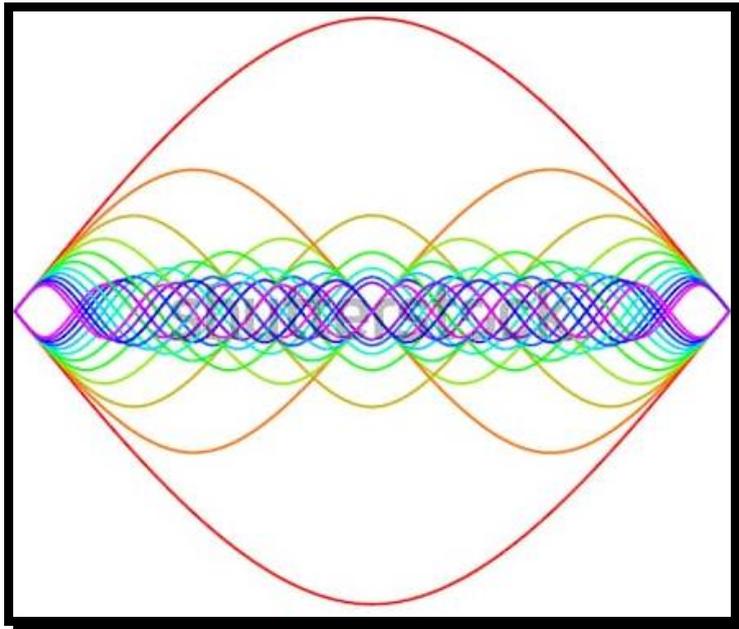




**Departamento de  
Ciencias de la Tierra**  
**Universidad Zaragoza**

## **TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**Caracterización petrofísica del material pétreo: Ventajas e inconvenientes de la emisión sonora frente a otros métodos.**



**Máster en Geología: técnicas y aplicaciones**

**Autor: Francisco Javier Artiaga Murillo**

**Director: Josep Gisbert Aguilar**

**Curso: 20018- 2019**

## ÍNDICE

RESUMEN .....	Pág. 4
ABSTRACT .....	Pág. 4
1. INTRODUCCIÓN .....	Pág. 5.
2. OBJETIVO .....	Pág. 6
3. CONTEXTO GEOLÓGICO Y GEOGRÁFICO .....	Pág. 6
4. MARCO TEÓRICO .....	Pág. 7
4.1 Conocimiento previo e hipótesis de trabajo .....	Pág. 7
4.2 Marco tecnológico instrumental: .....	Pág. 8
5. METODOLOGÍA .....	Pág. 9
5.1 Tipo de experimentos y medidas .....	Pág. 10
5.2 Materiales empleados .....	Pág. 10
5.2.1 Rocas estudiadas. Criterios de selección .....	Pag.10
5.3 Elaboración de las probetas .....	Pág. 11
5.4 Grupos de trabajo (probetas) y distribución .....	Pág. 11
5.5 Ensayos físico-mecánicos.....	Pág. 13
5.5.1 Dimensión y masa seca .....	Pág. 13
5.5.2 Ultrasonidos .....	Pág. 14
5.5.3 Emisión sonora .....	Pág. 16
5.5.3.1 Frecuencia Fundamental .....	Pág.17
5.5.3.1 Módulo de elasticidad dinámico .....	Pág.18
5.5.4 Propiedades hídricas .....	Pág. 18
5.5.5 Cambio dimensional .....	Pág. 18
5.5.6. Proceso de envejecimiento artificial acelerado .....	Pág. 19
5.5.6.1 Cristalización de sales .....	Pág. 20
5.5.6.2 Choque térmico.....	Pág. 20

5.5.6.3 Hielo-deshielo .....	Pág. 21
5.5.7 Índice de sensibilidad al deterioro (ISD) .....	Pág.21
6. RESULTADOS .....	Pág. 22
6.1 Ultrasonidos .....	Pág. 22
6.2 Emisión sonora (Frecuencia fundamental) .....	Pág. 23
6.3 Constantes elásticas .....	Pág. 25
6.4 Parámetros hídricos de muestras de cantera .....	Pág. 26
6.5 Análisis porométrico .....	Pág. 28
6.6 Cambio dimensional .....	Pág. 30
6.7 Envejecimiento acelerado: cristalización de sales.....	Pág. 31
6.8 Envejecimiento acelerado: choque térmico.....	Pág. 33
6.9 Envejecimiento acelerado: hielo-deshielo.....	Pág. 35
6.10. Índice de susceptibilidad al deterioro .....	Pág.37
7. INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN .....	Pág. 38
7.1 Propiedades intrínsecas de las rocas no envejecida .....	Pág. 38
7.1.1 Porosidad, densidad y propiedades hídricas .....	Pág. 38
7.1.2 Capacidad de absorción y saturación .....	Pág. 39
7.1.3 Cambio dimensional. Influencias de las propiedades intrínsecas ....	Pág. 40
7.2 Propiedades elásticas indirectas (Vp, frecuencia fundamental y MOE) de las rocas envejecidas .....	Pág. 42
7.2.1 Velocidad de propagación de ultrasonidos y factores que influyen en la medida.....	Pág. 44
7.2.2 Frecuencia fundamental flexural con propiedades intrínsecas y fiabilidad de las medidas .....	Pág. 44
7.2.3 Comparativa entre los diferentes métodos para calcular MOE.....	Pág. 47
7.3 Resultados de alteración.....	Pág.48

7.3.1 Afección de los ensayos de envejecimiento, en función de la pérdida de masa o de la disminución del MOE (ultrasonidos y flexura), y durabilidad de las litologías .....	Pág.48
7.3.2 Durabilidad .....	Pág.50
7.3.3 Índice de sensibilidad al deterioro .....	Pág.52
8. Conclusiones .....	Pág. 53
9. Bibliografía .....	Pág. 55
Anexos .....	Pág. 58

## **RESUMEN**

Se ha realizado un análisis acústico de los materiales pétreos como técnica de diagnóstico de características petrofísicas en rocas de usos constructivos. Este estudio se centra en el análisis de ultrasonidos y de la frecuencia fundamental, medidos en rocas sanas y envejecidas artificialmente de diez litologías elegidas por su diversidad de propiedades tecnológicas.

Para ello, se ha llevado a cabo una primera caracterización del estado inalterado del material pétreo, seguido por tres rutas de envejecimiento artificial acelerado y finalmente una caracterización de las muestras alteradas.

El grado de afectación entre roca sana y alterada se cuantificó utilizando la variación del módulo elástico, calculado con ultrasonidos (MOE ultrasonidos) y con medidas de frecuencia fundamental (MOE flexión). Analizando los datos de cada litología estudiada antes del envejecimiento artificial, se obtiene que los valores del módulo elástico calculados a partir de la frecuencia fundamental y de la velocidad de propagación ultrasónica son variables relacionadas y directamente proporcionales. Tras los procesos de envejecimiento por cristalización de sales, choque térmico y heladicidad; el coeficiente de correlación entre la variación del módulo elástico calculado con la velocidad de ultrasonidos y calculado con la frecuencia fundamental disminuye hasta  $R^2=0\text{'}31$ ,  $0\text{'}46$  y  $0\text{'}49$  respectivamente.

Finalmente se estimó la durabilidad de las rocas estudiadas, observando que grupos de rocas son más susceptibles a alterarse con las técnicas de envejecimiento acelerado utilizadas.

*Palabras clave: Piedra natural, técnica no destructiva, métodos acústicos, frecuencia fundamental, ultrasonido.*

## **ABSTRACT**

The aim is to advance in the acoustic analysis of stone materials as a technique for diagnosing petrophysical characteristics in rocks of constructive uses. This study focuses on the analysis of ultrasound and fundamental frequency, measured in healthy and artificially aged rocks of ten lithologies chosen for their diversity of technological properties.

For this, a first characterization of the unaltered state of the stone material was carried out, followed by three accelerated artificial aging routes and finally a characterization of the altered samples.

The degree of affectation between healthy and altered rock was quantified using the variation of the elastic modulus, calculated with ultrasound (MOE ultrasound) and with measures of fundamental frequency (MOE flexion). Analyzing the data of each lithology studied before artificial aging, it is obtained that the elastic modulus values calculated from the fundamental frequency and the ultrasonic propagation speed are related and directly proportional variables. After the processes of aging by crystallization of salts, thermal shock and frost; the correlation coefficient between the variation of the elastic modulus calculated with the ultrasound speed and calculated with the fundamental frequency decreases up to  $R^2 = 0.31, 0.46$  and  $0.49$  respectively.

Finally, the durability of the rocks studied was estimated, observing which groups of rocks are more susceptible to alteration with the accelerated aging techniques used.

*Keywords: Natural stone, non-destructive technique, acoustic methods, fundamental frequency, ultrasound.*

## **1. INTRODUCCIÓN**

Una parte notable de los edificios de las ciudades de nuestro entorno y sobre todo en los centros históricos están construidas con piedra. Sobre los mismos centros existen políticas de intervención que definen lo que actualmente conocemos como restauración, y aunque la definición de restauración ha evolucionado a lo largo del tiempo, hoy en día uno de los puntos básicos de una buena restauración se resume en “el uso de materiales compatibles, basados en el estudio de materiales históricos” (Cazalla, 2002). Tomando como referencia este punto, siempre será necesario un buen estudio y ensayo de los materiales pétreos tradicionalmente usados ya que, a pesar de su disminución de uso en construcciones modernas, siempre serán necesarios en intervenciones de conservación o restauración. Es decir, existen frentes abiertos en los que investigar en el campo de la petrofísica y mucho más dentro de las técnicas no destructivas.

Por otro lado, en las nuevas construcciones, la piedra es utilizada no solo como elemento resistente o como materia prima para la fabricación de otros materiales, sino también como elemento decorativo. Esto desembocó en una tendencia marcadamente “petrófila” (Wright, 2000), donde para ensalzar la belleza natural de la piedra, su puesta en obra se realiza sin ningún tipo de recubrimiento (morteros o enlucidos). Esto se conoce comúnmente como piedra “caravista”, pudiendo resultar una contradicción desde el punto de vista de la durabilidad de la roca puesto que se pierde cualquier protección contra la agresividad del medio.

Por todo ello y dado el interés que tiene conocer la durabilidad de cada roca estudiada, en este trabajo las probetas de roca fueron sometidas a tres rutas de envejecimiento acelerado diferentes (por cristalización de sales, choque térmico y heladicidad). Estos ensayos de envejecimiento se utilizaron para provocar una modificación en las condiciones petrofísicas iniciales de las rocas estudiadas, que fueron analizadas con los dos métodos acústicos no invasivos que se pretenden desarrollar (medidas de velocidad de propagación de ondas ultrasónicas y medidas de frecuencia fundamental de resonancia).

## **2. OBJETIVO**

El objetivo principal de este estudio es evaluar las ventajas del estudio de la frecuencia fundamental para elaborar modelos de variación de propiedades petrofísicas y envejecimiento, de las principales rocas de uso constructivo, en relación con otros métodos más convencionales.

## **3. CONTEXTO GEOGRÁFICO Y GEOLÓGICO**

Las rocas fueron elegidas por su importancia en el uso constructivo y provienen de diferentes puntos de la comunidad autónoma de Aragón, y Catilla-La Mancha, tal como se muestra en la Figura 1. Se han elegido tanto rocas ígneas como sedimentarias. De cara a caracterizar geológicamente los materiales empleados, se elaboraron una serie de fichas técnicas (una por variedad pétreo) divididas en 4 apartados: Información general, situación geográfica, situación geológica y petrografía (Anexo 1).

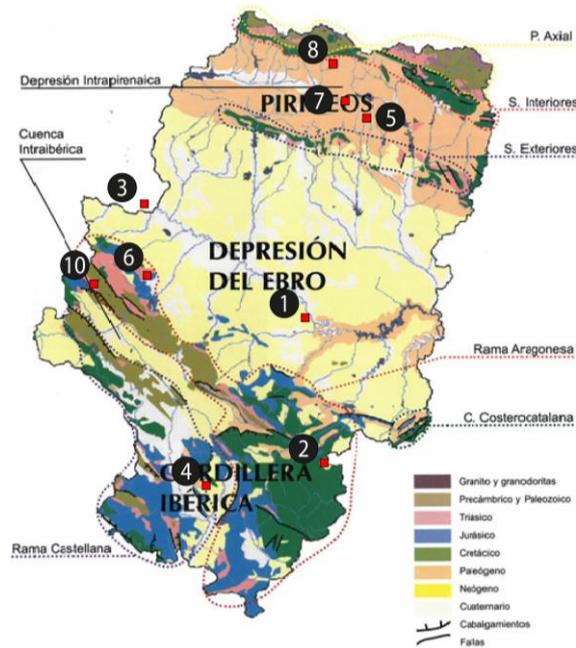


Figura 1. Mapa geológico y morfoestructural de Aragón. Los puntos rojos indican la procedencia de las muestras estudiadas: 1- Alabastro de Gelsa, 2-Travertino Nogal, 3-Caliza Campanil, 4-Travertino Teruel, 5-Piedra de Pueyo, 6-Caliza Calatorao, 7-Piedra Alto Aragón, 8-Granodiorita, 9-Basalto de Cabezo Gordo y 10-Arenisca de Rodeno.

#### 4. MARCO TEÓRICO

Las propiedades físico-mecánicas del material pétreo son unos de los factores intrínsecos indispensables que condicionan su degradación (Moropoulou et al, 2006). La interacción de la roca con los diferentes agentes de alteración (factores extrínsecos) propicia la aparición y desarrollo de defectos que pueden dar lugar a la pérdida de su estabilidad mecánica.

##### 4.1 CONOCIMIENTO PREVIO E HIPÓTESIS DE TRABAJO

La acústica es una de las ciencias clásicas más jóvenes y hasta finales del siglo XIX aún era considerada inexacta, como demuestran las generalidades de términos expuestos en libros como Theory of sound, de lord Rayleigh (Isbert, 1998). La medida de la emisión sonora se vino realizando a lo largo de la historia por estimaciones del oído humano en el marco del desarrollo de la música y fue en 1929 cuando la comisión de reducción de ruido de Nueva York, utilizando un método de balance para igualar ruidos y juzgado por medio del oído, hizo una inspección de ruido en la ciudad dando lugar a la primera campaña generalizada para la medición de ruido (Scott, 1957).

En el campo de la geología, fue Orbert en 1938 quien informó sobre el descubrimiento de la emisión sonora en la actividad microsísmica de las rocas, la cual podría ser detectada en experimentos controlados (Obert y Duvall 1942) y en 1960 investigadores como L.Hermite ya habían comenzado a relacionar la emisión acústica de hormigones sometidos a compresión con diferentes parámetros físicos como velocidades de propagación ultrasónicas y números de Poisson (L´Hermite, 1960).

Fue entre los años 80 y principios de los 90 cuando gracias a algunos autores como Scruby 1985; Sachse y Kim 1987; Ono 1993, se comenzó con el desarrollo teórico de técnicas cuantitativas basadas en el análisis de onda acústica. En la actualidad existen numerosas técnicas basadas en las características de propagación de una onda acústica, diferenciándose; ya sea en la fuente del impulso, en la configuración del ensayo, en las características de la respuesta medida o en la forma de procesar la señal recibida, y todo esto condicionado por las características del material sobre el que se investiga (Narváez, 2011). La técnica analítica principal de este proyecto se enmarcó en la emisión sonora pasiva, utilizando una importante propiedad dinámica de todo sistema elástico como son las frecuencias naturales de vibración.

#### **4.2 MARCO TECNOLÓGICO-INSTRUMENTAL**

En los primeros sonómetros, la percepción subjetiva del oído humano era indispensable para medir el nivel sonoro. Es sobre 1932 cuando aparecen los sonómetros que actualmente conocemos, como instrumentos objetivos de medida absoluta de niveles sonoros sin intervención del oído (Scott, 1957). Dicho sonómetro estaría compuesto de un micrófono, un amplificador y un indicador, y fue con la invención del amplificador de tubo de vacío cuando se incrementó notablemente el rango de tipos de mediciones. En 1957 los sonómetros ya eran aparatos totalmente diferentes a los iniciales, con solo 22 kg de peso y la batería integrada dentro del sonómetro. Actualmente un sonómetro profesional oscila entre los 225 y 600 gramos de peso.

En el marco del método ultrasónico; fue Solokoz en 1929 el primer científico en sugerir el uso de ondas ultrasónicas para detectar singularidades o defectos en elementos metálicos, y el precursor del método del pulso-eco al proponer el método de “shadow” (Recuero, 1999). El primer instrumento comercial fue manufacturado en 1943 y desde

entonces, debido al progreso de la electrónica, han experimentado reducciones de tamaño y peso, y una mejora simultánea en su sensibilidad y poder de resolución (Krautkrämer y Krautkrämer, 2013), aunque no fue hasta 1971 cuando apareció una amplia gama de aparatos digitales y portátiles como el PUNDIT (Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester).

## 5. METODOLOGÍA

### 5.1 TIPOS DE EXPERIMENTOS Y MEDIDAS

Tras una revisión bibliográfica acerca de las técnicas y ensayos empleados en trabajos de investigación sobre material pétreo de uso constructivo, se seleccionaron las normativas más adecuadas para alcanzar los objetivos planteados. Se siguieron las directrices que marcan las normas tecnológicas, salvo modificaciones concretas a causa de la incapacidad para cumplir los tiempos de ensayo establecidos y de la mejora de las condiciones de medida. Las normas junto a sus modificaciones se indican en la Tabla 1.

Normativa	Año	Tipo de ensayo	Propiedades analizadas	Modificaciones
UNE-EN 1936	2007	Porosimetría	Densidad real y aparente. Porosidad abierta y total	-
UNE-EN 14579	2005	Acústico (Ultrasonidos)	Velocidad de propagación del sonido	-
UNE-EN 14146	2005	Acústico (Emisión sonora)	Módulo de elasticidad dinámico	Soportes de goma
UNE-EN 13755	2008	Caracterización hídrica	Absorción de agua a presión atmosférica	-
RILEM	1980	Cambio dimensional	Deterioro de la piedra y eficacia de los métodos de tratamiento	-
UNE-EN 12370	1999	Envejecimiento acelerado por cristalización de sales	Resistencia a la cristalización de sales	Etapa calentamiento de 6 horas, temple de 3 horas e inmersión salina de 13 horas
UNE-EN 12371	2002	Envejecimiento acelerado por hielo-deshielo	Resistencia a la heladicidad	Etapa congelación de 9 horas y deshielo de 15
UNE-EN 14066	2003	Envejecimiento acelerado por choque térmico	Resistencia al envejecimiento por choque térmico	Etapa calentamiento de 9 horas y enfriamiento de 15 horas

Tabla 1. Cuadro resumen con la normativa dedicada a cada tipo de ensayo y modificaciones realizadas.

Los métodos de trabajo previstos se resumieron en los siguientes pasos:

- 1.- Obtención del material y tallado de las probetas.
- 2.- Medidas petrofísicas del material sano (densidad, porosidad, absorción de agua, expansión volumétrica, velocidad de propagación del sonido y emisión sonora) antes de los ensayos de envejecimiento. Incluye medidas del material con distintos grados de humedad.
- 3.- Simulación en laboratorio del envejecimiento del material con ensayos de envejecimiento acelerado. Los ensayos efectuados han sido: envejecimiento acelerado por cristalización de sales, por ciclos hielo-deshielo, choque térmico.
- 4.- Medidas petrofísicas por métodos indirectos del material al finalizar el envejecimiento. Permitted un seguimiento de la variación respecto a la situación inalterada de la muestra.
- 5.- Valoración de los resultados obtenidos y de la durabilidad de los materiales rocosos, mediante la observación de la superficie y pérdida de peso de las muestras.

## 5.2 MATERIALES EMPLEADOS

### 5.2.1 ROCAS ESTUDIADAS. CRITERIOS DE SELECCIÓN

Se escogieron los materiales pensando en abarcar el más amplio abanico posible de densidades y porosidades; los distintos grados de alteración pudieron inducirse a posteriori con envejecimiento acelerado. Los materiales escogidos se muestran en la Tabla 2. Según su génesis, los tipos de piedra estudiados se agruparon en cuatro grupos. Grupo 1 (sedimentarias químicas): alabastro de Gelsa, travertino nogal Montoro, travertino Teruel, piedra Campanil y caliza Calatorao. Grupo 2 (sedimentarias detríticas): arenisca Rodeno rojo Moncayo, piedra de Pueyo y piedra del Alto Aragón. Grupo 3 (volcánicas): basalto. Grupo 4 (plutónicas): granodiorita.

	Densidad aparente (kg/cm <sup>3</sup> )	Porosidad abierta (%)	Velocidad de pulsos ultrasónicos (m/s)
Alabastro Gelsa	2309,0	0,20	4878,0
Travertino Nogal Montoro	2401,0	5,04	2962,1
Caliza Campanil	2169,0	15,29	4196,9
Travertino Teruel	2491,0	3,23	4809,6
Piedra de Pueyo	2686,0	1,63	4927,5
Caliza Calatorao	2626,0	2,13	5668,6
Piedra Alto-Aragón	2685,0	1,63	4927,5
Granodiorita	2723,0	0,66	4486,8
Basalto Cerro Gordo	3012,0	0,65	6037,5
Arenisca de Rodeno	2395,0	5,42	2664,1

Tabla 2. Litologías estudiadas, junto a sus valores teóricos promedio de densidad aparente, porosidad abierta y velocidad de propagación de ultrasonidos, ordenadas de menos a mayor en función de la densidad aparente.

### **5.3 ELABORACIÓN DE LAS PROBETAS**

El diseño de las probetas de roca se llevó a cabo en seis etapas:

- a. Extracción de los bloques en sus yacimientos correspondientes o selección de los existentes en el almacén de piedras del Equipo Arbotante.
- b. Tallado de las probetas: para cada litología se recurrirá a una media de 15 prismas rectangulares de dimensiones aproximadas a 18x5x3cm.
- c. Siglado de las probetas, identificación del plano de estratificación con una flecha doble y determinación de los ensayos a las que van a ir destinadas.
- d. Lijado de las caras en aquellas probetas destinadas al ensayo de expansión hídrica. Se empleó una lijadora eléctrica manual con lijas de tamaño de grano medio y fino.
- e. Examen visual y descarte de aquellas que no se ajustan a los parámetros dimensionales establecidos o que poseen un volumen de imperfecciones significativo.

### **5.4 GRUPOS DE TRABAJO (PROBETAS) Y DISTRIBUCIÓN**

A grandes rasgos, el esquema de trabajo de esta memoria se dividió en tres etapas: etapa inicial de caracterización petrofísica en muestras inalteradas, etapa de envejecimiento acelerado y etapa final de caracterización petrofísica en muestras alteradas. Las técnicas que se emplearon en cada una de ellas y el número de probetas ensayadas se indican en la Figura 2. De cada litología se reservó un grupo de probetas sin ensayar y sirvieron para sustituir aquellas que pudieran deteriorarse durante el transcurso del proyecto.

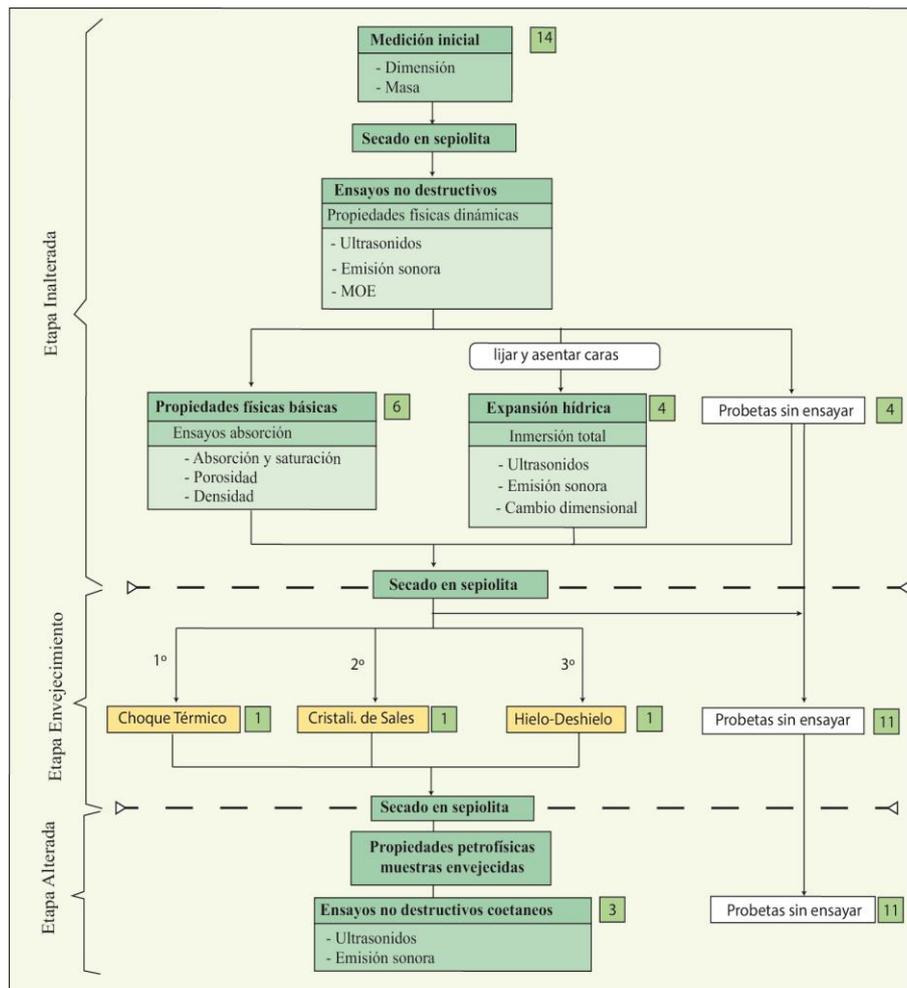


Figura 2. Esquema metodológico con los ensayos realizados y el número de probetas analizadas en cada ensayo (casillas verdes adyacentes). Consta de 3 etapas: muestras de roca sanas, proceso de envejecimiento y muestras alteradas. Se han reservado cuatro probetas de cada tipo de roca para cubrir incidencias y/o roturas.

A continuación, se describe el itinerario de ensayos seguido por las probetas de cada litología (en orden cronológico de ensayos).

A) Se partió de un grupo inicial formado por catorce probetas de cada litología estudiada. Introdujeron en un desecador de sepiolita hasta masa constante, se anotaron sus dimensiones y su masa (lo que se ha definido como *medición inicial*). Sobre el mismo grupo de probetas se realizaron los ensayos acústicos, denominados en el esquema como *ensayos no destructivos*, entre los que se encuentran las primeras mediciones de ultrasonido y emisión sonora. A partir de aquí, el grupo formado por todas probetas se desdobra en tres subgrupos:

- 1- Grupo de 6 probetas sobre las que se determinó las *propiedades físicas básicas*, sometiéndolas a los ensayos de absorción y porosimetría.
- 2- Grupo formado por 4 de las probetas del grupo inicial, en las cuales fueron lijadas y asentadas sus caras. Para este grupo se van a realizar ensayos de cambio dimensional (*expansión hídrica*), además de unas segundas mediciones de ultrasonido y emisión sonora.
- 3- Grupo formado por las probetas restantes (*Probetas sin ensayar*).

B) Se finalizó la etapa de caracterización petrofísica de la roca inalterada y comenzó la etapa de envejecimiento. Se siguieron tres métodos de envejecimiento acelerados diferentes (Choque térmico, cristalización de sales y heladicidad) (Figura 3), para generar diferentes orígenes de los daños ocasionados en las probetas.

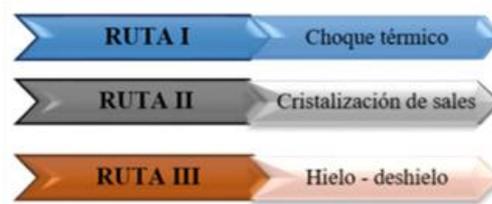


Figura 3. Rutas de alteración para las probetas de cada litología.

C) Tras secar por última vez todas las probetas en un desecador de sepiolita, finalizó la etapa de envejecimiento y comienza la etapa de caracterización petrofísica de la roca alterada. Se efectuó el tercer y último ensayo de ultrasonidos y emisión sonora, además de medidas de pérdida de masa.

## 5.5 ENSAYOS FÍSICO-MECÁNICOS

### 5.5.1 MASA SECA Y DIMENSIONES

Tras secar las probetas en un contenedor de sepiolita hasta masa constante, se realizaron tres medidas del peso de cada probeta para obtener el valor de la masa seca. Las medidas de masa se realizaron con la ayuda de una balanza digital con precisión de centésima de miligramo. La dimensión de las probetas se registró realizando 3 medidas en cada una de las direcciones ortogonales (longitud, espesor y anchura) utilizando un calibre digital con precisión de centésima de milímetro (véase Anexo 2).

## 5.5.2 ULTRASONIDOS

Para la determinación de la velocidad de propagación de pulsos ultrasónicos (UNE-EN 14579) y el análisis visual del recorrido de la onda, se usaron las medidas realizadas con un modelo Pundit Lab Proceq pl-200 siguiendo la norma europea específica. Este aparato tiene múltiples aplicaciones y una amplia gama de métodos de lectura (medidas directas, indirectas, semidirectas) aunque la directa suele ser la más deseable y satisfactoria ya que el máximo de energía de la onda es transmitida y recibida en los transductores.

### 5.5.2.1 Medidas de propagación de pulsos ultrasónicos ( $V_p$ ):

Se determinó la velocidad de propagación de ondas ultrasónicas longitudinales en el seno de las probetas en las tres direcciones ortogonales (Figura 4), utilizando el método de transmisión directa por ser el más preciso.

