

Trabajo Fin de Grado

“Evaluación del estado físico de las rocas por métodos indirectos: El caso de su emisión sonora”

Francisco Javier Artiaga Murillo.
Director: Josep Gisbert Aguilar.
Universidad de Zaragoza 2016

ÍNDICE.

Abstract	Pág. 1
1. Planteamiento	Pág. 2
2. Objetivos	Pág. 3
3. Metodología	Pág. 3
4. Situación y Contexto geológico	Pág. 6
5. Análisis petrofísico de las litologías de la colección	Pág. 8
5.1 Material	Pág. 8
5.2 Petrografía	Pág. 9
5.3 Caracterización hídrica	Pág. 9
5.4 Caracterización mecánica (Ultrasonidos).....	Pág. 10
6. Determinación del tipo de análisis de la señal sonora en cada método:	Pág. 11
6.1. Introducción	Pág. 11
6.2. Comparación del análisis de la frecuencia fundamental mediante una transformada rápida de Fourier frente a su análisis en tercio de octava	Pág.12
7. Análisis de emisión sonora como frecuencia fundamental, aplicando la transformada rápida de Fourier. (Método 1)	Pág. 13
7.1 Material y equipo	Pág. 13
7.2 Fórmula de la frecuencia fundamental	Pág. 14
7.2.1 Normalización de la fórmula	Pág. 14
7.3 Influencia de los parámetros internos	Pág. 15
7.3.1 Dimensiones geométricas	Pág. 15
7.3.2. Litología	Pág. 16
7.3.3 Grado de deterioro	Pág. 17
8. Análisis de emisión sonora en tercios de octava (Método 2)	Pág. 18
8.1 Introducción	Pág. 18
8.2 Espesor vs frecuencia	Pág. 19
8.3 Densidad vs frecuencia	Pág. 20
9. Discusión	Pág. 22
10. Aplicaciones	Pág. 23
11. Conclusiones	Pág. 24
12. Bibliografía	Pág. 25
Anexo	Pág. 26
Anexo 1	Pág. 26
Anexo 2	Pág. 26
Anexo 3	Pág. 27
Anexo 4.....	Pág. 28
Glosario	Pág. 29

Abstract

In this paper the results are presented in conducting a noise emission analysis on three materials using 2 assay methods, to know what the parameters (internal and external) are most influential and know how can control them. The samples studied are composed of three sedimentary rocks (Uncastillo sandstone, Calatorao limestone and alabaster of Gelsa) of different diagenetic environments, with values of density, porosity and elasticity modulus are totally different, all located in operative quarries in the community of Aragon. The wide variety of dimensions of the collection together with the different petrophysical parameters of each lithology, will form the basis on which to evaluate the behavior of the noise emission when modifies the different variables that affect to the test piece, as well as its evolution when do a little accelerated aging test by salts crystallization.

The rock test piece excited by an impact, will disturbs the molecules in the surrounding area making them oscillate in a similar way as it is doing the test piece, depending on predominant vibration mode and the oscillation frequencies, more or less excited, will be achieved a sound or other. The two proposed methods for the analysis of sonorous emission (Method 1 and 2) are entirely experimental. The difference in range of the method 1 and 2 only resides at the level of accuracy (higher for the first). After the definition of each method of analysis, we had to determine the range of measures to be used in sonorous emission. Because the human auditory system is able to hear sounds at frequencies between 20 Hz and 20.000 Hz, this will be the chosen range.

With Method 1 has been proved that the geometric dimensions of the rock test piece play very important role to control the fundamental frequency from the sonorous emission of rocks, being the order of importance: most influential the thickness, followed by the length and lastly the width. The behavioral model of the fundamental frequency, respect to the variation of the three geometric dimensions, it is as follows: The length is inversely proportional to the variation of the fundamental frequency. The thickness and width are directly proportional to the variation of the fundamental frequency.

The internal characteristics of the rock also take part in the sound signal obtained and, therefore, also by its degree of alteration (presence of fractures, pores, ...).

Finally for Method 2; we investigate the sound pressure at the frequencies of 100, 125 and 20.000Hz. The first two frequencies, responds logically to thickness variations while the third one makes it to the density changes on the rocks investigated.

Keywords: Sedimentary rocks, sonorous emission, fundamental frequency, geometric dimensions, petrophysical parameters, sound pressure.

1. Planteamiento

Proponemos un trabajo de petrofísica en el que la **física del sonido** va a ser una característica de peso a lo largo de todo el informe. Con intención de adjudicarle una aplicación real, tratamos de crear la **base** sobre la que, tras futuras investigaciones más detalladas, elaborar una metodología no destructiva destinada a conocer el estado físico de un material pétreo; esperamos que el método sirva para conocer el grado de fisuración y cohesión del material. Esto se podría aplicar a estudios de patrimonio en piedra o en la resistencia mecánica del material en diversos campos de obra civil.

Se han seleccionado 3 rocas sedimentarias (Arenisca de Uncastillo, Alabastro de Gelsa y Caliza de Calatorao) correspondientes a los 3 ambientes diagenéticos distintos (detrítica, química y organogénica). Los criterios de selección para las muestras han sido dos:

- 1) Tener características petrofísicas/composicionales diferentes.
- 2) Ser rocas frecuentemente usadas en ámbitos constructivos. (Ej. Caliza: Pavimento del centro comercial Aragonia, calles del casco viejo (Zaragoza), Plaza de la Catedral (Vitoria),... Ej. Arenisca: pavimentación y revestimiento de Uncastillo, pavimentación en los alrededores de la catedral de Huesca, restauración del castillo de Sádaba... Ej. Alabastro: Edificio de la CREA (pabellón de Aragón en la "Expo de Sevilla").

En nuestro caso, el **contexto geológico** consistirá en una localización de la zona de muestreo junto a una breve descripción de la muestra, ya que en realidad nos interesa saber *cómo* es la roca. La **caracterización petrofísica** de estas rocas se ha realizado con el fin de poder contrastar resultados sonoros con propiedades petrofísicas del material. Para ello, se ha realizado un estudio petrográfico (a partir de estudio bibliográfico) y la caracterización hídrica (densidad y porosidad) y mecánica (ultrasonidos y módulo de elasticidad).

La piedra natural, además de ser considerada como el elemento constructivo por excelencia (resistencia y durabilidad importantes), tiene la capacidad de producir sonido al ser golpeada, es lo que conocemos como **emisión sonora** y será representada en última estancia en función de la presión sonora de cada frecuencia (en forma de *gráfica presión sonora/hercios*). Cuanto más densa y homogénea sea la roca mejor será su sonoridad y musicalidad. Por el contrario, las rocas más porosas como en el caso de la arenisca de Uncastillo, apenas resonaran y su sonoridad será mala (*gráfica de señal sonora sucia, con mucho ruido y con poca diferencia de presión sonora entre sus valores de frecuencias*). Se ha medido la emisión sonora en las probetas mediante dos metodologías de golpeo (Método 1 y 2); la primera con la ayuda de un badajo de madera estandarizado y la segunda con un prototipo de péndulo para su análisis superficial. Al trabajar principalmente sobre probetas alargadas, el modo de vibración que se va a tener en cuenta para explicar la emisión sonora, es el transversal (a lo largo). En este mismo contexto para una mayor amplificación de la onda, los puntos de apoyo han de coincidir con los nodos de la onda (estos puntos están aproximadamente al 25% y 75% de la longitud de la probeta (imagen 1)).



Imagen 1. Esquema del movimiento de vibración de una onda con longitud (l) cualquiera donde los 2 puntos sin oscilación representan a los nodos y las zona de máxima oscilación, en el centro y los extremos, representa el antinodo o panza de la onda.

Método 1: Consiste en medir la frecuencia fundamental (única en cada probeta) y determinar su comportamiento al modificar las dimensiones, la litología y el grado de alteración. Las características petrofísicas las utilizamos en las comparaciones de "*variación frecuencia fundamental vs variación litología*" para determinar el coeficiente de correlación entre el valor de frecuencia fundamental y los

valores de densidad/porosidad/módulo de elasticidad. A las mediciones tomadas para el método 1 las denominaremos como “*ensayos fft*”.

Método 2: Se estudia cómo influyen las variaciones en las características internas de la probeta en los distintos valores de frecuencia (cada valor de frecuencia no es una frecuencia concreta sino que corresponde a un rango de frecuencias en tercios de octavas), y así determinar dentro de todo el espectro, que frecuencias son el reflejo de cambios internos concretos (ver apartado 8 de la memoria).

En el ámbito de los trabajos de restauración y rehabilitación, resulta de especial interés conocer el grado de deterioro de los diferentes materiales que conforman una determinada edificación, así como otros parámetros del material (módulo de elasticidad, porosidad, etc.). El análisis de la emisión sonora del material creemos que es un parámetro de interés en esta evaluación. Históricamente, este método se ha empleado “de oído” por canteros y albañiles para distinguir sillares en buen estado de otros deteriorados. Nosotros pretendemos con este trabajo hacer medidas objetivas y trabajamos con la hipótesis de que en paramentos pétreos continuos/confinados en los que existan fisuras, el sonido se retrotrae al de probetas de tamaño semejante al que resulta de dividir el paramento continuo por su densidad de fracturación. De momento tan solo es aplicable para ensayos realizados en laboratorio con las probetas de roca no confinadas y únicamente para las litologías estudiadas o aquellas con unas características muy similares; en las sucesivas fases de investigación se plantea conseguir una generalización de las interpretaciones a todo tipo de instalaciones pétreas.

Antecedentes: Los dos métodos propuestos para el análisis del estado físico a partir de la emisión sonora serán enteramente experimentales y, en parte, únicos; ya que, aunque ya existen investigaciones para determinar las características de otros materiales a partir del análisis de vibraciones que producen (como el de Íñiguez et al., (2007) o Gamba (2008) para tablonos madera), existen pocos ejemplos aplicados a la piedra natural. Para el método 1, nos hemos basado en una investigación para determinar el módulo de Young dinámico a partir de una excitación por impacto pero aplicado a morteros de cal y cemento (Rosell y Cantalapiedra, 2011). Nosotros hemos adaptado esa idea a la roca natural y aplicándolo no solo al módulo de elasticidad sino también a las dimensiones geométricas. Del método 2 el único antecedente encontrado ha sido el de un método experimental para la medición de las propiedades mecánicas de frutos y maderos (Quintero et al., 2011).

2. Objetivos

Los objetivos del trabajo son: 1) Desarrollar una metodología para el estudio de la emisión sonora de materiales pétreos. 2) Averiguar que variables internas de la roca (densidad del material, dimensiones probeta, porosidad, etc) guardan relación con la emisión sonora (cuantitativa y cualitativamente).

3. Metodología

(1) Realización de un estudio bibliográfico y recopilación del material.

(2) Observaciones en campo, recogida de muestras en el frente activo de las canteras para su posterior estudio en laboratorio y observación al microscopio en lámina delgada (la petrografía de las muestras se incluirá dentro del apartado de petrofísica).

(3) Elección de las dimensiones de las probetas, a partir de los bloques de cada litología, para formar la colección de este trabajo (Anexo 1). Hubo varios episodios de modificación en la colección, a partir de los cuales se definieron las morfologías definitivas propuestas para analizar la emisión sonora mediante el método 1 y 2 (la colección será diferente y mucho más amplia para el primero de ellos). Se partió de unas dimensiones triplicadas para cada una de las litologías, lo más variadas posibles y con cambios en las 3 dimensiones geométricas (Imagen 2_izquierda). Esta primera colección se eligió previamente a cualquier ensayo de emisión sonora y fue con la que se realizaron todas las pruebas previas para habituarnos al comportamiento del sonido de las diferentes rocas.

De cara a simplificar el análisis del Método 1 y reducir el número de incógnitas a la única variable que se desea investigar, se plantearon otras morfologías de probetas. Un grupo correspondiente para los ensayos *fft_anchura* (Imagen 2_centro) y otro grupo para los ensayos *fft_longitud* (Imagen 2_derecha) (para evaluar la influencia tanto de espesor como de litología se utilizarían esos 2 mismos grupos pero escogiendo probetas en las que varíe únicamente la variable a analizar). En el método 2 se requerirá únicamente de 4 probetas de alabastro (10x10x1, 10x10x2, 10x10x3, 10x10x5cm), 1 probeta de arenisca (10x10x3cm) y 1 probeta de caliza (10x10x3cm) que se extraerán directamente de la colección de partida.



Imagen 2. A la izquierda las probetas principales talladas en primera instancia y que usaremos para el Método 2. Al centro probetas secundarias para estudiar la anchura mediante los ensayos *fft* y a la derecha las probetas secundarias para estudiar la longitud mediante los ensayos *fft*.

(4) Caracterización petrofísica general de las litologías investigadas: se ha realizado con el fin de poder contrastar resultados sonoros con propiedades petrofísicas del material. Para ello se ha realizado un estudio petrográfico y una caracterización hídrica (densidad y porosidad) y mecánica (ultrasonidos y módulo de elasticidad).

(5) Elección de los métodos de análisis de la emisión sonora. ¿Por qué se utiliza la transformada rápida de Fourier (*fft*) para uno de los métodos y para el otro método se utiliza el estudio en 1/3 de octava de escala de frecuencias? y ¿Por qué se usan baquetas en el primero de ellos y un péndulo en el segundo?: Se han propuesto dos metodologías de ensayo (método 1 y método 2) definidas en función de la aplicación a la van a estar destinada y que explicamos seguidamente:

El Método 1: Usado para determinar la emisión musical de los materiales. Su aplicación estará encaminada a la elaboración de un litófono de alabastro, afinando cada probeta de roca a la frecuencia de la escala de notas musicales de Brahim et al., (1994) (Ejemplo: Do= 1046'5hz, Re= 1174'7hz, Mi= 1318'5hz, etc.). Se busca determinar la frecuencia **audible** y **característica** de la probeta, es decir, la frecuencia fundamental (en este caso corresponde al primer modo de vibración transversal de la probeta) y saber que variables modificar (lo más sencillo es cambiar las dimensiones) para producir un cambio en esa frecuencia. Para ello, lo más sencillo es aplicar una "*fft*" que no proporcionara la frecuencia fundamental como la frecuencia con mayor valor de presión sonora (decibelios). Ya que lo que interesa es obtener una buena musicalidad, se utilizara de actuador una baqueta de madera controlada de manera manual siempre procurando dar los golpes con la misma energía. Es la mejor opción ya que, además de ser la herramienta con la que se toca

dicho instrumento, se consigue un sonido claro que con el péndulo sería imposible obtener (el péndulo produce un sonido mucho más sucio y bruto, debido a su excesiva energía de impacto y a la baja densidad del material con el que está fabricado, donde ninguna de la presión sonora de las frecuencias predomina de manera clara sobre las demás).

