

4.- Propiedades mecánicas.

4.1.- Introducción.

Muchos materiales, cuando prestan servicio, están sometidos a fuerzas o cargas, ejemplos de ello son los revestimientos refractarios de los hornos, las aleaciones de aluminio con las cuales se construyen las alas de los aviones, el acero de los ejes de los automóviles o las vigas y pilares de los edificios. En tales situaciones es necesario conocer las características del material y diseñar la pieza de tal manera que cualquier deformación resultante no sea excesiva y no se produzca la rotura. El comportamiento mecánico o las propiedades mecánicas de un material reflejan la relación entre la fuerza aplicada y la respuesta del material (o sea, su deformación). Algunas de las propiedades mecánicas más importantes son la resistencia, la dureza, la ductilidad y la rigidez.

La respuesta de los materiales a las fuerzas aplicadas depende de

- 1.- Tipo de enlace.
- 2.- Disposición estructural de los átomos o moléculas.
- 3.- Tipo y número de imperfecciones, que están siempre presentes en los sólidos, excepto en raras circunstancias.

Así, fijada la sollicitación exterior es evidente que la deformación que se origina y, en consecuencia, la tensión creada en el sólido elástico dependen de las fuerzas de atracción molecular, es decir, de la estructura cristalina del material.

A pesar de la considerable complejidad de los materiales ingenieriles todos los materiales sometidos a cargas se pueden clasificar en tres grupos principales de acuerdo con el mecanismo que ocurre durante su deformación bajo las fuerzas aplicadas

(I).- MATERIALES ELASTICOS (Por ejemplo, los cristales iónicos y covalentes).

(II).- MATERIALES ELASTOPLASTICOS (Por ejemplo, los metales estructurales).

(III).- MATERIALES VISCOELASTICOS (Por ejemplo, los plásticos, los vidrios).

A su vez los tipos básicos de deformación de los materiales como respuesta a las fuerzas aplicadas son tres

1.- ELASTICO.

2.- PLASTICO.

3.- VISCOSO

Los materiales refractarios en servicio están sujetos a fuertes tensiones mecánicas debidas, en la mayor parte de los casos, a las dilataciones de la mampostería refractaria (Fuerzas debidas a la expansión térmica), como es el caso de los refractarios en el horno de cemento. La mayor o menor capacidad de un material para absorber dichas tensiones, deformándose sin romperse, será una de las causas de buen comportamiento del material refractario en las instalaciones.

Los elementos de un cuerpo tienden a dilatarse o contraerse cuando se calientan o se enfrían respectivamente, y las deformaciones que se presentan se denominan deformaciones unitarias térmicas. Si los elementos se pueden deformar libremente, las deformaciones unitarias térmicas no vienen acompañadas de tensiones, pero si se restringe la deformación, como ocurre en el caso de la mampostería refractaria, aparecen tensiones térmicas.

Las deformaciones unitarias térmicas vienen dadas por:

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} = \alpha \Delta T$$

donde:

- α = Coeficiente de dilatación lineal del material.
- ΔT = Cambio de temperatura.
- L = Dimensión final.
- L_0 = Dimensión inicial.

Asumiendo que la mampostería refractaria esta totalmente restringida, es decir los elementos no pueden variar sus dimensiones en la magnitud:

$$\Delta L = \varepsilon_0 L_0 = \alpha L_0 \Delta T$$

su dimensión final será la misma que la inicial.

La tensión térmica, σ_t , como se muestra en la [figura 4.1.1](#), puede calcularse usando la curva tensión-deformación unitaria del material. Asumiendo un modulo de elasticidad igual a E e igual a la tangente a la curva en el punto M (Intersección de la curva con la recta vertical $\varepsilon = \varepsilon_0$), la tensión térmica viene dada por:

$$\sigma_t = \varepsilon_0 E = \alpha E \Delta T$$

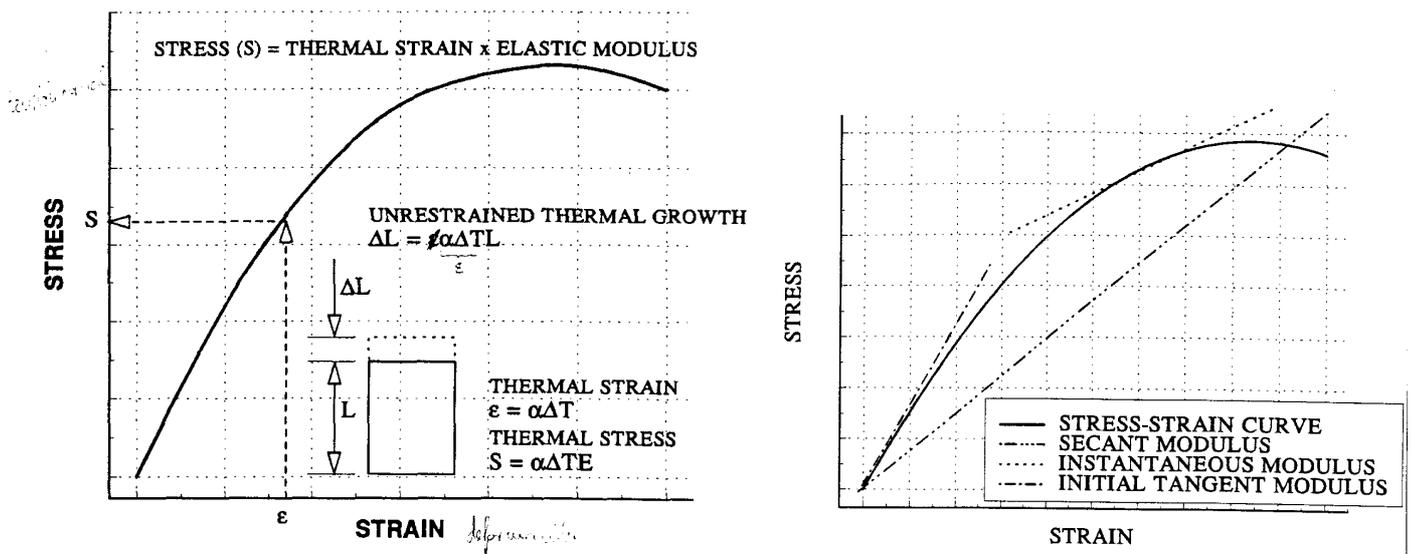


Figura 4.1.1.- Carga controlada por la deformación.

Las propiedades mecánicas de los materiales son muy sensibles a las operaciones y proceso de fabricación.

Los ingenieros de materiales y los metalúrgicos, por otro lado, dirigen sus esfuerzos a producir y conformar materiales que puedan soportar las condiciones de servicio predichas por el análisis de tensiones. Esto necesariamente implica un conocimiento de la relación entre la microestructura (es decir, los detalles internos) de los materiales y sus propiedades mecánicas.

4.2.- Conceptos de esfuerzo deformación.

Si una fuerza o carga es estática o bien cambia de forma relativamente lenta con el tiempo y es aplicada uniformemente sobre una sección o superficie de una pieza, el comportamiento mecánico del material puede ser estimado mediante un simple ensayo esfuerzo - deformación. Por tanto, para obtener la relación entre tensión y deformación tendremos que proceder necesariamente por vía experimental mediante ensayos realizados en el laboratorio, en donde se comprueba, en efecto, que para dos piezas de distintos materiales, de iguales dimensiones y sometidas al mismo estado de cargas, las deformaciones son distintas.

En los ensayos de compresión y de tracción el esfuerzo, σ , se mide como la fuerza, F , actuando por unidad de área (A), es decir:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (4.2.1)$$

La alteración de la forma o dimensiones de un cuerpo como resultado de las tensiones se denomina deformación. Existen tres principales maneras de aplicar la carga, a saber: tracción, compresión y cizalladura (Figuras 4.2.1 a, b, c). En las aplicaciones de ingeniería, muchas cargas son torsionales más que de cizalladura pura. Este tipo de carga se ilustra en la figura 4.2.1.d.

Puesto que existen esos tipos principales de tensión darán lugar a deformaciones de tracción, compresión, cizalladura y de torsión.

La deformación por tracción viene dada por:
$$\varepsilon_t = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (4.2.2)$$

y la de compresión:
$$\varepsilon_c = \frac{L_0 - L}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (4.2.3)$$

Los esfuerzos de tracción causan en la pieza una elongación perpendicular a su propia dirección, mientras que los de compresión dan lugar a una contracción.

En los ensayos en que se utiliza simplemente una fuerza de cizalladura tal como se muestra en la figura 4.2.1.c, la tensión de cizalladura τ se calcula de acuerdo con:

$$\tau = \frac{F}{A_0} \quad (4.2.4)$$

donde F es la carga o fuerza impuesta paralelamente a las caras superior e inferior, cada una de las cuales tiene un área A_0 . La deformación de cizalladura γ se define como la tangente del ángulo de deformación θ , tal como se indica en la figura 4.2.1.c, y, viene dada por la relación:

$$\gamma_c = \frac{aa'}{ad} = \text{tg}(\theta) \quad (4.2.5)$$

donde el ángulo θ es el resultante del cambio de inclinación de un cierto plano sujeto a una tensión cortante pura, τ , y una línea perpendicular a este. El segmento aa' es el deslizamiento horizontal del lado ab con respecto al lado cd . La tensión cortante es equivalente al estado tensional producido por una tracción en una dirección e igual compresión en la dirección perpendicular.

Las unidades de tensión y deformación de cizalladura son las mismas que las correspondientes de tracción.

La torsión es una variación de la cizalladura pura, mediante la cual un miembro estructural es deformado de la forma mostrada en la figura 4.2.1.d. Las fuerzas de torsión producen un movimiento rotacional alrededor del eje longitudinal de un extremo del miembro respecto al otro extremo. Ejemplos de torsión se encuentran en el caso de ejes de máquinas y ejes impulsores, y también en brocas.

Los ensayos de torsión generalmente se realizan sobre cilindros sólidos, o bien sobre tubos. La tensión de cizalladura τ es una función del par aplicado T, es decir $\tau = f(T)$, mientras que la deformación de cizalladura γ está relacionada con el ángulo de giro, Φ de la figura 4.2.1.d y viene dada por:

$$\gamma_t = \frac{\Phi r}{L} \quad \left(\Phi = \frac{2ML}{\pi R^4 G} \right), \quad G = \text{Módulo de cizalladura}, \quad M = \text{Momento del par} = TR \quad (4.2.6)$$

La tensión y la deformación de cizalladura son proporcionales entre sí según la expresión:

$$\tau = G\gamma \quad (4.2.7)$$

donde G es el módulo de cizalladura, o sea, la pendiente de la región elástica de la curva tensión-deformación de cizalladura.

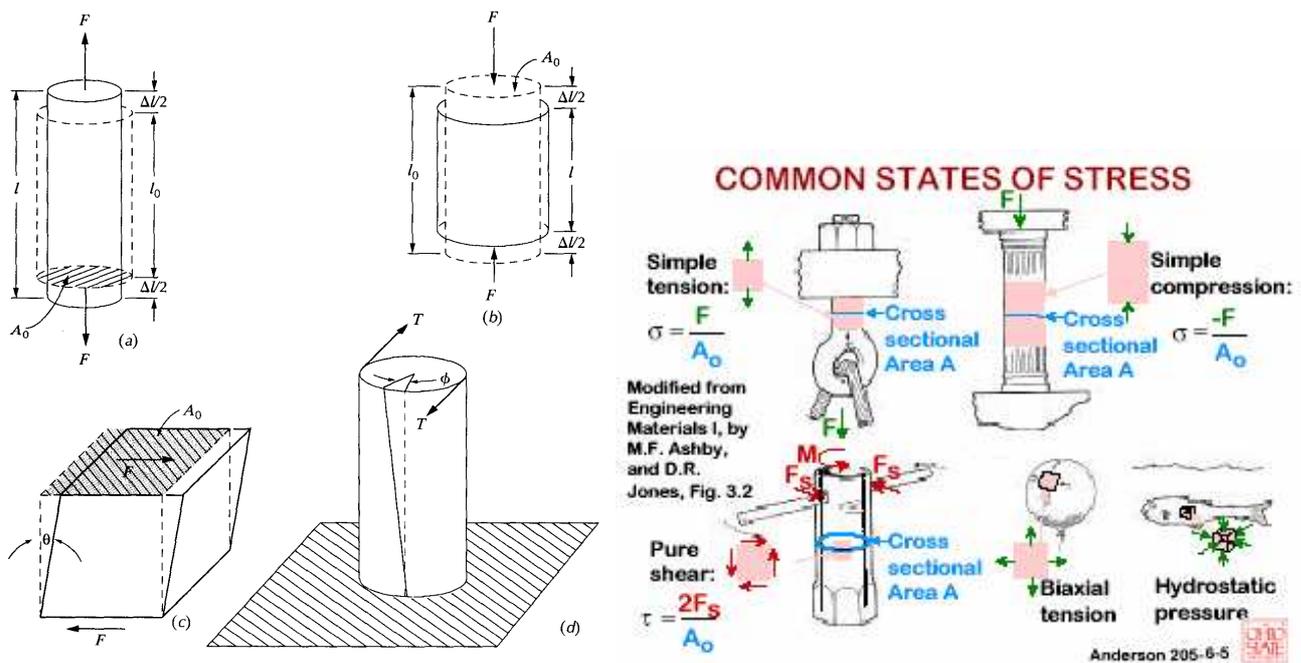


Figura 4.2.1.- (a).- Ilustración esquemática de como una carga de tracción produce un alargamiento y una deformación lineal positiva. Las líneas discontinuas representan la forma antes de la deformación y las sólidas, después de la deformación. (b).- Ilustración esquemática de como una carga de compresión produce una contracción y una deformación lineal negativa. (c).- Representación esquemática de la deformación de cizalladura, y, donde $\gamma = \text{tg}(\theta)$ (d).- Representación esquemática de una deformación torsional (o sea, ángulo de giro Φ) producido por un par aplicado T.

Cuando sobre un material se aplica una tracción, se produce un alargamiento elástico y una deformación ϵ_z en la dirección de la carga aplicada (la cual se tomará arbitrariamente como la dirección z), tal como se indica en la figura 4.2.2. Como resultado de este alargamiento, se producirán contracciones en las direcciones laterales (x e y) perpendiculares a la dirección de la aplicación de la tensión. A partir de dichas contracciones, se pueden determinar las deformaciones de compresión ϵ_x y ϵ_y .

Se define un parámetro denominado coeficiente de Poisson como el cociente entre las deformaciones laterales y axiales, o sea,

$$\nu = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_z} = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_z} \quad (4.2.8)$$

El signo negativo se incluye en la expresión para que ν sea siempre positivo, puesto que ϵ_x y ϵ_y siempre son de signo opuesto a ϵ_z .

