

## MODELO 3D DE UNA PANTALLA ACÚSTICA BASADA EN CRISTALES DE SONIDO UTILIZANDO EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

PACS: 43.58.Ta, 43.50.Gf

Onrubia Fontangordo, Lucas<sup>1</sup>; Castiñeira-Ibáñez, Sergio<sup>1</sup>; Bravo Plana-Sala, José María<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Centro de Tecnologías Físicas, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n,  
46022 Valencia, Spain.

E-mail: [luonfon@doctor.upv.es](mailto:luonfon@doctor.upv.es); [sercasib@fis.upv.es](mailto:sercasib@fis.upv.es); [jobrapla@fis.upv.es](mailto:jobrapla@fis.upv.es)

**Palabras Clave:** Modelización, Elementos finitos, Cristales de sonido, Pantallas acústicas

### ABSTRACT.

Finite element modeling of noise control devices has become an essential tool in recent years. This tool is commonly used to design acoustic barriers based on sonic crystals. In this paper we present the comparison of results of a modeled acoustic barrier, using 2D finite elements and its 3D equivalent with experimental results measured in an anechoic chamber. An interesting novelty of the work is how the 3D model has been made in order to minimize the computational time. The objective of this work is to verify which model best fits the experimental measurements and to verify if the 3D computational investment is cost-effective to realize customized designs of sonic crystal-based acoustic barriers.

### RESUMEN.

La modelización por elementos finitos de los dispositivos de control del ruido se ha convertido en una herramienta esencial en los últimos años. Esta herramienta se utiliza habitualmente para diseñar pantallas acústicas basadas en cristales de sonido. En este trabajo se presenta la comparación de resultados de una pantalla acústica modelizada mediante elementos finitos en 2D y su equivalente en 3D con resultados experimentales medidos en cámara anecoica. Una novedad interesante del trabajo es como se ha realizado el modelo 3D de forma que se minimice el tiempo de cálculo. El objetivo de este verificar qué modelo se ajusta mejor a las medidas experimentales y verificar si la inversión computacional en 3D es rentable para realizar diseños personalizados de barreras acústicas basadas en cristales de sonido.

### 1. INTRODUCCIÓN

El uso de pantallas acústicas (también denominadas barreras acústicas) para el control del ruido ha sido ampliamente estudiado, especialmente dentro de la tipología de barreras clásicas, como un obstáculo continuo que se interpone entre emisor y receptor. En este tipo de barreras acústicas, la atenuación depende fundamentalmente de su geometría (altura, espesor, longitud) y posición relativa entre la fuente de ruido y el receptor, así como de la difracción en cumbre o laterales de la pantalla [1]. En los últimos años, se están desarrollando barreras “no continuas” que se constituyen mediante elementos dispersores en estructura periódica ([2], [3]) y que basan su atenuación en el fenómeno de multi-interferencia también denominado dispersión múltiple. Algunas de las características más interesantes que se asocian con estas pantallas es su propiedad de permeabilidad. Esta propiedad imprime un valor añadido a la barrera al presentar múltiples ventajas:

- Permiten el paso de las corrientes naturales de aire, no generando gradiente térmico.
- Eliminan el “efecto presa” al no detener escorrentías superficiales de agua en situaciones de fuertes lluvias.
- Generan un menor impacto paisajístico al permitir la visión a su través.

- Requieren menor cimentación, abaratando su instalación al no generar efecto vela, reducen sustancialmente el momento al vuelco al no generar resistencias al aire.
- Permiten la sintonización. Mediante el diámetro de dispersores y su colocación se pueden atenuar bandas de frecuencia específicas, incluyendo baja frecuencia convirtiéndolas en dispositivos altamente ajustables.

En este trabajo, se estudiará la simulación de una tipología de barrera con diferentes modelos numéricos, comparando su coste computacional y su capacidad de ajuste a medidas experimentales realizadas en cámara anecoica.

## 2. SIMULACIONES

En este apartado se van a presentar 4 modelos numéricos, dos de ellos representando modelos anecoicos, más cercanos a lo que sería un ensayo experimental y otros dos modelos simplificados, denominados ideales. Todas las simulaciones se han realizado con el mismo equipo informático, en este caso un ordenador portátil personalizado cuyas características son las que figuran en la Tabla 1.

Tabla 1 – Características del equipo utilizado para simular.

Marca y modelo	PC Specialist Destian Intel
Procesador	Intel i7-12700, 12 núcleos, 20 hilos @ 4,90 GHz
Memoria RAM	64GB @ 3200 MHz

Asimismo, se utilizará el software de simulación numérica COMSOL Multiphysics® [4] con el módulo de acústica para realizar todas las simulaciones. Las simulaciones se centrarán en el mismo cristal de sonido que se mide de forma experimental en cámara anecoica. Se constituye por elementos dispersores cilíndricos de sección circular, de 11 cm de diámetro, contando con 4 filas x 10 columnas y con un paso de red de 15 cm. Obteniendo una frecuencia Bragg centrada en 1140 Hz, lo que generará una banda de atenuación que afectará especialmente al ruido de tráfico [5].

