizantes, como el fósforo y el azufre. De ahí que sirve para aceptar o rechazar materiales iguales de diferentes lotes una vez establecidas las relaciones con el comportamiento confiable en servicio.

El problema de choque es importante en el diseño y dimensionamiento de máquinas con partes móviles pesadas que realizan grandes recorridos o a velocidades notables. Ello ocurre en equipos de perforación por percusión, rieles ferroviarios, órganos de motores, donde sólo se podrá conocer su comportamiento frente a esas cargas si se acude a ensayos en escala natural. Estos se realizan muy esporádicamente, pero cuando se trata de controlar los materiales para tales elementos se recurre a *ensayos normalizados, donde se mide la energía de choque hasta la rotura del material y no se hacen determinaciones de deformaciones*. Como es un ensayo eminentemente tecnológico, las probetas vienen provistas con ranuras o entalladuras para provocar la rotura en la sección disminuida, midiendo la energía de rotura ya mencionada.

El objeto de las entalladuras obedece al hecho de que a temperaturas normales una probeta de un metal dúctil – por ejemplo acero de bajo % de carbono – sólo se dobla por efecto de una carga instantánea; en cambio la presencia de la entalladura obliga a su fracturación. Ello se debe a la concentración de tensiones que producen en sus inmediaciones, y esa tendencia a convertir una fractura dúctil en una frágil por la presencia de la entalladura se llama “*sensibilidad a la entalladura*” y a esos ensayos se los conoce como “*ensayos de resiliencia*”.

Son necesarias tres condiciones para una fractura frágil:

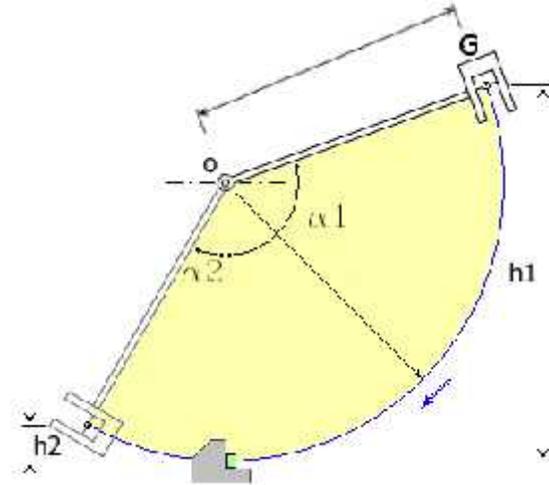
- 1) Estado triaxial de tensiones.
- 2) Temperaturas bajas.
- 3) Velocidades elevadas de carga o de deformación.

Las dos primeras condiciones son las responsables de la mayoría de las fracturas frágiles en servicio, y como estos factores se intensifican a velocidades de carga elevadas, es que se usan los “ensayos de resiliencia” para determinar la propensión de los materiales a la fractura frágil.

## 2 MÁQUINAS DE ENSAYO

Se usan máquinas llamadas “martillos pendulares”, que constan de una base robusta que contiene al yunque donde se ubican los apoyos de la probeta. Un bastidor vertical adosado a la base, soporta la masa pendular que gira con un mínimo roce en soportes a bolillas. Al costado del bastidor se halla una escala que mide la energía potencial del péndulo en cada posición, y por lo tanto también la energía gastada en la rotura de la probeta.

El principio de funcionamiento responde al esquema donde un peso “G” asegurado a una barra que puede girar libremente sobre un eje “O”, puede ser elevado a una altura “h1” desde su posición vertical de reposo, que también puede indicarse con “ $\alpha_1$ ”.



Si en esas condiciones se la deja caer, pasará en la primera oscilación a la posición opuesta, alcanzando una “h'1” o un “ $\alpha'1$ ”; la energía de la primera posición será igual a la del final de su carrera.

$$E_1 = E'_1 = G \cdot h_1 = G \cdot h'_1$$

Ahora si en el punto “P” situado sobre la vertical del desplazamiento del péndulo se coloca una barra de un material, la masa al chocar producirá su rotura y si la energía que posee el péndulo es mayor que la necesaria para lograrla, proseguirá su trayecto elevándose hasta una altura “h2” indicada por el ángulo “ $\alpha_2$ ”. El trabajo gastado en romper la barra será la diferencia entre la energía inicial y la que posee al final de la carrera:

$$E_0 = (E_1 - E_2); E_1 = G \cdot h_1; E_2 = G \cdot h_2$$

$$h_1 = OP - OA; OP = r; OA = r \cdot \cos\alpha_1; h_1 = r - r \cdot \cos\alpha_1 = r \cdot (1 - \cos\alpha_1)$$

$$h_2 = OP - OB; OP = r; OB = r \cdot \cos\alpha_2; h_2 = r - r \cdot \cos\alpha_2 = r \cdot (1 - \cos\alpha_2)$$

$$E_0 = G \cdot r \cdot (1 - \cos\alpha_1) - G \cdot r \cdot (1 - \cos\alpha_2)$$

$$E_0 = G \cdot r \cdot (\cos\alpha_2 - \cos\alpha_1)$$

## 3 MÉTODO DE CHARPY:

Es un método para determinar la resistencia a la flexión por choque en probetas entalladas de materiales metálicos, que reciben el impacto en la cara opuesta de la entalladura.

La norma IRAM 106, establece que:

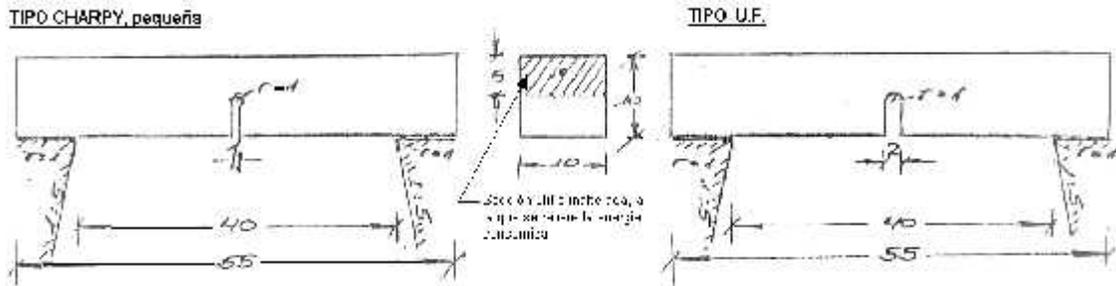
- 1) La temperatura de la probeta deberá permanecer en  $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ .
- 2) Las probetas se extraerán del material a ensayar, evitando modificaciones en su estructura, ya sea por calentamiento o por endurecimiento en frío.

Sus dimensiones serán:

Longitud:  $(55 \pm 1)$  mm; ancho = altura =  $(10 \pm 0,1)$  mm.

Las entalladuras en la sección media tendrán las caras bien paralelas, evitando la aparición de estrías u otros defectos. Según las formas y dimensiones de las entalladuras se tienen:

2-a Probetas francesas:

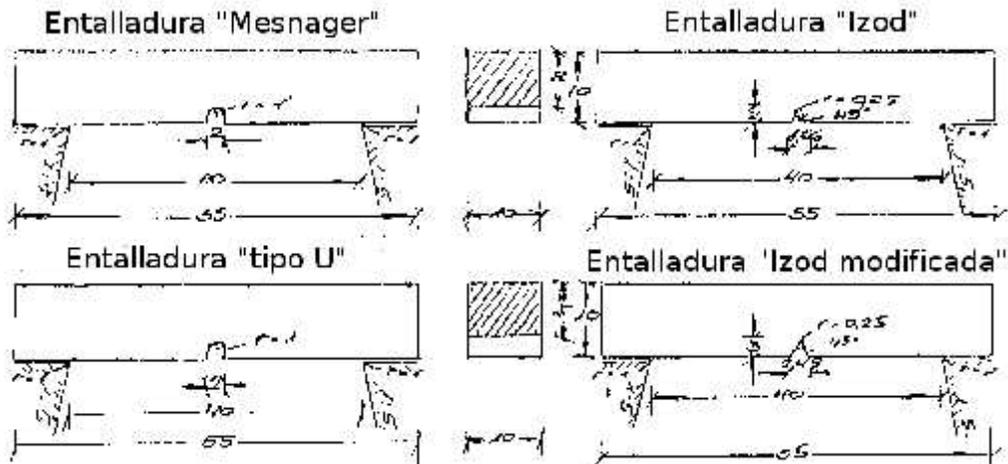


2-b Probetas alemanas:

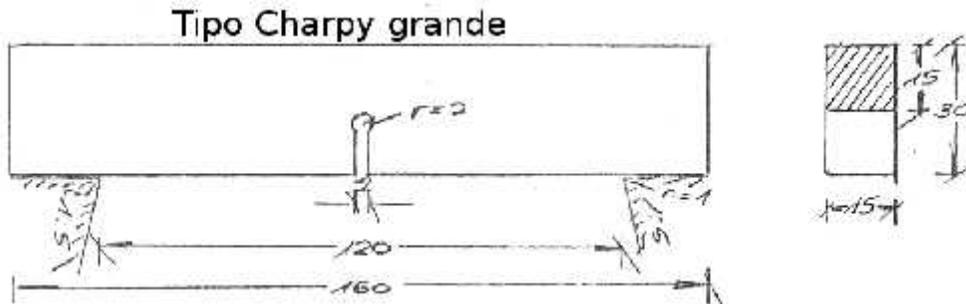
Se emplean en materiales que tienen menos resistencia a la flexión por choque.

Las más comúnmente usadas son:

- Entalladura "Mesnager"
- Entalladura "Izod"
- Entalladura "Tipo U"
- Entalladura "Izod modificada"



Excepcionalmente se emplean probetas "Charpy tipo grande" de 160 x 15 x 30, que exigen máquinas de 75 Kgf.



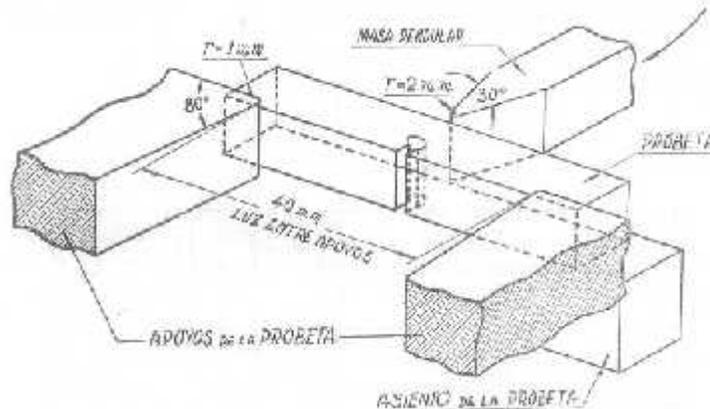
- 3) La máquina a emplear tiene un martillo pendular de 20 kgf de peso, que se deja caer desde una altura de 1,50 m. Dicho martillo está terminado en una cuchilla cuyo espesor es de 16 mm y sus caras forman un ángulo de 30° con un filo redondeado de  $r = 2$  mm.

Se vio que la distancia entre apoyos es de 40 mm, los bordes de éstos son redondeados con  $r = 1$  mm y las paredes tienen una inclinación de 1:5.

Cuando el péndulo esté suspendido libremente, el martillo debe tocar levemente con su extremo redondeado a la probeta.

La fricción entre sus partes deberá ser mínima de manera que para la marcha en vacío, se admite una diferencia del 1% del valor angular para sus posiciones extremas.

La velocidad del martillo en el impacto será de (5~6) m/seg y el trabajo correspondiente no podrá exceder los 30 kgfm.



Ambos valores se calculan con:

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot r \cdot (1 - \cos \alpha)}$$

$$E = G \cdot r \cdot (1 - \cos \alpha)$$

$\cos \alpha = 1$  para  $\alpha = 0^\circ$

$g$ : aceleración de la gravedad ( $m/seg^2$ )

$r$ : distancia eje rotación al centro de la cuchilla (m).

$G$ : peso actuante (kgf), obtenido colocando el péndulo en posición tal que el plano horizontal que contiene al eje de rotación coincide con el borde del martillo y éste descansa sobre el plato de la balanza

- 4) El procedimiento prevee colocar la probeta sobre los apoyos, de modo que el centro de la entalladura esté en el mismo plano vertical que recorre el centro del martillo, el cual golpeará la probeta en la cara opuesta de la entalladura.

La probeta deberá romperse de un solo golpe de martillo, y el trabajo para su rotura será:  $E_0 = (E_1 - E_2) = G \cdot r \cdot (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1)$ .

La resistencia a la flexión por choque o resiliencia dinámica está dada por:

$$K = \frac{E_0}{S}$$

$E_0$ : trabajo de impacto para rotura de la probeta de un solo golpe.

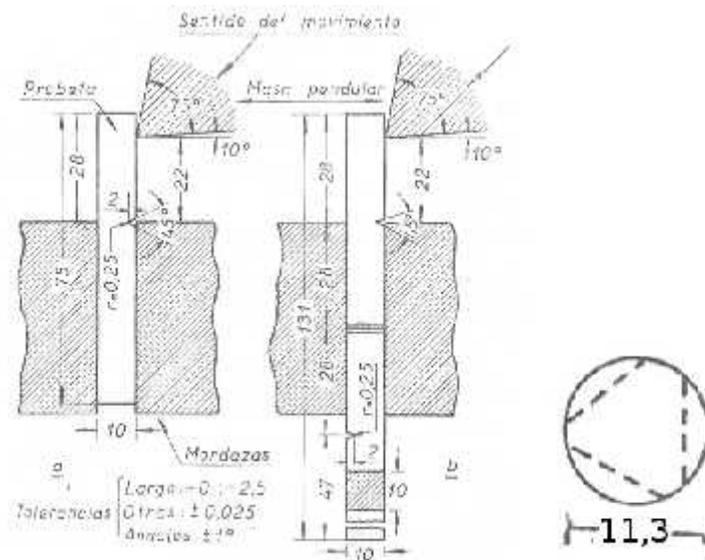
$S$ : sección útil de la probeta, medida en el plano de simetría de la entalladura.

#### 4 MÉTODO DE IZOD:

Es otro método para determinar la resistencia a la flexión por choque en probetas entalladas de materiales metálicos, empotradas, que reciben el impacto en la misma cara de la entalladura. Se acostumbra a operar con:

- 1) Temperatura de la probeta ( $20 \pm 1$ )°C
- 2) Las probetas se extraerán de la manera ya descrita, y la más comúnmente usada es una barra prismática cuadrangular de 130 mm de longitud y sección de 10 mm de lado, con tres entalladuras, en otras tantas caras, separadas 25 mm entre sí, que se ensayan sucesivamente a medida que se va separando cada trozo. También pueden ensayarse probetas cilíndricas de 11,3 mm de diámetro, de 130 mm de longitud, con entalladuras de 3,3 mm de profundidad, ubicadas en tres planos desfasados  $120^\circ$  entre sí, que se ensayan de la misma forma mencionada anteriormente (ambas secciones tienen áreas equivalentes).

En todos los casos a las probetas se las sujeta verticalmente hasta el plano de la entalladura, comportándose como una viga en voladizo que es golpeada a 22mm de dicho empotramiento.



- 3) La máquina puede ser la ya mencionada, colocándole una masa de 25,250 Kg. (60 libras) con una altura de caída de 0,610 m (2 pies), cambiándole las mordazas para conseguir el empotramiento.

El trabajo máximo no podrá exceder de 15,402 Kgfm., con una velocidad de impacto de (3~4) m/seg.

- 4) El procedimiento es bastante similar al mencionado, con la salvedad importante de que la resistencia a la flexión por choque o resiliencia dinámica es igual al trabajo o energía de impacto para rotura de la probeta de un solo golpe:

$$K = E_0$$

## 5 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS:

Lo mismo que para otros ensayos, conviene especificar:

1) Antes del ensayo:

- a) Norma a consultar.
- b) Material.
- c) Dimensiones de la probeta, con forma de entalladura y croquis de la misma.

- d) Características de la máquina de ensayo (“G” – “r” – “ ” – “h” – “E<sub>1</sub>” – “v”).
- 2) Durante el ensayo:

- a) Energía de impacto absorbido. (“E<sub>0</sub>”).
- b) Tipo de fractura con croquis de la misma.

- 3) Después del ensayo:

- a) Cálculo de la resiliencia dinámica (Si  $K < 10 \text{ Kgfm/cm}^2$  se expresa con una cifra decimal, si  $K \geq 10 \text{ Kgfm/cm}^2$  se indica en números enteros.)
- b) comparación con valores normales.