El módulo de cizalladura y el módulo elástico están relacionados entre sí y con el módulo de Poisson mediante la relación:

$$E = 2 G (1 + \nu)$$

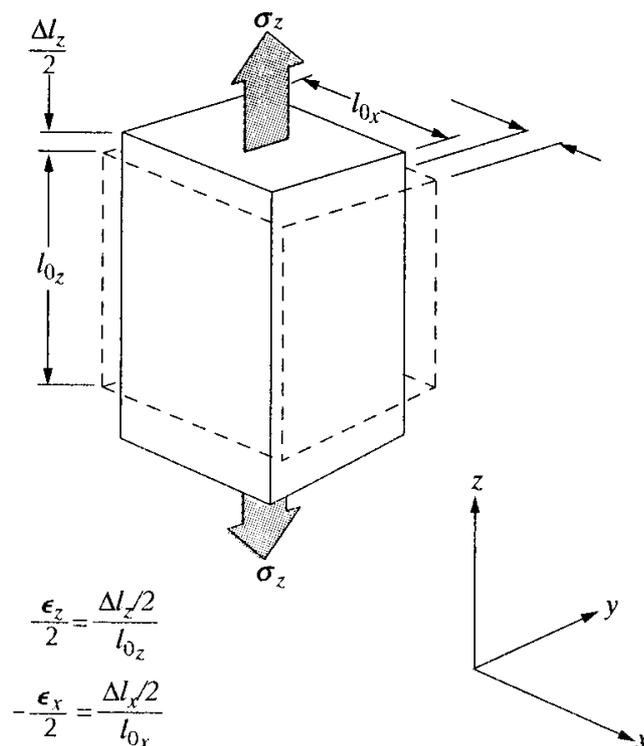


Figura 4.2.2.- Alargamiento axial (z) (deformación positiva) y contracciones laterales (x e y) en respuesta a una tracción aplicada. Las líneas continuas representan las dimensiones después de aplicación de la carga y las discontinuas, antes.

4.3.- Curvas tensión – deformación.

Las curvas tensión - deformación, usualmente, se obtienen mediante ensayos de laboratorio realizados mediante normas estandarizadas y utilizando probetas también estandarizadas. Se fijan la velocidad de carga y la temperatura.

Los ensayos se pueden realizar con cargas de compresión, tracción, flexión y cortadura, que a su vez pueden ser estáticas o dinámicas. Los ensayos de compresión, tracción y flexión con cargas estáticas son los que mas se suelen realizar.

Los ensayos de TRACCION se realizan con los MATERIALES DUCTILES con un cierto grado de plasticidad, tales como los materiales metálicos ferrosos y no ferrosos, plásticos, gomas, fibras, etc.

Los ensayos de COMPRESION Y FLEXION se realizan con los MATERIALES FRAGILES, tales como los materiales refractarios, el hormigón, cerámicos, etc. Estos materiales poseen una baja resistencia a la tracción en comparación con la de compresión.

En [la figura 4.3.1](#), puede verse la forma general de la curva tensión - deformación de un material dúctil y la de un material frágil. Se puede observar que los materiales dúctiles rompen después de experimentar una deformación apreciable, mientras que los materiales frágiles rompen después de pequeñas deformaciones. En [la figura 4.3.2](#) se muestra la curva tensión – deformación del acero y en [la figura 4.3.3](#) la de un material refractario con un 70 % de Al_2O_3 en función de la temperatura y ensayado a compresión.

Las curvas tensión - deformación nos permiten determinar las principales características mecánicas de los materiales, Así, se pueden estimar una serie de importantes propiedades tales como :

- 1.- RESISTENCIA.
- 2.- RIGIDEZ
- 3.- DUCTILIDAD.
- 4.- RESILIENCIA.
- 5.- TENACIDAD.

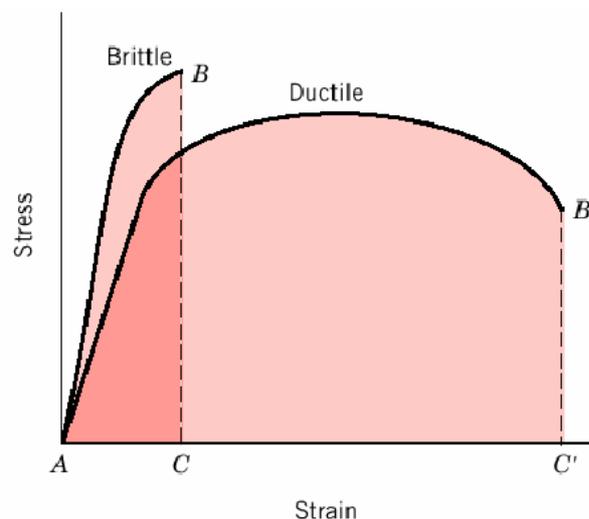


Figura 4.3.1.- Representación esquemática de los diagramas de tracción de materiales frágiles y dúctiles ensayados hasta la fractura.

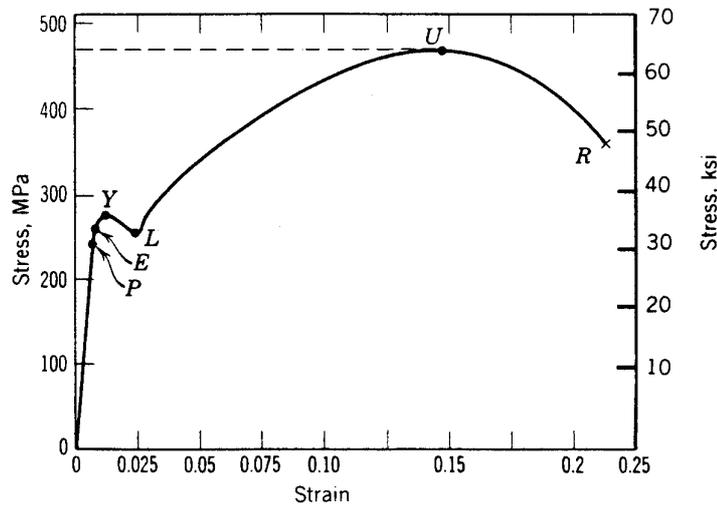


Figura 4.3.2.- Diagrama tensión - deformación de un acero sometido a tracción.

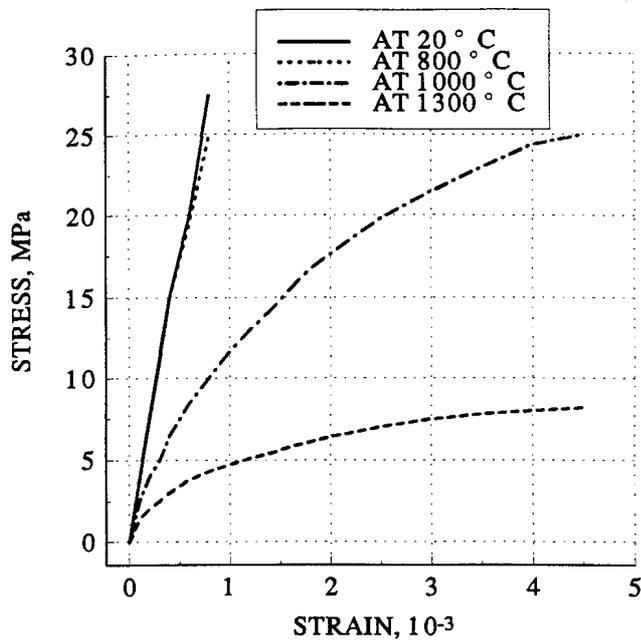


Figura 4.3.3.- Diagrama tensión - deformación de un material refractario con un 70 % de Al_2O_3 en función de la temperatura y ensayado a compresión.

El modulo de elasticidad de un material nos define la mayor o menor capacidad de un material de deformarse bajo tensiones y puede ser interpretado como la RIGIDEZ del material, es decir, su resistencia a la deformación elástica, de tal modo que cuanto mayor es el modulo mas rígido es el material, o sea, menor es la deformación elástica que se origina cuando se aplica una determinada tensión σ .

A escala atómica la deformación elástica macroscópica se manifiesta como pequeños cambios en el espaciado intraatómico y así los enlaces entre átomos son estirados. Por tanto, la magnitud del modulo de elasticidad es una medida de la resistencia a la separación de los átomos contiguos. Esto depende de dos factores, que son especialmente importantes:

- Las fuerzas de enlace intraatómicas, que mantienen unidos a los átomos actuando como pequeños muelles (Figura 3.6). Existen enlaces primarios (IONICO, COVALENTE Y METALICO), que son todos relativamente fuertes y dan puntos de fusión entre 750 y 4750 °C y enlaces secundarios (VAN DER WAALS Y PUENTES DE HIDROGENO), que son relativamente débiles y dan puntos de fusión entre -150 y 250 °C.

- El empaquetamiento atómico, que determina cuantos pequeños muelles hay por unidad de área y el ángulo en que ellos son estirados. El empaquetamiento está fuertemente influenciado por el tipo de enlace.

Los valores del módulo de elasticidad de las cerámicas en general son mayores que los valores de los metales y para los polímeros son menores. Estas diferencias son una consecuencia directa de los distintos tipos de enlace atómico en estos tres tipos de materiales.

4.4.- Tipos de Rotura.

La resistencia a la rotura no es una propiedad, sino el resultado de un ensayo que da la tensión o carga necesaria por unidad de sección para producir la rotura del metal ensayado. Como la rotura de un metal puede producirse por tracción, por compresión, por torsión o por cizalladura. Entonces habrá una resistencia a la rotura por tracción, otra por compresión, otra por torsión y otra por cizalladura.

La fractura o rotura simple es la separación de un cuerpo en dos o más piezas en respuesta a una tensión aplicada estática (es decir, constante o que cambia lentamente con el tiempo) y a temperaturas que son relativamente bajas en comparación con la temperatura de fusión del material. Se comentarán las fracturas que resultan de cargas de tracción uniaxiales.

En los materiales de ingeniería, existen dos tipos de fractura: dúctil y frágil. La clasificación está basada en la capacidad del material para experimentar deformación plástica. Los materiales dúctiles exhiben normalmente una deformación plástica substancial con muy alta absorción de energía antes de la fractura. Por otro lado, en la rotura frágil existe normalmente poca o ninguna deformación plástica con poca absorción de energía en el proceso de rotura.

Cualquier proceso de fractura está compuesto de dos etapas -la formación y la propagación de una fisura- en respuesta a una tensión aplicada. El modo de fractura depende mucho del mecanismo de propagación de la grieta. La fractura dúctil se caracteriza por la existencia de mucha deformación plástica en la vecindad de la grieta que avanza. Además, el proceso tiene lugar lentamente a medida que la grieta se extiende. Una grieta de este tipo se suele decir que es estable. Es decir, se resiste a su extensión a menos que se aumente la tensión aplicada. Además, hay evidencia de deformación plástica apreciable en las superficies de fractura (por ejemplo, retorcimiento y desgarre).

Por el contrario, en el caso de la fractura frágil, las grietas pueden extenderse de forma muy rápida, con muy poca deformación plástica. Tales grietas se denominan inestables, y la propagación de la grieta, una vez iniciada, continúa espontáneamente sin un aumento en la tensión aplicada.

La fractura dúctil es siempre preferida por dos razones. En primer lugar, la fractura frágil ocurre de forma súbita y catastrófica sin ningún síntoma previo. Esto es consecuencia de la propagación rápida y espontánea de la grieta. Además, en el caso de fractura dúctil la presencia de deformación plástica es un síntoma de que la fractura es inminente, siendo así posible tomar medidas preventivas. En segundo lugar, para inducir la fractura dúctil se requiere más energía de deformación ya que los materiales dúctiles generalmente son más tenaces. Bajo la acción de una tensión aplicada, la mayoría de los metales son dúctiles, mientras que las cerámicas son notablemente frágiles y los polímeros pueden exhibir ambos tipos de fractura.

Fractura dúctil.

Las superficies de fractura dúctiles tienen sus propios rasgos tanto a nivel microscópico como microscópico. La figura 4.4.1 muestra esquemáticamente dos perfiles microscópicos característicos de fractura. La configuración mostrada en la figura 4.4.1.a se encuentra en metales muy blandos, tales como oro y plomo a temperatura ambiente, y en otros metales, polímeros y vidrios inorgánicos a temperaturas elevadas. Estos materiales son muy dúctiles y se rompen cuando la estricción se reduce prácticamente a un punto, presentando una reducción de área virtualmente igual al 100%.

El tipo más común de perfil de fractura a tracción en los materiales dúctiles es el representado en la figura 4.4.1.b, en la cual la fractura es precedida por solo una cantidad moderada de estiramiento.

El proceso de fractura normalmente ocurre en varias etapas (Figura 4.4.2). En primer lugar, después de iniciarse la estiración, se forman pequeñas cavidades, o microcavidades, en el interior de la sección, tal como se indica en la figura 4.4.2.b. A continuación, a medida que la deformación aumenta, estas microcavidades se hacen mayores, se juntan y coalescen para formar una grieta elíptica, la cual tiene su eje mayor perpendicular a la dirección de la fuerza aplicada. La grieta continúa creciendo en una dirección paralela a su eje mayor mediante este proceso de coalescencia de microcavidades (Figura 4.4.2.c).

Finalmente, se produce la fractura por la rápida propagación de una grieta alrededor del perímetro exterior de la estiración (Figura 4.4.2.d), por deformación de cizalladura formando un ángulo de alrededor de 45° con respecto al eje de tracción, o sea, el ángulo en el cual la tensión de cizalladura es máxima. Algunas veces, una fractura que tiene este contorno característico se denomina fractura copa-cono debido a que una de las superficies tiene la forma de una copa y la otra la de un cono.

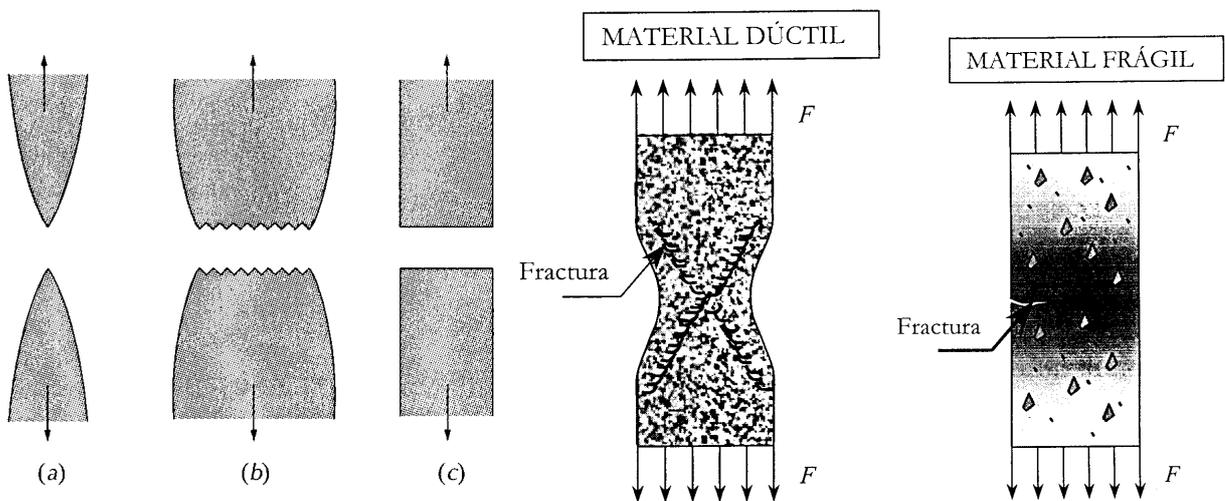


Figura 4.4.1.- (a) Fractura muy dúctil en la cual la probeta se estiración hasta llegar a un punto. (b) Fractura moderadamente dúctil después de cierta estiración. (c) Fractura frágil sin ninguna deformación plástica.

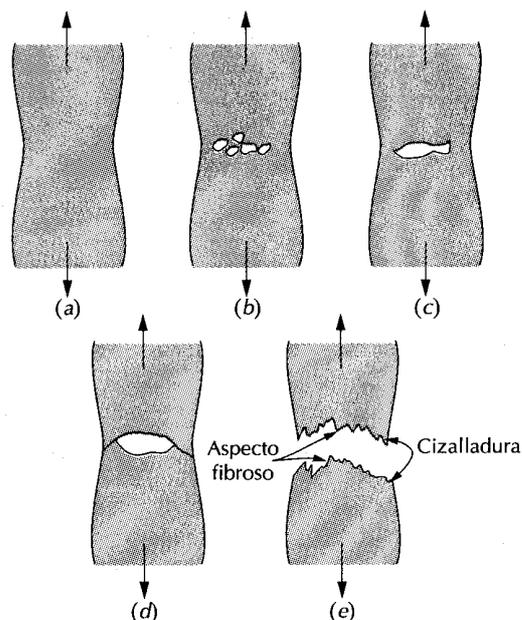


Figura 4.4.2.- Etapas en la fractura copa-cono. (a) estiración inicial. (b) Formación de pequeñas cavidades. (c) La coalescencia de cavidades forma una grieta. (d) propagación de la grieta. (e) Fractura final por cizalladura a un ángulo de 45° respecto a la dirección de la tensión.

