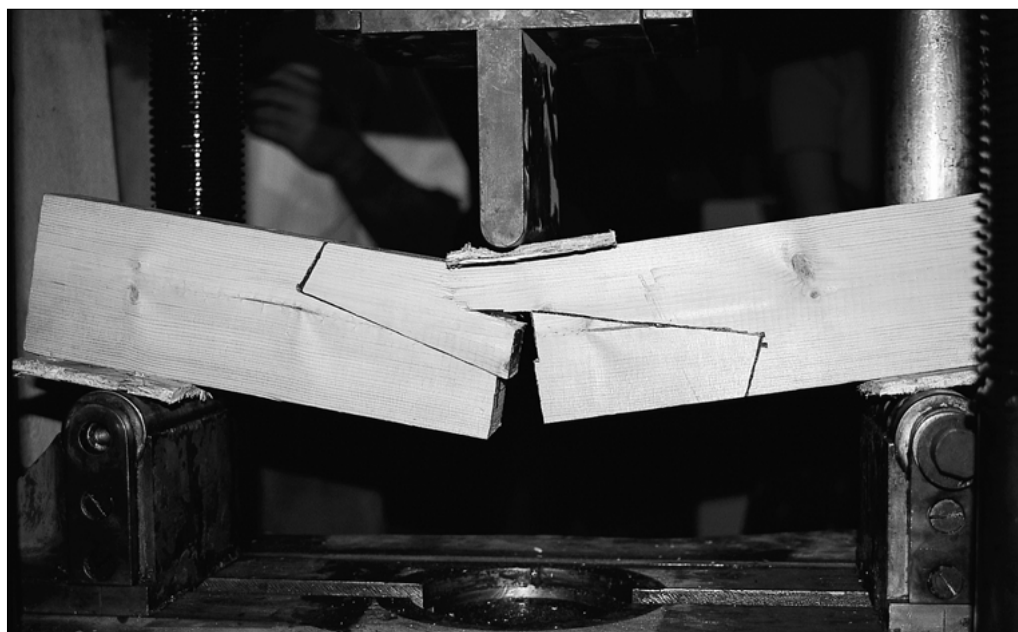


# Programa de normalización de estudios previos y control de calidad de las intervenciones. Propiedades mecánicas 2ª parte



Esther Ontiveros Ortega  
Rosario Villegas Sánchez

*Departamento de Análisis.  
Centro de Intervención del I.A.P.H.*

## Resumen

Continuando con las propiedades mecánicas (Boletín nº 28), en este artículo se describen los ensayos para la determinación directa de las propiedades mecánicas globales, así como los métodos indirectos. Estos ensayos definen la cohesión integral y las características de compacidad del material .

## A. PROPIEDADES MECÁNICAS GLOBALES

### I. Introducción

La resistencia mecánica global de un material se define como la máxima sollicitud que éste es capaz de soportar y determina el comportamiento del material frente a la acción de fuerzas mecánicas externas. Esta propiedad es posible determinarla mediante pruebas de laboratorio. En cada momento del ensayo los parámetros controlados son los siguientes:

Velocidad de aplicación de la carga:

$$V = \frac{F}{t} \text{ (N/s)}$$

Carga aplicada: F (N)

Variación longitudinal:

$$\Delta L = L_0 - L_t$$

Donde F: fuerza aplicada

t: tiempo transcurrido

L<sub>0</sub>: longitud inicial

L<sub>t</sub>: longitud en cada instante

A partir de estos datos se calculan los siguientes parámetros:

Tensión aplicada:

$$\sigma = \frac{F}{S} \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

Deformación longitudinal:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Módulo elástico o módulo de Young:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Los ensayos que permiten determinar directamente las propiedades mecánicas son los siguientes:

- Ensayo de resistencia a compresión simple.
- Ensayo de resistencia a tracción directa.
- Ensayo de resistencia a tracción indirecta (ensayo brasileño).
- Ensayo de resistencia a flexión.
- Ensayo de resistencia a flexión biaxial.

Para la descripción de los ensayos se han seguido las siguientes normas: U.N.E, Rilem y ASTM.

Además de las cargas máximas (de rotura) se puede estudiar la relación esfuerzo-deformación. Los materiales desde el punto de vista teórico puede tener un comportamiento elástico, plástico o frágil frente a la deformación axial o volumétrica. Estos ensayos permiten obtener para cada esfuerzo  $\sigma$  un determinado valor de deformación  $\varepsilon$ . La representación de todos los valores hasta llegar a la rotura es la llamada "curva de esfuerzo/deformación".