El Método 2: Debido a su posible aplicación técnica, interesa obtener una metodología que proporcione resultados de manera inmediata. Se analizara el sonido en 1/3 de octava puesto que una vez hecha la **investigación pertinente**¹, al analizar el sonido de una probeta aportará de forma directa el valor relativo del parámetro investigado únicamente fijándonos en la presión sonora de rangos de frecuencia concretos (Ej.100Hz) que sabemos que están estrechamente relacionados con dicho parámetro (Ej. *variación del espesor*). Para evitar cualquier error derivado de un mal golpeo se usara un péndulo normalizado con una altura de 30cm y un recorrido de la cabeza o actuador de 90 grados, efectuando el golpeo siempre desde la misma altura y con la misma energía.

(6) Equipo técnico para la medida del sonido producido por la vibración de las probetas de roca: Se ha empleado un afinador electrónico; Spectrum Analyze y un sonómetro profesional, modelo Svan 977 cedido por Lasierra, J. Los datos obtenidos se han tratado con programas informáticos de manipulación de datos: Svan-PC Software adjunto al sonómetro.

(7) Decisión sobre la colocación de los soportes, lugar de golpeo e intensidad del mismo: los consideramos, junto al *ruido ambiente* (a veces fuera de nuestro control), como los parámetros externos influyentes en el sonido final producido por la probeta. Muchas veces no causaran un cambio en la frecuencia fundamental pero sí un diferente reparto de las intensidades de los distintos parciales y, por lo tanto, un cambio general de la gráfica de la emisión sonora. Para no sumar más incógnitas al sistema se decantó por estandarizar el método de golpeo y siempre basarlo en el **primer rebote** (análisis del sonido en el instante de máxima energía del primer impacto). Para ahondar más sobre las influencia de los parámetros externos ver *Anexo 2*.

(8) Elección del material de la baqueta para utilizar en el método 1. Se realizaron una serie de ensayos de emisión sonora experimental, con el que comparar la firma sonora de las distintas probetas, al ser golpeadas por los 3 tipos de materiales (madera, goma y alabastro). Nos decantamos por las baquetas de madera, ya que nos dan resultados más intermedios y fiables debido a que la goma amortigua o apaga las frecuencias y la baqueta de alabastro amplifica la emisión sonora (en general, en casos concretos funcionan mejor las otras).

(9) Elección del material del actuador del péndulo para utilizar en el método 2. El material será de un polímero plástico o ABS, el mismo que el del cuerpo del péndulo, fabricado a través de una impresora 3D.

(10) Simulación o cálculo matemático de las frecuencias fundamentales analizadas en nuestra colección de rocas dentro del método 1. Para ello deberemos empezar por calcular una ecuación que ponga en relación la frecuencia fundamental con el mayor número de variables internas posibles o al menos con las más influyentes (dimensiones geométricas, módulo de elasticidad y densidad del material). *En realidad ha sido un paso coetáneo al análisis de las frecuencias fundamentales que nos ha valido para comprobar que la frecuencia obtenida de manera experimental al analizar la gráfica del sonómetro era la correcta o no.*

¹ La frecuencia que expresa el comportamiento de cada variable se ha obtenido mediante ensayos para un grupo de probetas donde la única variable diferente es la correspondiente a la característica que deseamos investigar (espesor o densidad).

(11) Resultados en la variación de la **frecuencia fundamental** entre las distintas probetas de roca sana y su representación gráfica en un diagrama de dispersión, enfrentando el valor de la frecuencia fundamental en función del valor de sus parámetros internos para determinar la variación unitaria de cada uno de ellos. Los parámetros internos que controlan la variación de frecuencias son el estado mecánico de la roca (la porosidad, densidad, cohesión, fisuración y módulo de elasticidad) y las dimensiones geométricas.

(12) Ensayo de envejecimiento acelerado por cristalización de sales: Para evaluar cómo se modifica la emisión sonora; y más concretamente la frecuencia fundamental, al deteriorarse el material.

(13) Resultados en las mediciones de frecuencia en 1/3 de octava (método 2): Interpretar el rango de frecuencia (a través de la repetición empírica de la misma en probetas de la misma composición/espesor) que mostrará, a partir de la presión sonora, el espesor y la densidad relativa de la probeta. A mayor presión sonora en dicha frecuencia, mayor será el espesor o densidad de la placa medida.

(14) Obtener las dimensiones exactas en probetas de alabastro para conseguir las frecuencias fundamentales equivalentes a un *Do* y *Mi* bemol. Comprobación de las frecuencias aplicando a dichas dimensiones la fórmula de la frecuencia fundamental (Siquier, 2008).

4. Situación y Contexto geológico

- *Situación general.*

Desde un punto de vista amplio; todas las rocas a caracterizar provienen de la comunidad autónoma de Aragón (Imagen 3), muchas de ellas extraídas de canteras actualmente en explotación. Geológicamente Aragón se puede dividir en 3 grandes unidades: cordillera pirenaica, cordillera ibérica y depresión central o terciaria del Ebro.

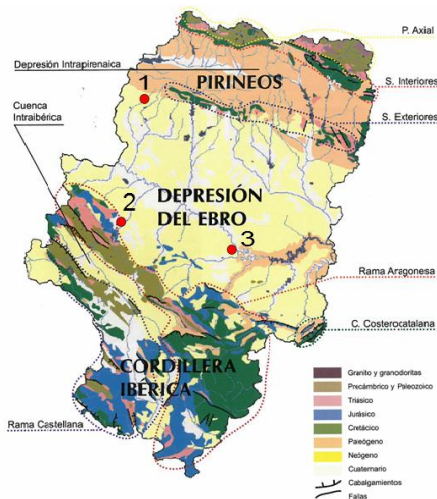


Imagen 3. Mapa geológico de Aragón mostrando la localización aproximada del lugar de muestreo de las litologías analizadas. 1. Arenisca de Uncastillo, 2. Caliza de Calatorao y 3. Alabastro de Gelsa.

No va a tener cabida una descripción detallada de la estratigrafía y tectónica de la zona donde hemos obtenido las muestras, debido a que no va a aportar ninguna información relevante para los datos que se van a tratar. Por ello, el contexto geológico incluirá únicamente una localización exacta de la zona de muestreo junto a una breve descripción de la muestra y de su ambiente de formación.

- *Situación y contexto:*

1. Arenisca de Uncastillo (Calclitita).

Edad: Mioceno Inferior. Fm: Uncastillo. Empresa: Olnasa.

Geográficamente esta variedad de arenisca es explotada en un frente activo localizado en la localidad de Uncastillo dentro de la comarca de las cinco villas (Zaragoza), y a 1'92Km del centro urbano (Imagen 4_izquierda). Las coordenadas geográficas de la cantería y del frente activo son:

-Latitud cantería: 42° 21' 0.97" N - Latitud frente activo: 42° 21' 36.19" N
-Longitud cantería: 1° 9' 3.16" O - Longitud frente activo: 1° 8' 42.42" O

Pertenece a la Fm.Uncastillo, concretamente a la unidad tectosedimentaria U2 (Arenas, 1993) de edad Mioceno Inferior (Aquitaniense-Burdigaliense) (Puigdefábregas, 1975), equivalente a la Fm.Sariñena (Quirantes, 1978). Interpretada como acumulaciones de sedimentos fluviales de sistemas aluviales que dan lugar a una disposición de estratos tanto paralelos como entrecruzados, compuestos por una alternancia de arcillas y areniscas. Explotada y comercializada por el Taller de Cantería Onlasa S.L, se explota en estratos subhorizontales lenticulares de hasta 3m de potencia (Imagen 4_derecha).



Imagen 4. *Izquierda*: en rojo localización del taller cantera (al SW de la imagen) y en amarillo el frente activo (en la zona central de la imagen y a la izquierda del casco urbano). *Derecha*: frente activo con el nivel explotado de arenisca y justo encima un máquina de testigos junto a un alimentador de gasoil.

Las principales anisotropías que afectan a la roca y por ende a nuestras determinaciones son las variaciones de tamaño de grano, las estructuras sedimentarias (laminaciones y estratificación cruzada sobre todo) y los cantos blandos. Hemos muestreado evitando los elementos citados.

2. Caliza de Calatorao (Packstone de peloides y pelecípodos).

Edad: Jurásico medio (Bathonense). Fm: Chelva. Empresa: Cantería CIM, S.L

Geográficamente, tanto la cantera como su adyacente frente activo, se sitúan en el término municipal de Calatorao (Zaragoza), próximas a su casco urbano, junto a La Almunia de D^a Godina y Épila (Imagen 5_izquierda). En el contacto entre la vertiente N de la rama Aragonesa (Cordillera Ibérica) y el borde meridional de la Depresión del Ebro, en las siguientes coordenadas:

-Latitud: 41° 31' 10,49" N. -Longitud: 1° 21' 3,89" O.

Se ha asociado a facies de plataforma marina muy somera donde la precipitación del carbonato cálcico y la acumulación de restos orgánicos tuvieron lugar bajo condiciones reductoras. Los diferentes estadios de consolidación del sedimento le han proporcionado su excelente grado de cristalinidad y color; "mármol negro de Calatorao". Se trata de una explotación minera a cielo abierto de tamaño medio, donde la roca explotada por la cantería CIM aparece en estratos de geometría tabular con potencias de entre 0'10 y 2 metros (Imagen 5_derecha).



Imagen 5. *Izquierda*: la localización de la cantería CIM con un indicador rojo al N de la captura y la localización del frente activo con un indicador amarillo S. *Derecha*: frente activo con el nivel canterizado de caliza.

Las principales anisotropías que afectan a la roca y por ende a nuestras determinaciones son las juntas de extensión, la macrofauna y estilolitos. Hemos muestreado evitando los elementos citados.

3. Alabastro de Gelsa (Yeso alabastrino).

Edad: Oligoceno sup-Mioceno inf. Empresa: Exportadora Turolense S.L

Geográficamente la cantera de alabastro Exportadora Turolense S.L (Imagen 6_izquierda), se sitúa a 42 km al SE de Zaragoza, entre la localidad de Gelsa (al noroeste) y Velilla de Ebro (al sureste), en el sector central de la Cuenca del Ebro. Las muestras se han obtenido de la corta Velilla situada al SE de Gelsa a una cota de 148 m.s.n.m y con coordenadas:

-Latitud: 41°23'58.4" N

-Longitud: 0°26'40.5" W.

Los nódulos estudiados, pertenecen, a la unidad genético-sedimentaria Torrente de Cinca-Alcolea de Cinca, constituida por arcillas rojas con intercalaciones de nódulos de yeso dispersos, areniscas y calizas grises (Imagen 6_derecha). 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 (Galarreta, 2014).



Imagen 6. *Izquierda*: localización de la corta de alabastro con un indicador amarillo al SE de Gelsa y Eras Bajas. *Derecha*: corta Velilla con los nódulos de yeso alabastrino de los que se han extraído las muestras analizables.

Las principales anisotropías que afectan a la roca y por ende a nuestras determinaciones son las vetas arcillosas. Hemos muestreado evitando los elementos citados.

5. Análisis petrofísico de las litologías de la colección

5.1 Material

Se utiliza una probeta para cada una de las litologías (Imagen 7 y Tabla 1), y los resultados se extrapolan al resto de probetas de la misma litología. Se realiza una descripción general de la petrofísica de cada litología, ya que nos interesa obtener una variación relativamente grande para observar un cambio real en la emisión sonora y que este cambio no esté causado por el error propio del aparato de medida.

Litología	Espesor	Anchura	Longitud
	cm	cm	cm
Alabastro Gelsa	2,940	4,730	19,500
Caliza Calatorao	2,786	4,646	19,400
Arenisca Uncastillo	2,781	4,592	19,390

Imagen 7: De izquierda a derecha probetas de alabastro, arenisca Uncastillo, caliza Caracoleña, caliza Calatorao, granodiorita y 3 probetas más de Caracoleña. Únicamente se usan las probetas de alabastro, arenisca y caliza de Calatorao en los ensayos petrofísicos (e incluso para la normalización de la fórmula de la frecuencia fundamental y para la realización de los ensayos fft-litología). Tabla 1: Dimensiones de las muestras en centímetros.

5.2 Petrografía

Nos permitirá definir la composición mineralógica y las características texturales de la roca. La caracterización petrográfica de los tres tipos de litologías a analizar se explica seguidamente:

Arenisca de Uncastillo: Clasificada como una arenita (Calclitita), según Pettijohn et al., (1987) (Imagen 8A). Según Buj y Gisbert (2008) el esqueleto granosostenido representa el 69% de la roca. Las partículas detríticas corresponden a cuarzo (32'1%; anguloso, monocristalino y policristalino) y fragmentos de roca (50'6%; silíceos, cuarcíticos, calcíticos y dolomíticos). Las partículas opacas y ferruginosas, suponen un (7'9%) de la roca. Como minerales accesorios contiene moscovita, turmalina y rutilo. El cemento 19% es de calcita esparítica (90%) y cuarzo sintaxial (10%). La matriz es filosilicatada y representa tan solo el 2% de la roca. Por último, la porosidad abierta es del 10%; al microscopio petrográfico, la mayoría de los poros observables se sitúan entre las 5 y las 60 micras. La morfología de los clastos es subangulosa y subredondeada y presentan una esfericidad baja. Las probetas empleadas poseen un tamaño medio de grano en torno a los 0,20 mm y un máximo de 1mm. Compactación moderada con contactos puntuales y largos.

Caliza de Calatorao: La roca es una Biopelmicrita (Folk, 1959) o Packstone de peloides (Dunham, 1962) (Imagen 8B), de textura granuda soportada por la matriz e intensa micro bioturbación que elimina la laminación de la roca; donde los bioclastos representan el 49% de la roca, los peloides el 13%, la matriz el 38%, el cemento un 4% y accesorios con un 1%.

Alabastro de Gelsa: compuesto por cristales de yeso e inclusiones de anhidrita (Imagen 8C). Encontramos; cristales alotriomorfos de yeso secundario microcristalino con tamaño inferior a 50 μm , fuertemente interpenetrados entre sí dando lugar a texturas masivas y esferulíticas. Cristales de yeso subidiomorfo e idiomorfos individuales de tamaños entre 30 μm y 300 μm . También aparecen cristales (alotriomorfos) con extinción no uniforme, con tamaños variables desde 200 μm hasta 2 mm. Tanto paralela como perpendicular a la estratificación.