### 5-a Valores normales para ciertos materiales

Con péndulo Charpy y probeta “Mesnager” (“U” de 2 mm profundidad), se tiene:

- |  |                            |
|--|----------------------------|
| a) En aceros dulces                          | $K = 30 \text{ Kgfm/cm}^2$ |
| b) Para aceros de elevado % C                | $K = 5 \text{ Kgfm/cm}^2$  |
| c) En aceros con $E_T = 100 \text{ Kg/mm}^2$ | $K = 15 \text{ Kgfm/cm}^2$ |

Se puede dar una tabla de equivalencias aproximadas sólo a título ilustrativo:

Charpy “pequeño” Kgfm/cm <sup>2</sup>	Charpy “U.F.” Kgfm/cm <sup>2</sup>	Izod Libras.pie
2	1,05	4
4	3	10
6	5	32
8	7	44
10	7,5	55
14	11	65
16	12	74
18	12,5	82
20	14	87
22	15	94
24	16	97
26	17	101

## 6 INFLUENCIA DE LAS VARIABLES IMPORTANTES:

### 1 De la Temperatura

El ensayo de choque sobre probetas entalladas es más informativo cuando se realiza sobre un intervalo de temperaturas, para poder determinar la transición de fractura dúctil a frágil. En las curvas del gráfico se aprecia que la energía absorbida disminuye al bajar la temperatura, aunque en la mayoría de los casos no hay un tránsito brusco a una temperatura bien definida de la zona de alto valor de resiliencia (fracturas dúctiles) a la zona de bajo valor de resiliencia (fracturas frágiles), por lo que resulta difícil determinar con precisión “la temperatura de transición”.

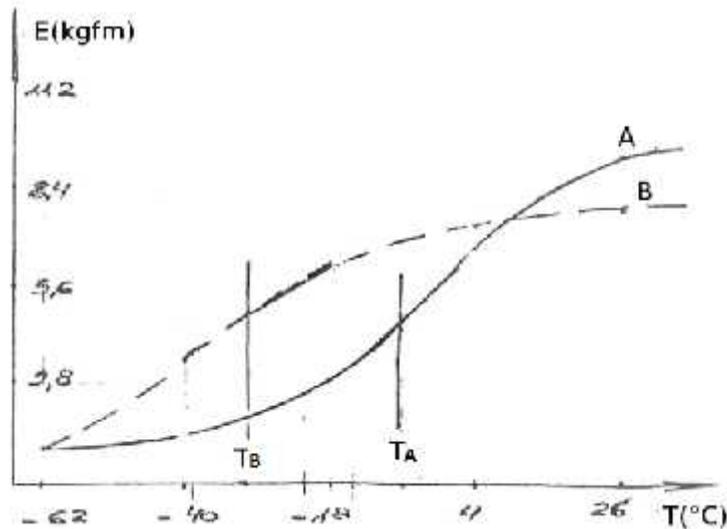
Del gráfico se desprende que no puede confiarse en ensayos realizados a una sola temperatura: el acero “A” es más resistente al choque sobre probeta entallada, a temperatura ambiente, pero su tránsito a frágil ocurre a una temperatura más elevada que el acero “B”.

Debe preferirse el material de temperatura de transición más baja, o sea “B”.

Los criterios empleados para determinar la temperatura de transición se basan en:

- a) Valor de la energía absorbida, con probeta “Charpy” y entalladura “Izod” debe ser  $E_0 = (1,4 - 2) \text{ Kgfm}$ .

- b) Cambio de aspecto de la superficie de fractura, cuando al descender la temperatura el aspecto de la fractura cambia desde la fibrosa de cizalladura a la granular de despegue, a través de una sucesión de fracturas de tipo mixto; es frecuente considerar como temperatura de transición aquella que corresponde a un 50% de fractura fibrosa.
- c) Variación de la ductilidad medida por contracción en el fondo de la entalladura, definiéndose como temperatura de transición a aquella que corresponde a un 1% de contracción lateral en el fondo de la entalladura.

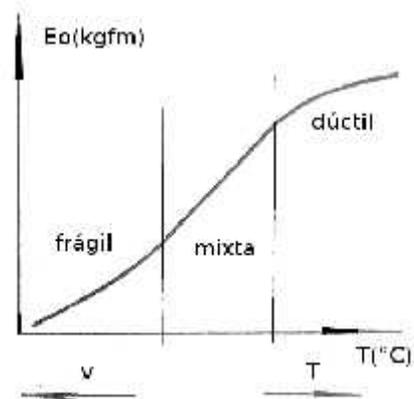


De estos tres criterios, el "b)" da una temperatura de transición mayor que "a)" y "c)".

**2 De la velocidad de ensayo o impacto**

El aumento de la velocidad de ensayo produce una disminución de la resiliencia, es decir que influye en sentido contrario a la temperatura. Por ejemplo en aceros dulces.

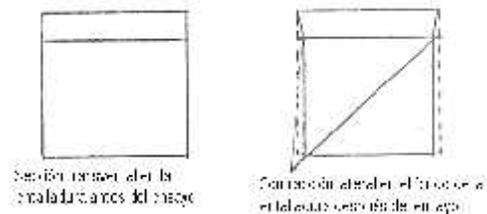
Velocidad de Impacto "v" (m/seg)	Trabajo fractura E <sub>0</sub> (Kgfm)
2,7	4,0
4,9	3,8
6,1	2,8
8,8	2,0



**3 Del tamaño de la probeta o de su sección transversal:**

La fractura frágil provoca más dificultades a medida que aumenta el tamaño de la pieza, debido a factores metalúrgicos y geométricos: probetas de diferente tamaño, idéntica estructura y entallas geoméricamente semejantes muestran dicho efecto.

A cierta temperatura pueden romper con fragilidad completa las más grandes, se mantendrán dúctiles las más pequeñas y las intermedias variarán de frágiles a dúctiles. La temperatura de transición más elevada o la menor tensión de fractura de las probetas o piezas grandes se debe a dos causas:



pueden contener estados de tensiones más desfavorables por efecto de la concentración de tensiones y también pueden almacenar mayor cantidad de energía elástica, y cuanto más grande sea la energía

disponible, se formará más fácilmente la fisura que se propagará en forma incontrolable hasta la rotura.

Por ejemplo en aceros dulces

Probeta Charpy grande:  $K = (35 - 40) \text{ Kgfm/cm}^2$

Probeta Charpy pequeña:  $K = (15 - 20) \text{ Kgfm/cm}^2$

#### 4 De la entalladura:

4-a) La profundidad influye más en aceros dúctiles donde la resiliencia varía en forma lineal o menor a partir de los 2 mm; en los aceros más frágiles no tiene influencia.

4-b) El ángulo influye también, en sentido tal que cuando éste aumenta, lo hace también la resiliencia; por ejemplo en aceros dulces para probetas Charpy con entalladura Izod:

Ángulo	Resiliencia (Kgfm/cm <sup>2</sup> )
15°	6,4
45°	7,1
60°	11,5
75°	18,3

4-c) La agudeza de la base hace que la energía de ruptura disminuya con ella, debido a la concentración de tensiones, se adopta como valor normal  $r = 0,25 \text{ mm}$ . Para un acero Cr-Ni en probeta Charpy con entalladura Izod de 2 mm de profundidad:

- |                                     |                          |
|-------------------------------------|--------------------------|
| 1) Sin curva de enlace              | $E_0 = 3,0 \text{ Kgfm}$ |
| 2) Con enlace $r = 0,25 \text{ mm}$ | $E_0 = 3,5 \text{ Kgfm}$ |
| 3) Con enlace $r = 1,00 \text{ mm}$ | $E_0 = 5,6 \text{ Kgfm}$ |

## 6 FRACTURA

La fractura es la separación o fragmentación de un cuerpo sólido en dos o más partes por efecto de tensiones actuantes en él, y esa fractura es el resultado de dos procesos: el de iniciación de las fisuras y el de propagación de las grietas.

En un material metálico o cristalino pueden ocurrir dos formas de fractura:

- 1) Por separación, despegue o decohesión;
- 2) Por corte, cizallamiento o deslizamiento.

La fractura final puede ocurrir después de poca o mucha deformación plástica: cuando hay poca o ninguna deformación plástica, caracterizada por una rápida propagación de grietas, se dice que "la falla es frágil". Una falla frágil va acompañada de una fractura por separación y esa superficie presenta apariencia granular o cristalina; la energía absorbida es pequeña ya que se gastó muy poco trabajo en la deformación plástica.

Cuando una gran deformación plástica se produce antes de la rotura, "la falla es dúctil"; la fractura que la acompaña es por "corte o cizallamiento", la superficie presenta una apariencia fina y sedosa y la energía absorbida es bastante alta debido a la gran deformación.

## ENSAYO DE DUREZA

### 1 INTRODUCCIÓN

La dureza de un material es un concepto relativo, ya que es posible afirmar que un material es más duro que otro pero no existe una medida o patrón único para definir la dureza cuantitativamente, si no es mediante una convención preestablecida.

Por la misma razón resulta obvio que los métodos y aparatos para determinar la dureza sean tan diversos.

Se ha definido en un comienzo la dureza de un material como la propiedad, que éste posee para rayar otro material, sin ser rayado por aquél. De ese modo se puede establecer una escala de dureza, y es Mohs quien ha dado una nómina de diez materiales, numerados de 1 a 10, en que la dureza de los mismos aumenta a medida que se progresa con la numeración.

- 1) talco
- 2) sal gema, yeso
- 3) calcita
- 4) fluorita
- 5) apatita
- 6) feldespato
- 7) cuarzo
- 8) topacio
- 9) corindón
- 10) diamante



Esta escala ha sido modificada sobre la base del desarrollo que se produjo en la fabricación de sustancias abrasivas sintéticas muy duras. Se han intercalado así, entre el cuarzo y el diamante, nuevos materiales, con lo cual se obtiene la siguiente escala, que constituye la extensión de la escala de Mohs de acuerdo con Ridgway, Ballard y Bailey.

- 1) talco
- 2) yeso
- 3) calcita
- 4) fluorita
- 5) apatita
- 6) feldespato
- 7) sílice puro vítreo
- 8) cuarzo
- 9) topacio
- 10) granate
- 11) carburo de tántalo
- 12) carburo de tungsteno
- 13) carburo de silicio
- 14) carburo de boro
- 15) diamante

Esta escala implica que el método para determinar la dureza consiste en el rayado del material en estudio por alguno de los materiales de la escala.

Dentro de los procedimientos actualmente en uso se emplea el diamante, al que se da una forma cónica o piramidal en el extremo. Sobre esa punta se hace incidir una carga, por lo general de 20g, bajo la cual se hace deslizar la punta de diamante normalmente a la superficie. Después de haber producido unos diez trazos, se mide el ancho de los mismos para luego calcular el ancho promedio.

El procedimiento para medir la dureza por rayado se utiliza en casos aislados habiéndose desarrollado otros métodos que se aplican con grandes ventajas en la industria por los beneficios que reportan tanto desde el punto de vista técnico como económico.

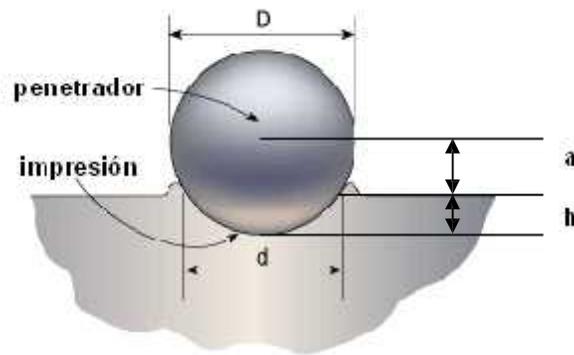
La mayor parte de esos métodos se basan en la resistencia que opone un cuerpo para dejarse deformar por otro más duro, que ejerce una presión de tal magnitud que produce una deformación de características netamente plástica en el primero. La magnitud de esa deformación, realizada en condiciones perfectamente normalizadas, da un índice de la dureza del cuerpo ensayado.

Seguidamente se describen algunos de los métodos en uso para el ensayo de dureza de los materiales, en los cuales se emplean técnicas especialmente desarrolladas y equipos diseñados para ese fin.

## 2 DUREZA BRINELL

El método Brinell para determinar la dureza de los materiales metálicos, o de las piezas confeccionadas con dichos materiales, se basa en la resistencia que opone el cuerpo examinado para dejarse penetrar por otro más duro llamado penetrador, impelido por una carga determinada. En todos los casos la forma del penetrador es esférica.

El procedimiento consiste, esencialmente, en apretar gradualmente sobre los materiales metálicos una bolilla dura, de diámetro  $D$ , con la fuerza  $F$ , y en medir, después de suprimida ésta, el diámetro  $d$  de la impresión.



El número de Brinell (H), que expresa la dureza, es la relación de la carga  $P$ , en kilogramos, a la superficie del casquete esférico de la impresión, en milímetros cuadrados.

$$H = \frac{\text{Carga}}{\text{Superficie del Casquete Esférico}} = \frac{P}{S} = \frac{P}{\pi D h}$$

Para evitar errores por lecturas rápidas es más conveniente calcular la dureza Brinell a partir del diámetro  $d$  de la impronta:

$$h = \frac{D}{2} - a \quad ; \quad a = \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{D^2 - d^2}{4}} = \frac{1}{2}\sqrt{D^2 - d^2}$$

$$h = \frac{D}{2} - \frac{1}{2}\sqrt{D^2 - d^2} = \frac{1}{2}(D - \sqrt{D^2 - d^2})$$

Y se obtiene:

$$HB = \frac{2P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \left( \frac{\text{daN}}{\text{mm}^2} \right)$$

En la que:

- P: carga aplicada a la bolilla en kilogramos
- D: diámetro de la bolilla en milímetros

- $d$  : diámetro de la impresión en milímetros
- HB: número de dureza Brinell en kilogramos por milímetro cuadrado

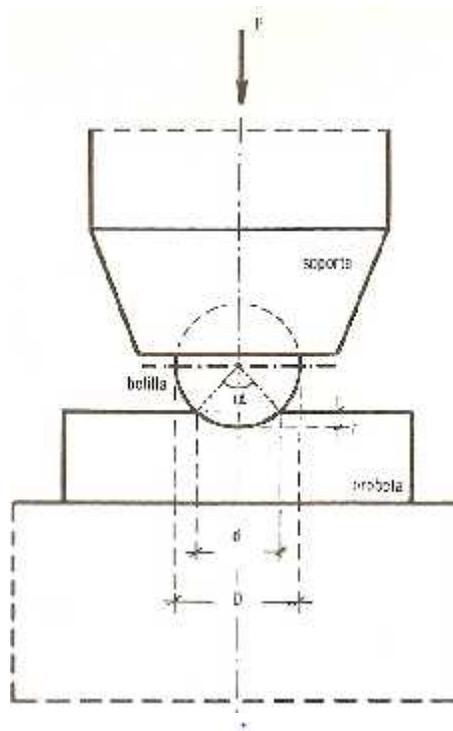
En general HB está dado en la daN/mm<sup>2</sup>, por esto la dureza suele indicarse tan sólo mediante el valor numérico.

El modo de operar y los requisitos que se deben observar para un ensayo Brinell están contenidos en la norma IRAM 104.

### Ley de semejanza para el ensayo Brinell

La norma IRAM 104 establece límites para el diámetro de la impresión  $d$  en un cierto porcentaje del diámetro de la bolilla del penetrador. Pero esa limitación nada dice con respecto a una ley de semejanza que permita comparar diversos ensayos Brinell entre sí cuando los mismos se efectúan con bolillas de distinto diámetro.

Esa semejanza queda asegurada si todas las impresiones Brinell se efectúan manteniendo constante el ángulo  $\alpha$  en todas ellas.



$$HB = \frac{P}{\pi D \left( \frac{D}{2} - \frac{D}{2} \cos \frac{\alpha}{2} \right)} = \frac{P}{\pi D^2 \operatorname{sen}^2 \frac{\alpha}{4}}$$

La constancia de  $\alpha$  impone para la igualdad de las durezas HB

$$\frac{P}{D^2} = \text{cte} = k$$

El valor de la constante  $k$  se ha determinado experimentalmente para cada material.

### Penetradores

Los penetradores más empleados en el ensayo de dureza Brinell son los de 10, 5 y 2,5 mm. A medida que los metales son más duros, es necesario recurrir a penetradores de menor diámetro, puesto que éstos se pueden confeccionar con una dureza mayor para que no sufran los efectos del aplastamiento. Es así que excepcionalmente se utilizan penetradores de 1,25 mm y 0,625 mm de diámetro.

### Determinación de la dureza Brinell

Para determinar la cifra de dureza Brinell se debe disponer de una máquina para aplicar la carga, del penetrador esférico correspondiente y de un cronómetro para medir el tiempo de duración del ensayo, de acuerdo con lo proscripto por las normas.