## 2. Preparación de las probetas

En general se emplean probetas de forma regular –cilíndrica, prismáticas o cúbica– cuyas dimensiones dependen del tipo de ensayo. No es posible dar un coeficiente de correspondencia entre la resistencia a la compresión del cilindro, el prisma y el cubo ni entre cilindros de diferente relaciones h/d (h= altura, d= diámetro de la base). Sin embargo, es necesario considerar siempre una adecuada relación entre la altura y anchura de las mismas, por ejemplo en el ensayo de

compresión uniaxial se considera esta relación 1. Se recomienda que el diámetro o dimensión lateral (distancia entre caras verticales opuestas) esté comprendida entre 4 y 8 cm, y la relación entre el área superficial y el volumen sea de 0,7 a 1,5 cm<sup>-1</sup>. En probetas cilíndricas la relación h/d debe ser 1 ó 2, y en las paralelepípedicas d=b o d=2b (siendo b la tercera dimensión). La altura viene definida por las características litológicas de la probeta. Para el ensayo de flexión las probetas recomendadas son de 20x10x5 cm.

En cualquier caso las dimensiones de las probetas deben venir indicadas en la tabla de resultados. Su dimensión mínima debe ser compatible con la heterogeneidad del material. Los ensayos deben realizarse sobre estados de humedad diferentes bien definidos, es decir, estado natural, saturado y seco, para poder determinar claramente el comportamiento del material en distintas condiciones medio ambientales. El número de probetas por litotipo debe estar comprendido entre un mínimo de 3 y un máximo de 10, las normas UNE establecen el número en 6.

## 3. Ensayo de resistencia a compresión simple

La resistencia a compresión se define como la carga por unidad de superficie bajo cuya acción un bloque o probeta rompe por fuerza de cizallamiento o hendidamiento. Ésta se utiliza como un índice general de resistencia de la roca tanto si es confinada (triaxial) como sin confinar (uniaxial); la más utilizada es ésta última, ya que se utiliza como un parámetro muy importante en la mecánica de las rocas.

El ensayo consiste en someter las probetas a un esfuerzo de compresión simple con la ayuda de una prensa. Las probetas son sometidas a una disposición de esfuerzos cuyo esquema aparece en la figura 1.

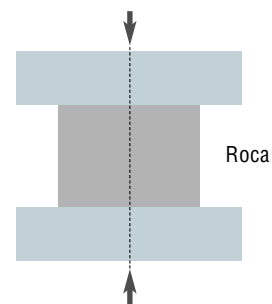


Figura 1. Ensayo de resistencia a compresión

### Procedimiento de ensayo

**Características del equipo.** Las máquinas para el ensayo de compresión deben estar equipadas con dos platos de carga de acero de espesor suficiente para evitar toda deformación excesiva con una dureza mínima de 55 Rockwell (UNE 7-053) y un sistema de regulación de cargas de tal manera que éstas puedan aumentar de manera continua y sin saltos bruscos.

Las superficies de los platos que han de estar en contacto con las caras de la probeta serán planas y estarán rectificadas, el error de planeidad de las mismas deberá ser inferior a 0.01 mm cada 100 m para el caso de máquinas ya usadas; los platos deben someterse a un nuevo rectificado cuando el valor de la planeidad sea doble del valor especificado.

Las caras de carga deben ser solamente un poco más grandes que las caras de la probeta sobre las que se aplica la carga (superior a un 3%) y para el caso de probetas pequeñas, deben usarse platos intermedios más pequeños unidos a los platos mayores. El plato inferior tendrá marcas que sirvan de guía para un correcto centrado de la probeta (la dimensión transversal de las acanaladuras no debe ser superior a 1 mm).

El plato superior está montado sobre una rótula esférica que permite efectuar giros de al menos 4 grados sexagesimales alrededor del eje vertical y de cualquier valor en el eje horizontal. El centro de la esfera de la rótula debe coincidir con el centro de la superficie de apoyo del plato superior sobre la probeta (tolerancia de 1/200 del diámetro del plato), a la vez el centro de la rótula estará en la vertical del centro del elemento que transmite la carga a los platos con una tolerancia de  $0.2 \pm h/20$  mm, siendo h la distancia entre platos en el ensayo considerado. La rótula tendrá un diámetro superior al 75% del diámetro de la probeta a ensayar.

**Descripción del ensayo.** Una vez limpias las probetas superficialmente y los platos de carga, éstas se centran sobre la placa de carga inferior. Se aplica la carga inicial a una velocidad que permita ajustar manualmente el plato de contacto sobre la probeta y se asienta debidamente el bloque esférico hasta conseguir un contacto uniforme, pero sin mover la probeta de la posición indicada.

Se aplica la carga de manera continua a una velocidad tal que provoque un aumento de tensión de 1 a 1,5 N/mm<sup>2</sup>·s según la dureza del material. Cuando se produce la rotura se anota la carga máxima soportada por la probeta.

**Resultados.** Se calcula la resistencia a compresión mediante la fórmula siguiente:

$$\sigma_{rc} = \frac{F}{S}$$

Donde  $\sigma_{rc}$ : resistencia a compresión de la probeta  
**F**: carga total de la probeta en la ruptura (N)  
**S**: superficie de la probeta (mm<sup>2</sup>).