En resumen, las características de las roturas dúctiles son:

* La rotura produce un cono a 45° .

* Observando el gráfico de [la figura 4.4.3](#) se observa:

- Tiene un gran alargamiento en el periodo de estricción y rotura.
- La diferencia entre el límite de proporcionalidad y tensión de rotura es muy grande.
- Tiene un gran periodo plástico.

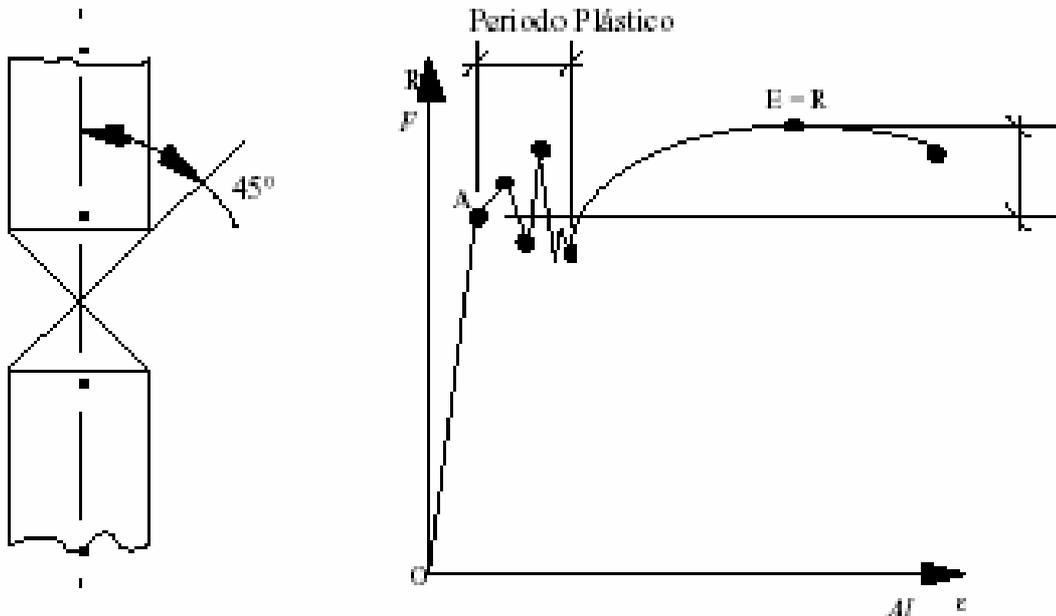


Figura 4.4.3.- Características de las roturas dúctiles.

Fractura frágil.

La fractura frágil ocurre sin apreciable deformación plástica, y por propagación rápida de una grieta. La dirección del movimiento de la grieta es casi perpendicular a la dirección de la tensión aplicada y produce una superficie de fractura relativamente plana, tal como esta indicado en [la figura 4.4.1 .c](#).

Las superficies de fractura de los materiales que se han roto de una manera frágil tienen sus propios detalles característicos; cualquier signo de deformación plástica importante esta ausente. La fractura frágil en materiales amorfos, tales como vidrios cerámicos, produce una superficie lisa y brillante.

En la mayoría de los materiales cristalinos frágiles, la propagación de la grieta corresponde a la sucesiva y repetida rotura de enlaces atómicos a lo largo de planos cristalográficos. Tal proceso se denomina descohesión. Este tipo de fractura se dice que es transgranular (o transcristalina), debido a que las grietas pasan a través de los granos. En algunas aleaciones, la propagación de la grieta ocurre a lo largo de los bordes de grano; esta fractura se denomina fractura intergranular.

En resumen, las características de las roturas frágiles son:

* Prácticamente no tiene cono de rotura. No hay apenas estricción.

* La rotura es de 90° respecto al eje.

* Observando el gráfico de [la figura 4.4.4](#) se tiene:

- Desaparece el periodo plástico. El alargamiento es muy corto.

- El periodo de estricción y rotura es muy corto.
- La diferencia entre el punto A y el punto B es muy corta.

Estos dos casos son los casos extremos, los demás casos se comprenden entre estos dos.

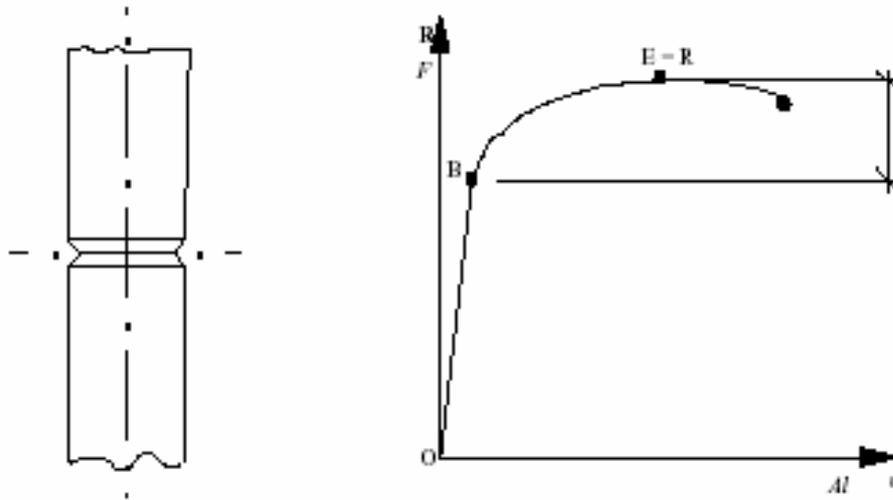


Figura 4.4.4.- Características de las roturas frágiles.

Factores de los que dependen las roturas:

(a).- Temperatura:

Actualmente se realizan ensayos en diferentes temperaturas (horno y aparato que produce frío-gas)

- * Comportamiento en frío: A medida que se enfríe el periodo plástico va desapareciendo, se convierte de material dúctil a frágil. El límite elástico se aproxima a la tensión de rotura.
- * Comportamiento en caliente (Figura 4.4.5): Aumenta el periodo plástico, disminuye la tensión de rotura.

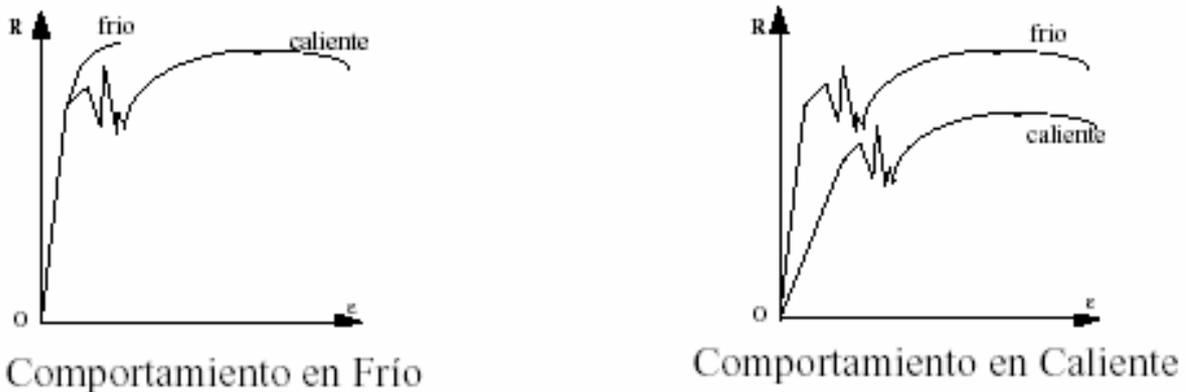


Figura 4.4.5.- Influencia de la temperatura en el comportamiento del material frente a la rotura

(b).- Velocidad:

Al aumentar la velocidad disminuimos el periodo plástico. No cambia la Tensión de Rotura.

(c).- Estructura Cristalina:

- Grano grande y abierto. El material rompe antes, NO hay periodo plástico.
- Grano pequeño y cerrado. Hay periodo plástico, el material rompe más tarde.

4.5.- Ensayos de resistencia: compresión, tracción y flexión.

4.5.1.- Resistencia a compresión en frío.

La resistencia a la compresión en frío, σ_{cf} , ha sido considerada como uno de los máximos exponentes de la resistencia mecánica general de un material refractario. Sin embargo, hoy en día no se considera tan importante porque las roturas a compresión representan una pequeña proporción de los problemas que aparecen en la construcción de hornos. De cualquier forma, resulta útil como comprobación indirecta de otras propiedades y porque puede poner de relieve defectos de fabricación

La resistencia a la compresión en frío tiene gran importancia, por ejemplo, en:

- Los hogares de combustión en donde un ladrillo con una resistencia a la compresión en frío elevada es más resistente a los golpes de barras o la limpieza de escorias, que uno que la tenga baja.
- Las chimeneas donde tienen que soportar el peso de todos los refractarios que están encima.

La resistencia a la compresión en frío guarda una estrecha relación con las siguientes propiedades y características (Tabla 4.5.1.1):

- POROSIDAD (COMPACIDAD).
- GRADO DE VITRIFICACION DEL CONSTITUYENTE MATRIZ.
- VISCOSIDAD DE LA FASE VITREA.

Una menor porosidad influye favorablemente. Esta es mínima en los materiales refractarios electrofundidos y es elevada en los refractarios aislantes que, por lo tanto, presentan resistencias a la compresión en frío limitadas (2 - 10 N/mm²), aunque por otra parte hay que tener en cuenta que al ser más ligeros están sometidos a una presión menor.

Los ladrillos de chamota conformados plásticamente deberán tener una resistencia mínima a la compresión en frío de 10-15 N/mm², mientras que en los ladrillos de chamota dura conformados en seco deberá ser sobre 30 a 50 N/mm² y en casos especiales hasta superior a 70 N/mm². La resistencia a la compresión en frío de los ladrillos de sílice alcanza de 20 a 30 N/mm², en los ladrillos aluminosos y de magnesia con alto contenido en hierro se sitúa ésta entre 30 y 150 N/mm². La máxima resistencia, que llega a rebasar los 200 N/mm², se alcanza con los ladrillos de carburo de silicio y aluminosos de alta calidad.

A su vez un menor grado de vitrificación del constituyente matriz también influye favorablemente. Las zonas donde exista fase vítrea son más débiles y, por tanto, son posibles zonas donde se inicie la fractura (Figura 4.5.1.1).

La extensión del grado de vitrificación se puede reducir mediante un recocido a alta temperatura (Aumenta la cristalización). Sin embargo, este tratamiento influye desfavorablemente sobre la resistencia al choque térmico, por lo que una alta resistencia a la compresión en frío supone, en general, una baja resistencia al choque térmico. Aunque, una resistencia alta a la compresión en frío no siempre supone una resistencia baja a los cambios bruscos de temperatura.

Finalmente, una mayor viscosidad de la fase vítrea influye favorablemente. La viscosidad de la fase vítrea se puede aumentar mediante aditivos.

Tabla 4.5.1.1.- Información de la resistencia a la compresión en frío. Factores favorables.

Información

- * Resistencia mecánica
 - . Presión
 - . Choque
 - . Abrasión
- * Detección de defectos

Factores favorables

- * Menor porosidad
- * Menor vitrificación
 - . Recocido
 - . Efecto desfavorable res. choque térm.
- * Viscosidad fase vítrea grande.
 - . Aditivos

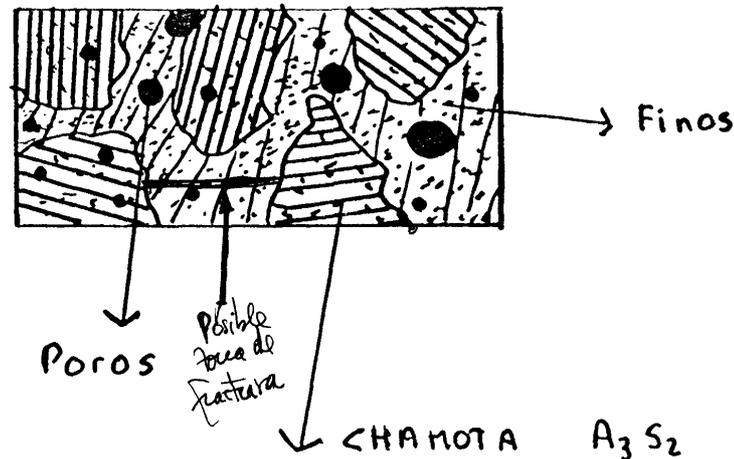


Figura 4.5.1.1.- Posible zona de iniciación de la fractura.

La resistencia a la compresión en frío se determina según la norma UNE EN 993-5 y se define como el cociente entre la carga máxima F , aplicada en condiciones especificadas a temperatura ambiente, que puede resistir un producto refractario sin destruirse, y la sección inicial de la probeta S_0 , es decir:

$$\sigma_{cf} = \frac{F(N)}{S_0(mm^2)} \quad (4.5.1.1)$$

Se expresa en N/mm^2 (MPa).

Una probeta de dimensiones conocidas se somete, en condiciones especificadas, a una carga de compresión que aumenta progresivamente hasta que la probeta rompe, es decir, hasta el momento en que no puede resistir un nuevo aumento de la carga.

Las probetas serán de forma cilíndrica de $50 \pm 0.5 \text{ mm}$ de diámetro por $50 \pm 0.5 \text{ mm}$ de altura, sacadas por taladro del centro de la pieza refractaria en la misma dirección en que haya actuado el prensado durante su fabricación, si se conoce, y luego cortadas. Las bases serán paralelas entre si y perpendiculares al eje de la probeta, alisándose por amolado con una máquina rectificadora. Se rechazarán las probetas que presenten defectos evidentes.

En casos excepcionales, cuando el tamaño o formato de las piezas refractarias no permita extraer las probetas de las dimensiones citadas, se utilizarán probetas cilíndricas de $36 \pm 0.3 \text{ mm}$ de diámetro por $36 \pm 0.3 \text{ mm}$ de altura.

También se pueden utilizar cubos de $50 \pm 0.5 \text{ mm}$ de lado.

Como esta propiedad mecánica presenta, habitualmente, una gran dispersión el número de probetas a ensayar de cada tipo de refractario no será nunca inferior a 5. Para reducir al mínimo la dispersión de los resultados y lograr una mejor repetibilidad es necesario preparar las probetas cuidadosamente. En la figura 4.5.1.2, se puede ver la forma y las dimensiones de las probetas, así como sus tolerancias respectivas.

