

Estudio del método de la medida de la velocidad de propagación del sonido y su aplicación a edificios históricos

M. ALVAREZ DE BUERGO (*)

T. GONZALEZ LIMON (**)

RESUMEN. Se estudia el método de la medida de la velocidad de propagación del sonido, comparando las diversas normativas existentes sobre el tema (NORMAL, RILEM, ASTM, UNE). Se enfoca el trabajo hacia el estudio y la valoración del deterioro de los materiales de construcción así como el comportamiento de las estructuras de fábricas en edificios históricos. La importancia de este método radica en constituir una técnica no-destruccionista. Por último se ha elaborado una relación de las aplicaciones más recientes orientadas en esta línea de trabajo.

STUDY OF THE METHOD OF MEASURING SOUND PROPAGATION VELOCITY AND ITS APPLICATION TO HISTORICAL BUILDINGS

ABSTRACT. The method of the sonic propagation velocity measurement is studied, comparing the different existing standards and recommendations about the topic (NORMAL, RILEM, ASTM, UNE). This paper is focused towards the building materials deterioration study and its evaluation, as well as the masonry structures behaviour in historic buildings. The importance of this method is based on the constitution of a non-destructive technique. Finally, a report of the most recent applications has been mentioned, all of them oriented towards this working line.

Palabras clave: Velocidad; Sonido; Alteración; Materiales de construcción; Restauración de monumentos.

1. FUNDAMENTO DEL METODO

El método para la determinación de la velocidad del sonido en los materiales de construcción está basado en la propagación de las ondas ultrasónicas. Estas son ondas elásticas cuyas frecuencias (por encima de los 20 kHz), las hacen inaudibles al oído humano (15-20 kHz). La transmisión de una onda elástica a través de un material depende de las fuerzas de unión entre las partículas. La medida de esta velocidad se efectúa mediante dos transductores que miden el tiempo que transcurre entre la emisión y la recepción de una señal entre dos puntos a una cierta distancia. El palpador electroacústico emisor produce impulsos de vibraciones longitudinales, que tras atravesar una cierta longitud, se convierten en una señal eléctrica por medio de un segundo palpador y un circuito que mide el tiempo de propagación de los impulsos.

En el caso de medida de la velocidad de propagación tanto en materiales pétreos como en ladrillos, se ha de considerar su carácter heterogéneo, discontinuo y anisótropo, generando, todo ello, un diferente comportamiento ante la propagación del impulso, que se caracteriza por la atenuación de dicha velocidad debido a los fenómenos físicos de absorción y dispersión. La atenuación de la onda varía proporcionalmente con la frecuencia utilizada.

Es una técnica que no implica modificación de las características del material (no destructiva), es fácil de emplear y permite determinar diferencias de calidad en el material auscultado: auscultaciones completas de una obra de arte, co-

lunna, estatus o probeta de cualquier material, permiten descubrir las partes alteradas, frágiles o de calidad diferente.

El tiempo de propagación del impulso ultrasónico depende de la densidad del material y de la presencia de huecos, es decir, de su anisotropía. Cuando un impulso ultrasónico atraviesa una interfase material-aire, se produce una transmisión despreciable de energía a través de ésta; si el hueco es grande o está cerca del punto de emisión o de recepción, puede que la señal no se reciba. Cualquier fisura, grieta o espacio lleno de aire que esté entre los dos transductores, y cuyo área sea mayor que la del transductor, obstruye el paso del haz ultrasónico, recorriendo un camino alrededor de la periferia del defecto y alargando el tiempo de propagación. Cuando estas ondas se propagan a través de fluidos sufren una atenuación. De todas formas, la aplicación de esta técnica tiene a veces una precisión limitada. En general, la velocidad de propagación del sonido está ligada a la compacidad del medio y varía en el mismo sentido que el módulo dinámico o la resistencia mecánica. La variación de dicha velocidad es función principalmente de la composición mineralógica de la piedra, conexiones intercrystalinas, volumen de poros, contenido de humedad y acciones a las que está sometido el material.