Además, se puede representar la curva esfuerzo frente a deformación.

Cuando la relación h/d difiere de la unidad en un 25% o más, se puede referir el resultado a la probeta cúbica equivalente, mediante la expresión:

$$\sigma_{rf} = \sigma_{rc} [0,778 + 0,222(d+h)]$$

Donde  $\sigma_{rf}$ : resistencia a compresión de la probeta cúbica equivalente (N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_{rc}$ : resistencia a compresión de la probeta ensayada (N/mm<sup>2</sup>)

**d**: diámetro o dimensión lateral de la probeta (cm)

**h**: altura de la probeta (cm)

#### 4. Ensayo de tracción directa

Este ensayo permite determinar el grado de adherencia de una roca para resistir la fuerza de arranque o grado de adherencia que presenta una roca para resistir la fuerza de tracción; está en función tanto de la resistencia de los granos minerales y del cemento del material, como del área interfacial de un mineral al próximo. Es de gran interés para estimar la resistencia de un material a las fuerzas expansivas de sales al hidratarse o del agua al congelarse. Este ensayo se aplica sobre materiales dúctiles (metales), su aplicación en material pétreo es muy limitada. La probeta es sometida al diagrama de esfuerzos que se recoge en la figura 2.

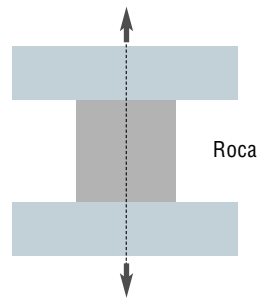


Figura 2. Ensayo a tracción directa

#### Procedimiento de ensayo

**Descripción del ensayo.** A las extremidades de las probetas se pegan unas cabezas metálicas con ayuda de un adhesivo. Una vez fijadas las cabezas metálicas, se coloca la probeta en la máquina de ensayos, centrándose de manera cuidadosa. Se aplica la fuerza de tracción de manera continua, sin sacudidas, a una velocidad de 0.05 MPa/s hasta ruptura de la probeta y posteriormente se anota la carga máxima que resiste la probeta durante el ensayo.

**Resultados.** El esfuerzo de ruptura a tracción directa viene dado por la relación entre la carga y la superficie efectiva de la probeta:

$$\sigma_{rt} = \frac{F}{S}$$

Donde  $\sigma_{rt}$ : resistencia a tracción de la probeta ensayada

**F**: carga total sobre la probeta en la ruptura (N)

**S**: superficie de la probeta (mm<sup>2</sup>).

**5. Ensayo a tracción indirecta (ensayo brasileño)**

El ensayo de tracción más frecuentemente utilizado en materiales pétreos es el de tracción indirecta. En este caso las probetas son discos que se someten a compresión sobre dos puntos diametralmente opuestos; este esfuerzo a compresión se transmite a la probeta en forma de esfuerzo a tracción convirtiéndose la sollicitación a tracción indirecta.

El esquema del ensayo aparece en la figura 3. Los parámetros controlados son los mismos que para el ensayo a compresión simple: velocidad de deformación, carga aplicada y deformación longitudinal.

Para este ensayo se recomiendan de 5 a 7 probetas por litotipo de 35 mm. de diámetro y 20 mm. de altura, con una esbeltez (h/d) de 0,5 a 0,6

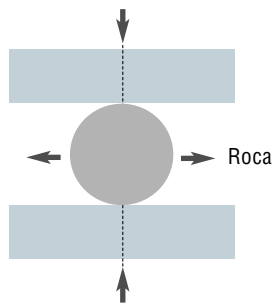


Figura 3. Ensayo a tracción indirecta

**Procedimiento de ensayo**

**Características del equipo.** Para el ensayo se utiliza una prensa de sistema rígido.

**Descripción del ensayo.** A las extremidades de las probetas se pegan unas cabezas metálicas con ayuda de un adhesivo (por ejemplo, epoxi). Una vez fijadas las cabezas metálicas, se coloca la probeta en la máquina de ensayos, centrándose de manera cuidadosa. Se aplica la fuerza de compresión de manera continua, sin sacudidas, a una velocidad de 0.05 N/mm<sup>2</sup> ·s hasta ruptura de la probeta y se anota la carga máxima que resiste la probeta durante el ensayo.

**Resultados.** Conociendo la carga de rotura (Q) y los parámetros anteriormente indicados, se calcula la resistencia a la tracción indirecta según la siguiente fórmula:

$$\sigma_t = \frac{2F}{\pi dl}$$

Donde  $\sigma_t$ : resistencia a tracción  
 F: carga (N)  
 d: diámetro de la probeta (mm)  
 l: longitud de la probeta (mm)

**6. Ensayo de resistencia a la flexión**

El módulo de ruptura o resistencia a la flexión es la resistencia de una losa de material a doblarse o flexionarse. La resistencia a la flexión puede permitir evaluar la resistencia de la piedra a la fuerza del viento, las cargas de la nieve o a las cargas que se originan por la superposición de otros materiales.

