

# Master Ingeniero de Estructuras Universidad de Granada



## **EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA Y CALIDAD EN ESTRUCTURAS**

### **PARTE 1**

PROFESOR GUILLERMO RUS CALRBORG

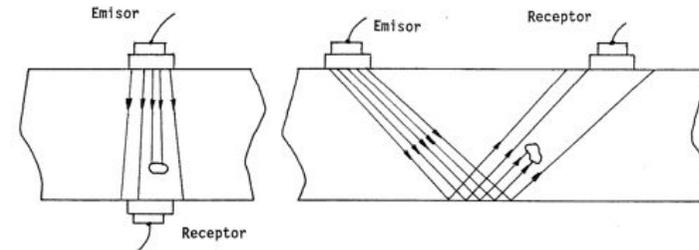
ALUMNO JOAQUÍN HIDALGO GARCÍA

ABRIL 2010

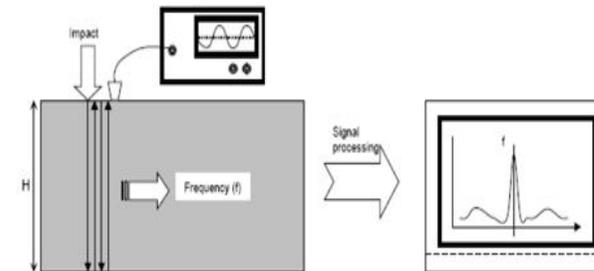
# Técnicas Ultrasonónicas

- Según el sistema de emisión y recepción de las ondas, las técnicas de ultrasonidos pueden clasificarse en tres grupos:

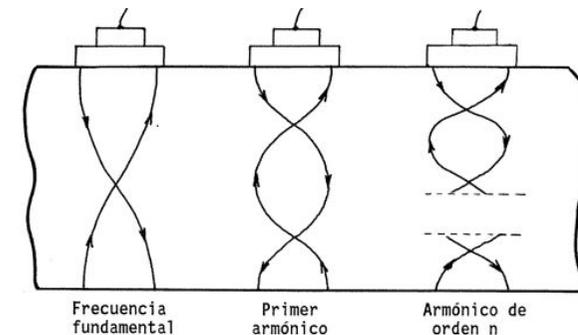
- Método de Transmisión.
- Método de Impulso-eco.
- Método de Resonancia.



Método de Transmisión



Método de Impulso-eco



Método de Resonancia

# Técnicas Ultrasonicas

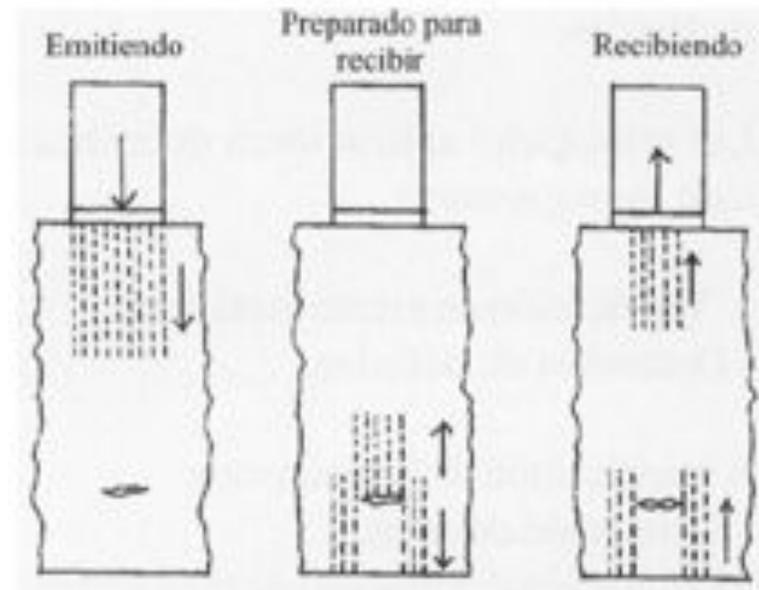
## Método de Transmisión

- Se trabaja con un emisor y un receptor.
- Frecuencias bajas para conseguir:
  - una **atenuación lo suficientemente pequeña**
  - y por lo tanto, un **mayor alcance** de los impulsos ultrasónicos en el material.
- La magnitud de un defecto puede determinarse a través de un aumento del tiempo que necesita el sonido para rodear al obstáculo si se compara este tiempo con el tiempo que se obtiene en otra zona homogénea del mismo medio.
- Estos métodos han sido **los mas utilizados en el estudio de materiales pétreos ornamentales.**

# Técnicas Ultrasonóicas

## Método de Impulso-eco

- Un solo transductor sirve de emisor y receptor.
- Si la roca presenta un defecto (fisura), en esta zona **se produce una reflexión del tren de ondas ultrasónicas**, que es posible registrar (calculándose el grosor y profundidad a que aparece).



# Técnicas Ultrasonías

## Método de Resonancia

- 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.
- La probeta se excita en su frecuencia propia por un emisor electrodinámico de oscilaciones (se pone en "resonancia").
- Se pueden determinar propiedades elásticas del material (mód. de elasticidad, mód. de cizallamiento y coeficiente de Poisson).
- Útil para problemas de medida de espesores de capas litológicas.

# Propagación de Pulsos Ultrasónicos

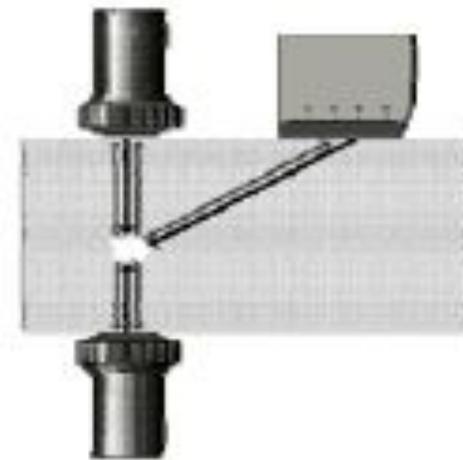
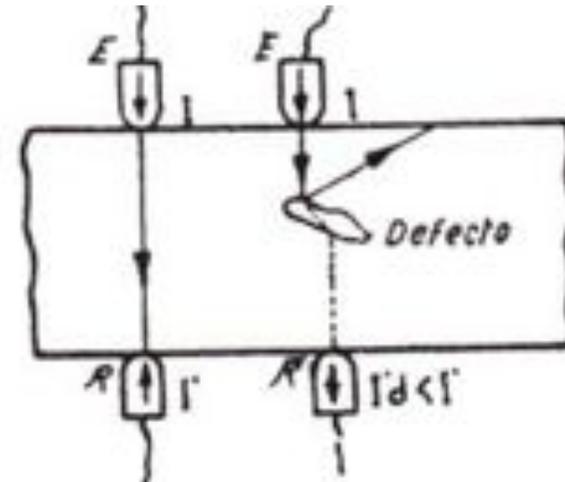
## Introducción

- La determinación de la variación de los parámetros que definen la propagación de una onda ultrasónica en el seno de un material pétreo es **una de las técnicas no destructivas (TND) más ampliamente utilizadas en el análisis y diagnóstico de la degradación del patrimonio arquitectónico.**
- Esta técnica se basa en el análisis de las ondas elásticas que viajan por el seno de los materiales, y estas ondas pueden proceder:
  - De forma espontánea y continua del propio material (método pasivo)
  - Introducirse artificialmente en él material (método activo)

# Propagación de Pulsos Ultrasónicos

## Conceptos

- Una onda ultrasónica incidente:
  - en parte se **refracta**
  - en parte se **refleja** si existe una variación de la resistencia a la onda sonora, como en el caso en que exista un defecto dentro del material.
- De ello se derivan dos procedimientos de ensayo, basados respectivamente:
  - en la evolución de la parte transmitida de la onda
  - o de la parte reflejada de la misma.