2. EQUIPO DE MEDIDA

2.1. TIPOS DE PROCEDIMIENTO Y EXCITACION

Existen dos tipos de procedimientos:

- Procedimiento activo, en el cual la onda se genera artificialmente y se introduce en el material para posteriormente registrar la señal.
- Procedimiento pasivo, en el cual la onda se genera espontáneamente al someter el material a ciertas tensiones.

(*) Geólogo. Laboratorio Central de Estructuras y Materiales. CEDEX, MOPTMA.

(**) Arquitecto. Laboratorio Central de Estructuras y Materiales. CEDEX, MOPTMA.

En este estudio nos centraremos en los procedimientos activos.

Igualmente existen dos tipos de excitación posibles:

- Continua: de larga duración y con una amplitud de oscilación constante.
- Por impulsos: de corta duración y de amplitud no uniforme; éste es el que normalmente se utiliza en ensayos no destructivos.

2.2. CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO

El equipo consta esencialmente de un generador de impulsos eléctricos (excitador u oscilador), un par de palpadores (pueden ser esféricos o planos, aunque se utilizan más estos últimos), un amplificador regulable y un circuito electrónico de medida del tiempo (cronómetro de precisión); un sistema de registro bastante frecuente es mediante un osciloscopio. El emisor, generalmente piezoeléctrico, debe enviar un impulso con la suficiente potencia y frecuencia a fin de que la onda resultante atraviese la sección del material a examen, aunque la frecuencia debe ser a la vez lo suficientemente baja para evitar interferencias. La señal eléctrica emitida por el oscilador es de esta forma transformada en vibración mecánica, que a su vez, al llegar al transductor receptor es transformada otra vez en señal eléctrica. También es posible el uso de filtros en el caso de que se quiera seleccionar un rango de frecuencias o una determinada anchura de banda.

2.3. RANGO DE FRECUENCIA

El impulso de la emisión debe generar ondas sónicas en la frecuencia máxima compatible con la amortiguación del material analizado. La frecuencia no debe ser superior a 150 kHz; el intervalo de frecuencias idóneo es 10-50 kHz (NORMAL 22-86) aplicado a materiales pétreos; la norma UNE 88-308-86 aplicada al hormigón dice que la frecuencia natural de los palpadores debe estar dentro del límite de 15 a 250 kHz. Igualmente para el hormigón, la RILEM recomienda un rango de frecuencias de 20-200 kHz (también Tobio, 1967).

En el caso de medida sobre elementos de un muro se puede recurrir a otro tipo de emisores de mayor potencia; para la interpretación de la medida se deberá tener en cuenta la frecuencia de las señales.

2.4. TIPOS DE APARATOS

Existen dos tipos de aparatos: el primero utiliza un tubo de rayos catódicos en el cual el primer frente de ondas se visualiza en la pantalla en una adecuada escala de tiempos; el segundo utiliza un medidor electrónico de tiempos con lectura digital.

2.5. PRECISIÓN DEL APARATO

La distancia entre dos puntos de medida debe registrarse con una exactitud de $\pm 1\%$. La lectura del tiempo se puede realizar mediante una instrumentación dotada de osciloscopio (obteniendo los oscilogramas de la señal en función del tiempo), y cronómetro con precisión de $\pm 1\%$. La señal se amplificará o reducirá, en cada lectura, una amplitud constante y un tiempo de salida lo más breve posible. En el caso de lectura del tiempo con dispositivo automático los valores deben corregirse teniendo en cuenta, bien el tiempo de tara (t_0), o bien el tiempo relativo a la posición del umbral electrónico adosado.

2.6. CONDICIONES AMBIENTALES

Las condiciones operativas del aparato deben mantenerse constantes en las condiciones ambientales en las que se va a realizar la medida.

3. PROCEDIMIENTO DE MEDIDA

3.1. TIPOS DE MEDIDA

Los diferentes tipos de transmisión del impulso ultrasónico son:

- Transmisión directa: los transductores se colocan opuestamente sobre superficies plano-paralelas del material (Fig. 1a).
- Transmisión semidirecta o diagonal o en ángulo: los palpadores se colocan sobre caras contiguas o adyacentes (Fig. 1b).
- Transmisión superficial o indirecta: se disponen sobre la misma cara (Fig. 1c).