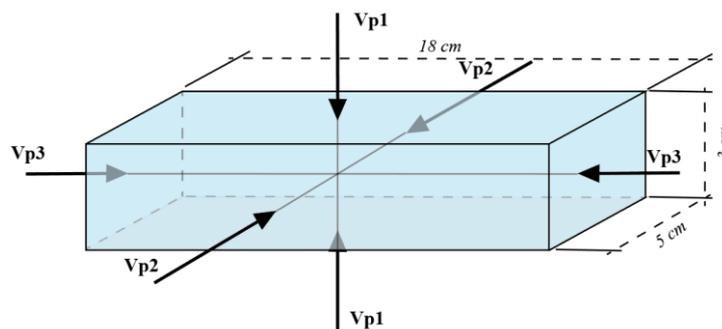


Figura 4. Esquema que representa las medidas de la velocidad de propagación de ultrasonidos ( $V_p$ ) en tres direcciones ortogonales de una probeta normalizada.

El equipo empleado proporcionó medidas de velocidad y tiempo de llegada de la onda, automáticamente y a tiempo real en su pantalla. Se equipó para esa ocasión con transductores de ondas P de 250kHz (con longitud de onda de 14'8mm y 7mm de tamaño de grano máximo del objeto a ensayar), óptimos para su aplicación en materiales de grano fino, ladrillos refractarios y rocas. Se realizaron tres medidas en cada dirección para cada una de las probetas de la colección, en estado inalterado, se les aplicó un tratamiento estadístico y se obtuvieron los valores promedio.

Los valores obtenidos se identificaron como:  $V_{p1}$  (velocidad de ondas longitudinales paralela al plano de estratificación según la dirección más corta de la probeta en m/s),  $V_{p2}$  (velocidad de ondas longitudinales paralela al plano en m/s) y  $V_{p3}$  (velocidad perpendicular al plano de estratificación según la dirección más larga de la

probeta en m/s). Los resultados se complementaron con valores de anisotropía estructural AM (total) y Am (relativa) siguiendo la metodología propuesta por (Guyarde y Denis, 1986).

Esta técnica permite conocer la velocidad de propagación característica de cada litología estudiada, en estado inalterado, ya que los datos varían según la composición mineralógica, el volumen de poros y fisuras (Ersen et al.,1995), y el contenido de humedad de la muestra (aumentando la velocidad por la presencia de humedad (Martín, 1990)). Se estableció una correlación entre los demás parámetros petrofísicos de las litologías inalteradas y la velocidad de propagación de la onda en su dirección de máxima elongación por ser la medida más representativa. Aprovechando el diferente comportamiento de la velocidad en función de la humedad, se complementó el ensayo de cambio dimensional (*apartado 5.5.5*), con datos de velocidad de propagación de ondas transversales y de emisión acústica.

#### **5.5.2.2 Coeficiente de poisson ( $u$ ):**

Se calculó para todas las probetas utilizando la siguiente ecuación [ $u = (V_p^2 - 2V_s^2) / (2V_p^2 - V_s^2)$ ] (Blake et al., 2019), donde;  $u$ = coeficiente de poisson,  $V_p$ = velocidad de onda longitudinal (m/s) y  $V_s$ = velocidad de onda transversal (m/s). Previamente se realizaron las medidas de velocidad de propagación de ondas ultrasónicas transversales, siguiendo la misma metodología que en la medición de las ondas longitudinales y acoplando los transductores de ondas S de 250khz.

#### **5.5.2.3 Módulo de elasticidad dinámico por ultrasonidos (MOE ultrasonidos):**

El módulo de elasticidad dinámico de un material se determinó debido a la relación existente entre la velocidad de ondas sísmicas y la constante elástica del material. En este apartado se calcula MOE ultrasonidos utilizando la fórmula propuesta por Rosell y Cantalapiedra, (2011).

- [ $MOE_{US} = \rho (1+u) (1-2u) V_{US}^2 / (1-u)$ ], donde;  $MOE_{US}$ = módulo de elasticidad dinámico (kg/m. s<sup>2</sup>),  $\rho$ = densidad del material (g/cm<sup>3</sup>),  $V_{US}$ = velocidad de onda longitudinal (m/s) y  $u$ = coeficiente de Poisson.

### 5.5.3 EMISIÓN SONORA

Para llevar a cabo el presente estudio se ha utilizado un sonómetro profesional, modelo Svan 977, junto a su software adjunto para el análisis gráfico del espectro de frecuencia de cada probeta.

Al representar una onda sonora es frecuente pensar en gráficas *energía-tiempo*. En el caso de sonidos simples, en las gráficas energía-tiempo además de ver la amplitud de la onda, también puede llegar a identificarse las frecuencias. Sin embargo, el sonido que emite una probeta de roca al ser golpeada consta de muchas frecuencias (sonido complejo) y son difíciles de identificar en una gráfica de este tipo. Para analizar la emisión sonora del material pétreo y conocer las frecuencias que componen el sonido con sus correspondientes niveles de presión sonora, se recurrió al análisis del espectro de frecuencias. El espectro de frecuencias es una representación gráfica del sonido en la que intervienen tres variables diferentes (Figura 5); frecuencia (Hz), presión sonora (dB) y tiempo (s).

En este apartado se analizaron espectros de frecuencias compuestos por 1601 bandas de frecuencias, para determinar la frecuencia que más tarda en disiparse, también denominada frecuencia fundamental. Esta frecuencia fundamental es también la frecuencia de mayor presión sonora.

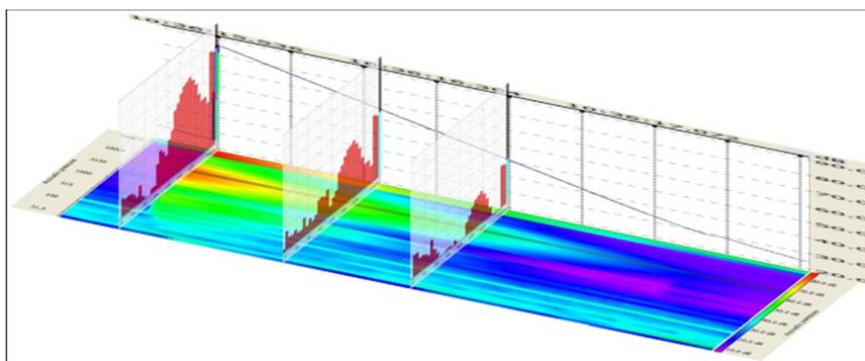


Figura 5: Representación del sonido de una probeta de alabastro tras ser golpeada, dónde; el eje X, Y, Z representan el tiempo, la banda de frecuencias y el nivel de presión sonora. La frecuencia fundamental es de 5000Hz y la presión sonora de 80,1 dB. Los planos rojos corresponden a espectros de frecuencia (presión sonora/frecuencia) registrados a intervalos de 500 milisegundos.

### 5.5.3.1 Frecuencia Fundamental

Para excitar las probetas y activar su vibración, se golpearon empleando un actuador de madera recubierto con goma. El impacto se realizó en la parte central de la cara superior de las probetas y siempre con la misma intensidad, registrando en este impacto el espectro de frecuencias de mayor presión sonora (intensidad en dB).

Utilizando la opción del sonómetro para medir el sonido aplicando una transformada rápida de Fourier (FFT), se realizaron tres medidas de la emisión sonora en cada una de las probetas de la colección. La transformada de Fourier la realiza el sonómetro de manera automática, representado gráficamente cada medida en forma de espectro de frecuencia con rango de 0Hz a 20000Hz. Para obtener el valor de la frecuencia fundamental, cada espectro se analizó individualmente, identificando manualmente la frecuencia con mayor presión sonora (Figura 6). Finalmente, se les aplicó un tratamiento estadístico para obtener el valor promedio de cada probeta y, desde un punto de vista más amplio, el valor promedio de cada litología. En esta primera etapa del proyecto; el objetivo del ensayo es calcular el coeficiente de correlación entre el valor de frecuencia fundamental y los valores de propagación ultrasónica.

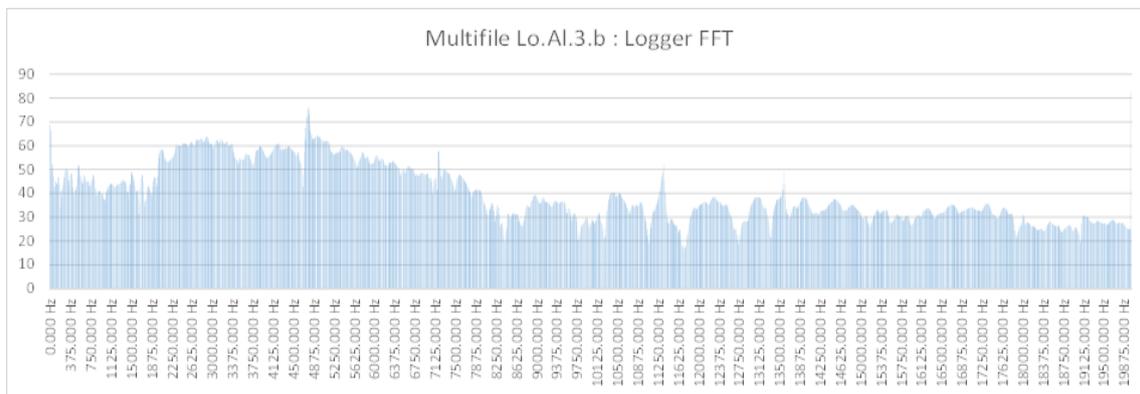


Figura 6. Representación de la señal múltiple para un ensayo FFT en una probeta de alabastro de dimensiones 15x5x3cm. Frecuencia fundamental=4775Hz y Presión sonora=76'23 dB. (Eje Y: Presión sonora) (Eje X: Frecuencia).

### 5.5.3.2 Modulo de elasticidad dinámico

Se calculó el módulo de elasticidad dinámico (MOE) mediante el valor de frecuencia de resonancia fundamental. Siguiendo las especificaciones de la norma

UNE-EN 14146 (2004), se calcularon dos módulos de elasticidad diferentes en función de si la frecuencia fundamental se obtuvo como consecuencia de una vibración de flexión (módulo de elasticidad dinámico de flexión) o longitudinal (módulo de elasticidad dinámico longitudinal). El módulo de elasticidad longitudinal y de flexión vienen dados por las ecuaciones:  $[E_{dL} \text{ (en MPa)} = 4 \cdot 10^{-6} \cdot l^2 \cdot F_L \cdot \rho]$  y  $[E_{dF} \text{ (en MPa)} = 15 \cdot 136 \cdot 10^{-6} \cdot l^2 \cdot F_F \cdot \rho \cdot C]$ , donde;  $l$  es la longitud de la probeta expresada en metros,  $\rho$  es la densidad en  $\text{kg/m}^3$ ,  $F_L$  es la frecuencia fundamental longitudinal en Hz,  $F_F$  es la frecuencia fundamental de flexión en Hz y  $C$  es un factor de correlación que depende del coeficiente de Poisson ( $C = 1'409$  a  $1'451$  para  $\nu$  variando de  $0'14$  a  $0'30$ ). Se midió en todas las probetas de la colección y se correlacionarán los resultados con los valores de módulo de elasticidad obtenidos por la técnica de ultrasonidos.

### **5.5.4 PROPIEDADES HÍDRICAS**

Se calculó la densidad (aparente y real) y porosidad (abierta y total), en cada una de las litologías estudiadas, según la norma UNE-EN 1936 (2007). La absorción y saturación en agua, parámetro muy relevante en los daños por heladas, se calculó siguiendo el protocolo de la norma UNE-EN 13755 (2008), tomando medidas tras una hora, dos días y siete días de dar comienzo el ensayo hídrico. Estas propiedades determinan el comportamiento de las probetas frente a fenómenos de interacción con el agua: Poros y espacios vacíos son un componente textural primordial en un material que puede colocarse a la intemperie, y su volumen y distribución determinan la cantidad de agua retenida, así como la velocidad a la que se desarrolla.

### **5.5.5 CAMBIO DIMENSIONAL**

Para eliminar cualquier imperfección o surco resultante del corte de sierra resultante de tallar las probetas, se lijaron cada una de las caras con una lija de grano medio (900) y grano fino (1200).

El ensayo consistió en la cuantificación de la expansión/retracción de las probetas, en dirección perpendicular a las caras de medida (Figura 7), por efectos hídricos o deterioro.

Existen varios métodos para llevarlo a cabo; por inmersión total de las probetas en agua destilada, por succión es una de las caras de la probeta, por inmersión parcial y por absorción de humedad en cámara climática. En este caso se utilizó el método de la inmersión total, por ser el que alcanza mayores valores de expansión en un intervalo más corto de tiempo.

El equipo empleado fue un micrómetro digital con una precisión de 0'001mm, anclado sobre una superficie metálica totalmente horizontal. Se tomaron medidas al inicio y final del ensayo, sobre cuatro probetas de cada litología y en sus caras a. y e. (Figura 7). En las determinaciones se siguió el protocolo de la norma RILEM (1980).

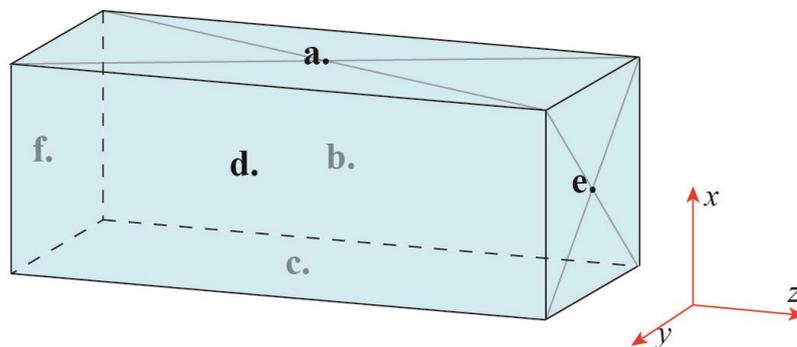


Figura 7. Designación de las caras de la probeta en el ensayo de expansión volumétrica. Las caras *a.* y *e.* se utilizaron como superficie de medida (en contacto con el micrómetro) y las caras *f.* y *c.* como superficie de apoyo. La cara *d.* no se midió debido al poco material a lo largo del Eje Y.

Aprovechando la repetibilidad de los ensayos no destructivos, simultáneamente al cambio dimensional se realizaron medidas de emisión sonora y de velocidad de propagación de ondas en las probetas totalmente saturadas de agua, para determinar la influencia del estado de saturación en las medidas acústicas.

### **5.5.6 PROCESO DE ENVEJECIMIENTO: ENVEJECIMIENTO ACELERADO**

Consistió en la simulación en laboratorio de las principales causas de alteración, mediante ciclos agresivos y concentrados en el tiempo. El resultado en las modificaciones texturales y la pérdida de masa, determinan el comportamiento del material frente a los agentes de alteración. El periodo de afectación de las probetas fue de 35 días, consiguiendo un total de 25 ciclos de envejecimiento.

**5.5.6.1 Cristalización de sales:** Se trata de un ensayo muy agresivo, cuyos factores y efectos sobre los materiales son bien conocidos (Alonso et all, 1987). El envejecimiento constó de ciclos de 24 horas con una etapa de calentamiento durante 6 horas (Figura 8), una de temple a la intemperie durante 3 horas y una de inmersión en la solución salina durante 13 horas. Se siguió la norma UNE-EN 12370 (1999) modificando la duración de las etapas.



Figura 8. Horno calefactor con probetas sometidas a choque térmico y cristalización de sales

**5.5.6.2 Choque térmico:** El procedimiento experimental de afectación de las probetas (Figura 9) constó de ciclos de 24 horas con una etapa de calentamiento (en horno) a 105° durante 9 horas y otra de enfriamiento (en agua) a 20° durante 15 horas. Se siguió la norma UNE-EN 14066 (2003) modificando la duración de las etapas.



Figura 9. Probetas sometidas a choque térmico.

**5.5.6.3 Hielo – deshielo (heladicidad):** La etapa de hielo abarcó 9 horas, donde las probetas permanecieron en el congelador (Figura 10). La etapa de deshielo se llevó a cabo a temperatura ambiente completando el ciclo con las 15 horas restantes. Mediante

este ensayo se estimó la durabilidad de una muestra sometida al efecto de las heladas, muy influyente en ambientes fríos y húmedos. Se siguió la norma UNE-EN 12371 (2002) modificando la duración de las etapas.



Figura 10. Probetas medidas en el congelador durante la etapa de hielo.

### 5.5.7 ÍNDICE DE SUSCEPTIBILIDAD AL DETERIORO

Tras las pruebas de envejecimiento hemos establecido un “Índice de sensibilidad al deterioro” *-Isd-* para cada litología. El índice es sólo relativo al universo de rocas estudiado y se calcula de la siguiente manera:

Se establecen 5 términos con valores que oscilan de 0 a 10 siendo cero ningún deterioro y 10 el máximo deterioro medido en el universo estudiado.

Término A: Pérdida de velocidad de propagación del sonido tras el ensayo/s de envejecimiento

Término B: Pérdida de frecuencia fundamental tras el ensayo/s de envejecimiento

Término C: Pérdida de peso tras el ensayo de envejecimiento por choque térmico

Término D: Pérdida de peso tras el ensayo de envejecimiento por heladicidad

Término E: Pérdida de peso tras el ensayo de envejecimiento por cristalización de sales

Así cada litología puede tener un valor de 0 (ningún deterioro) a 60 (máximo deterioro relativo en el conjunto de rocas estudiado).

El índice de sensibilidad al deterioro puede descomponerse en dos términos, el término “vibracional” compuesto por la suma de los términos A+B y el término gravitacional que sería la suma de las tres pérdidas de peso (C+D+E). El considerar los dos términos por separado puede ser interesante para la discusión y extracción de conclusiones.

## 6. RESULTADOS

### 6.1 Ultrasonidos

El estudio de la propagación de ondas ultrasónicas arrojó los resultados indicados en la tabla 3. Se han incluido los parámetros de velocidad de las ondas P (medido tanto en muestras secas como saturadas en agua y representada gráficamente en la Figura 11 y 12) y ondas S, así como de la anisotropía absoluta y relativa (representadas gráficamente en la Figura 13).

Roca	Vp (m/s) _ muestras secas						Vs (m/s)_ muestras secas		Vp (m/s) _ muestras saturadas				Anisotropía (%)			
	Eje Z		Eje X		Eje Y		Eje Z		Eje Z		Eje X		Absoluta		Relativa	
	Valor medio	Desviación estándar	Valor medio	Desviación estándar	Valor medio	Desviación estándar	Valor medio	Desviación estándar	Valor medio	Desviación estándar	Valor medio	Desviación estándar	Valor medio	Desviación estándar	Valor medio	Desviación estándar
Alabastro Gelsa	5029,6	289,0	5564,9	508,5	6237,0	179,4	2930,2	168,5	5286,6	34,4	5698,9	69,2	15,6	5,8	4,9	1,7
Travertino Nogal	2962,1	797,9	5906,0	671,1	6682,1	1377,3	1720,8	465,2	4077,3	868,3	6044,5	185,4	53,6	11,9	8,5	6,2
Piedra Pueyo	4927,5	299,4	6517,5	321,6	8488,9	937,6	2872,6	174,6	5202,0	116,0	5517,6	73,4	34,1	6,1	12,8	6,5
Travertino Teruel	4809,6	611,0	6880,9	355,0	7683,7	877,1	2803,9	356,2	5427,9	500,5	6217,1	207,6	33,5	10,4	5,2	5,3
Caliza Alto Aragón	5511,4	451,7	6444,4	184,8	6775,6	477,7	3213,1	263,3	5845,4	38,5	6210,4	44,5	17,2	6,7	2,4	3,8
Caliza Campanil	4196,9	529,0	4380,6	409,8	4774,9	358,9	2446,7	308,4	4240,9	174,3	4306,8	170,0	8,6	6,3	4,4	2,7
Arenisca Rodeno	2664,1	622,5	3103,9	307,9	3345,5	196,7	1553,1	362,9	3341,0	410,3	3526,0	292,7	18,3	16,3	3,9	3,0
Caliza Calatorao	5698,4	513,7	6560,8	576,6	7014,8	547,9	3322,1	299,5	6036,0	230,4	6458,5	288,1	17,5	6,9	2,7	2,1
Granodiorita	4486,8	337,4	4483,7	374,3	4971,9	1263,0	2615,7	196,7	5169,6	342,9	5856,8	330,4	10,5	9,1	3,8	8,6
Basalto	6037,5	119,1	6088,9	86,9	6144,1	217,4	3519,8	69,4	6300,1	110,4	6697,0	150,9	2,2	2,2	1,2	1,0

Tabla 3. Valores medios de la velocidad de propagación del sonido en las tres direcciones del espacio y anisotropía de esta variable. La totalidad de los valores pueden verse en el anexo 3.

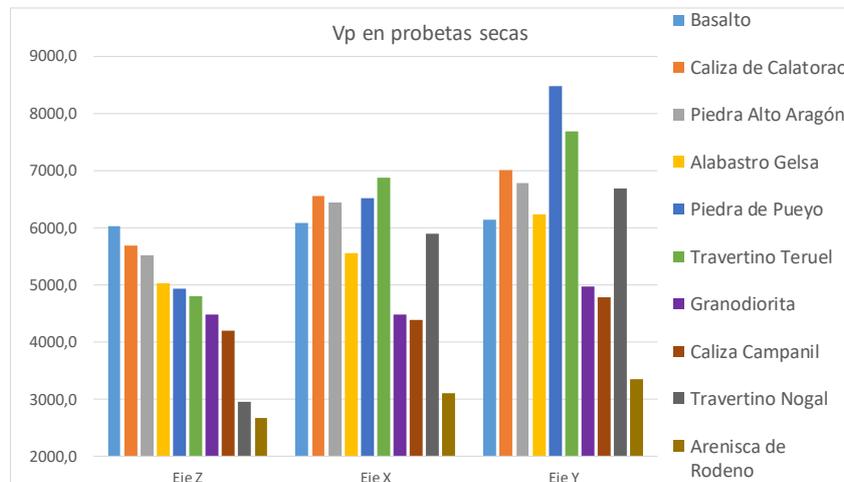


Figura 11. Representación gráfica de los valores de ultrasonidos (Vp) en las tres direcciones ortogonales de la probeta seca, antes del envejecimiento artificial.

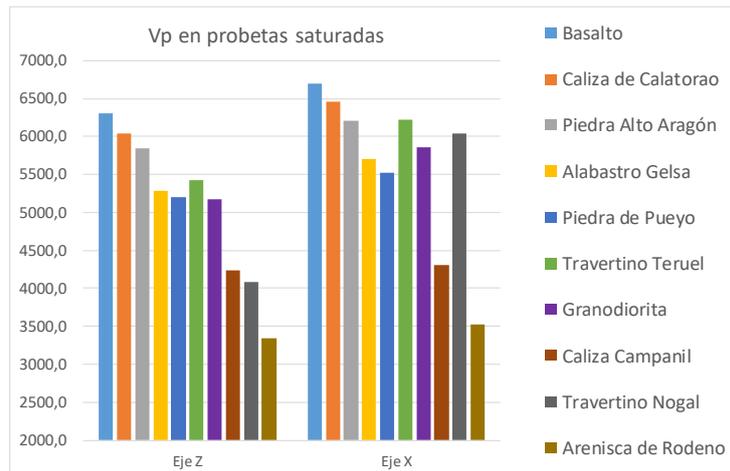


Figura 12. Representación gráfica de los valores de ultrasonidos ( $V_p$ ) en dos direcciones ortogonales de la probeta saturada en agua (Eje Z y X), antes del envejecimiento artificial.

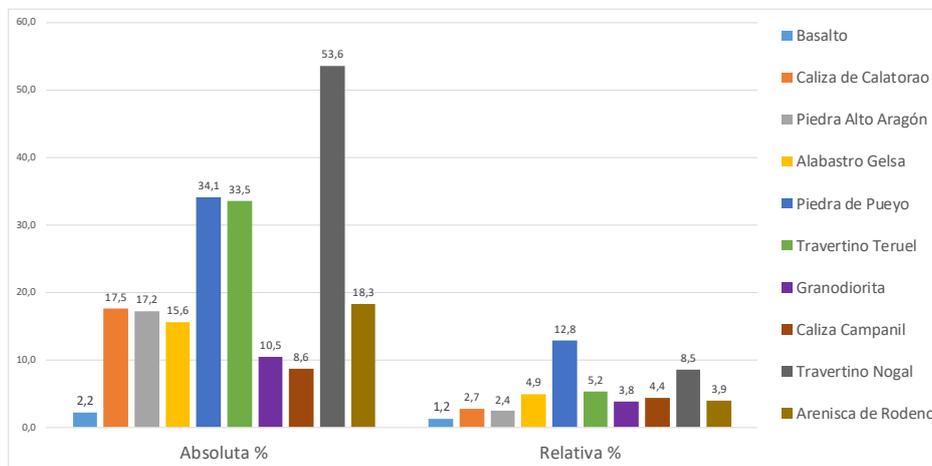


Figura 13. Representación gráfica de las anisotropía absoluta y relativa, antes del envejecimiento artificial, antes del envejecimiento.

## 6.2 Emisión sonora: Frecuencia fundamental.

En la tabla 4 se han recogido los valores medios de emisión acústica en forma de frecuencia fundamental flexural y longitudinal del material seco, y frecuencia fundamental flexural del material saturadas en agua. La variación del valor de frecuencia fundamental medida en probetas saturadas en agua respecto a su medida en secas es insignificante.

	Emisión sonora en roca sana y seca				Emisión sonora en roca sana y saturada	
	Frecuencia fundamental flexural (Hz)		Frecuencia fundamental longitudinal (Hz)		Frecuencia fundamental flexural (Hz)	
	Valor medio	Desviación estándar	Valor medio	Desviación estándar	Valor medio	Desviación estándar
Alabastro Gelsa	3570,05	116,47	5262,76	77,12	3525,75	206,47
Travertino Nogal	3709,80	398,03	5400,00	552,92	3741,90	310,03
Piedra de Pueyo	4018,42	153,06	5882,01	288,04	4000,57	131,06
Travertino Teruel	4259,03	122,83	6309,72	167,00	4250,45	201,83
Piedra Alto Aragón	4672,92	250,84	6691,67	159,96	4660,73	220,84
Piedra Campanil	3412,96	205,46	5119,66	353,61	3426,04	250,46
Arenisca Rodeno	2572,92	345,37	4076,85	399,73	3600,28	405,37
Caliza Calatorao	4522,15	95,99	6578,51	199,56	4506,11	100,99
Granodiorita	3885,83	381,37	6027,08	600,29	3820,21	371,37
Basalto	4900,83	132,20	7559,17	415,81	4702,30	152,20

Tabla 4. Frecuencia fundamental flexural y longitudinal de probetas secas, y frecuencia fundamental flexural de probetas saturadas en agua, medidas antes del envejecimiento artificial. Son los valores promedio de cada litología, antes del envejecimiento artificial. Lista de valores experimentales en el anexo 4.

En la figura 14 se ha representado los valores medios de frecuencia fundamental (longitudinal y flexural) y en la Figura 15 los datos de frecuencia fundamental de las catorce probetas medidas en cada litología.

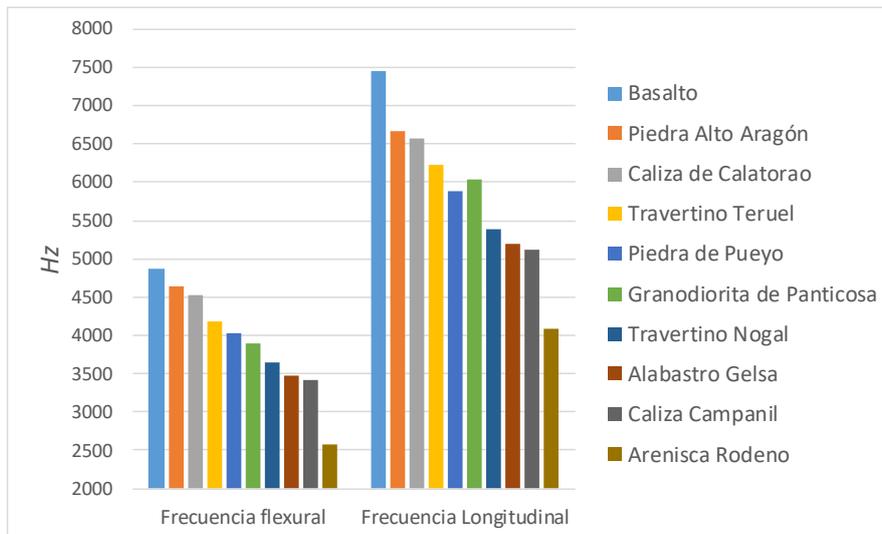


Figura 14. Representación gráfica de los valores medios de la frecuencia fundamental (flexural y longitudinal) de cada litología, antes del envejecimiento artificial.

