

TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS APLICADAS A LA CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO HISTÓRICO

Modesto Montoto San Miguel
Dpto. de Geología, Grupo de Petrofísica
Universidad de Oviedo

1. Introducción

Una de las etapas implicadas en un Programa de "Conservación de Monumentos Históricos" se refiere a la caracterización del estado de deterioro de sus piedras. Esta caracterización conlleva, entre otros, una serie de estudios y análisis fundamentalmente encaminados al conocimiento de algunas de sus propiedades físicas (térmicas, mecánicas, elásticas) y, en algunos casos, también al análisis del estado tensional tanto de las piedras del edificio como del basamento rocoso donde éste se cimenta.

Los métodos convencionales utilizados en otros campos de la Ciencia para la determinación de muchos de los aspectos señalados suelen tener en común su carácter "destrutivo", es decir, no resultan inocuos para la roca, sino que lesionan su estructura íntima provocando cambios irreversibles (p. ej. ensayos térmicos) o llegando incluso a destruirla por completo (p. ej. ensayos mecánicos). Cuando estos métodos se aplican a rocas, utilizando muestras de cantera, este carácter destructivo no tiene especial relevancia, ya que normalmente se dispone del volumen suficiente de roca y las probetas de ensayo que se utilizan no tienen mayor interés que el de servir precisamente para la determinación de la propiedad buscada.

Pero en las aplicaciones relacionadas con las piedras que integran tanto la estructura como los elementos arquitectónicos y escultóricos de las obras histórico/artísticas, no son aceptables los ensayos destructivos. En ellas es imperativo la utilización, in-situ, de los llamados "procedimientos no destructivos", NDT.

En esencia, un procedimiento no destructivo se basa en el análisis del comportamiento de una determinada propiedad física en el seno, o en la superficie, de un material; por ejemplo, velocidad de transmisión de ultrasonidos, conductividad de una corriente eléctrica, etc. En el caso de nuestras aplicaciones a Patrimonio Histórico construido en piedra, el comportamiento de la propiedad física utilizada se intenta interpretar en función de alguna característica de la piedra: presencia de discontinuidades internas (fisuración, inicio de desplazación,...), incremento local de la porosidad, degradación en las propiedades elásticas de la roca (estado de alteración), etc.

Desde el punto de vista genérico, los aspectos más sobresalientes implicados en las técnicas no destructivas, son: a) tipos de señales, naturales y artificiales, a utilizar; b) aplicación de la técnica mediante contacto directo sobre la piedra o sin contacto con ella; c) procedimiento de trabajo (reflexión o impulso-eco, transmisión superficial o transmisión por toda la masa rocosa; d) método basado en señal única o múltiple cruzando desde todas las posiciones posibles la piedra problema (tomografía). La discusión sobre todos estos aspectos resulta clave para plantear un enfoque adecuado a cada situación y problema; obviamente, su descripción rebasa los objetivos de este breve trabajo.

En nuestra opinión, este tema de técnicas no destructivas aplicadas a la conservación de materiales pétreos de Patrimonio Histórico, debería enfocarse bajo un planteamiento petrofísico, es decir, basándose en las propiedades físicas de las piedras y en su interpretación a partir

de las características de sus componentes petrográficos: poros, fisuras, uniones intergranulares, anisotropías, minerales, composición química, etc. (Esbert y Montoto, 1991). Este planteamiento resulta óptimo no sólo para la interpretación de los datos físicos obtenidos en términos de estados de deterioro, sino también para la predicción futura de la evolución física de la piedra. Otra ventaja del planteamiento petrofísico es permitir el seguimiento "in-situ", a lo largo del tiempo, de la evolución de las propiedades físicas de las piedras monumentales en estudio ("monitorización").

Una de las dificultades, sin duda la más importante, que acarrean estos estudios se centra en la correcta interpretación, en términos de estado de deterioro, de los resultados proporcionados por las técnicas utilizadas. Esta dificultad se debe a que las rocas son materiales no homogéneos, polifásicos, con discontinuidades internas y anisotropías a escalas muy diferentes de observación; todos estos aspectos dificultan la aplicación de los principios básicos de la Física teórica, que parte de presupuestos basados en el comportamiento de materiales homogéneos, isotropos, sin discontinuidades ni límites.

De todo lo enunciado hasta ahora puede resumirse un esbozo metodológico (Montoto et al., 1991) sobre las etapas implicadas en un estudio, mediante NDT, aplicado a un problema concreto y específico de conservación de piedra:

- a) elección de la técnica no destructiva más adecuada incluyendo una rigurosa interpretación petrofísica de dicha elección;
- b) diseño instrumental específico para los trabajos "in-situ";
- c) simulación o modelización en laboratorio del problema alterológico y valoración interpretativa de la NDT elegida;
- d) análisis de variaciones en los datos proporcionados por la señales y su correlación con estados de deterioro;
- e) valoración, por un experto en "Conservación de piedra", de los resultados obtenidos;
- f) adquisición de datos en monumento;
- g) interpretación petrofísica, en términos alterológicos, de los datos de campo;
- h) integración de los datos obtenidos mediante NDT con los aportados por exper-

tos mediante métodos tradicionales. Finalmente se plantea un valoración global de todos los datos obtenidos y una interpretación alterológica de conjunto.