La posición más recomendable es la que permite una transmisión directa al lograr que la máxima energía de los impulsos se dirija hacia el palpador receptor, obteniendo así

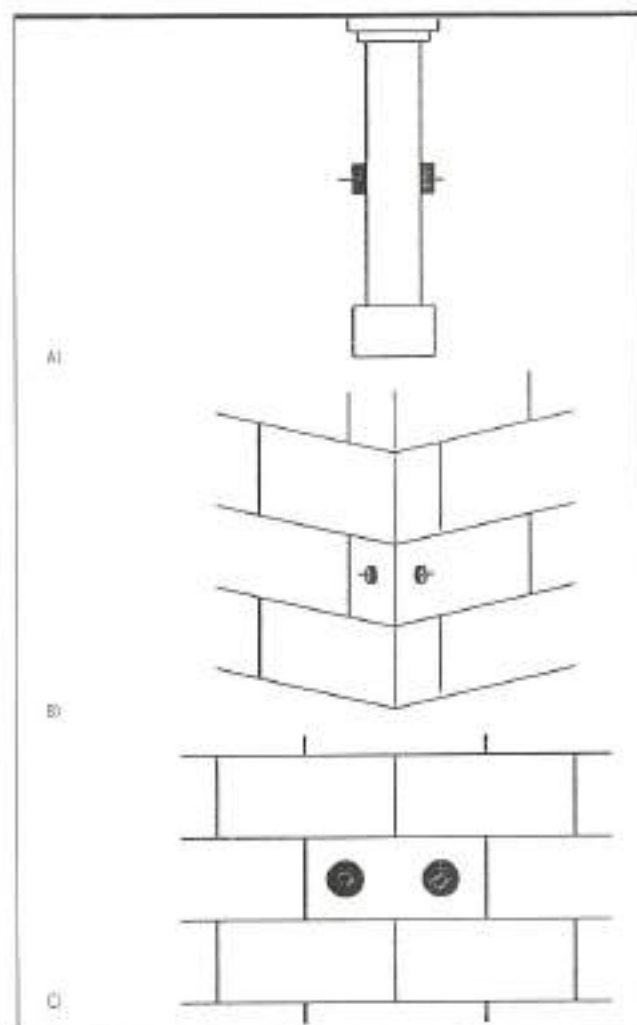


FIGURA 1. Tipos de medida: A) transmisión directa, B) transmisión semidirecta, C) transmisión indirecta.

la máxima sensibilidad. Muy útil en el caso de probetas y de pilares.

La transmisión superficial o indirecta es la menos sensible y se utiliza cuando sólo es accesible una de las caras. En algunos casos se aplica para la determinación de la profundidad de una grieta siempre que no pueda hacerse por transmisión directa, o bien para determinar la calidad o degradación de un material en su capa superficial. Para materiales que presenten alteraciones superficiales de espesor uniforme, este tipo de medida puede indicar aproximadamente dicho espesor de alteración (por ejemplo una costra). En las medidas por transmisión superficial se aconseja la realización de una serie de medidas con las sondas a diferentes distancias colocando el palpador-receptor en distintos puntos a lo largo de una línea a distancia constante. La pendiente de la recta distancia/tiempo recorrido, representa la velocidad del sonido en el material considerado. Dos pendientes diferentes indican la presencia de una diferente calidad del material en superficie.

La transmisión semidirecta tiene una sensibilidad intermedia entre las dos anteriores y se utilizará cuando no sea posible una transmisión directa. El emisor se puede colocar en una posición fija y sobre la superficie perpendicular se desplaza a intervalo constante el receptor. Este tipo de transmisión permite analizar y determinar la homogeneidad del material.