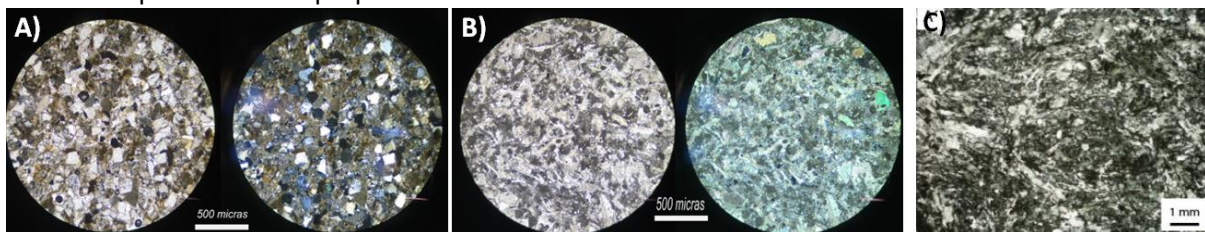


Imagen 8. Vistas al microscopio petrográfico: A) Arenisca de Uncastillo (Izquierda: NP. Derecha: NC. Escala μm . Con el objetivo de 10x). B) Caliza de Calatorao (Izquierda: NP. Derecha: NC. Con el objetivo de 10x). C) Sección de lámina de Alabastro de Gelsa (Galarreta, 2014).

5.3 Caracterización hídrica.

Se ha determinado la densidad aparente y la porosidad abierta (tabla 3) (AENOR (2007) Norma UNE-EN 1936). Para el caso de la muestra de alabastro de Gelsa se precisa de una metodología particular en la que se emplea agua saturada en yeso según protocolo de Galarreta (2014). Los pesos durante el ensayo y datos de absorción quedan representados en la (tabla 2).

Litología	Dimensiones (cm)	Momento de inmersión en agua destilada	Peso seco (gramos)	Peso tras 1h (20/11/15, 12:05:00)	Peso tras 24h (21/11/15, 11:05)	Peso tras 120h (25/11/15, 11:05)	Peso tras 144h (26/11/15, 11:05)	Peso tras 168h (27/11/15, 14:50)	Peso hidrostático (27/11/15, 15:20)
Caliza Calatorao	19,4 x 4,65 x 2,79	20/11/2015,	673,36	673,77	674,79	675,72	676,41	676,5	423,37
Arenisca Uncastillo	19,39 x 4,59 x 2,78	11:05:00	539,86	570,75	571,5	575,49	576,46	576,51	323,1

Tabla 2. Peso en gramos para cada probeta a lo largo del tiempo en los pasos seguidos para cuantificar la absorción de agua.

Litología	Volumen (cm3)	Densidad aparente geométrica (g/cm3)	Densidad aparente hidrostática (g/cm3)	Densidad aparente funcional	Densidad Real (g/cm3)	Porosidad Abierta (%)	Porosidad Total (%)
Alabastro Gelsa	271,171	-	-	2,306	2,316	0,171	0,411
Caliza Calatorao	251,109	2,682	2,660	2,660	2,694	0,45%	1,24%
Arenisca Uncastillo	247,617	2,180	2,130	2,155	2,491	12,46%	14,46%

Tabla 3. Datos obtenidos de porosidades y densidades. La densidad aparente funcional se ha calculado como promedio de la geométrica y la hidrostática

5.4 Caracterización mecánica (Ultrasonidos)

Hemos medido la velocidad de propagación de las ondas elásticas en las 3 dimensiones y la anisotropía de las muestras. Con esos valores hemos calculado el Módulo de Young.

Para realizar esta medida emplearemos un aparato de ultrasonidos (ultrasonic tester) que medirá tiempos en millonésimas de segundo. En este ensayo se tomarán medidas directas e indirectas (Imagen 9), y se llevará a cabo bajo las mismas condiciones.

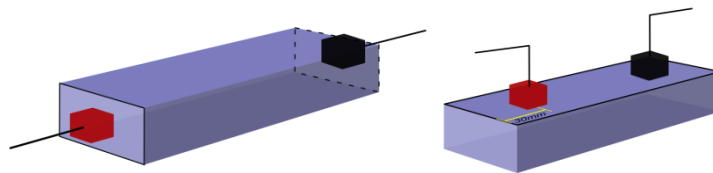


Imagen 9: Croquis de una medida directa (izquierda) e indirecta (derecha).

Los datos indirectos fueron medidos en la Universidad de Ingeniería de Cagliari, con el aparato de ultrasonidos Pundit Lab (Proceq). El centro de los sensores, para estas medidas indirectas, se situó a 30mm del borde de la cara longitudinal superior. Las medidas directas, aunque también se comprobaron en Cagliari, se midieron de nuevo en la universidad de Zaragoza (Imagen 10). Son estas últimas medidas propias, la que se utilizarán para evaluar la anisotropía de las rocas.



Imagen 10: Aparato de ultrasonidos en funcionamiento y badajo sintético estandarizado.

El total de datos de ultrasonidos utilizados son los representados en la tabla 4. Para el caso del alabastro, por no tener estratificación, X e Y se corresponden a los ejes paralelos al muro y techo en la posición de extracción del sillar en la cantera. De las tres muestras; la arenisca de Uncastillo presenta las velocidades de propagación del sonido más bajas, denotando su alta porosidad.

Litología	Ez	Ex	Ey	tZ	tX	tY	vZ	vX	Vy
	cm			millonesimas de segundo			m/s		
Caliza Calatorao	2,786	4,646	19,40	4,2	7,1	32	663,33	654,37	606,25
Arenisca Uncastillo	2,781	4,592	19,39	9,1	15,2	65,6	305,60	302,11	295,58
Alabastro Gelsa	2,940	4,730	19,50	-	-	-	496,7	501	496,1

Tabla 4. E=dimensiones geométricas de la probeta (mm). t=tiempo que tarda la señal en atravesar la muestra desde el polo positivo al negativo (en millonésimas de segundo). v=velocidad de propagación. X, Y, Z hacen referencia a la anchura, longitud y espesor de la probeta, estando XY contenidos en la estratificación y Z perpendicular a la misma. La velocidad del sonido al atravesar la muestra ($v = (Ex \cdot 10^{-3}) / (T/10^6)$).

La anisotropía se puede definir como la dependencia de las propiedades físicas de un material en la dirección de medida. La anisotropía absoluta y relativa se calcula a partir del algoritmo de Fort et al.,

(2008) (Tabla 5). Mayoritariamente las probetas son bastante isotrópicas y no influirá la estratificación en la emisión sonora (en el caso de caliza y arenisca).

Litología	An % absol.	An % relat.
Caliza Calatorao	7,984	0,681
Arenisca Uncastillo	2,724	0,576
Alabastro Gelsa	0,55	0,431

Tabla 5. Porcentaje absoluto y relativo de anisotropía en la probeta de cada litología. La anisotropía absoluta $[An\%=(1-(2Vp_1)/(Vp_2+Vp_3))*100]$ y relativa $[An\%=(1-(2Vp_2)/(Vp_2+Vp_3))*100]$, donde V_1 =velocidad mínima. V_2 =velocidad media. V_3 = velocidad máxima.

Cálculos cuantitativos del módulo elasticidad por ultrasonidos: estos cálculos se basan en la relación existente entre la velocidad de onda sísmica y la constante elástica.

La V_p corresponde a la velocidad de onda longitudinal de la muestra de roca; esta se puede medir en cualquiera de las direcciones pero es preferible hacerlo en la de máximo alargamiento (eje y) para reducir el error de tiempo causado por el espacio existente entre el traductor y la probeta. La V_s (velocidad de onda transversal) se calcula a partir de una fórmula empírica $[V_s= 0.583V_p-0.078]$ (Fais S., 2016). Con los datos obtenidos hasta el momento calculamos el Módulo de Young (tabla 6).

Litología	Densidad aparente	V_p (vy) (m/s)	V_s (m/s)	M.Y (Kg/m.s ²)	M.Y (MPa)
Caliza Calatorao	2,660	606,25	353,37	825576,23	825,58
Arenisca Uncastillo	2,130	295,58	172,24	157114,74	157,11
Alabastro Gelsa	2,306	496,10	289,15	479201,88	479,20

Tabla 6: Cálculos mecánicos para determinar el módulo de Young $[Módulo\ de\ Young = \rho V_s^2 (3 V_p^2 - 4 V_s^2) / (V_p^2 - V_s^2)]$ a partir de velocidad de ultrasonidos (Fais S., 2016), donde: ρ = densidad del material (D.A h), V_p = velocidad de onda longitudinal y V_s = velocidad de onda transversal (indicada anteriormente), y su transformación a MPa para poder utilizarlo en la fórmula de la frecuencia fundamental (apartado 7.2).

6. Determinación del tipo de análisis de la señal sonora en cada método:

6.1. Introducción

Cuando golpeamos un cuerpo y analizamos su emisión sonora no hay una única manera de interpretarla puesto que van a intervenir 3 variables (Hz, dB y tiempo) (Imagen 11).

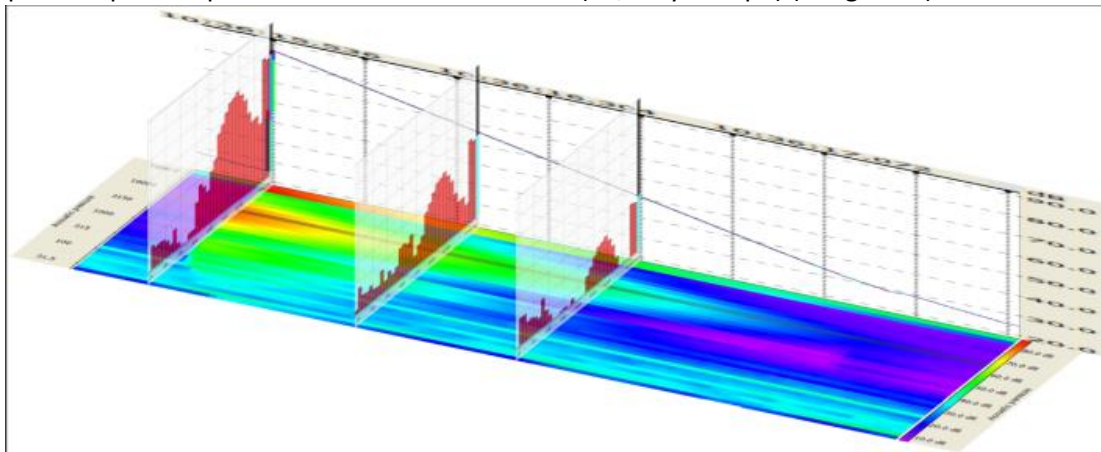


Imagen 11: Gráfico 3D compuesto para una probeta de alabastro, donde el eje X está formado por el tiempo, el Y por la frecuencia y el Z por la presión sonora. La frecuencia fundamental es de 5000Hz y la presión sonora de 80,1 dB. Los planos rojos corresponden a gráficas de barras (presión sonora/frecuencia) perpendiculares para los instantes 10:36:15.540, 10:36:16.114 y 10:36:16.562 segundos

En el método 2, se analizará la presión sonora de cada frecuencia únicamente en el momento de golpeo. Por el contrario para el método 1 se analizará teniendo en cuenta la evolución de las frecuencias en el tiempo, ya que se quiere determinar la frecuencia que más tarda en disiparse. Si

nos fijamos en la frecuencia con mayor presión sonora y correlacionamos diferentes gráficos de frecuencias para diferentes instantes de tiempo, lo que conseguimos es determinar la evolución de cada una de las frecuencias en el tiempo. Así pues, la frecuencia que prevalezca durante más tiempo corresponderá a la frecuencia fundamental y quedará también representada en el momento del impacto como la frecuencia con mayor presión sonora.

6.2. Comparación del análisis de la frecuencia fundamental mediante una transformada rápida de Fourier frente a su análisis en tercio de octava

Ambos métodos toman la medida en el mismo instante y utilizan las mismas variables para el análisis de la emisión sonora (Hz y dB), entonces ¿por qué no podemos estudiar los dos métodos con el mismo tipo de análisis de datos? Se debe a que son métodos que analizan datos diferentes. En uno se mide la evolución en el tiempo de la frecuencia de mayor presión sonora y su variación entre probetas de diferentes características (método 1), y para el otro se mide en el instante de golpeo la variación de la presión sonora relativa de un rango de frecuencia concreto al comparar probetas con diferente densidad o espesor. Por lo tanto, no se puede utilizar para ambos los mismos mecanismos de análisis.

Antes de realizar cualquier ensayo definitivo, se testeó el método más adecuado de transformar la emisión sonora para analizar la frecuencia fundamental al que denominaremos como Método 1, y así confirmar lo que ya se suponía. Se eligieron para ello 4 probetas de Alabastro (10x10x5, 10x10x3, 10x10x2, 10x10x1cm) por ser la litología con mejor sonoridad, y 3 tipos de pruebas para ver la variación del espesor:

- Analizar la señal en Tercios de Octava.
- Analizar la señal mediante una FFT con rango hasta los 10.000Hz.
- Analizar la señal mediante una FFT con rango hasta los 20.000Hz.

Se descartó el método de 1/3 octava para la identificación de la frecuencia fundamental por no alcanzar el detalle necesario, puesto que el intervalo de medida del sonómetro en la escala de frecuencias es muy amplio y al tomar las medidas de 100 en 100 Hz, una variación en la frecuencia fundamental de 35Hz no quedará expresada (no habrá modificación en la gráfica). Como se puede ver en la Imagen 12 a pesar de disminuir el espesor de probeta, la frecuencia fundamental no sufre variación alguna y queda siempre en el rango de los 5000Hz.

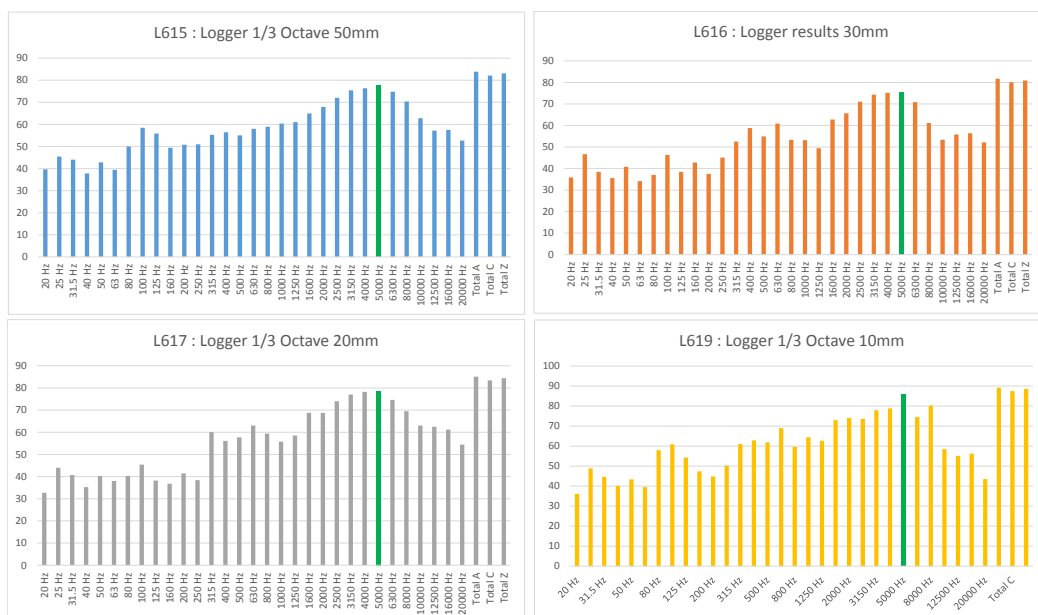


Imagen 12. Graficas del espectro en 1/3 de octava para las probetas 10x10x5cm (azul), 10x10x3cm (naranja), 10x10x2cm (gris) y 10x10x1cm (amarillo). En verde la columna de frecuencia que correspondería a la frecuencia fundamental en una análisis en 1/3 de octava. (Eje Y) presión sonora (Eje X) frecuencia.