Entre las diversas técnicas no destructivas posibles, este trabajo se centra en las basadas tanto en la creación, inyección y transmisión de ultrasonidos por el seno de las piedras de los monumentos, como en aquellas otras "emisión acústica" o "actividad microsísmica" en las cuales los ultrasonidos se crean espontáneamente en el medio rocoso (sillar o basamento) bajo la acción de esfuerzos mecánicos o térmicos.

En general, y desde el punto de vista de "Conservación de piedra monumental", las posibilidades prácticas de estas técnicas ultrasónicas se centran en la detección de posibles anisotropías y fisuras internas en las piedras, puesta en evidencia de diferentes grados de alteración, valoración del comportamiento mecánico y estado tensional (tanto de la piedra, como de la estructura del edificio o del basamento rocoso en el que éste se asienta), etc. (Cardú et al., 1991; Chiesura et al., 1983; Montoto et al., 1991, 1994, 1995)

Resaltar, finalmente, que las técnicas no destructivas en absoluto pueden considerarse substitutorias de otras tradicionales que realizan los expertos en "Conservación de piedra"; por el contrario, son complementarias a sus imprescindibles estudios y pretenden aportar datos cuantitativos sobre el estado de la piedra y muy especialmente de zonas no visibles de ésta.

2. Ultrasonidos

Uno de los fenómenos físicos más utilizado en ensayos no destructivos (NDT) es, sin duda, la propagación de ondas elásticas, ultrasonidos; las técnicas basadas en este fenómeno se engloban bajo la denominación genérica de procedimientos ultrasónicos. En ellos la interpretación se realiza a partir del análisis de las variaciones que dichos ultrasonidos experimentan durante su tránsito por el seno del medio investigado.

Los procedimientos ultrasónicos son los más habituales en el mundo de las medidas no destructivas, tanto en la industria (valoración de

materias primas, inspección de piezas, control de calidad de sistemas y elementos, etc.) como en variadas disciplinas de la investigación (biología, medicina, comunicaciones, etc.). Están muy desarrollados en aplicaciones en metales, "composites", cerámica, etc., en los cuales la "conductividad ultrasónica" es, en general, muy buena y las distancias que deben recorrer las ondas muy cortas, del orden de mm a pocos cm. En las rocas monumentales también están siendo aplicados, pero con mayores dificultades, ya que en éstas, por el contrario, la "conductividad ultrasónica" es, en general, bajísima y las distancias que deben recorrer es de varios decímetros o incluso metros.

En los últimos 40 años el desarrollo de los procedimientos ultrasónicos no-destructivos ha sido espectacular, tanto en el diseño de nuevos métodos, como en la mejora de los ya existentes; han pasado a ser herramientas indispensables en el control de calidad de materiales industriales y en diversas ramas de la investigación científica.

En los materiales creados por el hombre, las condiciones de su fabricación implican una composición conocida y uniforme, espesores también conocidos, etc. y el investigar si existe una desviación respecto a las condiciones de fabricación suele ser el problema más habitual. Por tanto, suele plantearse una única incógnita que, en general, es fácilmente detectable seleccionando la técnica no-destructiva más adecuada.

Por el contrario, las rocas son materiales formados por la naturaleza, bajo complejos procesos petrogenéticos y tectónicos, por lo que en su constitución petrográfica actual intervienen numerosas variables; el resultado es un material no homogéneo (tanto textural como mineralógico), con numerosas discontinuidades internas y anisotropías a todas las escalas de observación. Esto les aleja notablemente de los medios continuos ideales en que se basan los principios de la física teórica sobre propagación e interpretación de ultrasonidos. Debe pues partirse de una consciente dificultad en la aplicación de tales principios teóricos de la física a las rocas.

En unos procedimientos ultrasónicos, denominados activos, los ultrasonidos se generan artificialmente, se inyectan en el medio rocoso,

se detectan y se registran después de viajar por él, finalmente se procesan y se determina el parámetro físico que servirá de base interpretativa; en general suele utilizarse el tiempo de tránsito de las ondas compresivas (también llamado "tiempo de vuelo"). En otros procedimientos, emisión acústica o actividad microsísmica, ya se ha expuesto que los ultrasonidos se generan en el seno del medio rocoso, por lo que en su estudio se consideran las etapas recién mencionadas, salvo la primera de generación e inyección.

A continuación se exponen los aspectos básicos de los ultrasonidos así como los componentes instrumentales para su generación, detección, registro y proceso. Estos aspectos básicos finalizan con unos comentarios sobre los factores extrínsecos (por ej. grado de humedad) e intrínsecos o petrográficos (por ej. porosidad y fisuración) que influyen en las condiciones de propagación de ultrasonidos en medios rocosos.