3.2. ACOPLAMIENTO DE LOS PALPADORES

Los transductores deben asegurar un buen contacto con la superficie del material a examinar; la presión sobre la superficie del material debe mantenerse lo más constante posible. Según la norma italiana NORMAL 22-86, los transductores deben colocarse de tal forma que no necesiten el uso de productos acoplantes; asimismo esta norma recomienda el empleo de emisor dotado de cono y de receptor acabado en punta. La norma UNE 83-308-86, por el contrario, y enfocada hacia el hormigón, recomienda el uso de productos como resina, vaselina, grasa, jabón líquido, pasta de caolín y glicerina. En este caso se aconseja que sólo se interponga una capa muy delgada de cualquiera de estos productos entre el palpador y el material. Suárez del Río y Montoto (1990) mencionan productos como mezclas de glicerina y agua, miel, geles plásticos y cauchos naturales y artificiales; la RILEM añade sustancias como jabón y una pasta de caolín/glicerina.

3.3. CALIBRACION DEL APARATO

Se realiza poniendo en contacto directo las dos sondas, emisora y receptora (en este caso se deberá leer en el dispositivo de medida el valor 0), o bien interponiendo entre las dos sondas un material de referencia del que se conozca el tiempo de propagación y cuyas dimensiones sean compatibles con la frecuencia de la sonda. Si se va a utilizar un producto de acoplamiento, éste debe interponerse a su vez en el momento de poner los dos palpadores en contacto y realizar varias lecturas hasta obtener el 0.

Esta operación se realizará siempre antes de empezar a utilizar el aparato o cuando se cambie de transductores, aunque mejor sería realizarla antes y después de cada medida. Deberá repetirse más veces durante la investigación; cuando cada medida se modifique parcialmente o cuando se verifiquen variaciones sensibles de las condiciones ambientales.

4. TIPOS DE MEDIDAS

4.1. MEDIDAS «IN SITU»

La forma de aplicar la técnica sobre materiales de un monumento o de un edificio debe tener en cuenta los objetivos que se buscan y las características del material; de estas dos condiciones dependen la elección de los puntos de medida y la posición recíproca de las ondas.

La medida de superficie analiza una sección más o menos limitada a la parte superficial del material; en general se deben prever una serie de puntos de medida (cuantos más mejor) alineados a lo largo de una recta y equidistantes entre sí; la velocidad característica de los estratos superficiales se representará gráficamente obteniendo la recta de correlación de los puntos obtenidos en un diagrama espacio/tiempo.

Es necesario determinar con precisión la posición exacta de los puntos de medida (por ejemplo mediante fotografías), cuando la técnica se aplique para controlar la evolución de la calidad del material en el tiempo o los efectos obtenidos después de una intervención.

4.2. MEDIDAS EN LABORATORIO

La medida debe efectuarse teniendo en cuenta la posible anisotropía del material. La medida directa sobre una probeta se realiza en las tres direcciones ortogonales: x , y , z , siendo el plano x - y el plano de yacimiento (en la cantera, de sedimentación, de esquistosidad).

4.2.1. Preparación de las probetas. Las probetas deben poseer una forma regular (cubos, cilindros, paralelepípedos), aunque algunos autores (Martín, 1990) aconsejan que sean cilíndricas y de 5 cm de altura. Las dimensiones mínimas deben ser compatibles con la homogeneidad del material pétreo examinado. En el caso de cilindros el diámetro mínimo debe ser 5 cm; en el caso de paralelepípedos la sección mínima debe ser 7×7 cm; en ambos casos la diferencia entre la dimensión mayor y la menor debe estar comprendida entre 1 y 4; si este cociente es superior a 1, el eje longitudinal debe ser paralelo al plano de referencia. Después del corte, las probetas se lavan concienzudamente en agua desionizada para eliminar la posible presencia de material pulverulento.

4.2.2. Número de probetas. Depende de la homogeneidad del material pétreo, no siendo nunca inferior a 5 por cada serie (Martín, 1990, sólo habla de 3 por cada grupo como mínimo). Las probetas de cada serie deben ser comparables en homogeneidad y estado de alteración, así como en su forma y dimensión.