Para procesar la señal, el método elegido será el que aplica la transformada rápida de Fourier (FFT) porque posee un nivel de detalle altísimo y un gran número de puntos de medida en los que por poco que varíe la frecuencia fundamental (aumentando o disminuyendo) lo va a registrar. Dentro de los FFT se escogerá el rango de actuación más amplio, de 0 a 20.000Hz (Imagen 13), ya que de elegir el otro perderíamos la mitad del registro y, por lo tanto, mucha de la información de los parciales de la frecuencia fundamental.

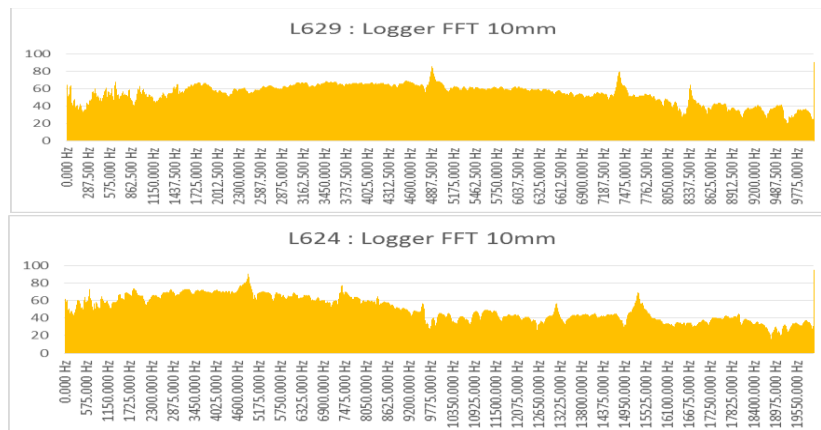


Imagen 13: Graficas del espectro en FFT para la probeta de alabastro de 1 centímetro de espesor. La superior para el rango de 0 a 10.000Hz y la inferior de 0 a 20.000Hz. (Eje Y) presión sonora (Eje X) frecuencia.

En el método 2 se lleva a cabo un estudio de cada uno de los rangos de frecuencias para determinar qué valores de frecuencia son reflejo de variaciones en la densidad y espesor, por lo que no será necesario tanto detalle. Si se realizara un análisis de la señal sonora con la transformada rápida de Fourier. El sonómetro tomará 1601medidas de frecuencia para el rango de 0 a 20000, por lo que el análisis, una a una, de cada columna es poco viable. Es por eso que se escogerá el análisis de la emisión sonora en 1/3 de octavas donde todo el espectro de frecuencias de agrupa en un total de 34 grupos o rangos de frecuencias.

7. Análisis de emisión sonora como frecuencia fundamental, aplicando la transformada rápida de Fourier. (Método 1)

7.1 Material y equipo

Mediante la emisión sonora se evaluará la correspondiente frecuencia fundamental (f.f). El sonómetro empleado permite determinar la frecuencia fundamental aplicando una transformada rápida de Fourier (fft), transformando las ondas del dominio del tiempo que transmite la roca provocado por impacto, al dominio de la frecuencia. Esta transformada se traduce en una simplificación automática de la gráfica de emisión sonora para analizar las frecuencias en el instante de golpeo (exagerando los picos de frecuencias con presiones sonoras altas e infravalorando las bajas) de modo que las frecuencias más excitadas (1º (f.f), 3º y 5º modo de vibración transversal) se verán amplificadas en la gráfica (Imagen 14). Para evaluar la frecuencia fundamental se tomó una media de 5 medidas, en un rango de 0Hz a 20.000Hz, para cada una de las probetas obteniendo así una señal media más representativa. Se ordenaron las probetas (tabla 7) para determinar su tendencia y variación unitaria al modificar cada variable.

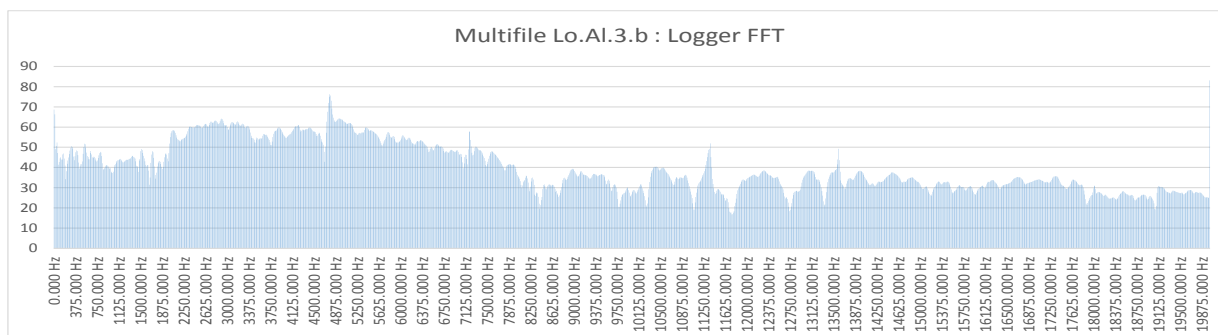


Imagen 14. Representación de la señal múltiple para un ensayo FFT-Longitud en una probeta de alabastro de dimensiones 15x5x3cm. Frecuencia fundamental=4775Hz y Presión sonora=76´23 dB. (Eje Y: Presión sonora) (Eje X: Frecuencia).

Litología	Tipo Ensayo	Sigla	fft-Anch.	fft-Long.	fft-Espe.	Longitud (mm)	Anchura (mm)	Espesor (mm)	Frecuencia Real (Hz)	Presion sonora Db	Frecuencia Teórica (Hz)
Alabastro Gelsa	FFT_Anchura	An.Al.3.a	1			94,27	77,79	31,72	11525,0	52,40	
		An.Al.3.b	2			97,38	52	25,72	10525,0	43,20	10304,60
		An.Al.3.c	3			97,92	30,01	29,34	10237,5	53,50	
	FFT_Longitud	Lo.Al.3.a		1	1	195,00	47,30	29,40	2937,5	79,67	2937,50
		Lo.Al.3.b		2		150,11	48,58	28,30	4775,0	76,23	4771,63
		Lo.Al.3.c		3		100,59	51,14	27,27	9212,5	56,05	10239,42
		Lo.Al.2.a			2	191,50	47,07	18,40	1912,5	72,05	1906,25
Lo.Al.1.a			3	198,20	47,73	8,00	837,5	72,05	773,72		
Arenisca Uncastillo	FFT_Anchura	An.Un.3.a	4			99,31	98,55	29,53	8475,0	40,50	
		An.Un.3.b	5			100,09	48,52	29,9	7062,5	60,90	7767,39
		An.Un.3.c	6			100,01	30,06	29,06	5875,0	58,60	
	FFT_Longitud	Lo.Un.3.a		4	4	193,9	45,92	27,81	1925,0	74,38	1925,00
		Lo.Un.3.b		5		152,96	50,31	25,44	2637,5	79,21	2829,74
		Lo.Un.3.c		6		101,13	49,9	28,45	8525,0	53,20	7239,48
		Lo.Un.2.a			5	198,4	48,04	21,7	1275,0	64,41	1434,70
Lo.Un.1.a			6	198,34	48,4	11,41	637,0	64,67	754,83		
Caliza Calatorao	FFT_Anchura	An.Ca.3.a	7			99,1	98,6	32,5	13250,0	41,00	
		An.Ca.3.b	8			101,04	47,68	31,4	12637,5	53,40	15477,17
		An.Ca.3.c	9			101,82	27,24	31,31	12175,0	44,30	
	FFT_Longitud	Lo.Ca.3.a		7	7	194	46,46	27,86	3725,0	80,78	3725,00
		Lo.Ca.3.b		8		149,45	48,91	26,2	5675,0	75,37	5902,80
		Lo.Ca.3.c		9		103,24	50,25	26,98	11162,5	59,17	12737,80
		Lo.Ca.2.a			8	197,83	50,64	22,28	2750,0	77,75	2864,70
Lo.Ca.1.a			9	198,5	46,96	10,81	1387,5	79,22	1380,55		

Tabla 7. Probetas utilizadas en el ensayo con información sobre la litología, tipo de ensayo fft realizado y dimensiones exactas de la probeta, así como de sus características musicales estudiadas (frecuencia real, presión sonora real y frecuencia matemática). La Frecuencia real es la medida de frecuencia fundamental calculada a partir la de transforma rápida de Fourier del sonómetro. La frecuencia matemática es la frecuencia teórica y se calcula aplicando la fórmula modificada de Siquier (2008) para la frecuencia fundamental (apartado 7.2).

7.2 Fórmula de la frecuencia fundamental

La fórmula de Siquier (2008), creada para la determinación de la frecuencia fundamental en tablas de madera, ha sido modificada para permitir calcular la frecuencia de vibración fundamental de una probeta de roca (siempre de una manera teórica y aproximada) quedando de la siguiente manera: $[f.f=1'03 \times (h/L^2) \times (\text{Raiz}(E/d)) \times 10^4]$, donde f.f= frecuencia fundamental en Hz; h=grosor en m; L=longitud en m; f=frecuencia en Hz; E=modulo de Young (N/mm²) normalizado y d=densidad Kg/m³.

7.2.1 Normalización de la fórmula

La fórmula original no incluía datos de anchura, por lo que al incorporar las variables los resultados no eran del todo correctos (Tabla 8.1), por ello se optó por hacer más compleja la fórmula. Esta mejora del cálculo aún debe refinarse, debido a que el cambio de algoritmo se ha realizado con los datos experimentales de una probeta con 4,73cm de ancho, por lo que las probetas con diferente anchura sufrirán una desviación de la frecuencia teórica respecto a la real, proporcional a la diferencia respecto a la anchura tipo (4,73cm).

Formularia Squier, despejando la Frecuencia Fundamental teniendo en cuenta el grosor.							
1.	Probeta	Grosor	Longitud	Densidad	Modulo elasticidad	Frecuencia Fundamental Matemática	Frecuencia Fundamental por Sonómetro
		(m)	(m)	(Kg/m3)	(N/mm2)	(Hz)	(Hz)
	Caliza Calatorao	0,0279	0,200	2660,0	825,58	3996,65	3725,0
	Arenisca Uncastillo	0,0278	0,194	2155,3	157,11	2057,01	1925,0
	Alabastro Gelsa	0,0294	0,195	2306,0	479,20	3630,32	2937,5

Formularia Squier, despejando la Modulo de Young.						
2.	Probeta	Grosor	Longitud	Densidad	Frecuencia Fundamental por Sonómetro	Modulo elasticidad
		(m)	(m)	(Kg/m3)	(Hz)	(N/mm2)
	Caliza Calatorao	0,0279	0,194	2660,00	3725,0	634,90
	Arenisca Uncastillo	0,0278	0,194	2155,30	1925,0	137,60
	Alabastro Gelsa	0,0294	0,195	2306,00	2937,5	313,75

Tabla 8. 1) Cálculo de frecuencias utilizando el modulo elástico obtenido por ultrasonidos. 2) cálculo del nuevo modulo elastico modificado despejando la fórmula con el valor de frecuencia fundamental real.

Para la mejora del cálculo (Tabla 9), se invirtió la fórmula para despejar un nuevo módulo de Young (Tabla 8.2) a partir de un grupo de probetas (las utilizadas en la caracterización petrofísica, Lo.Al.3.a, Lo.Ca.3.a, Lo.Un.3.a) de las que ya se sabía su frecuencia fundamental real. Este módulo de Young modificado será ligeramente diferente al calculado por ultrasonidos (debido a que la variable anchura es la que menos influye en la variación de frecuencia) pero cumplirá su función.

tomando el modulo de elast. obtenido del paso 2.							
3.	Probeta	Grosor	Longitud	Densidad	Módulo elasticidad	Frecuencia Fundamental Matemática	Frecuencia Fundamental por Sonómetro
		(m)	(m)	(Kg/m3)	(N/mm2)	(Hz)	(Hz)
	Caliza Calatorao	0,0279	0,194	2660,00	634,90	3725,0	3725,0
	Arenisca Uncastillo	0,0278	0,194	2155,30	137,60	1925,0	1925,0
	Alabastro Gelsa	0,0294	0,195	2306,00	313,75	2937,5	2937,5

Tabla 9. Cálculo de la frecuencia fundamental en las probetas con las que se ha normalizado la fórmula.

Será de gran utilidad en los ensayos problemáticos, donde la frecuencia con mayor presión sonora de todo el espectro no se correspondía con el primer modo de vibración transversal de la probeta (su frecuencia fundamental) y por consiguiente había que echar mano de la fórmula para orientarnos sobre el valor de frecuencia donde se hallaba la fundamental real.

7.3 Influencia de los parámetros internos

7.3.1 Dimensiones geométricas

FFT_ Longitud. Comportamiento inversamente proporcional de la frecuencia fundamental en función de la variación de la longitud (10, 15 y 20cm), para las 3 litologías (alabastro, Uncastillo, Calatorao) (Imagen 15). La numeración de cada punto indica la probeta a la que representa (*ver columnas fft en tabla 7*).

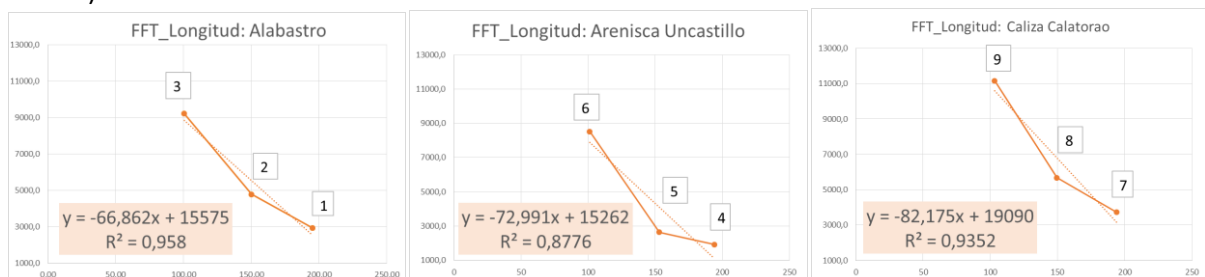


Imagen 15. Gráficas de variación de la frecuencia fundamental (Eje Y) en función de la variación de longitud (Eje X), para cada una de las litologías (izquierda alabastro, centro arenisca, derecha caliza) con 3cm de espesor.