Tratándose de las cargas más elevadas, 3 000 daN y 750 daN, es posible recurrir a cualquier máquina de ensayo de tipo universal, ya que éstas poseen el accesorio adecuado para los penetradores de 5 mm y 10 mm.

En general, se recurre a máquinas diseñadas especialmente para ese tipo de ensayo, las que no sólo permiten operar con toda la gama de penetradores y de cargas, sino que también admiten más de un tipo de ensayo de dureza, tales como los de Brinell y Vickers, Brinell y Rockwell, Vickers, Knoop y Grodzinski, etc.



La figura muestra un durómetro que permite realizar el ensayo Brinell. En esa fotografía se distinguen las siguientes partes: (a) plataforma para el ensayo de las probetas, cuya altura puede regularse con el volante que desplaza el tornillo; (b) penetrador intercambiable; (c) selector de la carga; (d) palanca que hace incidir la carga; (e) visor sobre el que se proyecta la impresión, la que se mide con el auxilio del tornillo micrométrico, con cuyo movimiento se produce la coincidencia de los trazos con los bordes de la impresión.

En piezas curvas, en que el radio de la probeta no sea menor que 25 mm, el diámetro de la impresión se puede tomar igual al promedio de los diámetros máximo y mínimo. Para radios menores se prepara una superficie plana en el lugar donde ha de producirse la impresión.

#### Indicación de la dureza Brinell

Se calcula la dureza Brinell sobre la base de la carga  $P$  aplicada sobre el penetrador, que ha producido una impresión de diámetro  $d$ .

Si bien para la mayoría de los ensayos Brinell el tiempo de duración del ensayo es de 30 segundos, hay excepciones a esa disposición que hacen necesario consignar en el informe el tiempo que ha durado la prueba.

Por esa razón, para identificar de un modo completo el ensayo efectuado se utiliza el símbolo "HB", al que siguen tres números que indican sucesivamente el diámetro de la bolilla del penetrador en mm, la carga en daN y el tiempo de duración del ensayo en segundos.

Así, por ejemplo, si un ensayo de dureza Brinell con  $D = 10$  mm,  $P = 3\ 000$  daN y  $t = 30$  s arrojó la cifra 185, el resultado se expresa con:

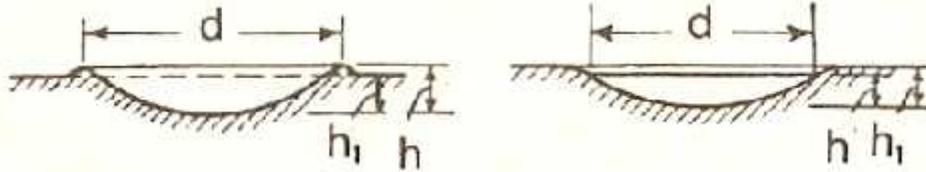
$185\ HB_{10/3000/30}$

#### Determinación de la dureza Brinell sobre la base de la profundidad de la penetración

Si bien desde el punto de vista teórico la cifra de dureza Brinell es la misma tanto si se la determina sobre la base del diámetro  $d$  de la impresión o de la profundidad  $h$  de la misma, en la práctica se comprueba una disparidad bastante notable entre ambas.

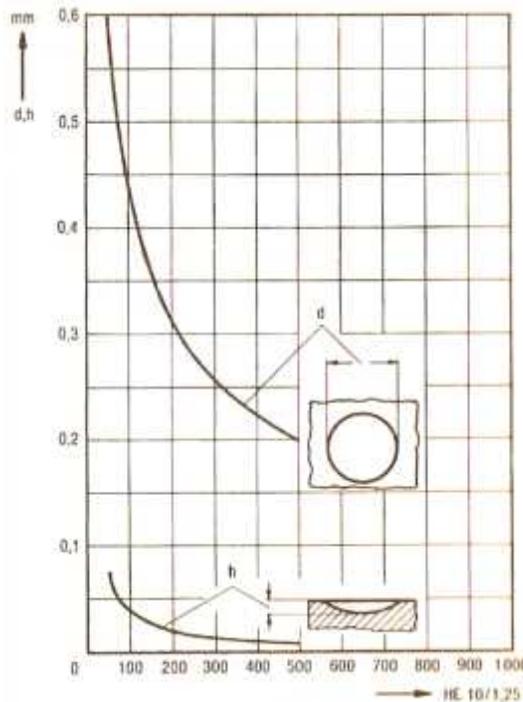
Ello se debe al hecho de que durante la penetración de la bolilla en el metal examinado se produce un reborde o resalte que incide sobre el valor del diámetro  $d$ , y que el medidor de profundidad no

toma en cuenta porque la profundidad observada  $h_1$ , determinada generalmente como movimiento relativo entre el soporte del penetrador y la probeta, y la profundidad real  $h$ , correspondiente al diámetro  $d$  de la impresión, no coinciden. Este efecto de resalte es más notorio en metales como el cobre, el acero dulce y otros metales blandos; en cambio, en los metales duros, como es el caso del acero al manganeso, el bronce fosforoso, etc., se origina una depresión en el borde de la impresión:



Como consecuencia de lo señalado, el diámetro de la impresión no depende tanto de ese fenómeno, por lo que da una cifra Brinell más uniforme. Por el contrario, la medición de  $h$  produce dispersiones en la cifra de dureza de  $\pm 7\%$ , siempre que la superficie de apoyo de las probetas sea trabajada; de lo contrario dicha dispersión puede llegar a  $\pm 9\%$ .

La siguiente gráfica permite apreciar que la exactitud de una cifra de dureza determinada sobre la base del diámetro de la impresión es mucho mayor que si se lo hace sobre la base de la profundidad de esa impresión. Ello surge de la forma de ambas curvas que relacionan  $d$  con  $HB$  y  $h$  con  $HB$ , en que esta última es mucho más achatada que la primera y, por lo tanto, menos exacta en cuanto a la apreciación de la dureza.



La medición de la dureza Brinell basada en la profundidad de la penetración sólo se utiliza para ensayos de series de piezas iguales, donde interesa investigar la uniformidad de la calidad más que la dureza en sí.

### Relación entre la dureza Brinell y la resistencia a la tracción

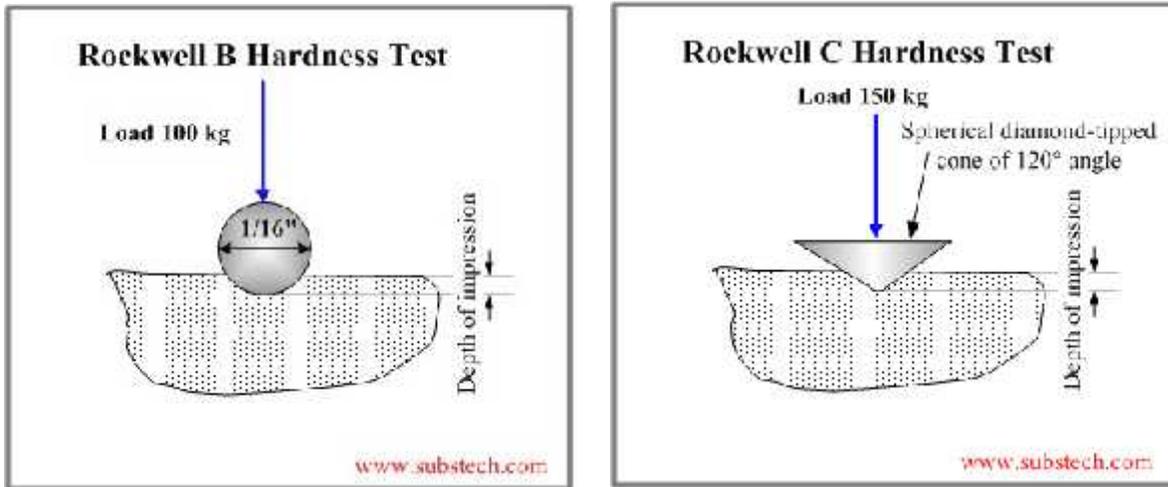
Dado que el ensayo Brinell está basado en una deformación netamente plástica del material, se ha establecido experimentalmente una relación que vincula la dureza así determinada con la resistencia a la tracción de los aceros. En la mayoría de los casos se verifica que para los aceros de bajo carbono:

$T$  3,5 HB 10/3000/30 (MPa)

La cifra así obtenida es solamente informativa y aproximada, ya que no reemplaza al ensayo directo de tracción.

### 3 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; en la dureza  $HR_C$ , dureza Rockwell 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 siguiente cuadro, 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.

#### Dureza Rockwell A B C D E F G H – Dureza Normal

Tipo	Penetrador	Carga (daN)			Material
		$G_0$	G	$G_1$	
A	cónico	10	50	60	aceros duros de poco espesor y extremadamente duros
B	Esférico (1/16")	10	90	100	aceros de bajo carbono, bronce en general para $HR_B < 100$
C	cónico	10	140	150	acero duro, acero templado, acero de aleación, en general $HR_C > 20$
D	cónico	10	90	100	acero duro, acero templado, acero de aleación, materiales con $HR_C > 20$
E	Esférico (1/8")	10	90	100	metales blandos, metales antifricción

F	esférico (1/16")	10	50	60	chapas de metales blandos
G	esférico (1/16")	10	140	150	aceros de bajo % carbono, bronce fosforosos, etc.
H	Esférico (1/8")	10	50	60	materiales blandos

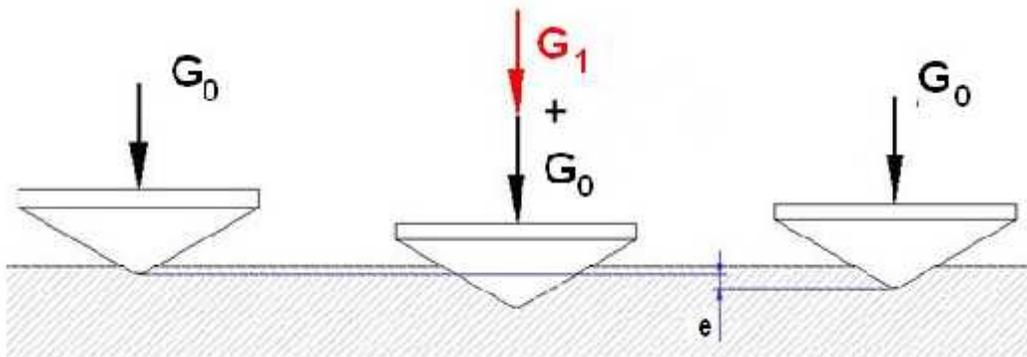
**Dureza Rockwell N T W X Y – Dureza Superficial**

N	cónico	3	12.27.42	15.30.45	acero endurecido, carburo de tungsteno u otras aleaciones duras
T	esférico	3	12.27.42	15.30.45	
W	esférico	3	12.27.42	15.30.45	materiales relativamente blandos, latones, bronce, aceros blandos, u otros materiales similares
X	esférico	3	12.27.42	15.30.45	
Y	esférico	3	12.27.42	15.30.45 J 1	

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

**Método de ensayo de dureza Rockwell para materiales metálicos**

El 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 de la penetración inicial.



El ensayo de dureza Rockwell normal es el 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.

El ensayo de dureza Rockwell superficial es el realizado con alguna de las siguientes escalas: N, T, W, X, e Y; se emplea otro 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 0,001 mm.

La 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. Mientras que la 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 aquella. Finalmente, la carga total es la suma de la carga inicial y adicional.

El número de dureza Rockwell (HR) es el número que expresa la dureza Rockwell y cuyo valor es:

$$HR = C - e$$

Siendo:

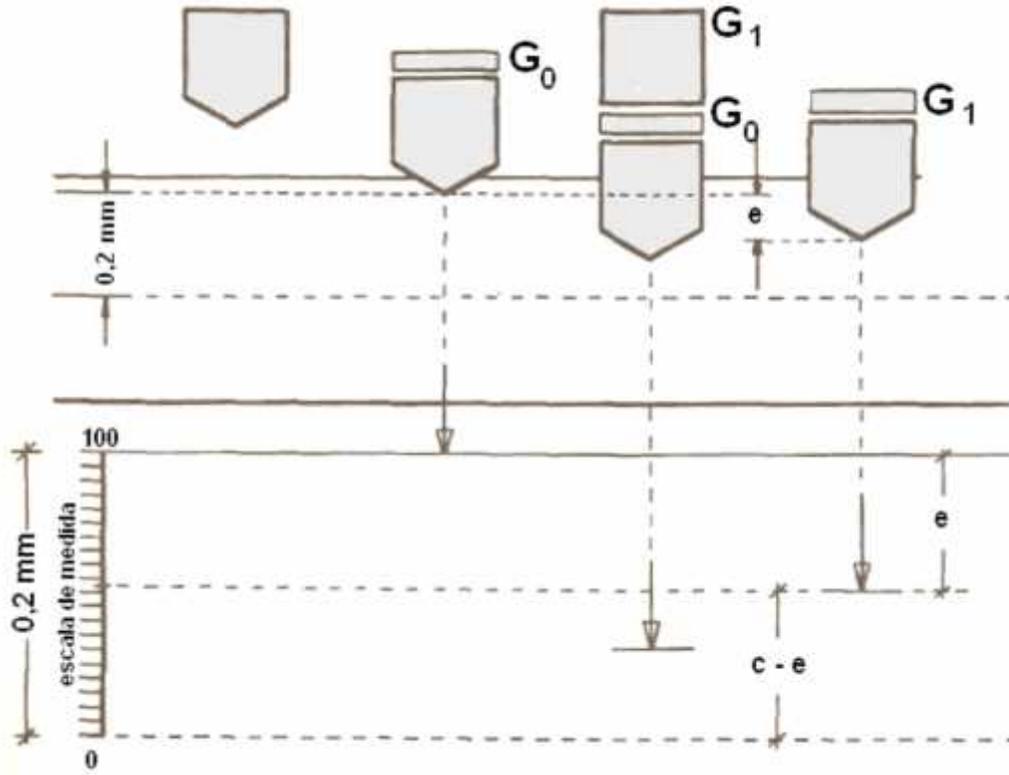
- C: el número cien o ciento treinta, según el tipo de penetrador usado, sea cónico o esférico respectivamente.
- e: el incremento de la penetración inicial, medido en una escala cuya unidad fijada arbitrariamente es 0,002 mm para la dureza Rockwell normal y 0,001 mm para la dureza Rockwell superficial.

El penetrador es la pieza que ejerce la presión sobre los materiales metálicos. Puede ser de dos tipos:

- *Penetrador cónico normal*: Es un cono con punta de diamante, de ángulo de cono del diamante de  $120^\circ \pm 0,1^\circ$ ; y radio del casquete esférico, en la punta del diamante de  $0,2 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$ .
- *Penetrador esférico*: Es una bolilla dura de acero de  $1,5875 \text{ mm}$  ( $1/16''$ ) de diámetro. Para la determinación de la dureza Rockwell y dureza Rockwell superficial de metales blandos, se pueden usar bolillas de diámetro ( $1/8''$ ),  $6,350 \text{ mm}$  ( $1/4''$ ) y  $12,700 \text{ mm}$  ( $1/2''$ ).

#### Procedimiento a seguir para realizar el ensayo

1. Se elige el penetrador a emplear en el ensayo, el que se coloca en el aparato para determinar la dureza Rockwell.
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 rojo de la izquierda u otro índice. En esa forma queda aplicada sobre la probeta una carga inicial:  $G_0 = 10 \text{ daN}$ .
4. Se gira el marco exterior del dial hasta hacer coincidir el origen con la aguja grande.
5. Se gira la manivela hacia atrás, con lo que queda liberada y aplicada la carga suplementaria:  $G_1 = 90 \text{ daN}$  si se utiliza el penetrador de acero de  $1/16''$  (Rockwell "B");  $G_1 = 140 \text{ daN}$  si se emplea el penetrador cónico de diamante (Rockwell "C")
6. Se observa la aguja grande hasta el instante en que se detiene. En ese momento se gira la manivela nuevamente a su posición inicial, con lo que queda suprimida la carga adicional  $G_1$ .
7. Se lee el número de dureza Rockwell sobre el dial de la escala correspondiente, ya sea "B" o "C". La cifra está dada por la diferencia de penetración producida por la carga inicial  $G_0$  y la carga máxima  $G_0 + G_1$ , una vez suprimida  $G_1$  tal como se indica en el esquema del ensayo. Este valor se llama "e".