4.2.3. Método de desecación. Cada probeta se deseca en una estufa con ventilación forzada a $60 \pm 5^\circ \text{C}$ y enfriado en un desecador antes de la pesada. La elección de la temperatura de 60°C se debe a la necesidad de no provocar alteraciones en sustancias utilizadas en tratamientos de conservación aplicados sobre las probetas.

El procedimiento de desecación se repite hasta conseguir peso constante (cuando la diferencia entre dos pesadas consecutivas realizadas en 24 horas de separación es $\leq 0,1\%$ de la masa de la probeta).

5. INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES DE ENSAYO SOBRE LOS RESULTADOS

5.1. SUPERFICIE DE ENSAYO

Esta debe ser lo más lisa posible para facilitar un buen contacto con el transductor. Si no queda otra opción que trabajar

con superficies rugosas, se realizarán medidas sobre longitudes de recorrido mayores que las normalmente utilizadas: según la normativa RILEM, 150 mm para transmisión directa y 400 mm para transmisión superficial, siempre aplicado al hormigón. Cuando esto no es posible el material puede pulirse un poco con abrasivos (poco recomendables en el caso de monumentos).

5.2. CONTENIDO DE HUMEDAD

Es conocido que para el caso de hormigones un muy elevado contenido en humedad puede resultar en un aumento de la velocidad de hasta un 5 % respecto a hormigones secos. La velocidad de propagación de las ondas longitudinales en el agua se multiplica por 5 con respecto al aire, por lo que una muestra de roca saturada de agua posee una velocidad mayor que una muestra seca de las mismas características.

5.3. TEMPERATURA

Al menos en el caso del hormigón no parece que los cambios incluidos en el rango entre 5 y 30° C tengan gran influencia en la velocidad que se obtenga.

5.4. LONGITUD DEL RECORRIDO

Sólo en el caso de que la longitud sea excesivamente pequeña y, sobre todo, que el material a ensayar sea heterogéneo, es posible que la velocidad de propagación se vea afectada. Se recomienda que la longitud sea como mínimo cinco veces mayor que el centil (tamaño máximo de grano). En el caso del hormigón, la RILEM recomienda una longitud mínima de recorrido de 100 mm cuando el tamaño máximo de árido sea menor de 30 mm, y 150 mm cuando el tamaño máximo de árido sea menor de 45 mm. Cuando las distancias sean muy grandes (más de 3 m) puede producirse una ligera reducción de las velocidades obtenidas, debido a que los componentes de alta frecuencia de los impulsos se atenúan más que los de baja frecuencia y la forma del frente de onda se vuelve más redondeada cuando se incrementa la distancia recorrida. Para una frecuencia de 50 kHz, el mínimo valor de la dimensión transversal ha de ser de 80 mm.

6. INFLUENCIA DEL MATERIAL A ENSAYAR

6.1. COMPOSICION MINERALOGICA

La velocidad de propagación de las ondas es diferente para cada mineral y, por tanto, para cada tipo de roca en función de la proporción y de los tipos de minerales que existan. A continuación se exponen algunos ejemplos de minerales y de otros materiales:

- V_p feldespato = 5.500-6.500 m/s.
- V_p moscovita = 5.900 m/s.
- V_p calcita = 5.500 m/s.
- V_p cuarzo = 5.225 m/s.
- V_p aluminio = 6.250 m/s.
- V_p acero = 5.730 m/s.
- V_p vidrio = 5.640 m/s.
- V_p agua = 1.500 m/s.
- V_p aire = 330 m/s.

Existe, por tanto, la posibilidad de estimar la velocidad de propagación en una roca de mineralogía conocida, así como sabiendo el porcentaje modal de cada mineral, con la condición de que la roca no sea anisótropa y de que sea poco porosa.

6.2. DENSIDAD/POROSIDAD

Cuanto mayor sea la densidad de un material, mayor será la velocidad de propagación; esto se debe a que un aumento en la densidad supone un descenso de la porosidad. Como es lógico, cuanto más elevada sea la porosidad o fisuración de un material, menor será la velocidad de propagación.