Al reducir la longitud, disminuimos el espaciado entre los nodos de onda y por lo tanto en la longitud de onda, pero se mantiene la misma altura de onda (ya que el espesor se ha mantenido intacto); la onda vibrará más veces por unidad de tiempo y por lo tanto la frecuencia fundamental de la probeta aumentará (Imagen 18_ derecha).

FFT_ Anchura. La variación de la anchura es directamente proporcional al de la frecuencia fundamental en las tres litologías (Imagen 16). Realizadas 3 mediciones, modificando la variable anchura, para 8, 5 y 3cm, vemos que a medida que aumentamos la anchura aumenta la frecuencia. No se ha sido capaz de plantear ninguna hipótesis que justifique el comportamiento.

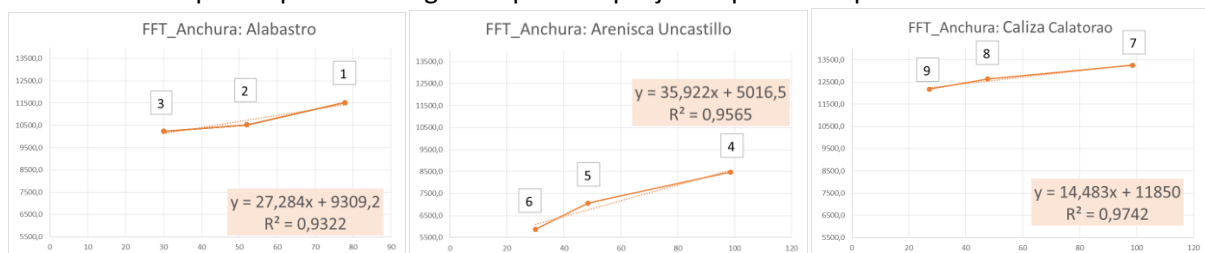


Imagen 16. Gráficas de puntos para las 3 probetas de cada litología, mostrando la tendencia de las frecuencias fundamentales (Eje Y) en función de la variación de la variable anchura (Eje X).

FFT_ Espesor. El comportamiento del espesor es directamente proporcional al de la frecuencia, en las 3 litologías y en las 3 longitudes analizadas (Imagen 17). Tras 3 mediciones modificando el espesor (3, 2 y 1cm), se ha visto que a medida que aumenta el espesor, aumenta la frecuencia.

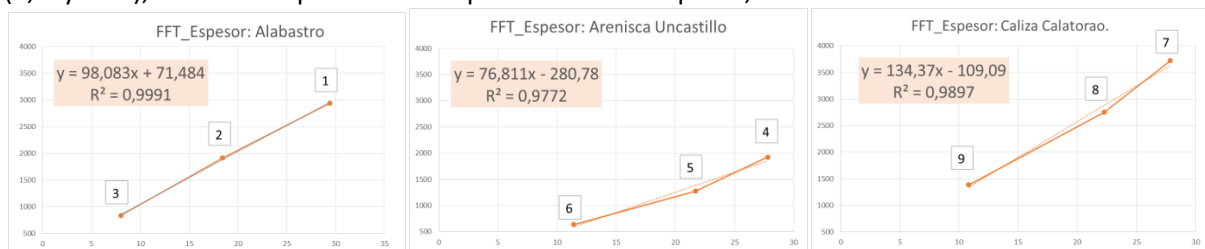


Imagen 17. Gráficas de puntos para las 3 probetas de cada litología, mostrando la tendencia de las frecuencias fundamentales (Eje Y) en función de la variación espesor (Eje X).

Una reducción del espesor se puede interpretar como un alargamiento o acomodación de la onda lo cual hace que aumente la distancia entre nodos (disminuyendo la frecuencia fundamental) al limitar su espacio de recorrido vertical. El tamaño, en el caso del espesor, potencia unas frecuencias sobre otras; así diferentes frecuencias pueden estar actuando al mismo tiempo, pero para un determinado espesor se potencian unas frecuencias y para un espesor menor se potencian otras como se ve en la Imagen 18_izquierda.

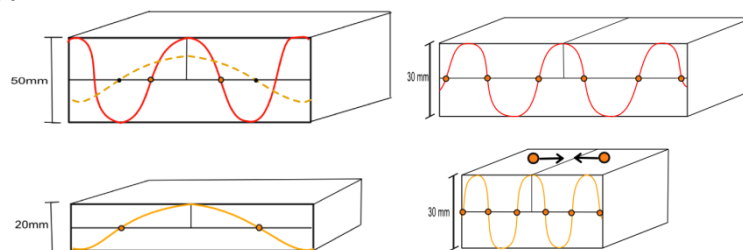


Imagen 18. *Izquierda:* Modelo de comportamiento de la onda acústica al modificar el espesor. *Derecha:* Modelo comportamiento de la onda acústica al modificar la longitud.

7.3.2. Litología

Hemos correlacionado las frecuencias obtenidas con el método 1 con la densidad, porosidad y módulo de Young. Con las mismas rocas utilizadas en la caracterización petrofísica y de dimensión geométrica (20x5x3); la probetas que dan mayores valores de frecuencia fundamental son (de menor

a mayor): Arenisca de Uncastillo < Alabastro < Caliza Calatorao. La relación numérica entre ellas y tomando como valor unitario la de menor frecuencia (Arenisca, 1925hz) es de 1'53 con el Alabastro y 1'94 con la Caliza Calatorao (Tabla 10). Los espectros de frecuencia para la roca de cada litología se pueden ver en la Imagen 19.

	Nombre	Sigla	Frecuencia fundamental muestra Inalterada (hz)	Relacion entre litologías	Densidad aparente (g/cm3)	Porosidad total (%)	Modulo Young (Mpa)
2	Alabastro Gelsa	Lo.Al.3.a	2937,5	1,526	2,3060	0,411	479,2
1	Caliza Calatorao	Lo.Ca.3.a	3725,0	1,935	2,6710	1,240	825,58
3	Arenisca Uncastillo	Lo.Un.3.a	1925,0	1,000	2,1553	14,463	157,11

Tabla 10. Frecuencias fundamentales para las probetas de las 3 litologías junto con su relación numérica e información petrofísica relevante.

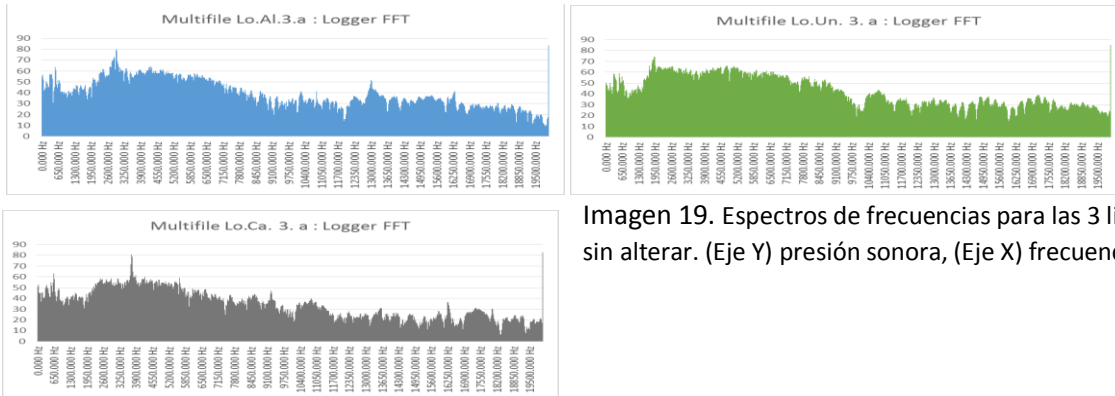


Imagen 19. Espectros de frecuencias para las 3 litologías sin alterar. (Eje Y) presión sonora, (Eje X) frecuencia.

Con la intención de determinar la influencia de las características petrofísicas en la emisión sonora de la roca, se han comparado los valores de frecuencia fundamental de cada probeta con los parámetros petrofísicos (densidad aparente, porosidad total y módulo de Young), en forma de rectas de regresión (Imagen 20). El módulo de elasticidad de la roca es la propiedad más influyente en la variación de la frecuencia debido a que es la que posee un R² más cercano a 1.

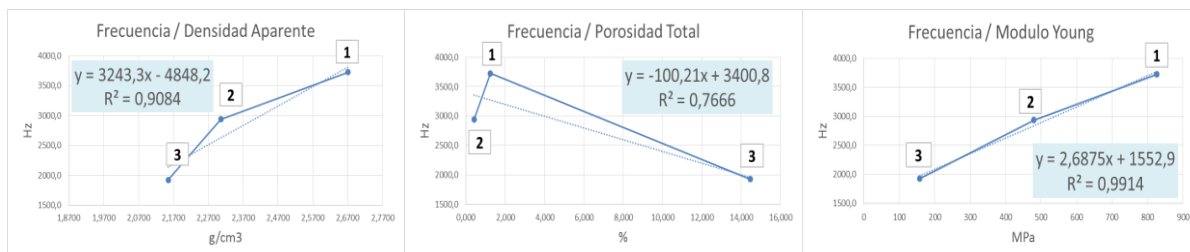


Imagen 20. *Izquierda*: Rectas de regresión de la frecuencia fundamental en función de la densidad aparente, *centro*: frecuencia en función de la porosidad total y *derecha*: frecuencia en función del módulo de Young para las 3 litologías sin alterar. Siendo el Eje Y la Frecuencia fundamental y el Eje X la densidad, porosidad y módulo de Young respectivamente. 1 Calatorao, 2 Alabastro, 3 Uncastillo.

7.3.3 Grado de deterioro.

Medidas de pérdida de peso y variación de la frecuencia fundamental tras un ensayo de 6 ciclos de envejecimiento acelerado por sales sobre las probetas usadas en el apartado 7.3.2 *litología*.

Para evaluar cómo se modifica la emisión sonora al deteriorarse el material se realizó un ensayo de envejecimiento acelerado de cristalización de sales (AENOR (1999) UNE-EN 12370). Se realizaran un total de 6 “ciclos” en lugar de los 15 que establece la norma (Tabla 11); midiendo la emisión sonora al inicio o ciclo 0 (roca inalterada) y tras 6 ciclos. Cada uno de los ciclos estará dividido en 12horas de sumersión y 12horas de secado, separando cada ciclo por una medida del peso de las probetas.

Nombre	Sigla Hid.	Sigla FFT	Peso tras el final de cada ciclo (gramos)								Variación de peso
			Ciclo 0 13/04/2016	Ciclo 1 14/04/2016	Ciclo 2 15/04/2016	Ciclo 3 18/04/2016	Ciclo 4 19/04/2016	Ciclo 5 20/04/2016	Ciclo 6 21/04/2016		
Alabastro Gelsa	Al.2.a.I	Lo.Al.3.a	602,33	598,17	597,78	597,38	597,42	597,53	597,53	-4,80	
Caliza Calatorao	Ca.2.a.I	Lo.Ca.3.a	673,75	674,32	674,56	675,09	675,03	675,06	675,09	1,34	
Arenisca Uncastillo	Un.2.a.I	Lo.Un.3.a	540,36	544,17	546,54	545,82	548,08	548,76	548,39	8,03	

Tabla 11. Datos de cada una de las probetas en el ensayo de envejecimiento por cristalización de sales.

Al realizar 6 ciclos de cristalización de sales, su alteración es pequeña y la variación de frecuencias no es muy significativa (tabla 12). El único incremento de frecuencia aparece en el alabastro, interpretable como resultado de una disolución apreciable y la variación en la emisión sonora podría deberse al cambio de volumen de la probeta. De modo que cuanto más compacta y resistente es la roca menor es su variación de frecuencia fundamental. La comparativa entre los espectros de frecuencia de muestra sana y alterada para las tres litologías en el momento del golpe la podemos ver en la imagen 21.

Nombre	Siglas Probeta	Emisión sonora roca sana		Emisión sonora roca envejecida		Variación en la Frecuencia fundamental	
		Frecuencia (Hz)	Presión sonora (Db)	Frecuencia (Hz)	Presión sonora (Db)	Hz	%
Alabastro Gelsa	Lo.Al.3.a	2937,5	79,67	3000,0	73,5	62,5	2,08
Caliza Calatorao	Lo.Ca.3.a	3725,0	80,78	3700,0	86,3	-25,0	-0,68
Arenisca Uncastillo	Lo.Un.3.a	1925,0	74,38	1775,0	75,7	-150,0	-8,45

Tabla 12. Valores de frecuencia fundamental (Hz) y Presión sonora (dB) para las 3 probetas, alteradas y sin alterar. Junto al porcentaje de variación de frecuencia de la muestra alterada con la inalterada.

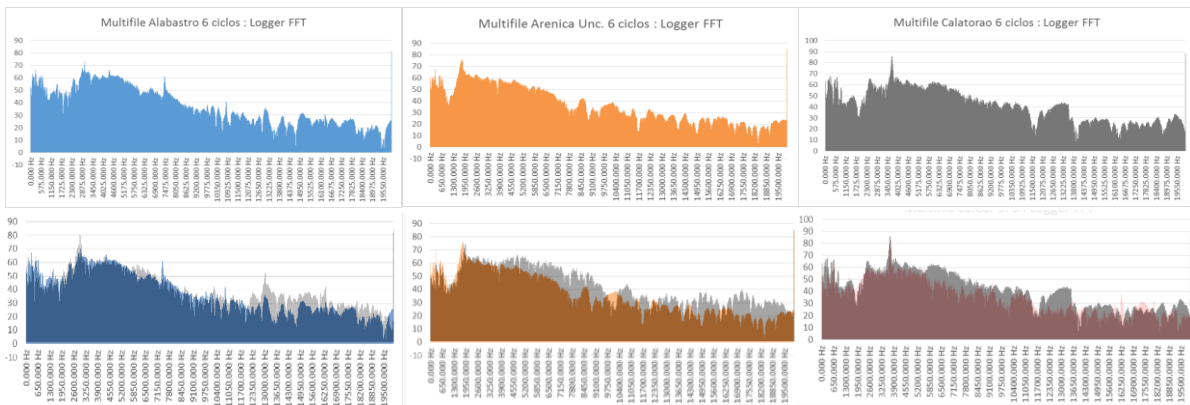


Imagen 21. Superior: Espectros de frecuencias para las 3 litologías alteradas (alabastro=azul, arenisca=naranja, caliza=gris). Inferior: Espectros de frecuencias de las probetas alteradas, en el mismo orden que en la parte superior, superpuestos al espectro de las probetas sin alterar (alabastro= gris, arenisca= gris, caliza=rojo) para las 3 litologías. (Eje Y) presión sonora, (Eje X) frecuencia en todas las gráficas.

