

# Análisis Experimental Mediante Ultrasonidos para la Determinación de la Resistencia de la Piedra

Javier De la Puente Crespo<sup>a</sup> y Fco. Javier Rodríguez Rodríguez<sup>a</sup>

<sup>a</sup>G.O.C. S.A. C/ Dr. Canoa nº 5 Bajo 36206 VIGO (España), [estudios@gocsa.es](mailto:estudios@gocsa.es)

**RESUMEN:** El empleo de técnicas de ensayo no destructivo basadas en la propagación del impulso ultrasónico se encuentra ampliamente difundida en la evaluación de elementos estructurales realizados en hormigón. Sin embargo, en los últimos años se está despertando, tanto en la sociedad como en los arquitectos e ingenieros, una fuerte corriente basada en la rehabilitación y el conservacionismo de los edificios ejecutados con otros materiales estructurales, especialmente de piedra. Es por ello, que surge la necesidad de aplicar técnicas no destructivas de propagación del impulso ultrasónico como herramienta para estimar la capacidad resistente de la piedra.

En el presente documento se recogen las principales conclusiones de un amplio estudio realizado sobre la evaluación de las características resistentes mediante la utilización de técnicas ultrasónicas realizado a más de 115 muestras de piedra de tipo granítico de tres variedades: Albero, Rosa Porriño y Gris Mondariz.

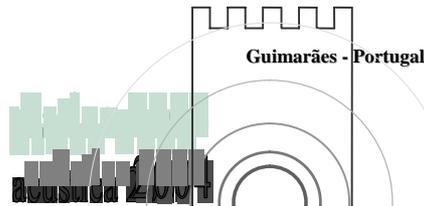
**ABSTRACT:** Use of non-destructive test techniques based on the spread of the ultrasonic impulse are found widely spread in the structural elements evaluation made in concrete. However, the last few years has been an awakening in the society, as well as in the architects and engineers. A great current based on the rehabilitation and the heritage of the buildings executed with other structural materials, especially in stone. It is because of this, that emerges the need of applying non-destructive test techniques of the ultrasonic impulse as a tool to estimate stone resistant capacity.

In this paper are collected the principal conclusions of a wide study accomplished on the evaluation of the resistant characteristics through the ultrasonic techniques utilization accomplished to more than 115 granitic type stone samples of three varieties: Albero, Rose Porriño and Gray Mondariz

## 1. INTRODUCCION

Entre los materiales utilizados históricamente en la construcción de edificios sobresale, de manera destacada, la piedra, la cual ha sido utilizada masivamente como elemento de carga en muros, arcos y bóvedas. En la zona norte de la Península, y especialmente en Galicia, se ha empleado la piedra de origen granítico de la que nuestra comunidad es uno de los primeros productores.

Una de las cuestiones cruciales en la rehabilitación y reforma de edificios radica en la determinación de la capacidad resistente de la piedra, así como de su estado de conservación ya que deberá formar parte de una estructura con una nueva distribución de cargas, con la incorporación de nuevos materiales. Todo ello requerirá del proyectista un profundo conocimiento de las prestaciones reales del material para que pueda ser empleado con las suficientes garantías de seguridad.



De acuerdo con los principios básicos de la física teórica, cualquier esfuerzo mecánico súbito aplicado a un sólido producirá una deformación que será transmitida en su seno dependiendo de la naturaleza del esfuerzo aplicado y de las características intrínsecas del sólido. Si el cuerpo sobre el que se aplica es continuo, homogéneo e isótropo el tránsito de la deformación será perfectamente elástico y la vibración de sus partículas responde a movimientos oscilatorios periódicos.

En el caso de los materiales rocosos, la deformación transmitida discrepará en su carácter elástico en la medida que la roca se aleje del comportamiento ideal por efecto de sus características petrofísicas: carácter elástico / inelástico, presencia de discontinuidades, grado de anisotropía, etc.

Existen varias técnicas de ensayo asociadas a la transmisión de ondas en medio rocoso como son la emisión acústica, ultrasonidos y actividad microsísmica. En el presente trabajo se empleará la técnica ultrasónica por ser la más comúnmente aplicada en edificación y de manera especial en la auscultación de edificios, ya que las pulsaciones ultrasónicas<sup>1</sup> proporcionan un flanco delantero nítido y bien definido y generan la máxima energía en la dirección de propagación frente a las sónicas<sup>2</sup>.