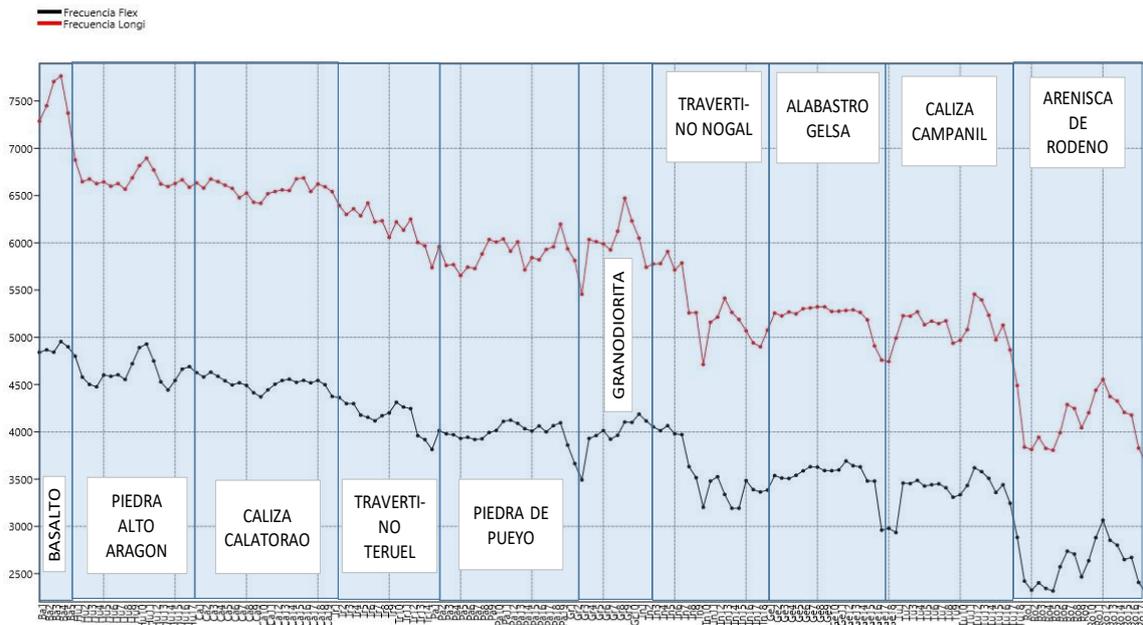


Figura 15. Representación de los valores de frecuencia en todas las probetas de las litologías ensayadas, antes del envejecimiento artificial. Marcadores rojos son los valores de frecuencia fundamental longitudinal y marcadores negros los valores de frecuencia fundamental flexural.

### 6.3 Constantes elásticas

La tabla 5 muestra los valores medios de módulos elásticos dinámicos calculados, en cada una de las litologías, según los criterios establecidos en la metodología. Al tomar de base el módulo elástico calculado con métodos ultrasónicos, la colección de probetas abarca un rango de valores que van desde los 93MPa del Basalto a los 15MPa que caracterizan a la arenisca de Rodeno (Figura 16).

	MOE calculado con el valor de velocidad de ultrasonidos (MPa)		MOE calculado con el valor de frecuencia fundamental (MPa)			
	MOE ultrasonidos		MOE Flexural		MOE Longitudinal	
	Valor medio	Desviación estándar	Valor medio	Desviación estándar	Valor medio	Desviación estándar
Alabastro Gelsa	49,48	5,38	58,54	1,89	15,89	0,24
Travertino Nogal	19,01	10,48	62,13	7,68	16,89	1,64
Piedra de Pueyo	55,27	6,55	75,40	2,61	20,32	0,92
Travertino Teruel	49,41	12,76	75,06	2,30	20,53	0,83
Piedra Alto Aragón	69,33	10,81	88,65	4,69	23,38	0,51
Caliza campanil	32,76	7,21	51,41	3,05	14,20	0,96
Arenisca Rodeno	15,10	6,39	43,54	5,73	12,71	1,22
Caliza de Calatorao	72,58	12,60	83,47	1,67	22,36	0,67
Granodiorita	46,54	6,94	73,92	5,92	21,12	1,88
Basalto	92,78	3,66	105,79	3,99	30,04	1,52

Tabla 5. Valores medios del módulo de elasticidad dinámico calculado con ultrasonidos (MOE ultrasonidos), con la frecuencia fundamental flexural (MOE flexural) y con la frecuencia fundamental longitudinal (MOE longitudinal), antes del envejecimiento artificial. La totalidad de los valores de cada litología pueden verse en el anexo 5.

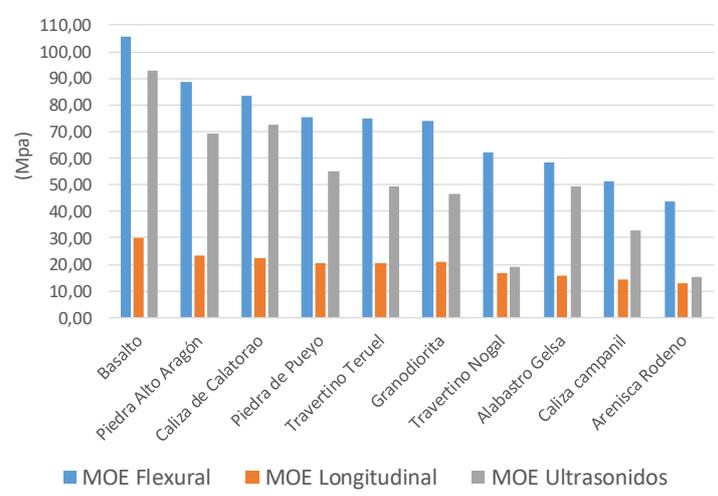


Figura 16. Representación de los valores medios del módulo de elasticidad dinámico calculado con ultrasonidos (MOE ultrasonidos), con la frecuencia fundamental (MOE flexural y MOE longitudinal).

#### 6.4 Parámetros hídricos de muestras de cantera

En la tabla 6 se han recogido los diferentes valores medios de densidad y porosidad según la litología, medidos antes del envejecimiento artificial.

Roca	Densidad aparente geométrica		Densidad aparente con métodos hídricos		Densidad picnómetro	Porosidad abierta		Porosidad inaccesible		Porosidad total	
	kg/m3		kg/m3		kg/m3	%		%		%	
	Valor	Desviación estándar	Valor	Desviación estándar	Valor	Valor	Desviación estándar	Valor	Desviación estándar	Valor	Desviación estándar
Alabastro Gelsa	2274,6	11,5	2308,8	0,8	2317,7	0,20	0,03	0,18	0,02	0,38	0,04
Travertino Nogal	2323,7	64,4	2400,7	41,8	2681,3	5,04	1,01	5,43	0,79	10,46	1,56
Piedra Pueyo	2671,2	12,0	2685,8	3,6	2771,1	1,63	0,09	1,45	0,04	3,08	0,13
Travertino Teruel	2436,2	36,4	2491,3	16,7	2694,6	3,23	0,62	4,31	0,24	7,54	0,62
Piedra Alto Aragón	2677,8	9,3	2685,1	7,1	2689,0	0,97	0,21	-0,83	0,09	0,14	0,26
Caliza campanil	2147,1	90,0	2169,3	93,9	2694,2	15,29	3,10	4,19	0,52	19,48	3,49
Arenisca Ródeno	2376,1	29,4	2395,4	33,0	2645,1	5,42	0,73	4,02	0,54	9,44	1,25
Caliza Calatorao	2658,5	139,1	2626,1	24,1	2716,7	2,13	0,85	1,20	0,10	3,34	0,89
Granodiorita	2671,1	28,8	2723,4	15,5	2755,6	0,66	0,25	0,51	0,34	1,17	0,56
Basalto	2994,1	28,0	3012,5	28,2	3064,0	0,65	0,28	1,03	0,67	1,68	0,92

Tabla 6. Valores medios de densidad y porosidad según la litología (medidas sobre un total de seis probetas para cada litología), antes del envejecimiento artificial. Lista de valores experimentales en Anexo 6.

Las densidades aparentes geométrica e hídrica son parecidas, aunque por el método de cálculo la hídrica es sistemáticamente mayor. La densidad mineral del polvo de roca es mayor (Figura 17).

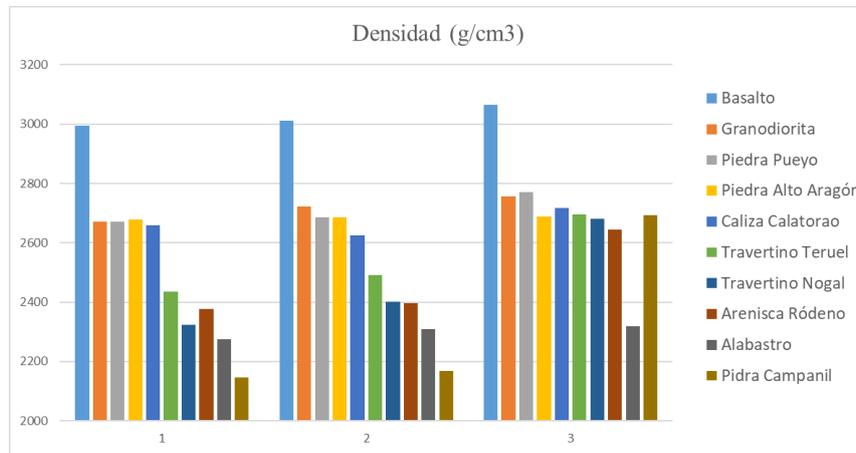


Figura 17. Representación gráfica de los valores de densidad (1-Densidad aparente geométrica, 2-Densidad aparente calculada con métodos hídricos y 3- Densidad del polvo de roca calculada con picnómetro), antes del envejecimiento artificial.

La roca que presenta una mayor porosidad es la Caliza Campanil (19,5 %) mientras que los menores valores de porosidad se registraron en la piedra del alto Aragón y en el alabastro, con una porosidad total del 0,14 y 0,38% respectivamente. El resto de las rocas presentan unos valores de porosidad entre 1,2% y 10,5% (Figura 18).

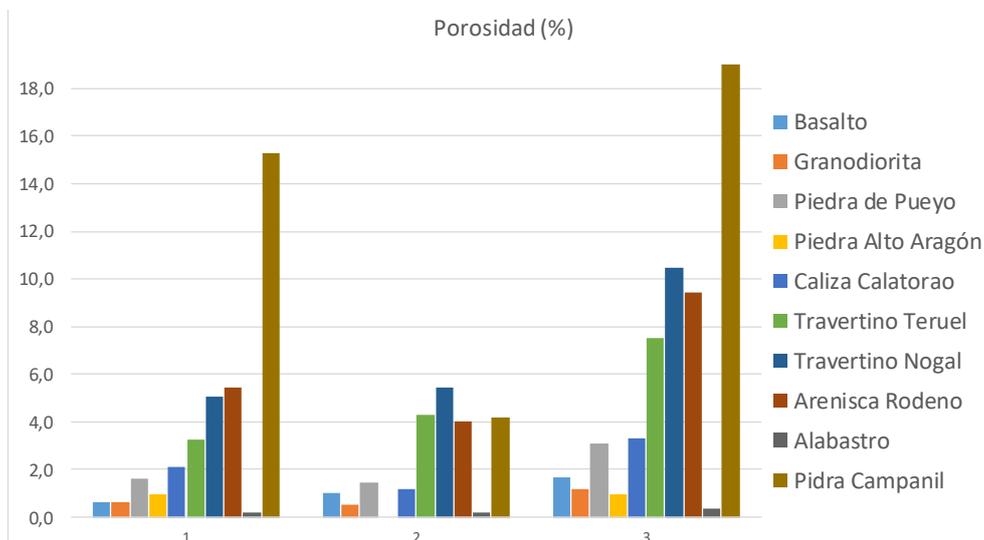


Figura 18. Representación gráfica de los valores medios de porosidad de las diez litologías (1- Abierta, 2-Inaccesible y 3- Total), antes del envejecimiento artificial.

Los valores medios de porosidad inaccesible relativa de las litologías estudiadas se han representado en la Figura 19.

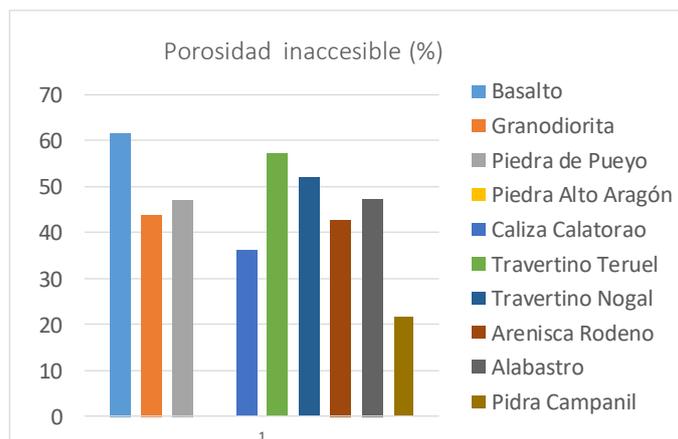


Figura 19. Representación gráfica de los valores medios de porosidad inaccesible relativa de cada litología estudiada, antes del envejecimiento artificial.

### 6.5 Análisis porométrico

En la Tabla 7 se han registrado los valores medios de absorción y saturación de agua de cada litología medidos antes del envejecimiento artificial.

Roca	W- 1hora		W- 2días		W- 7días		Saturación- 1h		Saturación- 2días		Saturación- 7días	
	%		%		%		%		%		%	
	Valor	Desviación estándar	Valor	Desviación estándar	Valor	Desviación estándar	Valor	Desviación estándar	Valor	Desviación estándar	Valor	Desviación estándar
Alabastro Gelsa	0,07	0,01	0,07	0,01	0,09	0,01	74,78	15,37	82,22	10,90	100	14,98
Travertino Nogal	1,31	0,30	1,83	0,41	2,10	0,45	62,08	14,06	87,11	19,61	100	21,31
Piedra de Pueyo	0,17	0,01	0,58	0,04	0,61	0,04	28,36	1,47	95,52	7,32	100	6,26
Travertino Teruel	0,77	0,20	1,11	0,23	1,30	0,26	59,65	15,03	85,20	17,85	100	19,86
Piedra Alto Aragón	0,08	0,02	0,24	0,06	0,36	0,08	23,24	5,12	66,81	16,10	100	21,40
Piedra Campanil	6,35	1,70	6,80	1,85	7,12	1,85	89,16	23,88	95,58	25,97	100	26,05
Arenisca Rodeno	1,73	0,25	2,01	0,28	2,27	0,34	76,34	10,85	88,77	12,28	100	14,91
Caliza Calatorao	0,19	0,07	0,61	0,29	0,81	0,33	23,26	8,92	74,72	35,35	100	40,51
Granodiorita	0,19	0,08	0,21	0,09	0,24	0,09	79,31	33,14	87,93	36,81	100	38,45
Basalto	0,09	0,07	0,15	0,09	0,22	0,10	43,31	32,32	68,73	41,65	100	44,47

Tabla 7. Valores medios de absorción y saturación de agua medidos en las litologías estudiadas (a intervalos de una hora, dos días y siete días), antes del envejecimiento artificial. La totalidad de los valores pueden verse en el anexo 7.

En la Figura 20 se han representado los porcentajes medios de absorción de agua de cada litología.

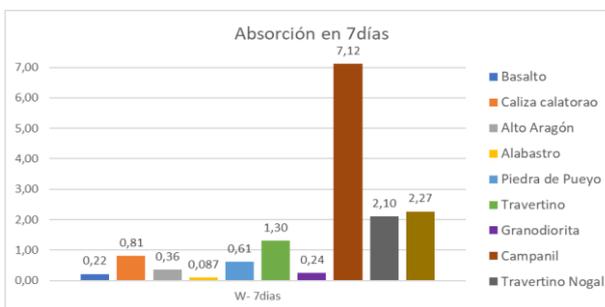
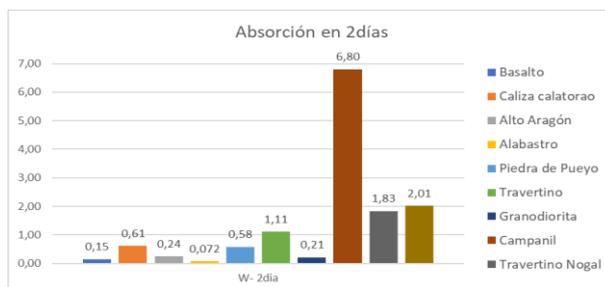
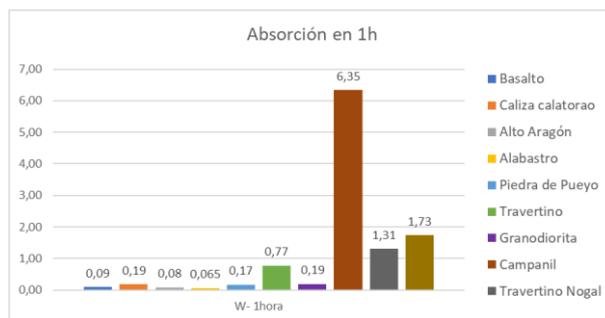


Figura 20. Representación del valor medio de absorción en cada una de las litologías estudiadas, a intervalos de 1 hora, dos días y siete días.

En la figura 21 se representa la medida de saturación de las litologías estudiadas, tras una hora de inmersión de las probetas en agua. El 40% de las litologías alcanzaron las tres cuartas partes de su capacidad de saturación.

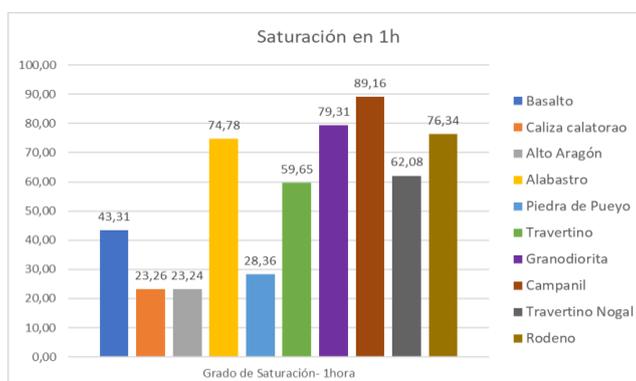


Figura 21. Representación de la saturación en la primera hora de ensayo en cada una de las litologías estudiadas.

## 6.6 Cambio dimensional

En la tabla 8 se han recogido los valores medios de cambio dimensional por inmersión total en agua (expansión hídrica) de probetas de cada litología, expresado en micras y en tanto por millón. A simple vista (Figura 22) lo más llamativo son los valores negativos de expansión cuantificados en el Travertino de Teruel, así como la inesperada y elevada expansión de la Piedra de Pueyo.

Roca	Cambio dimensional				
	Medida expresada en micras		Medida expresada en tantos por millón		
	Eje Largo Z	Eje Ancho X	Eje Largo Z	Eje Ancho X	isotropía relativa
Alabastro Gelsa	0,008	0,004	60,5	74,285	10,2
Travertino Nogal	0,016	0,011	88,9	234,964	45,1
Piedra Pueyo	0,042	0,017	274,5	391,448	17,6
Travertino Teruel	-0,003	-0,006	-18,3	-113,369	72,2
Piedra Alto Aragón	0,020	0,009	112,1	211,966	30,8
Caliza Campanil	0,009	0,004	52,9	164,799	51,4
Arenisca Rodeno	0,016	0,009	82,2	177,785	36,8
Caliza Calatorao	0,007	0,004	36,4	80,921	38,0
Granodiorita	0,014	0,010	77,8	195,340	43,0
Basalto	0,009	0,006	48,0	108,327	38,6

Tabla 8. Valores medios del cambio dimensional por expansión hídrica, antes del envejecimiento artificial. La totalidad de las medidas pueden verse en el anexo 8.

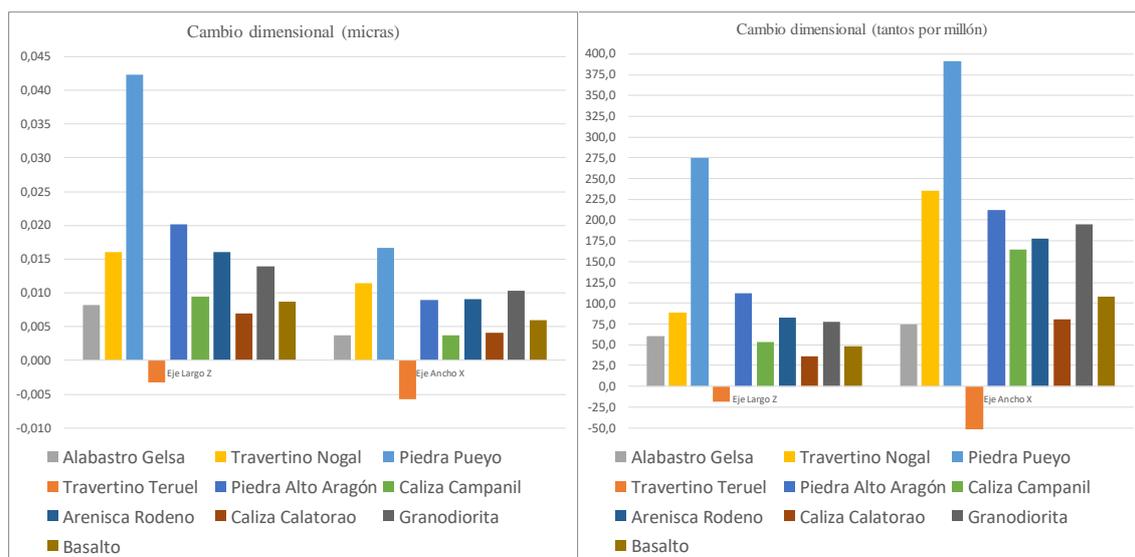


Figura 22. Izquierda: Representación gráfica del cambio dimensional medido en micras. Derecha: Representación gráfica del cambio dimensional medido en tantos por millón.

### 6.7 Envejecimiento acelerado: cristalización de sales.

El deterioro visual de las probetas se muestra en la figura 23. Los resultados del estudio de la variación de las propiedades petrofísicas (masa de las probetas, velocidad de ultrasonidos, frecuencia fundamental y constantes elásticas) tras finalizar el ensayo de envejecimiento acelerado por cristalización de sales se muestran en la tabla 9 y figura 24.

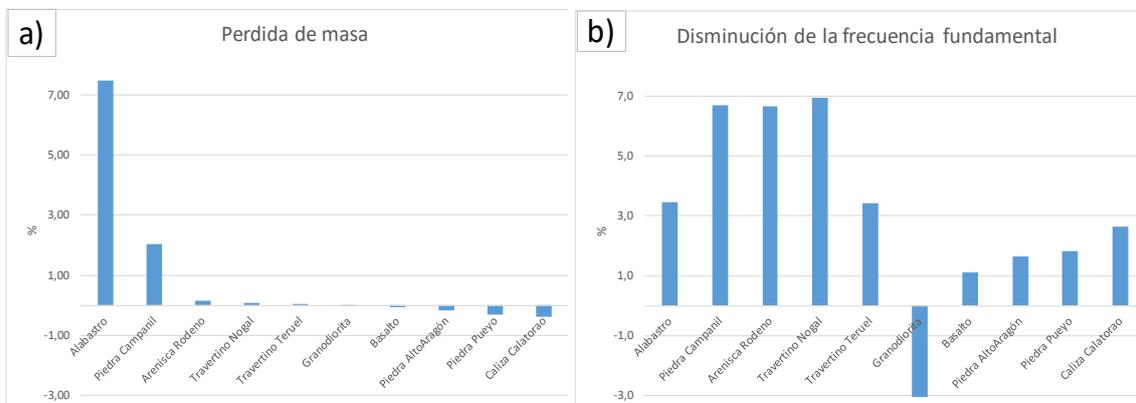


Figura 23. Aspecto visual de las probetas afectadas tras un envejecimiento acelerado por cristalización de sales.

A	Masa final de probetas envejecidas			Velocidad de propagación de ondas longitudinales (Vp)								
				Eje Z			Eje X			Eje Y		
	Valor medio (g)	Variación (g)	Variación (%)	Valor Medio (m/s <sup>2</sup> )	Variación (m/s <sup>2</sup> )	Variación (%)	Valor Medio (m/s <sup>2</sup> )	Variación (m/s <sup>2</sup> )	Variación %	Valor Medio (m/s <sup>2</sup> )	Variación (m/s <sup>2</sup> )	Variación (%)
Alabastro	578,93	46,84	7,49	3593,7	1626,0	31,2	3698,0	1975,0	34,8	4500,0	1690,7	27,3
Travertino Nogal	645,74	0,53	0,08	1554,3	1921,1	55,3	4146,0	1004,7	19,5	4369,3	2171,0	33,2
Piedra Pueyo	730,53	0,00	0,00	2594,0	1638,0	38,7	4934,0	2014,0	29,0	5058,3	3324,7	39,7
Travertino Teruel	727,58	0,26	0,04	4227,3	1638,3	27,9	5247,0	1617,3	23,6	5422,3	2533,7	31,8
Piedra AltoAragón	807,56	0,00	0,00	5672,0	-109,3	-2,0	5455,0	1004,0	15,5	4787,7	2094,0	30,4
Caliza campanil	568,38	11,77	2,03	2070,7	1992,0	49,0	3427,3	1148,0	25,1	2980,3	2151,3	41,9
Arenisca Rodeno	648,16	0,87	0,13	2425,0	687,0	22,1	2835,7	52,0	1,8	3158,0	103,3	3,2
Caliza Calatorao	743,06	0,00	0,00	3460,3	2368,1	40,6	5377,7	-890,0	-19,8	4924,0	1691,0	25,6
Granodiorita	743,57	0,00	0,00	3169,0	848,7	21,1	4887,3	-64,0	-1,3	4660,7	127,0	2,7
Basalto	920,81	0,00	0,00	5208,7	996,0	16,1	5556,3	532,3	8,7	6124,0	203,0	3,2

B	Frecuencia Fundamental			Constantes elásticas					
	Valor medio (Hz)	Variación (Hz)	Variación (%)	MOE por ultrasonidos			MOE por frecuencia		
				Valor Medio (MPa)	Variación (MPa)	Variación (%)	Valor Medio (MPa)	Variación (MPa)	Variación (%)
Alabastro	3475,00	125,00	3,5	25,19	27,94	52,6	56,47	2,03	3,5
Travertino Nogal	3795,83	283,34	6,9	4,90	19,59	80,0	64,14	4,79	6,9
Piedra Pueyo	3812,50	70,83	1,8	15,26	25,36	62,4	72,06	1,34	1,8
Travertino Teruel	4333,33	154,17	3,4	37,60	34,80	48,1	75,96	2,70	3,4
Piedra AltoAragón	4720,83	79,17	1,6	72,96	-2,78	-4,0	89,20	1,50	1,6
Caliza campanil	3183,33	229,17	6,7	7,85	22,39	74,0	26,99	1,94	6,7
Arenisca Rodeno	2329,17	166,67	6,7	11,90	7,70	39,3	21,81	1,56	6,7
Caliza Calatorao	4304,17	116,67	2,6	26,56	48,79	64,8	79,54	2,16	2,6
Granodiorita	3641,67	-129,17	-3,7	23,10	14,03	37,8	69,78	0,00	0,0
Basalto	4912,50	54,17	1,1	69,07	28,89	29,5	104,20	1,15	1,1

Tabla 9. Valores medios de las propiedades petrofísicas medidas tras un envejecimiento de las probetas por cristalización de sales y su variación respecto al estado inicial de las probetas de cada litología. A: masa de las probetas y velocidad de ultrasonidos en las tres direcciones ortogonales. B: frecuencia fundamental y constantes elásticas (MOE con técnicas ultrasónicas y con la frecuencia fundamental).



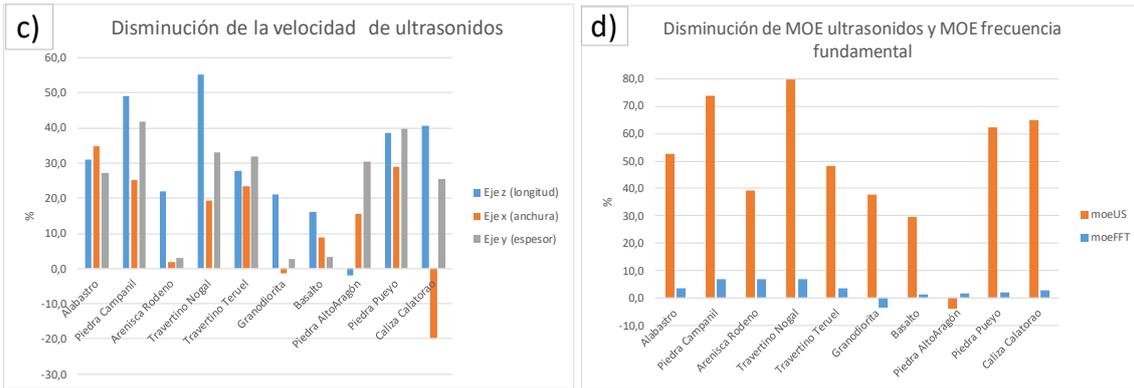


Figura 24. Representación gráfica de las variaciones petrofísicas tras los ensayos de cristalización de sales: (a) Pérdida de masa, (b) Disminución de la frecuencia fundamental, (c) Disminución de la velocidad de propagación de pulsos ultrasónicos en las 3 direcciones ortogonales y (d) Disminución del módulo de elasticidad dinámico calculado con ultrasonidos (MOE ultrasonidos) y calculado con la frecuencia fundamental (MOE flexural).

### 6.8 Envejecimiento acelerado: choque térmico.

El deterioro visual de las probetas se muestra en la figura 25. Los resultados del estudio de la variación de las propiedades petrofísicas (masa de las probetas, velocidad de ultrasonidos, frecuencia fundamental y constantes elásticas), tras finalizar el ensayo de envejecimiento acelerado por choque térmico se muestran en la tabla 10 y figura 26.



Figura 25. Aspecto visual de las probetas afectadas tras un envejecimiento acelerado por choque térmico.