En este ensayo los materiales son sometidos al esquema de carga que se recoge en la figura 4.

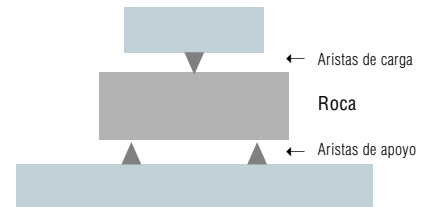


Figura 4. Ensayo de flexión

**Procedimiento de ensayo**

**Características del equipo.** El equipo necesario comprende un punto de carga y dos soportes (situados simétricos y paralelos al punto de carga). Los soportes de la probeta son dos cuchillas de tipo balancín, con los filos al menos tan largos como la anchura de la probeta. El soporte de carga puede ser de tipo balancín o rígido.

**Descripción del ensayo.** Se colocan las probetas horizontalmente de manera que las cuchillas descansen en posiciones correctas. A continuación se aplica directamente una carga de 44 N con una velocidad que no exceda de 4500 N/min hasta ruptura de la probeta.

**Resultados.** La tensión de ruptura se calcula con la siguiente ecuación:

$$\sigma_{rf} = \frac{3}{2} \times F \frac{l}{bh^2}$$

Donde  $\sigma_{rf}$ : resistencia a flexión  
 F: carga total sobre la probeta en la ruptura (N)  
 l: distancia entre los ejes de apoyo (mm)  
 h: altura de la probeta en la zona de ruptura (mm)  
 b: espesor de la probeta (mm)

**7. Ensayo de resistencia a la flexión biaxial**

Este ensayo permite medir la resistencia mecánica y módulo de elasticidad, cuando la carga aplicada llega a la ruptura del disco se determina la resistencia a la flexión biaxial.

**Procedimiento de ensayo**

**Preparación de las muestras.** Las probetas son discos de unos 10 cm de diámetro y 1,5 cm de grosor. Los discos se pulen por las dos caras.

**Descripción del ensayo.** El equipo esta constituido por dos anillos, uno de carga y otro de apoyo, cuyas dimensiones vienen indicadas en la figura 5, en el cual se introduce la muestra que debe estar bien centrada; sobre la muestra se sitúa un palpador sobre un soporte de tres pies que permite medir la flecha central de la que se deduce la flexión biaxial. Se instala sobre el anillo de carga un elemento cilíndrico que recubriendo al palpador recibe la carga de compresión. Estas piezas se disponen como viene indicado en la figura 6 y 7. Una vez situado en la prensa el dispositivo se aplica la carga por etapas, repetir hasta estabilización del cero del palpador; a carga nula. Aumentar la carga hasta ruptura.

**Resultados.** Se representa la curva de tensión/deformación; el cálculo del módulo de elasticidad y la resistencia a la flexión biaxial se determina con las siguientes ecuaciones:

$$E = 1,5 \times \frac{F}{F_0} \times \frac{1}{b^3} (1-\nu^2) \left[ R_2^2 \ln \frac{R_2}{R_1} + \frac{(R_1^2 - R_2^2)(3+\nu)}{2(1+\nu)} \right]$$

$$\sigma_{fb} = \frac{3F}{4\pi b^2} \left[ 2 \cdot (1+\nu) \ln \frac{R_1}{R_2} + \frac{(1-\nu)(R_1^2 - R_2^2)}{R_1^2} \frac{R_1^2}{R^2} \right]$$

- Donde E: módulo de elasticidad
- $\sigma_{fb}$ : resistencia a la flexión biaxial (N)
- Q: carga aplicada en el centro (N)
- b: espesor de la probeta (mm)
- $\nu$ : coeficiente de Poisson
- $R_1$  y  $R_2$ : radios de los anillos inferior y superior (mm)
- R: radio del disco de piedra (mm)
- $F_0$  constante del equipo.