2a. Conceptos generales

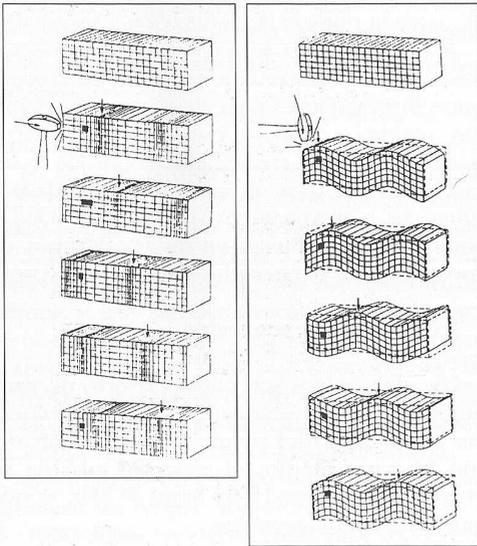
Los ultrasonidos son ondas elásticas de igual naturaleza que las sonoras, pero cuyas frecuencias están fuera del rango de percepción del oído humano medio; el espectro audible se extiende desde unos 15 Hz hasta 20 kHz, donde comienzan los ultrasonidos.

Las ondas ultrasónicas se propagan en medios donde existan fracciones de materia capaces de sustentar dicha propagación. Así, si una partícula del material es desplazada de su posición de equilibrio por la aplicación de una fuerza externa, este desplazamiento induce otros en partículas vecinas, dando lugar a una reacción en cadena que permite la propagación de la onda.

Si en vez de hablar de una partícula se refiere a todas las que están en un mismo plano, es decir, que son afectadas en el mismo instante por la fuerza externa, este plano transmitirá su movimiento al plano siguiente y éste a su vecino. Existirá un desfase temporal entre el inicio del movimiento para cada plano y esta diferencia cronológica entre partículas coplanares o en fase, provocará zonas en las cuales los elementos de materia se aproximen entre sí, zonas de compresión, y otras en las cuales las partículas

se alejarán, zonas de descompresión. En el instante siguiente las fuerzas elásticas harán que las partículas tiendan a recuperar su configuración inicial, invirtiéndose así las zonas de presión.

Este modelo, es decir, la alternancia de zonas de alta y baja presión viajando a través del material, representa el tipo de transmisión de una onda elástica longitudinal, **Fig. 1**.



Esquema de propagación de ondas longitudinales (P) y transversales (S) en el seno de un medio homogéneo, continuo, isótropo y sin límites

2b. Tipos de onda

Se debe distinguir, en primer lugar, entre ondas internas ("body waves"), es decir, aquellas que se propagan por el interior de un material y ondas de superficie, cuya propagación se realiza en las zonas superficiales del cuerpo, siendo su penetración no superior a una longitud de onda.

Las ondas elásticas del primer tipo son catalogadas de acuerdo con la forma y dirección del movimiento de las partículas afectadas:

Ondas longitudinales (P). En ellas la vibración de las partículas se realiza en la dirección

paralela al avance de la onda, Fig. 1. Se conocen además como ondas primarias (P), ya que son las que se reciben en primer lugar al presentar la mayor velocidad de propagación. En ocasiones, se las denomina ondas de compresión: su avance provoca zonas de compresión (concentración de partículas) y de descompresión. Como ya se ha comentado pueden propagarse en sólidos y fluidos.

Ondas transversales (S). En ellas la vibración de las partículas se hace en dirección perpendicular a la de propagación de la onda, Fig. 1; se dice que estas ondas están polarizadas según direcciones perpendiculares al avance. Entre otras denominaciones de este modo de onda se incluye la de ondas secundarias (S), por ser recibidas siempre después de las longitudinales, y la de ondas de cizalla por provocar esfuerzos de este tipo en los materiales que atraviesan. Estas ondas transversales sólo se propagan en sólidos. Los líquidos y gases tienen un módulo de elasticidad transversal igual a 0, es decir, no poseen fuerzas internas capaces de restablecer a su posición de equilibrio las partículas desplazadas.

Otras ondas que, se incluyen dentro del grupo de las superficiales, son las Rayleigh y las Lamb, las cuales poseen menor velocidad de propagación que las longitudinales y transversales.

2c. Parámetros ultrasónicos

Tanto para ondas P como S el movimiento vibratorio que realiza una partícula afectada por su propagación es un movimiento armónico simple; el desplazamiento producido sigue un movimiento sinusoidal cuya función básica se expresa como:

$$d = A \cdot \text{sen } 2\pi(x/\lambda - t/T) + \theta$$

donde **d** es el desplazamiento de la partícula, **A** es la amplitud de la onda, **x** es la posición de equilibrio de la partícula, medida a lo largo de una línea en la dirección de propagación, **λ** es la longitud de onda, **t** es el tiempo en el cual es considerado el desplazamiento, **T** es el periodo de vibración de la partícula y **θ** es un ángulo determinado por las condiciones iniciales.