8. Análisis de emisión sonora en tercios de octava (Método 2)

8.1 Introducción

Partiremos de una gráfica decibelios/tiempo parecida a las obtenidas en el anterior método pero con la diferencia de que a lo largo del transcurso de la señal se van superponiendo una serie de picos secundarios localizados a la derecha del pico máximo como se ve en la imagen 22_izquierda (correspondientes a los diferentes rebotes del percutor del péndulo). A su izquierda, las fluctuaciones de intensidad son debidas únicamente al sonido ambiente ya que todavía no se ha iniciado el golpe. Como lo que nos interesa es el instante de golpeo; se seleccionara el pico de máxima presión sonora como resultado de la suma de los decibelios de todas las frecuencias en ese instante. Una transversal a ese punto nos proporcionara el espectro de frecuencias obtenido en 1/3 de octava con el que trabajaremos (Imagen 22_derecha).

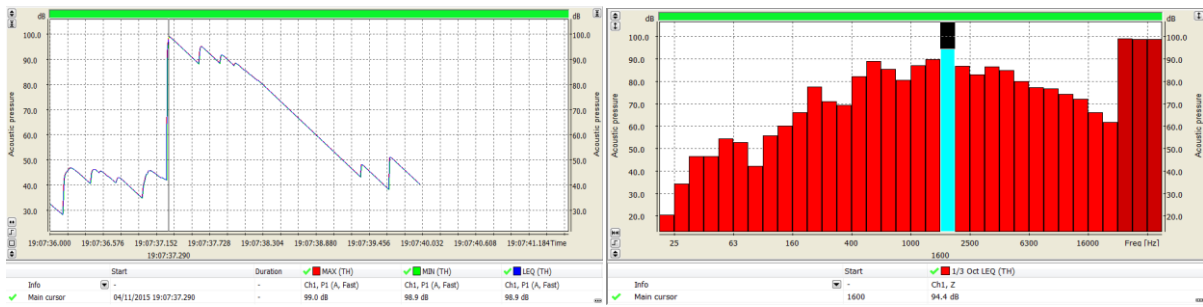


Imagen 22. *Izquierda*: Gráfica de emisión sonora de un ensayo en 1/3 de Octava en alabastro (Análisis L1100 Test 7). Presión sonora (eje Y), tiempo (eje X). *Derecha*: Transversal en el punto de máxima presión sonora de la gráfica anterior para obtener espectro de frecuencias en ese instante. Presión sonora (eje Y), frecuencia (eje X).

8.2 Espesor vs frecuencia

Para obtener las señales acústicas primero se golpearon 5 veces cada una de las probetas de diferente espesor (50, 30, 20 y 10mm), dando de esta forma 20 medidas de emisión sonora en 1/3 de octava, estas medidas se unificaron obteniéndose una gráfica compleja (con el valor medio de la emisión sonora (en decibelios) obtenida para cada espesor, en función de la frecuencia). Este proceso se repite 3 veces más, obteniendo de esta forma 4 gráficas complejas (Imagen 23), en dónde se observa la evolución de la señal sonora en función del espesor de la probeta, para cada una de las frecuencias analizadas.

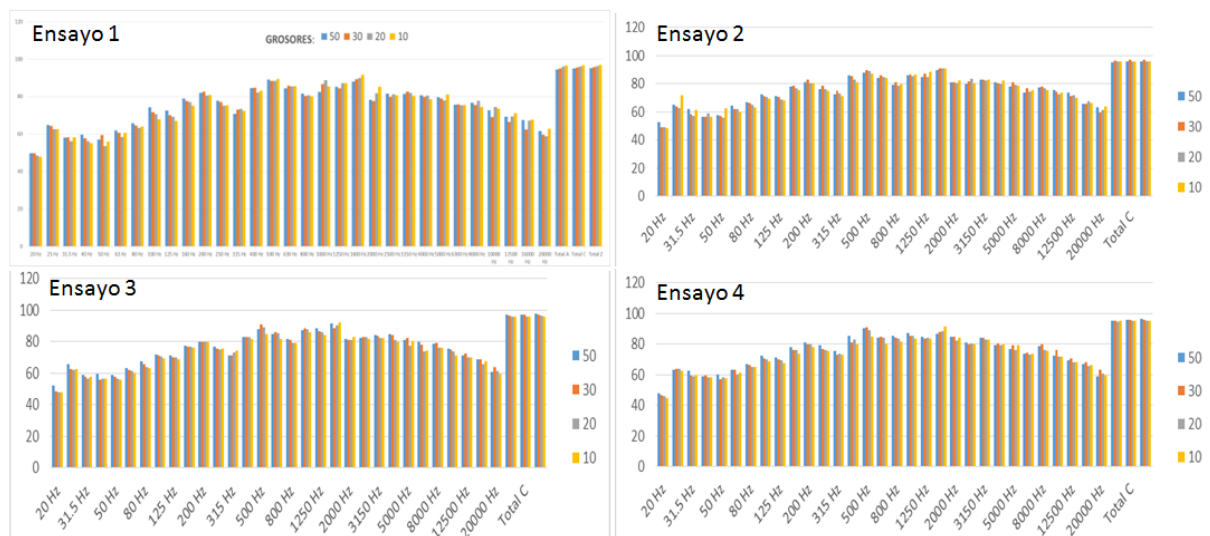


Imagen 23. Ensayo 1, 2, 3 y 4 con la firma sonora comparativa, para cada uno de los ensayos, de un grupo de 4 probetas de alabastro que difieren en su espesor (50-30-20-10mm). Presión sonora (Eje Y), frecuencia (Eje X).

Una vez obtenidas las gráficas complejas, se procede a comparar (entre la primera y la segunda) la evolución de la presión sonora en función de cada uno de los espesores para cada frecuencia. De esta forma se observaran las coincidencias en la evolución de la firma sonora en función del espesor para ambas gráficas, considerando como evoluciones reales la directa (aumento de la presión sonora al aumentar el espesor) y la indirecta (aumento de la presión sonora al disminuir el espesor), puesto que una distribución aleatoria sería fruto de la casualidad. Una vez se inicia la comparación se indicará el número de coincidencias o porcentaje de acierto (Tabla 13), dónde el valor 4 corresponde a un 100% de coincidencia (la distribución de las 4 barras, según espesor, para cada frecuencia es la misma para las 2 gráficas múltiples) como ocurre para las frecuencias de 100 y 125Hz; el valor 2 corresponde a un 50% de coincidencia (coincide la distribución de 2 barras al comparar las 2 gráficas); El valor 1 corresponde a un 25% de coincidencia (coincide la distribución de 1 barra al comparar las 2 gráficas) y el valor 0 corresponde a un 0% de coincidencia (no coincide la distribución

de las barras al comparar los gráficos). Una vez realizada la comparación, nos quedaremos con las frecuencias que presentan un 100% de coincidencia y las compararemos con las gráficas complejas 3 y 4, para comprobar que también presentan coincidencia con estas.

Teste 8											
Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	
20 Hz	25 Hz	31.5 Hz	40 Hz	50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	
2	1	1	2	2	2	2	4	4	2	2	
Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	
250 Hz	315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz	2000 Hz	2500 Hz	
0	0	0	0	2	0	0	0	2	1	1	
Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	
3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz	8000 Hz	10000 Hz	12500 Hz	16000 Hz	20000 Hz			
1	0	0	2	2	0	1	1	2			
% de acierto				4	100%	2	50%	1	25%	0	0%
nº de ocurrencia				2		12		7		10	
Total medidas				31							

Tabla 13. *Superior*: Comparativa de la gráfica compleja 1 y 2 indicando el valor de coincidencias en el orden relativo entre grosores de probetas y de presión sonora en cada frecuencia de emisión de cara a evaluar la influencia del grosor en las probetas de alabastro. *Inferior*: número de ocurrencias para cada porcentaje de acierto obtenido a partir de la *tabla superior*.

En las frecuencias de 100 y 125Hz (Imagen 24), la columna con mayor presión sonora es la probeta con mayor espesor (50mm) y presenta una distribución directa, disminuyendo la presión sonora hasta llegar al mínimo en el menor espesor (10mm). De esta manera se puede diferenciar entre placas de diferente espesor mediante la altura relativa de cada una de las 4 columnas representadas en la anterior frecuencia.

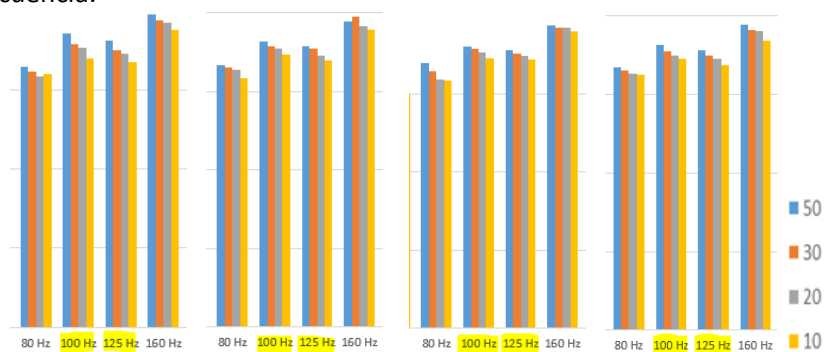


Imagen 24. Fragmentos clave de la firma sonora parcial de los ensayos múltiples 1, 2, 3 y 4 respectivamente, para el análisis de la relación entre el espesor de la probeta y la emisión musical del Método 2 (1/3Oct). (Eje Y) presión sonora (Eje X) frecuencia. La leyenda de colores corresponde a los espesores en mm.

8.3 Densidad vs frecuencia

Partiremos de un grupo de probetas de diferentes litologías pero dimensiones aproximadas (10x10x3cm). Obtenemos de nuevo un gráfico de barras múltiple resuelto (Imagen 25 *izquierda*) y que utilizaremos como gráfica base, compuesto por diferentes barras que corresponderán a las diferentes familias de emisión sonora (diferentes litologías) ordenadas en la leyenda por colores.

La técnica para comparar las gráficas y calcular el porcentaje de coincidencia en cada una de las frecuencias, será la misma utilizada en el apartado anterior. Se determinó el valor de frecuencia con una repetitividad del 100% (mismo orden relativo de presión sonora) y respondiendo a las variaciones de densidad de manera lógica.

En este caso; las señales acústicas se han obtenido a partir de dos ensayos; cada uno de ellos compuesto por los *multifiles (señal acústica media)* de los 5 golpes realizados para cada una de las probetas de las 3 litologías. Comparando las frecuencias entre los ensayos se obtienen unas tablas en las cuales se indica el número de coincidencias en el orden relativo entre la litología de las probetas y la presión sonora.

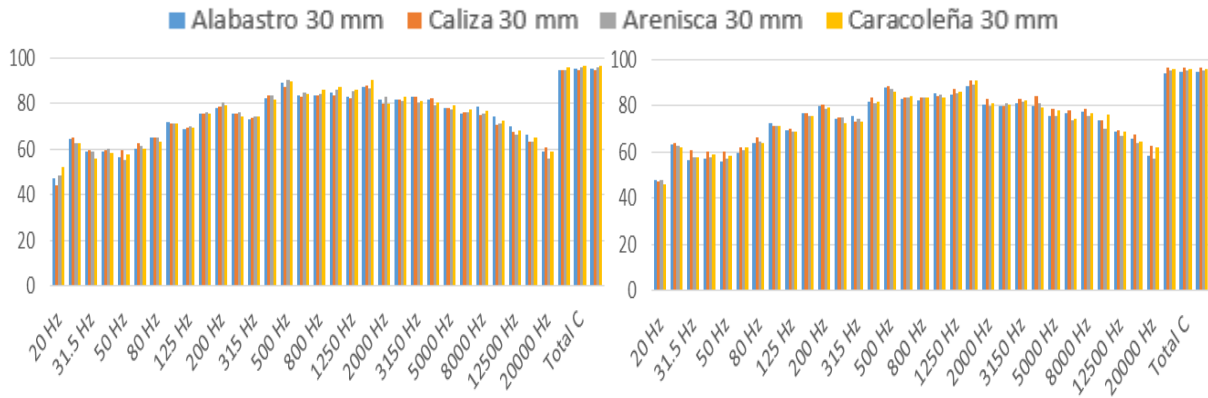


Imagen 25. Gráfico de barras múltiple 1 (izquierda) y 2 (derecha). Corresponden a unos ensayos de emisión sonora en 1/3 de octava en el análisis de la frecuencia de 20000Hz (teste 9) para las probetas de dimensiones 10x10x30cm de Alabastro, caliza Calatorao, arenisca y Caracoleña. (Eje Y) presión sonora, (Eje X) frecuencia.

El ensayo de repetitividad (Tabla 14) dio un acierto del 100% a la frecuencia de 20.000Hz, donde el orden de mayor a menor presión sonora ha sido: Caliza Calatorao >Alabastro > Arenisca Uncastillo (Imagen 26). Se reafirma que el método de discriminación de frecuencias es correcto; ya que al analizar las frecuencias en un grupo de probetas de diferentes litologías (diferentes densidades) pero mismas dimensiones (todas con espesores de 3 cm aprox.), se observó que en las frecuencias de 100 y 125 Hz (Imagen 26) las cuatro barras correspondientes a las 4 probetas analizadas reflejaba que el espesor de las probetas era prácticamente el mismo (obtuvieron casi la misma altura) demostrando la fiabilidad del análisis.

					Teste 9						
Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	
20 Hz	25 Hz	31.5 Hz	40 Hz	50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	
0	2	1	0	2	0	2	1	0	1	0	
Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	
250 Hz	315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz	2000 Hz	2500 Hz	
1	2	1	0	0	2	1	0	2	0	1	
Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	Ch1 (SLM)	
3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz	8000 Hz	10000 Hz	12500 Hz	16000 Hz	20000 Hz			
	1	1	0	0	0	0	2	1	4		
% de acierto					4_100%	2_50%	1_25%	0_0%			
nº de ocurrencia					1	7	10	13			
Total medidas					31						

Tabla 14. Superior: Comparativa grafica compleja 1 y 2. Indica el número coincidencias en el orden relativo, entre la litología y la presión sonora, en cada frecuencia. Como son cuatro litologías distintas la coincidencia del 100% se produce cuando coincide el orden de los 4. (2 serían el 50% y 1 el 25%) A.1-ABS I versus A.1-ABS IV.

Inferior: número de ocurrencia obtenido en cada porcentaje de acierto.