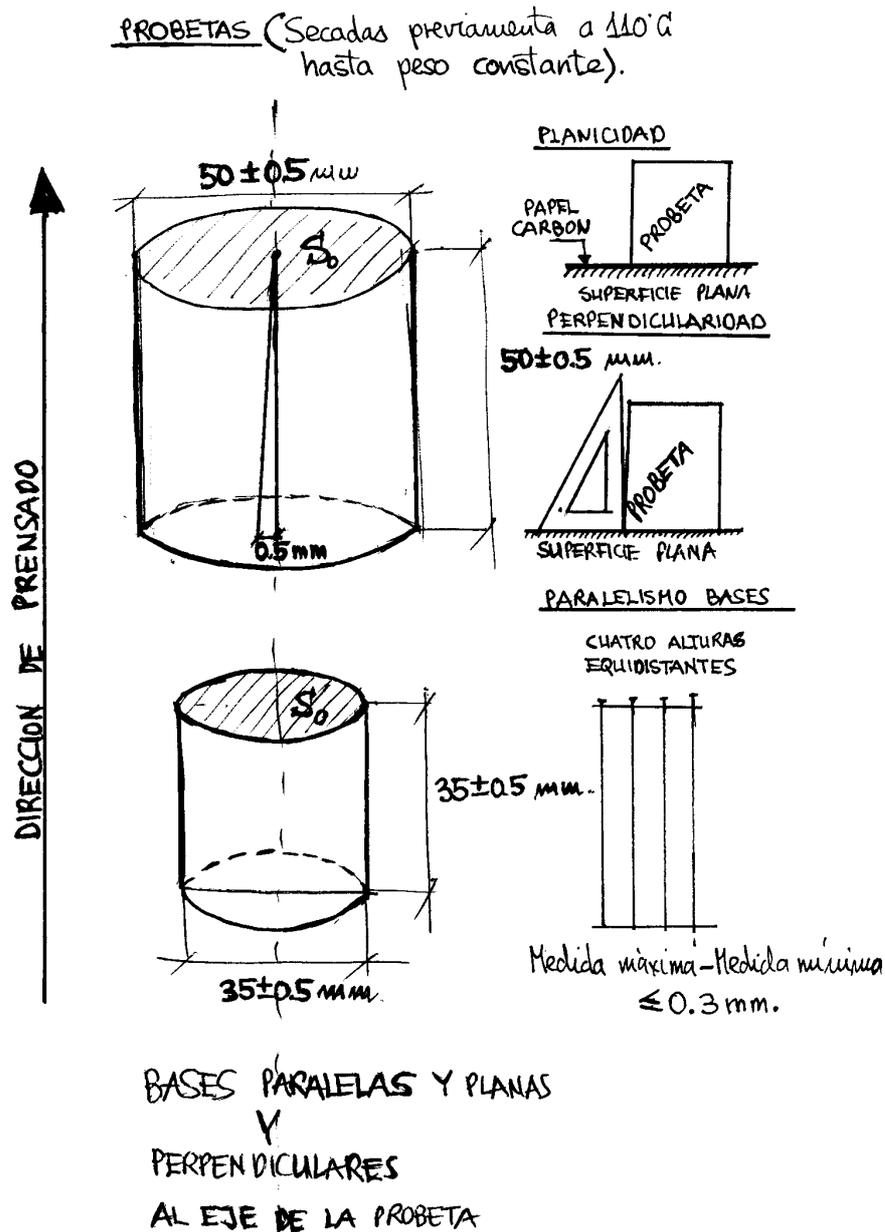


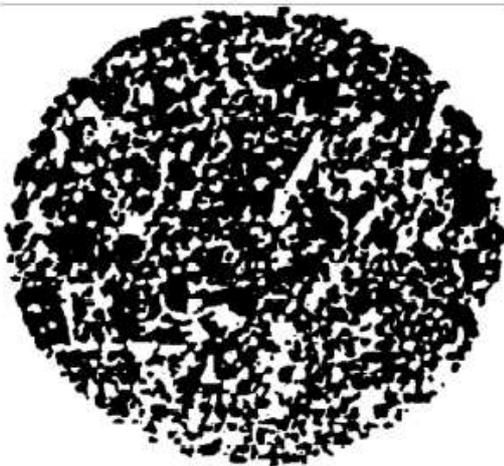
Figura 4.5.1.2.- Forma y las dimensiones de las probetas, así como sus tolerancias respectivas.

Las dimensiones y tolerancias son:

- En diámetro y altura de las probetas cilíndricas : $\pm 0.5 \text{ mm}$ ($\pm 0.3 \text{ mm}$).
- En el lado de la cúbica : $\pm 0.5 \text{ mm}$
- En perpendicularidad del eje de la probeta a las bases : desviación menor de 0.5 mm .
- En el paralelismo de las bases: desviación igual o menor de 0.3 mm .

Las tolerancias anteriores se verifican del modo siguiente:

- La planicidad de las bases se comprobará con ayuda de un papel de carbón colocado sobre una superficie perfectamente plana y sobre el cual se colocarán las bases de la probeta. Cada uno de ellas debe ser presionada con una carga de $3 \text{ kN} \pm 1 \text{ kN}$ sobre la placa de nivel recubierta con papel carbón o con papel de ferropusiató y papel de filtro duro (de $0,15 \text{ mm}$ de espesor). Las probetas que no presenten dos impresiones completas y coloreadas de forma claramente visible deben pulirse de nuevo (Figuras 4.5.1.3. a 4.5.1.6 para ejemplos de probetas cilíndricas).



a) ladrillo tipo de grano grueso

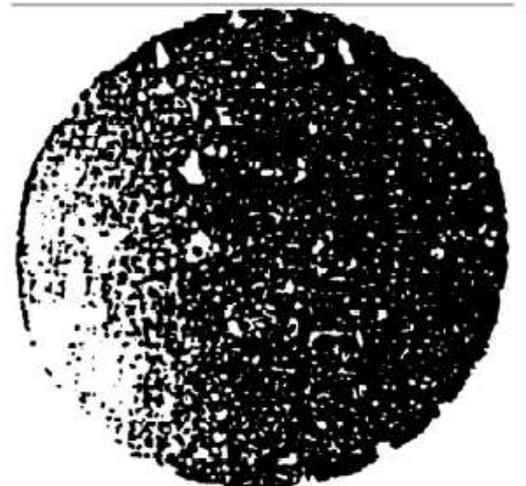


b) ladrillo tipo de grano fino

Figura 4.5.1.3.- Huella sobre papel carbón o de ferropusiató. Resultados aceptables



a) ladrillo tipo de grano grueso



b) ladrillo tipo de grano fino

Figura 4.5.1.4.- Huella sobre papel carbón o de ferropusiató. Resultados aceptables



a) ladrillo tipo de grano grueso



b) ladrillo tipo de grano fino

Figura 4.5.1.5.- Huella sobre papel carbón o de ferroprusiato. Resultados no aceptables



Figura 4.5.1.6.- Huella sobre papel carbón o de ferroprusiato. Resultados no aceptables debido a la presencia de estrias visibles tras el corte o pulido

- La perpendicularidad del eje de la probeta a las bases se comprobará situándola de pie sobre una superficie perfectamente plana y aplicando una escuadra sobre una generatriz. La holgura entre cualquiera de las generatrices y la rama vertical de la escuadra, no deberá sobrepasar la tolerancia, que es de 0.5 mm.

- El paralelismo de las bases se comprobará realizando cuatro medidas de la altura de la probeta, equidistantes. Para las probetas cilíndricas las medidas se deben realizar entre los extremos de dos diámetros perpendiculares, y para las cúbicas en las en las cuatro aristas entre las caras que soportan la carga. La diferencia entre la medida máxima y la mínima, no deberá exceder a la tolerancia fijada, que es de 0.2 mm.

La máquina de ensayos será una prensa hidráulica o mecánica ([Figura 4.5.1.7](#)), que disponga de varias escalas de manera que se pueda escoger la apropiada, según el valor medio del ensayo a efectuar, de forma que ningún resultado individual quede por debajo de la décima parte del valor máximo de la gama de medida empleada. Debe permitir la aplicación de la carga de una manera continua y progresiva.



Figura 4.5.1.7.- Máquina para el ensayo de resistencia a la compresión en frío.

Entre los platos de la prensa se situará el dispositivo de compresión (Figura 4.5.1.8), en el cual uno de los platos de presión estará montado sobre una rótula, con el fin de repartir de forma uniforme la carga y adaptarse al posible no paralelismo de las bases. Se coloca la probeta, centrada entre los platos de la prensa.

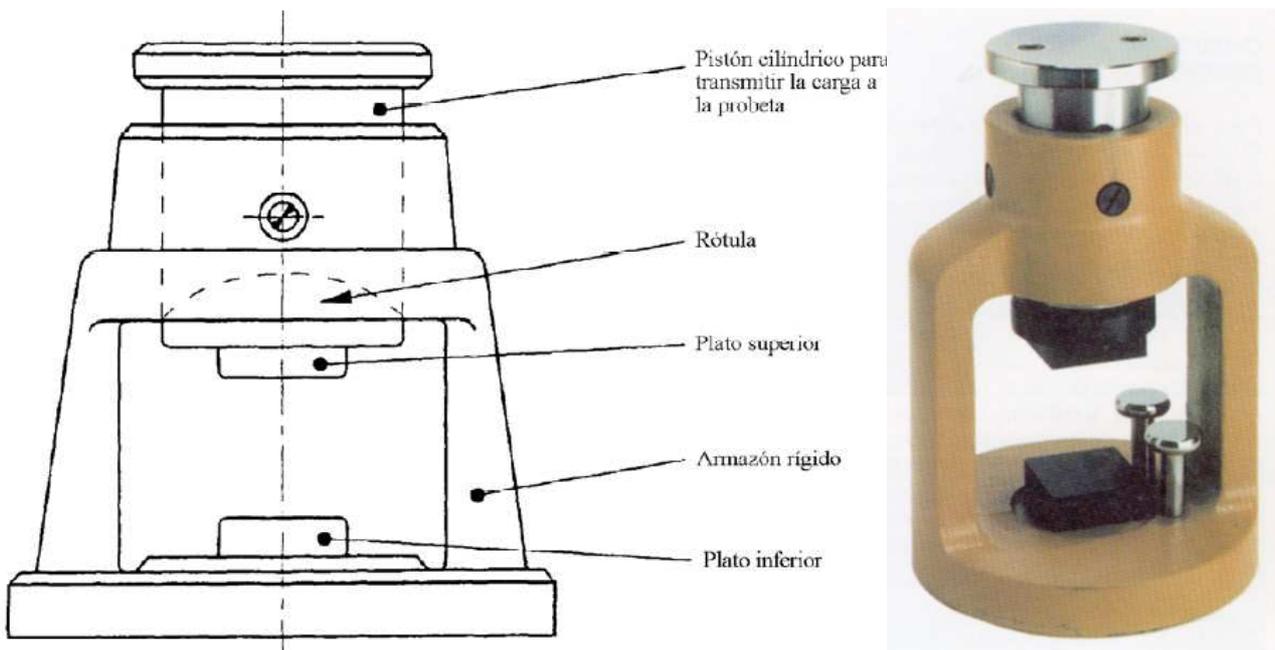


Figura 4.5.1.8.- Dispositivo para determinar la resistencia a la compresión en frío

Cada probeta, previamente secada, se coloca en el dispositivo de compresión, el cual a su vez estará colocado entre los platos de la prensa. A continuación, se selecciona la escala de carga de tal forma que la carga de rotura esperada sea superior al 10 % del valor de la escala y se somete a la probeta a un esfuerzo continuado de compresión, con una velocidad de carga de $1 \text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1} \pm 0.1 \text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$, hasta que la probeta rompa, es decir, hasta que no es capaz de soportar la carga. Se registra el valor de la carga máxima.

Entre las bases de la probeta y las placas de presión, no debe intercalarse ningún material, tales como cartón, papel, goma, etc., que pueda ejercer un efecto de almohadillado o también un esfuerzo lateral.

Se expondrán todos los resultados obtenidos, precisando la forma en que han sido tomadas las probetas y la dirección en que se ha aplicado la carga. El resultado del ensayo será el valor medio de los resultados individuales.

Si el ensayo se ha realizado con probetas de formato diferente al normal, se deberá indicar en el informe.

En la figura 4.5.1.9 se pueden ver las curvas tensión-deformación obtenidas en el ensayo de resistencia a la compresión de un ladrillo aluminoso con un 70 de Al_2O_3 , para diversas temperaturas.

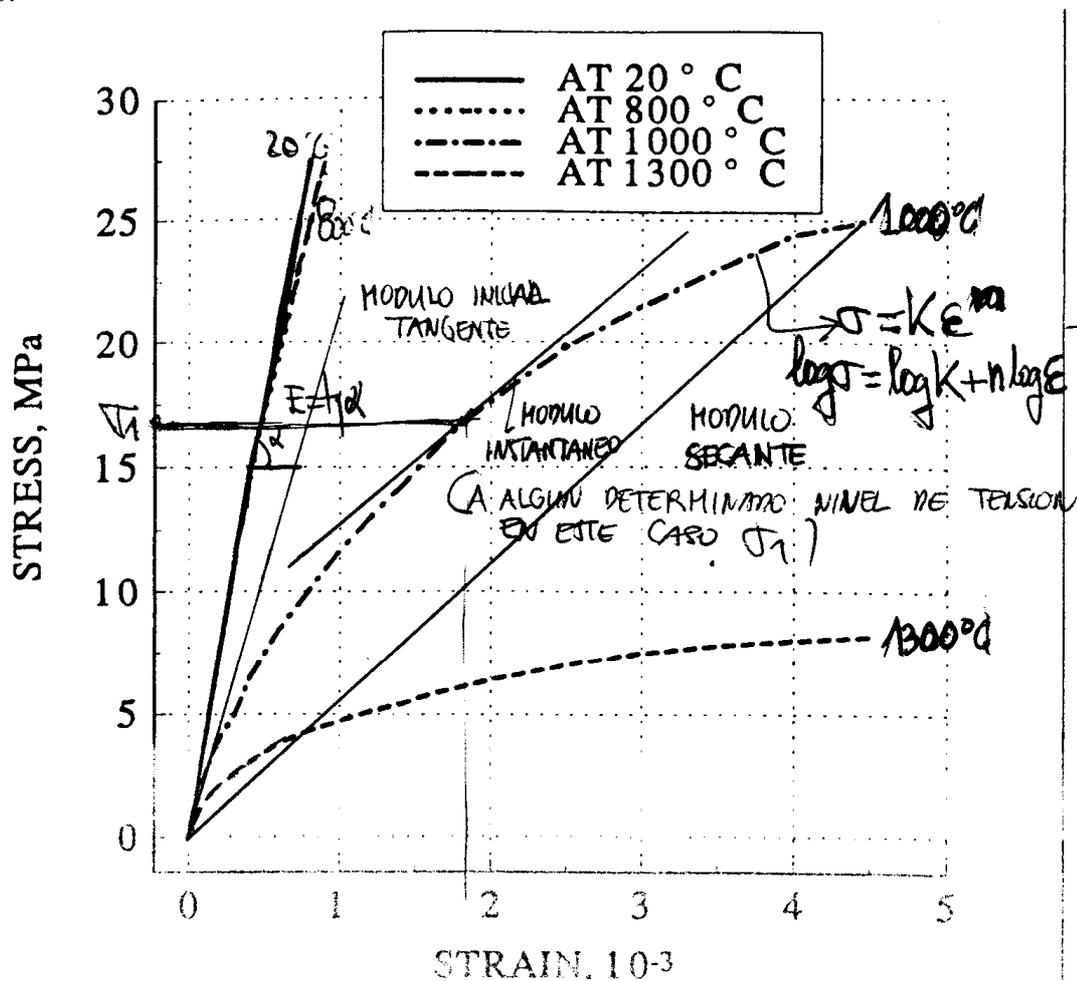


Figura 4.5.1.9.- Curvas tensión-deformación a la compresión de un ladrillo aluminoso con un 70 de Al_2O_3 ,

4.5.2.- Resistencia a la tracción.

Esta prueba es realizada muy pocas veces, variando mucho la forma de las probetas según la máquina que se emplee, no estando normalizado en casi ningún país. La resistencia a la tracción de los materiales refractarios varía entre $\frac{1}{8}$ y $\frac{1}{57}$ de la resistencia a la compresión, tomándose como término medio $\frac{1}{28}$ de la resistencia a la compresión.