### 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 sobre el dial una lectura menor.

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

Dureza Rockwell

$$HR_A = 100 - e$$

$$HR_B = 130 - e$$

$$HR_C = 100 - e$$

$$HR_D = 100 - e$$

$$HR_E = 130 - e$$

$$HR_F = 130 - e$$

$$HR_G = 100 - e$$

Dureza Rockwell Superficial

$$HR_N = 100 - e$$

$$HR_T = 130 - e$$

$$HR_W = 130 - e$$

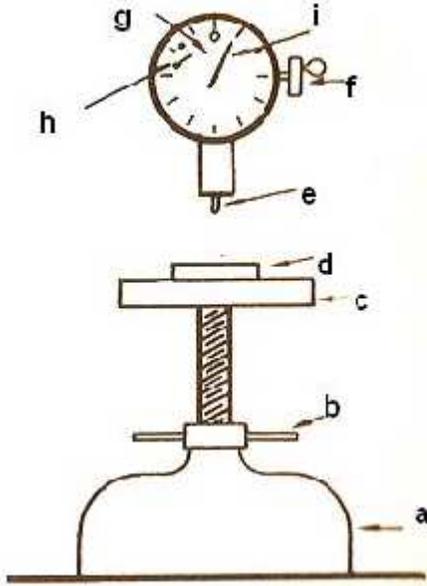
$$HR_X = 130 - e$$

$$HR_Y = 130 - e$$

El número obtenido se antepone al símbolo correspondiente. Si, por ejemplo, el número de dureza Rockwell  $HR_C$  obtenido es 44, la designación se hará como sigue: 44  $HR_C$ .

### Máquina para el ensayo Rockwell

El esquema de la siguiente figura indica los elementos básicos que integran una máquina manual para el ensayo de dureza Rockwell. Se distinguen sucesivamente: a) base; b) volante para subir el plato; c) de apoyo de la probeta; d) probeta; e) penetrador; f) manivela para aplicar la carga; g) dial que indica directamente la cifra de dureza; h) aguja que marca la carga inicial; i) aguja que indica la dureza.



Las máquinas para el ensayo de dureza Rockwell se fabrican generalmente para ese tipo de ensayo, pues exigen cargas muy distintas de las que se emplean para los ensayos Brinell y Vickers.

Además, el procedimiento de ensayo es diferente de los otros, por cuanto exige la aplicación de una carga inicial  $G_0 = 10 \text{ daN}$  en el caso de la dureza Rockwell normal y de  $3 \text{ daN}$  en el de la dureza superficial, lo cual no sucede con los otros métodos de ensayo. Eso implica disponer de un dial indicador especial para tener en cuenta esa carga.

#### 4 DUREZA VICKERS

La determinación de la dureza por el método Vickers se efectúa con un penetrador cuya forma es la de una pirámide cuadrangular, con un ángulo en el vértice  $136^\circ \pm 30'$  (Norma IRAM 106).

Los valores de la dureza Vickers coinciden prácticamente con los de la dureza Brinell hasta la cifra de 350, lo cual se debe al ángulo de  $136^\circ$  de la pirámide del penetrador Vickers, cuyas aristas son tangentes al penetrador esférico Brinell considerando un diámetro de la penetración  $d = 0,375 D$ , que es el valor medio de  $d = 0,25 D$  y  $d = 0,50D$ .

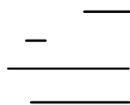
Para valores mayores de 350 HB 30, las cifras Vickers son inferiores a las Brinell.

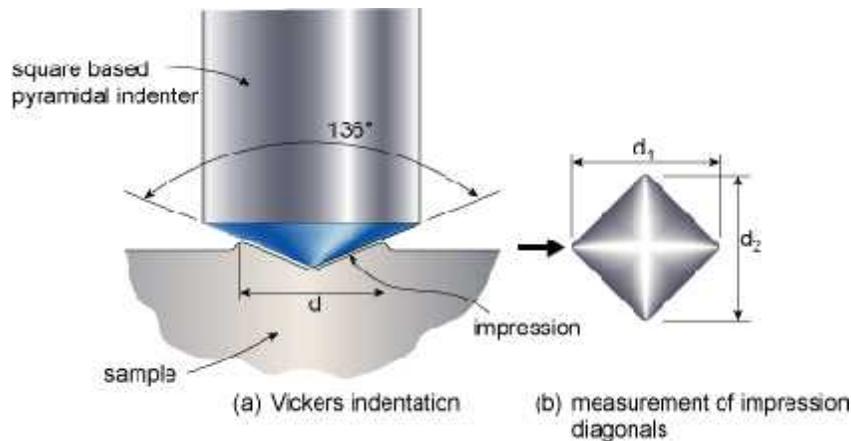
Al igual que en el método Brinell, la cifra de dureza Vickers, HV, se obtiene como cociente entre la carga aplicada P y la superficie S de la impresión que deja el penetrador, constituido por una punta de diamante.

$$HV = \frac{P}{S} = \frac{2P}{4la}$$

$$a = \frac{l}{2 \operatorname{sen} 68^\circ}$$

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





La carga  $P$  se mide en daN (kgf) y la diagonal  $d$  en mm. Si la diagonal se da en  $\mu\text{m}$ , el coeficiente multiplicativo de  $P$  debe tomarse igual a 1 854,4.

Las dos diagonales  $d_1$  y  $d_2$  de la impresión piramidal producidas por la carga  $P$  se miden con un microscopio. Para la fórmula de HV se toma el promedio  $(d_1 + d_2)/2 = d$ .

Si en lugar de medir la diagonal de la impresión se determina la profundidad  $h$  de la misma, la

$$HV = 0,038 \frac{P}{h^2}$$

dureza se calcula con la expresión:

Como en el caso de la dureza Brinell, cuanto mayor es la carga aplicada tanto más exacta residía la cifra de dureza determinada sobre la base de la diagonal  $d$ .

Para cargas  $P$  menores de 5 daN, la ley de similitud es más complicada. En ese caso se requieren máquinas especiales para aplicar pequeñas cargas y dispositivos de lectura muy precisos para medir la diagonal  $d$  de la impresión.

En consecuencia, se recurre a los microdurómetros. Aun en el caso de la dureza Vickers normal, es posible realizar en una misma sección de una barra de acero una serie numerosa de impresiones como para determinar la variación de la dureza a lo largo de ciertas direcciones.

Al indicar la dureza Vickers de un material debe especificarse el valor de la carga y el tiempo de aplicación, si éste fuera distinto de 15 segundos.

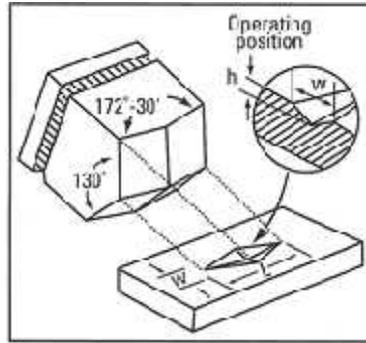
Así, por ejemplo, la dureza Vickers de una probeta a la que se aplicó una carga de 30 daN durante 15 segundos se indica como HV 30. Si el tiempo de aplicación fuera de 20 segundos la indicación es HV 30/20.

El valor de la carga, según las características del material a ensayar, puede oscilar entre límites que varían entre 0,01 daN a 120 daN. Los valores más corrientes en la práctica están comprendidos entre 5 daN y 100 daN.

## 5 KNOOP Y GRODZINSKY

La determinación de la dureza Vickers en metales muy duros queda afectada de un error cada vez mayor a medida que la carga empleada es menor que 5 daN. Ello se debe a que la dimensión de la diagonal se hace tan pequeña que el error con que resulta afectada su determinación tiene cada vez mayor preponderancia.

Ese defecto se ha eliminado en gran parte mediante el penetrador Knoop formado por un diamante piramidal tallado con los ángulos indicados en la siguiente que se detalla a continuación. Una impresión realizada con ese penetrador produce una forma romboédrica, en que las diagonales  $l$  y  $a$  guardan entre sí una relación  $l/a = 7,1$ .



El número de dureza Knoop se obtiene dividiendo la carga aplicada  $P$  sobre la superficie del romboide de la impresión, sin que se haya producido todavía la recuperación elástica del material. Ello se consigue expresando dicha superficie en función de la diagonal mayor de la impresión, la que resulta muy poco afectada por dicha recuperación.

siendo

$$F = \frac{\pi l}{2} = 0,07028 l^2$$

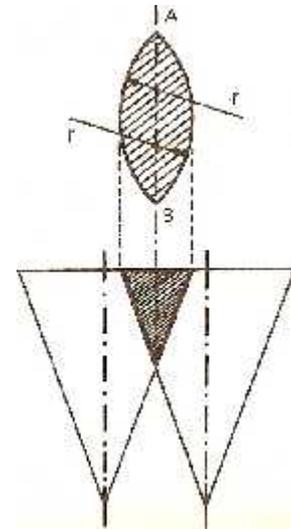
se obtiene finalmente

$$HK = \frac{14230 P}{l^2}$$

donde  $P$  se mide en daN y  $l$  en  $\mu\text{m}$ .

La diagonal  $l$  puede tener valores comprendidos entre 5 y 1000  $\mu\text{m}$ , y es aproximadamente tres veces mayor que la que produce el ensayo Vickers con la misma carga. De ese modo se obtiene una exactitud mayor en la medición de la dureza de superficies muy duras.

El mismo objetivo se consigue con el penetrador Grodzinski, cuya forma se obtiene por la intersección de dos conos iguales (Fig. 7.42), con lo cual se logra una superficie alargada después de quitar la carga.



## 6 MICRODUREZA

Al tratar el método de dureza Rockwell se mencionó su aplicación para determinar la dureza superficial. Para ello se emplean cargas de 15, 30 y 45 daN.

La microdureza se aplica básicamente en aquellos casos en que se quiere determinar la dureza en capas metálicas muy delgadas (casi siempre originadas por algún tratamiento térmico), o bien cuando se trata de espesores metálicos muy delgados, tales como filamentos de herramientas, agujas, etc., o recubrimientos ejecutados por electrodeposición.

Con ese objeto se recurre a los penetradores Vickers y, sobre todo, a los de Knoop y Grodzinski, con cargas que oscilan entre 0,10 N y 30 N. La lectura de la impresión se realiza siempre mediante el sistema de ampliación óptica de que están provistos los aparatos.

La carga que se aplica en el ensayo de microdureza depende del espesor de la pieza y de su dureza. Así, por ejemplo, con una carga de 0,30 N la profundidad de la impresión es de aproximadamente 3  $\mu\text{m}$ ; con cargas menores es posible examinar un recubrimiento metálico cuyo espesor es de 1  $\mu\text{m}$ . De tal modo se puede efectuar la medición de la dureza en los cristales metálicos, los que se ubican en el campo de observación con la intervención del ocular del aparato.

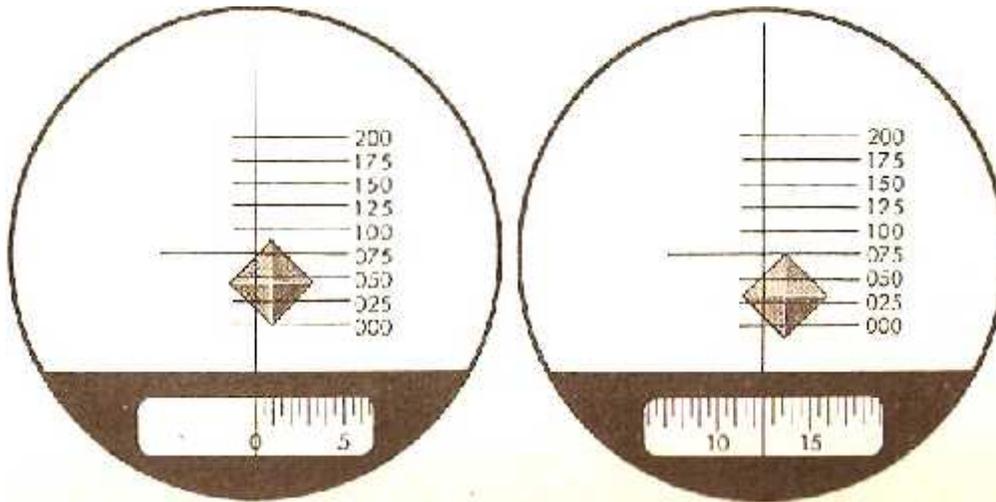
Para una carga dada, el penetrador Knoop produce una impresión cuya diagonal mayor es alrededor de tres veces la de la pirámide Vickers. La profundidad de la impresión es un tercio menor.

En la siguiente figura se da un ejemplo de medición de una impresión Vickers producida por una carga P. Una vez orientada la impresión en el campo del retículo, se hace coincidir uno de los vértices de la impresión con una de las divisiones micrométricas y se anota la lectura 0,0 μm de acuerdo con la figura de la izquierda. Se gira el tornillo micrométrico hasta hacer coincidir el otro extremo de la misma diagonal con una división de la escala. La escala micrométrica indica ahora la cifra 12,5 μm (figura de la derecha). La longitud de la diagonal está dada por la diferencia entre ambas lecturas más la cantidad de divisiones abarcadas por la impresión durante el transcurso de las lecturas efectuadas, o sea

$$12,5 \mu\text{m} - 0,0 \mu\text{m} + 75 \mu\text{m} = 87 \mu\text{m}$$

Aplicando la fórmula  $HV = 1,8544 P / d^2$  se halla la dureza Vickers, la que también se puede obtener directamente de la tabla de durezas correspondiente.

La dureza Knoop se determina con la fórmula  $HK = 14230 P / l^2$ .



## 7 DUREZA DE LOS MATERIALES PLÁSTICOS

Los métodos de dureza de los materiales plásticos utilizan los mismos principios que los descritos hasta aquí.

En el siguiente cuadro se dan los lineamientos para efectuar esos ensayos en diversos materiales de acuerdo con las normas pertinentes.

Norma de ensayo	Material	Carga previa	Carga de ensayo	Cuerpo penetrador
Din 53456	Materiales plásticos blandos	1 daN	5/13,5/36,5/98 daN	Punzón de bolilla, Ø de bola 5 mm.
VDE 0302	Materiales aislantes	0,3 daN	50 daN	Punzón de bolilla, Ø de bola 5 mm.
DIN 51955	Recubrimientos para pavimentos	0,3 daN	50 daN	Punzón de compresión cilíndrico, 11,3 mm Ø
ASTMF 36-61T	Materiales para juntas	1,0/5,0 lbs	245/99/79/49 lbs	Punzón de rompió sión cilíndrico. 0,252/0,504/1.129"
DIN 1168	Estuco y yeso para la construcción	1 daN	20 daN	Punzón do huillín, Ø de bola, 10 mm.

Para los elastómeros (goma, látex o similares) se recurre a la dureza según Shore, para lo cual se utilizan los siguientes penetradores: 1. durezas Shore B y C: penetrador en forma de tronco de cono, ensayo que se realiza de acuerdo a las normas DIN 53505, ASTM-D 2240, BS 903; 2. dureza Shore

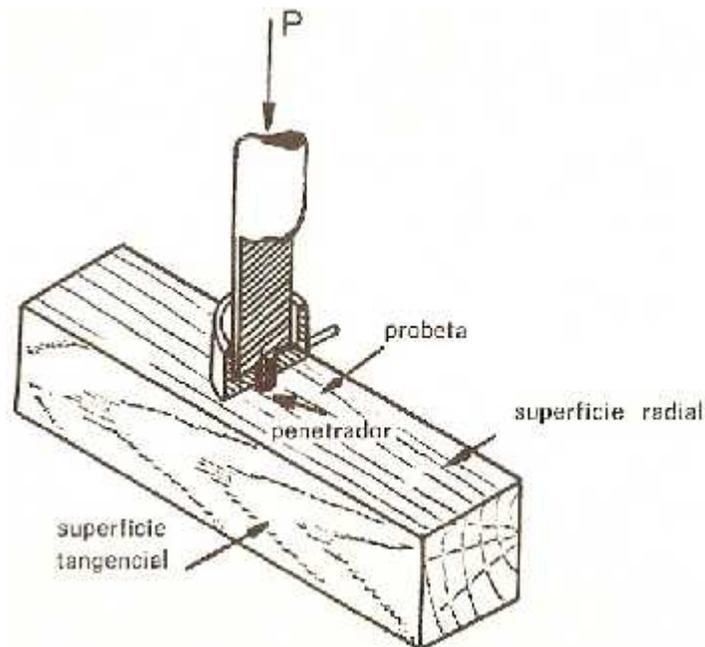
D: penetrador cónico con ángulo de  $30^\circ \pm 1/4^\circ$  (igual que en el caso anterior, con una superficie de con tacto igual a  $1 \text{ cm}^2$ ). Normas aplicables: DIN 53505 y ASTM - D 2240.