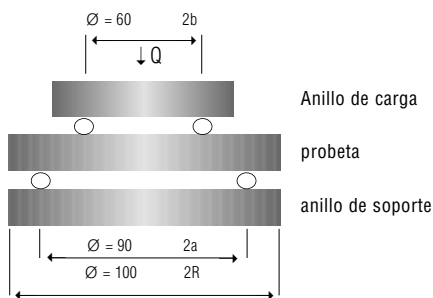


Figura 5. Dimensiones de los anillos de carga

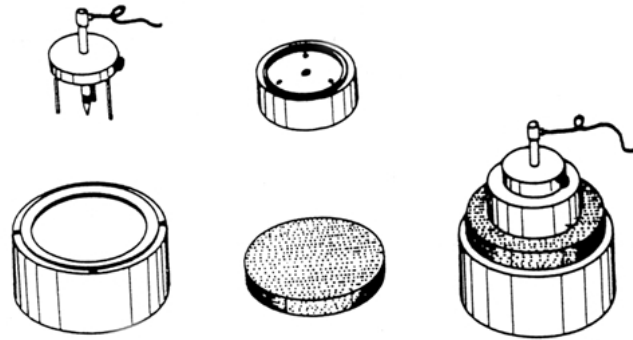


Figura 6. Anillos de carga y soporte, probeta y palpador

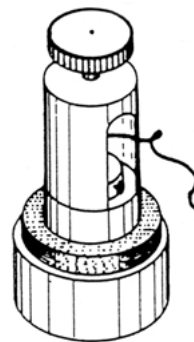


Figura 7. Montaje dispuesto para introducir en la prensa

**B. MÉTODOS INDIRECTOS**

Dentro de estos métodos se incluye el estudio de la propagación de ultrasonidos y la frecuencia de resonancia. Estos métodos se emplean para determinar el módulo de elasticidad dinámico de materiales.

**I. TRANSMISIÓN DE ULTRASONIDOS**

Se trata de la técnica no destructiva más ampliamente utilizada en el análisis y diagnóstico de la degradación del material empleado en Patrimonio; analiza el comportamiento de una determinada propiedad física, en el seno o en la superficie de un material. Se aplica en la valoración de materias primas, inspección de piezas y elementos; está muy desarrollada en materiales cerámicos y metales, en los cuales la conductividad ultrasónica es en general muy buena y las distancias que tienen que recorrer las ondas son muy cortas (mm-cm). En rocas ornamentales también se está aplicando pero con mayores dificultades, ya que en éstas la conductividad ultrasónica es muy baja y las distancias que deben recorrer las ondas son de bastantes centímetros, incluso metros.

En estas técnicas se utilizan vibraciones elásticas de una frecuencia tan elevada que se sobrepasa el umbral de percepción acústica humana. Estas frecuencias son superiores a los 20 KHz, pudiendo alcanzar valores muy elevados.

Las ondas ultrasónicas se propagan en medios donde existe materia capaz de sustentar dicha propagación; así, una partícula de material se desplaza de su posición de equilibrio por la aplicación de una fuerza externa, este desplazamiento induce a otras partículas vecinas, dando lugar a una reacción en cadena que permite la propagación de la onda. Existe un desfase temporal entre el inicio del movimiento para cada plano y esta diferencia cronológica entre las partículas coplanares o en fase, provocará zonas en las cuales los elementos de materia se aproximan entre sí, zonas de compresión, y otras en las que se alejarán, zonas de descompresión.

Se distinguen entre ondas internas, aquéllas que se propagan en el interior de los materiales, y ondas de superficie, cuya propagación se realiza en zonas superficiales del material. Las primeras ondas, que son de tipo longitudinal, se propagan paralelas al avance de la onda y son las de mayor velocidad de propagación. Las siguientes son las transversales, y su dirección de transmisión es perpendicular a la propagación de la onda.

La propagación de las ondas ultrasónicas es posible en cualquier medio si éstas son de tipo longitudinal y solamente en cuerpos sólidos, si son transversales.

La heterogeneidad natural que presentan las rocas provoca comportamientos diversos ante la propagación de los ultrasonidos. Todas estas variables provocan en las ondas fenómenos de atenuación que están directamente relacionados con dos características de la señal transmitida: frecuencia y longitud de onda. A medida que aumenta la frecuencia de la señal lo hace la atenuación debida al medio.

Por lo que se refiere a la discriminación de discontinuidades, la onda "saltará" aquéllas de menor tamaño que la longitud de onda sin verse afectada. De esta forma, cuando en el ensayo se utilice una frecuencia alta, la longitud de onda será pequeña, y por tanto el poder de discriminación de la señal aumentará, pero al mismo tiempo aumentará la atenuación, por lo que la señal será difícil de recibir. Por esta razón es importante seleccionar

la frecuencia adecuada para cada caso, de forma que se minimice en lo posible la atenuación pero sin mermar el poder discriminativo deseado.

Las ondas ultrasónicas sufren fenómenos de reflexión, refracción y difusión, dependiendo su propagación de la impedancia acústica del medio; así, cuando un haz de ultrasonidos llega a la superficie de separación de dos medios cuya impedancia es diferente, una parte del haz se refleja, otra es refractada y una tercera se difunde. Precisamente en esta propiedad se basan las múltiples aplicaciones de los ultrasonidos en los ensayos no destructivos.

**Preparación de las muestras**

Las muestras deben ser de forma regular: cubica, cilíndrica o paralelepípeda, sus dimensiones deben ser compatibles con la heterogeneidad del material a examinar. Para el caso del cilindro su diámetro debe ser de 5 cm; para el caso del paralelepípedo la sección mínima debe ser de 7(7. La esbeltez de las probetas debe estar comprendida entre 1 y 4.