## 2. ENSAYO DE PROPAGACIÓN DEL IMPULSO ULTRASÓNICO

### 2.1. Fundamento del Método

El método de la velocidad de propagación de los ultrasonidos consiste, básicamente, en la medición del tiempo que emplea un impulso de este tipo en recorrer la distancia comprendida entre un transductor emisor y un transductor receptor, acoplados al material que se está ensayando.

Las características del material, se determinan teniendo en cuenta dos variables esenciales:

- a) El tiempo de recorrido.
- b) La potencia del impulso recibido, considerando la pérdida de potencia con respecto a la del impulso emitido.

En la aplicación de esta técnica, un impulso de vibraciones ultrasónicas longitudinales es producido por un transductor electro-acústico, que ha sido puesto en contacto con la superficie de la piedra que se ensaya. Después de recorrer a través de la masa del material una distancia conocida, "L", el impulso es convertido en una señal eléctrica por medio de un segundo transductor, que también está en contacto con la superficie del hormigón ensayado. Por medio de un circuito electrónico, se determina el tiempo de tránsito "t", que ha necesitado el impulso para recorrer la distancia "L". La velocidad de los ultrasonidos, viene entonces, dada por la relación entre la distancia y el tiempo necesario para recorrerla.

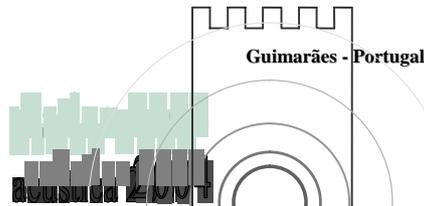
En el caso que nos ocupa, las frecuencias utilizadas comienzan en las proximidades de la zona audible y se extienden hasta una frecuencia de 250 kHz, siendo la de 50 kHz la más apropiada para la comprobación en materiales rocosos.

Esto es debido, como ya se ha mencionado, a que para poder realizar una medición exacta del tiempo de recorrido se necesita un flanco de impulso lo más vertical posible, es decir,

---

<sup>1</sup> De mayor frecuencia, por encima de los 20 kHz.

<sup>2</sup> De menor frecuencia, entre 20 Hz y 20 kHz



frecuencias elevadas. Como por otra parte, únicamente se consiguen grandes penetraciones en materiales heterogéneos con frecuencias bajas (poca amortiguación de la señal), ha de buscarse un compromiso, que nos lleva a utilizar frecuencias de alrededor de 50 kHz.

Además, como son las propiedades elásticas del material las que afectan a la velocidad del impulso ultrasónico, es necesario considerar en detalle las relaciones entre el módulo de elasticidad dinámico y la resistencia a compresión, cuando interpretan los resultados de este ensayo.

Existen dos tipos de ondas elásticas: aquellas que se propagan por el interior del material o internas y las de superficie, denominadas ondas de Rayleigh, que no penetran en el material más allá de su longitud de onda. Las comúnmente empleadas son las internas que, en función de la forma y dirección del movimiento de las partículas afectadas, se clasifican en :

- Ondas longitudinales: en las cuales la vibración de las partículas se realiza en dirección paralela al avance de la onda y se denominan “ondas primarias” P, por ser las que presentan mayor velocidad de propagación.
- Ondas transversales: en ellas la vibración de las partículas se realiza en dirección perpendicular a la de propagación de la onda. Se denominan “ondas secundarias”, “S”, por recibirse más tarde que las longitudinales, u “ondas de cizalla” por provocar este tipo de esfuerzos en el material.

Para un medio infinito, homogéneo, isótropo y elástico, la velocidad de la onda longitudinal viene dada por la expresión:

$$v = \sqrt{\frac{K \cdot Ed}{\rho}} \quad (1)$$

donde

$$K = \frac{(1 - \nu)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (2)$$

siendo

$\nu$ : Velocidad de la onda longitudinal.

Y: Coeficiente de Poisson.