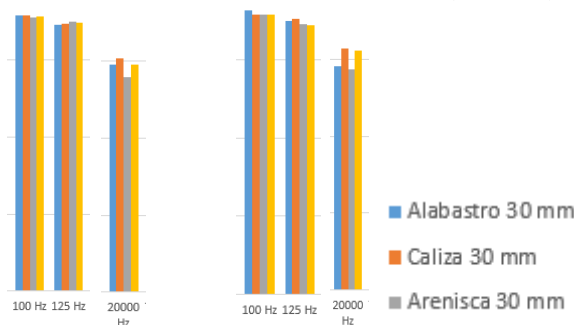


Imagen 26. Fragmentos clave de la firma sonora parcial de los ensayos múltiples A.1_ABS I y ABS II en la frecuencias de 100, 125 y 20000Hz para el análisis de la relación entre densidad de probeta y emisión sonora en 1/3 de octava. Presión sonora (eje Y), frecuencia (eje X).

9. Discusión

Método 1: Las pautas de variación de la emisión sonora con las dimensiones de la probeta son inversamente proporcionales a la variación de la frecuencia fundamental en el caso de la variable *Longitud* y directamente proporcional en el caso del *Espesor* y la *Anchura*. El incremento unitario de cada una de las dimensiones afecta en diferente grado al incremento de la frecuencia fundamental. Siendo la más influyente el espesor, seguido de la longitud y de la anchura.

-Variación en el espesor de 10mm= variación de frecuencia Arenisca (785,37hz), Caliza (1370,97hz), Alabastro (981,31hz).

-Variación en la longitud de 10mm= variación de frecuencia Arenisca (711,44hz), Caliza (819,47hz), Alabastro (664,65hz).

-Variación en la anchura de 10mm= variación de frecuencia Arenisca (379,62hz), Caliza (150,64hz), Alabastro (269,46hz).

Tras analizar los espectros de frecuencia de una larga lista de dimensiones llegamos a la conclusión de que son más limpios cuanto mayor es la diferencia entre las dimensiones de la probeta analizada, ya que se impone un modo de vibración de sobre los demás. Se debe a que todas las dimensiones influyen en el resultado de la emisión sonora y si estas son similares influirán todos los modos de vibración (y sus correspondientes frecuencias fundamentales) con el mismo grado sin destacar ninguno de ellos. Como consecuencia de esta escasa diferencia entre las dimensiones; muchas veces la frecuencia fundamental audible no corresponde a la frecuencia de mayor presión sonora teórica y toca echar mano de fórmula de la frecuencia para identificar el pico fundamental real.

Las características petrofísicas que más influyen en la emisión sonora de la roca son el módulo elástico, porosidad y densidad con un valor de coeficiente de correlación (R^2) de 0'94, 0'85 y 0'79. Teniendo en cuenta el grado de alteración de la roca; las microfisuras de las rocas producen una disminución en las dimensiones y, consecuentemente, de la frecuencia fundamental, e incluso una anulación (silencio de la roca al golpearla) previa al fallo mecánico. Un ejemplo real apareció en una probeta de alabastro de 10x5x1cm; que poseía una frecuencia excesivamente baja (1487,5hz) para sus 5 cm de anchura si se compara con los resultados correspondientes a las probetas de 8 y 3 cm de anchura con valores entre 4900hz y 3350hz respectivamente, por lo que se piensa que entre estos valores debería rondar la frecuencia. Esta probeta presenta una fisura perpendicular a la anchura y en su parte central formando una barrera física que reduce la anchura teórica y probablemente es la responsable de la variación en la emisión sonora.

En relación a la fabricación del litófono de alabastro, la forma de controlar la afinación es acortando la probeta (sonido más agudo, frecuencia más alta) o lijando la parte posterior (más grave, frecuencia más baja) teniendo en cuenta la variación unitaria antes descrita para alcanzar la frecuencia exacta de la nota acotada con la ayuda de la escala de frecuencias para la escala musical.

Método 2: Podemos discriminar espesores utilizando las frecuencias bajas (100Hz y 125 Hz) y diferencias en las densidades utilizando las frecuencias altas (20.000 Hz), ambos siempre de una manera relativa. Tras el análisis de reproducibilidad se observó que únicamente las frecuencias de 100 y 125Hz responden de manera lógica a las variaciones de espesor. Las presiones sonoras (decibelios) se ordenan, con valores altos en la probeta de mayor espesor (50mm) hasta el valor más bajo con la probeta de menor espesor (10mm).

- Espesor de probetas de mayor a menor presión sonora en la frecuencia 100Hz: 50mm (74'18dB), 30mm (71'59dB), de 20mm (70'53dB) y de 10mm (67'8dB).
- Espesor de probetas de mayor a menor presión sonora en la frecuencia 125Hz: 50mm (72'53dB), 30mm (70dB), de 20mm (69'21dB) y de 10mm (66'96dB)

Con este segundo ensayo “Densidad Probeta - Emisión sonora” la frecuencia con un porcentaje de acierto del 100% y por lo tanto la que refleja las diferencias entre las litologías, fue la de 20.000Hz. Según el orden de mayor a menor presión sonora, puede responder a un cambio en la densidad (g/cm^3) de los materiales: Caliza Calatorao ($2,67 \text{ g/cm}^3$) > Alabastro ($2,31 \text{ g/cm}^3$) > Arenisca Uncastillo ($2,16 \text{ g/cm}^3$).

Los valores obtenidos admiten su representación como rectas de regresión, que pueden verse en el Anexo 4. Hagamos notar que, al igual que con el método 1, el módulo elástico tiene mejor correlación (R^2) que la densidad:

- R^2 Espesor= 0,9599 (en la banda de 100Hz) y 0,9714 (en la de 125Hz).
- R^2 Densidad= 0,8032.
- R^2 Módulo elástico= 0,9401.

10. Aplicaciones

Derivado de analíticas necesarias para caracterizar la emisión musical de la roca sana (**método 1**), en base a sus dimensiones geométricas, nos planteamos conseguir la fabricación de un prototipo de litófono de alabastro (Imagen 27), tallando las dimensiones exactas de probeta para conseguir las frecuencias fundamentales equivalentes a las notas de una escala musical (DO \rightarrow SOL’).



Imagen 27. Litófono de alabastro de Gelsa con una amplitud de notas del Do (1046hz) al Sol’ (3135hz).

Al no influir de la misma manera todas las dimensiones (X, Y y Z), es posible conseguir los mismos sonidos (igual frecuencia fundamental) con piezas de diferente tamaño. A continuación, se mostrarán las dimensiones con la frecuencia fundamental equivalente a un Mi (bemol) y un Do (Tabla 15). Gráficas con la señal sonora de cada nota en Anexo 3.

	Grosor	Longitud	Anchura	Densidad	Módulo elasticidad	Frecuencia matemática	Frecuencia real
	(mm)	(mm)	(mm)	(Kg/m3)	(N/mm2)	(Hz)	(Hz)
Do	22,22	300,20	59,56	2306	313,75	936,75 (+) 111,25	1048
	6,60	160,25	61,89			976,44 (+) 71,6	
Mi	26,42	290,92	59,86			1186,00 (+) 61,0	1247
	6,36	144,25	72,31			1161,25 (+) 85,8	

Tabla 15. Ejemplo en alabastro de dos dimensiones de probetas con similar frecuencia, en un caso para la frecuencia de Do y en otro para la de Mí. La columna de *Frecuencia matemática* representa la frecuencia teórica calculada empíricamente junto a su error (medido respecto a su *Frecuencia real*).

Aplicado en el ámbito de la evaluación del estado físico del material: Una vez tengamos controlada la fórmula de la frecuencia; mediríamos la emisión sonora real de una probeta al ser golpeada y comprobaríamos el valor con la frecuencia teórica obtenida de la fórmula, al integrar los factores de dimensión de la probeta y módulo de Young para la roca sana. Si no coinciden los valores de frecuencia, partiendo de la base de que los valores de dimensión los hemos medido correctamente, significa que el módulo de Young será diferente, como consecuencia de unas características petrofísicas también diferentes. Integrando los resultados de un análisis de envejecimiento acelerado se podría conseguir determinar el grado de deterioro en función de la variación de frecuencias medidas. De momento nuestros datos de envejecimiento no son aplicables ya que el grado de cristalización de sales fue débil y la alteración mínima.

Con el prototipo de péndulo (**método 2**); las actuales aplicaciones únicamente están destinadas a probetas aisladas sin confinar y en condiciones de laboratorio. La aplicación en obras de ingeniería civil con las muestras de roca confinadas o formando parte de un único elemento como puede ser una pared de cemento, todavía no son viables ya que no sabemos si los resultados serán extrapolables a las diferentes condiciones de confinamiento y/o para otro tipo de material diferente a las litologías estudiadas.

11. Conclusiones

We have developed two research methods of sound behavior on rocks (Methods 1, fundamental frequency, and Methods 2, sound pressure to 1/3 de octave). The patterns of variation of the sonorous emission with rock test piece dimensions (1, 2 and 3) and petrophysical properties analyzed (4, 5 and 6), obtained by method 1 are:

1) Inversely proportional to the variation of the fundamental frequency (Y) in the case of the length variable (X): $Y = -66,86X + 15575$ ($R^2=0,96$) (Alabaster). $Y = -72,99X + 15262$ ($R^2=0,96$) (Sandstone). $Y = -82,175X + 19090$ ($R^2=0,94$) (Limestone).

2) Directly proportional to the variation of the fundamental frequency (Y) in the case of thickness variable (X): $Y = 27,28X + 9309$ ($R^2=0,93$) (Alabaster). $Y = 35,92X + 5016,5$ ($R^2=0,96$) (Sandstone). $Y = 14,48X + 11850$ ($R^2=0,97$) (Limestone).

3) Directly proportional to the variation of the fundamental frequency (Y) in the case of the width variable (X): $Y = 98,08X + 71,484$ ($R^2=0,99$) (Alabaster). $Y = 76,81X + 280,78$ ($R^2=0,98$) (Sandstone). $Y = 134,371X + 109,09$ ($R^2=0,99$) (Limestone).

4) Directly proportional to the variation of the fundamental frequency (Y) in the case of the density variable (X): $Y = 3243,3X - 4848,2$ ($R^2=0,9084$).

5) Directly proportional to the variation of the fundamental frequency (Y) in the case of the Young's modulus (X): $Y = 2,6875X + 1552,9$ ($R^2=0,9914$).

6) Inversely proportional to the variation of the fundamental frequency (Y) in the case of the porosity variable (X): $Y = -100,21X + 3400,8$ ($R^2=0,7666$).

The patterns of variation of the noise emission with the physical parameters of the samples obtained by the method 2 are:

1) Directly proportional to the variation of sonorous pressure (Y) in the case of thickness variable (X): $Y = 0,1515X + 66,859$ ($R^2=0,959$) (100Hz). $Y = 0,1326X + 66,028$ ($R^2=0,971$) (125Hz).

2) Directly proportional to the variation of sonorous pressure (Y) in the case of density variable (X): $Y = 8,5786X + 38,083$ ($R^2=0,8032$) (20.000Hz).

3) Directly proportional to the variation of sonorous pressure (Y) in the case of Young's modulus variable (X): $Y = 0,0073X + 54,954$ ($R^2=0,9401$) (20.000Hz).

These calculations are improvable in its accuracy, with the extension of the experimental method proposed to a larger universe of rocks/samples. They have laid the foundation for building stone xylophones to predicting the sound emitted according the specimen dimensions.

12. Bibliografía

- AENOR (1999) UNE-EN 12370 Determinación de la resistencia a la cristalización de sales 10pp.
- 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 13pp.
- 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) 17pp.
- Arenas, C. (1993): *Sedimentología y paleogeografía del Terciario del margen pirenaico y sector central de la Cuenca del Ebro (zona aragonesa occidental)*. Tesis doctoral (inérita). Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza, 858 p.
- Brahim, L., Herbert Massmann y Rodrigo Ferrer (1994): Instrumentos musicales artesanía y ciencia. *Revista Musical Chilena*, 48 (181): 143-143.
- Buj Fandos, O y Gisbert Aguilar, J (2008): *Caracterización tecnológica de las rocas aragonesas de usos constructivos: Propiedades hídricas y durabilidad de las rocas con uso ornamental*. Tesis doctoral, Universidad de Zaragoza, 483 p.
- Dunham, R.J. (1962): Clasificación de carbonates de rocas de acuerdo a texturas de deposición. En: *Classification of Carbonate Rocks (Symposium)*:108-121.
- Fais S. (2016) Comunicación Personal Dipartimento di Ingegneria Civile, AmFacoltà di Ingegneria Via Marengo, 2 University of Cagliariorientale e Architettura. Cagliari 09123
- Folk, R. L. (1959): Practical petrographic classification of limestones. *AAPG Bulletin*, 43: 1-38.
- Fort, R., Fernández Revuelta, B., Varas, M.J., Alvarez de Buergo, M., Taborda Duarte, M. (2008): Influencia de la anisotropía en la durabilidad de las dolomías Cretácicas de la Comunidad de Madrid frente a la cristalización de sales. *Materiales de Construcción*, 58: 161-178.
- Galarreta, S. (2014): *Evaluación de las propiedades físicas del alabastro como material constructivo y/o decorativo*. Trabajo de fin de grado, Universidad de Zaragoza, 31 p.
- Gambra Uriz, A. (2008): *Relación entre la frecuencia fundamental propia de una tabla de Iroko (Chlorophora excelsa) y sus dimensiones. Aplicación a la txalaparta*. Trabajo práctico tutorado, Universitat de Lleida, 68 p.
- Íñiguez González, G., Arriaga Martitrgui, F., Esteban Herrero, M. y Argüelles Álvarez, R. (2007): Los métodos de vibración como herramienta no destructiva para la estimación de las propiedades resistentes de la madera aserrada estructural. *Informes de la construcción*, 59: 97-105.
- Pettijohn, F.J., Potter, P.E. y Siever, R. (1987): *Sand and sandstone*. Springer Verlag, New York, 553 p.
- Puigdefábregas Tomás, C. (1975): *La sedimentación molásica en la cuenca de Jaca*. Instituto de Estudios Pirenaicos, Jaca, 188 p.
- Quintero R, H.F., Henao Castañeda, E., Monroy, M. y Camargo G, J.C (2011): Métodos experimentales para la medición de las propiedades mecánicas de frutos y maderos. *Scientia Et Technica*, 48: 41-46.
- Quirantes, J. (1978): *Estudio sedimentológico y estratigráfico del Terciario Continental de Los Monegros*. Tesis Doctoral, Institución Fernando el Católico (CSIC), Zaragoza, 27: 207 p.
- Rosell, J. R. y Cantalapiedra, 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.
- Siquier, A. (en línea). La Txalaparta. Construcción de instrumentos tradicionales. (Última modificación 02/12/2008). Disponible en: <http://www.luispayno.es/colabora/txalaparta.htm>

Anexo

Anexo 1: Tallado de probetas de cada una de las rocas.