El numero de probetas utilizadas para el ensayo no debe ser inferior a 5 y será función de la heterogeneidad del material.

**Procedimiento de ensayo**

**Características del equipo.** La energía ultrasónica se origina mediante generadores electrónicos; según se trabaje con altas y bajas frecuencias se utilizan distintos sistemas para transformar las oscilaciones eléctricas en ultrasonidos. Los procedimientos actualmente en uso se basan en el efecto de magnoestricción, por una parte y en el piezoeléctrico, por otra, siendo este último el más utilizado.

En la figura 8 se representa un esquema básico de un equipo de ultrasonidos. El equipo consta de:

- Generador de impulsos ultrasónicos
- un par de palpadores
- un amplificador
- un circuito amplificado
- circuito electrónico de medida del tiempo

El generador de impulsos base produce impulsos muy breves (10 µseg) con una frecuencia de repetición propia del aparato.

El palpador, que posee como elemento fundamental un cristal piezoeléctrico, transforma los impulsos eléctricos en impulsos de onda que se transmiten por medio de un acoplante al cuerpo sometido a examen.

Los impulsos se propagan en el cuerpo y las ondas reflejadas en la superficie opuesta o en un defecto (grieta, etc.) vuelven al mismo palpador u otro situado convenientemente, el cual por el proceso inverso transforma el impulso ultrasónico en eléctrico dando lugar a un oscilograma como el representado en la figura 8.

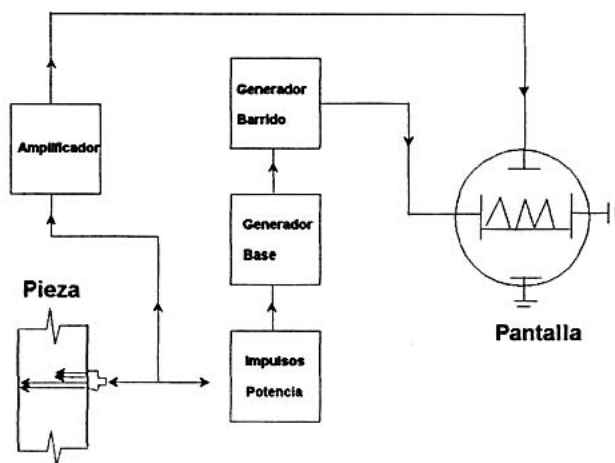


Figura 8. Equipo básico de ultrasonidos

Analizando la posición del palpador, la geometría de la pieza, el tiempo transcurrido entre el impulso inicial y el reflejado (eco) y la amplitud del impulso recibido, puede obtenerse información sobre la pieza sometida al ensayo (su compacidad, la presencia de discontinuidades, etc.).

Existen dos tipos de aparatos:

- En el primero las señales recibidas por el receptor se presentan en la pantalla de un osciloscopio en una adecuada escala de tiempos. De esta forma se puede medir el tiempo transcurrido en recibirse la señal y la amplitud del impulso.
- En el segundo se presenta directamente la lectura del tiempo que tarda en captarse la señal de retorno, normalmente en una escala digital.

Los aparatos deberán satisfacer las siguientes especificaciones:

- Deben ser capaz de medir el tiempo de propagación del impulso ultrasonido con una precisión de  $\pm 1\%$ .
- La excitación electrónica del impulso aplicado al palpador-emisor tendrá un tiempo de producción no mayor que un cuarto de su periodo natural.
- La frecuencia de repetición de los impulsos será suficientemente baja para asegurar que el conjunto de señales recibidas esté libre de interferencias.
- El aparato mantendrá sus características entre los límites de tensión, temperatura y humedad, suministrados por el fabricante.
- La frecuencia natural de los palpadores estará dentro del límite de 15 a 250 KHz.

**Descripción del ensayo.** Atendiendo a la forma de emisión y recepción de las ondas, las técnicas de ultrasonidos pueden clasificarse como:

**1. Método de reflexión por eco.** Se trabaja con un solo transductor que sirve de emisor y receptor; así si el material presenta algún defecto (por ejemplo una fisura) el tren de ondas ultrasónicas recibe una reflexión que es posible registrar, calculándose su grosor y profundidad a que aparece.

Los factores que deben ser tenidos en cuenta al realizar un ensayo por este método son: posición del palpador; amplitud del eco recibido, recorrido de las ondas en el material y forma del impulso.

**2. Método de Transmisión o transparencia.** Este procedimiento es el más utilizado; se trabaja con dos transductores (un emisor y un receptor), frecuencias bajas para conseguir una atenuación lo suficientemente pequeña y un mayor alcance de los impulsos ultrasónicos en el material. Existen tres posiciones para la colocación de los palpadores:

- En caras opuestas (transmisión directa) (figura 9).
- En caras adyacentes (transmisión semindirecta) (figura 10).
- En la misma cara (transmisión superficial) (figura 11).