Ed: Módulo de elasticidad dinámico del hormigón.

$\rho$ : Peso específico del medio atravesado.

Por tanto, la estimación de la resistencia a compresión de un material utilizando la técnica de la velocidad de los ultrasonidos, está basada en la relación existente entre la velocidad del impulso longitudinal y el módulo de elasticidad dinámico del hormigón, que a su vez está relacionado con su resistencia a compresión.

## 2.2. Campo de Aplicación

Para el estudio de las rocas, el parámetro que se utiliza es la velocidad de propagación de las ondas longitudinales, que presenta valores muy variables en función de los tipos litológicos. En la tabla siguiente se recogen los valores de propagación para distintos tipo de rocas:

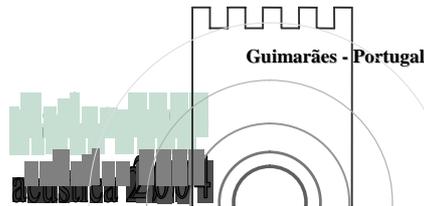


Tabla 1 - Velocidad de propagación de ultrasonidos en distintos tipos de rocas

Tipo de roca	Velocidad de propagación (m/s)
Granito	3000-5000
Basalto	4500-6500
Gabro	4500-6500
Arenisca	1400-4000
Caliza	2500-6000
Mármol	3500-6000
Cuarcita	5000-6500
Pizarra	3500-5500

La normativa nacional e internacional existente para la aplicación de los ultrasonidos a la determinación de las características mecánicas de los materiales de construcción se refieren al hormigón. Sin embargo, por las similitudes entre las características mecánicas entre el hormigón y la roca, pueden aplicarse con fundamento los criterios expresados en la normativa existente para el caso de las muestras de granito.

La norma española UNE 83-308-86 "Determinación de la velocidad de propagación de los impulsos ultrasónicos", establece como principales campos de aplicación del método de los ultrasonidos, los siguientes:

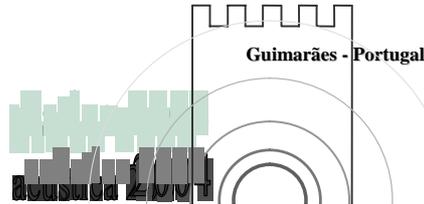
- a) Estudio de la uniformidad del material, delimitando zonas con calidades diferentes.
- b) Estimación de los cambios cualitativos en las propiedades del hormigón, a lo largo del tiempo.
- c) Determinación del módulo de elasticidad dinámico<sup>3</sup> y del coeficiente de Poisson del material.
- d) Detección de defectos, tales como coqueras, fisuras, grietas, etc.
- e) Estimación de la resistencia. Se trata de una estimación orientativa, que por sí sola no es recomendable, siendo necesario establecer una correlación fiable mediante la extracción de una serie de probetas testigo.

### 2.3. Instrumental de Ensayo

La emisión ultrasónica es producida por un transductor (emisor), que lleva alojado en su interior un cristal piezoeléctrico. Una carga eléctrica aplicada sobre las caras polarizadas de este tipo de cristales produce un desplazamiento mecánico que origina un impulso ultrasónico.

Un transductor similar (receptor), situado a una distancia conocida del emisor, recibe la "señal" ultrasónica y convierte a su vez la energía mecánica en energía eléctrica de la misma frecuencia. La medida del tiempo de recorrido entre transductores está basada en la detección de las ondas de compresión en el receptor.

<sup>3</sup> Para el análisis en hormigón, los procedimientos para deducir el módulo de elasticidad dinámico en función de la velocidad ultrasónica se recogen la norma británica BS 1881 y RILEM Recommendation NDT .



Ambos transductores han de estar perfectamente acoplados a la superficie del hormigón, de modo que se cree una verdadera barrera acústica. Dependiendo de la textura de la superficie del material ensayado, será necesario en algunos casos alisar previamente en la zona de ensayo, y utilizar un material tipo vaselina, grasa consistente o jabón líquido, como acoplante. El equipo *Pundit* utilizado habitualmente para la medición de la velocidad del impulso ultrasónico, es capaz de computar el tiempo de tránsito con una precisión de,  $\pm 1\%$ . La distancia entre palpadores (transductores), debe ser medida también con precisión de  $\pm 1\%$ . Esto puede acarrear alguna dificultad con longitudes de trayectoria superiores a 500 mm, pero no para distancias más cortas. En base a estos niveles de precisión en la medida del tiempo de recorrido y la distancia entre palpadores, los fabricantes asignan una precisión de  $\pm 2\%$  en la medición de la velocidad del tránsito.