# Propagación de Pulsos Ultrasónicos

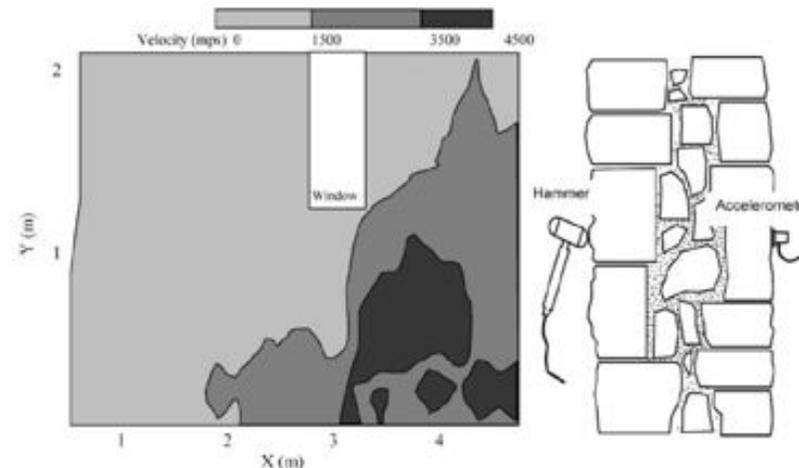
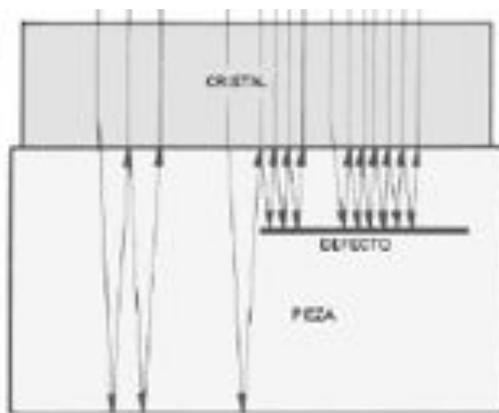
## Objetivos

- El análisis de las ondas ultrasónicas transmitidas a través de un sólido poroso permiten:
  1. Detectar defectos y discontinuidades presentes (espacios vacíos, fracturas, despegues, etc.).
  2. Valorar el estado tensional del material y su posible inestabilidad mecánica.
  3. Obtener una información sistemática a lo largo de grandes superficies, como muros o fachadas con problemas estructurales, permitiendo la posibilidad de establecer en los edificios un mapa de defectos, materiales, actuaciones, etc.

# Propagación de Pulsos Ultrasónicos

## Objetivos

4. **Caracterizar un material** pétreo inalterado (de cantera) y determinar el grado o nivel de alteración alcanzado en un determinado edificio.
5. **Establecer la anisotropía elástica** de una roca\*, para así conocer las direcciones preferentes de alteración.
6. Predecir la **durabilidad** de un determinado litotipo.

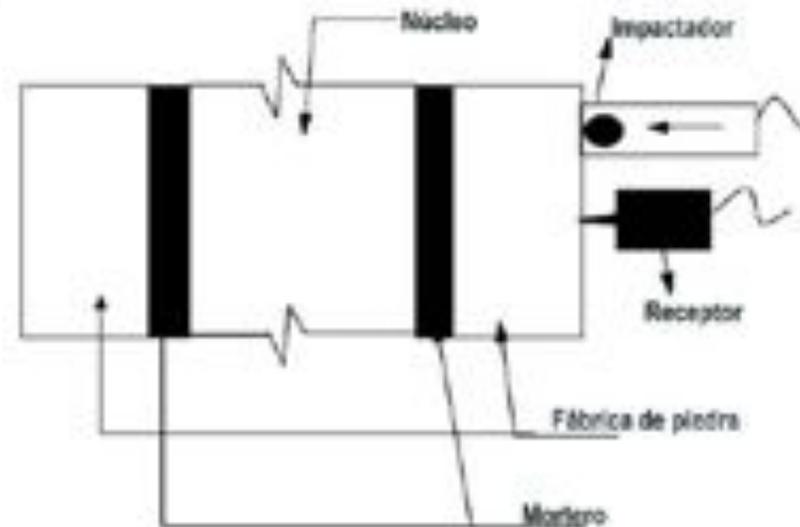


- Elasticidad de una roca es una propiedad ideal de un material y depende de tres factores principalmente: Homogeneidad, isotropía y continuidad

# Propagación de Pulsos Ultrasónicos

## Método

- **La elección del método** a utilizar debe fundamentarse en un **alto contraste en las propiedades físicas de los distintos materiales involucrados**, con el fin de poder ser más fácilmente caracterizables y discriminables



- Por ejemplo, en el caso de los métodos por ultrasonidos, la impedancia acústica y el amortiguamiento de frecuencias de todos los materiales presentes, aconsejará el procedimiento óptimo de trabajo.

# Master Ingeniero de Estructuras Universidad de Granada



## **EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA Y CALIDAD EN ESTRUCTURAS**

### **PARTE 2**

PROFESOR GUILLERMO RUS CALRBORG

ALUMNO JOAQUÍN HIDALGO GARCÍA

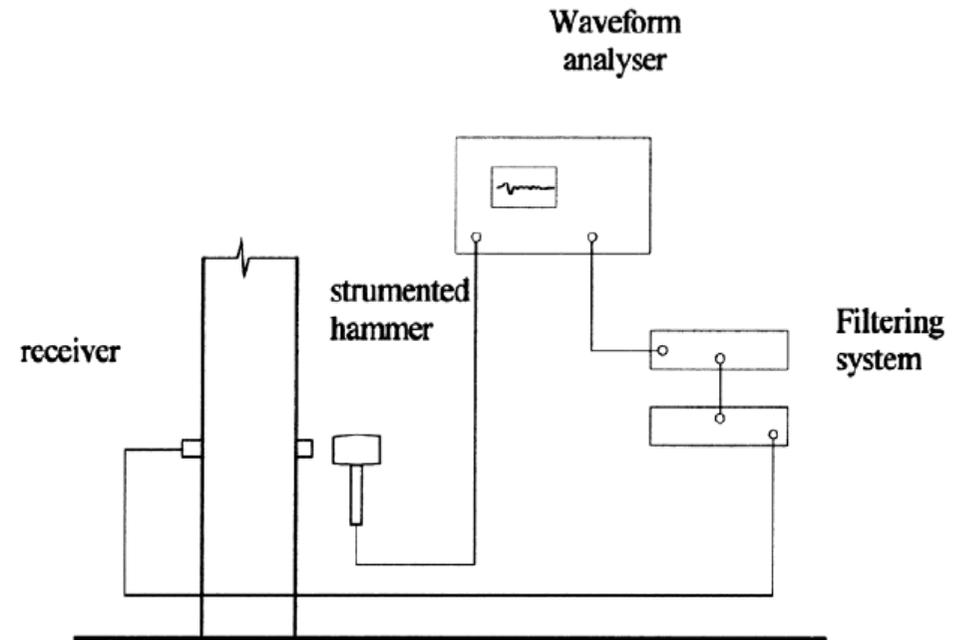
ABRIL 2010

# Ultrasonidos

- Las ondas ultrasónicas son una de **las más frecuentemente empleadas** debido a que:
  - A. Pueden generarse y detectarse por **procedimientos sencillos**.
  - B. Pueden **propagarse a bastante distancia** por el interior de muchas estructuras **sin sufrir demasiada atenuación**.
  - C. Las señales captadas poseen la suficiente capacidad de **portar información** como para poder **determinar importantes características** tanto de la textura como físico-mecánicas del material y sus defectos y/o variaciones.