En estos estudios se consideran unos pará-

metros fundamentales como Amplitud, A; Período de vibración, T; Longitud de onda, λ y Frecuencia, f, que caracterizan a la onda elástica. Otros parámetros son característicos del material y condicionan la propagación de la onda por su seno; los dos fundamentales son: Velocidad de propagación, C e Impedancia acústica, Z. Esta última se considera como una constante del material y puede definirse de forma práctica como la relación entre C y la densidad ρ del medio atravesado, $Z = C \cdot \rho$; es, en realidad, una resistencia que se opone a la vibración de las partículas del medio.

2d. Atenuación de ultrasonidos en rocas

Las rocas, como materiales naturales, presentan una enorme diversificación y se caracterizan por su ya citado carácter inhomogéneo, discontinuo y anisótropo, alejándose considerablemente de lo que podríamos denominar como sólidos ideales.

Podría decirse que una roca es la suma de varios medios: la constitución física de sus espacios vacíos y fases minerales dotadas de diferentes características elásticas. Por ello las diferencias mineralógicas, de orientación cristalográfica o de tamaño de grano, provocan comportamientos diversos ante la propagación de los ultrasonidos.

Todas estas variables provocan, sobre la propagación de la onda, efectos de amortiguación que se pueden englobar en el término atenuación el cual está directamente relacionado con dos características de la señal transmitida: frecuencia y longitud de onda.

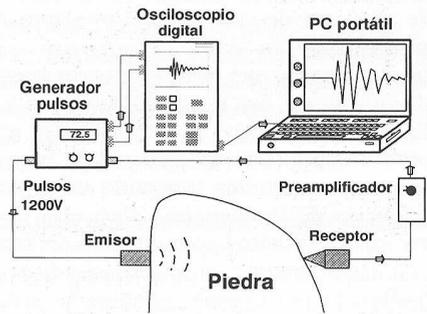
A medida que aumenta la frecuencia de la señal lo hace la atenuación debida al medio. La longitud de onda está relacionada con los tamaños de grano y de las heterogeneidades de la estructura; la onda "saltará" todas aquellas discontinuidades de menor tamaño que la longitud de onda, sin ser afectada por ellas. Para tamaños del orden de $1/1.000$ a $1/100$ de λ , el efecto dispersador del material puede ser despreciado; será importante para tamaños superiores a $1/10$ de λ .

Según lo expuesto, el efecto de la atenuación da lugar a una serie de problemas en la elección de las condiciones de ensayo. Así, si se

toma una frecuencia alta, la longitud de onda será pequeña y, por tanto, el poder de discriminación de la señal aumentará; pero con una alta frecuencia la atenuación será considerable y difícil la recepción de la señal, aún aumentando el voltaje de excitación del transductor emisor o la ganancia del equipo. Por ello, es necesario encontrar la frecuencia adecuada para cada caso, de forma que se minimice en lo posible la atenuación, pero sin mermar el poder de discriminación deseado.

2e. Instrumentación

Un equipo de ultrasonidos consta de los siguientes componentes (Fig. 2):



Esquema básico de un equipo de ultrasonidos, diseñado por su portabilidad, capacidad de análisis y autonomía, para realizar adquisición de datos en monumentos (Montoto et. al. 1994)

Excitador (oscilador o generador de impulsos), sistema de sincronismo, transductor emisor, transductor receptor, amplificador, sistema de filtrado y registro.

Conviene señalar, desde el punto de vista práctico, que, para mejorar el contacto entre transductores y muestra, suelen utilizarse diversos tipos de interfases, sólidas o fluidas, siendo las más comunes: grasa, vaselina, mezclas de glicerina y agua, miel, ciertos tipos de geles, plásticos, cauchos naturales y artificiales. La interfase deberá ser de fácil aplicación, de impedancia media entre el transductor y la muestra, adaptable perfectamente al material para minimizar en lo posible el efecto de la rugosidad y los parásitos acústicos superficiales.

Todo lo expuesto hasta aquí se ha referido exclusivamente al registro de la amplitud frente al tiempo, es decir, dentro del llamado "dominio del tiempo". Sin embargo, en el siglo pasado, J.B. Fourier demostró que cualquier onda existente puede ser obtenida por combinación de ondas sinusoidales más simples o, lo que es lo mismo, que toda onda compleja puede descomponerse en otras ondas sinusoidales de diferentes frecuencias y cuya combinación es única para cada onda. Esto permite otra forma de representación, el llamado "dominio de la frecuencia", en la cual el eje del tiempo es sustituido por el de frecuencia.

La unión de ambos ejes, tiempo y frecuencia, frente a la amplitud, permite una observación combinada de la señal; la información que aporta cada una de estas "vistas" es diferente y complementaria.