### 3. PLAN EXPERIMENTAL

La campaña de ensayos se ha realizado sobre 115 muestras de tres tipos de granito de 50 x 40 cm y 20 cm de espesor, los cuales resultan representativos de tres familias de piedra utilizadas ampliamente en la construcción:

- 33 piezas de granito de tipo Albero, numerada de la A-01 a A-33
- 40 piezas de granito tipo Rosa Porriño, numeradas de R-01 a R-40
- 42 piezas de granito tipo Gris Mondariz, numeradas de G-01 a G-42

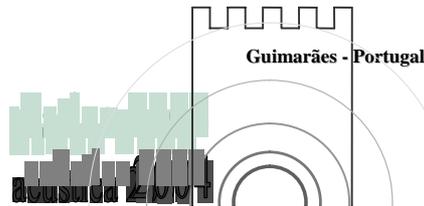
Las medidas han sido realizadas por un equipo de ultrasonidos marca Procer, modelo Tico con número de serie 10129, propiedad de G.O.C. S.A. Sobre las muestras y los palpadores se ha aplicado vaselina para mejorar el contacto. Para la "puesta a cero" el equipo incluye una barra cilíndrica de características conocidas, como pieza de tarado. El equipo ha sido tarado antes, durante y al final de cada período de medición, según se menciona en las principales normativas y recomendaciones de uso de esta técnica.



Figura 1: Ensayo transversal en muestra de granito Rosa Porriño



Figura 2: Ensayo longitudinal en muestra de granito Albero



Respecto al posicionado de los transductores en el elemento de piedra ensayado, se ha utilizado la técnica de transmisión directa, según la cual se transmite el impulso ultrasónico a través de la piedra con una mayor energía -para una determinada frecuencia- y por ello es la más precisa en la medición del tiempo de tránsito. En este tipo de transmisión, la longitud de recorrido está bien definida y puede ser medida con la precisión requerida. Se trata por ello del tipo de transmisión que, en opinión de los investigadores de esta técnica, debe de utilizarse cuando se pretenda estimar la resistencia a compresión del hormigón.

#### 4. RESULTADOS OBTENIDOS

Con los resultados obtenidos se ha realizado un tratamiento estadístico con objeto de rechazar los valores considerados aberrantes; así cada valor es sometido a un análisis con ayuda de la t de Student-Fischer para conocer si éste debe ser eliminado para el grado de probabilidad escogido, en este caso 0,05. Una vez obtenidos los valores considerados como válidos, se analizan las respuestas obtenidas para determinar las poblaciones de resultados y observar su dispersión.

Con el fin de dotar a los valores de un estimador de la resistencia a compresión, se han realizado una serie de ensayos de resistencia a compresión de muestras obtenidas de piezas en las que previamente se había desarrollado el ensayo de propagación de ultrasonidos.

Asimismo, se ha llevado a cabo, sobre todas las piezas, un estudio de determinación del índice de rebote mediante esclerómetro del tipo Schmidt. Este ensayo permite otorgar valores estimativos de dureza superficial a las muestras ensayadas.