No se suele hacer debido al alto coste de la preparación de la probeta a ensayar y por otro que se requiere un alineamiento extremadamente bueno de la dirección de la carga y del eje de la probeta durante el ensayo, ya que cualquier desalineamiento introduce tensiones de flexión lo que hace que la medida de la resistencia a la tracción sea incierta. En la figura 4.5.2.1 puede verse una posible forma de la probeta y del dispositivo de tracción.

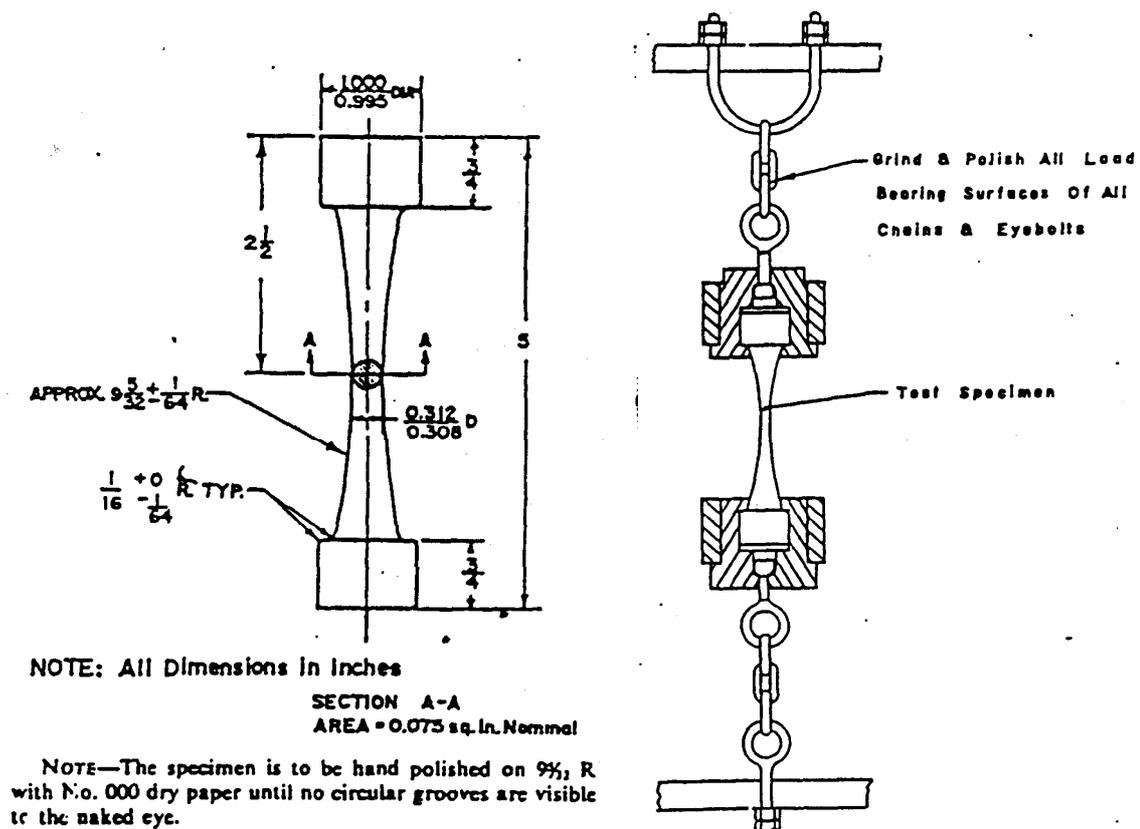


Figura 4.5.2.1.- Posible forma de la probeta y del dispositivo de tracción.

Existe un método para determinar la resistencia a tracción indirecta (Ensayo brasileño) sobre probetas cilíndricas, que también se puede usar para probetas cúbicas o prismáticas. En el caso de la probeta cilíndrica se le somete a una fuerza de compresión aplicada en una banda estrecha y en toda su longitud. El resultado de la fuerza de tracción ortogonal resultante origina que la probeta rompa a tracción.

En la figura 4.5.2.2 pueden verse los dispositivos de ensayo para probetas cilíndricas y prismáticas. Las bandas de apoyo son de fibras prensadas de densidad > 900 y dimensiones, ancho $a = 10$ mm., espesor $t = 4$ mm y una longitud superior a la línea de contacto de la probeta. Las bandas de apoyo solo deberán usarse una vez.

Durante el ensayo debe asegurarse que la probeta permanece centrada cuando comienza la carga y durante la aplicación de esta el plato superior ha de estar paralelo con el inferior. Se selecciona un incremento de tensión constante dentro del rango, por ejemplo, de 0.04 a 0.06. La carga se aplica sin brusquedades y se incrementa continuamente, en la velocidad seleccionada 1 %, hasta que no soporte una carga mayor.

La velocidad de carga requerida en la máquina de ensayo se calcula mediante la formula:

$$R = \frac{\pi s}{2Ld} \quad (4.5.2.1)$$

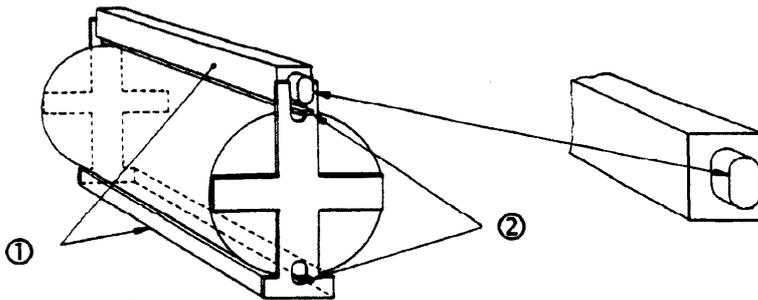
donde:

R = Velocidad de incremento de carga, en newtons por segundo;

L = Longitud de la probeta en milímetros (véase la figura);

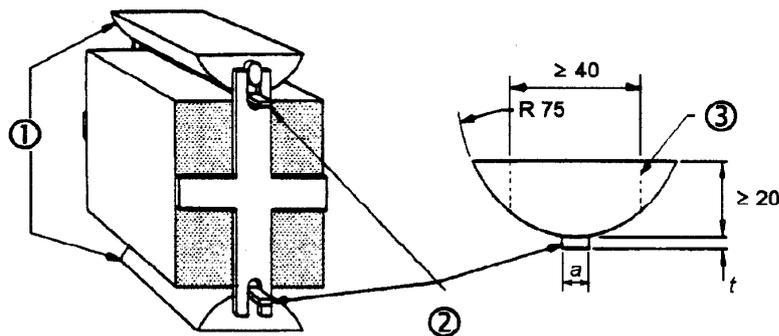
d = Dimensión de la sección transversal de la probeta en milímetros;

s = Incremento de tensión, en megapascales por segundo (newtons por milímetro cuadrado por segundo).



Leyenda

- 1 Pieza de acero de carga
- 2 Bandas de apoyo



Leyenda

- 1 Pieza de acero de carga
- 2 Bandas de apoyo
- 3 Segmento que puede cortarse

Figura 4.5.2.2.- Dispositivos de ensayo para probetas cilíndricas y prismáticas.

La resistencia a la tracción indirecta viene dada por la formula:

$$\sigma_{ct} = \frac{2F}{\pi Ld} \quad (4.5.2.2)$$

donde:

σ_{ct} = Resistencia a tracción indirecta, en megapascales o newtons por milímetro cuadrado.

F = Carga máxima, en newtons;

L = Longitud de la línea de contacto de la probeta, en milímetros;

D = Dimensión de la sección transversal, en milímetros .

4.5.3.- Resistencia a la flexión en tres puntos o cuatro puntos.

El comportamiento tensión – deformación de los materiales frágiles usualmente no se describe mediante el ensayo de tracción por dos razones. En primer lugar, es difícil preparar y ensayar probetas de tracción con la geometría requerida y en segundo lugar, existe una diferencia significativa entre los resultados obtenidos a partir de ensayos conducidos bajo cargas de tracción y de compresión. Por consiguiente, frecuentemente se emplea un ensayo de flexión, en el cual una probeta en forma de barra con sección rectangular o circular es flexionada usando una técnica de tres o cuatro puntos de aplicación de la carga. El esquema de aplicación de carga por tres y cuatro puntos se ilustra en la figura 4.5.3.1.

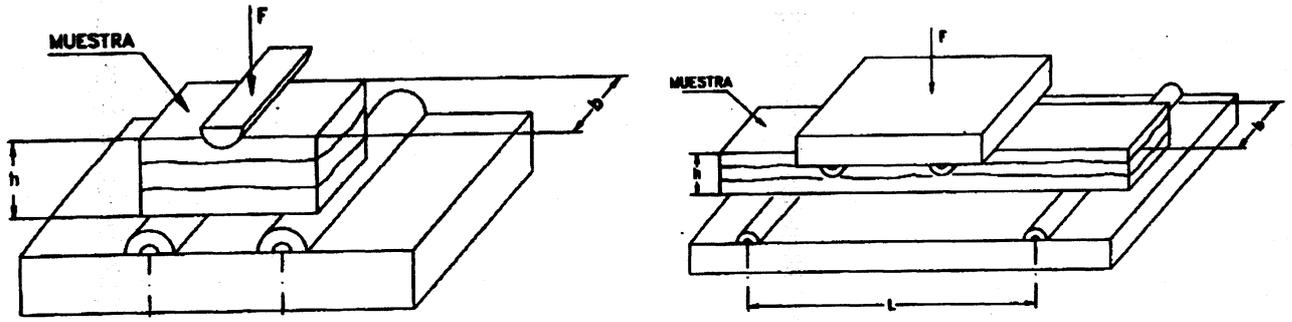


Figura 4.5.3.1.- Resistencia a la flexión en tres y cuatro puntos.

Los materiales refractarios raras veces se rompen por esfuerzos puros de compresión y si por una combinación de esfuerzos de compresión y de tracción. En el ensayo de flexión la superficie superior esta sometida a un estado de compresión, mientras la superficie inferior esta sometida a tracción (Figura 4.5.3.2).

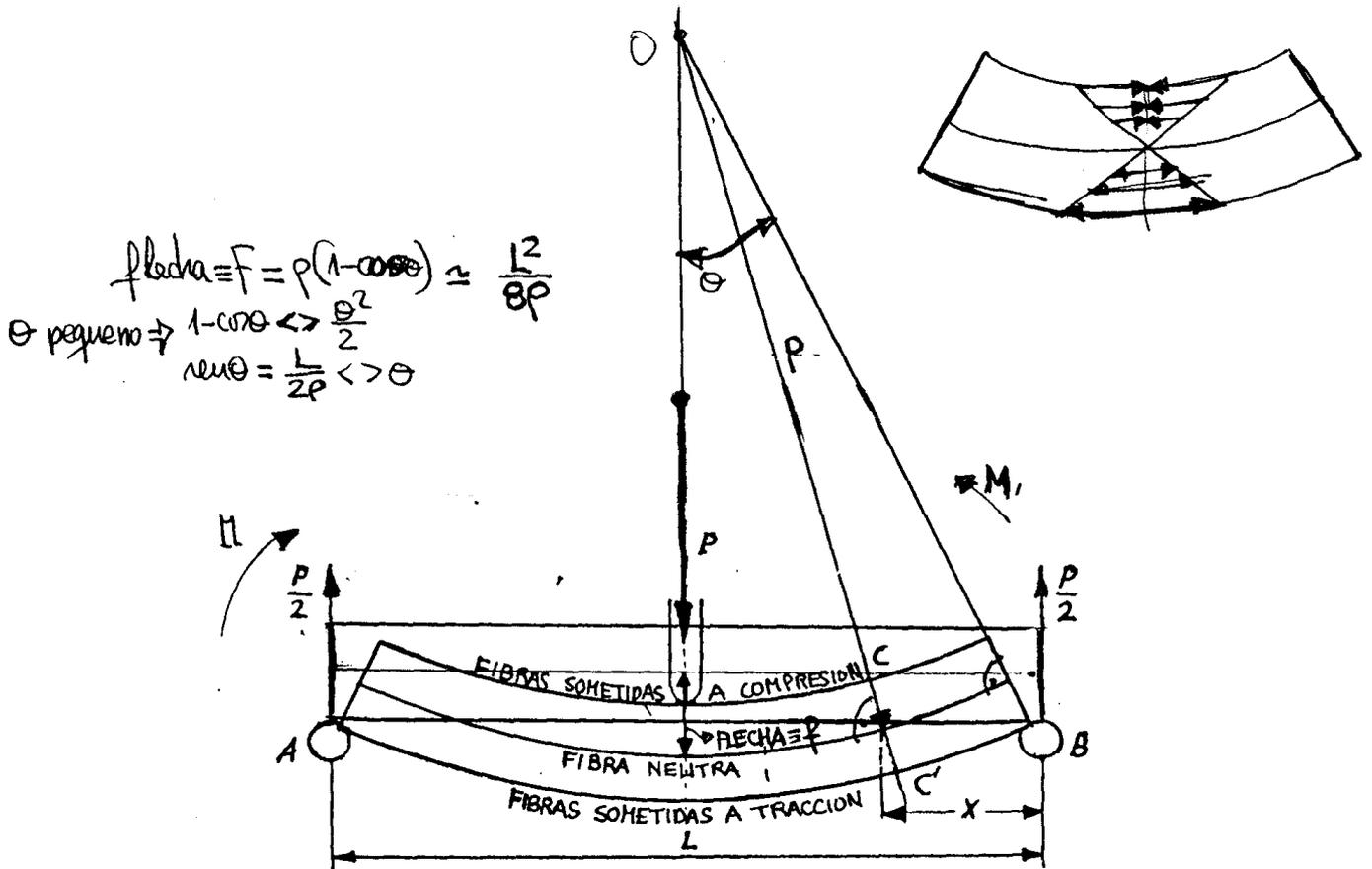


Figura 4.5.3.2.- Deformación de la probeta durante el ensayo de flexión.

Las suposiciones básicas de la teoría clásica de las vigas son las siguientes:

1.- Los planos perpendiculares al eje longitudinal permanecen perpendiculares, y planos cuando la viga se somete a flexión. Así, los planos AC y BD en la figura 4.5.3.3.b pueden rotar, uno con respecto al otro, pero permanecen perpendiculares al eje longitudinal curvo. Como las deformaciones unitarias están relacionadas directamente con las deformaciones totales, esta suposición implica que la deformación unitaria longitudinal ϵ_x varía linealmente con la profundidad de la viga desde un extremo negativo o valor mínimo en CD hasta un valor positivo máximo en AB, como se indica en la figura 4.5.3.3.c.

Las fibras EF, para las cuales la deformación unitaria es cero, están situadas en la llamada superficie neutra de la viga. La intersección de esta superficie neutra con un plano vertical de flexión se llama el eje neutro. Esta suposición también implica que los únicos esfuerzos producidos por los momentos de flexión M_z que actúan en el plano x-y son los esfuerzos normales, σ_x . Debido al efecto de Poisson, las deformaciones unitarias en las direcciones y y z son :

$$-\frac{\nu\sigma_x}{E}$$

Debido a este mismo efecto, la superficie neutra se curva en dos direcciones, pero se supone curva únicamente en el plano x-y y plana en la dirección z.

2.- El material de la viga se comporta linealmente, es decir que los esfuerzos son directamente proporcionales a las deformaciones unitarias, de acuerdo con la ley de Hooke, esto significa que los esfuerzos normales σ_x varían linealmente con la profundidad de la viga, como se indica en la figura 4.5.3.3.d.