## 8 DUREZA DE LAS MADERAS

Si bien la dureza de la madera se puede determinar mediante el ensayo de Brinell, empleando la bolilla de 10 mm y una carga entre 100 y 500 daN (según sea la dureza de la madera), la que se aplica en 15 segundos y se mantiene durante 30 segundos, el ensayo frecuentemente empleado es el de Janka.

De acuerdo con ese método de dureza se utiliza un penetrador esférico de 11,28 mm de diámetro, o sea una sección  $F = 1,0 \text{ cm}^2$ , que se introduce en la muestra de madera a una profundidad igual al radio. La cifra de dureza Janka es igual a la de la carga para producir esa penetración, puesto que se define como la relación entre la carga y la sección diametral de la impresión, que es igual, precisamente, a  $1,0 \text{ cm}^2$ .

El ensayo se realiza sobre una probeta especialmente preparada (norma ASTM D-143) de 5,1 cm x 5,1 cm x 15,2 cm. Esta se coloca sobre el plato de apoyo de una máquina de ensayo, en cuyo cabezal superior se ha introducido el dispositivo con el durómetro, que posee un aditamento que sólo permite que éste penetre hasta una profundidad igual a 5,64 mm.



En general, se practican dos penetraciones sobre una superficie tangencial, dos sobre la superficie radial y una en cada extremo, cuidando de hacerlo lejos de los bordes.

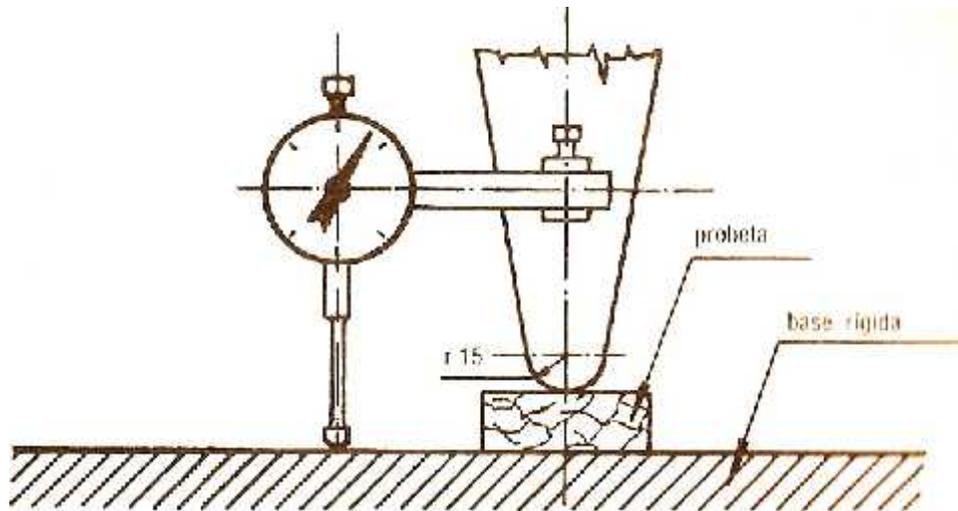
Se obtienen de ese modo tres cifras de dureza que varían entre sí de acuerdo con la especie de la madera. Esa diferencia se hace tanto menor cuanto mayor es el peso específico de la madera, en cuyo caso aumenta también la cifra de dureza.

La norma IRAM 9558 establece un método de ensayo para determinar la dureza de las maderas, que está basado en la norma AFNOR B 51 - 013.

El instrumental necesario para dicho ensayo consta de:

- una cuchilla recta de acero con borde cilíndrico, de 15 mm de radio y de una longitud mayor que la dimensión transversal de la probeta;
- una máquina para la aplicación de las cargas hasta 200 daN, con lecturas al  $\pm 1\%$ ;

c) un penetrómetro para la medición de las profundidades de las improntas con lecturas al 0,01 mm.



En el instante del ensayo la humedad de la madera debe ser de 15 %  $\pm$  3 %. La determinación de la humedad se efectúa de acuerdo con la norma IRAM 9532.

El ensayo se realiza siguiendo el procedimiento que se detalla a continuación.

Se mide el ancho de la cara a ensayar en su zona media. Luego se coloca la probeta sobre el plato de la máquina y se apoya la cuchilla de modo que el eje del borde cilíndrico quede horizontal y perpendicular en la mitad del eje longitudinal de la probeta.

Se aplica a la cuchilla una carga progresiva creciente hasta obtener un valor de 5 daN, y se lee el valor de la profundidad de la impronta en el penetrómetro.

Se aumenta progresivamente la carga aplicada durante 3 minutos hasta obtener un valor de 100 daN por centímetro de ancho de la probeta, manteniéndose esa carga durante 5 segundos. Para el caso de maderas muy blandas, la carga máxima aplicada debe ser de 50 daN por centímetro de ancho de la probeta.

Se disminuye progresivamente la carga y cuando llega a 5 daN se lee nuevamente el valor de la profundidad de la impronta en el penetrómetro.

La profundidad ( $t$ ) de la impronta es la diferencia entre los valores obtenidos en las lecturas efectuadas según lo descrito. Para el caso de maderas muy blandas (carga de 50 daN), dicha diferencia debe multiplicarse por dos para expresar los resultados.

*Cálculos:*

$$D = \frac{l}{t}$$

La dureza de la probeta se determina mediante la fórmula siguiente:

siendo:

D la dureza de la probeta;

t la profundidad de la impronta, determinada en milímetros.

*Informe:*

Se debe indicar el número y el valor medio de las probetas ensayadas, así como también el menor y el mayor valor hallado.

## ENSAYO DE FATIGA

### 1 GENERALIDADES

Algunos órganos de máquinas y elementos de estructuras están sometidos durante su servicio a cargas de intensidad variable que generan en los materiales tensiones también variables. Tal es el caso de piezas de motores - bielas, resortes de válvulas, ejes de automotores y de coches ferroviarios; como ejemplo, durante su vida útil, el número de variaciones de carga puede ser:

Piezas	Número de ciclos
Cordones de puente ferrocarril	$2 \times 10^6$ (en 50 años)
Ejes de locomotoras	$1100 \times 10^6$
Ejes de automóviles	$50 \times 10^6$
Cigüeñales de motores aviación	$18 \times 10^6$ (en 200 hs de vuelo)
Cigüeñales de motores automóvil	$120 \times 10^6$
Ejes de turbinas de vapor	$15000 \times 10^6$ (en 10 años)

Un metal sometido a este tipo de tensiones, fallará a un valor de éstas mucho más bajo que el necesario para producir la fractura en una sola aplicación de la carga, incluso más bajo que su límite elástico.

Estas roturas se producen repentinamente, sin que previamente aparezcan deformaciones, que permitan precaverse contra ella.

Son necesarias tres condiciones básicas para que se produzca una rotura por fatiga:

- Una tensión máxima.
- Una variación bastante amplia de la tensión aplicada.
- Un número suficiente de ciclos.

Influyen además otro grupo de efectos como ser: concentración de tensiones, corrosión, temperatura, tensiones residuales, estructura metalográfica, todos los cuales tienden a modificar las condiciones necesarias para la fatiga.

Se desconoce la causa fundamental de la fatiga por lo que es conveniente analizar los efectos de estos factores.

### 2 MECANISMO DE LA FATIGA

El hecho instintivo de la rotura de una varilla de alambre por sucesivos doblados y enderezados nos da una idea del fenómeno de la fatiga, el que plantea la incógnita de porqué una serie de esfuerzos, menores individualmente que el necesario para producir la rotura, conducen a ella cuando se repiten un cierto número de veces.

La explicación está dada porque la rotura del material se produce por variación de los esfuerzos de tracción y compresión, que se producen en la zona mencionada y los que al repetirse en cada doblado, someten a los cristales del metal a continuos deslizamientos que no influirán mientras no sobrepasen los valores de proporcionalidad, ya que volverán a su posición primitiva al cesar la carga que los origina. Si aumentan los esfuerzos hasta provocar deslizamientos típicos del periodo plástico en las fibras extremas se generan mayores deformaciones, que al repetirse sistemáticamente, van destruyendo progresivamente las redes cristalinas del metal, hasta que el número de cristales no afectados sea insuficiente y así sobrevenga la rotura.

En otros términos puede decirse que, en el material sometido a una variación de tensiones, la distribución del esfuerzo difiere de un cristal a otro, permitiendo suponer que las partículas

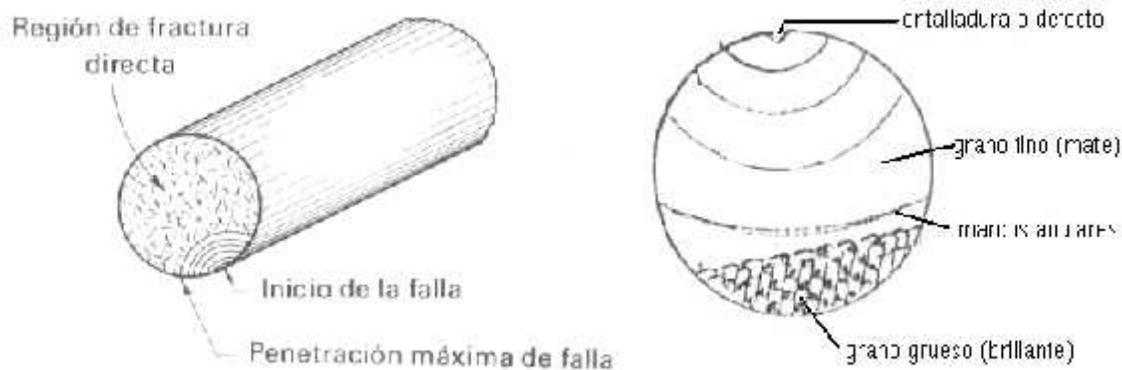
constituyentes tienden a moverse lentamente, unas con respecto a otras, hasta que un cristal se debilita tanto, que rompe y queda dislocado. En esa pequeña fisura se concentran las tensiones y al repetirse los ciclos, se extienden y la sección debilitada no puede resistir el esfuerzo.

El desplazamiento de los cristales se debe a que los metales ó aleaciones están constituidos por una agregación de los mismos orientados al azar dentro de sus masas y al ser tensionados hace que algunos de ellos lleguen al límite elástico más pronto, debido a orientaciones desfavorables (planos de deslizamiento). Si se supera ese valor, llamado "límite de deslizamiento", sucede repentinamente la rotura por fatiga.

### 3 ASPECTO DE LA FRACTURA POR FATIGA

La superficie de fractura suele ser normal al eje de la tensión de tracción principal y presenta dos regiones características:

- Una zona de superficie lisa, mate, de grano fino, debido al frotamiento que ocurre cuando se propaga la grieta a través de la sección, que equivale a un ligero pulimento del material.
- Una región rugosa, de grano grueso, brillante cuando la pieza ha roto frágilmente, por haber disminuido la sección sana y no poder soportar la carga. La falla muchas veces se inicia en un punto de concentración de tensiones (una esquina aguda, una entalladura ó una inclusión) y parece propagarse desde dicho punto como una serie de marcas anulares, similar a un frente de olas hacia el interior de una playa.

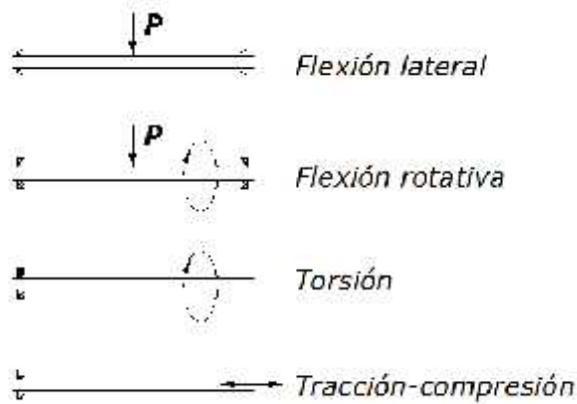


### 4 CLASIFICACIÓN DE LOS ESFUERZOS DE FATIGA

La sollicitación de fatiga puede ocurrir con esfuerzos normales - tracción, compresión, de flexión o de torsión.

La tensión de tracción se considera positiva y a la de compresión negativa.

Los distintos tipos de sollicitaciones pueden esquematizarse así:



Se define:

- a) La **“tensión media”**: como la semisuma de los valores límites

$$\sigma_m = (\sigma_{\text{máx.}} + \sigma_{\text{mín.}}) / 2 = (\sigma_1 + \sigma_2) / 2$$

- b) La **“amplitud”**: como la diferencia entre dichos valores

$$\sigma_A = (\sigma_{\text{máx.}} - \sigma_{\text{mín.}}) = (\sigma_1 - \sigma_2)$$

- c) La **“semiamplitud”**: como la semidiferencia de dichos valores

$$\sigma_a = (\sigma_{\text{máx.}} - \sigma_{\text{mín.}}) / 2 = (\sigma_1 - \sigma_2) / 2$$

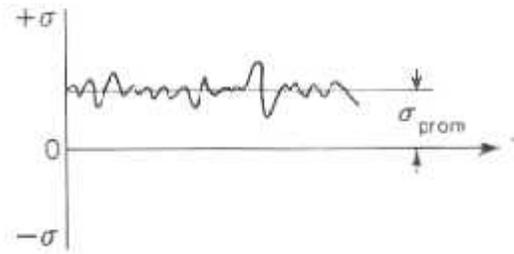
- d) La **“relación de tensiones”**: como el cociente entre ambos valores; es otra forma de representar los datos de fatiga

$$R = \sigma_{\text{máx.}} / \sigma_{\text{mín.}} = \sigma_1 / \sigma_2$$

Según la variación de dichos esfuerzos ( $\sigma_1; \sigma_2$ ) pueden clasificarse en diversos grupos, cuya representación en el tiempo se hace mediante diagramas de apariencia sinusoidal.

Solicitaciones	Diagrama	Tensión media	Amplitud	Semiamplitud
Pulsatorio entre $\sigma_1$ y $\sigma_2$		$(\sigma_1 + \sigma_2) / 2$	$(\sigma_1 - \sigma_2)$	$(\sigma_1 - \sigma_2) / 2$
Pulsatorio entre 0 y $\sigma_1$ (intermitente)		$\sigma_1 / 2$	$\sigma_1$	$\sigma_1 / 2$
Alternativo Asimétrico entre $\sigma_1$ y $-\sigma_2$ $ \sigma_1  >  \sigma_2 $		$(\sigma_1 - \sigma_2) / 2$	$(\sigma_1 + \sigma_2)$	$(\sigma_1 + \sigma_2) / 2$
Alternativo simétrico $ \sigma_1  =  \sigma_2 $		0	$2 \cdot \sigma_1$	$\sigma_1$

La figura indica ciclos de tensión irregulares, como ser el que afecta a parte de un ala de avión sometida a sobrecargas periódicas imprevisibles debidas a las rachas de viento.



De los diagramas vistos cualquiera sea el ciclo representativo del esfuerzo explicado, este puede ser considerado como la suma algebraica de uno constante “ $\sigma_m$ ” y otro alternado puro simétrico “ $\sigma_a$ ”, que llamamos “**Tensión Dinámica**”:

$$\sigma_d = \sigma_m \pm \sigma_a$$

## 5 CURVA DE WÖHLER

Se deben a August Wohler las primeras experiencias sistemáticas sobre los fenómenos de fatiga (1852-1870) realizados en hierros forjados y aceros, y sus ensayos con algunas modificaciones son los que aún se emplean en los laboratorios.

Si bien Wöhler realizó ensayos en rieles de ferrocarril, empleó preferentemente probetas de sección circular con un extremo ensanchado, por el cual se la sujetaba en las mordazas de la máquina de ensayo que le imprimía un movimiento de rotación; un determinado peso colocado en el otro extremo del material (carga en voladizo) hacía que se generara un esfuerzo de flexión que se invertía cada  $180^\circ$  por el giro de la probeta. Se obtenían así esfuerzos alternados de tracción-compresión con una variación cíclica senoidal simétrica ( $\sigma_m = 0$ ).

Esta probeta solicitada en voladizo, presenta varios inconvenientes que influyen en forma considerable en los resultados, siendo uno de ellos el del esfuerzo de corte que tiene lugar en el material, y otro, de mucha importancia, el de la superficie de continuidad entre el cuerpo de la probeta propiamente dicho y el vástago ensanchado que se coloca en las mordazas, pues es en esta zona donde tienen lugar las máximas tensiones. Comprobaciones prácticas han demostrado que la resistencia de fatiga aumenta con el radio de la superficie de unión.