A	Masa final de probetas envejecidas			Velocidad de propagación de ondas longitudinales (Vp)								
				Eje Z			Eje X			Eje Y		
	Valor medio (g)	Variación (g)	Variación (%)	Valor Medio (m/s <sup>2</sup> )	Variación (m/s <sup>2</sup> )	Variación (%)	Valor Medio (m/s <sup>2</sup> )	Variación (m/s <sup>2</sup> )	Variación %	Valor Medio (m/s <sup>2</sup> )	Variación (m/s <sup>2</sup> )	Variación (%)
Alabastro	617,11	5,56	0,89	2417,5	2014,2	45,4	2280,7	3414,0	60,0	4500,0	1690,7	27,3
Travertino Nogal	612,68	0,69	0,11	1720,7	376,7	18,0	4316,3	270,7	5,9	4369,3	2171,0	33,2
Piedra Pueyo	759,86	0,00	0,00	4372,0	550,7	11,2	4736,7	2007,3	29,8	5058,3	3324,7	39,7
Travertino Teruel	643,74	0,17	0,03	4566,0	668,0	12,8	5515,7	1254,3	18,5	5422,3	2533,7	31,8
Piedra AltoAragón	744,96	0,00	0,00	4616,0	827,3	15,2	4500,0	1878,0	29,4	4787,7	2094,0	30,4
Caliza campanil	591,29	1,09	0,18	4121,2	268,5	6,1	3937,0	531,0	11,9	2980,3	2151,3	41,9
Arenisca Rodeno	650,83	0,00	0,00	1539,7	585,7	27,6	2988,3	-50,3	-1,7	3158,0	103,3	3,2
Caliza Calatorao	740,95	0,00	0,00	4411,4	1423,3	24,4	5435,0	905,0	14,3	4924,0	1691,0	25,6
Granodiorita	747,53	0,00	0,00	4193,6	88,7	2,1	3778,3	138,0	3,5	4660,7	127,0	2,7
Basalto	923,22	0,00	0,00	5554,8	478,2	7,9	5859,3	235,0	3,9	6124,0	203,0	3,2

B	Frecuencia Fundamental			Constantes elásticas					
	Valor medio (Hz)	Variación (Hz)	Variación (%)	MOE por ultrasonidos			MOE por frecuencia		
				Valor Medio (MPa)	Variación (MPa)	Variación (%)	Valor Medio (MPa)	Variación (MPa)	Variación (%)
Alabastro	2666,67	825,00	23,63	11,40	26,90	70,2	43,33	13,41	23,6
Travertino Nogal	2437,50	579,17	19,20	6,00	2,92	32,7	41,19	9,79	19,2
Piedra Pueyo	3741,67	275,00	6,85	43,36	11,61	21,1	70,73	5,20	6,8
Travertino Teruel	4137,50	50,00	1,19	43,86	13,78	23,9	72,53	0,88	1,2
Piedra AltoAragón	4081,25	256,25	5,91	48,32	18,88	28,1	77,12	4,84	5,9
Caliza campanil	3375,00	66,67	1,94	31,11	4,19	11,9	48,59	3,50	1,9
Arenisca Rodeno	2308,33	266,67	10,36	4,80	4,34	47,5	39,26	2,81	10,4
Caliza Calatorao	4250,00	120,83	2,76	43,16	32,35	42,8	78,54	2,23	2,8
Granodiorita	3412,50	258,33	7,04	40,45	1,74	4,1	65,39	4,95	7,0
Basalto	4954,17	133,33	2,62	78,55	14,06	15,2	105,08	2,83	2,6

Tabla 10. Valores medios de las propiedades petrofísicas medidas tras un envejecimiento de las probetas por choque térmico y su variación respecto al estado inicial de las probetas de cada litología. A: masa de las probetas y velocidad de ultrasonidos en las tres direcciones ortogonales. B: frecuencia fundamental y constantes elásticas (MOE con técnicas ultrasónicas y con la frecuencia fundamental).

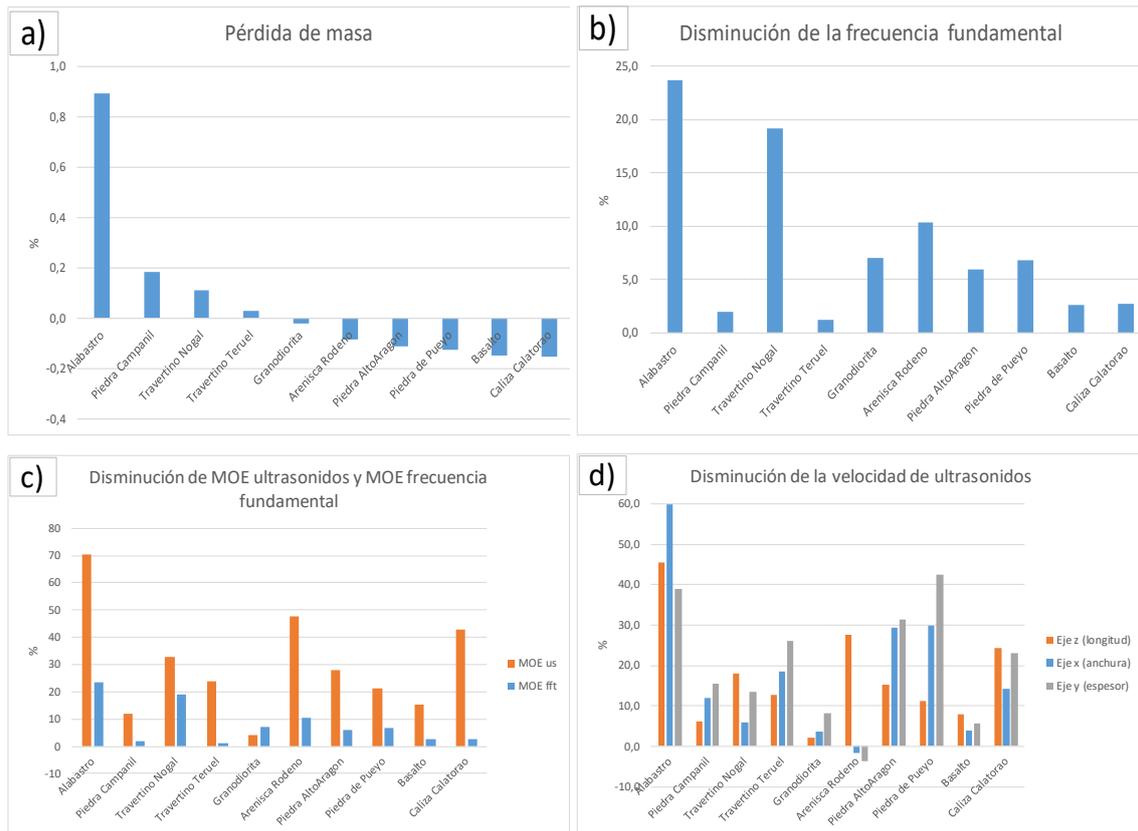


Figura 26. Representación gráfica de las variaciones petrofísicas tras el envejecimiento por choque térmico: (a) Pérdida de masa, (b) Disminución de la frecuencia fundamental, (c) Disminución de la velocidad de propagación de pulsos ultrasónicos en las 3 direcciones ortogonales y (d) Disminución del módulo de elasticidad dinámico calculado con ultrasonidos (MOE ultrasonidos) y calculado con la frecuencia fundamental (MOE flexural).

### 6.9 Envejecimiento acelerado: hielo-deshielo.

El deterioro visual de las probetas se muestra en la figura 27. Los resultados del estudio de la variación de las propiedades petrofísicas (masa de las probetas, velocidad de ultrasonidos, frecuencia fundamental y constantes elásticas) tras finalizar el ensayo de envejecimiento acelerado por hielo-deshielo se muestran en la tabla 11 y figura 28.



Figura 27. Aspecto visual de las probetas afectadas por el envejecimiento acelerado por hielo-deshielo.

A	Masa final de probetas envejecidas			Velocidad de propagación de ondas longitudinales (Vp)								
				Eje Z			Eje X			Eje Y		
	Valor medio (g)	Variación (g)	Variación (%)	Valor Medio (m/s2)	Variación (m/s2)	Variación (%)	Valor Medio (m/s2)	Variación (m/s2)	Variación %	Valor Medio (m/s2)	Variación (m/s2)	Variación (%)
Alabastro	606,94	27,62	4,35	3576,0	1495,7	29,5	3686,7	1923,3	34,3	5000,0	1190,7	19,2
Travertino Nogal	655,71	0,65	0,10	3543,0	182,7	4,9	5056,3	1431,7	22,1	5029,3	2072,3	29,2
Piedra Pueyo	737,33	0,00	0,00	2869,4	1676,6	36,9	4777,3	2044,0	30,0	4771,3	4510,7	48,6
Travertino Teruel	641,62	0,41	0,06	4634,8	741,5	13,8	5703,7	1117,7	16,4	5708,0	250,0	4,2
Piedra AltoAragón	764,70	0,00	0,00	5172,2	205,8	3,8	5028,3	1224,7	19,6	5247,0	1804,0	25,6
Caliza campanil	608,08	0,26	0,04	4218,4	220,9	5,0	4098,7	452,7	9,9	4110,0	692,7	14,4
Arenisca Rodeno	663,66	0,00	0,00	3142,5	308,8	8,9	3580,7	9,0	0,3	3448,3	198,7	5,4
Caliza Calatorao	753,64	0,00	0,00	4743,7	965,3	16,9	5376,0	957,3	15,1	4891,7	1656,3	25,3
Granodiorita	735,64	0,00	0,00	4923,8	-22,8	-0,5	4531,7	63,3	1,4	4265,7	206,0	4,6
Basalto	926,12	0,00	0,00	5888,8	-19,8	-0,3	5415,3	648,7	10,7	6244,3	138,7	2,2
B	Frecuencia Fundamental			Constantes elásticas								
	Valor medio (Hz)	Variación (Hz)	Variación (%)	MOE por ultrasonidos			MOE por frecuencia					
				Valor Medio (MPa)	Variación (MPa)	Variación (%)	Valor Medio (MPa)	Variación (MPa)	Variación (%)			
Alabastro	3437,50	166,67	4,62	24,94	25,22	50,3	55,86	2,71	4,6			
Travertino Nogal	4037,50	16,67	0,41	25,46	2,69	9,6	68,22	0,28	0,4			
Piedra Pueyo	3787,50	162,50	4,11	18,68	28,20	60,2	71,59	3,07	4,1			
Travertino Teruel	4150,00	0,00	0,00	45,20	15,63	25,7	72,75	0,00	0,0			
Piedra AltoAragón	4404,17	120,83	2,67	60,67	4,93	7,5	83,22	2,28	2,7			
Caliza campanil	3475,00	20,83	0,60	32,60	3,51	9,7	53,04	0,32	0,6			
Arenisca Rodeno	3045,83	95,83	3,05	19,98	4,12	17,1	51,34	1,62	3,1			
Caliza Calatorao	4425,00	108,33	2,39	49,91	22,38	31,0	81,77	2,00	2,4			
Granodiorita	4470,83	87,50	1,92	55,76	-0,51	0,0	85,67	1,68	1,9			
Basalto	4825,00	-12,50	-0,26	88,28	-0,64	0,0	102,34	0,00	0,0			

Tabla 11. Valores medios de las propiedades petrofísicas medidas tras un envejecimiento de las probetas por ciclos de hielo-deshielo y su variación respecto al estado inicial de las probetas de cada litología. A: masa de las probetas y velocidad de ultrasonidos en las tres direcciones

ortogonales. B: frecuencia fundamental y constantes elásticas (MOE con técnicas ultrasónicas y con la frecuencia fundamental).

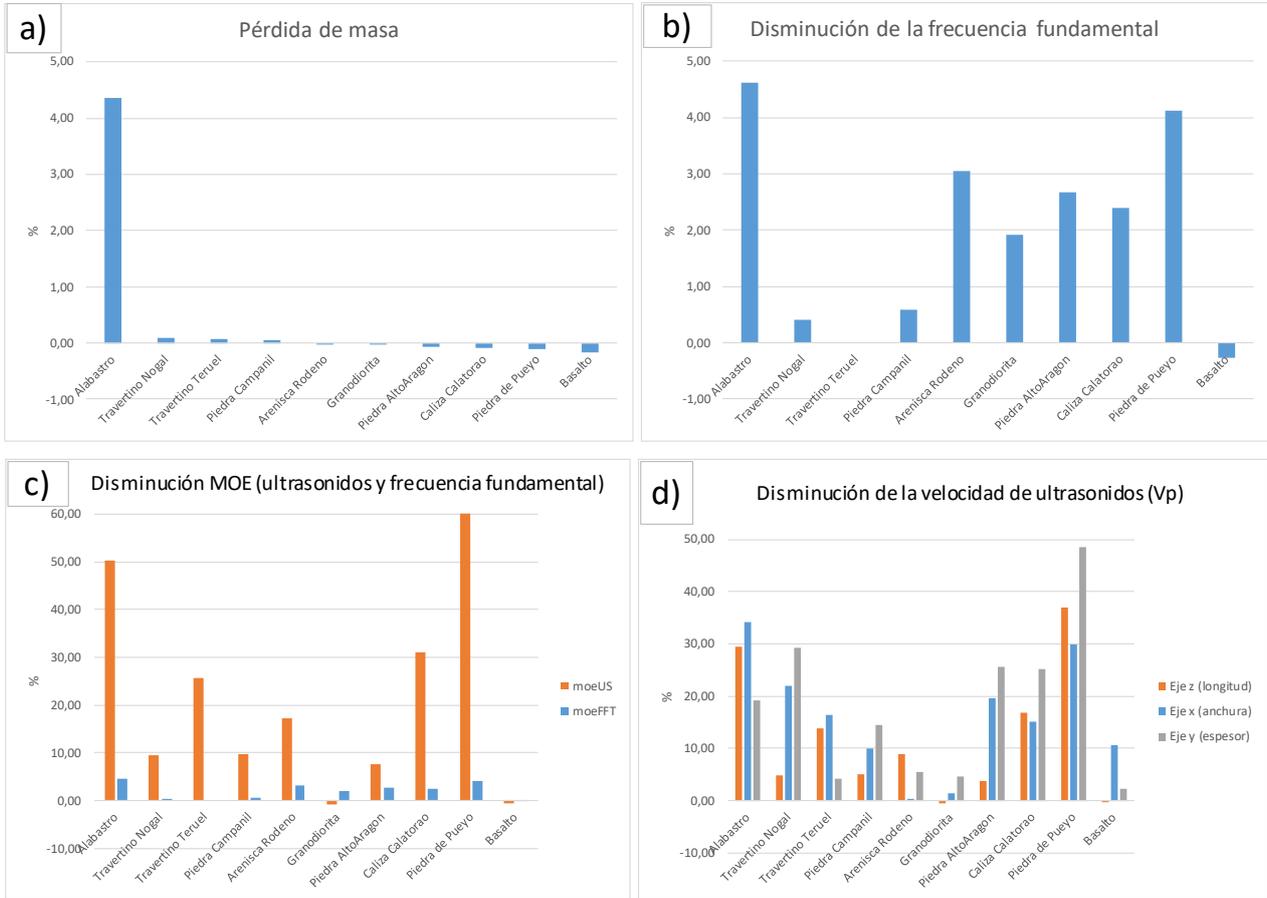


Figura 28. Representación gráfica de las variaciones petrofísicas tras el envejecimiento por heladicidad: (a) Pérdida de masa, (b) Disminución de la frecuencia fundamental, (c) Disminución de la velocidad de propagación de pulsos ultrasónicos en las 3 direcciones ortogonales y (d) Disminución del módulo de elasticidad dinámico calculado con ultrasonidos (MOE ultrasonidos) y calculado con la frecuencia fundamental (MOE flexural).

### 6.10. Índice de susceptibilidad al deterioro (ISD)

Los valores de ISD total, parcial vibracional y parcial gravitacional se presentan en la Tabla 12. La roca más relevante es el basalto y la más alterable el travertino nogal.

	Índice de Deterioro Total	Índice vibracional (A+B+C)	Índice gravitacional (D+E)
	N.º índice (0 a 50)	N.º índice (0 a 20)	N.º índice (0 a 30)
	Alabastro	8	6
Travertino Nogal	10	10	0

Piedra Pueyo	3	3	0
Travertino Teruel	5	5	0
Piedra Alto Aragón	4	4	0
Caliza campanil	7	6	0
Arenisca Rodeno	9	9	0
Caliza Calatorao	4	4	0
Granodiorita	5	5	0
Basalto	1	1	0

Tabla 12. Valores calculados del ISD total, vibracional y gravitacional para cada una de las litologías.

## 7. INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN

### 7.1 Propiedades intrínsecas de las rocas estudiadas no envejecidas

#### 7.1.1 Porosidad, densidad y propiedades hídricas de las rocas no envejecidas

Pese haber seleccionado las probetas de cada litología con la mayor homogeneidad posible, en la figura 29 se observa que las mayores dispersiones de valores de densidad aparente son los medidos en la caliza campanil, travertino nogal y arenisca de rodeneo, todas ellas con elevada porosidad inaccesible. Esta distribución de valores es extrapolable al resto de las propiedades hídricas analizadas y sin duda indican una mayor variabilidad en su sistema poroso.

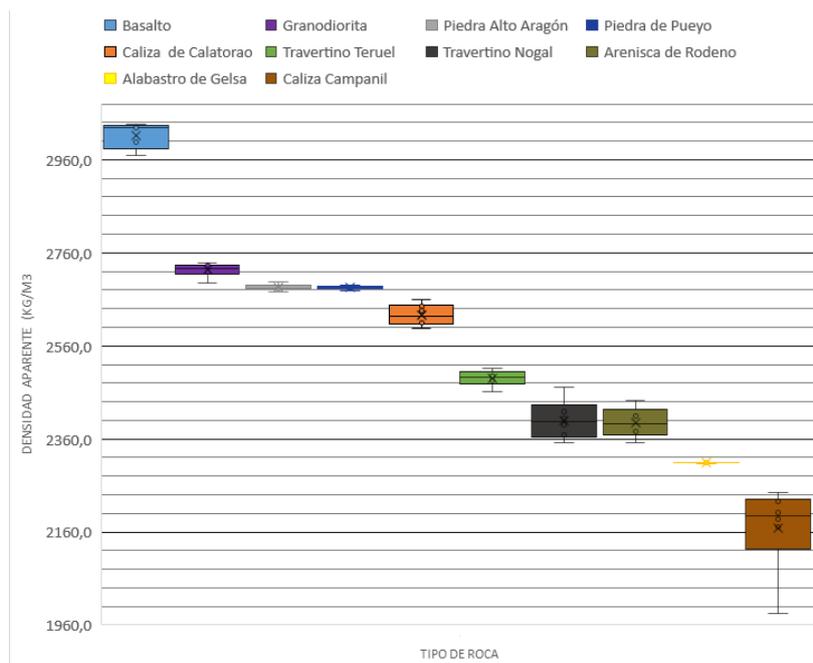


Figura 29. Diagrama de caja mostrando la distribución de los seis valores de densidad aparente, calculada con métodos hídricos en cada una de las litologías estudiadas. En cada una de las cajas; la sección rectangular sombreada con color es el rango intercuartil y representa el 50% de los datos. Se puede considerar la expresión cuantitativa de la variabilidad en los valores de porosidad

En función del porcentaje de porosidad inaccesible (absoluta y relativa), parámetro relevante para identificar litologías sensibles a hielo deshielo y sales, las rocas estudiadas se han agrupado de la siguiente manera (Tabla 13):

A	<b>Porosidad Inaccesible absoluta</b>	<b>Rocas estudiadas</b>
	Muy baja (<0'5%):	Alabastro, Granodiorita y piedra Alto Aragón
Baja (0'5 a 2%):	Basalto, piedra de Pueyo y caliza Calatorao	
Media (2 a 5%):	Travertino Teruel, arenisca Rodeno y caliza campanil	
Alta (>50%):	Travertino Nogal	
B	<b>Porosidad Inaccesible relativa</b>	<b>Rocas estudiadas</b>
	Saturación baja (<30%):	Alabastro, Granodiorita
	Saturación media (30 a 40%):	Basalto
	Saturación alta (40 a 50%):	Travertino Teruel y travertino Nogal
	Saturación muy alta (>70%):	Alabastro, granodiorita, arenisca Rodeno y caliza campanil

Tabla 13. Grupos de porcentaje de porosidad inaccesible y rocas incluidas en cada grupo, antes del envejecimiento artificial. A: Porosidad inaccesible absoluta. B: Porosidad inaccesible relativa.

### 7.1.2 Capacidad de absorción y saturación en una hora, en rocas no envejecidas:

La velocidad media de la absorción de agua sigue una trayectoria logarítmica en todas las litologías (Figura 30) aunque destaca de nuevo la caliza campanil con una capacidad de absorción de 6'7 gramos tras permanecer sumergida en agua una sola hora, frente al 1'7g que es capaz de absorber la segunda litología con mayor porosidad abierta (arenisca de Rodeno) en esa misma hora.

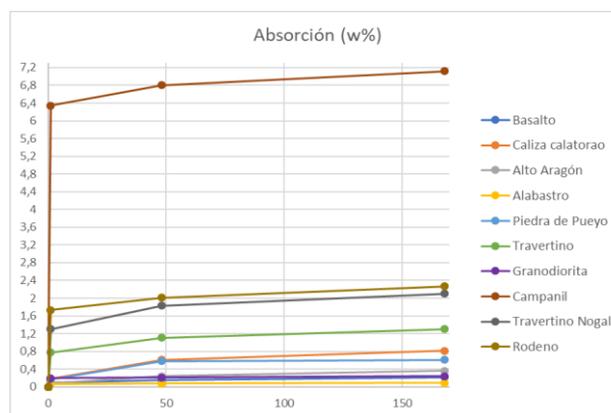


Figura 30. Evolución de la curva de absorción en función de la litología, en un rango temporal de una semana.

En función del porcentaje de saturación en una hora, las rocas estudiadas se han agrupado de la siguiente manera (Tabla 1):

<b>Porcentaje de saturación en 1h</b>	<b>Rocas estudiadas</b>
Saturación baja (<30%):	Piedra de Pueyo, Piedra del Alto Aragón y caliza Calatorao
Saturación media (30 a 50%):	Basalto
Saturación alta (50 a 70%):	Travertino Teruel y travertino Nogal
Saturación muy alta (>70%):	Alabastro, granodiorita, arenisca Rodeno y caliza campanil

Tabla 14. Grupos de porcentaje de saturación en una hora y rocas incluidas en cada grupo.

Las catalogaciones vistas de propiedades físicas la emplearemos seguidamente para discutir todo lo relacionado con la sensibilidad a la alteración de cada tipo rocoso.

### **7.1.3 Cambió dimensional, influencia de las propiedades intrínsecas del material no envejecido:**

Las propiedades intrínsecas de las rocas, calculadas con métodos hídricos, no guarda relación aparente con su porcentaje de expansión volumétrica por inmersión en agua (Figura 31), sino que ha dependido más de la propia composición, estructura interna y planos de estratificación de la probeta. Tanto es así que la variedad Piedra de Pueyo, una litoarenita con valores intermedios de porosidad y densidad, presenta un índice de expansión mucho más alto que el resto (Apartado 6.6 *Cambio dimensional*), y experimentalmente se ha comprobado que sillares de roca almacenados en la intemperie llegan a agrietarse y abrirse por estos planos de debilidad de la roca debido a la presencia de micas orientadas a favor del plano de estratificación; probablemente en este caso es la cantidad y tipo de arcilla la que condiciona este comportamiento. La expansión negativa del travertino Teruel fue debida a errores experimentales dado el elevado volumen de poros de gran tamaño.

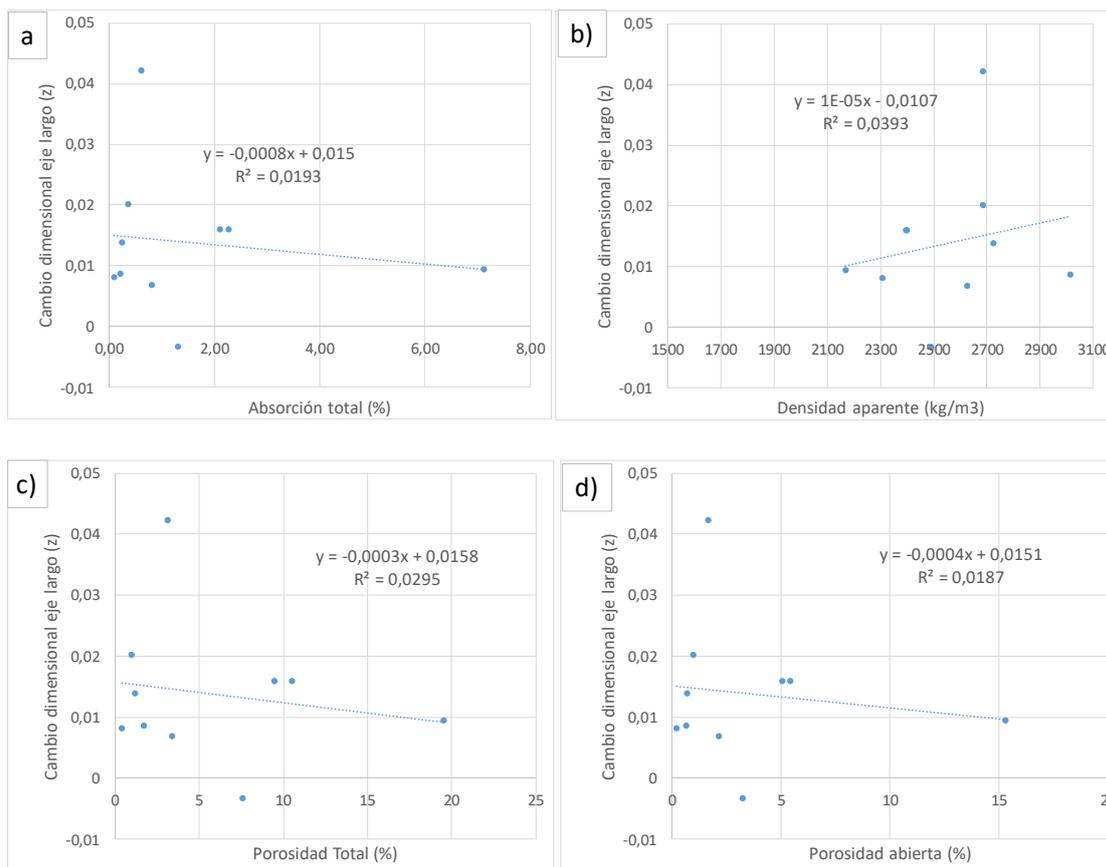


Figura 31. Graficas de correlación entre el valor medio de expansión de cada litología y el valor medio de: (a) Absorción total, (b) Densidad aparente, (c) Porosidad total y (d) Porosidad abierta.

En función del valor de expansión por cambio dimensional y su anisotropía, las rocas estudiadas se han agrupado de la siguiente manera (Tabla 15):

	<b>Cambio dimensional eje Z</b>	<b>Rocas estudiadas</b>
A	Expansión baja (< 0%):	Piedra de Pueyo, Piedra del Alto Aragón y caliza Calatorao
	Expansión media (0 a 60%):	Basalto
	Expansión alta (60 a 120%):	Travertino Teruel y travertino Nogal
	Expansión muy alta (>120%):	Alabastro, granodiorita, arenisca Rodeno y caliza campanil
	<b>Anisotropía</b>	<b>Rocas estudiadas</b>
B	Baja (<20%):	Travertino Teruel
	Media (20 a 40%):	Caliza campanil, caliza Calatorao, basalto
	Alta (40 a 60%):	Alabastro, granodiorita, arenisca Rodeno y piedra Alto Aragón
	Muy alta (>60%):	Piedra de Pueyo

Figura 15. Agrupación de las rocas estudiadas, en función de sus valores de expansión en el eje Z y anisotropía.

## 7.2 Propiedades elásticas indirectas (Vp, frecuencia fundamental y MOE) de las rocas sin envejecer

### 7.2.1 Velocidad de propagación de ondas ultrasónica y factores que influyen en la medida:

En función del valor de velocidad de ultrasonidos (Vp), las rocas estudiadas se han agrupado de la siguiente forma (Tabla 16):

Velocidad propagación ultrasonidos	Rocas estudiadas
Velocidad baja (<3000 m/s <sup>2</sup> ):	Arenisca Rodeno y travertino Nogal
Velocidad media (3000 a 5000 m/s <sup>2</sup> ):	Caliza campanil, granodiorita, travertino Teruel y Piedra de Pueyo
Velocidad alta (5000 a 6000 m/s <sup>2</sup> ):	Caliza Calatorao, Piedra Alto Aragón y alabastro
Saturación muy alta (>6000 m/s <sup>2</sup> ):	Basalto

Figura 16. Agrupación de las rocas estudiadas, en función de sus valores medios de propagación de ondas ultrasónicas.

Hay tres factores que influyen en las medidas de velocidad de propagación ultrasónica de ondas P (Planos de estratificación, longitud del material medido y saturación en agua):

1º.-Las direcciones X e Y son las dos paralelas a la estratificación y consecuentemente los valores de Vp serán relativamente homogéneos. Dicho de otra manera, la anisotropía en el plano XY será siempre más baja que en los XZ e YZ. (Figura 32).