En el "dominio del tiempo" puede verse la señal compuesta, su longitud de onda y su amplitud; en el "dominio de la frecuencia" resaltan otros componentes de que consta la señal: frecuencias y amplitudes, formando así el llamado "espectro de frecuencias". Con ello podrá saberse cuáles de estos componentes se propagan con mayor energía (proporcional a la amplitud) pudiendo, por ejemplo, eliminar las señales no deseadas que aquí no estarán enmascaradas como ocurre en el "dominio del tiempo".

2f. Generación de ondas ultrasónicas y su inyección en la roca

En los ensayos no destructivos se utiliza normalmente la excitación del transductor emisor mediante impulsos, constituida por trenes de onda cortos, de escaso tiempo de duración y de amplitud no uniforme. El cristal emite durante un periodo de tiempo muy corto manteniéndose en reposo, silencio, durante un tiempo mucho mayor que el de duración del impulso.

Existe una amplia gama de equipos ultrasónicos diseñados específicamente para el método según el cual se opere, subdividiéndose, según el tipo de excitación, en resonancia e impulso ultrasónico. En el caso más frecuente, de excitación por impulsos ultrasónicos, se colocan dos transductores, uno emisor y otro receptor, aline-

ados sobre dos caras opuestas de la muestra (método de transparencia) o sobre la misma cara del objeto (método de superficie).

Las frecuencias de ensayo utilizadas para rocas suelen estar en el rango 30 kHz a 1 MHz y se suele medir el tiempo de tránsito de la onda.

2g. Propagación de ondas elásticas en rocas. Factores extrínsecos y petrográficos condicionantes.

La propagación de ondas elásticas por el seno de las rocas sufre la influencia directa de una serie de factores que deben ser controlados para su correcta interpretación petrofísica.

Dichos factores (Lama y Vutukuri, 1978) pueden dividirse en intrínsecos, es decir, debidos a las características propias del medio rocoso (minerología, textura, densidad, porosidad y anisotropías), y extrínsecos, ajenos a la naturaleza del material y provocados por la instrumentación utilizada o por las condiciones imperantes durante las mediciones (grado de humedad, temperatura, presión). Es evidente que el análisis de dichas influencias está fuera de los objetivos de este trabajo de tipo general, pero, no puede olvidarse que los resultados de las mediciones realizadas estarán influenciadas por dichos factores; es más, en algunos casos dicha influencia será el eje sobre el que descansará la razón de aplicación de esta técnica.

Sin embargo, cabe reseñar algunos comentarios de carácter muy general sobre algunos de los factores más significativos. Así, la velocidad de propagación de los ultrasonidos se ve modificada por el contenido en humedad de la roca; las ondas longitudinales se propagan con una velocidad 5 veces mayor en el agua que en el aire, por lo que una muestra saturada tendrá una V_p mayor que una seca de la misma porosidad; por el contrario, las ondas transversales sólo se propagan a través del armazón mineral de la roca y, por ello, su velocidad permanece casi constante, independientemente del grado de saturación.

En cuanto a la influencia de la petrografía de la roca sobre la propagación de las ondas elásticas, es el resultado de la interacción de toda una

serie de factores, tanto texturales como mineralógicos y fractográficos, que caracterizan cada tipo rocoso. De ello se deduce que no necesariamente la velocidad de una caliza deberá ser diferente a la de un granito, ni que dos granitos mineralógicamente iguales deban presentar las mismas velocidades de propagación.

Los factores que en este sentido ejercen la mayor influencia sobre el comportamiento de la roca son:

a) Densidad. Existe una relación prácticamente lineal entre la densidad y las velocidades de propagación de ondas. La variación de densidad puede deberse a causas mineralógicas y así, por ejemplo, al estudiar la variación de V_p con el contenido en hornblenda y cuarzo (densidades de 3.200 y 2.650 kg/m³ respectivamente) en una serie de rocas se observa cómo, al aumentar el porcentaje en hornblenda aumenta la V_p . Otra causa de esta variación de la densidad puede ser una disminución de la porosidad, con el consiguiente aumento de las velocidades.

b) Porosidad y fractografía. Entre porosidad y V_p suele existir una clara relación inversa, ya que la señal inyectada suele sufrir elevada atenuación en poros y fisuras en comparación con la que se transmite por el medio sólido. Como se ha apuntado ya, al comentar las anisotropías consideradas dentro de la textura, la anisotropía fisural también influye en la velocidad de propagación de ondas y se puede, con el mismo criterio, definir un coeficiente de anisotropía. La influencia de las fisuras sobre la velocidad de propagación es mayor que la que ejercen los poros. La velocidad se verá más afectada cuando se mida perpendicularmente a la anisotropía fisural que cuando se haga paralelamente a ella; además, esta influencia es más importante sobre V_p que sobre V_s .