La posición más recomendada es la que permite una transmisión directa ya que la máxima energía de los impulsos se dirige hacia el palpador receptor, obteniéndose la máxima sensibilidad.

Para asegurar que los impulsos ultrasónicos generados en el palpador emisor pasen a través del material y sean detectados por el receptor, es necesario que exista un adecuado acoplamiento entre la superficie del material y el palpador. Para ello se utilizan unas sustancias que permitan una superficie de contacto homogénea, como vaselina, grasa, glicerina, etc.

Se hace necesario que esta capa sea fina y los palpadores se coloquen haciendo presión suficiente para llevar a cabo un registro de tiempo correcto.

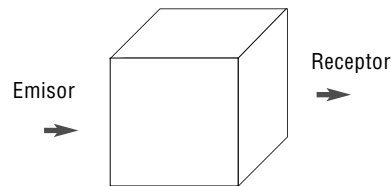


Figura 9. Transmisión directa

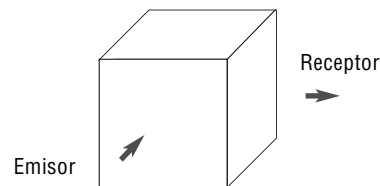


Figura 10. Transmisión semindirecta (en ángulo)

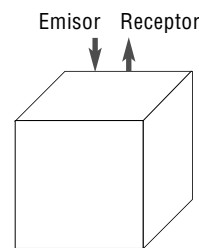


Figura 11. Transmisión indirecta

La lectura cero representa el tiempo de propagación de los impulsos entre el emisor y el receptor cuando existe entre ellos un espesor nulo. Esta medida puede realizarse presionando entre sí los dos palpadores con el mismo medio de acoplamiento que vaya a utilizarse en la inspección del material. También puede utilizarse una pieza de calibración, en la cual se conozca el tiempo de propagación.

**Resultados.** La velocidad de propagación de los impulsos ultrasónicos viene dada por la fórmula:

$$V = \frac{L}{t}$$

donde L: longitud del camino recorrido (m)  
t: tiempo de propagación (s)

**2. FRECUENCIA DE RESONANCIA**

Este ensayo permite determinar el módulo de Young (longitudinal) y el módulo dinámico de flexión o torsión. Consiste en excitar el material, haciéndolo vibrar en las condiciones específicas requeridas para determinar el módulo que se desea.

Exige un equipo más complejo para analizar las transformaciones que sufren las ondas, en cuanto a energía, amplitud, frecuencia y velocidad, al atravesar un medio sólido. Permite determinar propiedades elásticas del material y es útil para medidas de espesor en capas litológicas.

**Módulo longitudinal.** En este ensayo el generador de vibración se coloca en un extremo de la probeta, situando el captador de desplazamiento en el extremo opuesto (figura 12). Se producirá resonancia cuando al efecto de un pulso se le superpone exactamente la impulsión siguiente.

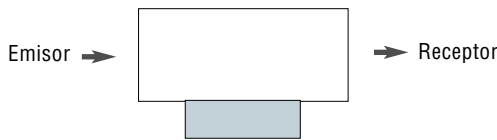


Figura 12. Realización de la medida del módulo longitudinal

**Módulo de flexión.** Se diferencia del anterior por la posición de los apoyos y del emisor y receptor (figura 13).

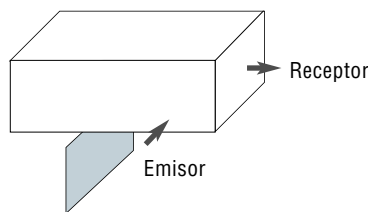


Figura 13. Realización de la medida del módulo de flexión

**Módulo de torsión.** El emisor de impulsos y el receptor se colocan en dos ángulos opuestos de las probetas a ensayar (figura 14).

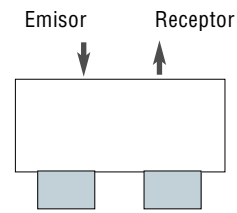


Figura 14. Realización de la medida del módulo de torsión

El módulo de elasticidad dinámico permite caracterizar la naturaleza de la piedra y poner en evidencia cualquier modificación interna del material (fisuras). Por tanto puede determinar patologías localizadas en el interior del material, no así en el exterior.

**Procedimiento de ensayo**

**Características del equipo.** Para la realización del ensayo se precisa de un aparato formado por :

- Un oscilador de frecuencia variable cuyo intervalo de frecuencia puede alcanzar 20 Khz con una exactitud del 1%.
- Un vibrador electromagnético.
- Un captador.
- Un amplificador.
- Un aparato capaz de determinar la amplitud de las vibraciones.
- Un soporte para la muestra muy estrecho situado en el plano nodal.

Las probetas se sitúan sobre el soporte, entre el vibrador y el captador para la determinación del módulo longitudinal, para el caso del módulo de torsión y flexión las probetas se disponen como se indica en la figura 15.