# Funcionamiento de un equipo de ultrasonidos

- **Emitimos** las ondas elásticas en el material a examinar por medio de un **transductor (emisor) acoplado a su superficie.**
- Después de viajar por su interior las ondas **se reciben en otro transductor (receptor),** y se miden el tiempo transcurrido entre su emisión y su recepción y las variaciones en:
  1. Energía
  2. Frecuencia
  3. Amplitud



# Factores a tener en cuenta en los ensayos

- **Frecuencia:** Es el mayor condicionante de los resultados. Las frecuencias utilizadas van desde los 20KHz hasta los 25MHz. El uso de bajas frecuencias implica pérdida de definición y una menor atenuación de las ondas, pero cubren mayores distancias dentro del material. Un valor elevado de longitud de onda, en cierta medida haría que se "rodeasen" los obstáculos que el frente de ondas encontrase en su camino, sin verse afectada excesivamente por estos, con el inconveniente de no ofrecer información sobre los mismos. Todo lo contrario ocurre con ondas elásticas de alta frecuencia (baja longitud de onda). Las altas frecuencias permiten una definición muy buena pero muestran una atenuación más elevada y, por lo tanto, menor penetración en el material.
- **Impedancia acústica del material:** Este parámetro se define como el producto de la densidad del material por la velocidad de propagación de las ondas. El gran contraste de impedancias entre un material rocoso y el aire que rellena los espacios vacíos, posibilita la utilización de los ultrasonidos en los estudios de alterabilidad, ya que ofrecen una información muy valiosa sobre el espacio poroso de un material.
- **Acoplamiento correcto de los transductores a la superficie pétreo:** Suelen utilizarse grasas, resinas epoxi, etc., para conseguir un mejor contacto entre la fuente emisora de ultrasonidos y el medio a estudiar.
- **Atenuación de las ondas:** Depende de la frecuencia de estas y también de las características del material en el que se propagan (textura, porosidad, etc.). La presencia de un fluido en el seno poroso de un material pétreo produce una considerable atenuación de las ondas ultrasónicas que lo atraviesan, siendo ésta mayor a medida que era mayor la frecuencia de las mismas.
- **Dispersión de la señal:** Especialmente en los métodos de impulso-eco.

# Sistemas de representación

- Hay tres tipos básicos de representación de pantallas de TRC para ensayos ultrasónicos:

## **Representación "Tipo A" (o pantalla Tipo A).**

- Es el más extendido y es el de representación en un tubo de rayos catódicos (TRC) en el que las indicaciones aparecen como deflexiones verticales de la base de tiempo, es decir, en la pantalla se representa el tiempo en la escala horizontal y la amplitud en la escala vertical.
- La representación tipo A, se discrimina de izquierda a derecha. La altura de los ecos pueden ser comparadas con la altura de un eco proveniente de un reflector de referencia conocido, a fin de tener una referencia del tamaño de la indicación.
- El método de registro más sencillo para este tipo de pantalla es el de la fotografía directa del oscilograma. Sin embargo, este método es lento por lo que, en ocasiones, se acoplan al equipo sistemas de registro sobre papel que el propio operador puede manejar de manera simple, obteniendo la representación del oscilograma en tiempo real representación tipo A.

# Sistemas de representación

## Representación "Tipo B"

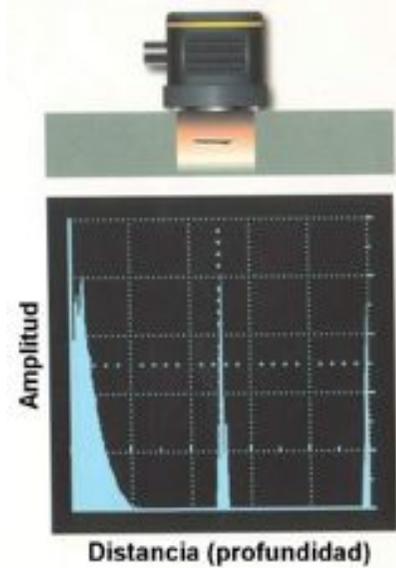
- La representación tipo B, usa una pantalla de osciloscopio típico que muestra una vista de una sección transversal del material a ser ensayado. La imagen es retenida sobre el TRC el tiempo necesario para evaluar la pieza y para fotografiar la pantalla, con el objeto de obtener un registro.

# Sistemas de representación

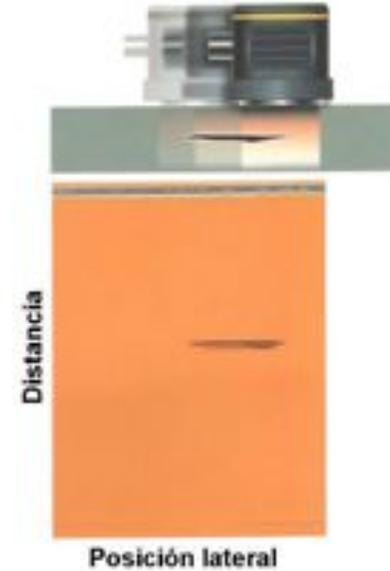
## Representación "Tipo C"

- La pantalla tipo C, representa una vista en planta, similar a una placa radiográfica. Además, muestra la forma y localización de la discontinuidad, pero no su profundidad.
- Los sistemas de alta velocidad de barrido, generalmente utilizan pantallas tipo C, conjuntamente con graficadores, algunos de ellos con papel tratado químicamente. El movimiento del papel está sincronizado con el movimiento del transductor a través de la superficie de ensayo.
- La ventaja de la pantalla tipo C, es su velocidad y su capacidad de producir registros permanentes. Sin embargo, la pantalla solamente da longitud y ancho, pero no la profundidad de la falla. Este tipo de representación, junto con el tipo B, prácticamente están reservados a los ensayos automáticos por inmersión.

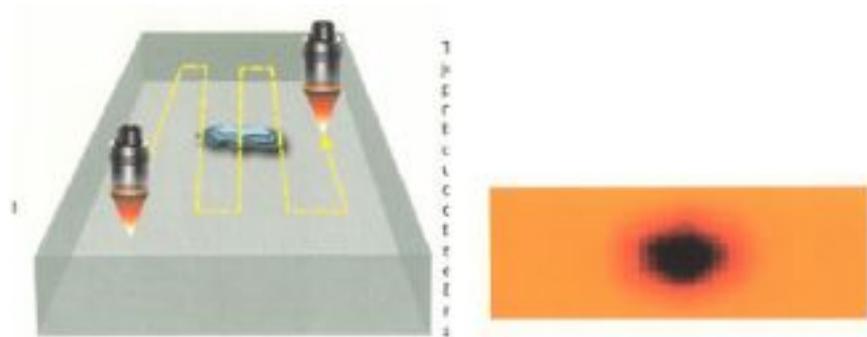
# Sistemas de representación



Representación  
TIPO A



Representación  
TIPO B



Representación  
TIPO C

# Principios físicos

- Según Poisson, pueden producirse dos clases distintas de ondas en el interior de un medio limitado:
  - La primera es la onda longitudinal o de compresión, ondas P o L, cuya velocidad es:

- donde :
- $\rho$  = impedancia acústica
- $\rho$  = densidad
- E = módulo de elasticidad

$$V_L = \frac{E(1 - \mu)}{\rho(1 + \mu)(1 - 2\mu)}$$

- La segunda, más lenta, por lo que se registra siempre después de la onda longitudinal, es la denominada onda transversal o de cizallamiento (ondas S o bien T), cuya velocidad es:

$$V_T = \frac{E}{\rho 2(1 - \mu)}$$

# Principios físicos

- Un equipo de ultrasonidos estándar sólo mide el frente de ondas del impulso ultrasónico que recibe; por tanto, se mide únicamente el tiempo del recorrido de la onda longitudinal, pero el aparato considera que las velocidades de la onda longitudinal y transversal prácticamente se igualan, así hablamos de la velocidad de propagación de la onda ultrasónica.
- Si "s" es la distancia entre los dos transductores en milímetros, y "t" el tiempo de recorrido en microsegundos ( $1\mu\text{s} = 10^{-6}\text{s}$ ), la velocidad de la onda ultrasónica se calcula como:

$$VL = \frac{s}{t}$$

- La velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas es independiente de su frecuencia, pero sí depende de la naturaleza del medio en que se transmiten, o sea, de sus características mineralógicas y texturales, así como del grado de alteración físico-químico.

# Aplicaciones de los ultrasonidos en el control de parámetros estructurales y nivel de degradación en materiales pétreos ornamentales

- a) **Materiales de Canteras**:
- El análisis de la propagación de ondas elásticas en los materiales utilizados en la construcción de la Catedral de Granada, se llevó cabo en los siguientes tipos de muestras:
  - Sobre cubos de dimensiones normalizadas (5 cm de lado).
  - En prismas cortados en laboratorio, según la orientación que presentaba la roca en el afloramiento (dimensiones al menos 10 veces mayores que es elemento de fabrica mas grande).

# Aplicaciones de los ultrasonidos en el control de parámetros estructurales y nivel de degradación en materiales pétreos ornamentales

- b) **Aplicaciones en material pétreo de Edificios Históricos:**

- Sobre elementos de fábrica retirados del edificio (debido a acciones de sustitución, pérdida de bloques, desprendimientos, etc.). Estos fueron tallados según las geometrías antes descritas (cubos y/o prismas).
- "*In situ*", en el edificio, registrando los valores de velocidad de propagación de ultrasonidos, mediante el uso de aparatos portátiles.

Zeza (1990) propuso un índice para definir el daño total sufrido por materiales de construcción de uso en monumentos históricos basado en las variaciones de VL, medidas mediante Test Ultrasónicos comparando materiales de cantera y monumento.

# Aplicaciones de los ultrasonidos en el control de parámetros estructurales y nivel de degradación en materiales pétreos ornamentales

- También es posible determinar la anisotropía textural (elástica) de este tipo de materiales, a través de dos índices obtenidos por medidas ultrasónicas. La metodología (propuesta por Zezza), es la siguiente:
  - Aplicación de ultrasonidos en piezas singulares y/o separadas del resto del edificio, estatuas o sillares sustituidos.
  - Problemas de aplicación: normalmente, en el edificio, es probable que se encuentren problemas, que cuestionan los resultados de las medidas así determinadas,(si no impiden su obtención).

# Aplicaciones de los ultrasonidos en el control de parámetros estructurales y nivel de degradación en materiales pétreos ornamentales

- Problemas de aplicación más comunes:
  - Mal contacto de los transductores, debido a las costras de alteración superficial, diferentes del resto del material pétreo, y que impiden la propagación del impulso ultrasónico.
  - Solución "ad hoc", (no muy eficaz), es la aplicación de un medio, generalmente visco-elástico (grasa, silicona, etc.). Otra posibilidad es la eliminación de la costra superficial. En todos los casos es necesario controlar las variaciones sufridas por  $V(L)$ .
  - Control exacto de las dimensiones de la probeta (problemas en medidas de transmisión directa en cuerpos cilíndricos y/o amorfos, o excesivamente grandes).

# Aplicaciones de los ultrasonidos en el control de parámetros estructurales y nivel de degradación en materiales pétreos ornamentales

- c) Parámetros determinados:
  - $V(L)$ , en tres direcciones perpendiculares (VL1, VL2, VL3).
  - Control de las variaciones de  $V(L)$  en las muestras del monumento, respecto de las muestras Inalteradas de cantera, mediante sistemas de algoritmos (Tomados de Zezza & Veniale, 1988; Zezza. 1990).

# Master Ingeniero de Estructuras Universidad de Granada



## **EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA Y CALIDAD EN ESTRUCTURAS**

### **PARTE 3**

PROFESOR GUILLERMO RUS CALRBORG

ALUMNO JOAQUÍN HIDALGO GARCÍA

ABRIL 2010

# EVALUACIÓN DE DAÑOS EN LA CATEDRAL DE GRANADA MEDIANTE END

## LÍNEAS DE ACTUACIÓN

- Programa de reconocimiento
- Programa de Conservación
- Programa de Mantenimiento
- Programa de uso y gestión
- Programa de comunicación
- Memoria económica

# Conclusiones generales sobre las causas, mecanismos y formas de alteración que afectan a los materiales pétreos calcáreos que conforman la Catedral de Granada

1. Tipos de materiales pétreos se utilizaron en su construcción
2. Características medioambientales del entorno urbano del edificio
3. Formas de alteración desarrolladas y su grado de conservación
4. Mineralogía, textura y composición química de cada litología inalterada (de cantera)
5. Parámetros físico-mecánicos que controlan el tipo y grado de alteración de cada litotipo comparando materiales inalterados y alterados
6. Durabilidad de cada material pétreo frente a los mecanismos de alteración predominantes
7. Causas y mecanismos que han provocado los diversos fenómenos de alteración presentes en el edificio
8. Posibles soluciones y tratamientos de conservación

# Procedimientos de medidas

## Muestras

- Se llevaron a cabo medidas de velocidad de propagación de pulsos ultrasónicos (método directo) en numerosas muestras de cantera (de morfología y dimensiones dadas en la **Tabla 1**) en todas las variedades y litotipos empleados en la construcción de la catedral de Granada.

| Variedad | Porosidad Hg (media) | Intervalo de variación | Área Superficial | n* de muestras |
|----------|----------------------|------------------------|------------------|----------------|
| E-1      | 17.7                 | 12.7 - 22.9            | 1.26             | 8              |
| E-2      | 31.2                 | 27.8 - 34.7            | 0.87             | 5              |
| E-3      | 24.6                 | 22.2 - 28.1            | 0.94             | 6              |
| PAR      | 25.2                 | 21.9 - 31              | 0.53             | 5              |

Tabla 1

- Del mismo modo, en casos concretos, se han realizado este mismo tipo de medidas en materiales alterados del monumento que, por causa de su elevado grado de alteración o por verse desprendidos de su ubicación original, fueron retirados del mismo. En el laboratorio fueron tallados como prismas y se efectuaron medidas en tres direcciones perpendiculares.