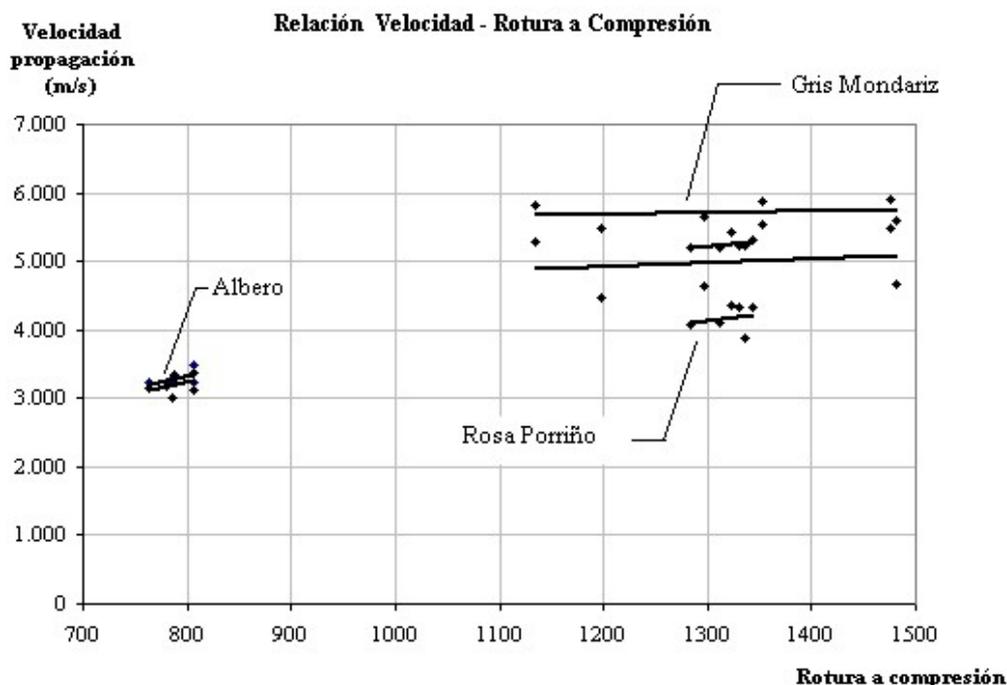


Figura 3: Gráficas de resistencia en función de la velocidad de propagación de ultrasonidos

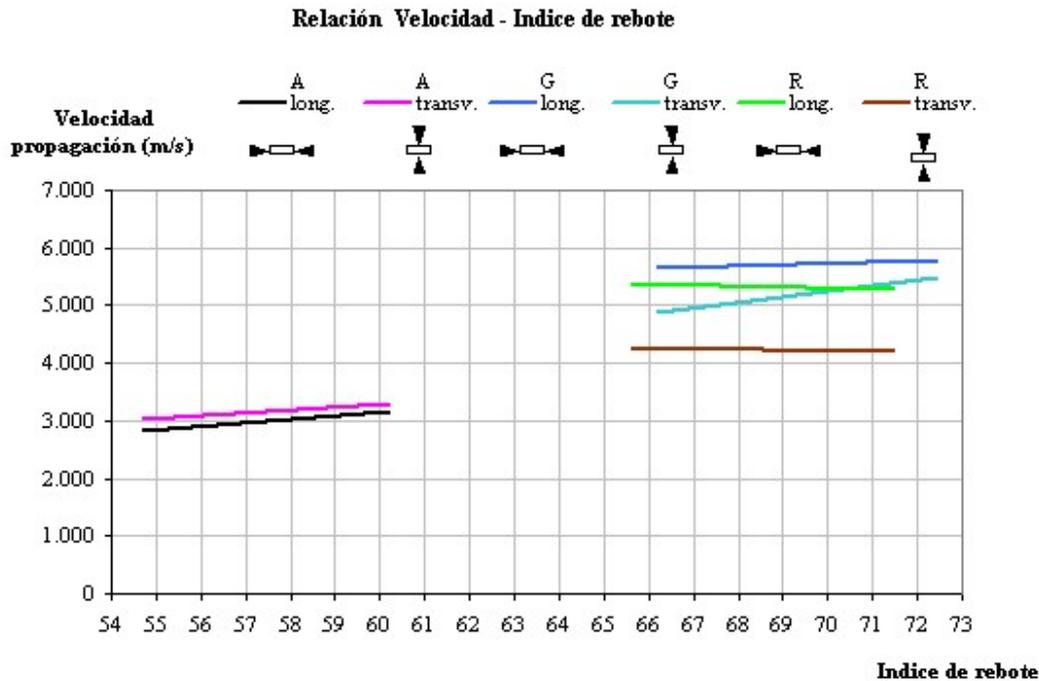
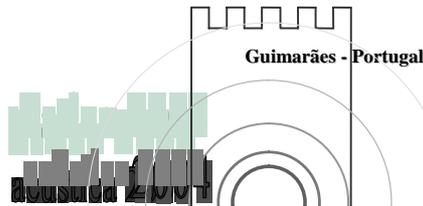