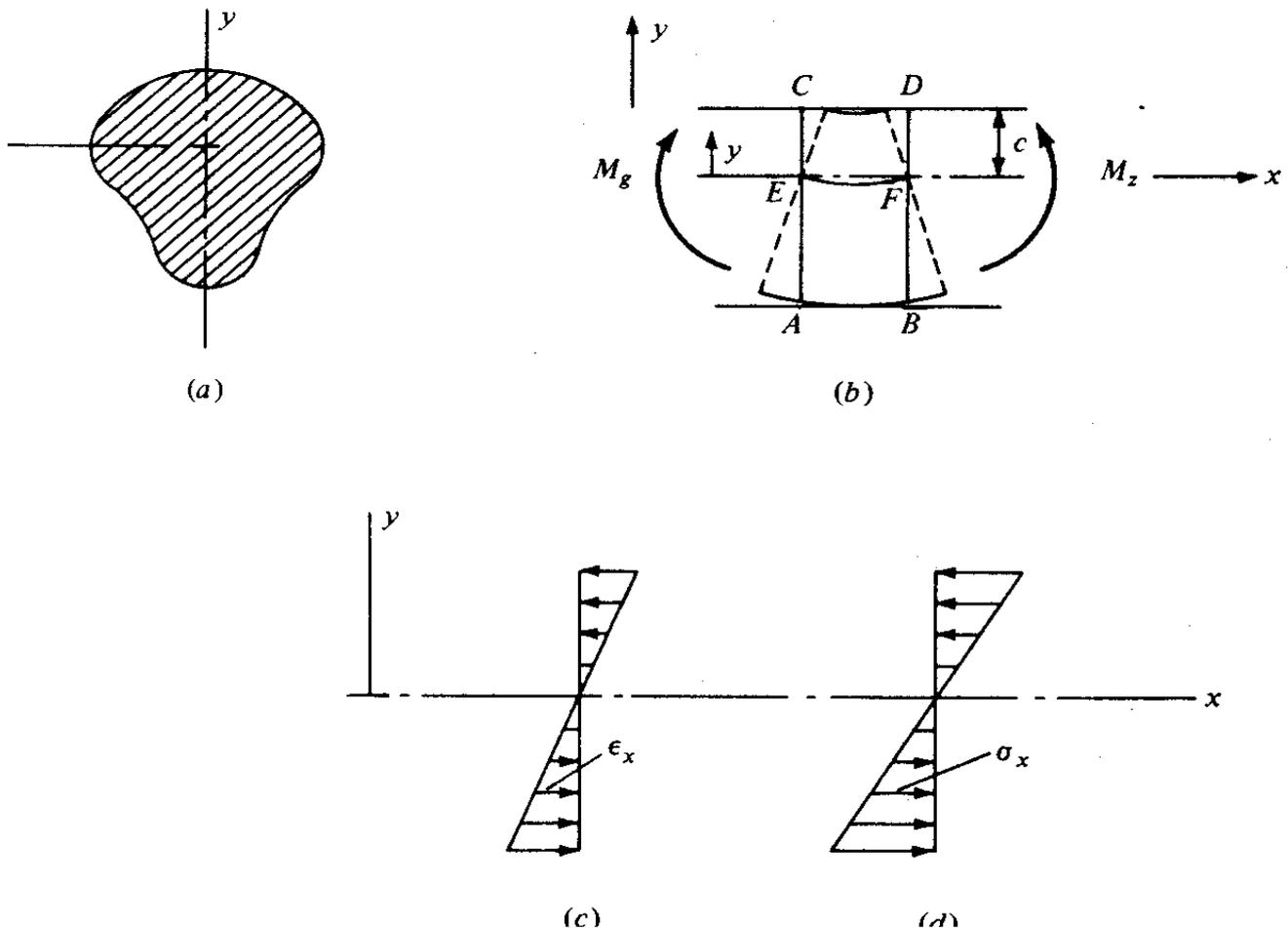


Figura 4.5.3.3.- Flexión pura de vigas.

Las suposiciones básicas para flexión pura no son estrictamente aplicables a los casos en que se presenta corte simultáneamente con la flexión. No obstante, para los elementos clasificados como vigas, las deformaciones por corte generalmente son despreciables comparadas con las producidas por flexión.

Únicamente en casos excepcionales tales como las vigas cortas de gran profundidad sometidas a altas cargas de corte, la deformación por corte desempeña un papel significativo. Sin embargo, para la gran mayoría de vigas, las deformaciones por corte (no los esfuerzos cortantes) son despreciables. Esto también es cierto para las vigas sometidas a carga axial, con tal que esta última carga no sea predominante.

Fórmula de la flexión elástica.

Con base en las suposiciones anteriores, una variación lineal de los esfuerzos normales, σ_x , se puede expresar en la forma:

$$\sigma_x = \frac{y}{c} \sigma_{ext} \quad (4.5.3.1)$$

en donde y es la distancia hasta el eje neutro y c es la distancia a la fibra extrema (véase [la figura 4.5.3.2.b](#)).

Si se aplica un momento positivo M_z , las condiciones de equilibrio exigen que en cualquier sección transversal la suma de las fuerzas en la dirección x debe ser igual a cero. Entonces, de acuerdo con la relación entre las componentes del esfuerzo y las acciones internas, se tiene:

$$P = \int_A \sigma_x dA = 0 \quad \text{o bien:} \quad \frac{\sigma_{ext}}{c} \int_A y dA = 0 \quad (4.5.3.2)$$

y para valores diferentes a cero de σ_{ext} y c ,

$$\int_A y dA = 0 \quad (4.5.3.3)$$

Esto implica que el eje neutro coincide con el eje centroidal del elemento.

Además del equilibrio de fuerzas horizontales se debe satisfacer el equilibrio de momentos, esto exige que :

$$dM_z = \sigma_x dA y \text{ e integrado a toda la sección: } M_z = \int_A y \sigma_x dA \quad (4.5.3.4)$$

y sustituyendo σ_x el valor de dado por (4.5.3.1):

$$M_z = \int_A y \sigma_{ext} \left(\frac{y}{c} \right) dA = \frac{\sigma_{ext}}{c} \int_A y^2 dA \quad (4.5.3.5)$$

Por definición, el término $\int_A y^2 dA$ es el momento de inercia del área de la sección transversal con respecto al eje z y se designa mediante I_z o, sencillamente, I . I tiene la dimensión de longitud a la cuarta potencia (ésta es, metros⁴ o pulgadas⁴).

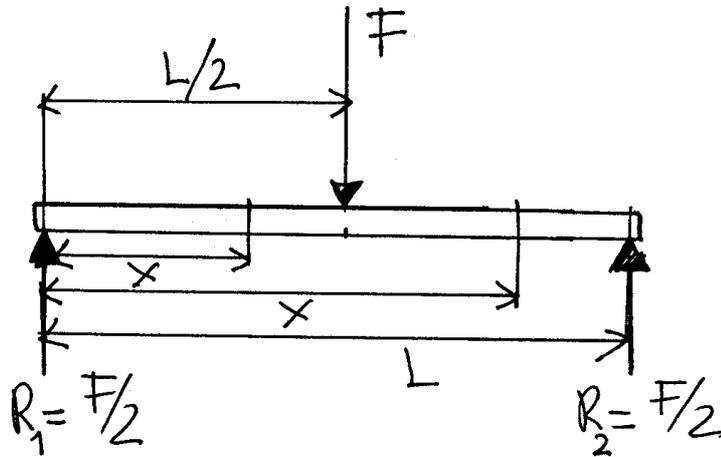
Reemplazando M_z por M se obtiene:

$$M = \frac{\sigma_{ext} I}{c} \quad \text{o bien:} \quad \sigma_{ext} = \frac{Mc}{I} \quad (4.5.3.6)$$

y llamando $W = \text{Momento resistente} = \frac{I}{c}$ se tiene:

$$\sigma_{ext} = \frac{M}{W} \quad (4.5.3.7)$$

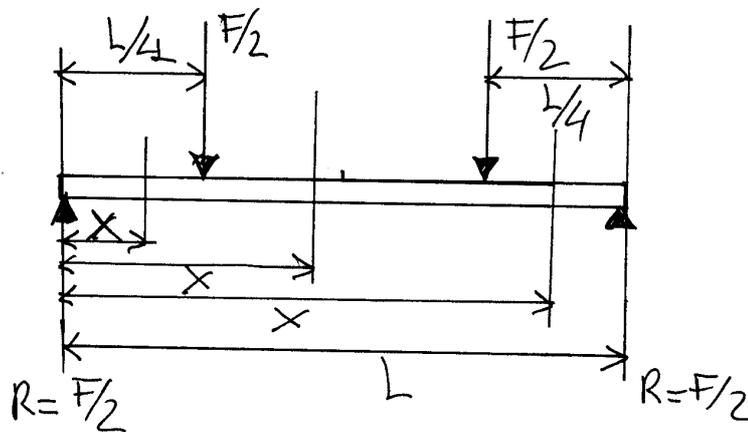
Para el ensayo de tres puntos se tiene:



a).- $0 \leq x \leq \frac{L}{2}$ $M = \frac{P}{2}x$ y para $x = \frac{L}{2}$ resulta : $M_{max} = \frac{PL}{4}$

b).- $\frac{L}{2} < x < L$ $M = \frac{P}{2}x - P\left(x - \frac{L}{2}\right) = \frac{PL}{2} - \frac{Px}{2}$ y para $x = \frac{L}{2}$ resulta : $M_{max} = \frac{PL}{4}$

y para el ensayo de cuatro puntos se tiene:



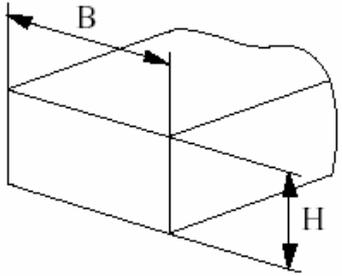
a).- $0 \leq x \leq \frac{L}{4}$ $M = \frac{P}{2}x$ y para $x = \frac{L}{4}$ resulta : $M_{max} = \frac{PL}{8}$

b).- $\frac{L}{4} < x < \frac{3L}{4}$ $M = \frac{P}{2}x - \frac{P}{2}\left(x - \frac{L}{4}\right) = \frac{PL}{8}$

c).- $\frac{3L}{4} < x < L$ $M = \frac{P}{2}x - \frac{P}{2}\left(x - \frac{3L}{4}\right) - \frac{P}{2}\left(x - \frac{L}{4}\right) = -\frac{P}{2}x + \frac{PL}{2}$

y para $x = \frac{3L}{4}$ resulta : $M_{max} = \frac{PL}{8}$

Para una probeta de sección rectangular y ensayo en tres puntos se tiene:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\text{máx}} &= \frac{M_f}{W} \\ I_x &= \frac{BH^3}{12} \end{aligned} \right\} \sigma_{\text{máx}} = \frac{\frac{P}{2} \frac{l}{2}}{\frac{\frac{BH^3}{12}}{\frac{H}{2}}} = \frac{\frac{P}{4}}{\frac{BH^2}{6}} \implies \boxed{\sigma_{\text{máx}} = \frac{3Pl}{2BH^2}}$$


y para probeta de sección circular y ensayo en tres puntos se tiene:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\text{máx}} &= \frac{M_f}{W} = \frac{\frac{P}{2} \frac{l}{2}}{\frac{I_x}{h}} \\ I_x &= \frac{\pi d^4}{64} ; h = \frac{d}{2} \end{aligned} \right\} \sigma_{\text{máx}} = \frac{\frac{P}{4}}{\frac{\frac{\pi d^4}{64}}{\frac{d}{2}}} = \frac{\frac{P}{4}}{\frac{\pi d^3}{32}} \implies \boxed{\sigma_{\text{máx}} = \frac{8Pl}{\pi d^3}}$$

La tensión máxima, o tensión a la fractura en este ensayo de flexión, se denomina módulo de rotura, o resistencia a la flexión, un parámetro mecánico importante para los materiales frágiles. La tensión se calcula a partir del espesor de la probeta, el momento de flexión y el momento de inercia de la sección.

El valor del módulo de elasticidad se calcula por la fórmula:

$$E = \frac{PL^3}{48If} \quad (4.5.3.8)$$

donde:

- P = Carga del límite de proporcionalidad.
- f = Flecha
- L = Distancia entre centros de apoyo
- I = Momento de inercia.

Análogamente, para una probeta de sección rectangular y ensayo en cuatro puntos se tiene:

$$\sigma_{4P} = \frac{3PL}{4bh^2} \quad (4.5.3.9)$$

y si es de sección circular:

$$\sigma_{4P} = \frac{32PL}{\pi R^3} \quad (4.5.3.10)$$

En [la figura 4.5.3.4](#) se da un resumen del ensayo de flexión en tres puntos para secciones rectangulares y circulares.

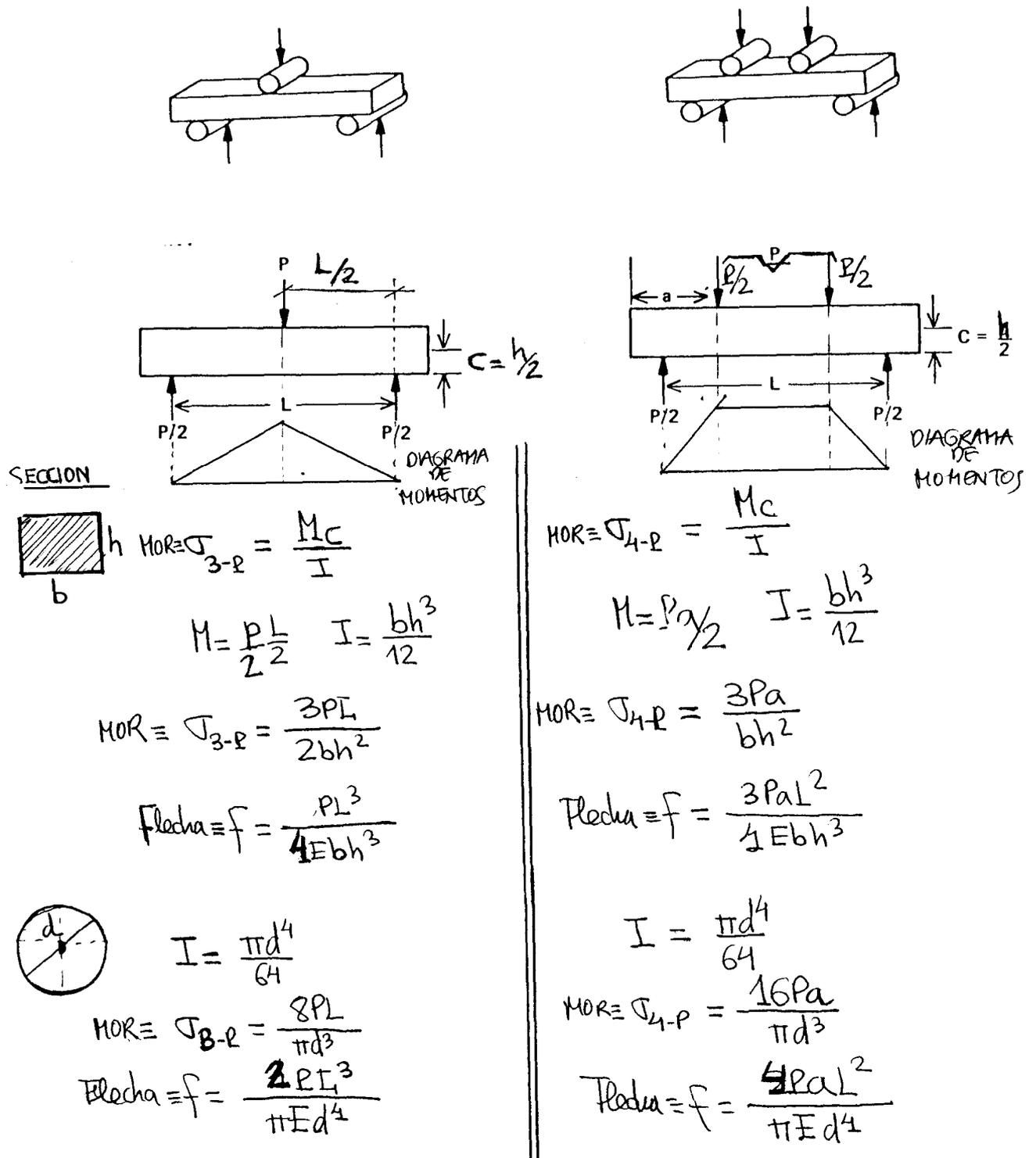


Figura 4.5.3.4.- Esquema del sistema de flexión por tres y cuatro puntos para medir el comportamiento esfuerzo - deformación y modulo de rotura de materiales frágiles, incluyendo las expresiones para el calculo de la tensión en probetas de secciones rectangular y circular.