6.3. TEXTURA

Materiales de tamaño de grano fino tienen una mayor velocidad de propagación que los de grano grueso. Si existen anisotropías la velocidad es siempre mayor paralelamente al bandeado, alineación, elongación, orientación cristalográfica o mineralógica, etc., que perpendicularmente a él. El coeficiente de anisotropía se establece como la relación entre la velocidad paralela y perpendicular a la orientación.

7. EXPRESION DE LOS RESULTADOS

Cálculo de la velocidad de la propagación del sonido: la velocidad de la onda longitudinal, expresada en m/s, se calcula con la siguiente fórmula:

$$v = l / t$$

donde l es la distancia emisor-receptor (m) y t es el tiempo que tarda la onda (sg) corregido por el tiempo t_0 .

La velocidad de cada serie de medidas se considera afectada por un error igual a la desviación cuadrática media, σ , cuando tenga un valor significativo.

8. PRESENTACION DE LOS RESULTADOS

En la presentación de los resultados, éstos van ilustrados con una tabla en la que figuran los siguientes valores:

- Tiempo t_0 (sg).
- Diferencia entre la dimensión mayor y la menor.
- Tiempo t (sg).
- Distancia entre los puntos de medida (m) así como su localización en el edificio-monumento.
- Velocidad v y velocidad media V_m , con su correspondiente desviación cuadrática media.
- Coeficiente de variación C , definido como el coeficiente entre σ y la velocidad media v .

Además de estos datos se deben añadir a la tabla datos relativos a la instrumentación utilizada, al material sobre el que se realiza la medida, al tipo de prueba y al ambiente. En un gráfico se representarán el tiempo de recorrido y la distancia entre palpadores. La pendiente de la recta resultante al unir los puntos representará la velocidad de los impulsos a lo largo de la línea elegida sobre la superficie del material. La zona del gráfico en la que se produzca una inflexión o discontinuidad indicará probablemente que en dicho punto existe una fisura o mayor porosidad o zona en general anómala, es decir, pendientes diferentes indicarán diferentes calidades del material.

8.1. DATOS RELATIVOS A LA INSTRUMENTACION

- Tipo de equipo (amplificación, visualización y cronómetro).
- Tipo de transductores utilizados (frecuencia, forma y tamaño).

8.2. DATOS RELATIVOS AL MATERIAL Y AL TIPO DE MEDIDA

- Características pétreas del material: caliza, granito, hormigón, ladrillo...

— Tipo de medida: directa, indirecta o semidirecta (con su correspondiente esquema)/«in situ», en laboratorio.

8.2.1. Datos relativos a medidas determinadas in situ:

- Condiciones termohídricas del material.
- Descripción de la superficie del material: presencia de polieronía, enlucido, tratamientos, depósitos, incrustaciones, superficie rugosa o pulida... y del estado de conservación de la misma.
- Fase de la intervención de conservación, limpieza, tratamiento superficial, durante la cual se ha efectuado la medida.
- Posición de los puntos de medida.

8.2.2. Datos relativos a medidas efectuadas en el laboratorio:

- Número, forma, dimensión del material (también cociente entre la dimensión mayor y la menor).
- Posición del transductor respecto al plano de referencia del material.

8.3. DATOS RELATIVOS AL AMBIENTE

- Temperatura durante la medida.
- Humedad relativa durante la medida.

9. APLICACIONES

Por auscultación con estos métodos no destructivos, es posible, sin la extracción de muestras, definir las clases de porosidad, calidades y estado de alteración tanto de materiales pétreos como de ladrillos.

Mamillan (1981) ha realizado ensayos en ladrillos sin alterar, obteniendo unos resultados con variaciones de velocidad de 1.500 a 3.500 m/s. Asimismo, ha obtenido una relación entre la velocidad del sonido y la porosidad de ladrillos macizos. Se observa que si la porosidad disminuye de 35 a 15 %, la velocidad del sonido aumenta de 1.800 m/s a 3.300 m/s.