3 placas de 10x10x1
3 placas de 10x10x2
3 placas de 10x10x3
3 placas de 10x10x5
3 tiras de 10x5x1
3 tiras de 10x5x2
3 tiras de 10x5x3
3 tiras de 15x3x1
3 tiras de 15x3x2
3 tiras de 15x3x3
3 tiras de 20x5x1
3 tiras de 20x5x2
3 tiras de 20x5x3

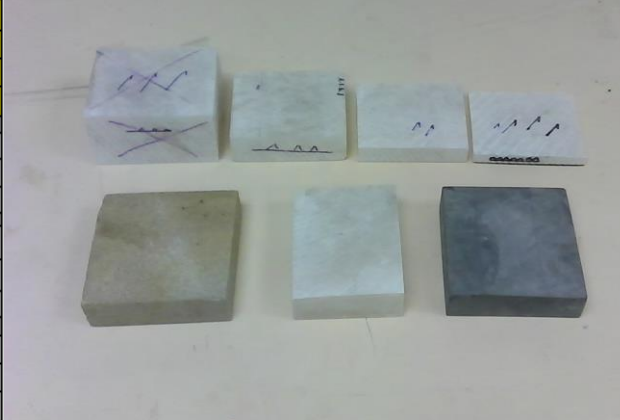


Tabla 16: Tamaño general (en *cm*) para cada litología de la colección de probetas a ensayar en el Método 2 (en amarillo las dimensiones utilizadas en la obtención de los resultados). Imagen28: Probetas utilizadas (fila superior para evaluar el comportamiento del sonido al modificar el espesor y la fila inferior para la variación de litología).

1 placa 20x5x3
1 placa 15x5x3
1 placa 10x5x3
1 placa 20x5x2
1 placa 15x5x2
1 placa 10x5x2
1 placa 20x5x1
1 placa 15x5x1
1 placa 10x5x1



1 placa 10x8x3
1 placa 10x5x3
1 placa 10x3x3
1 placa 10x8x2
1 placa 10x5x2
1 placa 10x3x2
1 placa 10x8x1
1 placa 10x5x1
1 placa 10x3x1



Tablas 17: Tamaño general (en *cm*) de las probetas creadas en el Método 1 para ensayos fft de cada litología (en amarillo las utilizadas finalmente). Imagen 29: (*superior izquierda*) Fotografía para el ejemplo concreto del ensayo fft-Longitud, (*inferior izquierda*) fotografía para el ejemplo concreto del ensayo fft-Espesor, (*derecha*) fotografía para el ejemplo del ensayo fft-Anchura.

Anexo 2: Influencia de los parámetros externos a la probeta.

2.1 Intensidad de golpeo.

Los gráficos de las frecuencias resultantes de golpear una misma probeta con diferente intensidad no son totalmente iguales debido a que con una mayor intensidad de golpeo se excitan una serie de parciales que de otra manera estarían apagados (Imagen 30), pese a que la frecuencia fundamental debe ser la misma en ambos casos.

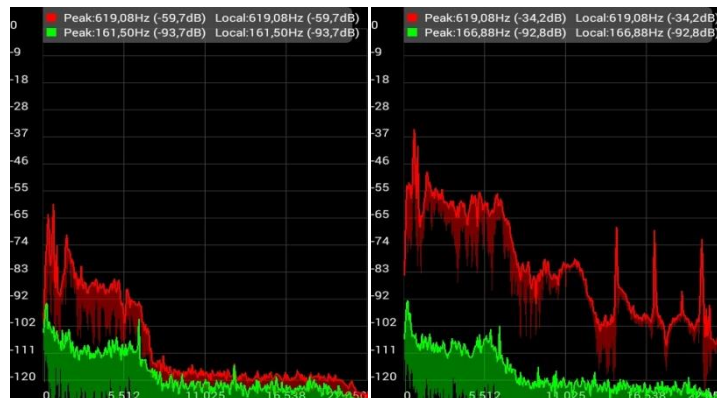


Imagen 30. Gráficos del app Spectrum Analyze resultantes de golpes efectuados con diferentes intensidades (menor energía de impacto para el gráfico de la izquierda) sobre una misma probeta de la colección. (Eje Y) presión sonora, (Eje X) frecuencia. La línea fluctuante verde indica el sonido previo al golpeo (sonido de fondo) y la roja el sonido en el instante del golpeo.

2.2 posición de los soportes.

Los soportes de madera (prismas de sección semicircular) se colocaran perpendiculares al eje Y (longitud) y sobre una superficie metálica horizontal en una mesa aislada de posibles perturbaciones del entorno (Imagen 31).



Imagen 31. Izquierda conjunto de elementos para la medición. Derecha detalle de los soportes.

No son un simple elemento estético, sino que cumplen una función de aislamiento de las probetas frente a las vibraciones externas. La colocación de estos soportes de madera respecto a la probeta define el modo de vibración de las muestras; ya que aunque la posición relativa de los soportes respecto a la probeta no varía las frecuencias de los parciales y, por tanto, tampoco de las zonas nodales de la probeta (Gambra, 2008), sí produce un cambio en el sonido debido al diferente reparto de las intensidades de cada parcial. Teniendo en cuenta lo anterior y según la norma AENOR (2004) UNE-EN 14146; los soportes se colocaran paralelos a una distancia del 25% de la longitud total, respecto a los extremos de cada probeta, debido a que en esa posición se localizan los nodos o zonas de mínima vibración del primer modo de vibración transversal. Así pues los soportes tendrán una distribución 25%-75%.

2.3 lugar de golpeo en la cara superior.

El lugar de golpeo tiene gran importancia. El sonido producido al pegare en cada zona es diferente, debido a que se acentúan unos parciales u otros dependiendo de por donde pasa la línea de fuerza del golpeo. Si la línea de fuerza atraviesa un vientre, ese parcial quedara remarcado, en cambio, si atraviesa un nodo, queda silenciado.

En el siguiente esquema (Imagen 32) se representa la probeta estática, los 3 primeros modos de vibración transversal y 3 zonas de golpeo diferentes. Como una de las cosas que se buscan es evaluar la frecuencia fundamental nos decantaremos por golpear en el centro (golpe 3), que enfatizará el primer modo transversal.

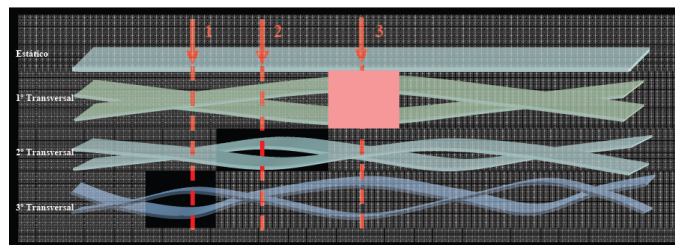
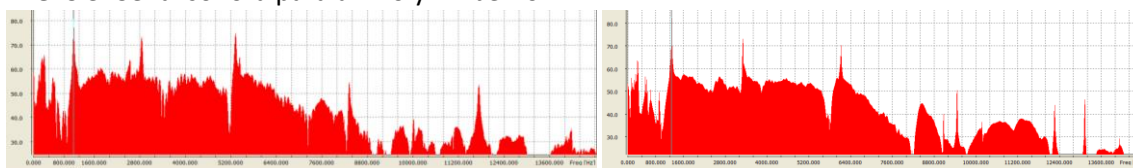


Imagen 32: Líneas de golpeo, tabla estática y primer, segundo y tercer modo transversal (Gambra, 2008).

Anexo 3: Señal sonora para un Do y Mi bemol.



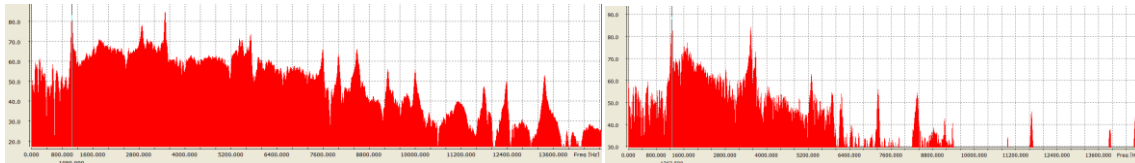


Imagen 33: Espectro de frecuencias obtenido en el momento de impacto para las 2 probetas con emisión sonora en Do (izquierda) y para las 2 probetas con emisión sonora en Mi (derecha). (Eje Y) presión sonora (Eje X) frecuencia. La línea vertical oscura sobre el eje X indica la localización de la frecuencia fundamental.

Anexo 4: rectas de regresión del método 2.

Litología	Frecuencia 100Hz		Litología	Frecuencia 125Hz	
	Presión sonora (Db)	Espesor de probeta (mm)		Presión sonora (Db)	Espesor de probeta (mm)
Alabastro	74,18	50	Alabastro	72,53	50
	71,59	30		70,00	30
	70,53	20		69,21	20
	67,80	10		66,96	10

Tabla 18. Valores de presión sonora y espesor de probeta para las frecuencias de 100Hz (izquierda) y 125Hz (derecha), con los que se elaboran las gráficas de regresión de la imagen 34.

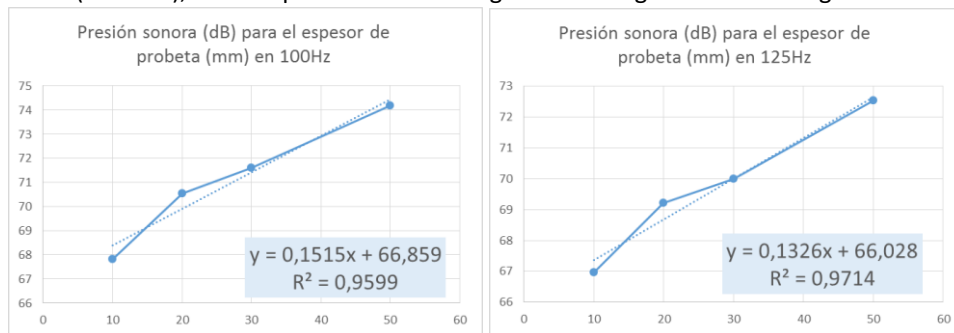


Imagen 34. *Izquierda:* Rectas de regresión de la presión sonora en función del espesor de las probetas en la frecuencia de 100Hz. *Derecha:* presión sonora en función del espesor de las probetas en la frecuencia de 125Hz. Siendo el Eje Y la presión sonora y el Eje X el espesor.

Litología	Frecuencia 20,000Hz		Litología	Frecuencia 20,000Hz	
	Presión sonora (Db)	Densidad roca (g/cm ³)		Presión sonora (Db)	Modulo de Young (MPa)
Caliza	60,62	2,67	Caliza	60,62	825,58
Alabastro	59,15	2,31	Alabastro	59,15	479,2
Arenisca	55,73	2,16	Arenisca	55,73	157,11

Tabla 19. Valores de presión sonora, densidad (izquierda) y módulo de Young (derecha) de las probetas para las frecuencias de 20.000Hz, con los que se elaboran las gráficas de regresión de la imagen 35.

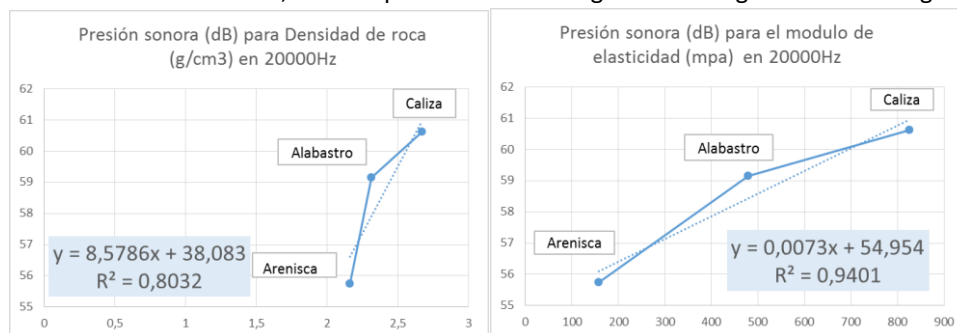


Imagen 35. *Izquierda:* Rectas de regresión de la presión sonora en función de la densidad de la probeta de cada litología y en la frecuencia de 20.000Hz. *Derecha:* Rectas de regresión de la presión sonora en función del módulo de elasticidad de la probeta de cada litología y en la frecuencia de 20.000Hz. Siendo el Eje Y la presión sonora y el Eje X la densidad o el módulo de elasticidad.

Glosario

- **Actuador:** Extremo de la cabeza del péndulo que entra en contacto con la roca al accionar el movimiento.
- **Antinodo:** Aquella parte de un sistema vibrante que más oscilación presenta. Sinónimo de vientre.
- **Armónico:** Aquellos sobretonos que son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental.
- **Decibelio (dB):** Unidad logarítmica utilizada para medir la amplitud de la onda sonora.
- **Emisión sonora:** Ruido que produce un objeto cuando es golpeado, al perturbar las moléculas de aire que tiene a su alrededor del mismo modo a como oscila el propio objeto.
- **Espectro de frecuencias:** Gráfico de emisión sonora para el momento del impacto que representa la frecuencia en el eje x y la intensidad en el eje y.
- **FFT (Fast Fourier Transform):** Algoritmo basado en la teoría de Fourier y utilizada por los programas de edición de sonido, en este caso para la función de análisis de frecuencias.
- **Frecuencia:** Número de ciclos por segundo con la unidad de medida en Hercio (Hz). En música las frecuencias altas corresponden a sonidos agudos y las bajas a graves.
- **Frecuencia fundamental:** Frecuencia predominante y correspondiente al primer modo de vibración transversal.
- **Modos de vibración:** Familia característica de oscilación de un sistema mecánico (transversal, torsional, lateral y longitudinal). La identificación de los modos es tarea del análisis modal.
- **Multifiles:** Señal acústica media o multi-archivo, obtenida automáticamente al realizar una superposición de varias señales de emisión sonora para cualquiera de las probetas.
- **Nodo:** Aquella parte de un sistema vibrante que menos oscilación presenta.
- **Octava:** Sucesión de las ocho notas de la escala musical (do, re, mi, fa, sol, la, si, DO). También definida como el intervalo o banda de frecuencia que separa dos sonidos cuyas frecuencias fundamentales tienen una relación de 2:1. Las frecuencias centrales de las bandas de octava quedan representadas en la siguiente serie: 63:125:250:500:1k:2k:4k:8k:16k Hz.
- **1/3 de Octava:** Es la tercera parte de una banda de octava. Se utiliza como método de análisis del sonido porque se asemejan a la forma de percepción del mecanismo auditivo humano.
- **Presión sonora:** Es lo que concebimos como el volumen o intensidad de una emisión sonora, medida en decibelios.
- **Parciales:** Son aquellos sobretonos que no son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental.
- **Tono:** Sensación auditiva del sonido que lo caracteriza como más agudo o más grave, en función de la frecuencia.