Los valores característicos del modulo de rotura para varios materiales cerámicos están tabulados en la tabla 4.5.3.1. Puesto que durante la flexión una probeta esta sometida tanto a esfuerzos de tracción como de compresión, la magnitud de su modulo de rotura es mayor que la resistencia a la tracción. Además, σ , dependerá del tamaño de la probeta, de tal modo que al aumentar el volumen de la probeta (bajo carga) aumenta la severidad de los defectos y, por consiguiente, el modulo de rotura disminuye.

Tabla 4.5.3.1.- Módulos de rotura (Resistencia a la flexión) y módulos de elasticidad para materiales cerámicos.

Material	Módulo de rotura		Módulo de elasticidad	
	psi × 10 ³	Mpa	psi × 10 ⁶	MPa × 10 ⁴
Carburo de titanio ^a (TiC)	160	1100	45	31
Óxido de aluminio ^a (Al ₂ O ₃)	30–50	200–345	53	37
Óxido de berilio ^a (BeO)	20–40	140–275	45	31
Carburo de silicio ^a (SiC)	25	170	68	47
Óxido de magnesio ^a (MgO)	15	105	30	21
Espinela ^a (MgAl ₂ O ₄)	13	90	35	24
Sílice vítrea	16	110	11	7,5
Vidrio	10	70	10	7

^a Sinterizado y con alrededor de 5% de porosidad.

Fuente:: W. D. Kingery, H. K. Bowen, y D. R. Uhlmann, *Introduction to Ceramics*, 2nd edition. Copyright © 1976 John Wiley & Sons, New York. Reproducido con permiso de John Wiley & Sons Inc.

El módulo de ruptura calculado en el ensayo en tres puntos se relaciona con la resistencia a tracción que tiene el material refractario, pero determinada en una zona muy limitada, ya que el momento máximo se produce en el centro de la probeta.

Para tener en cuenta la heterogeneidad que presenta un material refractario, que debe reflejarse en el comportamiento de la probeta, con el ensayo de resistencia a flexión en cuatro puntos, en el que se somete la probeta de longitud L , a una carga P que se aplica sobre la probeta en dos puntos separados $\frac{L}{2}$, se consigue tener una zona de probeta de longitud $\frac{L}{2}$ sometida al mismo momento flector, rompiéndose la probeta por la sección más débil de esta parte central.

En la tabla 4.5.3.2 se dan las características de los principales tipos de materiales refractarios, entre las que figura la resistencia a la compresión en frío. Se puede observar que la resistencia más alta se encuentra en los refractarios de carburo de silicio y de magnesia, 100 y 80 Mpa respectivamente.

TIPO REFRACTARIO	Composición aproximada	Temperatura aproximada de fusión	Resistencia al fuego bajo carga de 2 kg/cm²	Densidad aparente	Densidad real	Porosidad total en volumen	Dilatación térmica a 1.000°	Dilatación térmica a 1.300°	Contracción permanente a 1.500°	Resistencia a la compresión en frío	Resistencia a los cambios de temperatura. Número de enfriamientos	Resistencia a la acción de las escorias
Silice	SiO ₂ 95 %	1.720°	1.625° 1.670°	1,80	2,33	24 %	1,15 %	1,25 %	a 1.300° 0,1-0,2 %	400 kg/cm²	6	Resistencia a la acción de las escorias ácidas.
Silico aluminoso	SiO ₂ 40-63 % Al ₂ O ₃ 21-45 %	1.610° 1.700°	1.380° 1.580°	2	2,6	22 %	0,5 %	0,60 %		500 kg/cm²	15	
Dolomita	CaO 41 % MgO 39 %	1.900°	1.475° 1.540°	2,75	3,40	22 %			1 %	600 kg/cm²	7	Muy resistente a las escorias básicas
Magnesita	MgO 85-90 %	2.000°	1.525° 1.620°	2,75	3,45	22 %	1,30 %	1,85 %	0,65 %	600 kg/cm²	7	Muy resistente a la acción de las escorias básicas.
Cromita	Cr ₂ O ₃ 40 %	1.900°	1.400° 1.510°	3,10	3,75	16 %	0,75 %	1,15 %	a 1.600° 0,2-0,4 %	800 kg/cm²	11	Fuertemente resistente a todas las escorias básicas y ácidas.
Cromo magnesita	Cr ₂ O ₃ 30 % MgO 42 %	1.950°	1.560° 1.630°	2,85	3,80	22 %	0,85 %	1,35 %	0,45 %	250 kg/cm²	15	Muy resistente a la acción de las escorias tanto ácidas como básicas.
Silimanita	Al ₂ O ₃ 60 %	1.840°	1.530° 1.675°	2,35	3,15	22 %	0,40 %	0,65 %	0,12 %	500 kg/cm²	22	Muy resistente a la acción de las escorias básicas y neutras.
Aluminoso-50	Al ₂ O ₃ 50 %	1.780°	1.460° 1.640°	2,18	2,70	20 %	0,71 %	0,81 %	a 1.500° 0,05-0,1 %	400 kg/cm²	17	Muy resistente a la acción de las escorias alcalinas y calcáreas.
Carburo de silicio	SiC 85 %	2.000°	1.570° 1.650°	2,55	2,85	12 %	0,45 %	0,65 %		1.000 kg/cm²	Superior a 30	Fuertemente resistente a las escorias ácidas.

Debido a su estructura heterogénea de cerámica basta, los ladrillos refractarios tienen sólo un margen pequeño de comportamiento totalmente elástico (Figura 4.5.3.5, curva OBR), es decir pierden su comportamiento elástico al aumentar la carga. La razón de ese comportamiento se debe a la estructura heterogénea de los materiales refractarios, los cuales están formados por granos de muy diferentes tamaños y poros.

Cuando se aplica una carga a un material refractario nos encontramos con que no todo el sistema se comporta de igual manera, los granos mayores son difícilmente deformables, mientras que los finos, que forman la matriz, se deforman más fácilmente. Estas deformaciones van dando lugar, en la mayoría de los casos, a microfisuras, que no llegan a romper la probeta más que a cargas elevadas.

Debido a este comportamiento no elástico del material más que a bajas cargas, el módulo de elasticidad nos viene dado por la pendiente de la curva en el punto O, como se puede ver en la figura 4.5.3.5. La relación entre tensión y deformación en este estado inicial completamente elástico y en donde la deformación es aún reversible es el módulo de elasticidad E, que se mide en la mayoría de los casos dinámicamente por ultrasonido o frecuencia de resonancia.

Con el aumento de la deformación hasta la rotura se llega fuera del margen puramente elástico, las deformaciones se concentran en la parte fina del ladrillo, que es la que más cede por lo que la tensión relativa a la deformación asciende ahora más lentamente. En tal caso no basta solamente con conocer el módulo E para hallar el cálculo de las tensiones surgidas. Es éste el motivo por el que se ha introducido la relación entre el esfuerzo y la deformación de rotura como módulo de deformación V:

$$V = \frac{\sigma_R}{\epsilon_R} \quad (4.5.3.11)$$

En los materiales refractarios este módulo es inferior o a lo sumo igual al módulo E. Cuando se desee conocer qué deformación se produce en un material refractario bajo carga se utilizará el módulo de deformación.

Este parámetro nos sirve para diseñar un material que va a estar sujeto a tensiones, como puede ser en un horno rotativo de cemento, para que pueda soportarlas deformándose sin llegar a fisurar.

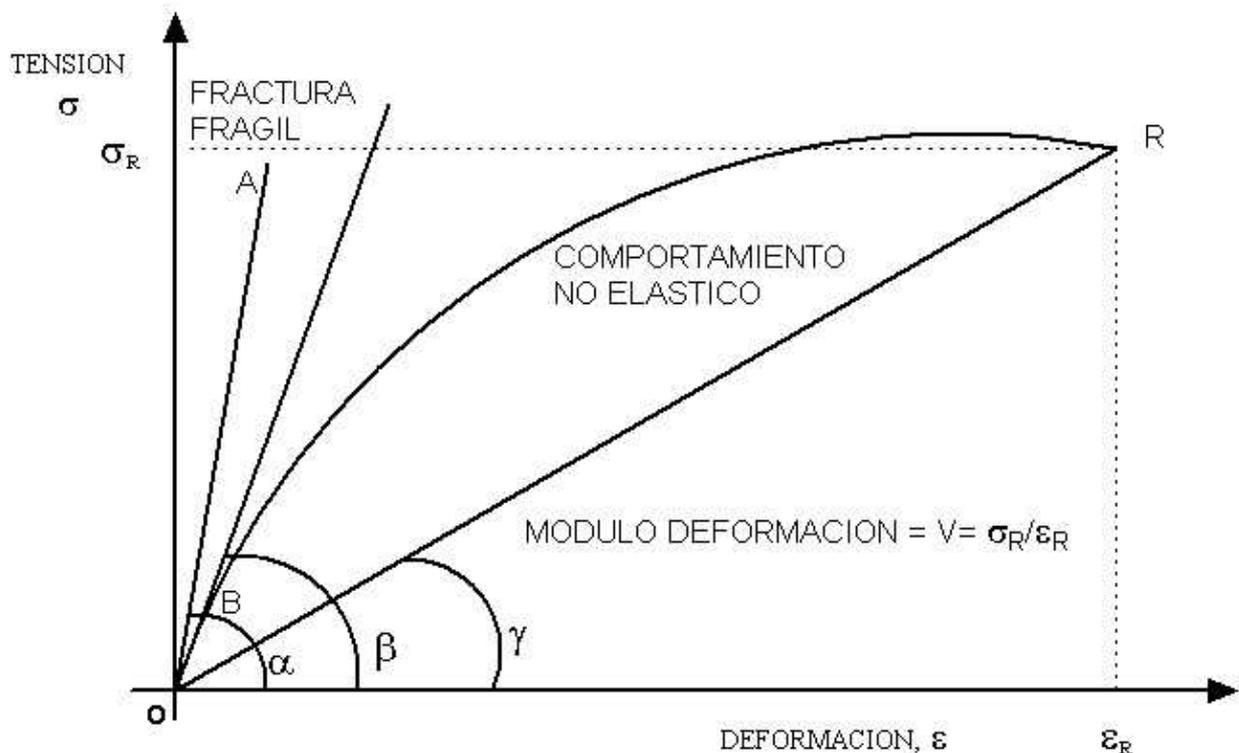


Figura 4.5.3.5.- Módulo de elasticidad y módulo de deformación.

La determinación del módulo de deformación en frío se realiza al mismo tiempo que se determina la resistencia a la flexión. Para el cálculo del módulo de deformación se utiliza el mismo aparato que para el módulo de elasticidad y la misma ecuación, sólo que en este caso se aplica la tensión de rotura y la deformación de rotura.

$$V = \frac{\sigma_R}{\varepsilon_R} = \frac{F_R L^3}{4bh^3 f_R} = \frac{\sigma_R L^2}{6hf_R} \quad (4.5.3.12)$$

Observando la ecuación (4.5.3.12) se ve que el módulo V nos indica, que para un mismo módulo de rotura, cuando menor sea el módulo de deformación, mayor será la capacidad de deformarse un material bajo tensiones, es decir, una menor tendencia a producirse en él fisuras y desconches.

Se puede observar en la práctica, que materiales con elevadas características mecánicas presentan elevados valores del módulo de elasticidad. El hacer esta afirmación es muy peligroso, ya que esto puede cumplirse solo en productos del mismo tipo. Cuando hablamos de materiales diferentes, esta afirmación es errónea.

Tanto el módulo de elasticidad, como el módulo de deformación no son parámetros inherentes a un producto, sino que actuando sobre su microestructura, distribución de granos, porosidad, etc., podemos variarlo en el sentido que nos interese, según la aplicación que vayamos a dar al material refractario.

Como se ha podido ver por definición, no debe existir una relación clara entre módulo de deformación y módulo de elasticidad, salvo que el módulo de deformación de un material nunca puede ser mayor que el de elasticidad.

En un trabajo presentado por el Sr. Kienow y el Sr. Hennicke relacionaron el módulo de elasticidad (E) y el de deformación (V), esperando que esta relación indicase el grado que un material se aleja de un comportamiento puramente elástico. Determinaron el módulo de elasticidad mediante la frecuencia de resonancia y el de deformación, por medida de la deformación en rotura mediante el ensayo de 3 puntos, en una serie de materiales refractarios. Observaron :

- 1.- Que los refractarios de magnesia pura presentaban una relación $\frac{E}{V}$ más baja, entre 2 y 3, y valores del módulo de deformación, V , más elevados.
- 2.- Los refractarios de Magnesia-Cromo con un contenido menor del 10% de Cr_2O_3 presentaban una relación superior, entre 4 y 15, y los de Magnesia-Cromo con un contenido mayor del 10% de Cr_2O_3 entre 3 y 4, siendo los módulos de deformación de estos últimos del mismo orden.
- 3.- Los refractarios de Magnesia-Cromo con un contenido menor del 10% de Cr_2O_3 son los que se utilizan fundamentalmente en hornos rotativos de cemento, los cuales en servicio tienen que soportar unas elevadas tensiones, las cuales tienen que poder soportar sin romper, y por lo tanto son diseñados teniendo en cuenta esta exigencia.

Resumiendo diremos que los materiales refractarios tienen un comportamiento elástico sólo en zonas de baja carga de aplicación por lo que cuando deseamos conocer el comportamiento real de un material refractario bajo presión, el módulo de deformación nos da mayor información.

Es importante de todas formas indicar, que esta información es parcial, ya que no hay que olvidar, que el ensayo se realiza a temperatura ambiente.

Para los ladrillos refractarios se intenta lograr normalmente una gran ductilidad, o sea un amplio margen de deformación sin ruptura, lo que supone un valor elevado para la relación entre la resistencia a la flexión y el módulo de deformación.

4.5.4.- Resistencia al desgaste.

Los ladrillos refractarios no se someten a esfuerzos mecánicos solo con la pura presión de carga, sino también con el ataque abrasivo producido por el material del horno que se desliza lentamente en la mampostería de altos hornos, hornos de cuba, cámaras de coque, hornos rotativos, cámaras de combustión y similares y por el efecto de choque de los gases que en su paso rápido llevan finas partículas sólidas.

Por lo tanto, no basta la resistencia a la compresión en frío para caracterizar el desgaste de los ladrillos. A modo de criterios generales diremos que un material refractario tendrá más resistencia al desgaste por abrasión si se verifica:

- 1.- Que la cohesión entre el componente disperso y la matriz sea lo más elevado posible lo que implica la obtención de materiales de elevada densidad.
- 2.- Que el tamaño del constituyente disperso sea fino y de morfología granular.
- 3.- Que la temperatura de cocción, para un determinado componente matriz, sea lo más elevado posible.
- 4.- Que la resistencia a la compresión en frío sea elevada.