Figura 4: Gráficas de índice de rebote en función de la velocidad de ultrasonidos

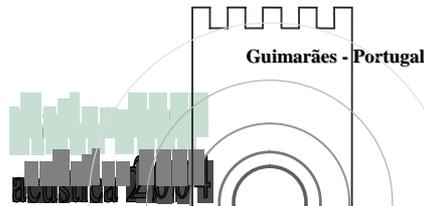
A la hora de la interpretación de resultados, ha de tenerse en cuenta que la relación entre la velocidad de pulsación y el módulo de elasticidad dinámico de un medio elástico no es lineal, sino cuadrática, y resulta, asimismo, cuadrática la relación entre el módulo de deformación y la resistencia a compresión.

El problema estriba en que la piedra no constituye un medio homogéneo y, además su módulo de elasticidad dinámico y su módulo de deformación estático no están relacionados por una función de validez universal. Por otra parte, los instrumentos de medida no determinan directamente la velocidad de pulsación, sino el tiempo de paso entre el emisor y el receptor, y, por tanto la distancia entre ambos, en línea recta, puede no coincidir con la trayectoria real de la onda, especialmente si ésta se ve obligada a contornear microfisuras, poros o coqueas internas en su recorrido.

## 5. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos en los trabajos realizados, correspondientes al plan experimental, pueden extraerse las siguientes conclusiones a modo de reflexión:

- Los ensayos realizados con ayuda del equipo de ultrasonidos han permitido diferenciar, de manera clara, las distintas resistencias relativas de las diversas muestras ensayadas.



- La presencia de lesiones o alteraciones que afectan a la estructura cristalina del material pétreo, así como la existencia de fisuras significativas, son detectadas con el ensayo ultrasónico, al obtenerse tiempos de transmisión anormalmente altos.
- Los resultados obtenidos en los ensayos ultrasónicos en dirección longitudinal y transversal a las muestras indican que existen familias de resultados coherentes entre sí, aunque con una diferencia porcentual casi constante entre ambos. Este hecho puede ser debido a la diferencia de dimensión para el recorrido de las ondas entre los ensayos longitudinal (50 cm) y transversal (20 cm).
- La combinación de la técnica del impulso ultrasónico con el índice de rebote mediante esclerómetro arroja unos resultados satisfactorios; permitiendo estas dos técnicas de ensayo no destructivo, aportar una característica cualitativa de la resistencia de la piedra y su relación con la dureza superficial y la velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas
- La técnica del ensayo ultrasónico empleada en muestras de piedra granítica resulta adecuada para el conocimiento del parámetro mecánico de resistencia. Para la realización de análisis cualitativos resulta necesario combinar estos ensayos con otras técnicas, preferentemente rotura a compresión de probetas testigo para obtener correlaciones fiables en la determinación numérica de su resistencia..

## RECONOCIMIENTOS

La presente comunicación deriva del proyecto de investigación que desarrolla el Área de Estudios de G.O.C. en colaboración con el grupo de trabajo que dirige el Prof. Dr. José Antonio González Taboada de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad de Vigo. Este programa ha sido subvencionado por la Consellería de Innovación de la Xunta de Galicia, dentro del Programa de tecnologías de la construcción y conservación del patrimonio, código PGIDIT03CCP01E.

## REFERENCIAS

- [1] J. Fernández Gómez et al., *Evaluación de la capacidad resistente de estructuras de hormigón*, Intemac S.A., año 2001
- [2] Rosa María Esbert et al., *Manual de diagnosis y tratamiento de materiales pétreos y cerámicos*, Col·legi d' Aparelladors i Arquitectes Tècnics de Barcelona, Barcelona 1997
- [3] *Norma UNE 83-308-86 Ensayos de hormigón - Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasonidos.*
- [4] Giuseppe Lenzi y Stefano Limonta, *SQS system – stone quality and sound* , Litos, Enero 1999