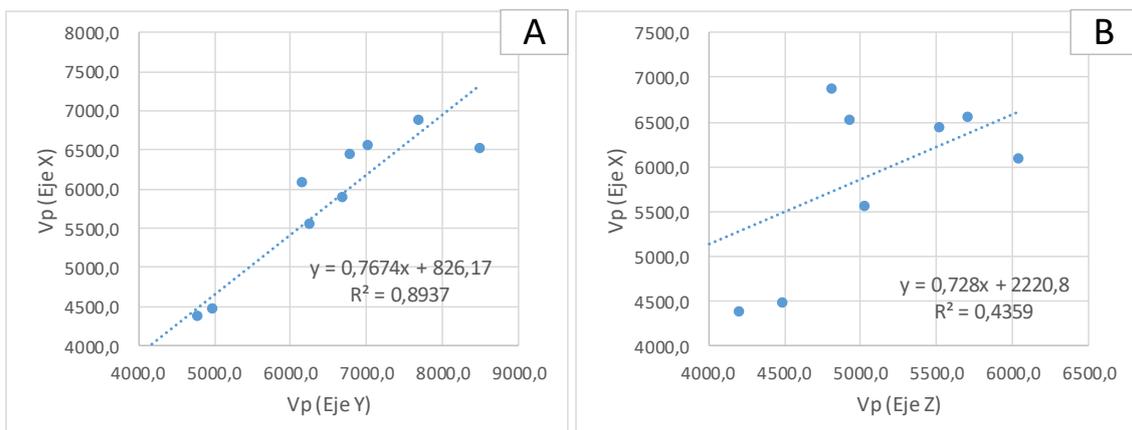


Figura 32. Correlación entre los valores de velocidad de ultrasonidos (Vp) medidos en los Eje X, Y y Z, tomando los valores medios de las litologías estudiadas. Gráfica A: Correlación de valores de velocidad Vp medidos en el eje X con los valores medidos en el eje

Y. Gráfica B: Correlación de valores de velocidad Vp medidos en el eje X con los valores medidos en el eje Z.

2°\_ La longitud total de material en el que se transmite la onda ultrasónica ya que a mayor longitud hay mayor probabilidad de que se crucen discontinuidades. Las velocidades del eje z (180mm) son inferiores a las del eje x (50mm) y estas últimas a su vez inferiores a las velocidades de transmisión a través del eje y (30mm). Esta diferencia de valores de velocidad de ultrasonidos fue debida a la mayor acumulación de discontinuidades estructurales al disponer de mayor longitud de material en el que transmite la onda. Esto se refleja en los altos porcentajes de anisotropía absoluta que tienen todas las litologías (apartado 6.1 Ultrasonidos).

3°\_ Respecto al estado de saturación de la roca: en general la velocidad de propagación aumenta al saturar las probetas de roca, debido a que el agua tiene mayor velocidad de transmisión de ondas ultrasónicas (Figura 33). Esto se confirma por la relación entre la velocidad de propagación del material y su porosidad inaccesible absoluta (Figura 34), donde las litologías con mayores porcentajes de porosidad inaccesible y macro porosas (representados debajo de la línea de tendencia de la figura 34), son también las que tienen una mayor diferencia entre los resultados de velocidad de propagación en probeta sana y saturada en agua, debido a que hay más volumen de aire que es sustituido por agua. En el caso de la caliza Campanil (litología microporosa) pasa todo lo contrario, las causas de este comportamiento pueden ser varias, citemos bien una incorporación a la fracción mineral de la roca o bien su incorporación a la estructura de la materia orgánica. En ambos casos el efecto de las nuevas estructuras minerales -menos rígidas- reducen la velocidad de propagación.

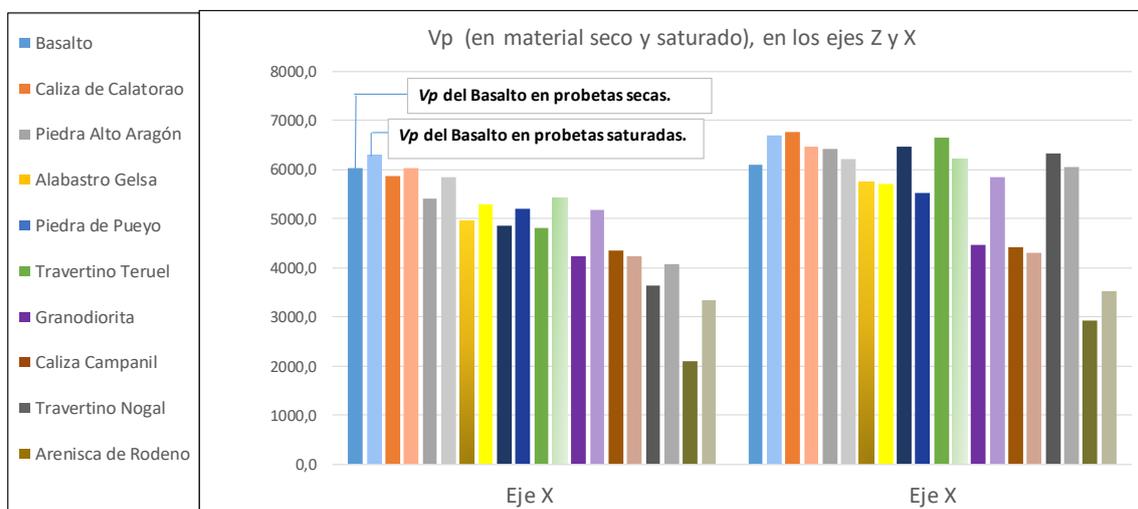


Figura 33. Influencia del estado de saturación de la litología en los valores promedio de velocidad de ultrasonidos en los ejes Z y X, antes del envejecimiento artificial.

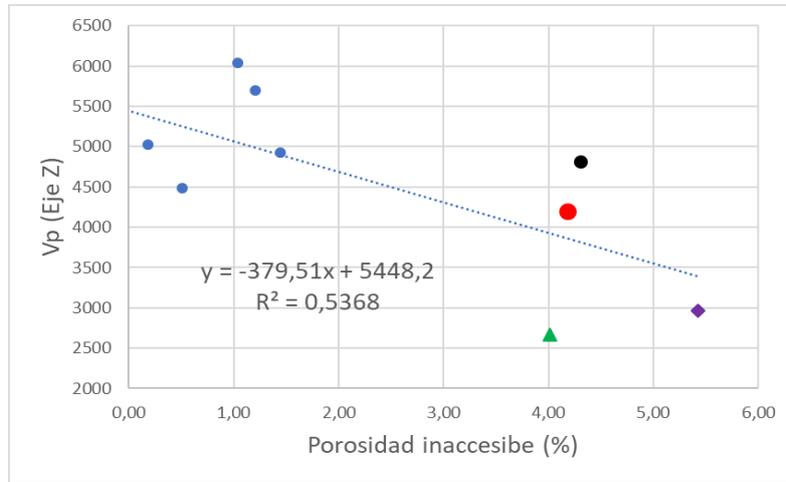


Figura 34. Correlación entre el valor medio de velocidad de propagación de ondas Vp en el eje Z y el valor medio de porosidad inaccesible de cada una de las litologías estudiadas, antes del envejecimiento artificial. Los marcadores de color verde, morado, negro y rojo representan la arenisca de rodeno, el travertino nogal, travertino Teruel y la caliza campanil respectivamente. Los marcadores azules representan las seis litologías restantes.

### 7.2.2 Frecuencia fundamental flexural, relación con propiedades intrínsecas del material inalterado y fiabilidad de las medidas

En función del valor medios de frecuencia fundamental flexural, las rocas estudiadas se han agrupado de la siguiente forma (Tabla 17):

Frecuencia fundamental flexural	Rocas estudiadas
Frecuencia baja (<2600 hz):	Arenisca Rodeno
Frecuencia media (2600 a 3800 hz):	Caliza campanil, alabastro y travertino Nogal
Frecuencia alta (3800 a 4200 hz):	Travertino Teruel, Piedra de Pueyo y Granodiorita
Frecuencia muy alta (>4200 hz):	Basalto, Piedra del Alto Aragón y caliza Calatorao

Figura 17. Agrupación de las rocas estudiadas, en función de sus valores medios de frecuencia fundamental flexural.

Respecto a su relación con las propiedades intrínsecas; el valor de frecuencia fundamental se correlaciona con los datos de densidad aparente (geométrica y calculada con métodos hídricos) de las litologías aragonesas (Figura 35).

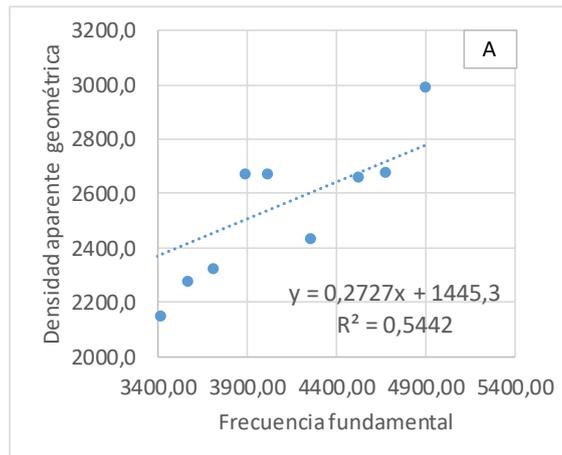


Figura 35. Correlación entre el valor medio de frecuencia fundamental flexural (hz) y el valor medio de densidad aparente de cada una de las litologías estudiadas, antes del envejecimiento artificial. Gráfica A: Frecuencia fundamental frente a densidad aparente geométrica. Gráfica B: Frecuencia fundamental frente a densidad aparente calculada con métodos hídricos.

Finalmente se han propuesto dos razones que demuestra la fiabilidad de las medidas de frecuencia fundamental como variable de caracterización de las propiedades intrínsecas del material pétreo:

1°\_Los datos de frecuencia fundamental y de velocidad de ultrasonidos están relacionadas (Figura 36), y son variables acústicas que difieren únicamente en el rango de frecuencias que utilizan.

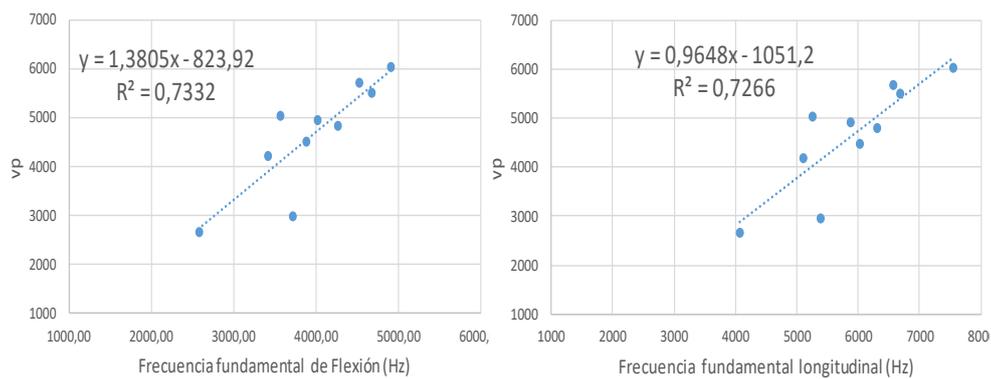


Figura 36. Graficas de correlación tomando los valores medios de frecuencia fundamental y Vp de cada litología antes del envejecimiento artificial. Grafica izquierda: correlación entre los valores medios de Vp y de frecuencia fundamental flexural, Grafica derecha: correlación entre los valores medios de Vp y de frecuencia fundamental longitudinal.

2°\_El similar coeficiente de variación del valor de desviación estándar calculado con frecuencia fundamental si la comparamos con la distribución de las mediciones de ultrasonidos (Tabla 18).

	<b>Frecuencia fundamental</b>		<b>Velocidad de ultrasonidos (Vp)</b>	
	Desviación estándar (hz)	Coeficiente de variación (%)	Desviación estándar (m/s <sup>2</sup> )	Coeficiente de variación (%)
Alabastro	116,47	3,26	289,02	1,47
Travertino Nogal	398,03	10,73	797,91	10,24
Piedra de Pueyo	153,06	3,81	299,42	4,90
Travertino Nogal	122,83	2,88	611,00	2,65
Piedra Alto Aragón	250,84	5,37	451,71	2,39
Caliza campanil	205,46	6,02	528,96	6,91
Arenisca Rodeno	345,37	13,42	622,50	9,80
Caliza Calatorao	95,99	2,12	513,74	3,03
Granodiorita	381,37	9,81	337,42	9,96
Basalto	132,20	2,70	119,07	5,50

Tabla 18. Desviación estándar de los valores de frecuencia fundamental y velocidad ultrasonidos (Vp) de las litologías ensayadas, antes del envejecimiento artificial.

En la figura 37, se representa los valores de frecuencia fundamental de las probetas de las diez litologías. Al analizar más en detalles las mediciones acusticas de las probetas de una misma litología, además de cambiar la frecuencia fundamental también cambia el resto de frecuencias que componen el espectro sonoro (figura 38). El sonido emitido por una probeta sana, será un sonido más armónico si se compara con el emitido por una probeta de la misma litología pero fisurada (menos rentable económicamente). Debido al mayor valor de presión sonora (Pa) de la frecuencia fundamental (Hz) y sus sobretonos, respecto al valor de presión sonora (Pa) del resto de frecuencias que componen el espectro de la probeta sana.

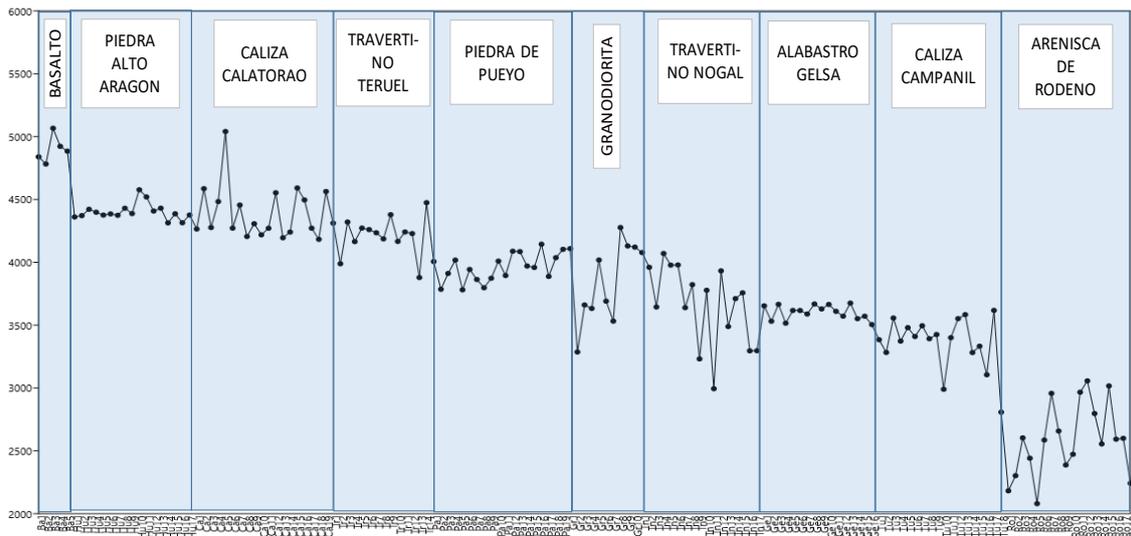


Figura 37. Representación de la frecuencia fundamental en función de la litología, y ordenados de mayor a menor frecuencia fundamental, donde los marcadores negros indican el valor de cada probeta ensayada antes del envejecimiento artificial.

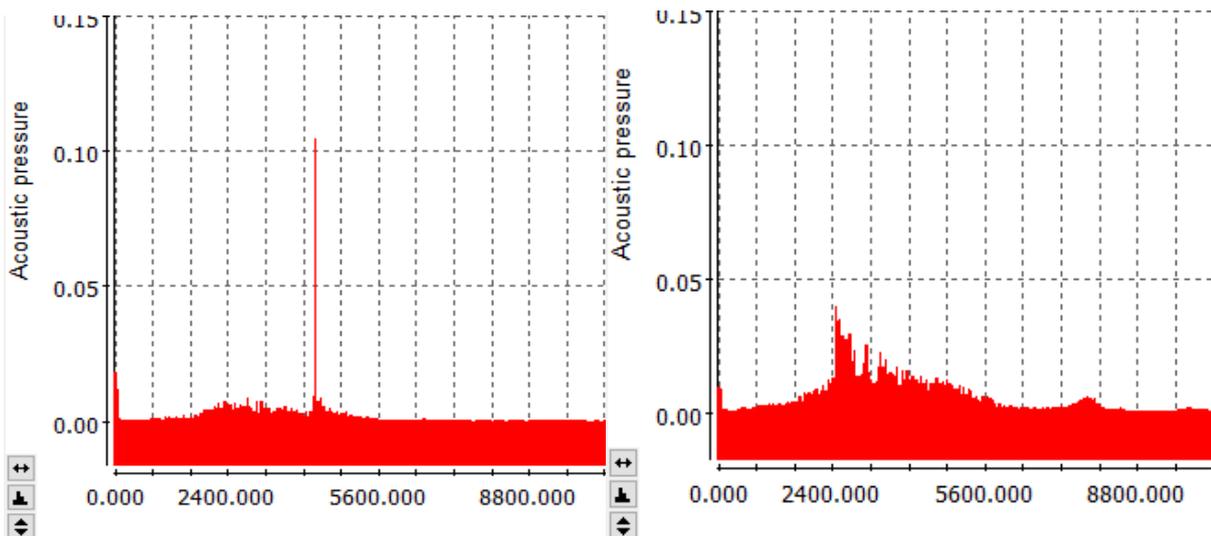


Figura 38. Espectros de frecuencias, registrados en el instante de golpeo, del sonido emitido por dos probetas distintas de travertino nogal (representando de manera gráfica las diferencias entre un sonido armónico y un ruido). Izquierda sonido armónico: Espectro de frecuencias de una probeta con baja porosidad y frecuencia fundamental de 4275hz y 0'11Pa. Derecha ruido: Espectro de frecuencias de una probeta con fisuras y una frecuencia fundamental de 2525hz y 0'04Pa.

### 7.2.3 Comparativa entre los diferentes métodos para calcular MOE:

El módulo elástico calculado con datos de velocidad de propagación de ondas ultrasónicas tiene una relación directamente proporcional con los calculados a partir de

la frecuencia fundamental de flexión (con coeficiente de correlación de 0,85) y de la frecuencia fundamental longitudinal (con coeficiente de correlación de 0,82) (Figura 39).

Esto confirma que el método para calcular módulos elásticos a partir de los datos de frecuencia fundamental es válido para las litologías ensayadas, y que de entre los módulos elásticos calculados a partir de la frecuencia fundamental el más útil es el flexural al tener ligeramente mejor correlación.

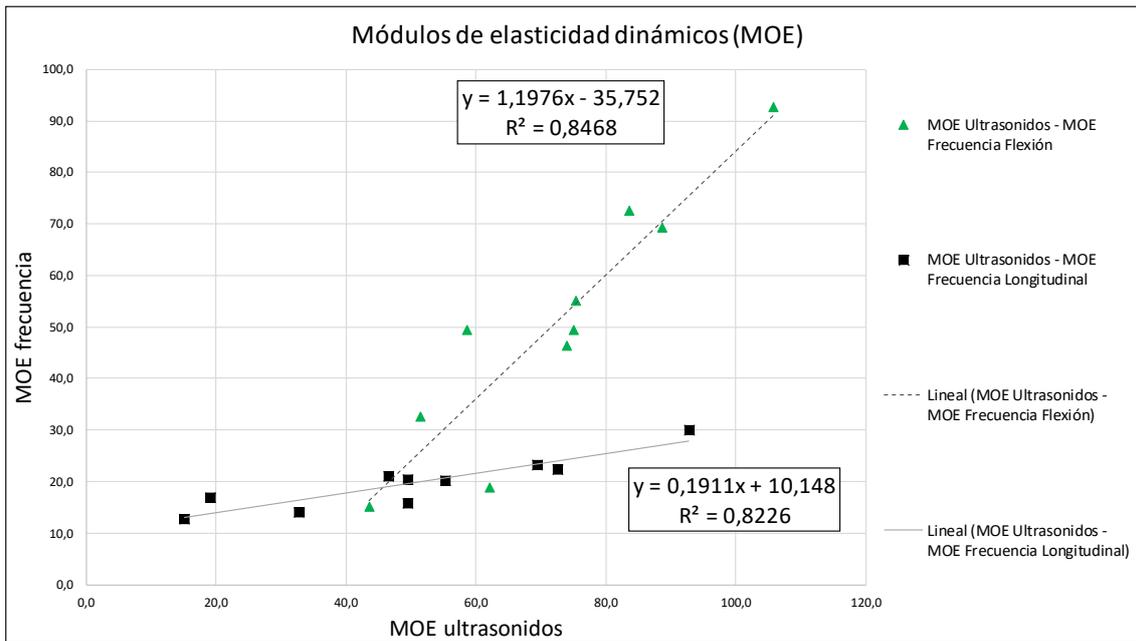


Figura 39. Correlación entre los diferentes tipos de módulos elásticos, antes del envejecimiento artificial. MOE ultrasonidos: calculado con los datos de velocidad de propagación de ondas  $V_p$  utilizando la fórmula de Rosell y Cantalapiedra, (2011). MOE frecuencia (flexural y longitudinal): siguiendo las especificaciones de la norma UNE-EN 14146 (2004).

### 7.3 Resultados de alteración

#### 7.3.1 Afección de los ensayos de envejecimiento, en función de la pérdida de masa o de la disminución del MOE (ultrasonidos y flexural), y durabilidad de las litologías:

La pérdida de masa total de las litologías muestra una mayor afección de los ciclos de envejecimiento por cristalización de sales, seguido del envejecimiento por hielo-deshielo y del envejecimiento por choque térmico (figura 40), acorde con la degradación superficial observable a simple vista.

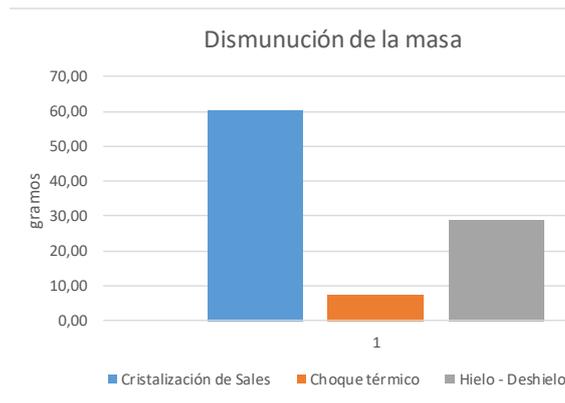


Figura 40. Disminución total de la masa de diez probetas envejecidas artificialmente con ciclos de cristalización de sales (una por litología estudiada), con ciclos de choque térmico y heladicidad. Gráfica derecha: Disminución total del MOE calculado con ultrasonidos, según el tipo de ciclo de envejecimiento.

La poca pérdida de masa total, de las probetas envejecidas con ensayos de choque térmico, no implica una menor afección a las rocas. En las rocas envejecidas por choque térmico, otra causa de deterioro es la micro fisuración. Esta micro fisuración, no apreciable a simple vista, provoca una disminución importante de los valores totales de disminución de MOE, calculados con ultrasonidos y frecuencia fundamental (Figura 41).

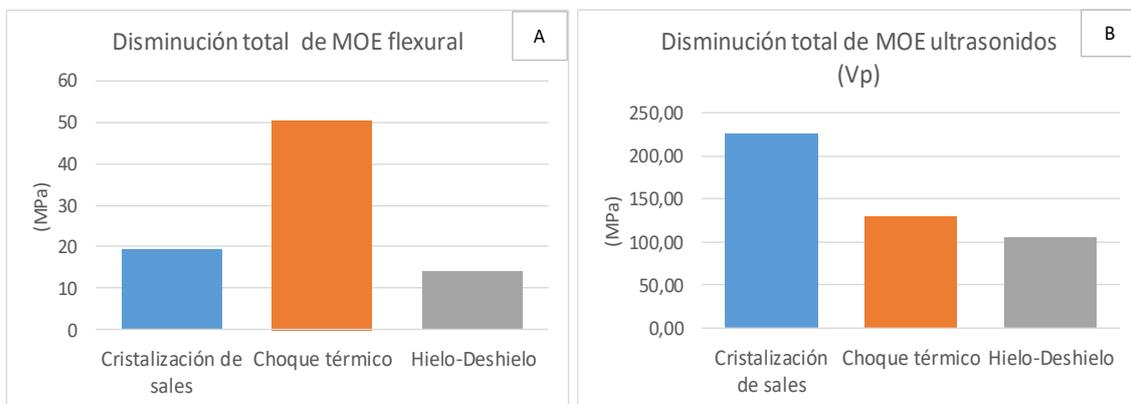


Figura 41. Disminución total de la masa según el tipo de ciclo de envejecimiento. Gráfica A: Disminución total del MOE flexural, según el ensayo de envejecimiento aplicado a las rocas. Gráfica B: Disminución total del MOE ultrasonidos, según el ensayo de envejecimiento aplicado a las rocas.

El caso de los ciclos de heladicidad es más peculiar, ya que es el único ensayo de envejecimiento en el que en una de las litologías (el Basalto de Cerro Gordo) se detecta

un aumento tanto de MOE flexural como de MOE ultrasonidos, como consecuencia de un aumento de su resistencia su mecánica (Figura 42).

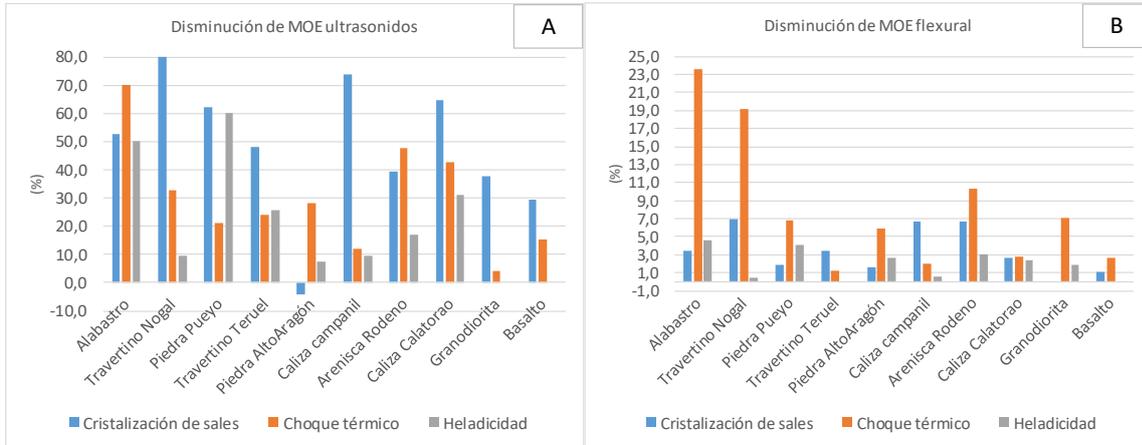


Figura 42. Gráfica A: Disminución del valor de MOE ultrasonidos en las litologías estudiadas, en función del ensayo de envejecimiento utilizado. Gráfica B: Disminución del valor de MOE flexural en las litologías estudiadas, en función del ensayo de envejecimiento utilizado.

### 7.3.2 Durabilidad

Desde el punto de vista estético; las litologías menos durables han sido aquellas con valores de porosidad y absorción de agua altos, como la caliza campanil, arenisca Rodeno, travertinos travertino Teruel, travertino Nogal. El alabastro se agrieta y sufre disolución superficial.

Desde el punto de vista de la alteración de las propiedades mecánicas, para cada uno de los ensayos de envejecimiento; se ha representado la relación entre la disminución de MOE y la propiedad petrofísica del material inalterado con el coeficiente de correlación más alto. De forma que las probetas más durables frente a alteraciones fenómenos de cristalización de sales serán aquellas con una velocidad de propagación alta y una porosidad inaccesible baja (Figura 43)

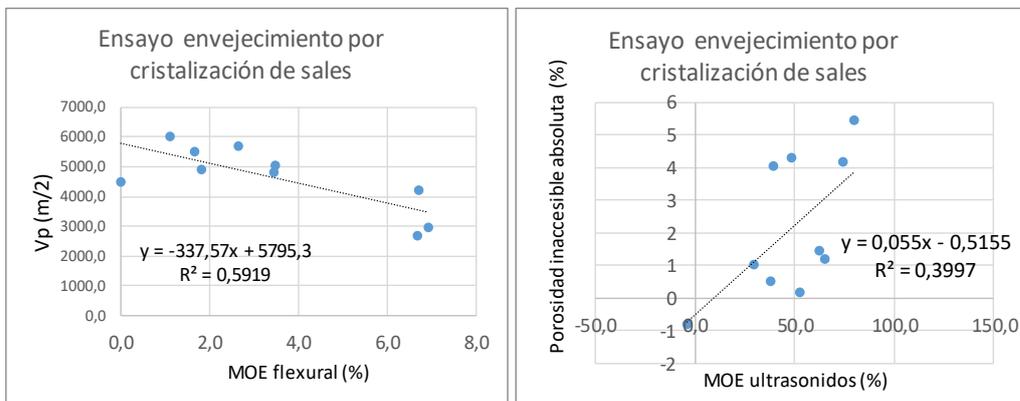


Figura 43. Gráfica Izquierda: Correlación del valor medio de velocidad ultrasonidos antes del envejecimiento, con la disminución de MOE flexural. Gráfica derecha: Correlación del valor medio de porosidad inaccesible absoluta antes del envejecimiento, con la disminución de MOE ultrasonidos.

Las probetas más durables frente a alteraciones con ensayo de choque térmico serán aquellas con unos valores de densidad aparente del mineral de roca alta, tanto para los datos de MOE flexural y MOE ultrasonidos (Figura 44).