# Procedimientos de medidas

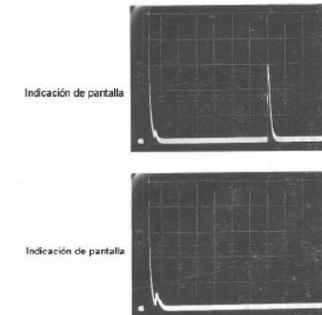
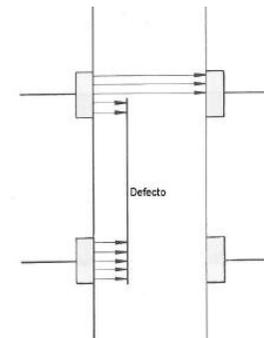
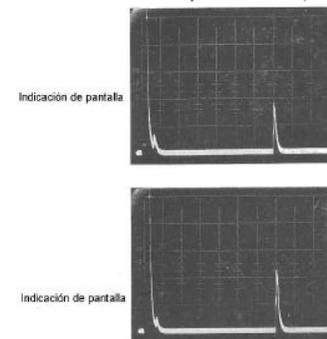
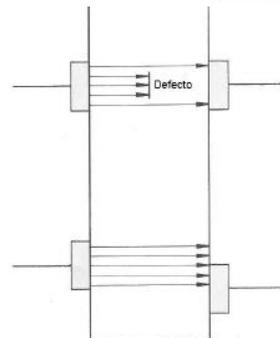
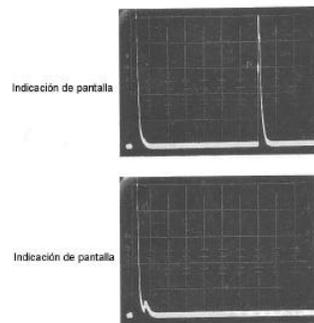
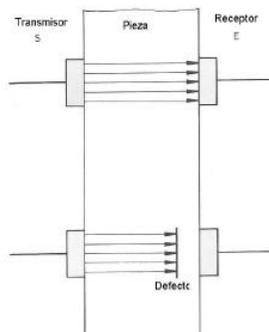
## Equipo

- Equipos de ultrasonidos utilizados:
  - Modelo STEINKAMP BP V y Modelo CONTROL V.
- Elementos de que constan:
  - Generador de impulsos de baja potencia.
  - Transductor de emisión y transductor de recepción de alta potencia.
  - Thyristor: convertidor de tensión que posibilita el contacto entre generador y transductor (debido a sus diferentes potenciales). Mediante una descarga del thyristor a intervalos periódicos se excita el emisor que oscila con una frecuencia propia. Las frecuencias de los transductores utilizados fue de: 25, 50 y 100 Kherz.

# Procedimientos de medidas

## Equipo

- Los impulsos ultrasónicos recorren el material y son reconvertidos por el receptor en impulsos eléctricos que se amplifican. A la salida del amplificador hay conectado un comparador que suministra un impulso eléctrico que borra la memoria y cierra la puerta. El tiempo en que la memoria ha quedado registrada y la puerta abierta, equivale al tiempo de recorrido del sonido entre los transductores.



# Procedimientos de medidas

## Acoplamiento de transductores

- Su objetivo es proporcionar un buen paso de la onda elástica entre los transductores y el material sometido a ensayo.
- Los transductores han de acoplarse a las probetas mediante un revestimiento plástico (origina una pérdida de energía) o con aceite, vaselina o plastilina. En este estudio se ha aplicado un tipo de grasa especialmente diseñada por la casa CONTROL (Milán, Italia) para realizar medidas de propagación de pulsos ultrasónicos.
- Cuanto más rugosa sea la superficie, más viscoso y denso deberá ser el medio de acoplamiento utilizado.
- Para no usar un medio de acoplamiento, o en casos en los que las superficies sean excesivamente rugosas, se han desarrollado transductores con puntas de acero inoxidable en forma de cono, que permiten introducir los impulsos de forma puntual, pero la energía de estos es bastante menor (no se han utilizado en este estudio).

# Procedimientos de medidas

## Calibrado

- El tiempo de recorrido del sonido medido, es la suma del tiempo que tarda el pulso ultrasónico en pasar a través de la probeta, más el que se efectúa en pasar a través del transductor (emisor + receptor); por lo tanto, este último intervalo de tiempo es necesario obviarlo mediante un adecuado calibrado del aparato.
- El ajuste se realiza con una pieza patrón de PVC duro, donde el tiempo de recorrido del sonido (a T ambiente) es exactamente de 10  $\mu$ s. Algunos autores prefieren calibrar directamente con los transductores, haciendo el tiempo de recorrido entre ellos igual a 0.

# Procedimientos de medidas

## Frecuencia

- En la elección de la frecuencia adecuada ha de encontrarse un compromiso según las dimensiones de la muestra y su tamaño de grano:
  - Probetas pequeñas y relativamente homogéneas (muestras geológicas): frecuencias altas para alcanzar una mayor exactitud (tienen menor alcance).
  - Objetos grandes y de textura basta (muros de contención, paramentos, etc.): frecuencias más bajas para que tengan un mayor alcance (se pierde en exactitud).

# Procedimientos de medidas

## Mineralogía

**Caliza de crinoides.** La principal característica macroscópica es la presencia de una estructura laminada a gran escala, así como una granulometría y composición variables. La piedra de Sierra Elvira se compone de granos y cemento de carbonato cálcico. La microestructura presenta elevada densidad, careciendo de una porosidad apreciable con microscopía óptica. Su estudio mediante microscopía óptica y DRX permite señalar que mineralógicamente presenta un dominio casi absoluto de calcita (Figura 1); en algunos casos se encuentran también cristales de dolomita.

**Caliza micrítica.** Esta variedad presenta granulometría lutítica. Macroscópicamente parece un wackstone. Microscópicamente revela aspecto de packstone y, en otros casos, una facies de transición. El color en muestras, es generalmente marrón bronce. Su composición mineralógica es exclusivamente calcítica (Figura 2).

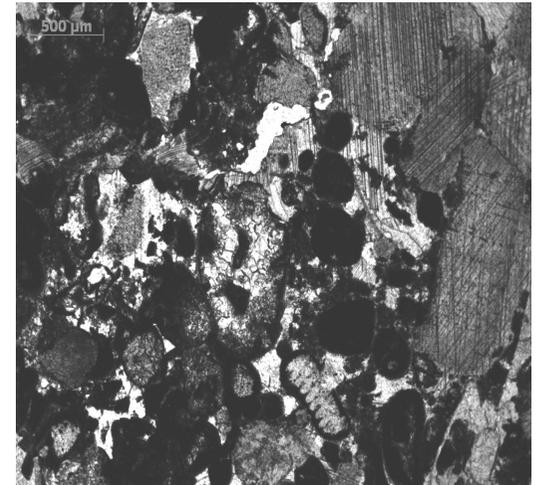


Figura 1

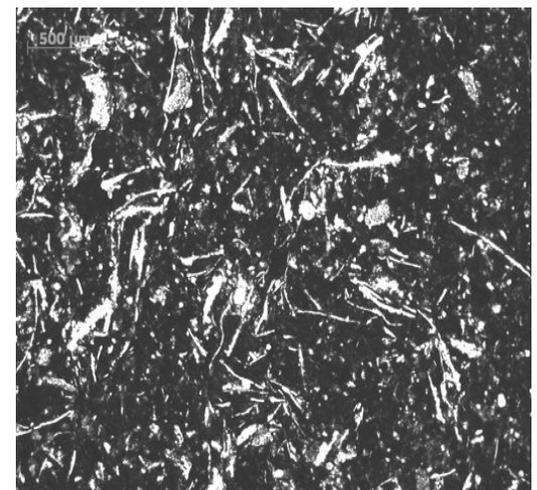
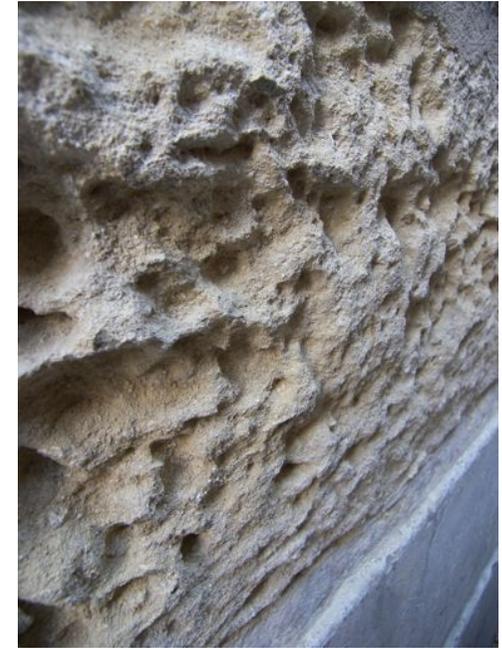