Hobbs (1986) ha llevado a cabo un estudio de este tipo sobre bloques de hormigón, morteros y ladrillos, realizando medidas directas e indirectas en las tres direcciones, y observando cómo las medidas indirectas ofrecen siempre unas velocidades de propagación más bajas que las directas. También se ha comprobado con este estudio la gran variabilidad de velocidades en ladrillos antiguos (hasta un 14 % de coeficiente de variación). Las medidas efectuadas en las tres direcciones principales de los ladrillos antiguos, refleja la estructura impuesta a los cuerpos arcillosos en su proceso de fabricación. Los valores obtenidos en estos materiales varían desde 2.500-3.600 m/s (medida directa) a 1.970-2.550 m/s, para medidas indirectas. El mismo autor ha desarrollado un programa de investigación en el que demuestra la capacidad de esta técnica para obtener información acerca de la calidad de fábricas de ladrillo y piedra al día siguiente de su construcción.

Fulvio Zezza (1990) ha medido la velocidad de los impulsos ultrasónicos en los doce leones esculpidos en mármol del Patio de los Leones de la Alhambra de Granada, determinando así el estado de deterioro del material. Las medidas se han realizado mediante transmisión superficial, con el fin de obtener la profundidad de la alteración superficial y el desarrollo de la fisuración y, en definitiva, una previsión del futuro desarrollo del deterioro.

Ugo Zezza (1990) ha realizado medidas sobre rocas metamórficas, magmáticas y sedimentarias, con el objetivo de establecer rangos y magnitudes de anisotropía en rocas utilizadas para construcción y para poder explicar, bien el dete-



FIGURA 2. Medida de velocidad de propagación del sonido en escultura.

riero diferencial que sufren algunos litotipos o para prever el deterioro que sufrirán en un futuro, siempre en función de su anisotropía.

Asimismo Veniale y Zezza (1986) establecieron la importancia de determinar las propiedades fisicoquímicas de ciertos granitos mediante la técnica de ultrasonidos, llegando a la conclusión que las medidas de las velocidades de los impulsos ultrasónicos a lo largo de las diferentes direcciones de la fábrica del granito, permiten evaluar las diferencias específicas en granitos ornamentales, lo cual es muy significativo a la hora de entender el grado efectivo de deterioro.

Suárez del Río y Montoto (1990) han realizado un estudio del estado de alteración en los sillanes de granito del Monasterio de El Escorial en Madrid.

La importancia, en ciertos casos, del uso de técnicas no-destructivas, se fundamenta en el hecho de que sobre los materiales que integran las estructuras de las obras de interés histórico-artístico no es aconsejable el empleo de técnicas destructivas para su caracterización y determinación del comportamiento estructural (Suárez del Río y Montoto, 1990).

Estos métodos se han aplicado con cierto éxito a estructuras sencillas de fábrica con acceso a ambas caras de la estructura. Debe tenerse en cuenta cualquier variación en la longitud del camino de transmisión debido al espesor de la estructura. Existe mayor dificultad de interpretación cuando se quieren evaluar otras variaciones en la construcción como pudieran ser el espesor en muros, arcos internos o los cambios en el material utilizado como relleno (hormigón, tierra...). Ciertos elementos, como llaves de atados, pueden dar caminos preferenciales a la transmisión de la onda longitudinal, afectando al registro de los tiempos de transmisión.

Berra y Bindá (1991) llevaron a cabo un estudio experimental en prismas de fábrica de ladrillo a los que se les inyectó resinas epoxy o morteros de cemento modificados



FIGURA 3. Medida de velocidad de propagación del sonido en fábrica de ladrillo (5MES).

con resina. Las medidas de la velocidad de propagación de ultrasonidos en diferentes fases (probetas sanas, después de romperlas a compresión, una vez realizadas las inyecciones y después del ensayo de compresión y antes del colapso final), permitieron identificar las fisuras y grietas en el interior del material, evaluar los ensayos de envejecimiento (durabilidad frente a los ensayos de cristalización de sales, ciclos térmicos) sobre los prismas y detectar el cambio en las propiedades mecánicas tras las inyecciones, junto con la evaluación de la eficacia del refuerzo por inyección.