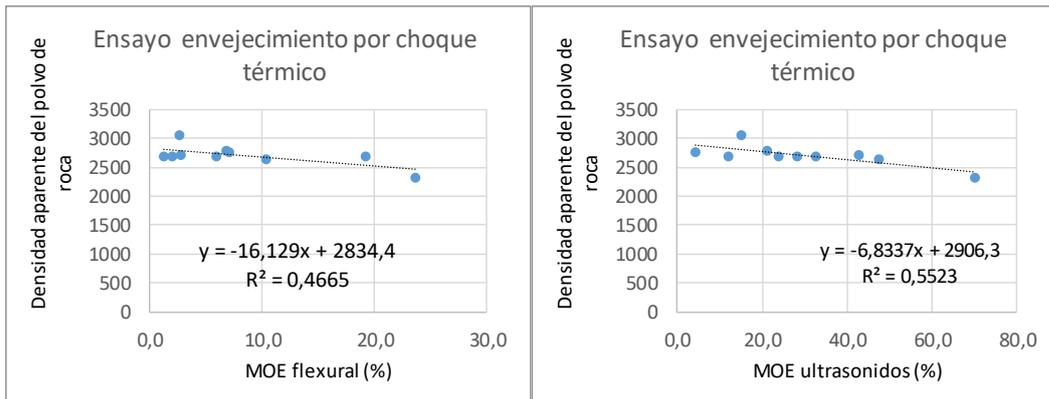


Figura 44. Gráfica Izquierda: Correlación del valor medio de densidad aparente calculada en cada litología antes del envejecimiento, con la variación de MOE flexural después del ensayo de envejecimiento. Gráfica derecha: Correlación del valor medio de densidad aparente calculada en cada litología antes del envejecimiento, con la variación de MOE flexural después del ensayo de envejecimiento.

Las probetas más durables frente a alteraciones por fenómenos de heladicidad son el basalto, la granodiorita y travertino nogal.

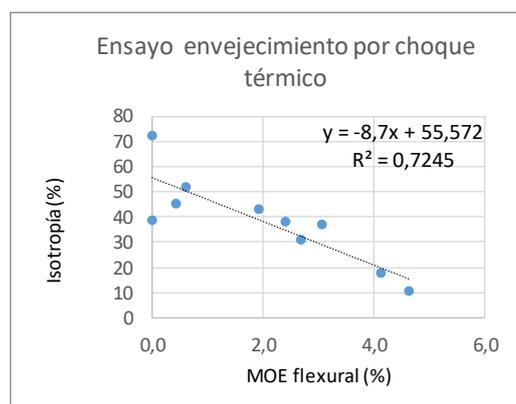


Figura 45. Correlación entre el porcentaje de anisotropía relativa de expansión hídrica calculada en cada litología antes del envejecimiento, y la variación de MOE flexural después del ensayo de envejecimiento

### 7.3.3 Índice de sensibilidad al deterioro

Se ha comprobado que el ISD total de cada litología tiene mejor correlación con la disminución del valor de frecuencia fundamental tras el ensayo de envejecimiento acelerado que con el valor de disminución de velocidad de ultrasonidos (Figura 46).

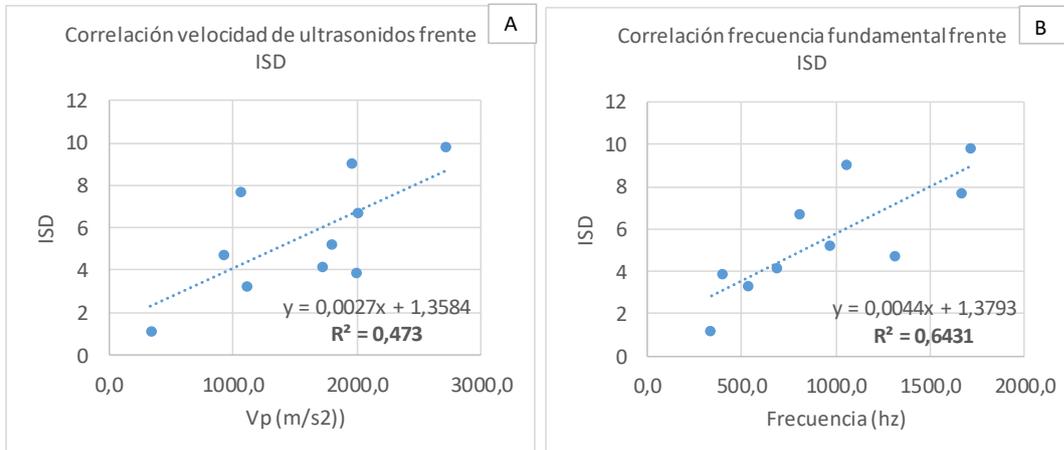


Figura 46. Gráfica A: Correlación del ISD con el valor de variación de ultrasonidos y frecuencia fundamental tras el envejecimiento. Gráfica B: Correlación del ISD con el valor de variación de frecuencia fundamental tras el envejecimiento artificial

La mejor correlación con los datos de frecuencia fundamental hace suponer una mejora de las técnicas sonoras en la caracterización petrofísica del material pétreo, frente a su análisis con técnicas ultrasónicas. Esta mejora se mantiene si se considera únicamente la correlación del índice gravitacional de cada litología (términos C+D+F de pérdida de peso) (Figura 47).

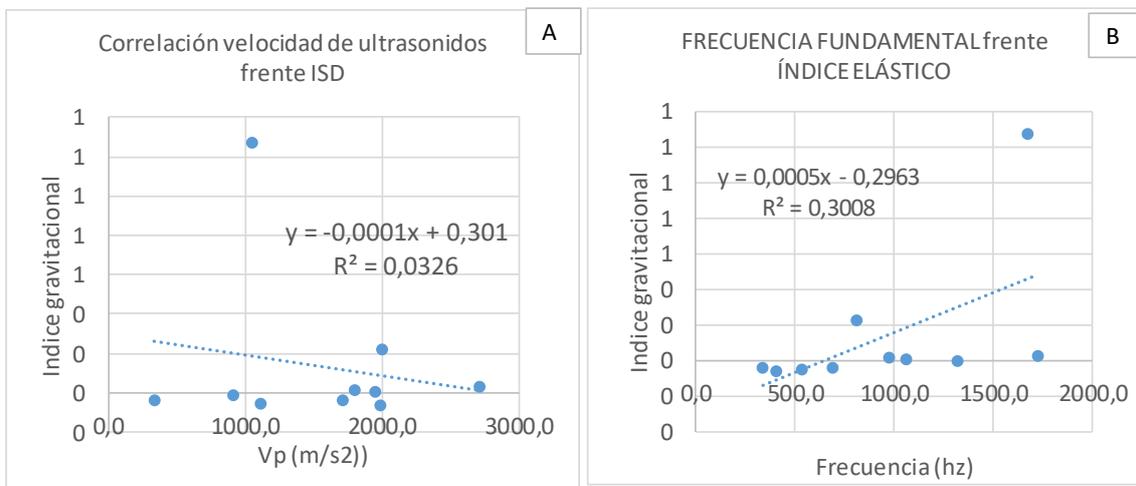


Figura 47. Gráfica A: Correlación del índice gravitacional con el valor de variación de ultrasonidos tras el envejecimiento Gráfica B: Correlación del índice gravitacional con el valor de variación de frecuencia fundamental tras el envejecimiento.

Teniendo en cuenta la escasa pérdida de peso de las litologías tras los envejecimientos, esta última relación nos indica la gran influencia de la pérdida de material en la variación de los valores de frecuencia fundamental.

## 8. CONCLUSIONES

- Existe una buena correlación entre la frecuencia fundamental y la velocidad de propagación ultrasónica. La frecuencia fundamental permite caracterizar de una forma ligeramente más acorde con la realidad el estado físico de las rocas.
- Tanto  $V_p$  como frecuencia fundamental informan sobre las propiedades intrínsecas del material pétreo. Los valores de  $V_p$  se correlaciona mejor con los valores de porosidad inaccesible. Los valores de frecuencia fundamental se correlacionan mejor con los valores de densidad aparente.
- El estado de saturación de las rocas solo afecta a las medidas de velocidad de propagación de ultrasonido; la frecuencia fundamental puede aplicarse sin necesidad de tener en cuenta el estado de saturación.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

AENOR (2014): UNE-EN 14066 Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia al envejecimiento por choque térmico. Asociación española de normalización y certificación, Madrid (España), 12p.

AENOR (2011): UNE-EN 12371 Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la heladicidad. Asociación española de normalización y certificación, Madrid (España), 17p.

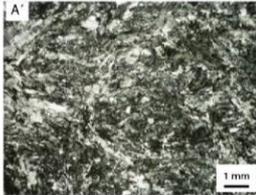
AENOR (2008): UNE-EN 13755 Determinación de la absorción de agua a presión atmosférica. Asociación española de normalización y certificación, Madrid (España), 10p.

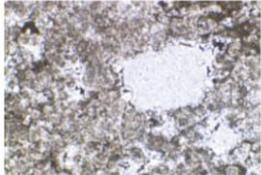
- AENOR (2007): UNE-EN 1936 Métodos de ensayo para la piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total. Asociación española de normalización y certificación, Madrid (España), 13p.
- AENOR (2006): UNE-EN 12504-4 Ensayos en estructuras de hormigón. Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos. Asociación española de normalización y certificación, Madrid (España), 16p.
- AENOR (2005): UNE-EN 14579 Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la velocidad de propagación del sonido. Asociación española de normalización y certificación, Madrid (España), 15p.
- AENOR (2004): UNE-EN 14146 Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación del módulo de elasticidad dinámico (con la medida de la frecuencia de resonancia fundamental). Asociación española de normalización y certificación, Madrid (España), 17p.
- AENOR (1999): UNE-EN 12370 Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la cristalización de sales. Asociación española de normalización y certificación, Madrid (España), 10 p.
- Alonso, F. J., Ordaz, J., Valdeón, L., & Esbert, R. M. (1987): Revisión crítica del ensayo de cristalización de sales. *Materiales de construcción*, 37: 53-60.
- Blake, O. O., Faulkner, D. R., & Tatham, D. J. (2019): The role of fractures, effective pressure and loading on the difference between the static and dynamic Poisson's ratio and Young's modulus of Westerly granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 116: 87-98.
- Buj, O. & Gisbert, J. (2008): Caracterización tecnológica de las rocas aragonesas de uso constructivo: Propiedades hídricas y durabilidad de las rocas con uso ornamental. Tesis doctoral, Universidad de Zaragoza (España), 483 p.
- Cazalla O. (2002): Morteros de cal. Aplicación en el patrimonio histórico. Tesis Doctoral, Universidad de Granada (España), 242 p.
- Ersen, A., Karagüler, M. & Güleç, A. (1995): Possible substitutes for Khorasan mortar in Bizantine and Ottoman monuments. En: *Methods of evaluating products for the conservation of porous buildings materials in monuments*. ICCROM, Roma (Italia), 15-27.

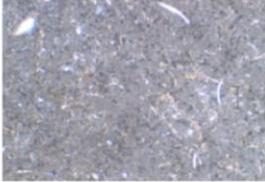
- Grosse, C. U., & Ohtsu, M. (2008): Acoustic emission testing. Springer Science & Business Media, Heidelberg (Alemania), 396 p.
- Guyarde, J. & Denis, A. (1986): Propagation des ondes dans les roches anisotropes sous contrainte évaluation de la qualité des schiste ardoisieres. Bull Engineering Geology, 33: 49-55.
- Isbert, A. C. (1998): Diseño acústico de espacios arquitectónicos. Iniciativa Digital Politecnica (Universitat Politecnica de Catalunya), Barcelona (España), 438 p.
- Krautkrämer, J. & Krautkrämer, H. (2013): Ultrasonic testing of materials. Springer Science & Business Media, New York (USA), 560 p.
- L' Hermite, R. G. (1960). Paper V-3, Volume change of concrete. En: Chemistry of Cement, Proceedings of the Fourth International Symposium, 43: 659-694.
- Martín Pérez, A. (1993): Ensayos y experiencias de alteración en la conservación de obras de piedra de interés histórico-artístico. Revista de Edificación (Universidad de Navarra), 13: 53-57.
- Miller RK., McIntire P., (1987): Nondestructive testing handbook, Vol. 5: Acoustic emission testing. American Society for Nondestructive Testing, Ohio (USA), 603 p.
- Moropoulou, A., Labropoulos, K., Konstanti, A., Roumpopoulos, K., Bakolas, A., & Michailidis, P. (2006): Weathering. In fracture and failure of natural building stones. Springer, Dordrecht, 291-297 p.
- Narváez Campo, P. E. (2011): Efectos del fracturamiento en muestras de rocas en la propagación de ondas. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Colombia, 161 p.
- Obert, L., & Duvall, W. (1942): Micro seismic method of predicting rock failure in underground mining. Part II. Laboratory experiments. Bureau of mines, Washington D. C. (USA).
- Ono, K., (1993): Trends of recent acoustic emission literature. Journal of Acoustic Emission 12: 177-198.

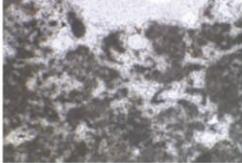
- Ouyang, C., Landis, E. N., Shah, S. P., (1991): Damage assessment in concrete using quantitative acoustic emission. *Journal of Engineering Mechanics*, 117: 2681-2698.
- Recuero, M. (1999): *Ingeniería acústica*. Editorial Paraninfo, Madrid (España), 670 p.
- RILEM TC 25-PEM (1980): Recommended tests to measure the deterioration of Stone and to assess the effectiveness of treatment methods. *Materials and Structures*, 13: 175-253.
- Rosell, J. R. & Cantalapedra, I. R. (2011): Método simple para determinar el módulo de Young dinámico a partir de una excitación por impacto aplicado a morteros de cal y cemento. *Materiales de construcción*, 61: 39-48.
- Sachse, W. & Kim, K.Y. (1987): Quantitative acoustic emission and failure mechanics of composite materials. *Ultrasonics*, 25: 195-203.
- Scruby, C. B., & Moss, B. C. (1985): The launching of Rayleigh waves from surface point sources. En: *Rayleigh-wave theory and application* (Ash, E. A. & Paige E. G. S., eds.). Springer, Berlin, Heidelberg (Alemania), 47: 102-109.
- Scott, H. H. (1957): Historical development of the sound level meter. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 29: 1331-1333.
- Thury, H. (1828). Sur le Procédé proposé par M. Brard pour reconnaître immédiatement les pierres qui ne peuvent pas résister à la gelée, et que l'on désigne ordinairement par le noms de pierres gelives ou pierres gelisses. In *Annales de Chimie et de Physique* (Vol. 38, pp. 160-192).
- Thury, H. (1828): Sur le Procédé proposé par M. Brard pour reconnaître immédiatement les pierres qui ne peuvent pas résister à la gelée, et que l'on désigne ordinairement par le noms de pierres gelives ou pierres gelisses. En: *Annales de Chimie et de Physique*, 38 (Gay-Lussac, L. J. & Arago F., eds.). Chez Crochard Libraire, Paris, 38: 160-192.

## ANEXO 1

<b>LITOLOGÍA:</b> Alabastro de Gelsa	
<b>Información general</b>	
Sigla: Ge Exolotada por: Exportadora Turolese, S.L	Formación: Nombre científico: Yeso alabastrino.
<b>Situación geográfica</b>	
En la corta Velilla, a 42km al SE de Zaragoza, entre el municipio de Gelsa (al NE) y Velilla del Ebro (SE), en el sector central de la cuenca del Ebro (cota 148 msnm).	
<b>Situación geológica</b>	
Unidad genético-sedimentaria Torrente de Cinca-Alcolea de Cinca, constituida por arcillas rojas con intercalaciones de nódulos de yeso dispersos, areniscas y calizas grises. Su formación se asocia a facies arcillosas y yesíferas de margen de lago salino, mientras que las calizas y margas pertenecen a facies depositadas en un ambiente lacustre-palustre.	
<b>Petrografía</b>	
Yeso alotriomorfo secundario microcristalino, tamaño inferior a 50 µm, interpenetrados entre sí (texturas masivas y esferulíticas). Yeso subidiomorfo e idiomorfas individuales de tamaños entre 30 µm y 300 µm. Yeso alotriomorfo con extinción no uniforme y tamaños de 200 µm a 2 mm.	

<b>LITOLOGÍA:</b> Travertino Nogal Montoro	
<b>Información general</b>	
Sigla: VI-II Exolotada por: Canteras CMC, S.L	Formación: - Nombre científico: caliza travertínica recristalizada-sparstone.
<b>Situación geográfica</b>	
Cantera "El Cantalar" ubicada en el término municipal de Villarluego (Teruel).	
<b>Situación geológica</b>	
Series subhorizontales de bancos masivos de edad miocena, localizados en la Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica.	
<b>Petrografía</b>	
De composición calcítica en su totalidad; compuesta por micrita 7%, microesparita 40% y esparita 30-35% (tapizando parcialmente la porosidad de la roca). Porosidad del orden del 15-20% con tamaño de micras hasta más de 3mm.	

<b>LITOLOGÍA:</b> Caliza Campanil.	
<b>Información general</b>	
Sigla: Tu	Formación: Tudela (Mioceno).
Exolotada por: Construcciones Zubillanga, S.A. Nombre cient.: Biomicrita-wackstone bioclástico.	
<b>Situación geográfica</b>	
En la cantera "Cabanilla-1" ubicada en el término municipal de Cabanillas (Tudela).	
<b>Situación geológica</b>	
Formación continental de materiales aluviales y lacustres carbonatados, dominada por arcillas y margas ocreas con niveles de caliza algales calcáreas más potentes hacia techo. Corresponden al desarrollo de un sistema lacustre-palustre carbonatado poco estable.	
<b>Petrografía</b>	
Textura granuda soportada por una matriz calcítica 58%. Bioclastos calcíticos 26% (50% bivalvos, 30% carofitas y 20% ostrácodos), cuarzo detrítico 2% y minerales de la arcilla. Cemento 3% de calcita esparítica. Porosidad abierta 10%, por bioturbación vegetal y porosidad móldica, condicionada por compactación.	

<b>LITOLOGÍA:</b> Travertino Teruel.	
<b>Información general</b>	
Sigla: Tr	Edad: Mioceno inferior.
Exolotada por: Mármoles Llorens, S.L. Nombre científico: Caliza travertónica recristalizada-Sparstone	
<b>Situación geográfica</b>	
En la cantera "Monteagudo" ubicada en el término municipal de Villalba Baja (Teruel).	
<b>Situación geológica</b>	
Calizas travertínicas de color crema, porosas pero coherentes, que pasan lateral y verticalmente a yesos-margas. Corresponden al relleno de la fosa de Alfambra-Teruel bajo régimen continental.	
<b>Petrografía</b>	
De composición calcítica en su totalidad; cristales subidiomorfos inequigranulares de microesparita 60% y calcita esparítica 15%. Relictos de bioclastos de 0'3mm dentro de los mosaicos esparíticos. Porosidad elevada 25% sin tamaño predominante (max. 5-6 mm).	

**LITOLOGÍA:** Piedra de Pueyo

### Información general

Sigla: Pa

Explotada por: Ayuntamiento de Pueyo de Aragón.

Formación: Grupo Hecho (Eoceno).

Nombre científico: Litoarenita-filoarenita.

### Situación geográfica

Cantera "Toreelisca" ubicada en el término municipal de Pueyo de Aragón (Huesca).

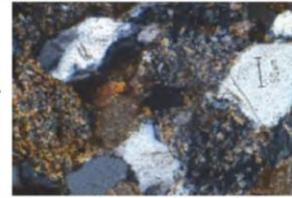
### Situación geológica

Facies Flysch del Grupo Hecho (alternancia de areniscas silíceas o calcáreas con margas y arcillas), al sur de las Sierras interiores y en contacto con las calizas de alveolinas. El tramo en explotación se corresponde al tramo medio de unos megarritmos, de barras calcáreas, generados por corrientes de turbidez y caracterizado por areniscas calcáreas gradadas de 5 a 50 metros.



### Petrografía

Esqueleto granosostenido 87'3%: fragmentos líticos 56'1% (metamórficos 61'2%), cuarzo 30%, feldspatos 3'2%, filosilicatos primarios 3'2%. Cemento esparítico 4'4% (calcita ferrosa (95%) y dolomita (5%)). Matriz filosilicatada 6'3%. Accesorios <1%. Clastos subangulosos 0'12 a 0'35mm y contactos largos-saturados.



**LITOLOGÍA:** Caliza de Calatorao

### Información general

Sigla: Ca.

Explotada por: Cantera CIM, S.L

Formación: Chelva.

Nombre científico: Packstone de peloides y pelecípodos

### Situación geográfica

Cantera y frente activo situados en el término municipal de Calatorao (Zaragoza), próximo al casco urbano, junto a la Almunia de D<sup>a</sup> Godina y Épila



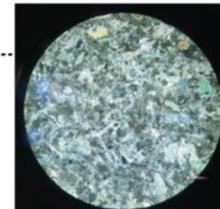
### Situación geológica

Asociado a facies de plataforma marina muy somera, la precipitación de carbonato cálcico y la acumulación de restos orgánicos se dieron en condiciones reductoras. La cristalinidad y el color se deben a los diferentes estadios de consolidación del sedimento.



### Petrografía

Textura granuda soportada por la matriz e intensa micro bioturbación que elimina la laminación de la roca. Bioclastos (49%), peloides (13%), matriz (38%), cemento (4%), y accesorios (1%).



**LITOLOGÍA:** Piedra Alto Aragón

**Información general**

Sigla: Hu  
Explotada por: Piedra del Alto Aragón S.L

Formación: Grupo Hecho (Eoceno).  
Nombre científico: Litoarenita calcárea-sedarenita

---

**Situación geográfica**

Se explota en la cantera "Los EsquiñonesII" ubicada en el término municipal de Fiscal (Huesca).

---

**Situación geológica**

Facies Flysch del Grupo Hecho (alternancia de areniscas silíceas o calcáreas con margas y arcillas), al sur de las Sierras interiores y en contacto con las calizas de alveolinas. El tramo en explotación se corresponde al tramo medio de unos megarritmos, de barras calcáreas, generados por corrientes de turbidez y caracterizado por areniscas calcáreas gradadas de 5 a 50 metros.




---

**Petrografía**

Esqueleto granosostenido compuesto por fragmentos líticos 57% de tamaño medio 0'2mm (carbonatados calcíticos (63'5%), dolomíticos (9'5%) y filitas/felsitas (27%)), cuarzo 13'9% y feldespatos 5'2%. Cemento calcítico esparítico 18% y sinaxial de cuarzo 1%. Matriz < 2%. Porosidad <1%.



**LITOLOGÍA:** Granodiorita

**Información general**

Sigla: Gr.  
Explotada por:

Formación:  
Nombre científico:

---

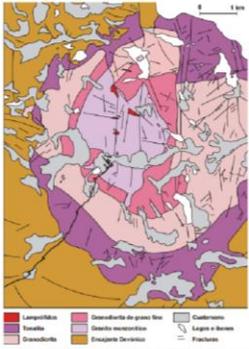
**Situación geográfica**

La zona muestreada a 6'65 km de la localidad de Panticosa (Huesca) y a 2'10 km del balneario, entre el embalse de Brazato y el Ibon de Brazato.

---

**Situación geológica**

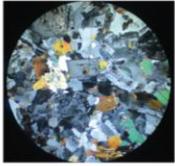
Macizo granítico manifestación del magmatismo hercínico, en la parte occidental del pirineo axial y emplazado en la zona alta del Valle de Tena. Forma circular y ligeramente alargada en dirección sur, extensión de 40 km<sup>2</sup>. Presenta zonación progresiva (Debon 1996). Roca encajante constituida por sedimentos Devónicos (calizas, pizarras y pizarras arenosas) afectados por metamorfismo de contacto superpuesto a un débil regional.




---

**Petrografía**

Granodiorita de origen sintectónico, corresponde a una roca granuda, holocristalina de grano medio y textura equigranular (Santana 2002).





## ANEXO 2

Litología	Dimensiones (mm)									Masa seca (g)		
	Longitud			Altura			Anchura			1ª pesada	2ª pesada	3ª pesada
Alabastro Gelsa	181,0	181,0	180,8	29,3	29,4	29,4	48,9	48,5	48,8	590,4	590,4	590,4
	180,5	180,5	180,5	29,4	29,7	30,3	50,2	49,7	50,0	610,8	610,8	610,9
	179,0	179,0	179,0	28,7	29,2	29,2	49,9	49,1	48,3	582,6	582,6	582,6
	180,5	180,5	180,5	29,5	29,7	29,8	49,9	49,6	49,5	605,5	605,5	605,5
	181,2	181,2	181,2	29,1	29,2	29,3	49,6	49,7	50,0	600,9	600,9	600,9
	180,4	181,0	180,2	31,5	30,5	30,4	48,6	49,2	49,2	623,0	623,0	623,0
	181,2	181,0	181,0	30,2	30,4	30,8	49,7	50,1	50,7	625,8	625,8	625,8
	181,0	181,0	181,0	29,6	30,1	29,7	51,9	51,3	50,7	625,6	625,6	652,6
	181,4	181,1	181,0	30,5	30,5	31,4	49,8	49,6	49,7	629,4	629,4	629,4
	181,3	181,0	181,0	28,7	29,1	29,0	50,7	50,4	49,5	600,0	600,0	599,9
	181,0	181,0	181,0	30,4	30,3	30,1	48,8	49,2	48,4	612,3	612,3	612,3
	181,0	181,0	181,2	31,7	31,7	31,0	49,5	49,3	49,2	637,2	637,1	637,2
	180,3	181,0	180,0	31,4	31,3	30,2	48,4	49,1	48,9	622,7	622,7	622,7
	182,0	181,5	181,2	29,6	29,8	29,6	50,7	50,9	50,4	620,4	620,4	620,4
	181,3	181,1	181,0	31,5	31,2	30,8	49,1	49,9	50,9	643,3	643,3	643,3
	181,0	181,0	181,0	28,3	28,8	29,3	50,0	49,9	49,7	589,6	589,6	589,6
	179,0	178,0	177,5	30,0	30,2	30,3	50,4	50,0	50,3	617,2	617,2	617,2
178,0	178,0	179,0	29,5	30,2	30,5	50,8	50,7	50,7	619,4	619,4	619,4	
Travertino Nogal	180,7	180,5	180,3	31,7	31,6	31,5	48,1	48,3	49,0	679,5	679,5	679,6
	180,0	180,0	180,0	32,2	31,8	31,5	48,8	49,0	48,9	674,8	674,9	674,8
	178,6	179,0	179,0	31,2	31,7	31,6	48,4	48,3	48,0	630,8	630,8	630,8
	180,5	180,3	180,0	30,1	30,1	30,4	50,2	49,9	49,8	670,4	670,3	670,4
	181,0	181,0	181,0	30,5	31,2	31,6	50,1	49,6	48,9	646,3	646,3	646,3
	180,4	180,3	180,0	31,1	30,4	30,0	50,3	49,8	49,3	659,4	659,4	659,4
	179,8	179,9	179,9	31,2	31,7	31,6	48,7	49,1	49,6	618,3	618,3	618,3
	179,0	178,0	177,0	30,5	31,2	31,6	50,0	50,2	50,4	656,4	656,3	656,4
	182,0	183,0	183,0	28,7	29,0	28,8	49,2	49,7	50,2	613,4	613,4	613,4
	184,0	184,0	184,0	28,9	28,8	28,9	49,7	49,1	48,8	597,6	597,6	597,6
	179,0	179,0	179,0	31,2	30,9	30,4	50,1	49,7	49,6	605,8	605,8	605,8
	182,0	181,4	181,0	29,7	29,9	30,0	51,5	51,0	50,6	656,9	656,9	656,9
	179,0	179,8	179,9	31,0	30,9	30,9	47,9	48,2	48,8	600,9	600,9	600,9
	182,0	182,0	182,0	29,7	29,8	29,8	50,8	51,1	51,3	654,4	654,4	654,4
	184,0	184,0	185,0	28,8	29,1	28,9	50,2	49,5	49,3	599,7	599,7	599,7
	182,0	182,2	183,0	29,8	29,6	29,5	50,3	50,6	50,2	629,8	629,8	629,8
	180,4	180,2	180,0	31,3	31,2	31,3	50,5	50,7	50,6	717,9	717,8	717,9
181,1	181,2	181,3	28,2	29,2	29,1	45,7	46,6	47,5	585,1	585,1	585,1	