Figura 2

# Procedimientos de medidas

## Efectos

- Los materiales alterados de la Catedral de Granada, muestran una mineralogía prácticamente similar a la de los materiales de cantera.



- Solamente aquellas muestras de costras de alteración y las tomadas en zonas de eflorescencias salinas presentan importantes variaciones composicionales, tanto cualitativas como cuantitativas.

# Procedimientos de medidas

## Calcarenitas de la Catedral de Granada

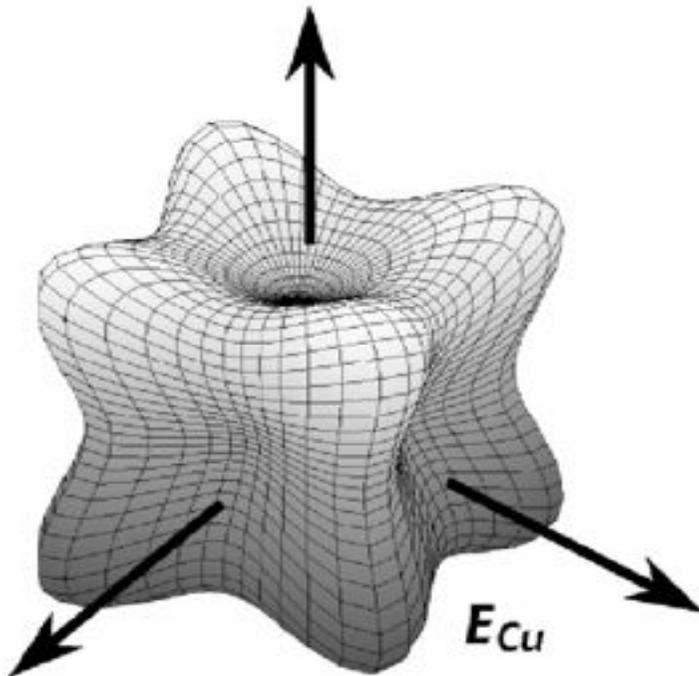
- **En el monumento se realizaron medidas de velocidad de propagación de ultrasonidos en diferentes elementos, efectuándose las mediadas en transmisión directa.** Para ello fue necesario realizarlas en elementos exentos como pináculos, gárgolas, bajo relieves, estatuas, cornisas, paramentos de escaso grosor, etc., o en bloques desprendidos, que debido a su excesivo tamaño, no pudieron ser adecuadamente transportados al laboratorio.



# Resultados

## Calcarenitas de la Catedral de Granada

- La **Tabla 2**, presenta los valores de velocidad de propagación de ultrasonidos según tres direcciones ortonormales, de cada una de las variedades de calcarenita explotadas en las canteras de Santa Pudia (Escribana y Parideras), mostrando además, los valores medios de anisotropía elástica total y relativa.



Este concepto se utiliza para calificar el comportamiento de los materiales respecto de las direcciones del espacio.

Es **isótropo** respecto de una propiedad determinada cuando esta, no varía al variar la dirección en la que se mida la propiedad (siendo una propiedad **escalar**). Por el contrario, un material es **anisótropo** cuando la propiedad varía según la dirección considerada. En este caso, la propiedad es **vectorial**.

**Tabla 2.** Velocidad de propagación de pulsos ultrasónicos (m/s) en calcarenitas de cantera. Se dan los valores medios, rango de variación y desviación estándar, según tres direcciones perpendiculares.

| Variedad |       | VL 1                       | VL 2                       | VL 3                       | AM  | Am  |
|----------|-------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----|-----|
| E-1 1    | E-1 a | 3328<br>2957 – 3643<br>257 | 3566<br>3130 – 3938<br>310 | 3441<br>3013 – 3805<br>309 | 5.0 | 3.6 |
|          | E-1b  | 3046<br>2782 – 3741<br>127 | 3315<br>3077 – 3819<br>153 | 3183<br>2861 - 3680<br>205 | 5.7 | 4.0 |
| E-2      |       | 2658<br>2586 – 2750<br>71  | 2816<br>2764 – 2896<br>76  | 2669<br>2605 – 2768<br>74  | 3.1 | 5.4 |
| E-3      |       | 3037<br>2907 – 3194<br>71  | 3270<br>2945 – 3454<br>41  | 3167<br>2934 – 3238<br>76  | 2.1 | 2.6 |
| PAR      |       | 3324<br>3054 – 3542<br>230 | 3645<br>3564 – 3699<br>42  | 3537<br>3420 – 3617<br>17  | 7.4 | 3.0 |

Donde:

VL1 = velocidad mínima

VL2 = velocidad máxima

VL3 = velocidad intermedia

Los valores de:

AM = Anisotropía elástica total (%)

Am = Anisotropía elástica relativa (%)