La sollicitación abrasiva se imita bien por la máquina rectificadora de Böhme, sin embargo los resultados no se pueden extrapolar bien a las elevadas temperaturas de servicio de los hornos, sobre todo cuando la superficie del ladrillo se modifica en su resistencia por influencias químicas.

Para medir la resistencia a la abrasión no existe todavía ningún método reconocido, por lo que seguirá utilizándose como punto de referencia el coeficiente de abrasión según Böhme. Para analizar el efecto de choque de los gases cargados con partículas sólidas se utiliza el control por chorro de arena, para cuya valoración existen las mismas limitaciones que para el coeficiente de abrasión. En la tabla 4.5.4.1 se han indicado algunos valores para la resistencia a la abrasión por máquina rectificadora y por chorro de arena.

Tabla 4.5.4.1.- Resistencia a la abrasión por máquina rectificadora y por chorro de arena.

	Ladrillo de chamota conformado plásticamente	Ladrillo de sílice denso con grano grueso	Ladrillo de chamota dura	Ladrillo antiácido
Densidad en aparente g/cm ³	1,95	1,87	2,15	2,15
Porosidad total %	< 28	< 23	< 21	< 16
Resistencia a la compresión en frío (KDF) N/mm ²	> 20	> 30	> 30	> 80
Coeficiente de abrasión cm ³ /cm ²				
Máquina rectificadora	0,29	0,16	0,20	0,12
Control por chorro de arena	0,81	0,66	0,40	0,10

Un ensayo frecuente para cuantificar la resistencia al desgaste consiste en hacer incidir sobre una probeta refractaria durante un tiempo determinado una corriente de finas partículas abrasivas (corindón) a través de flujo de aire de alta velocidad (Figura 4.5.4.1). Se determina la pérdida de peso que experimenta la probeta refractaria.

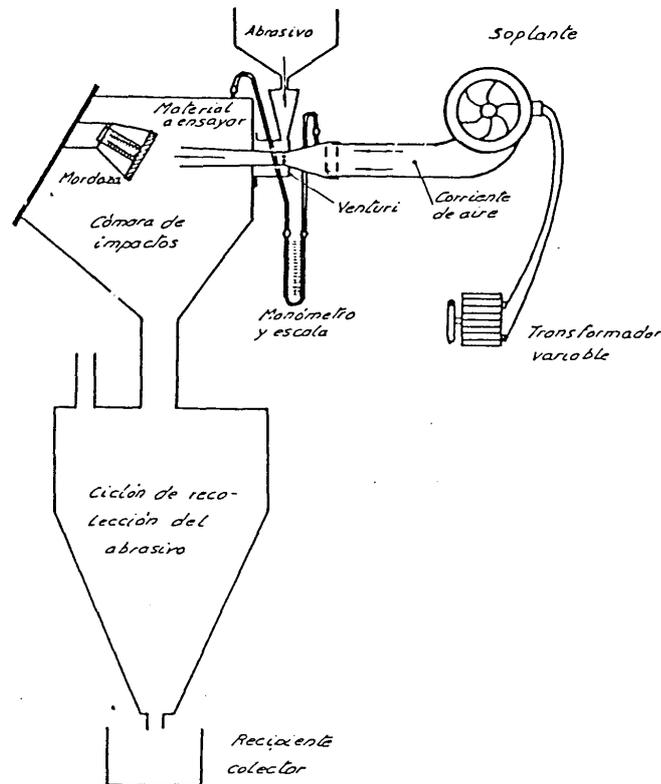


Figura 4.5.4.1.- Equipo para realizar ensayos de abrasión.

Otro ensayo sería medir el desgaste lineal producido sobre tres caras de dos probetas cúbicas del material refractarios.

Para la ejecución del ensayo descrito en esta norma, será necesario una máquina de tipo especial, apta para este ensayo y que reunirá las características siguientes (Figura 4.5.4.2):

- a).- Dispondrá de una pista de rozamiento de radio mínimo interior de 25 cm y de radio mínimo exterior de 40 cm capaz de girar a una velocidad mínima relativa de 1 m/s, referido al centro de la probeta.
- b).- Constará de dos portaprobetas, solidarios a sendos ejes deslizantes y diametralmente opuestos sobre el bastidor, que estarán centrados sobre la circunferencia media de la pista de rozamiento.
- c).- Poseerá un dispositivo mediante el cual se pueda comprimir la probeta entre los platos con una presión de 0,0588 MPa.
- d).- Tendrá otros dispositivos que permitan verter abrasivo y agua en las superficies de rozamiento.
- e).- Dispondrá así mismo de un contador de vueltas.

El ensayo se efectuará sobre un mínimo de dos probetas cúbicas de 7 cm de arista, con una tolerancia del $\pm 5\%$.

En cada probeta se determinará el volumen inicial por el método de la balanza hidrostática (UNE 22-182). Posteriormente se determina la superficie a desgastar midiendo con un calibre las dos dimensiones de la cara, de forma que cada dimensión viene dada por la media de los valores en los extremos y en el centro de las aristas de la cara. Seguidamente se colocan las probetas en los portas y se cargan a razón de 0.0588 MPa respecto a la superficie de la cara a desgastar.

Finalmente se pone la máquina en marcha y se va vertiendo, de manera uniforme, el abrasivo (carborundum cuyos granos estén comprendidos entre un tamiz 0,33 UNE 7-050 y otro tamiz 0,63 UNE 7-050), en una cantidad de $1 \frac{g}{cm^2}$ de la superficie de la mayor cara de las sometidas al desgaste, así como 12 gotas de agua por minuto. Se someten las probetas a un recorrido de 1 000 m, sacándolas posteriormente de la máquina y limpiándolas cuidadosamente.

El resultado será el siguiente:

$$\text{Desgaste lineal (mm)} = D = \frac{V_i - V_f}{A} \quad (4.5.4.1)$$

siendo:

V_i = Volumen inicial (mm^3).

V_f = Volumen final (mm^3).

A = Superficie de las caras de las probetas en contacto (mm^2).

Se tomará como resultado definitivo la media aritmética de los desgastes lineales de cada una de las dos.

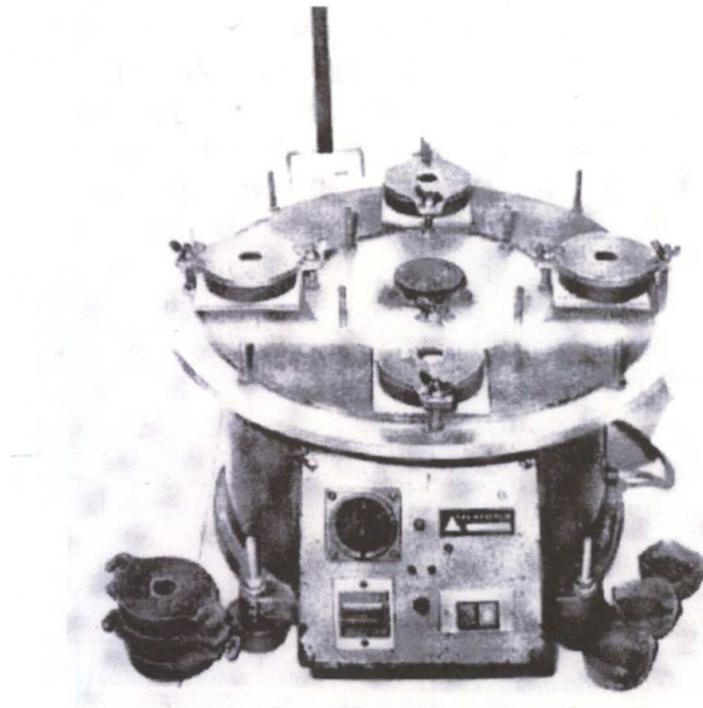
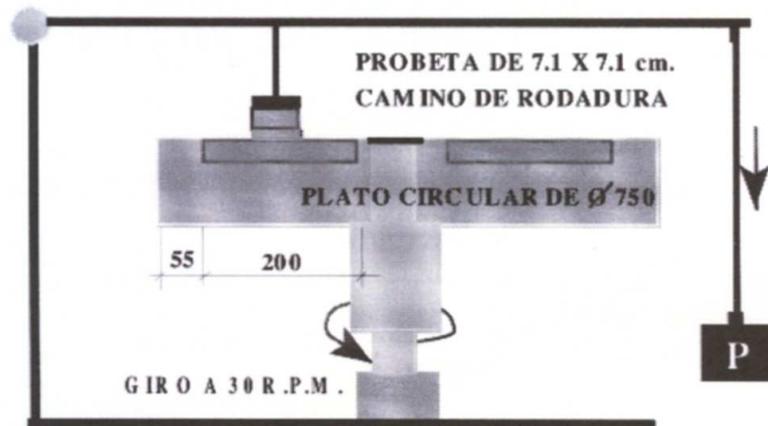


Figura 4.5.4.2.- Equipo de medida para la determinación de la abrasión superficial.

Otro método para determinar el valor de la resistencia a la abrasión se basa en la huella producida en la cara vista del material al ser sometida al rozamiento de un disco de acero y material abrasivo a una velocidad de 75 r.p.m. durante un minuto (Figura 4.5.4.3)

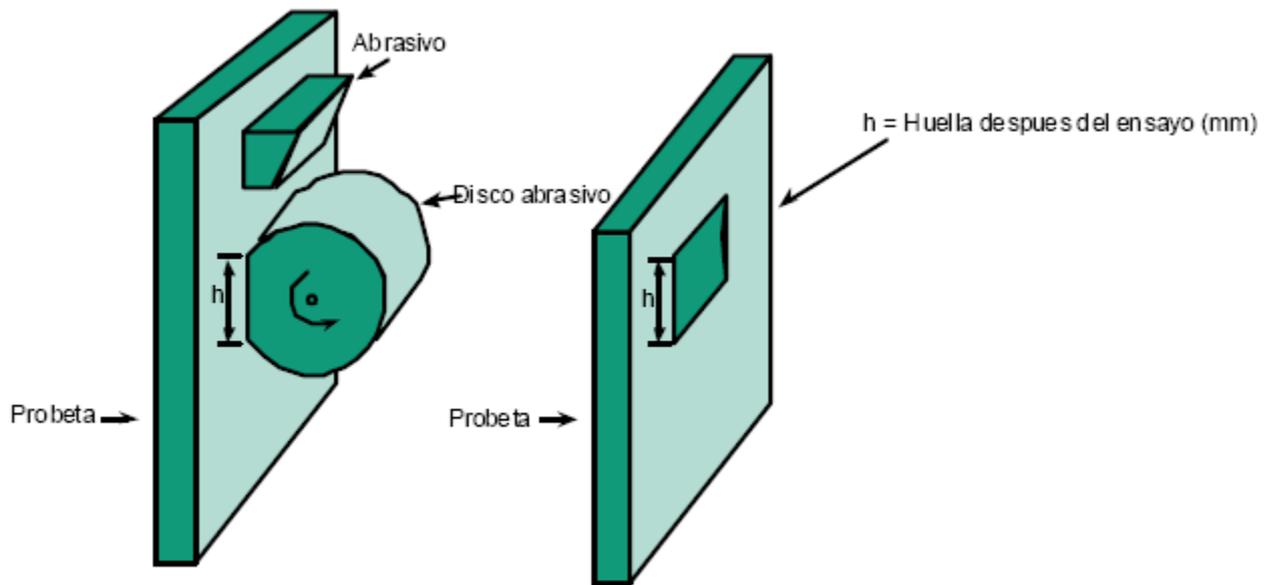


Figura 4.5.4.3.- Esquema de ensayo de desgaste por abrasión.

La máquina de desgaste se compone de los elementos que figuran en el esquema indicado en la figura 4.5.4.4.

El disco es de acero, de dureza comprendida entre 203 HB y 245 HB, de diámetro 200 mm, y de anchura 70 mm y un carro portaprobetas con un contrapeso que mantienen la presión. Como material abrasivo se emplea corindón blanco de tamaño de grano 80.

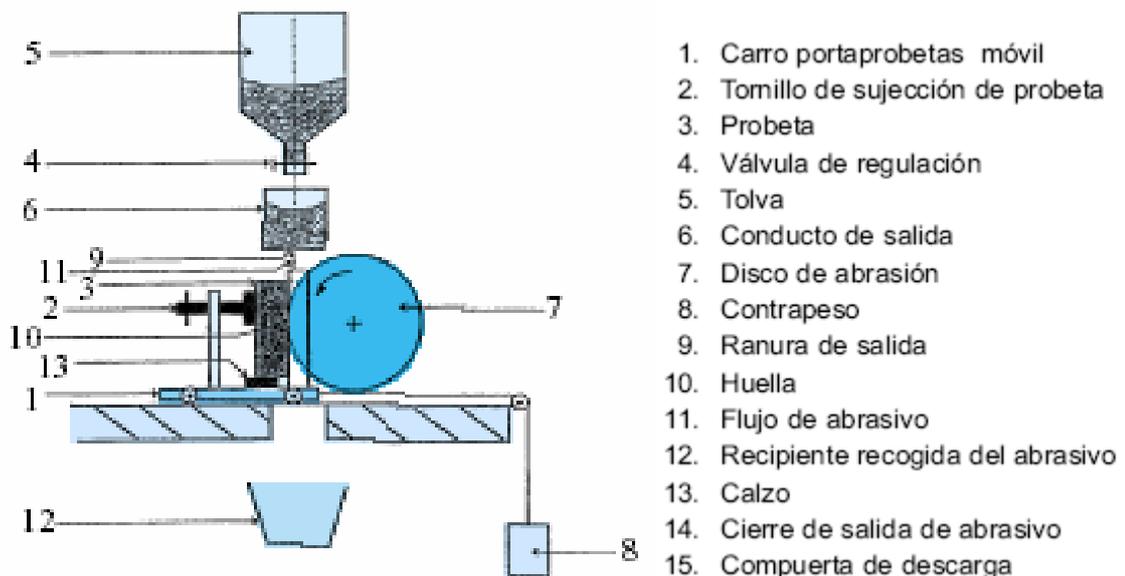


Figura 4.5.4.4.- Esquema de la máquina del ensayo de desgaste por abrasión

La muestra estará compuesta por piezas cortadas de 100x70 mm². La probeta estará limpia y seca y la superficie de su cara vista será plana, por lo que, si la textura de la probeta es rugosa ésta se planificará hasta conseguir una superficie lisa.

Se llena la tolva con abrasivo seco. Se sitúa la probeta sobre el carro, de forma que la huella que se produzca se encuentre a más de 15 mm de cualquier borde de la probeta.

Una vez situada la probeta en contacto con el disco, se abre la válvula de control y se inicia el ensayo hasta completar 75 vueltas. Siempre que sea posible se aconseja realizar dos huellas sobre cada probeta y se tomará como resultado del ensayo la medida mayor obtenida.

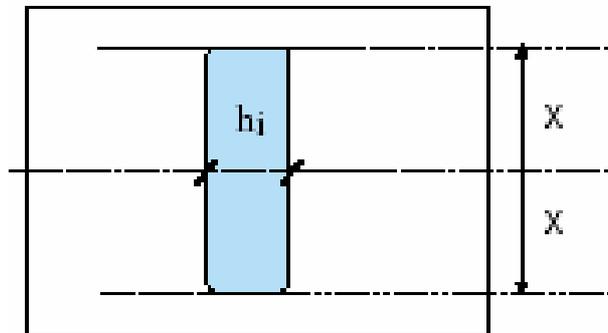


Figura 3

h_i = medida de la huella para cada probeta.
 X = distancia entre el borde y el centro de la huella.

El resultado del ensayo es el siguiente:

- Desgaste de cada probeta (h_i en mm)
- El desgaste medio :

$$h = \frac{\sum h_i}{4}$$