Piedra de Pueyo	179,0	179,4	179,4	29,7	29,8	29,9	48,9	49,4	50,5	708,1	708,1	708,1
	179,0	179,2	179,3	30,8	30,8	30,5	50,2	50,2	49,9	733,7	733,7	733,7
	178,0	179,0	180,0	30,8	31,3	31,6	52,0	51,7	51,6	766,8	766,8	766,8
	180,1	180,0	180,0	29,0	29,2	29,5	51,5	51,6	51,1	726,5	726,4	726,4
	178,0	179,0	180,0	31,0	30,5	29,9	49,8	49,8	50,1	728,3	728,3	728,3
	181,0	180,0	180,0	30,3	30,5	30,7	49,5	50,7	50,9	739,9	739,9	739,9
	180,0	180,0	180,0	30,9	30,8	30,4	50,0	49,6	50,1	736,5	736,5	736,5
	180,4	179,5	178,0	30,0	29,9	29,8	49,7	49,8	49,6	704,6	704,6	704,6
	179,2	179,5	179,6	31,4	31,1	30,2	51,7	51,5	50,7	758,9	758,9	758,9
	179,2	179,4	179,4	30,7	30,9	30,8	49,6	48,9	47,8	723,3	723,3	723,3
	179,0	179,1	179,2	29,3	29,5	29,9	50,4	50,4	50,5	706,2	706,2	706,2
	175,0	177,0	178,0	30,9	30,5	29,9	50,9	50,7	50,2	720,3	720,4	720,3
	180,0	180,0	179,0	30,5	30,8	30,6	50,3	51,1	51,3	748,5	748,5	748,5
	180,0	180,0	180,0	28,2	28,6	28,8	49,4	50,5	50,9	690,9	690,9	690,9
	179,0	179,0	179,0	30,4	31,0	31,7	49,8	50,2	50,0	737,7	737,7	737,7
	181,0	178,0	177,5	29,5	29,3	29,4	50,7	50,3	50,5	698,7	698,7	698,7
	180,1	180,1	180,1	30,2	30,4	30,6	50,8	50,7	51,0	747,0	747,0	747,0
	180,0	180,1	180,1	29,4	29,4	29,3	48,4	48,8	48,9	682,6	682,6	682,6
	179,5	179,6	179,6	32,2	31,0	30,8	49,6	50,8	50,0	744,4	744,4	744,4
	Travertino Teruel	181,0	181,0	181,0	31,2	31,3	31,4	51,0	50,7	50,5	716,7	716,7
182,0		181,7	181,6	31,5	31,9	32,1	51,0	51,1	51,1	717,1	717,1	717,1
180,3		180,4	180,4	31,3	31,3	31,3	51,2	51,4	51,3	727,8	727,8	727,8
182,0		181,5	180,7	31,2	31,5	30,8	50,2	50,1	50,6	700,2	700,2	700,2
181,0		181,0	181,0	29,4	29,2	29,8	49,8	49,7	49,7	642,0	642,0	642,0
181,0		181,0	181,0	28,8	29,2	30,0	50,5	50,1	49,5	645,3	645,2	645,2
180,1		180,1	180,1	29,6	29,7	29,7	49,4	49,7	49,4	643,9	643,9	643,9
181,0		181,0	181,0	28,8	29,3	29,6	45,2	45,3	45,4	571,2	571,2	571,2
180,0		180,0	180,0	28,8	29,4	29,9	50,2	49,9	49,4	652,8	652,8	652,8
180,0		180,0	180,0	31,0	30,8	30,6	48,4	48,1	47,8	660,3	660,3	660,3
181,0		181,0	181,0	31,3	31,3	31,3	49,9	49,8	49,5	700,7	700,7	700,7
180,0		180,0	180,0	29,4	29,3	29,3	49,1	48,9	48,6	653,2	653,1	653,2
180,0		180,0	180,0	29,3	39,4	29,3	52,0	51,9	51,6	691,2	691,2	691,2
201,0		201,0	201,0	29,3	29,5	29,3	51,8	51,7	50,8	770,7	770,6	770,6
Piedra Alto Aragón	180,2	180,0	180,0	33,2	33,2	32,8	50,3	50,5	50,4	808,6	808,6	808,6
	180,0	180,0	180,0	30,9	31,0	31,0	51,0	51,0	51,0	757,8	757,8	757,8
	181,0	181,0	181,0	30,2	30,5	30,4	50,7	51,0	51,3	750,1	750,0	750,0
	179,7	180,0	180,0	31,2	31,1	31,1	51,4	51,7	51,4	771,3	771,3	771,2
	180,0	180,0	180,0	30,3	30,5	30,5	49,4	49,8	49,8	724,3	724,3	714,3
	180,0	180,0	180,0	32,6	32,8	33,1	51,1	50,8	50,7	806,1	806,1	806,1
	180,0	180,0	180,0	31,0	31,1	31,0	51,0	51,2	51,1	764,1	764,1	764,1
	180,5	180,5	180,5	30,6	30,6	30,5	50,4	50,6	50,6	745,2	745,2	745,2
	183,0	183,0	183,0	32,7	32,9	33,0	50,7	51,0	50,7	821,7	821,7	821,7

	180,0	180,0	180,0	32,9	33,1	32,8	50,6	50,9	50,7	806,8	806,8	806,8
	179,0	179,0	179,0	32,9	32,8	32,7	50,8	50,8	50,3	798,6	798,6	798,6
	181,0	181,0	181,0	32,8	32,8	32,7	51,1	51,3	51,2	813,8	813,8	813,8
	180,0	179,8	179,8	30,3	30,4	30,4	50,3	50,3	50,2	731,3	731,3	731,3
	180,5	180,4	180,4	30,2	30,2	30,6	50,8	51,1	51,5	744,1	744,1	744,1
	180,0	180,0	180,0	30,9	30,8	30,7	50,9	51,1	51,1	756,3	756,3	756,3
	180,0	180,0	180,0	33,1	33,4	33,3	51,2	51,5	51,5	825,5	825,5	825,5
	182,0	181,5	181,0	32,9	32,8	32,6	50,6	51,2	50,7	808,5	808,6	808,5
	180,1	180,3	180,3	32,5	32,6	32,9	61,4	61,3	66,9	911,9	911,9	911,9
Caliza Campanil	180,0	180,0	179,0	30,3	29,9	29,6	50,3	50,2	50,3	586,4	586,4	586,4
	178,9	178,2	178,0	29,5	29,8	29,9	50,8	50,6	50,7	568,1	568,1	568,1
	178,0	178,0	178,0	30,3	30,3	30,3	51,9	51,4	51,1	610,6	610,6	610,6
	180,0	179,1	179,2	29,7	29,8	30,0	50,4	50,1	50,5	573,9	573,8	573,8
	179,1	179,1	179,0	28,9	29,1	29,3	51,2	51,2	51,2	580,1	580,2	580,2
	180,0	180,4	180,0	30,7	30,8	31,0	50,3	50,3	50,4	608,2	608,2	608,7
	180,0	179,8	179,7	29,7	29,3	28,8	50,3	50,2	50,1	581,3	581,3	581,3
	179,0	179,0	179,0	30,4	30,1	29,8	51,1	51,2	51,1	592,4	592,4	592,4
	179,0	179,0	179,0	28,5	29,2	29,9	51,2	51,5	51,4	593,9	593,9	593,9
	179,0	179,0	179,0	30,7	30,9	31,0	50,4	50,5	50,6	549,9	549,9	549,9
	178,2	178,2	178,2	30,2	30,5	30,7	51,6	51,6	51,6	620,1	620,1	620,1
	178,0	178,0	178,0	30,5	30,2	30,0	50,8	51,6	52,6	619,4	619,4	619,4
	178,0	178,0	178,0	30,1	30,1	30,0	51,3	51,8	52,5	613,9	613,9	613,9
	178,2	178,2	178,2	30,4	30,6	30,5	51,1	51,3	51,2	599,6	599,6	599,6
	179,0	179,0	179,0	30,5	30,6	31,0	51,4	51,2	51,2	620,3	620,3	620,3
	179,0	179,0	179,0	31,1	30,8	30,5	51,0	51,3	51,0	597,6	597,5	597,6
	178,6	178,5	178,3	29,6	29,7	29,9	52,5	52,0	51,0	608,8	608,8	608,8
	178,0	178,1	178,1	30,2	30,1	29,4	50,8	50,8	50,9	537,2	537,2	537,2
	Arenisca Rodeno	180,0	180,0	180,0	29,4	29,5	29,4	50,3	50,2	49,9	613,5	613,5
180,0		180,0	180,0	29,4	29,4	29,5	50,4	50,3	49,8	609,3	609,4	609,3
180,0		180,0	180,0	29,5	29,6	30,0	51,4	51,6	51,4	644,3	644,2	644,2
179,8		180,0	180,0	29,2	29,2	29,1	52,0	51,9	51,4	645,2	645,2	645,3
181,0		181,0	181,0	30,3	30,4	30,3	51,6	51,9	51,8	686,4	686,4	686,4
181,3		181,2	181,4	29,5	29,4	29,2	50,4	51,0	51,2	649,0	649,0	649,0
179,0		179,6	179,5	31,3	31,6	32,1	49,6	49,6	49,8	663,6	663,6	663,6
181,0		181,2	181,0	29,4	29,5	29,3	52,1	52,4	52,3	650,3	650,3	650,3
180,0		180,0	180,0	30,2	30,2	30,3	51,1	51,0	50,4	660,6	660,6	660,6
180,0		180,0	180,0	29,3	29,3	29,4	51,0	51,6	52,0	643,4	643,4	643,4
180,0		180,0	180,0	31,5	31,2	31,0	50,2	50,3	49,9	663,5	663,5	663,4
180,0		180,0	180,0	30,2	30,7	31,5	49,3	49,9	49,9	658,2	658,2	658,2
180,0		180,0	180,0	31,8	31,7	32,1	48,7	49,2	49,6	669,3	669,3	669,3
182,0		182,0	182,0	29,3	29,4	29,5	50,7	50,5	50,4	642,1	642,1	642,1
180,0	180,0	180,0	29,6	29,7	29,8	49,7	49,4	48,8	625,4	625,4	625,5	

	181,0	181,0	181,0	29,3	29,4	29,5	51,6	51,5	51,3	653,3	653,3	653,3
	181,0	181,2	181,1	29,3	29,4	29,5	47,8	48,6	49,5	623,2	623,2	623,2
	180,0	180,0	180,0	29,3	29,4	29,3	51,1	50,7	50,9	616,9	616,8	616,8
Caliza de Calatorao	179,0	179,3	179,1	31,8	31,9	32,1	49,4	49,6	49,5	739,7	739,7	739,7
	180,0	180,0	180,0	30,0	30,1	30,2	49,9	50,2	50,4	722,1	722,1	722,1
	180,0	180,0	180,0	32,1	32,0	31,9	50,1	50,0	49,5	745,2	745,2	745,2
	180,0	180,1	180,0	31,8	31,7	31,6	49,8	50,1	50,1	749,6	749,6	749,6
	179,5	179,6	179,6	20,4	29,5	29,4	50,2	50,2	50,1	699,8	699,8	699,9
	181,0	181,0	181,1	31,4	31,4	31,4	50,0	50,3	50,1	740,2	740,2	740,2
	181,0	181,0	181,0	31,1	31,3	31,6	50,6	49,8	48,4	736,8	736,8	736,8
	179,0	179,3	179,5	32,1	32,1	32,0	50,8	50,8	50,7	753,0	753,0	753,0
	181,0	181,0	181,0	30,1	30,4	31,2	51,0	51,0	51,0	737,6	737,6	737,6
	181,0	181,0	181,0	31,5	31,4	31,4	50,3	50,0	50,0	739,8	739,8	739,8
	180,7	180,5	180,6	31,3	31,1	31,1	50,6	50,8	50,9	746,3	746,3	746,4
	180,0	180,3	180,1	30,0	30,1	30,2	49,8	50,1	50,0	717,9	717,9	717,9
	178,3	178,7	179,0	32,1	32,1	32,0	49,6	49,6	49,2	733,4	733,4	733,4
	180,0	180,0	180,0	31,9	32,0	32,1	50,5	50,9	51,0	756,3	756,3	756,3
	180,0	180,0	180,0	30,2	30,1	29,9	49,7	49,5	49,3	711,4	711,4	711,4
	179,0	179,0	179,2	29,4	29,5	29,3	50,2	50,1	50,0	696,2	696,2	696,2
	179,3	179,3	179,3	32,1	32,0	31,8	50,2	50,1	50,1	749,8	749,8	749,8
	179,0	179,0	179,0	32,1	32,0	32,1	49,5	49,7	50,0	737,5	737,6	737,6
	179,1	179,1	179,1	29,4	29,5	29,5	51,1	51,7	52,0	721,2	721,2	721,2
	Granodiorita de Panticosa	180,0	182,0	182,0	29,9	30,2	29,5	54,6	53,9	52,9	785,8	785,8
181,3		182,0	182,0	30,3	30,2	30,1	52,1	52,1	52,1	770,5	770,5	770,5
178,0		178,0	179,0	30,2	30,0	29,6	53,9	52,8	51,6	763,4	763,4	763,4
183,0		182,0	181,0	29,6	29,7	29,7	50,6	50,8	50,5	743,4	743,4	743,4
171,0		171,0	172,0	30,8	30,8	30,9	51,2	51,7	51,9	735,5	735,5	735,5
181,0		181,0	181,0	31,4	31,3	31,3	52,4	51,7	51,6	792,3	792,3	792,3
179,0		179,0	179,0	30,9	30,8	30,8	50,4	50,3	50,6	747,4	747,4	747,4
180,0		180,0	180,0	30,2	29,9	30,1	49,0	48,8	50,6	707,0	707,0	707,0
179,0		179,0	179,0	28,2	28,3	28,4	51,7	51,6	51,3	699,5	699,5	699,5
180,0		181,0	182,0	30,1	30,1	30,2	53,8	53,3	52,7	763,0	763,0	763,0
Basalto	181,5	181,0	181,0	30,6	30,7	30,8	51,6	51,6	51,2	855,1	855,1	855,1
	182,0	181,2	181,0	30,1	30,4	30,3	51,1	50,6	50,4	820,4	820,4	820,4
	183,0	182,0	182,0	30,1	30,2	30,3	56,3	55,8	54,7	920,1	920,1	920,1
	180,0	180,2	180,2	29,4	29,1	29,7	57,1	58,0	58,6	924,6	924,6	924,6
	183,0	183,0	183,0	32,3	32,3	32,3	52,5	52,0	51,3	921,8	921,8	921,9

Anexo 2. Dimensiones y masa seca de cada una de las probetas.

### ANEXO 3

	Vp en muestras secas (m/s)			Anisotropía (%)		Vs en muestras secas (m/s)	Vp en muestras saturadas (m/s)	
	Eje z	Eje x	Eje y	Absoluta	Relativa	Eje z	Eje z	Eje x
Alabastro de Gelsa	5234,0	5676,7	6025,0	10,54	2,98	3051,3	5336,3	5751,7
	5136,0	5805,0	6365,0	15,60	4,60	2994,2	5263,7	5712,0
	5176,0	5616,3	6365,0	13,60	6,25	3017,5	5282,7	5598,0
	4239,7	5943,0	6365,0	31,11	3,43	2471,6	5263,7	5734,0
	5296,0	3692,0	6190,7	10,84	7,79	3087,5	-	-
	5101,7	5689,0	5984,0	12,59	2,53	2974,2	-	-
	5219,7	5673,0	6190,7	12,01	4,36	3043,0	-	-
	5071,7	5610,0	6190,7	14,04	4,92	2956,7	-	-
	5184,7	5570,0	5985,7	10,27	3,60	3022,6	-	-
	4431,7	5694,7	6365,0	26,50	5,56	2583,6	-	-
	5227,0	5596,7	6190,7	11,31	5,04	3047,3	-	-
	5038,3	5805,0	6143,7	15,67	2,83	2937,3	-	-
	5107,3	5645,7	6143,7	13,36	4,22	2977,5	-	-
	5082,3	5610,0	6647,0	17,07	8,46	2962,9	-	-
	4997,7	5673,0	6184,0	15,70	4,31	2913,6	-	-
4929,7	5738,0	6457,0	19,15	5,90	2873,9	-	-	
Travertino Nogal	3486,7	6228,3	7035,3	47,43	6,08	2032,6	4603,0	6034,7
	3873,3	6145,0	7035,3	41,23	6,76	2258,1	3901,7	5797,0
	2480,0	6510,0	6947,0	63,14	3,25	1445,8	2929,3	6239,0
	4703,3	6432,0	7135,0	30,67	5,18	2742,0	4875,3	6107,3
	3475,3	5150,7	6540,3	40,55	11,89	2026,0	-	-
	4211,3	6224,0	7188,0	37,20	7,19	2455,1	-	-
	1991,0	6224,3	7370,0	70,71	8,43	1160,7	-	-
	3725,7	6488,0	7101,7	45,17	4,52	2172,0	-	-
	2097,3	4587,0	5307,0	57,60	7,28	1222,7	-	-
	2451,0	6707,7	7487,0	65,47	5,49	1428,9	-	-
	2499,7	5475,3	5561,3	54,70	0,78	1457,2	-	-
	2318,0	5411,7	7306,0	63,55	14,90	1351,3	-	-
	3118,0	5873,3	6242,0	48,53	3,04	1817,7	-	-
	2493,7	6450,7	7615,0	64,54	8,28	1453,7	-	-
	2018,0	4450,3	7623,0	66,57	26,28	1176,4	-	-
3183,0	6068,3	7247,0	52,19	8,85	1855,6	-	-	
2679,3	6432,0	1851,3	35,31	-55,30	1562,0	-	-	
2513,0	5448,7	7686,0	61,73	17,03	1465,0	-	-	
Piedra de Pueyo	5086,0	6413,0	9688,0	36,82	20,34	2965,1	5293,0	5585,0
	4804,7	6700,0	6772,7	28,68	0,54	2801,0	5049,0	5523,0
	4483,7	6713,0	7687,0	37,73	6,76	2613,9	5175,0	5548,0
	5042,7	6050,0	9469,0	35,01	22,03	2939,8	5291,0	5414,3
	4232,0	6948,0	8383,0	44,79	9,36	2467,2	-	-
	4901,7	6808,3	9301,7	39,15	15,48	2857,6	-	-
	4546,0	6821,3	9282,0	43,54	15,28	2650,2	-	-
	4703,0	6884,0	7207,0	33,25	2,29	2741,8	-	-
	4922,7	6744,0	8392,0	34,95	10,89	2869,8	-	-
	5213,0	6450,0	9698,0	35,43	20,11	3039,1	-	-
	5066,3	5868,0	9138,0	32,48	21,79	2953,6	-	-
	5136,0	6222,0	6929,0	21,89	5,38	2994,2	-	-
	5269,0	6458,0	9391,0	33,51	18,51	3071,7	-	-
	4964,0	6852,0	8759,0	36,40	12,22	2893,9	-	-
	4939,3	6027,0	8649,7	32,69	17,87	2879,6	-	-
5346,0	6233,3	8265,7	26,26	14,02	3116,6	-	-	
4594,0	6730,7	8960,7	41,45	14,21	2678,2	-	-	
5172,3	6386,0	7677,3	26,44	9,18	3015,4	-	-	
5200,0	6524,7	7638,0	26,57	7,86	3031,5	-	-	

Travertino Teruel	4887	7087,0	8143,7	35,83	6,94	2849,0	5829,0	6412,0
	4593,667	6029,3	7941,7	34,24	13,69	2678,0	4841,3	5940,0
	5865,667	6864,3	7956,0	20,84	7,37	3419,6	5859,3	6333,0
	3915	6582,7	7756,0	45,39	8,18	2282,4	5182,0	6183,3
	5376,333	6821,3	5958,0	15,86	-6,76	3134,3	-	-
	4308,667	6821,3	6808,0	36,77	-0,10	2511,9	-	-
	5234	6770,0	6645,0	21,97	-0,93	3051,3	-	-
	4577	6621,0	6647,0	31,01	0,20	2668,3	-	-
	4568,667	6884,0	8140,0	39,18	8,36	2663,5	-	-
	4386	6860,0	7756,0	39,98	6,13	2557,0	-	-
	5889,667	6916,0	7567,0	18,67	4,49	3433,6	-	-
	4094	7317,0	8500,3	48,23	7,48	2386,7	-	-
	4534,667	7432,0	8921,3	44,54	9,11	2643,6	-	-
	5104,333	7327,0	8832,0	36,82	9,31	2975,7	-	-
Piedra Alto Aragón	5782	6468,3	6880,0	13,37	3,08	3370,8	5884,7	6183,3
	5631,667	6458,0	5113,3	15,41	-11,62	3283,2	5808,7	6204,3
	4922,667	6378,0	6772,7	25,13	3,00	2869,8	5816,3	6179,0
	5253,667	6378,0	7160,3	22,39	5,78	3062,8	5872,0	6275,0
	4668,333	6496,0	6623,3	28,83	0,97	2721,6	-	-
	5562,667	6459,0	6881,7	16,61	3,17	3243,0	-	-
	5378	6253,0	7051,0	19,15	6,00	3135,3	-	-
	5679	6332,0	6823,0	13,66	3,73	3310,8	-	-
	5601	6413,0	6741,0	14,84	2,49	3265,3	-	-
	6123	6926,3	7278,0	13,79	2,48	3569,6	-	-
	6056,333	6760,0	7450,3	14,76	4,86	3530,8	-	-
	5820,667	6513,3	6698,0	11,88	1,40	3393,4	-	-
	5596,667	6227,0	6772,7	13,90	4,20	3262,8	-	-
	5443,333	6378,0	6672,0	16,58	2,25	3173,4	-	-
	4404	6541,0	7051,0	35,20	3,75	2567,5	-	-
	5691	6351,7	6604,0	12,15	1,95	3317,8	-	-
5761	6541,0	6671,0	12,79	0,98	3358,6	-	-	
5829,667	6125,0	6718,3	9,22	4,62	3398,6	-	-	
Caliza Campanil	4243,667	4446,0	4727,3	7,48	3,07	2474,0	4220,0	4218,0
	4217	4281,7	4752,0	6,64	5,21	2458,4	4074,7	4196,0
	4597,333	4682,0	5047,0	5,49	3,75	2680,2	4485,3	4559,3
	4353,333	4311,3	4727,3	3,67	4,60	2537,9	4183,7	4254,0
	4062,667	4575,3	5131,7	16,29	5,73	2368,5	-	-
	4439,333	4551,3	4802,7	5,08	2,69	2588,1	-	-
	4277,333	4485,7	4932,3	9,17	4,74	2493,6	-	-
	4389,667	4468,0	4727,3	4,52	2,82	2559,1	-	-
	4473,667	4279,0	4930,0	2,84	7,07	2608,1	-	-
	3060,333	3456,0	4126,0	19,27	8,84	1784,1	-	-
	4259,333	4508,0	4328,0	3,59	-2,04	2483,1	-	-
	4631,667	4760,0	5252,0	7,48	4,91	2700,2	-	-
	4634	4839,0	5191,0	7,60	3,51	2701,5	-	-
	4284,333	4414,3	4515,0	4,04	1,13	2497,7	-	-
	4393	4468,7	4802,7	5,23	3,60	2561,0	-	-
	3882,333	4234,7	4712,0	13,21	5,34	2263,3	-	-
4672,333	4809,0	5251,0	7,11	4,39	2723,9	-	-	
2672	3280,7	3993,3	26,53	9,80	1557,7	-	-	
Arenisca de Rodeno	1684,333	2862,7	3063,7	43,16	3,39	981,9	2889,7	3542,0
	2300,667	2748,0	3180,0	22,38	7,29	1341,2	3120,3	3452,0
	2913,333	2869,7	3359,0	6,45	7,86	1698,4	3793,0	3201,7
	1497	3248,3	3258,3	53,99	0,15	872,7	3561,0	3908,3
	2781,667	2865,0	3010,0	5,30	2,47	1621,6	-	-
	3112	2887,7	3261,3	9,38	2,34	1814,2	-	-
	3451,333	3589,7	3647,0	4,62	0,79	2012,0	-	-
	2125,333	2938,0	3261,3	31,43	5,22	1239,0	-	-

	1719,333	3319,0	3191,0	47,18	1,97	1002,3	-	-
	2758,667	3064,7	3285,0	13,11	3,47	1608,2	-	-
	2713,667	3579,7	3605,0	24,46	0,35	1582,0	-	-
	3515	3732,0	3633,3	4,55	-1,34	2049,2	-	-
	3332,667	3356,0	3542,7	3,38	2,71	1942,9	-	-
	2597,667	2821,3	3345,7	15,76	8,50	1514,4	-	-
	3292,333	3155,0	3629,7	2,95	7,00	1919,4	-	-
	2964,333	3041,0	3345,7	7,17	4,77	1728,1	-	-
	3030	3094,7	3409,0	6,82	4,83	1766,4	-	-
	2165,333	2697,3	3191,0	26,45	8,38	1262,3	-	-
Caliza de Calatorao	5454,7	6421,0	6548,0	15,88	0,98	3180,0	5803,0	6209,0
	6409,0	7156,0	7787,0	14,22	4,22	3736,4	6304,0	6708,0
	5591,3	6421,0	6639,3	14,38	1,67	3259,7	5891,0	6209,0
	6064,7	7056,0	7767,7	18,18	4,80	3535,6	6146,0	6708,0
	6134,7	6862,0	7719,0	15,85	5,88	3576,4	-	-
	5828,3	4487,7	6615,0	27,87	6,32	3397,8	-	-
	5251,3	6862,0	7404,0	26,38	3,80	3061,4	-	-
	5709,0	6333,3	6548,0	11,36	1,67	3328,3	-	-
	4421,7	6522,3	6686,0	33,05	1,24	2577,8	-	-
	5834,7	6340,0	6432,0	8,63	0,72	3401,5	-	-
	5724,7	6550,0	6711,0	13,66	1,21	3337,4	-	-
	6363,0	7056,0	7719,0	13,87	4,49	3709,6	-	-
	5758,3	6340,0	6417,0	9,72	0,60	3357,0	-	-
	5177,7	6550,0	6639,3	21,49	0,68	3018,5	-	-
	6269,0	7150,0	7923,0	16,82	5,13	3654,7	-	-
	4911,0	6862,0	7066,3	29,48	1,47	2863,0	-	-
5576,3	6591,0	6685,0	15,99	0,71	3250,9	-	-	
5555,7	6421,0	6548,0	14,32	0,98	3238,9	-	-	
6234,0	6674,3	7425,7	11,57	5,33	3634,3	-	-	
Granodiorita	4558,7	4199,7	4712,0	9,40	1,65	2657,6	5582,7	5773,0
	4009,3	3919,7	3913,0	1,30	1,13	2337,4	4778,3	5424,3
	4317,3	4953,3	4891,7	12,29	0,63	2516,9	5278,7	6125,0
	4017,7	4823,3	4787,7	16,39	0,37	2342,2	5038,7	6105,0
	4901,0	4595,0	4471,7	5,82	1,36	2857,2	-	-
	4382,0	4892,0	4663,0	8,28	2,40	2554,6	-	-
	4282,3	3916,3	4120,7	6,79	1,92	2496,5	-	-
	4926,7	4573,0	4946,3	7,36	0,20	2872,2	-	-
	4738,0	4574,7	4774,3	3,82	0,38	2762,2	-	-
	4735,3	4390,3	8438,7	33,35	28,11	2760,6	-	-
Basalto	6027,3	5977,7	5849,0	2,56	0,41	3513,9	6208,7	6664,0
	6053,3	6220,0	6122,0	1,91	0,79	3529,0	6201,7	6843,0
	6204,7	6088,7	6327,0	0,05	1,92	3617,2	6411,3	6500,0
	5869,0	6064,0	6383,0	5,70	2,56	3421,5	6378,7	6781,0
	6033,0	6094,3	6039,3	0,56	0,45	3517,2	-	-

Anexo 3. Medidas de las variables ultrasónicas en las probetas de las diez litologías, donde  $V_p$  es la velocidad de propagación de ondas longitudinales (en probetas secas y probetas saturadas en agua) y  $V_s$  es la velocidad de propagación de ondas transversales (medida solo en probetas secas).