c) Composición mineralógica. La velocidad de propagación de ondas no es igual para los distintos minerales y, por tanto, variará en las rocas según se combinen éstos. La V_p media para el cuarzo es de 5.225 m/s; en los feldespatos varía entre 5.500 y 6.500 m/s; 5.900 m/s en la moscovita y 5.500 m/s en la calcita. Respecto

a las anisotropías mineralógicas, la velocidad estará en función de la dirección de la medida respecto al bandeo composicional y las diferentes velocidades de los minerales atravesados. Los valores de velocidad son siempre mayores en la dirección paralela al bandeo que en la perpendicular a él. A partir del cociente entre las velocidades medidas paralela y perpendicularmente al bandeo puede establecerse un coeficiente de anisotropía.

2h. Módulos de elasticidad dinámicos

A partir de las velocidades de propagación de ondas longitudinales, V_p , y transversales, V_s , pueden obtenerse las denominadas constantes dinámicas de un material: módulo de Young (E) y relación de Poisson (ν). Estas constantes suministran información sobre su comportamiento deformacional, por lo que su evaluación constituye un método muy aconsejable para la caracterización "in situ" y no destructivo de las piedras de los monumentos.

Su evaluación se realiza a partir de los datos de velocidades de propagación (V_p y V_s) y densidad del medio (ρ_d) aplicando las fórmulas descritas en las recomendaciones de la ASTM (D. 2845, 1976) para este propósito.

$$E_{din} = \rho_d \cdot V_s^2 (3 V_p^2 - 4 V_s^2) / (V_p^2 - V_s^2)$$

$$\nu_{din} = (V_p^2 - 2 V_s^2) / 2 (V_p^2 + V_s^2)$$

3. Emisión acústica / actividad microsísmica

Entre las diversas técnicas acústicas existentes para la caracterización de materiales rocosos se incluyen las de tipo activo, descritas en el apartado anterior y otras pasivas como la emisión acústica. Las primeras de ellas utilizan dos transductores, uno, emisor, que genera una onda elástica, y otro, receptor, que la recibe modificada después de atravesar el material. Por el contrario, la técnica de emisión acústica, también denominada de actividad microsísmica, utiliza, en el caso más simple, un único transductor receptor que capta las ondas elásticas autogene-

radas por el material o estructura cuando se encuentra sometido a tensiones.

El origen de este tipo de ondas elásticas, generadas espontáneamente en el medio rocoso, parece ser consecuencia de la liberación repentina de energía de deformación elástica almacenada en la roca; se generan así ondas elásticas que, partiendo del punto de origen, viajan por el medio rocoso pudiendo ser captadas mediante transductores.

Así pues, la emisión acústica parece estar relacionada con procesos de deformación y rotura; en materiales geológicos, puede originarse, a escala microscópica, por dislocaciones y maclaciones, a escala macroscópica, por movimiento y roce de granos o iniciación y propagación de fisuras, y a escala megascópica, por la rotura de grandes volúmenes de roca o incluso por el movimiento relativo de unidades estructurales.

Por consiguiente, es de interés en todas las escalas en las que pueden plantearse problemas alterológicos en un Monumento Histórico; desde problemas de estabilidad mecánica en el basamento rocoso en el que se cimenta el Edificio, hasta la escala de la porosidad en la que se produce cristalización de sales y desarrollo local de tensiones mecánicas capaces de fisurar la piedra y provocar desplazamientos, Montoto et al. (1991, 1995), Grossi et al. (en prensa).

3a. Conceptos generales

Teniendo en cuenta que la emisión acústica son ondas elásticas, cualquier procedimiento de análisis de ondas puede, en principio, ser de interés para interpretar procesos de deformación y rotura que estén sucediendo en el seno del material pétreo.

Como medida de la emisión acústica suele utilizarse la "velocidad de emisión acústica" (AE rate o noise rate), expresada en "sucesos" o "cuentas" (counts) por unidad de tiempo, siendo un suceso cada uno de los cambios físicos producidos en el material y que es capaz de generar emisión acústica (es decir, un tren de ondas). Cada suceso puede estar formado por un número variable de "cuentas", definiéndose una "cuenta" como cada uno de los máximos del tren de ondas, por encima del umbral de ruido

de fondo del registro originado en cada suceso.

El espectro de frecuencias de una señal de emisión acústica depende de las características de la fuente, de la distancia entre ésta y el transductor y de las características del material por el que se transmite. Estas dos últimas producen un cambio de las características de la señal original, modificando su amplitud y frecuencia. Esta atenuación aumenta, en general, con la frecuencia, por lo que sólo los componentes con bajas frecuencias pueden transmitirse hasta distancias importantes. Normalmente, en los estudios del basamento rocoso el rango de frecuencias de trabajo es bajo (de algunos Hz a pocos kHz), mientras que en los relacionados con problemas a escala de sillar o inferior o en ensayos de laboratorio es superior, de hasta varios MHz.