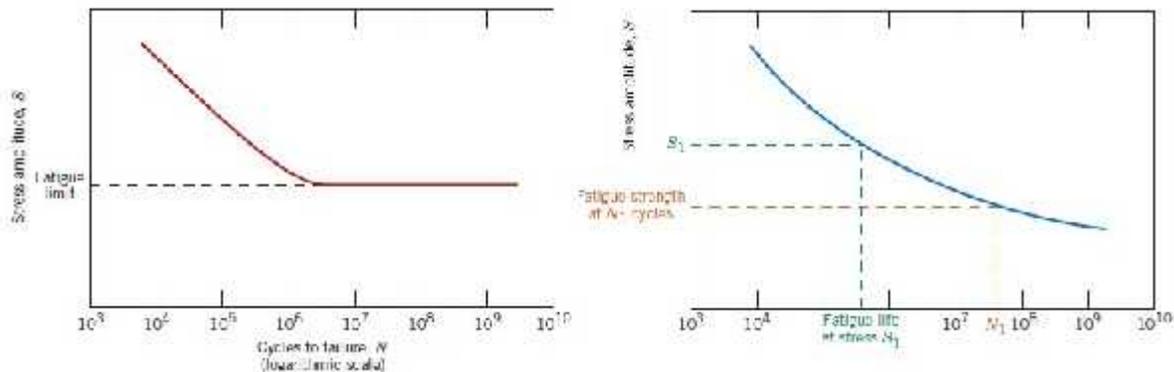
Estos inconvenientes se han eliminado adoptando probetas con radios de curvatura adecuados y configuraciones de ensayo que permitan aplicar sollicitaciones axiales (tracción-compresión) o flexión pura en toda la zona calibrada del material.

**La Curva de Wohler representa la duración de la probeta, en número de ciclos N, hasta su rotura, para la tensión aplicada.**

La figura muestra curvas de Wohler típicas de este ensayo, donde se aprecia que el número de ciclos N aumenta al disminuir la tensión, siendo N el número de ciclos de tensión necesarios para producir la fractura completa de la probeta. La tensión máxima a la que se consigue que una probeta no rompa después de un número infinito de ciclos se toma como **límite de fatiga**.

Para obtener una mejor definición de estas curvas se toman en abscisas “Log. N” y así para los aceros la curva presenta dos ramas rectas bien delimitadas, la primera de las cuales permite ubicar

el límite de fatiga por ser sensiblemente paralela al eje horizontal, a partir de un “N de  $10^6$  ó  $5 \times 10^6$ ”. Por debajo de ese límite se presume que el material soportará un número infinito de ciclos sin romperse.



La mayor parte de los metales o aleaciones no ferrosas tienen una curva continuamente descendente, al aumentar el “N”, aproximándose a una horizontal pero sin llegar a serlo nunca; es decir, no tienen un verdadero límite de fatiga y en esos casos se identifican las propiedades del material para un número de ciclos “N” convenido, generalmente “ $10^8$ ” ó “ $5 \times 10^8$ ”.

Para determinar la curva de Wöhler se necesitan de 8 a 12 probetas del mismo material, de iguales dimensiones y maquinado, ensayando la primera a una tensión elevada (Ej.:  $66\% \sigma_{ET}$ ) la cual se espera rompa después de un número pequeños de ciclos; se va disminuyendo la tensión hasta que una o dos no rompan para el número especificado de ciclos, que suele ser “ $10^6$  ó  $5 \times 10^6$ ” por lo menos. Cada probeta determinará un par de valores “ $\sigma_d - N$ ” es decir un punto del diagrama; se encontrará una dispersión en los valores, pero casi siempre se podrá trazar la “curva de Wöhler”, que divide al plano del diagrama en dos zonas: la superior, en que se produce la rotura de la probetas, y la inferior, donde las probetas aguantan los respectivos “N” para cada “ $\sigma_d$ ”, sin romperse.

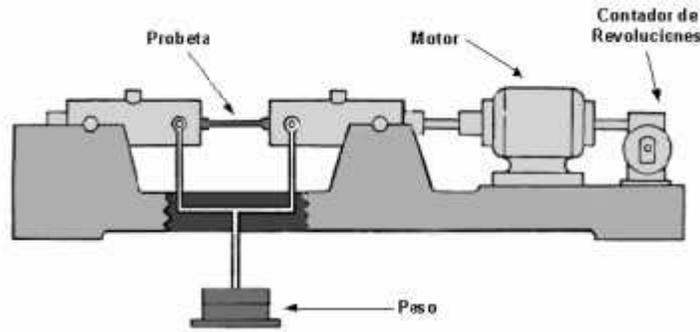
## 6 MÁQUINA DE ENSAYO. PROBETAS

Las máquinas se clasifican según el tipo de esfuerzo a que quede sometida la probeta, por ejemplo esfuerzos axiales, de flexión, de torsión o combinados. También se diferencian en que algunas producen esfuerzos alternados y otras pueden variar el esfuerzo de tracción en forma pulsatoria o intermitente. Entre estas máquinas la más común y la más convenientemente utilizada es la de flexiones rotativas donde  $\sigma_m = 0$ , cuyo primer modelo fue diseñado por Wöhler en 1870.

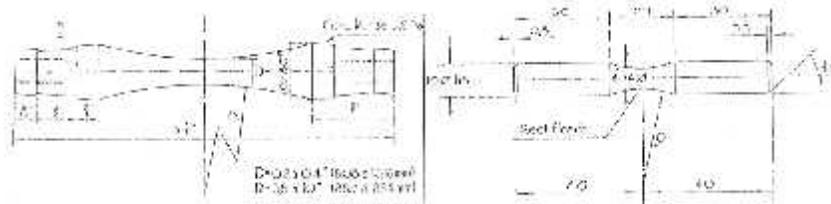
La probeta de forma cilíndrica es amarrada por un extremo a la mordaza de la máquina, mientras que en el extremo opuesto se la somete a un esfuerzo “P”, ya sea por medio de un resorte o a la carga de patillos de peso conocido (pesas).

La probeta trabaja como una viga en voladizo, y la mordaza por medio de un motor eléctrico, adquiere una rotación que transmite a la probeta, mientras la carga actúa siempre en la misma dirección y sentido. Cada vez que la probeta gira  $180^\circ$  las tensiones cambian de signo, pasando de un valor de tracción a igual valor de compresión, o sea solicitaciones alternativas simétricas. Un contador de vueltas permite determinar el número de ciclos y las cargas pueden variarse con la tensión del resorte o las pesas aplicadas.

Las máquinas más modernas tienen la ventaja de producir flexión pura en una determinada longitud de la probeta, ésta se encuentra tomada por las mordazas, que se unen al motor y al contador de ciclos, el cual se detiene al producirse la rotura de la probeta.



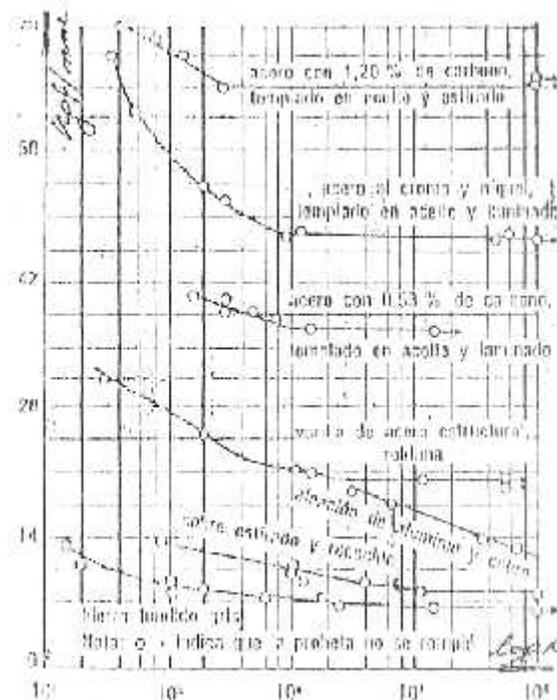
Las probetas utilizadas por los distintos experimentadores son diversas desde el punto de vista de las formas (cilíndricas, cónicas, tóricas) y de sus dimensiones. Esa gama de modelos hace difícilmente comparables los resultados obtenidos ya que cada diseñador pretende destacar ciertos hechos en esa prueba que involucra variables tan complejas.



Las más comúnmente usadas son la de "Moore" que se emplea en máquinas americanas y la de "Schenck", utilizada en Europa en máquinas del mismo constructor.

## 7 DIAGRAMAS Y VALORES DE FATIGA PARA DISTINTOS MATERIALES

En la figura se indican para diferentes materiales las curvas de Wöhler, obtenidas según el procedimiento ya visto.



Conocer las curvas de Wöhler no muestra con exactitud las propiedades mecánicas del material, ya que los resultados dependen del valor de la carga, del tipo de máquina y probeta utilizada, pero en cambio indica las horas de vida que tendrá el material al cargarlo con esfuerzos mayores que la resistencia a la fatiga (tensión límite de fatiga).

Es un ensayo de gran valor práctico para conocer la calidad estructural del material, pues cualquier pequeño defecto ó impureza del material, que no modificarían su resistencia estática conducirían a la rotura por fatiga: "es el ensayo que más afecta a sus elementos constituyentes".

La resistencia a la fatiga no guarda una relación directa con la resistencia estática a la tracción, aunque generalmente aumenta con ésta: aproximadamente, para aceros es (35% - 60%), un 40% para fundiciones y de (25% - 30%) para los no ferrosos.

Para dar una idea de la calidad del material se define una relación importante:

$\sigma_d/\sigma_{ET}$ :

- Mayor parte de los aceros es 0,50.
- Aceros dulces o suaves es 0,60.
- Aceros alto contenido de C (1%) es 0,35
- Aceros aleados  $\sigma_{ET} > 120 \text{ kgf/mm}^2$  es 0.40

## 8 VARIACIÓN DEL N° DE CICLOS Y RESISTENCIA A LA FATIGA EN FUNCIÓN DE LA AMPLITUD.

Entre las conclusiones más importantes a que llegó Wöhler es que la rotura por fatiga queda determinada por la amplitud de tensiones  $\sigma_A$ , a la que llamo "resistencia de servicio" y no por la tensión máxima. Para unas " $\sigma_1$ " y " $\sigma_2$ " dadas el número de ciclos aumenta al disminuir  $\sigma_A$  hasta un valor de ésta en que al material no rompe, llamada amplitud límite.

Para acero dulce ( $\sigma_{ET} = 37 \text{ Kgf/mm}^2$ ) en probetas de similares condiciones, se tiene:

$\sigma_1 \text{ (Kg f/mm}^2\text{)}$	$\sigma_2 \text{ (Kg f/mm}^2\text{)}$	$\sigma_A \text{ (Kg f/mm}^2\text{)}$	$N^\circ \times 10^6$
+22, 5	-22, 5	45	1(rompió)
+22, 5	-19, 5	42	3, 8(rompió)
+19, 5	-19, 5	39	7, 2(no rompió)

En los dos primeros casos aún manteniendo la tensión máxima se ve que  $N^\circ$  depende de  $\sigma_A$  y por comparación con el tercer ensayo, se aprecia que  $N^\circ$  puede alcanzar varios millones, inclusive a la amplitud límite, para valores poco inferiores de las tensiones.

## 9 EFECTOS QUE VARÍAN LA RESISTENCIA DE FATIGA

### 9-a Del tratamiento térmico

Se ha comprobado que aceros aleados y con alto % de carbono mejoran su resistencia a tensiones repetidas hasta en un 200%, al ser tratados térmicamente. El tratamiento a dar a los materiales para mejorar esa resistencia, dependerá del uso: así para los que trabajan a flexión o torsión rotativas se los endurecerá superficialmente (cementación, nitruración, etc.), ya que es el exterior quien soporta el mayor esfuerzo, afectará a toda la sección (temple, revenido, etc) cuando los esfuerzos sean axiales.

### 9-b Del acabado superficial

#### 1) Rugosidad:

El grado de terminación o acabado superficial tiene importancia en fatiga, siendo así que las que presentan superficies pulidas al máximo tienen más vida que las de pulido corriente y éstas a su vez más resistencia que las simplemente torneadas.

Ello ocurre porque con el torneado se arranca la viruta, que afecta la superficie hasta cierta profundidad y por lo tanto a la red cristalina del metal, hecho que también prueba el desarrollo y extensión de las fisuras a partir de las rayaduras superficiales.

Esa disminución de la resistencia a la fatiga se puede eliminar por un pulido adecuado, el que a su vez produce el mismo efecto pero con menor intensidad.

“Las rayaduras transversales (directrices) son más perjudiciales que las longitudinales (generatrices), ya que éstas están orientadas según la dirección de la tensión principal de tracción.

Las marcas en frío (letras y cifras) y las huellas de dureza, particularmente Rockwell “C” y Vickers, constituyen orígenes de rotura por fatiga, y su emplazamiento deberá elegirse cuidadosamente, en zonas de las piezas que trabajan al mínimo (ej.: extremos)

#### 2) Cambios en las propiedades superficiales:

Una capa descarbonada en la superficie de una pieza disminuye su resistencia a la fatiga. Las operaciones de decapado con ataque de ácidos, chorros de arena y/o granalla pueden mejorar dicha propiedad, siempre que se empleen los inhibidores necesarios en un caso y se empleen granos y/o perdigones de formas adecuadas (redondos en lo posible). El chorro de granallado da mejores resultados porque anula las grietas microscópicas y martilla la superficie, endureciéndola.

También se pueden mejorar las propiedades de fatiga por cementación, nitruración, temple superficial a la llama o por inducción.

El arenado es difícil realizarlo sin perjudicar la resistencia a la fatiga, ya que durante el recubrimiento ocurren grandes variaciones en las tensiones residuales que pueden originar microfisuras.

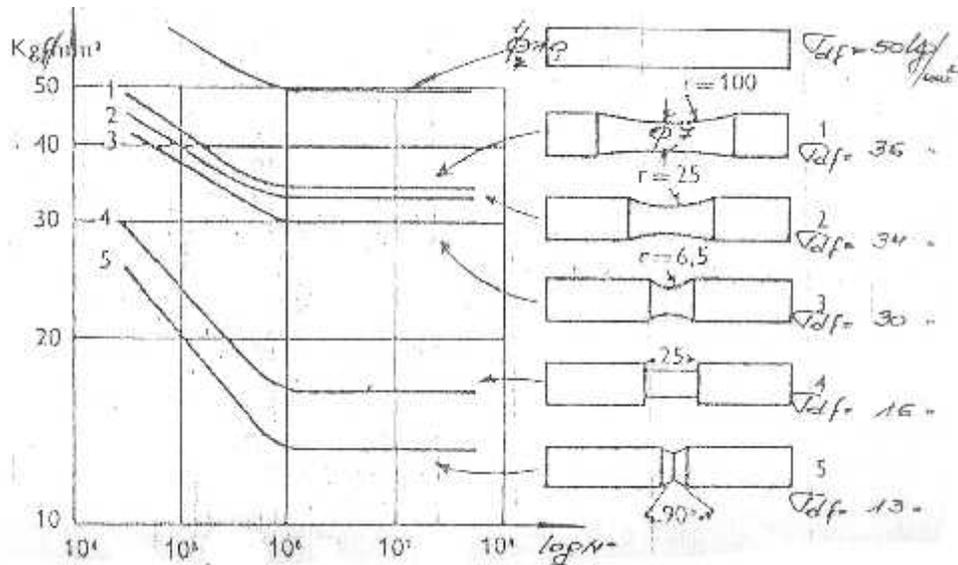
### 9-c) De las entalladuras

Las entallas de las piezas reducen notablemente la resistencia a la fatiga de los aceros entre 50% y 75% de su valor original.

Los más sensibles son los aceros templados de alta resistencia; en cambio las fundiciones y los aceros inoxidable son menos afectados.

La zona de unión de grandes secciones con otras partes de menor diámetro deben hacerse suaves y bien pulimentadas, evitando las aristas vivas que faciliten la fatiga.

El siguiente ejemplo corresponde a un acero Cromo-Níquel, donde se aprecia la variación de la resistencia a la fatiga por cambios de sección de distintos radios de curvatura y luego con distintas entalladuras de unión.



Las roscas de perfil triangular con fondo agudo influyen más que las de igual perfil y fondo redondeado, y éstas a su vez más que las de perfil semicircular, con % variables entre un 30% y 20% de reducción.

Las ranuras longitudinales (chaveteros), disminuyen el límite de fatiga de los árboles entre 25% y 60%, conviene redondear el fondo de la ranura y usar chavetas de cobre, acero extradulce, etc.

#### 9-d) De la corrosión

Se ha comprobado experimentalmente que la disminución de resistencia a la fatiga por corrosión anterior al ensayo es débil, mientras que la ejercida durante el ensayo es muy importante.