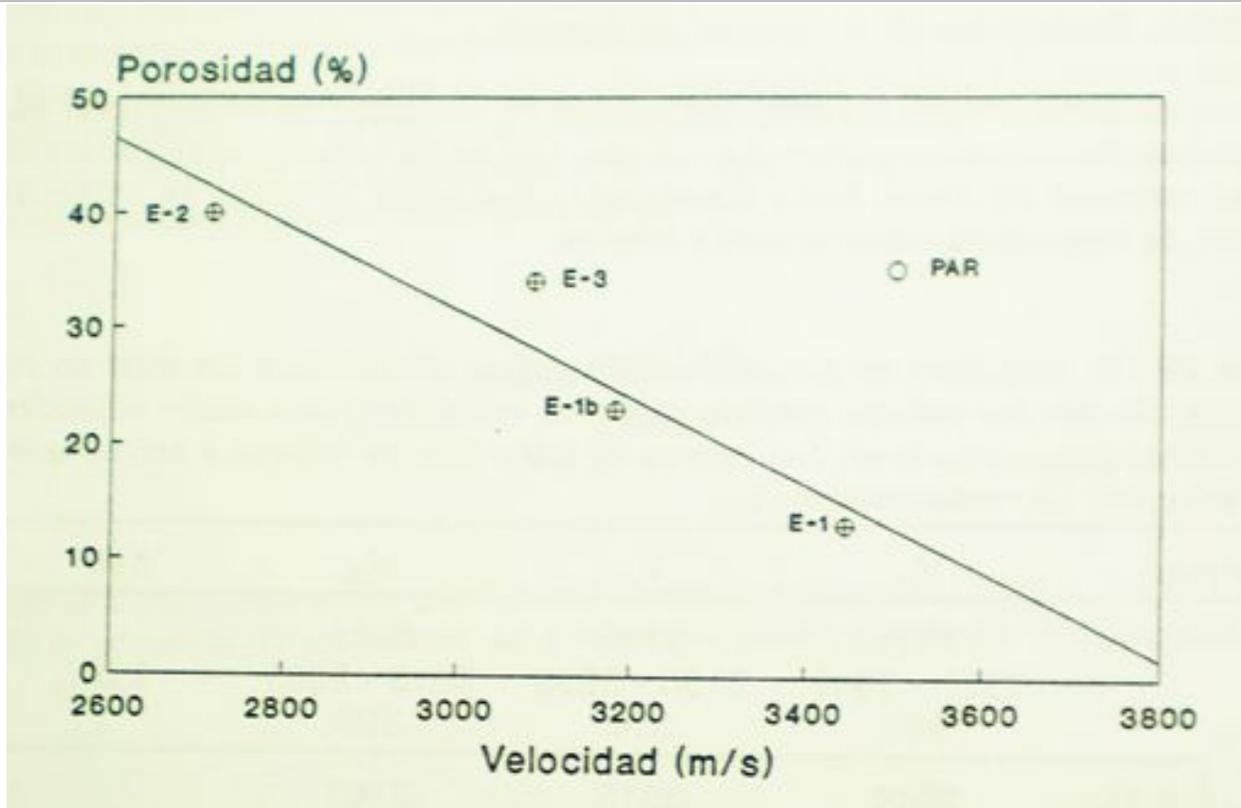
# Resultados

## Durabilidad calizas



- **La durabilidad de las calizas viene motivada por sus excelentes propiedades mecánicas, dinámicas y el bajo coeficiente de anisotropía estructural-textural;** este último aspecto se refleja en los escasos daños generados por esfuerzos mecánicos debidos a dilataciones y contracciones asociadas a variaciones térmicas acusadas, fenómeno climático usual en Granada y que, sin embargo, sí representa un factor determinante en el deterioro de otros tipos de rocas ornamentales, como sucede con los mármoles.

**Figura 1.** Variación de VL (valores medios) respecto a la porosidad total (determinada por picnometría de He) de cada una de las variedades de calcarenita (de cantera) utilizadas en la construcción de la catedral de Granada.



**Figura 1**

La densidad es un parámetro físico básico en la caracterización de las rocas, y que depende fuertemente de su composición mineralógica y porosidad. El sistema poroso se puede caracterizar con diferentes técnicas, entre las que se pueden resaltar: picnometría de He.

- Queda reflejado que existe una correlación directa entre **Porosidad total ( $n$ )** y **Velocidad de propagación (VL)**, tal y como se aprecia. Los tres tipos calcarenita de la Escribana: E-1 (variedad compacta, E-1a, y porosa, E-1b), E-2 y E-3.

# Resultados

## Porosidad

- Existe una correlación directa entre porosidad total ( $n$ ) y velocidad de propagación de pulsos ultrasónicos ( $VL$ ), existiendo entre ambos parámetros la siguiente relación:

$$n = 143,8 - 0,0037 VL$$

- Señalar que de la variedad E-1, solo se realizaron medidas de  $VL$ , en elementos realizados con el subtipo mas poroso (E-1b), ya que no se encontró ningún elemento de la variedad E-1 a (compacta) que hubiese sido reemplazado

**Tabla 3. incremento de VL (en %) según tres direcciones ortonormales en materiales.**

- Las variaciones de la velocidad de propagación de ondas elásticas en el monumento se exponen en la siguiente tabla:

| Variedad | Nivel de alteración | $AV_{L1}$ | $AV_{L2}$ | $AV_{L3}$ | $AV_{L\text{medio}}$ |
|----------|---------------------|-----------|-----------|-----------|----------------------|
| E-1b     | Intermedio          | -9.9      | -14.2     | -11.0     | -11.7                |
| E-2      | Intermedio          | -12.8     | -11.1     | -10.1     | -11.3                |
| E-3      | Bajo                | -2.3      | -2.4      | -2.7      | -2.5                 |
| PAR      | Elevado             | -29.1     | -20.1     | -30.5     | -26.6                |

# Resultados

## Alteración calizas

- Las variedades E-1b y E-2, son las que sufren niveles de alteración más elevados en los materiales de la cantera de la Escribana.
- La variedad E-3, en el único caso en que ha sido posible obtener datos de propagación de pulsos ultrasónicos en materiales alterados, presenta valores medios de disminución de VL, muy bajos. Dicho elemento no presentaba un nivel de degradación tan elevado como el de los casos precedentes.
- Los elementos analizados de la variedad PAR, suponen un caso completamente opuesto al anterior. Presentan las mayores variaciones de VL, llegando estos a superar el 26% de disminución. En este caso, las muestras tomadas pertenecían a bloques con grados extremos de alteración (arenización y des-cohesión intergranular), con desarrollo de grandes poros (cavernas).

# Resultados

## Degradación calizas

- La degradación, sobre todo de carácter químico, de esta piedra ornamental es de escasa intensidad y muy lenta; ello se debe a sus parámetros físico-mecánicos, esencialmente sus índices de porosidad eficaz y su comportamiento frente a la captación de fluidos y gases, así como su circulación por el interior de la piedra, ya que el limitado tamaño de microporo, su escasa conectividad, y la exigua permeabilidad la restringen significativamente.
- Su comportamiento frente a la contaminación también es aceptable debido a estas mismas causas.



# Resultados

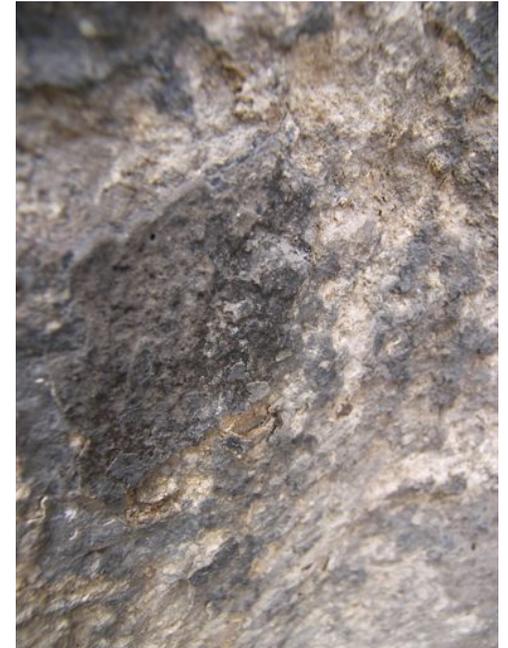
## Porosidad calizas

- En gran medida, la composición mineralógica, la textura y, **fundamentalmente, los espacios vacíos de una roca condicionan la velocidad de propagación de una onda elástica** (Suarez del Rio, 1982; Alonso, 1986; Alonso et al., 1987).
- Además, **la geometría del sistema poroso influye en la propagación de una onda elástica.**
- Tourenq et al. (1971) señalan que **las mayores variaciones son ocasionadas por discontinuidades de tipo planar (fisuras, fracturas y grietas)** siendo los poros equidimensionales los que afectan de forma menos acusada.

# Resultados

## Degradación calizas

- **Los daños más frecuentes** son los originados por **defectos estructurales de la construcción**, los ocasionados por **impactos**, los debidos a las **discontinuidades** y heterogeneidades intrínsecas, como son los estilolitos, y cuando esta piedra se expone a procesos de **contaminación ambiental** importante.



- Las morfologías de deterioro más llamativas son las **pérdidas de material, las rupturas y las pátinas o acumulaciones de suciedad**; con menor frecuencia la decohesión granular.