Hobbs y Wright (1987), han investigado experimentalmente en la aplicación de la técnica de ultrasonidos para detectar fallos en estructuras de fábrica, llegando a la conclusión de que este método es capaz de localizar las zonas de morteros de baja resistencia, juntas de mortero estriadas y ladrillos con un coeficiente de absorción de agua demasiado elevado. También se han ensayado muros de fábrica armada resultando útil esta técnica en el control de calidad del relleno de dichos muros.

BIBLIOGRAFIA

- BARONIO, G.; BERRA, M., y BINDA, L. (1989). «Durability of masonry strengthening by injection techniques». *IABSE Symposium*. Lisbon, 6-8 septiembre.
- BERRA, M.; BINDA, L.; ANTI, L., y FATTICIONI, A. (1991). «Non destructive evaluation of the efficacy of masonry strengthening by grouting techniques». En: *Proceedings of the 9th International Brick/Block Masonry Conference*. Berlin, Germany, 13-16 octubre 1991. DGFm, pp. 1457-1468.
- BERRA, M.; BINDA, L.; BARONIO, G., y FATTICIONI, A. (1991). «Ultrasonic pulse transmission: a proposal to evaluate the efficiency of masonry strengthening by groutings». En: *Proceed. of the Workshop The degradation of brick and stone masonries due to moisture and salt content and the durability of surface treatments*. Milán.
- BINDA, L.; BERRA, M.; BARONIO, G., y PONTANA, A. (1989). «Repair of masonries by injection technique; effectiveness, bond and durability problems». *International Technical Conference on Structural Conservation of Stone Masonry*. Atenas, octubre 1989.
- HOBBS, B., y WRIGHT, S. (1987). «Ultrasonic Testing for Fault Detection in Brickwork and Blockworks». *The third international conference on structural faults and repair*, 7-9 julio 1987.
- HOBBS, B. (1991). «Development of a construction quality control procedure using ultrasonic testings». En: *Proceedings of the 9th International Brick/Block Masonry Conference*. Berlin, Germany, 13-16 octubre, 1991. DGFm, 9 p.
- IMES, (1990). *Restauro edilizio e monumentale. Diagnosi e consolidamento*. Edizioni di arte e scienza. Roma, 158 pp.
- MAMILLAN, M. (1990). «Methodes d'évaluation des dégradations des monuments en pierres». *Analytical methodologies for the Investigation of Damaged Stones*. Pavia (Italy), 14-21 septiembre 1990.
- MARTIN, A. (1990). «Ensayos y experiencias de alteración en la conservación de obras de piedra de interés histórico artístico». *Fundación Ramón Areces*, 609 p.
- NORMAL-22/86. «Misura della velocità di propagazione del suono».
- RILEM RECOMMENDATIONS: NDT 1. (1972). (E). *Testing of concrete by the ultrasonic pulse method*.
- SUAREZ DEL RIO, L. M., y MONTOTO, M. (1990). «Ultrasonidos: aplicaciones para la observación, caracterización y auscultación tensional de materiales rocosos». *Curso sobre aplicación de las técnicas físicas de análisis al estudio y control del material*, tomo II, 49 p., Madrid, 1990.
- TOBIO, J. M. (1967). *Ensayos no destructivos. Métodos aplicables a la construcción*. IETCC. Madrid, 383 p.
- UNE 83-308-86: *Ensayos de hormigón. Determinación de la velocidad de propagación de los impulsos ultrasónicos*.
- VENIALE, F., y ZEZZA, U. (1986). «Quarring and properties of the Lago Maggiore granites». En: *Meeting Advanced Methods and Techniques for the Study of Stone Decay, Cleaning and Conservation*. Pavia, Italy, 17-18-19 septiembre 1986.
- ZEZZA, F. (1990). «Computerized analysis of stone decay in monuments». En: *Analytical Methodologies for the Investigation of Damaged Stones*. Pavia, Italy, 14-21 octubre 1990, 163-184 pp.
- ZEZZA, U. (1990). «Physical-mechanical properties of quarry and building stones». En: *Advanced Workshop Analytical Methodologies for the Investigation of Damaged Stones*. Pavia, Italy, 14-21 septiembre 1990, 21 pp.