3b. Instrumentación

El sistema básico de captación y registro de la emisión acústica es relativamente simple en su concepción. Consta de un sistema de captación (o transductor), un sistema de amplificación y un sistema monitor para registrar las señales detectadas.

La señal de salida del transductor captador (de unos pocos microvoltios) necesita ser amplificada mediante un preamplificador situado próximo al transductor, para evitar la introducción de ruido y distorsión en la señal captada.

Generalmente se incluye un sistema de filtros para seleccionar la banda de frecuencias útiles a nuestros propósitos y eliminar el "ruido cultural" (ondas producidas en el entorno por actividades humanas).

Posteriormente las señales se vuelven a amplificar y se registran. Estos procedimientos consisten en auténticas estaciones de recogida, transmisión y proceso de señales a lo largo de las 24 horas del día, involucrándose emisoras de FM que transmiten la información desde el terreno al propio laboratorio.

Hay que resaltar la importancia de la instalación de los transductores, ya que es condicionante para la correcta captación de las señales, y es una exigencia ineludible el conseguir un perfecto contacto entre los transductores y la roca. Los sistemas de captación y registro pue-

den ser monocanales o multicanales, según que reciban información de uno o varios transductores; una de las ventajas de los multicanales es la posibilidad de localizar las coordenadas espaciales de las fuentes de emisión acústica. Esto es importante, ya que un suceso de una magnitud determinada puede corresponder tanto a una pequeña deformación, cuya fuente está situada próxima al transductor, como a una muy superior pero más alejada.

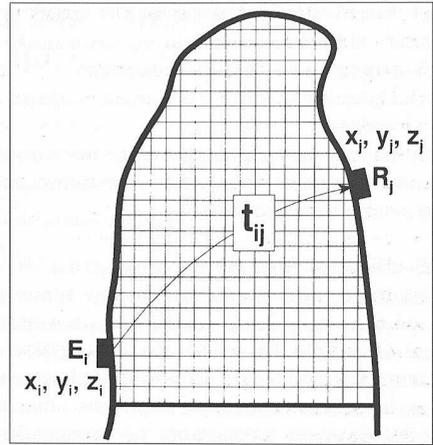
Los datos obtenidos pueden representarse gráficamente, suministrando información espacial respecto a las zonas potencialmente inestables y permitiendo "visualizar" la evolución en el tiempo de la deformación en estudio.

4. Tomografía.

Una de las aplicaciones más prometedoras de las técnicas no destructivas en el campo de las rocas monumentales es, sin duda, la tomografía o intento de "visionar" el estado de deterioro interno del medio rocoso. Concretamente, la tomografía persigue la obtención no destructiva de "imágenes físicas" (conjunto de valores numéricos de una determinada propiedad física) del interior de un cuerpo mediante el análisis de señales (ultrasonidos, radar, rayos-X, ...) que han sido enviadas a su través.

En lo que se refiere a la tomografía ultrasónica se basa en los tiempos de tránsito (t_p) de ondas longitudinales enviadas desde posiciones E/R (emisor/receptor) conocidas, en la superficie de la piedra, a través de recorridos internos desconocidos **Fig. 3**.

El conocimiento del recorrido seguido por la señal es, en general, el aspecto más crítico de la tomografía; así, en una masa rocosa no homogénea (alterada) la onda se transmite sufriendo constantes refracciones debido a que va atravesando zonas físicamente diferentes. El recorrido se deduce a partir de un proceso informático mediante algoritmos adecuados. Los algoritmos sencillos realizan una reconstrucción rectilínea del recorrido de la señal, proporcionando resultados que suelen ser poco realistas. Por el contrario, otros algoritmos, mucho más complejos, realizan una reconstrucción basada en recorridos



En tomografía ultrasónica se asume que el "tiempo de vuelo" o valor ($t_{p,ij}$) medido para cada pareja E_i-R_j integra el conjunto de valores particulares de (t_p) a lo largo de la zona de la roca por la que ha viajado la señal. Los recorridos internos de ésta son desconocidos y se deducen mediante proceso informático de complejos algoritmos; a su vez, éstos asignan valores de velocidades de propagación al interior de la piedra (Montoto et al. 1994)

curvilíneos; son sin duda, mucho más realistas.