# Resultados

## Degradación calizas

- Las fases de restauración/conservación más habituales a emprender en este tipo de roca serán:

- Limpieza
- Reintegración
- Protección
- Consolidación

# Resultados

## Degradación calizas

- Los procedimientos de **consolidación y protección** **vienen muy condicionados por la escasa eficacia que logran los productos** y metodologías de aplicación más usuales en intervenciones en piedra ornamental, ya que la **penetración o fijación superficial en esta roca es casi nula** debido a su espectro porosimétrico.

### Parámetros hídricos de las calizas de Sierra Elvira.

H% = contenido en humedad natural

A% = coeficiente de absorción

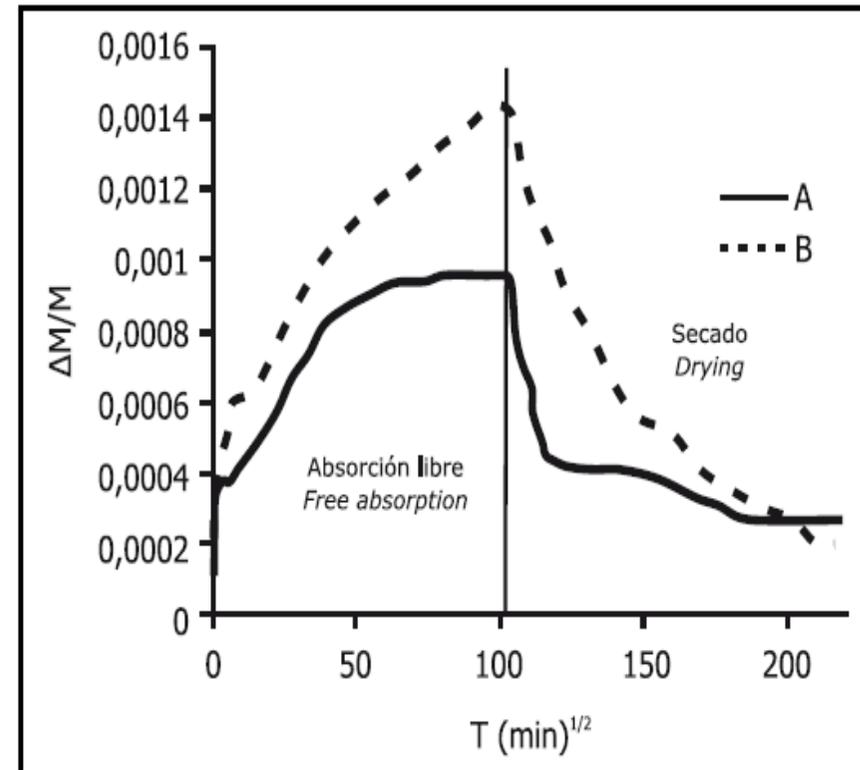
S% = coeficiente de saturación

DA = densidad aparente (en g/cm<sup>3</sup>)

DR = densidad real (en g/cm<sup>3</sup>)

PA% = porosidad accesible al agua

I<sub>p</sub>% = índice de porosidad calculada en función de PA%.



|  | H     | A    | S    | D <sub>A</sub> | D <sub>R</sub> | P <sub>A</sub> | I <sub>p</sub> |
|--|-------|------|------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Caliza crinoides / <i>Crinoid limestone</i>  | 0.024 | 0.09 | 0.26 | 2.71           | 2.71           | 0.20           | 1.002          |
| Caliza micrítica / <i>Micritic limestone</i> | 0.035 | 0.14 | 0.38 | 2.69           | 2.70           | 0.37           | 1.004          |









# Bibliografía

1. Acuña L., Diez M.R., Casado M, Los Ultrasonidos y la calidad de la madera estructural aplicación a Pinus Pinaster ait, Boletín del CIDEU 2: 7 – 26 (2006).
2. C. Maierhofer, J. Wöstmann, Federal Institute for Materials Research and Testing (BAM), C. Hennen, S.L. Gedenkstätten, Wittenberg, *Non-destructive investigation of complex historic masonry structures with impulse radar*, International Symposium (NDT-CE 2003) Non-Destructive Testing in Civil Engineering 2003.
3. E. Sebastián Pardo, G. Cultrone, V. Garibaldi, C. Rodríguez Navarro, M. J. de la Torre y I. Valverde, *La Caliza de Sierra Elvira: comportamiento petrofísico de una piedra significativa en el Patrimonio Arquitectónico Andaluz*, Materiales de Construcción Vol.58, 289-290, 51-63 enero-junio 2008.
4. F. Veniale, M. Setti y S. Lodola, *Diagnóstico del deterioro de la piedra en el patrimonio construido. Datos y perspectivas*, Materiales de Construcción Vol.58, 289-290, 11-3, enero-junio 2008.
5. G. Ramón, A. Basterra, M. Casado, L. Acuña, *Análisis de las técnicas de diagnóstico de madera estructural en edificios existentes y propuesta de integración orientada al Proyecto*, Instituto de ciencias de la construcción “Eduardo Torroja”, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (2005).
6. I. Lombillo, L. Villegas, GTED, *Metodologías no destructivas aplicadas a la rehabilitación estructural del patrimonio*, Grupo de Tecnología de la Edificación de la Universidad de Cantabria, (2006).
7. I. Lombillo, J. P. Fernández, A. García-Lengomín, P. Gómez, *Ensayos Sónicos en el Palacio de Riva-Herrera, Santander*, Dpto. de Ingeniería Estructural y Mecánica, Universidad de Cantabria. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, C. y P., (2006).

# Bibliografía

8. J. Cuaresma Pardo, *Sedes catedralicias en Andalucía: estado de la cuestión* Información del PH, PH47 - Febrero 2004
9. J. F. Rodríguez Gordillo, *Arqueometría y Arqueología Medieval*, Morteros como elementos de estudio en arqueología-arqueometría medieval, Universidad de Granada, (2005).
10. J. Guardia Olmedo, J.M. Gómez Moreno, R. López Guzmán, J. Prieto- Moreno, *Arte y deterioro en los monumentos Granadinos. Catedral, Chancillería y Palacio de Carlos V*, Uniersidad de Granada, (1986).
11. Luigia BINDA & Antonella SAISI, *Application of NDTs to the diagnosis of Historic Structures*, NDTCE'09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering Nantes, France, June 30th – July 3rd, 2009.
12. P. Salmerón, *Las catedrales andaluzas. Dinámicas de los espacios urbanos*, Información del PH ,PH47 - Febrero 2004.
13. RILEM MS-D.5, “Measurement of ultrasonic pulse velocity for masonry units and walletes”.
14. S. Limón Rodríguez, *Catedrales andaluzas en internet*, Centro de Documentación del IAPH. 64
15. Ricardo Echevarria, *Ultrasonidos*, Universidad Nacional del Comahue, Facultad de Ingeniería Laboratorio de Ensayos No destructivos (2002).
16. Alfonso Fernandez Hatre, *Ensayos No destructivos por Ultrasonidos*, Instituto de Fomento Regional (Asturias).
17. Carlos A.Canoba, Hector R. Fraga, *Propiedades Elásticas de las Rocas*, Universidad Nacional del Rosario (2004).
18. David Benavente, Ana M. Bernabéu y Juan C. Cañaveras, *ESTUDIO DE PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS ROCAS Study of physical properties of the rocks*, Departamento de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente. Universidad de Alicante. Laboratorio de Petrología Aplicada. Unidad Asociada del CSIC-UA. (2004)