## ANEXO 4

	Frecuencia fundamental flexural (Hz)				Frecuencia fundamental longitudinal (Hz)			
	1° golpeo	2° golpeo	3° golpeo	Frecuencia media de la probeta	1° golpeo	2° golpeo	3° golpeo	Frecuencia media de la probeta
Alabastro de Gelsa	3537,50	3537,50	3537,50	3537,50	5237,50	5237,50	5237,50	5237,50
	3487,50	3487,50	3487,50	3487,50	5187,50	5187,50	5187,50	5187,50
	3587,50	3587,50	3587,50	3587,50	5350,00	5337,50	5350,00	5345,83
	3462,50	3462,50	3450,00	3458,33	5137,50	5150,00	5150,00	5145,83
	3475,00	3475,00	3475,00	3475,00	5312,50	5312,50	5312,50	5312,50
	3687,50	3687,50	3687,50	3687,50	5287,50	5287,50	5287,50	5287,50
	3600,00	3600,00	3600,00	3600,00	5312,50	5312,50	5300,00	5308,33
	3600,00	3600,00	3612,50	3604,17	5337,50	5337,50	5337,50	5337,50
	3675,00	3675,00	3675,00	3675,00	5325,00	5312,50	5325,00	5320,83
	3487,50	3487,50	3500,00	3491,67	5312,50	5312,50	5312,50	5312,50
	3600,00	3600,00	3600,00	3600,00	5187,50	5187,50	5187,50	5187,50
	3700,00	3700,00	3700,00	3700,00	5337,50	5325,00	5325,00	5329,17
	3775,00	3775,00	3775,00	3775,00	5337,50	5337,50	5337,50	5337,50
	3450,00	3450,00	3450,00	3450,00	5250,00	5250,00	5112,50	5204,17
	3662,50	3662,50	3662,50	3662,50	5250,00	5250,00	5250,00	5250,00
	3337,50	3325,00	3325,00	3329,17	5100,00	5100,00	5100,00	5100,00
	2412,50	3962,50	3962,50	3445,83	4200,00	4325,00	4600,00	4375,00
2100,00	2112,50	2100,00	2104,17	5387,50	3625,00	5400,00	4804,17	
Travertino Nogal	4275,00	4275,00	4262,50	4270,83	5900,00	5887,50	5900,00	5895,83
	4200,00	4200,00	4200,00	4200,00	5825,00	5825,00	5825,00	5825,00
	3887,50	3875,00	3862,50	3875,00	5500,00	5500,00	5512,50	5504,17
	4087,50	4087,50	4075,00	4083,33	6000,00	6000,00	6000,00	6000,00
	4075,00	4087,50	4075,00	4079,17	5837,50	5837,50	5837,50	5837,50
	4037,50	4025,00	4037,50	4033,33	5875,00	5887,50	5887,50	5883,33
	3825,00	3825,00	3825,00	3825,00	5525,00	5362,50	5362,50	5416,67
	4062,50	4050,00	4050,00	4054,17	6062,50	6062,50	6062,50	6062,50
	2875,00	3062,50	3112,50	3016,67	4512,50	3875,00	4500,00	4295,83
	3475,00	3475,00	3475,00	3475,00	5425,00	5425,00	5425,00	5425,00
	3112,50	3112,50	3112,50	3112,50	3750,00	4362,50	5137,50	4416,67
	3850,00	3850,00	3850,00	3850,00	5637,50	5637,50	5637,50	5637,50
	3625,00	3612,50	3600,00	3612,50	5312,50	6125,00	5325,00	5587,50
	2525,00	2575,00	2550,00	2550,00	5075,00	4975,00	5000,00	5016,67
	3412,50	3412,50	3412,50	3412,50	5275,00	5137,50	5150,00	5187,50
	3612,50	3612,50	3612,50	3612,50	5375,00	5337,50	5375,00	5362,50
	3425,00	3437,50	3425,00	3429,17	4962,50	4450,00	4562,50	4658,33
3125,00	3125,00	3125,00	3125,00	4712,50	5337,50	4362,50	4804,17	
Piedra de Pueyo	4012,50	4012,50	4012,50	4012,50	6025,00	6000,00	6000,00	6008,33
	3912,50	3912,50	3912,50	3912,50	5725,00	5550,00	5725,00	5666,67
	4112,50	4112,50	4112,50	4112,50	6025,00	6037,50	6550,00	6204,17
	3912,50	3912,50	3912,50	3912,50	5550,00	5525,00	5162,50	5412,50
	3875,00	3887,50	3887,50	3883,33	5700,00	5687,50	5687,50	5691,67
	4000,00	3987,50	4000,00	3995,83	5862,50	5850,00	5862,50	5858,33
	3950,00	3950,00	3950,00	3950,00	5700,00	5675,00	5662,00	5679,00
	3812,50	3812,50	3812,50	3812,50	5650,00	5637,50	5650,00	5645,83
	4025,00	4012,50	4012,50	4016,67	7025,00	5962,50	5975,00	6320,83
	4150,00	4150,00	4150,00	4150,00	6487,50	5962,50	5962,50	6137,50
	3875,00	3875,00	3887,50	3879,17	5825,00	5400,00	5475,00	5566,67
	4312,50	4300,00	4300,00	4304,17	6412,50	6412,50	6425,00	6416,67
	4187,50	4187,50	4187,50	4187,50	6212,50	5162,50	5875,00	5750,00
	3775,00	3775,00	3775,00	3775,00	5862,50	5875,00	5862,50	5866,67

	4137,50	4137,50	4137,50	4137,50	5925,00	5625,00	5025,00	5525,00
	4112,50	4112,50	4112,50	4112,50	5850,00	6275,00	6287,50	6137,50
	3937,50	3937,50	3937,50	3937,50	5712,50	5837,50	5850,00	5800,00
	3950,00	3950,00	3950,00	3950,00	5850,00	5850,00	5862,50	5854,17
	4300,00	4312,50	4312,50	4308,33	6212,50	6225,00	6212,50	6216,67
Travertino Ternel	4450,00	4450,00	4450,00	4450,00	6425,00	6412,50	6412,50	6416,67
	4150,00	4150,00	4150,00	4150,00	6750,00	5937,50	5937,50	6208,33
	4487,50	4487,50	4487,50	4487,50	6537,50	6600,00	6537,50	6558,33
	4250,00	4262,50	4262,50	4258,33	6125,00	6137,50	6137,50	6133,33
	4150,00	4150,00	4150,00	4150,00	6387,50	6387,50	6387,50	6387,50
	4125,00	4125,00	4125,00	4125,00	6337,50	6337,50	6337,50	6337,50
	4187,50	4187,50	4187,50	4187,50	6400,00	6400,00	6812,50	6537,50
	4037,50	4037,50	4037,50	4037,50	5787,50	5787,50	5787,50	5787,50
	4287,50	4287,50	4287,50	4287,50	6375,00	6375,00	6375,00	6375,00
	4275,00	4275,00	4275,00	4275,00	6012,50	6012,50	6012,50	6012,50
	4375,00	4375,00	4375,00	4375,00	6300,00	6225,00	6300,00	6275,00
	4137,50	4137,50	4137,50	4137,50	6225,00	5850,00	6275,00	6116,67
	4225,00	4225,00	4225,00	4225,00	6350,00	6362,50	6362,50	6358,33
	3512,50	3512,50	3525,00	3516,67	5537,50	5537,50	5537,50	5537,50
	Piedra del Alto Aragón	4800,00	4800,00	4800,00	4800,00	6662,50	6675,00	6675,00
4512,50		4512,50	4512,50	4512,50	6662,50	6650,00	6625,00	6645,83
4425,00		4425,00	4425,00	4425,00	6637,50	6625,00	6612,50	6625,00
4575,00		4562,50	4562,50	4566,67	6750,00	6762,50	6750,00	6754,17
4437,50		4437,50	4437,50	4437,50	6500,00	6500,00	6500,00	6500,00
4800,00		4800,00	4800,00	4800,00	6675,00	6687,50	6675,00	6679,17
4525,00		4525,00	4525,00	4525,00	6625,00	6612,50	6612,50	6616,67
4475,00		4487,50	4500,00	4487,50	6575,00	6587,50	6587,50	6583,33
4650,00		4650,00	4650,00	4650,00	6500,00	6500,00	6512,50	6504,17
5025,00		5025,00	5025,00	5025,00	6962,50	6962,50	7000,00	6975,00
5000,00		5000,00	5000,00	5000,00	6975,00	6975,00	6962,50	6970,83
4762,50		4762,50	4762,50	4762,50	6725,00	6712,50	6787,50	6741,67
4500,00		4487,50	4475,00	4487,50	6600,00	6600,00	6600,00	6600,00
4337,50		4337,50	4337,50	4337,50	6525,00	6512,50	6537,50	6525,00
4500,00		4512,50	4500,00	4504,17	6662,50	6662,50	6662,50	6662,50
4787,50		4787,50	4787,50	4787,50	6687,50	6712,50	6687,50	6695,83
4700,00		4700,00	4700,00	4700,00	6637,50	6650,00	6637,50	6641,67
5300,00	5300,00	5312,50	5304,17	7250,00	6612,50	7312,50	7058,33	
Caliza campanil	3387,50	3387,50	3387,50	3387,50	5050,00	5050,00	5050,00	5050,00
	3312,50	3312,50	3312,50	3312,50	5362,50	5000,00	5000,00	5120,83
	3675,00	3675,00	3675,00	3675,00	5512,50	5512,50	5512,50	5512,50
	3362,50	3375,00	3375,00	3370,83	5037,50	5037,50	5037,50	5037,50
	3412,50	3412,50	3412,50	3412,50	5262,50	5261,50	5262,50	5262,17
	3500,00	3487,50	3500,00	3495,83	5100,00	5100,00	5100,00	5100,00
	3412,50	3412,50	3412,50	3412,50	5150,00	5150,00	5150,00	5150,00
	3437,50	3450,00	3437,50	3441,67	5175,00	5187,50	5200,00	5187,50
	3375,00	3375,00	3362,50	3370,83	5200,00	5175,00	5187,50	5187,50
	3112,50	3112,50	3112,50	3112,50	4437,50	4437,50	4437,50	4437,50
	3512,50	3525,00	3525,00	3520,83	5275,00	5287,50	5287,50	5283,33
	3662,50	3662,50	3662,50	3662,50	5525,00	5525,00	5525,00	5525,00
	3675,00	3675,00	3675,00	3675,00	5562,50	5562,50	5562,50	5562,50
	3400,00	3400,00	3400,00	3400,00	5100,00	5100,00	5100,00	5100,00
	3450,00	3450,00	3450,00	3450,00	5037,50	5037,50	5037,50	5037,50
	3225,00	3225,00	3225,00	3225,00	4775,00	4787,50	4787,50	4783,33
	3637,50	3650,00	3650,00	3645,83	5562,50	5562,50	5575,00	5566,67
	2862,50	2862,50	2862,50	2862,50	4250,00	4250,00	4250,00	4250,00
Arenisca de Rodeno	2100,00	2225,00	2100,00	2141,67	3662,50	3650,00	3650,00	3654,17
	2175,00	2300,00	2300,00	2258,33	3575,00	3625,00	3625,00	3608,33
	2575,00	2575,00	2575,00	2575,00	4212,50	4175,00	4150,00	4179,17

	2362,50	2387,50	2375,00	2375,00	4037,50	4062,50	4025,00	4041,67
	2125,00	2050,00	2062,50	2079,17	3487,50	3137,50	3137,50	3254,17
	2462,50	2512,50	2512,50	2495,83	4112,50	4112,50	4137,50	4120,83
	3162,50	3137,50	3125,00	3141,67	4587,50	4612,50	4600,00	4600,00
	2575,00	2575,00	2575,00	2575,00	3925,00	4225,00	4287,50	4145,83
	2412,50	2400,00	2400,00	2404,17	4087,50	3937,50	3962,50	3995,83
	2412,50	2425,00	2412,50	2416,67	4000,00	3975,00	3987,50	3987,50
	3075,00	3087,50	3100,00	3087,50	4625,00	4625,00	4625,00	4625,00
	3137,50	3137,50	3137,50	3137,50	4712,50	4712,50	4700,00	4708,33
	2937,50	2987,50	2987,50	2970,83	4325,00	4337,50	4325,00	4329,17
	2512,50	2362,50	2475,00	2450,00	4087,50	4075,00	4087,50	4083,33
	3025,00	2962,50	2962,50	2983,33	4562,50	4562,50	4575,00	4566,67
	2462,50	2562,50	2512,50	2512,50	4012,50	4012,50	3875,00	3966,67
	2512,50	2525,00	2512,50	2516,67	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00
	2212,50	2200,00	2162,50	2191,67	3525,00	3500,00	3525,00	3516,67
Caliza de Calatorao	4587,50	4587,50	4575,00	4583,33	6425,00	6425,00	6425,00	6425,00
	4587,50	4600,00	4600,00	4595,83	6837,50	6837,50	6837,50	6837,50
	4562,50	4562,50	4562,50	4562,50	6475,00	6475,00	6475,00	6475,00
	4737,50	4737,50	4737,50	4737,50	6712,50	6712,50	6712,50	6712,50
	4462,50	4462,50	4462,50	4462,50	6762,50	6737,50	6762,50	6754,17
	4412,50	4425,00	4425,00	4420,83	6362,50	6362,50	6362,50	6362,50
	4612,50	4600,00	4600,00	4604,17	6612,50	6612,50	6612,50	6612,50
	4525,00	4537,50	4537,50	4533,33	6462,50	6462,50	6450,00	6458,33
	4337,50	4337,50	4337,50	4337,50	6512,50	6500,00	6512,50	6508,33
	4375,00	4375,00	4362,50	4370,83	6325,00	6325,00	6312,50	6320,83
	4437,50	4375,00	4400,00	4404,17	6425,00	6425,00	6425,00	6425,00
	4550,00	4562,50	4562,50	4558,33	6812,50	6812,50	6812,50	6812,50
	4550,00	4550,00	4550,00	4550,00	6387,50	6387,50	6400,00	6391,67
	4525,00	4525,00	4512,50	4520,83	6475,00	6475,00	6475,00	6475,00
	4600,00	4600,00	4600,00	4600,00	6787,50	6775,00	6812,50	6791,67
	4450,00	4450,00	4450,00	4450,00	6762,50	6762,50	6762,50	6762,50
4587,50	4575,00	4587,50	4583,33	6487,50	6500,00	6525,00	6504,17	
4525,00	4512,50	4525,00	4520,83	6362,50	6350,00	6375,00	6362,50	
4525,00	4525,00	4525,00	4525,00	7000,00	7000,00	7000,00	7000,00	
Granodiorita	4025,00	4025,00	4037,50	4029,17	6525,00	6512,50	6525,00	6520,83
	3200,00	3262,50	3262,50	3241,67	5062,50	5112,50	5037,50	5070,83
	3737,50	3712,50	3712,50	3720,83	5837,50	5850,00	5850,00	5845,83
	3525,00	3500,00	3512,50	3512,50	5437,50	5475,00	5437,50	5450,00
	4562,50	4550,00	4562,50	4558,33	6800,00	6812,50	6812,50	6808,33
	3812,50	3812,50	3812,50	3812,50	5787,50	5775,00	5775,00	5779,17
	3675,00	3675,00	3662,50	3670,83	5362,50	5387,50	5387,50	5379,17
	4287,50	4287,50	4275,00	4283,33	6575,00	6637,50	6637,50	6616,67
3937,50	3937,50	3937,50	3937,50	6287,50	6300,00	6525,00	6370,83	
4100,00	4087,50	4087,50	4091,67	6425,00	6412,50	6450,00	6429,17	
Basalto	4887,50	4887,50	4887,50	4887,50	7362,50	7362,50	7362,50	7362,50
	4750,00	4750,00	4750,00	4750,00	7150,00	7125,00	7137,50	7137,50
	4950,00	4987,50	4962,50	4966,67	7850,00	7850,00	7850,00	7850,00
	4812,50	4812,50	4812,50	4812,50	8137,50	8137,50	8125,00	8133,33
	5087,50	5087,50	5087,50	5087,50	7312,50	7312,50	7312,50	7312,50

Anexo 4. Frecuencia fundamental flexural y frecuencia fundamental longitudinal, de las probetas ensayadas por emisión acústica.

## ANEXO 5

Módulos de elasticidad dinámicos (MPa)			
	Calculado con los valores de velocidad de ultrasonidos	Calculado con los valores de frecuencia fundamental flexural	Calculado con los valores de frecuencia fundamental longitudinal
	MOE ultrasonidos	MOE flexural	MOE longitudinal
Alabastro de Gelsa	53,42	58,06	15,83
	51,44	56,98	15,61
	52,24	57,64	15,82
	35,05	56,50	15,48
	54,70	57,22	16,11
	50,76	60,27	15,92
	53,13	59,19	16,07
	50,16	59,21	16,15
	52,42	60,49	16,13
	38,30	57,43	16,09
	53,28	59,14	15,70
	49,50	60,83	16,14
	50,87	61,64	16,05
	50,37	57,04	15,84
	48,71	60,26	15,91
47,39	54,69	15,43	
Travertino Nogal	24,65	72,56	18,45
	30,42	70,96	18,12
	12,47	64,65	16,91
	44,86	69,19	18,72
	24,49	69,68	18,36
	35,96	68,32	18,35
	8,04	64,53	16,83
	28,15	66,98	18,45
	8,92	52,49	13,76
	12,18	61,35	17,64
	12,67	52,00	13,59
	10,89	66,11	17,83
	19,71	60,73	17,30
	12,61	44,04	15,96
	8,26	60,46	16,93
20,54	62,67	17,13	
14,56	58,05	14,52	
12,80	53,51	15,15	
Piedra de Pueyo	58,68	75,21	20,74
	52,37	73,26	19,54
	45,60	76,87	21,36
	57,68	73,98	18,85
	40,63	72,59	19,59
	54,50	75,80	20,47
	46,88	74,66	19,77
	50,18	71,50	19,50
	54,97	75,43	21,86
	61,65	77,86	21,21
	58,23	72,59	19,18
	59,84	78,37	21,52
	62,98	78,85	19,94
	55,90	71,35	20,42
	55,34	77,34	19,02
64,83	76,73	21,09	
47,88	74,50	20,21	

	60,69	74,70	20,39
	61,34	81,04	21,53
Travertino Ternel	50,26	78,89	20,95
	44,40	74,19	20,44
	72,40	78,99	21,26
	32,25	75,83	20,11
	60,82	73,57	20,85
	39,06	73,13	20,69
	57,65	73,46	21,12
	44,08	71,58	18,89
	43,92	75,17	20,58
	40,48	74,95	19,41
	72,99	77,56	20,49
	35,27	72,54	19,75
	43,27	74,07	20,53
	54,82	76,88	22,29
Piedra del Alto Aragón	75,82	90,77	23,23
	71,93	85,27	23,13
	54,96	84,55	23,31
	62,60	86,20	23,48
	49,43	83,85	22,62
	70,18	90,70	23,24
	65,59	85,50	23,03
	73,14	85,27	23,04
	71,15	90,82	23,39
	85,03	94,95	24,27
	83,19	93,43	23,99
	76,84	90,99	23,72
	71,04	84,67	22,93
	67,20	82,36	22,82
	43,99	85,11	23,18
	73,45	90,46	23,30
	75,27	90,30	23,50
77,08	100,49	24,63	
Caliza campanil	33,00	51,52	14,15
	32,58	49,66	14,14
	38,73	54,86	15,16
	34,72	51,14	14,07
	30,24	51,55	14,64
	36,11	53,45	14,36
	33,52	52,00	14,45
	35,31	51,96	14,42
	36,67	50,89	14,42
	17,16	46,99	12,34
	33,24	52,68	14,56
	39,31	54,68	15,19
	39,35	54,86	15,29
	33,63	50,87	14,05
	35,36	52,08	14,01
	27,62	48,69	13,30
	40,00	54,71	15,38
13,08	42,77	11,69	
Arenisca de Rodeno	5,74	36,10	11,34
	10,71	38,07	11,20
	17,17	43,41	12,97
	4,53	40,01	12,54
	15,65	35,44	10,21
	19,59	42,68	12,98

	24,10	52,59	14,18
	9,14	43,92	13,02
	5,98	40,53	12,40
	15,40	40,74	12,38
	14,90	52,05	14,36
	25,00	52,89	14,62
	22,47	50,08	13,44
	13,65	42,22	12,96
	21,93	50,29	14,18
	17,78	42,83	12,45
	18,57	42,94	12,57
	9,49	36,95	10,92
Caliza de Calatorao	65,99	83,89	21,66
	91,11	84,93	23,27
	69,34	84,32	22,04
	81,58	87,58	22,85
	83,48	82,07	22,88
	75,35	82,64	21,90
	61,17	86,04	22,76
	72,29	83,10	21,80
	43,37	81,05	22,40
	75,51	81,68	21,75
	72,69	81,93	22,01
	89,80	84,37	23,22
	73,55	82,85	21,43
	59,46	83,55	22,04
	87,17	85,01	23,11
	53,49	81,39	22,78
	68,97	84,04	21,96
68,46	82,62	21,41	
86,20	82,79	23,59	
Granodiorita	47,80	78,37	23,36
	36,98	63,35	18,25
	42,88	70,00	20,25
	37,13	68,82	19,67
	55,25	79,15	21,77
	44,17	73,88	20,63
	42,18	69,57	18,78
	55,83	82,09	23,35
	51,64	74,63	22,24
	51,58	79,29	22,94
Basalto	92,44	104,96	29,12
	93,24	102,27	28,30
	97,96	108,04	31,45
	87,64	102,18	31,80
	92,61	111,48	29,51

Anexo 5. Valores del módulo de elasticidad dinámico calculado con ultrasonidos (MOE ultrasonidos), con la frecuencia fundamental flexural (MOE flexural) y con la frecuencia fundamental longitudinal (MOE longitudinal).

millón.

## ANEXO 6

	Densidad aparente geométrica (kg/m3)	Densidad aparente con métodos hídrico (kg/m3)	Densidad real Picnómetro (kg/m3)	Porosidad abierta (%)	Porosidad cerrada (%)	Porosidad total (%)
Alabastro Gelsa	2280,98	2307,64	2317,7	0,24	0,19	0,43
	2289,25	2308,15		0,22	0,19	0,41
	2261,20	2308,90		0,21	0,17	0,38
	2261,38	2308,97		0,20	0,17	0,38
	2272,81	2309,24		0,16	0,21	0,36
	2281,77	2310,01		0,18	0,15	0,33
Travertino nogal	2317,36	2367,81	2681,3	5,16	6,53	11,69
	2409,62	2470,40		3,31	4,55	7,87
	2222,09	2352,73		6,25	6,01	12,25
	2362,13	2404,59		4,64	5,68	10,32
	2341,54	2419,11		5,15	4,63	9,78
	2289,41	2389,69		5,71	5,16	10,88
Piedra de Pueyo	2677,64	2686,99	2771,1	1,60	1,44	3,04
	2670,13	2688,14		1,57	1,42	2,99
	2675,69	2686,54		1,61	1,45	3,05
	2649,36	2679,35		1,79	1,52	3,31
	2669,74	2684,44		1,69	1,44	3,13
	2684,42	2689,34		1,54	1,41	2,95
Travertino Tenuel	2420,66	2491,49	2694,6	3,43	4,11	7,54
	2426,52	2484,65		3,69	4,10	7,79
	2433,53	2495,33		3,30	4,09	7,40
	2381,99	2462,60		4,00	4,61	8,61
	2477,44	2510,63		2,44	4,38	6,83
	2476,77	2503,32		2,54	4,56	7,10
Piedra Alto Aragón	2662,55	2675,32	2689,0	1,20	-0,69	0,51
	2680,70	2685,22		1,04	-0,89	0,14
	2676,71	2683,11		1,03	-0,81	0,22
	2673,83	2682,66		1,00	-0,77	0,24
	2690,09	2687,35		0,97	-0,91	0,06
	2682,89	2696,99		0,58	-0,88	-0,30
Caliza campanil	2173,27	2188,55	2694,2	14,29	4,48	18,77
	2177,27	2202,44		13,88	4,37	18,25
	2200,92	2226,35		13,84	3,52	17,36
	2149,77	2169,65		15,11	4,36	19,47
	2212,43	2243,63		13,14	3,58	16,72
	1968,94	1985,31		21,49	4,82	26,31
Arenisca de Rodeno	2415,51	2442,44	2645,1	4,50	3,17	7,66
	2396,08	2409,27		5,06	3,85	8,92
	2354,03	2375,08		5,69	4,52	10,21
	2336,57	2352,76		6,45	4,60	11,05

	2389,65	2416,73		4,86	3,77	8,63
	2364,96	2376,21		5,95	4,22	10,17
Caliza de Calatorao	2940,95	2659,58	2716,7	1,07	1,03	2,10
	2597,80	2611,03		2,73	1,16	3,89
	2617,95	2644,98		1,35	1,29	2,64
	2580,67	2597,00		3,09	1,31	4,41
	2617,25	2634,62		1,77	1,26	3,02
	2596,34	2609,21		2,79	1,16	3,96
Granodiorita	2697,38	2732,58	2755,6	0,56	0,28	0,84
	2692,45	2728,26		0,54	0,46	0,99
	2685,42	2694,70		1,16	1,05	2,21
	2644,17	2738,96		0,50	0,10	0,60
	2680,64	2719,83		0,57	0,73	1,30
	2626,57	2726,18		0,61	0,45	1,07
Basalto	2988,55	2999,15	3064,0	0,63	1,49	2,12
	2948,39	2968,92		1,12	1,98	3,10
	3009,59	3031,15		0,41	0,66	1,07
	3020,51	3035,34		0,48	0,45	0,94
	3003,57	3027,84		0,60	0,58	1,18

Anexo 6. Parámetros hídricos (densidad y porosidad) de seis probetas de cada litología.

## ANEXO 7

	Absorción en 1 hora (%)	Absorción en 2 días (%)	Absorción en 7 días (%)	Grado de saturación en 1 hora (%)	Grado de saturación en 2 días (%)	Grado de saturación en 7 días (%)
Alabastro de Gelsa	0,080	0,069	0,105	91,5	79,5	120,2
	0,083	0,079	0,096	95,0	90,1	110,4
	0,058	0,073	0,089	66,5	83,6	101,9
	0,050	0,086	0,088	56,8	98,3	100,8
	0,057	0,060	0,068	64,9	69,2	78,3
	0,064	0,063	0,077	73,9	72,6	88,5
Travertino Nogal	1,447	1,894	2,178	68,8	90,0	103,5
	0,783	1,122	1,341	37,2	53,3	63,7
	1,635	2,293	2,654	77,7	109,0	126,2
	1,180	1,634	1,928	56,1	77,7	91,7
	1,355	1,934	2,130	64,4	91,9	101,2
	1,436	2,119	2,391	68,3	100,7	113,7
Piedra de Pueyo	0,177	0,566	0,594	29,1	93,1	97,7
	0,164	0,546	0,585	27,0	89,8	96,2
	0,166	0,565	0,598	27,2	92,9	98,4
	0,183	0,646	0,668	30,1	106,3	109,8
	0,155	0,553	0,629	25,6	91,0	103,5
	0,126	0,518	0,573	20,7	85,3	94,4
Travertino Teruel	0,756	1,147	1,375	58,2	88,3	105,9
	0,989	1,297	1,484	76,2	99,9	114,3
	0,730	1,112	1,323	56,2	85,6	101,9
	1,024	1,404	1,624	78,8	108,0	125,0

	0,586	0,813	0,974	45,1	62,6	75,0
	0,564	0,868	1,015	43,4	66,8	78,1
Piedra Alto Aragón	0,084	0,310	0,449	23,3	85,7	124,1
	0,099	0,259	0,386	27,4	71,5	106,5
	0,093	0,255	0,385	25,7	70,4	106,4
	0,098	0,259	0,374	27,2	71,5	103,2
	0,080	0,234	0,362	22,2	64,5	100,1
	0,050	0,135	0,217	13,7	37,2	59,8
Caliza Campanil	5,744	6,169	6,529	80,7	86,7	91,7
	5,458	5,936	6,303	76,7	83,4	88,6
	5,721	5,941	6,218	80,4	83,5	87,4
	6,050	6,606	6,966	85,0	92,8	97,9
	5,323	5,643	5,858	74,8	79,3	82,3
	9,776	10,518	10,826	137,4	147,8	152,1
Arenisca de Rodeno	1,471	1,679	1,841	64,9	74,1	81,2
	1,655	1,889	2,102	73,0	83,3	92,7
	1,870	2,100	2,397	82,5	92,7	105,8
	2,079	2,416	2,741	91,8	106,6	120,9
	1,457	1,781	2,012	64,3	78,6	88,8
	1,846	2,204	2,504	81,5	97,3	110,5
Caliza calatorao	0,111	0,267	0,402	13,6	32,7	49,4
	0,241	0,791	1,044	29,6	97,1	128,1
	0,121	0,334	0,509	14,8	41,0	62,5
	0,284	0,953	1,192	34,8	117,1	146,3
	0,145	0,472	0,670	17,9	57,9	82,3
	0,235	0,835	1,070	28,8	102,5	131,4
Granodiorita	0,154	0,179	0,205	63,8	73,9	84,8
	0,151	0,164	0,196	62,4	67,9	81,3
	0,354	0,393	0,429	146,4	162,7	177,6
	0,152	0,170	0,184	62,9	70,5	76,1
	0,161	0,177	0,210	66,7	73,2	86,8
	0,178	0,192	0,225	73,8	79,4	93,3
Basalto	0,081	0,132	0,209	37,6	61,3	97,1
	0,216	0,302	0,379	100,2	140,0	175,6
	0,049	0,075	0,134	22,5	34,9	62,3
	0,055	0,093	0,159	25,6	43,3	73,5
	0,066	0,138	0,197	30,7	64,2	91,5

Anexo 7. Absorción y grado de saturación de seis probetas de cada litología ensayada, tras una hora, dos días y siete días de dar comienzo la inmersión en agua.

## ANEXO 8

		Medida expresada en micras		Medida expresada en tantos por millón	
		Eje Z	Eje X	Eje Z	Eje X
Alabastro de Gelsa	0,0037	0,0032	20,497	66,703	
	0,0100	0,0042	55,633	85,079	
	0,0000	0,0046	0,233	93,334	
	0,0190	0,0026	105,494	52,024	
Travertino nogal	0,0127	0,0209	70,406	431,553	
	0,0164	0,0115	29,861	380,053	
	0,0152	0,0111	11,414	191,803	
	0,0194	0,0019	107,480	38,374	

Piedra de Pueyo	0,0487	0,0109	271,724	220,138
	0,0447	0,0069	249,553	138,066
	0,0410	0,0169	391,294	326,976
	0,0334	0,0323	185,382	627,229
Travertino Teruel	0,0010	-0,0034	5,755	-67,332
	0,0064	-0,0027	35,072	-53,872
	-0,0153	-0,0061	-84,784	-118,553
	-0,0053	-0,0108	-29,170	-213,718
Piedra Alto Aragón	0,0200	0,0103	111,301	203,386
	0,0234	0,0056	129,861	109,513
	0,0220	0,0113	121,777	220,545
	0,0154	0,0089	85,464	173,072
Caliza campanil	0,0077	0,0016	42,904	31,503
	0,0057	0,0202	32,003	399,750
	0,0104	0,0033	58,287	63,144
	0,0140	-0,0104	78,254	-206,940
Arenisca de Rodeno	0,0274	0,0039	152,083	78,099
	0,0110	0,0122	61,343	244,251
	0,0150	0,0080	61,343	-12601,981
	0,0097	0,0109	53,955	211,004
Caliza de Calatorao	0,0047	0,0076	26,284	153,126
	0,0097	0,0049	53,935	97,974
	0,0071	0,0041	29,861	432,705
	0,0064	-0,0004	35,410	-8,337
Granodiorita	0,0050	0,0116	27,803	215,370
	0,0314	0,0042	172,611	81,569
	0,0054	0,0153	30,140	289,081
	0,0015	0,0106	80,815	729,002
Basalto	0,0100	0,0049	55,428	95,537
	0,0064	0,0039	35,143	77,252
	0,0124	0,0059	67,870	106,472
	0,0060	0,0089	33,540	154,045

Anexo 5. Resultados del ensayo de cambio dimensional; expresados en micras y en tantos por