En síntesis la construcción de un tomograma ultrasónico implica las siguientes etapas:

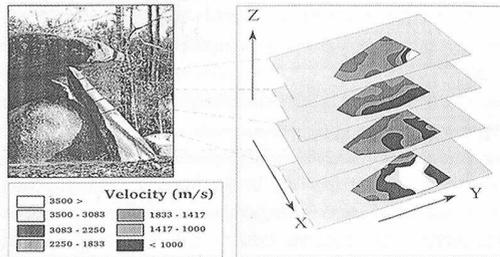
- a)** Transmisión a través del cuerpo rocoso de una señal ultrasónica desde n posiciones E_i-R_j (emisor/receptor) de coordenadas conocidas.
- b)** Medición de los "tiempos de vuelo" ($t_{p,ij}$) para cada una de las n parejas E_i-R_j .
- c)** Asumir que el valor ($t_{p,ij}$) medido para cada pareja E_i-R_j integra el conjunto de valores particulares de (t_p) a lo largo de la zona de la roca por la que ha viajado la señal.
- d)** Aplicar algoritmos de reconstrucción tomográfica. Se alimentan con los siguientes datos para cada pareja E_i-R_j : coordenadas (x_i, y_i, z_i) , (x_j, y_j, z_j) y valor $t_{p,ij}$.
- e)** "Subdivisión" del cuerpo rocoso en una matriz (2D ó 3D) de celdas regulares (pixels o boxels).
- f)** Deducción de los recorridos seguidos por las señales.

g) Asignación de “tiempos de vuelo” para cada celda. Su conversión en velocidades de propagación (u otros parámetros).

h) Elaboración de tomogramas o mapas de velocidades.

i) Interpretación petrofísica de los tomogramas, en término de estados de deterioro de la piedra tomografiada.

El resultado final de un tomograma es, por consiguiente, una matriz de valores numéricos que cubre toda la masa rocosa. Su presentación gráfica se realiza en mapas en falso color que describen los diferentes rangos de valores de la propiedad física utilizada. Por todo ello debe resaltarse que un tomograma no constituye un mapa geológico de la masa rocosa estudiada, sino una representación 2D o 3D de las variaciones de la propiedad petrofísica utilizada. Más detalles sobre esta novedosa aplicación puede



Tomogramas horizontales realizados en el Megalito de Axeitos, La Coruña. (Montoto et al. 1994). Cada tomograma constituye un mapa de velocidades de propagación de las ondas principales por el seno de la piedra

encontrarse en Montoto et al (1994) relativo a un ejemplo concreto, la tomografía realizada en el Megalito de Axeitos (La Coruña), **Fig. 4.**

BIBLIOGRAFÍA

ASTM (D. 2845, 1976)

Cardu, M., M. Gomez y R. Mancini. "Nondestructive Testing for Soundness of Stone Architectural Pieces". **Science, Technology and European Cultural Heritage**. Commission of the European Communities. ISBN 0-7506-0237-6 pp. 583-586. (1991).

Chiesura, G., S. Massa y M. Tabasso. "L'auscultazione dinamica con ultrasuoni nelle diagnostica di opere d'arte: un esempio di applicazione allo studio della Colonna Traiana a Roma". **1ª Conferenza Internazionale sulle Prove non Distruttive nella Conservazione delle Opere d'Arte**, Roma, pp 1/9.1 - 1/9.24. (1983).

Esbert, R. M. y M. Montoto. "La petrofísica y su aplicación a los estudios de las patologías en piedra". **Patología: Conservación y Restauración de edificios**. Tomo I, pp. 211-230, Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid. España. ISBN: 84-7740-040-7. (1991).

Grossi, C.M., R.M. Esbert, M. Montoto, L.M. Suárez del Río and M. Laurenzi-Tabasso. "Acoustic emission monitoring to study the crystallization of sodium sulphate in porous carbonate stones". **Studies in Conservation**. (en prensa).

Lama, R. D. y V. S. Vutukuri. **Handbook on Mechanical Properties of Rocks. Testing Techniques and**

Results. Vol. II. Trans Tech Publications. (1978).

Montoto, M., L. Calleja, B. Pérez García, L.M. Suárez del Río, V.G. Ruiz de Argandoña, R.M. Esbert y C.M. Grossi. "Non-destructive ultrasonic procedure to evaluate in situ the relative deterioration of Monumental stones: Preliminary results". **Science, Technology and European Cultural Heritage**. Commission of the European Communities. ISBN 0-7506-0237-6 pp. 545-548. (1991).

Montoto, M., R.M. Esbert, L.M. Suárez del Río, V.G. Ruiz de Argandoña y C.M. Grossi. "Acoustic Emission/Microseismic Activity monitoring of salt crystallization for stone conservation". **Journal of Acoustic Emission**, Vol 10, nº 1 y 2, pp. 35-41. (1991).

Montoto, M., R.M. Esbert, L.M. Suárez del Río, V.G. Ruiz de Argandoña, L. Calleja y C.M. Grossi. "Acoustic emission in stone conservation". **Acoustic Emission/Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials. Proc. Fifth Conf.**, Trans Tech Publications, Clausthal. H. Reginald Hardy, Jr (Ed.), pp.665-684. ISBN 0-87849-097-3. (1995).

Montoto, M., L. Valdeón, P. Côtte, L. Calleja, N. Corral, T. López, B. Sánchez y R.M. Esbert. "Non-destructive characterization of the state of deterioration of Megaliths by ultrasonic tomography: a petrophysical interpretation". **The Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin**, pp 3-9. (1994).