##### 1) Corrosión previa:

Su efecto es comparable al estado de la superficie y a los accidentes de la misma (taladros, entallas), al crear la corrosión rugosidades, picaduras y grietas.

Se pueden distinguir tres casos:

- La corrosión se traduce en un ataque uniforme en toda la superficie (generalizada), con frecuente formación de una película protectora. La influencia sobre la fatiga es pequeña.
- La corrosión se manifiesta como ataque profundo en ciertos puntos (localizada), el resto de la superficie está poco alterado, su influencia sobre la fatiga y otras propiedades mecánicas es sensible.
- La corrosión es intercrystalina, su influencia sobre la fatiga es muy importante, sobre todo en los metales, donde la fisuración por fatiga es también intercrystalina.

En todos los casos que existe corrosión, la influencia de ésta se asemeja a la concentración de tensiones alrededor de las picaduras, es decir analogía completa con la influencia de las entallas.

##### 2) Fatiga y corrosión simultáneas:

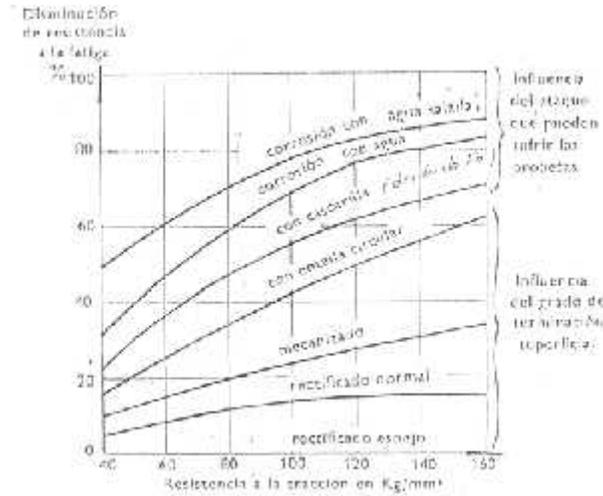
Cuando el ataque corrosivo y las cargas de fatiga actúan simultáneamente, se acelera la propagación de grietas por el ataque químico y la disminución de las propiedades de fatiga es mayor que la originada por corrosión previa de la superficie. La explicación de ello estaría dada por el hecho de que las tensiones cíclicas rompen localmente la película superficial de óxido y facilita la formación de nuevas picaduras, es decir remueven y desalojan a los productos de la corrosión que podrían proteger contra el ataque posterior. El fondo de las picaduras es más anódico que el resto del metal

y por ello las picaduras progresan en profundidad, ayudadas por la destrucción de la película de óxido, debido a las tensiones cíclicas.

El agrietamiento ocurrirá cuando las picaduras sean suficientemente agudas para originar una elevada concentración de tensiones.

Existen varios métodos para combatir el deterioro de fatiga con corrosión: el material para este servicio debe elegirse atendiendo más a su resistencia a la corrosión, por ejemplo: aceros inoxidables, bronce, aleaciones cobre-berilio.

En el presente diagrama puede apreciarse como disminuye la resistencia a la fatiga cuando el material tiene defectos superficiales, el mecanizado es muy grosero o el material sufre un ataque químico superficial.

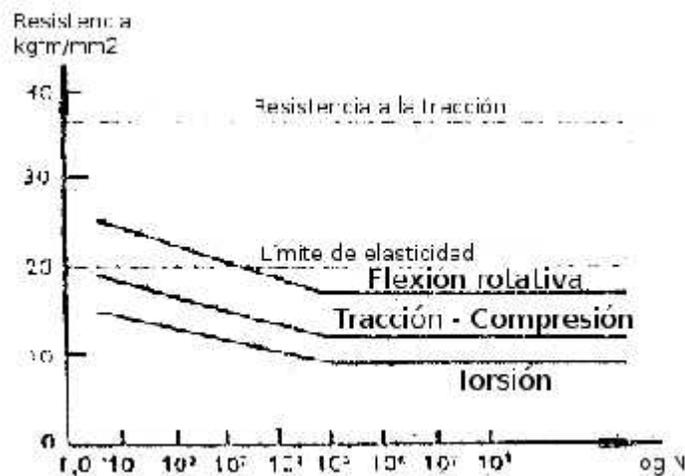


**9-e) Del método de ensayo:**

Los resultados de fatiga para un mismo material, varían según el método de ensayo, lo que a su vez difieren con las máquinas de ensayo.

La resistencia a la fatiga por torsión es menor que a la flexión rotativa en 50%-65%, para aceros al carbono; 45% - 70% para aceros aleados y alto carbono y del 50% para no ferrosos.

En el gráfico, para un acero dulce se comparan la resistencia estática a la tracción y el límite elástico con la resistencia de fatiga por distintos métodos.



### 9-f) De la temperatura:

En los ensayos comunes de fatiga se despreja con frecuencia la influencia de la temperatura ambiente (variaciones diarias y estacionales); en los aceros puede ser apreciable su efecto, recomendándose anotar la temperatura media de los ensayos.

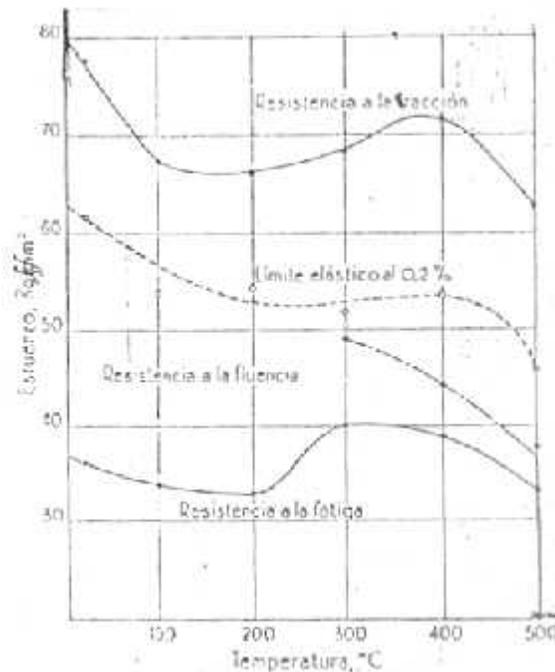
#### 1) Temperaturas superiores a la ambiente:

Según varios experimentadores para ciertos aceros (aleados) es mayor a 300--350°C que a temperatura ambiente; en cambio en otros aparece una disminución continua del límite de fatiga con la superación de la temperatura ambiente.

En los diagramas puede apreciarse que las variaciones del límite de fatiga y la resistencia estática a la tracción, siguen desarrollos prácticamente paralelos, aunque la fatiga resulte menos afectada por la temperatura.

También se ha encontrado que entre 70° C y 100° C se reduce la resistencia a la fatiga entre un 15% y un 20% respectivamente, del valor ambiental, pudiendo llegar a un mínimo a 120° C, esto tiene mucha importancia porque muchas piezas y órganos de motores trabajan a esa temperatura.

Cuando la temperatura es mayor a 400° C no se encuentra un límite de fatiga y la curva desciende continuamente ya sea por oxidación o por falta de consolidación del recocido que ocurre durante los ensayos en caliente.



#### 2) Bajas temperaturas:

Se han encontrado aumentos de un 15% aproximadamente cuando la temperatura disminuye de +25° C a -25°. A -40° C hay aumento de todas las resistencias: de fatiga, de elasticidad, de rotura por tracción y de dureza.

Continuando con la disminución de la temperatura, aumenta el límite de fatiga consecuentemente; por ejemplo:

**Acero dulce 0,1% C**

Temperaturas	+20° C	-80° C	-180° C
Límite de fatiga Sobre probetas lisas	19 Kg f /mm <sup>2</sup>	26 Kg f /mm <sup>2</sup>	58 Kg f /mm <sup>2</sup>
Límite de fatiga Sobre probetas entalladas	13Kg f /mm <sup>2</sup>	14Kgf/mm <sup>2</sup>	17 Kg f /mm <sup>2</sup>

**Acero Cr - Ni**

Temperaturas	+20° C	-80° C	-180° C
Límite de fatiga Sobre probetas lisas	55 Kg f /mm <sup>2</sup>	59 Kg f /mm <sup>2</sup>	78 Kg f /mm <sup>2</sup>
Límite de fatiga Sobre probetas entalladas	-----	-----	-----

**9-g De las variaciones momentáneas de los esfuerzos**

Se conoce que la resistencia a la fatiga de un metal no es constante, sino que varía con el servicio a que se la someten y como los órganos de máquinas trabajan a regímenes variables, se traducen en esfuerzos variables en amplitud.

Experimentalmente se ha demostrado que si a una probeta se aplican momentáneamente esfuerzos alternados y éstos son superficiales al límite de fatiga, se encuentra posteriormente un límite inferior al primitivo. Este concepto vale para esfuerzos muy grandes aplicados poco tiempo o esfuerzos ligeramente superiores al límite de fatiga y aplicados un gran número de veces.

Este efecto así descrito se llama “sobrefatiga”.

Si por el contrario, la probeta ha soportado con anterioridad esfuerzos cíclicos inferiores al límite de fatiga, se encontrará un nuevo límite más elevado; a este efecto se lo conoce como “subfatiga”.

Estos fenómenos pueden explicarse admitiendo que el límite de elasticidad ha variado por la aplicación de esos esfuerzos primitivos, de manera que el material adquiere un nuevo límite de fatiga; esa adaptación es limitada y si llegara a sobrepasarse se producirá rápidamente la rotura. Se adaptan mejor los materiales dúctiles que los frágiles.

Finalmente mencionaremos que el aumento o disminución del límite de fatiga dependerá del porcentaje de la sobrecarga o subcarga y del número de ciclos de cada caso.

**9-h) De la frecuencia**

La variación periódica del esfuerzo produce idéntico efecto en la deformación, que pueden ser alargamiento, acortamiento, flecha o ángulo de torsión.

La frecuencia actúa en los ensayos de fatiga en la siguiente forma: si el esfuerzo aplicado es grande y se manifiesta desprendimiento de calor (por histéresis mecánica), la rotura puede sobrevenir más rápido cuando la frecuencia es elevada, ya que el calor que desarrolla la histéresis es cada vez mayor, no pudiendo ser evacuado por convección ó radiación al medio ambiente.

Experiencias de Cozand en flexión rotativa para acero Cr–Ni recocido a 3000, 8000, 11000, y 15000 rpm, dan como resultado que para los esfuerzos más elevados, el N° de ciclos que produce la rotura disminuye cuando la velocidad pasa de 3000 a 8000 rpm, debido al calentamiento por frotamiento interno, incluso hasta poner el metal al rojo. Por el contrario, con esfuerzos cercanos al límite de fatiga, donde no se manifiesta calentamiento alguno, no tiene influencia hasta 8000 rpm y se aumenta la resistencia a la fatiga a 11000 y 15000 rpm.

En ensayos para velocidades de 1500 a 30000 rpm se ha encontrado, para probetas lisas ó entalladas que a 30000 rpm es mayor que a 1500 rpm, la resistencia a la fatiga en 2% para aceros comunes, 15% para aceros inoxidables y de 15% a 35% para no ferrosos.

### 9-i) Del tamaño:

Un problema práctico es tratar de relacionar los resultados de probetas pequeñas de laboratorio con el de piezas de máquinas en servicio. La experiencia demuestra que existe un "efecto de tamaño", es decir que la resistencia a la fatiga de los órganos o piezas es menor que la de probetas pequeñas. El estudio exacto es complicado porque es difícil preparar probetas geoméricamente semejantes, de diámetro creciente, que tengan la misma estructura metalúrgica y la misma distribución de tensiones a través de toda la sección transversal.

Al cambiar el tamaño de la probeta para fatiga resultan alterados dos factores. Primero, al aumentar el diámetro aumentan el volumen y el área superficial, y ésta es importante porque las fisuras de fatiga se inician en la superficie. En segundo lugar, para probetas sometidas a flexión o torsión, el gradiente de tensiones varía a través del diámetro y aumentará el volumen de material sometido a tensiones elevadas a medida que crezca el diámetro.

Distintos experimentadores han encontrado disminución en el límite de fatiga por flexión:

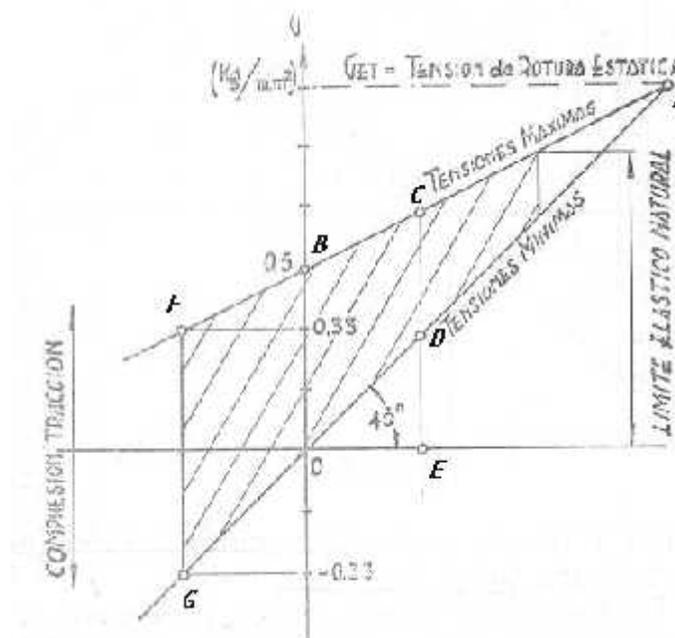
- 1) En aceros suaves, del 10%, al pasar de 2,5 a 50mm.
- 2) En aceros al carbono, normalizado, del 40% al pasar de 7,5 a 152mm.

La importancia de los gradientes de tensión en los efectos de tamaño ayuda a explicar porqué es frecuentemente mala la relación entre ensayos de laboratorio y roturas en servicio. Las fallas reales de piezas grandes son atribuibles a concentraciones de tensiones, intencionadas o accidentales y resulta casi imposible conseguir esta misma concentración y el mismo gradiente de tensiones en las probetas de laboratorio.

### 9-j) De la forma de la sección:

Límites de fatiga a flexión plana alternada, disminuyen cuando pasan de una sección circular de diámetro "d", a una cuadrada de lado "d" y aumenta ligeramente cuando ésta se gira 45°.

## 10 DIAGRAMA DE GOODMAN:



Cada curva de Wöhler representa distintos ensayos de fatiga realizados con una misma tensión media y diferentes amplitudes; por lo tanto es una representación parcial. Otras diferentes condiciones de ensayo dan lugar a otras tantas curvas que corresponden a diferentes tipos de sollicitación. Resulta así de interés trazar un solo diagrama que relacione tensiones medias, amplitudes, tensiones máximas y mínimas.

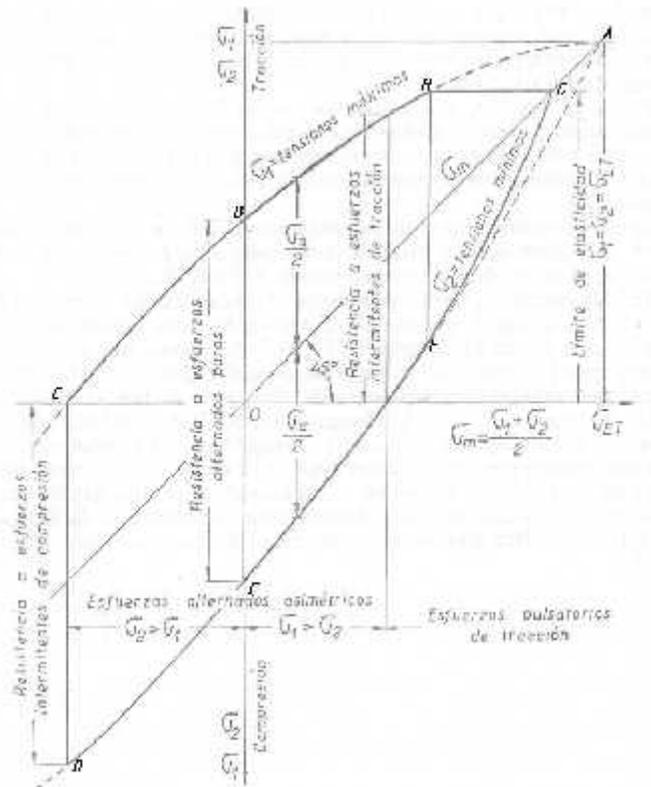
Goodman dijo que si realizamos ensayos pulsatorios con una tensión mínima variable según una recta a 45°, las máximas necesarias para mantener la resistencia a la fatiga siguen una ley lineal determinada por el punto A ( $\sigma_{ET}$ ) y por el B que es la máxima para esfuerzos intermitentes ( $\sigma_2=0$ ) y cuyo valor es  $0,5 \sigma_{ET}$ . La tensión máxima se limita al límite elástico o de fluencia ya que no tienen sentido utilizar valores de fatiga que superen ese límite y el campo de tensiones estaría dado por la zona rayada, donde en una ordenada cualquiera se tienen:  $CE = \sigma_1$  (tensión máxima);  $DE = \sigma_2$  (tensión mínima),  $CD = \sigma_a$  (amplitud).