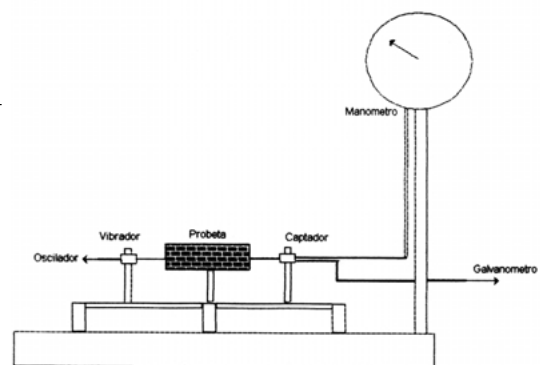


Figura 15. Esquema del aparato para medir el módulo dinámico de elasticidad

Las vibraciones recibidas por el captador pueden leerse en un indicador (previamente amplificadas). Cuando la probeta entra en resonancia la amplitud captada es máxima. Se realizan varias medidas y se toma el valor medio.



**Resultados**

El módulo de elasticidad de resonancia longitudinal  $E_{dl}$  se determina como:

$$E_{dl} = \frac{4f^2 l^2 \rho_e}{g}$$

El módulo de resonancia a flexión  $E_{df}$  se determina como:

$$E_{df} = \frac{4\pi^2}{386} \times \frac{f^2 l^4}{I} \times \frac{\rho_e}{g}$$

El módulo de resonancia a torsión  $E_{dt}$  se determina a través de la siguiente ecuación:

$$E_{dt} = \frac{4f^2 l \rho_e}{g} \times \frac{\frac{a}{b} + \frac{b}{a}}{\frac{a}{b} - 2,52 \frac{a^2}{b^2} + 0,21 \frac{a^6}{b^6}}$$

donde **I**: momento de inercia.  
**f**: frecuencia de resonancia  
**l**: longitud de la probeta  
 **$\rho_e$** : densidad aparente ( $\text{kg/m}^3$ )  
**g**: aceleración de la gravedad (9,81 m/s)  
**a y b**: lados de sección del prisma.

**Bibliografía**

Junta de Andalucía. Conserjería de Cultura, IAPH. Cuadernos de Técnicas de diagnóstico aplicadas a la Conservación de materiales de construcción en edificios Históricos (1996).

MARTÍN PÉREZ, A. Ensayos y experiencias de alteración en la construcción de obras de piedra de interés Histórico Artístico (199) Fundación Areces.

Rilem: MR-8. Determination de l'adhérence en flexion entre las unités de maçonnerie et mortier (basado en la norma ASTM.E518-74).

RODRÍGUEZ NAVARRO, C. "Causas y mecanismos de alteración de los materiales calcáreos de la Catedrales de Granada y Jaén". Publicación inédita (1995).

Rilem: MR-13. Determination de la resistance du mortier a la deformation.

Normal-22/86. Missura della velocità di propatgazione del suono. Raccomandazioni Normal. CNR (1996)

UNE: 7068/53. Ensayos a compresión de adoquines de piedra.

UNE:22175/85. Granitos ornamentales, resistencia a compresión.

UNE: 22176/85 Granitos ornamentales, resistencia a flexión.

UNE:22186/85. Mármoles y calizas ornamentales, resistencia a compresión.

UNE: 22186/85. Mármoles y calizas ornamentales, resistencia a flexión.

UNE: 22194/85. Pizarras ornamentales, resistencia a compresión.

UNE:22195/85. Pizarras ornamentales, resistencia a flexión.

UNE: 4172/89Ex. Bloques de hormigón, método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión.

UNE: 67026/94 Ex. Ladrillos y bloques de cerámica de arcilla cocida. Determinación de la resistencia a compresión.

UNE: 67026/95 Ex/IM. Ladrillos y bloques de cerámica de arcilla cocida. Determinación de la resistencia a flexión.

UNE: 67100/85. Baldosas cerámicas. Determinación de la resistencia a compresión.

UNE: 67100/1M/92. Baldosas cerámicas. Determinación de la resistencia a flexión.

UNE: 83304/84. Ensayos de hormigón. Rotura a compresión.

UNE: 83305/86. Ensayos de hormigón. Rotura a flexión-tracción.

UNE:83306/95. Ensayos de hormigón. Rotura a tracción indirecta(ensayo brasileño).

UNE: 83821/92Ex. Morteros. Métodos de ensayo. Morteros endurecidos. Determinación de la resistencia a flexión y compresión.

UNE: 102031/82. Yesos y escayolas de construcción. Métodos de ensayo físicos y mecánicos.

**Agradecimientos:**

Ignacio Valverde Espinosa. *Catedrático de Materiales de Construcción. Escuela Universitaria de Arquitectura de Granada.*

Eduardo Sebastián Pardo. *Profesor de Dpto. de Mineralogía de la Facultad de Ciencias de Granada.*