Para esfuerzo alternativo simétrico la amplitud está dada por el segmento FG o sea una  $\sigma_a = 0,33\sigma_{ET}$ . Uniendo A con la intersección del segmento FG y eje abcisas puede obtenerse la  $\sigma_m$ , comprobándose que cuando ésta aumenta, disminuye proporcionalmente la amplitud.

Comparando los valores de las tensiones máximas dadas por Goodman y las obtenidas en laboratorio, para aceros dulces, se llegará a una diferencia del 30% en intermitente y para alternativas simétricas  $\sigma_a$  no es  $0,33\sigma_{ET}$  sino que toma valores variables entre 35% y 60%.

### 11 DIAGRAMA DE SMITH:

Estas diferencias mencionadas llevaron a Smith a modificar la representación gráfica y así poder disponer de un medio que permita conocer rápidamente tensiones límites y amplitudes a aplicar a un material para distintos tipos de esfuerzos.



Así en un sistema de coordenadas ortogonales con igual escala, se toman en abcisas  $\sigma_m$  y en ordenadas  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$ , medidas a partir de la bisectriz cuyos puntos corresponden a  $\sigma_m$ .

Las ordenadas de los valores de las tensiones superiores  $\sigma_1$  e inferiores  $\sigma_2$ , de las resistencias de fatiga para las distintas tensiones medias, unidas entre sí, proporcionan las curvas límites del diagrama de Smith. Los puntos ubicados dentro de la zona demarcada por dichas curvas responden a ensayos de fatiga donde las probetas no rompen; todos los ubicados fuera representan probetas que rompen por fatiga.

El diagrama se cierra en el límite elástico  $\sigma_a$  con HG y en la práctica HB, BC, GF, FE, ED pueden sustituirse por rectas de manera tal que la construcción gráfica queda reducida a la determinación de un cierto número de puntos.

La construcción práctica del diagrama de Smith sobre la base de curvas de Wöhler se hace del siguiente modo: En un punto de la línea  $\sigma_m$  a  $45^\circ$ , que es constante para cada curva, se ubican hacia arriba y abajo los valores de  $\sigma_d$  ( $\sigma_d = \sigma_m \pm \sigma_a$ ). Los extremos unidos entre sí proporcionan las curvas límites  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$ . Cualquier punto del gráfico que esté por encima de la curva límite de tensión máxima ( $\sigma_1$ ) corresponde a una probeta que rompió en el ensayo, en cambio los puntos que se encuentran en el área comprendida entre las curvas límites, responden a probetas que no han roto.

## ENSAYO DE FLUENCIA LENTA O CREEP

### 1 GENERALIDADES

El empleo de calderas de alta presión y turbinas de vapor, motores de combustión interna y el aumento producido en las temperaturas de la mayor parte de los procesos industriales ha requerido conocer deformaciones y roturas en el tiempo, para eliminar efectos perjudiciales que en metales o en aleaciones se producen a temperaturas elevadas. Consiste en aplicar cargas constantes, a prefijadas temperaturas y determinar la fluencia lenta, por cuanto para cada material y cada carga existe una temperatura límite hasta la cual las deformaciones producidas no provocan la rotura sino que se llega a una situación estable luego de un cierto tiempo; pasada esta temperatura la velocidad de deformación aumenta hasta la fractura del material. Ahora si las tensiones son suficientemente bajas el efecto creep no se produce ni aun a altas temperaturas.

El continuo aumento de la deformación con el tiempo se llama fluencia lenta (“creep” en inglés o “kriechen” en alemán).

En cambio, a temperatura ambiente la situación se refiere a medir la variación de carga que experimenta una longitud conocida de material, a una temperatura determinada. Esta prueba recibe el nombre de “relajamiento” y es importante en estudio de aceros de estructuras pretensadas, donde es necesario conocer la pérdida de carga que sufren los cables de tensado, para tenerla en cuenta durante su estiramiento que luego provocará la precompresión del hormigón.

### 2 REPRESENTACIÓN DEL ENSAYO

Conocidas la carga y temperatura constantes a que puede estar sometido un material se puede representar gráficamente el alargamiento por fluencia lenta, realizando ensayos sobre probetas sometidas a tensiones de tracción, torsión, flexión transversal, etc. Estos ensayos se realizan, dentro de lo posible, en condiciones análogas a sus empleos prácticos, pudiendo durar desde dos o más meses hasta varios años, aunque en estos casos conviene extrapolar los resultados para acelerar las experiencias.

Ensayos de menos de 1000 horas (42 días aproximadamente) no son considerados aceptables para conseguir resultados rigurosos.

Si a un metal o aleación le aplicamos a temperatura ambiente, una tensión inferior al límite de proporcionalidad, se producirá en el mismo un alargamiento elástico, que permanecerá constante cualquiera sea su tiempo de aplicación. Llevado a un diagrama deformación – tiempo queda representado por la ordenada OA y la oblicua A-B.

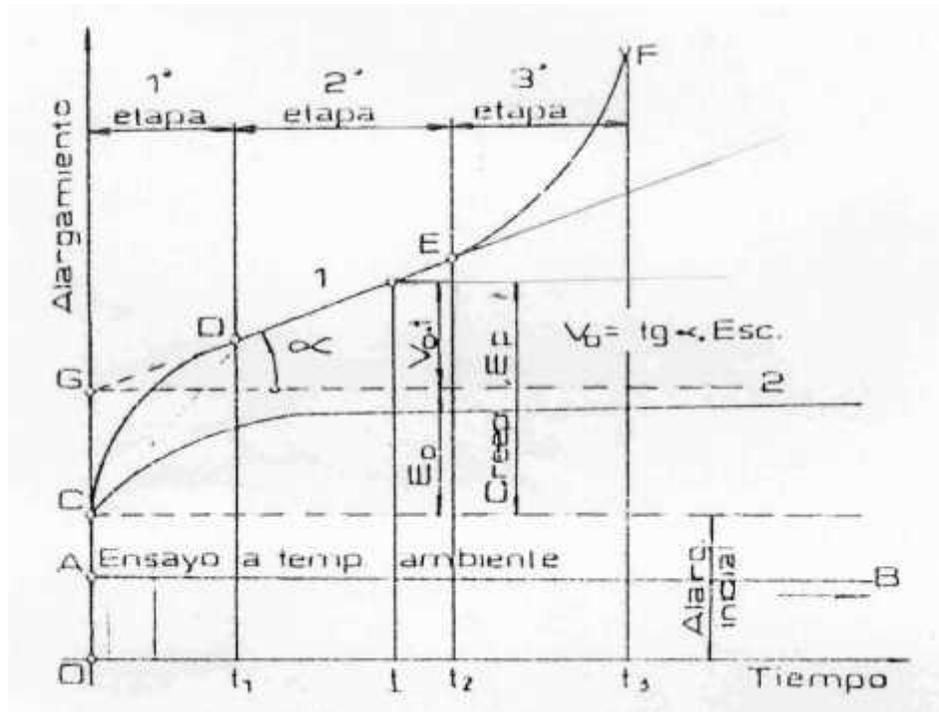
Si bajo la misma tensión se eleva la temperatura se produce una deformación instantánea  $OC > OA$ , debido principalmente al hecho de que el módulo de elasticidad disminuye al aumentar la temperatura (mayor movilidad de los átomos), pudiendo ser dicha deformación elástica o elasto-plástica según el material, la temperatura y tensión aplicada. En el tiempo las deformaciones podrán seguir la curva 1 y producirá la fractura en el punto “F” al cabo del tiempo “ $t_3$ ”; en caso contrario presentará deformación estable según curva 2 que nos indica que aunque las mismas aumenten no se llegará a la estricción del material.

El análisis de la curva 1 es similar al del gráfico espacio- tiempo de un estudio cinemático y admite tres consideraciones a saber:

- a) El alargamiento inicial es rápido y que a medida que éste aumenta la velocidad de creep disminuye, como indica la curva CD. Esta deformación a velocidad decreciente se denomina primera etapa del creep y finaliza en tiempo  $t_1$ .

- b) La segunda etapa está representada por la variación lineal DE, que nos manifiesta que las deformaciones se producen a velocidad constante y cuyo valor estará dado por el producto de la tangente trigonométrica del ángulo que forma con la horizontal y las escalas del dibujo. En este período la sección transversal se mantiene prácticamente sin alteraciones.
- c) La tercera etapa se caracteriza por un rápido aumento de la velocidad de deformación hasta la rotura, la que se ve facilitada por la disminución de sección que experimenta la probeta.

La curva 2 presenta en el tiempo de ensayo, las dos primeras etapas del creep y en donde el período a velocidad constante es de menor ángulo que el de la curva anterior, tendiendo a la horizontal si disminuye la carga o la temperatura.



### 3 NATURALEZA DEL CREEP

Para interpretar el fenómeno de deformaciones lentas se admite que la rotura de los metales a bajas temperaturas, se produce a través de los cristales mismos, mientras que para altas temperaturas (mayores de 450° C), la fractura tiene lugar en los bordes de aquéllos, es así que para una misma tensión y material, los alargamientos que se obtienen a temperaturas menores que la mencionada, se asemejan a un movimiento elástico entre los elementos constituyentes (el metal presenta características elásticas aun dentro del período plástico). A temperaturas superiores, si bien el fenómeno que tiene lugar es poco conocido, se admite que el escurrimiento es similar al que se obtendría en un líquido muy viscoso.

De lo analizado se deduce que el endurecimiento provocado por la deformación del material predomina hasta los 450° C y el efecto creep no ocurre si las tensiones no son lo suficientemente grandes como para superar el aumento de la resistencia motivado por este endurecimiento (diagrama 2 con deformación estable).

Pasados los 450° C la materia intercrystalina adquiere una determinada viscosidad, y como el endurecimiento en estas condiciones ofrece menor resistencia a las deformaciones plásticas, los granos del metal pueden sufrir deslizamientos aun para pequeños valores del esfuerzo, es decir que en altas temperaturas la velocidad de deformación es mayor que la de endurecimiento aunque las tensiones sean bajas.



de la temperatura se hace con una termocupla conectada al centro de la probeta y la regulación de la temperatura se hace con un termostato.

La deformación se determina con extensómetros de dial indicador, donde las varillas están construidas con aceros refractarios.

Las máquinas modernas tienen capacidad de carga de hasta 3000 kg con sensibilidad de 1 kg; las temperaturas son variables hasta 1200° C y las indicaciones se realizan con dispositivos ópticos que permiten apreciar desde 0,01 mm y el diagrama se obtiene con un registrador fotográfico.

## 5 PROBETAS

Las probetas son de forma cilíndrica con longitudes calibradas de 2" (50,8 mm) a 20" (508 mm) y diámetros de 0,505" (12,8 mm); 0,357" (9,1 mm); 0,252" (6,4 mm) con tolerancias de  $\pm 0,5\%$ .

Cuando se busca la resistencia al creep se usan probetas cortas (2") y de mayor longitud cuando se quieren medir pequeñas velocidades de deformación. Para uso general se prefieren de 5" (127 mm) y 0,505" (12,8 mm).

## 6 EJECUCIÓN DEL ENSAYO

Una vez establecida la carga y temperatura a las que se realizará el ensayo, se calienta la probeta hasta ese valor y se mide en ese instante la longitud de calibración. Luego se aplica la carga en forma rápida, evitando los impactos; a partir de ese momento se toman lecturas de la fluencia al cabo de horas al comienzo; luego diariamente y en ningún caso menos de 50 determinaciones, simultáneamente se registrarán las temperaturas.

Como se expresó anteriormente conviene que los ensayos se prolonguen por 1000 horas como mínimo, y cuando éstos duren por varios años deberán prolongarse hasta alcanzar el tiempo de velocidad constante del segundo período. De tal modo, suponiendo que la fluencia continúe en igual forma, se podrá determinar gráficamente el creep total o alargamiento plástico "p", que experimentará el material al cabo de un tiempo "t" mayor que el de ensayo.

Llamando "0" al creep elemental (intersección del tramo recto con eje de los alargamientos) y conociendo que la tangente del ángulo del segundo período nos da la velocidad constante, el creep total para el tiempo "t" es :

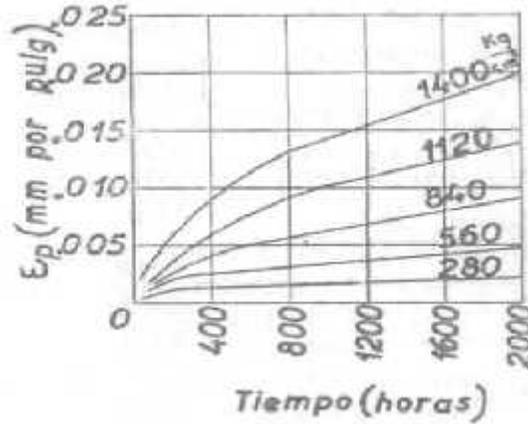
$$p = 0 + V_0 \cdot t \quad \text{ó} \quad p = 0 + tg \cdot t \quad * \text{escalas dibujo} * t$$

## 7 EMPLEO DE LAS CURVAS DE ENSAYO

El dimensionamiento de piezas sometidas a tensiones constantes y temperaturas superiores a 450° C se efectúa, para evitar inconvenientes en los mecanismos, en base a la velocidad de alargamiento de la segunda etapa de la fluencia. En cambio para temperaturas menores, se realizan ensayos de corto tiempo que permitan conocer  $\epsilon$  y  $\epsilon_T$  bajo esas condiciones.

En ensayos de creep se puede fijar una temperatura y graficar el comportamiento de los materiales bajo diferentes tensiones, que luego por extrapolación permitirán conocer los diagramas para tiempos muy superiores a los de ensayo y para un creep máximo de 1% de pulgada.

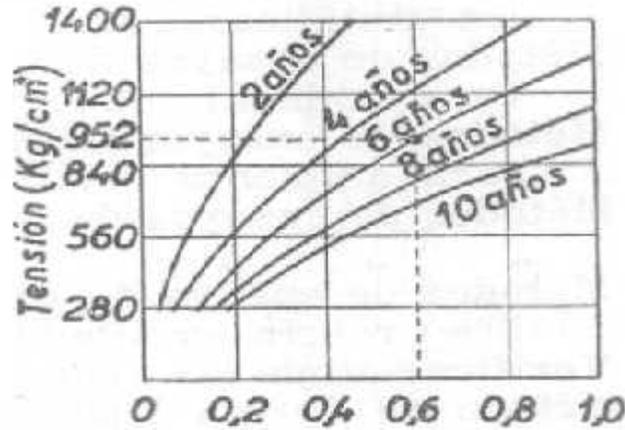
En base al siguiente diagrama se construyen otros, con los que se puede obtener la tensión admisible capaz de producir una deformación dada en un tiempo conocido y para una temperatura considerada.



Temperat

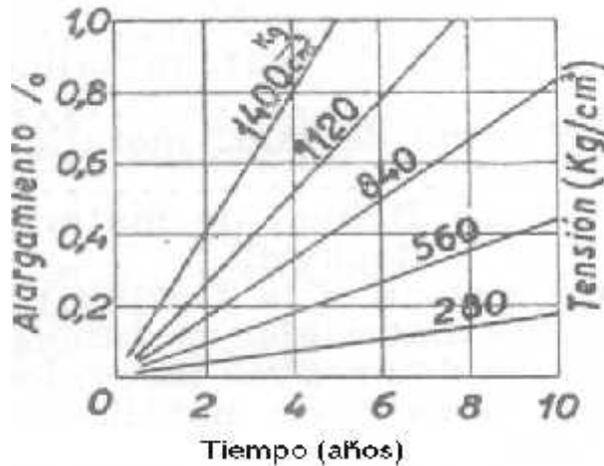
Por ejemplo para una deformación del 0,6% en 6 años a 450° C nos da una tensión de 952 kg/cm<sup>2</sup>.

Temperatura:  
450° C



Otro diagrama puede construirse en base al p y tiempo, pero para este último, considerado en años.

Temperatura:  
450° C



Los factores que inciden sobre el comportamiento de los materiales sujetos a fluencia lenta son: tamaño del grano, composición química, procedimiento de fabricación y tratamiento térmico.