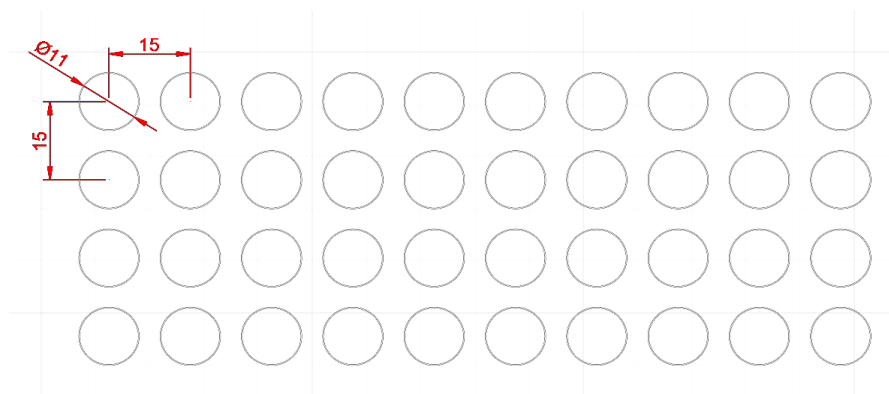


Figura 1 – Representación gráfica del cristal de sonido a simular, cotas en cm.

El parámetro utilizado para valorar los resultados obtenidos será el IL (*Insertion Loss*) en espectro desde 100 a 2000 Hz. Para ello, cada modelo se calcula dos veces, una con cristal y otra sin él.

$$IL = L_{\text{vacío}} - L_{\text{cristal}} \quad (1)$$

Siendo:  $IL$  (dB) las pérdidas por inserción,

$L_{\text{vacío}}$  (dB) el nivel de presión sonora en recepción sin la presencia de la barrera, y

$L_{\text{cristal}}$  (dB) el nivel de presión sonora en recepción con el cristal presente.

En todas las simulaciones presentadas se tendrán en cuenta los costes computacionales que se derivan de la complejidad del modelo (tiempo de cálculo, memoria RAM consumida, número de grados de libertad, etc.) y se hará una representación gráfica del modelo y los niveles de presión para la frecuencia Bragg (1140Hz).

### 2.1. Modelo de cámara anecoica en 2D

Las simulaciones se realizan atendiendo a las dimensiones de la cámara anecoica del Centro de Tecnologías Físicas de la UPV en la que se realizarán las pruebas experimentales. El trabajo se inicia con un modelo bidimensional de esta cámara cuyas dimensiones efectivas son de 6.6 m x 3.6 m. En ella se inserta el cristal de sonido ya descrito. Para simular de un modo más realista el contorno de la cámara anecoica, se van a modelar las paredes con coeficientes de absorción elevados, del orden de 0.90 y una fuente emisora lineal. Las superficies de los dispersores serán rígidas, el dominio de mallado será extremadamente fino. Se usa el resolvidor lineal directo MUMPS de COMSOL.

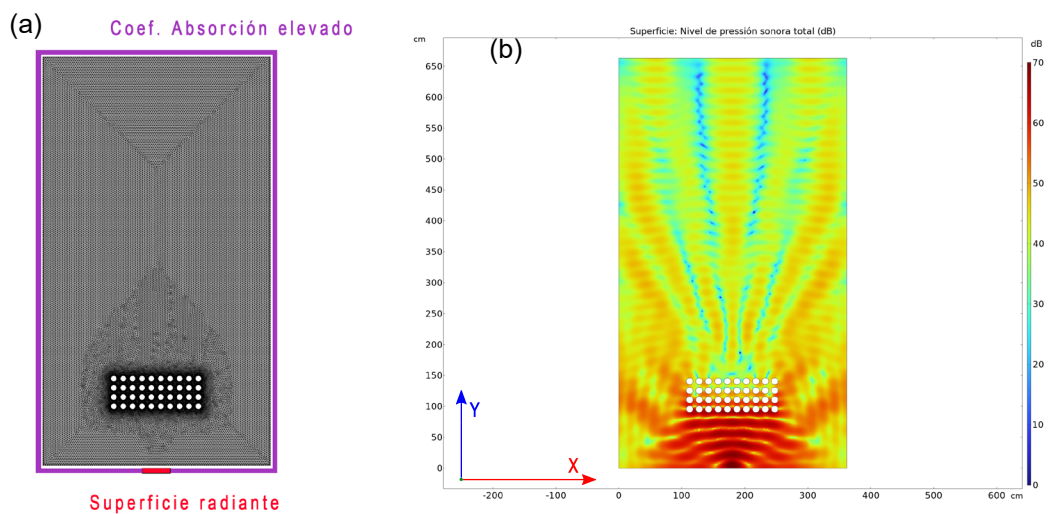


Figura 2 – (a) Detalle del mallado y condiciones de contorno. (b) Mapa de niveles de presión acústica a 1140Hz (frecuencia Bragg).

En la Figura 2(a), podemos ver la representación en COMSOL de la barrera estudiada. A la derecha, en la Figura 2(b) muestra el mapa de nivel de presión sonora, justificando que a la frecuencia 1140 reduce el nivel al otro lado de la pantalla, como cabe esperar. A continuación, se exponen las características computacionales de esta simulación en la Tabla 2.

Tabla 2 – Detalles computacionales de la simulación de cámara anecoica 2D.

	Con cristal	Sin cristal
Nº Elementos	70.000	51.000
Nº Grados de libertad	142.000	103.000
Tiempo de cálculo (s)	300	220
RAM consumida (GB)	8 - 10	8 - 10
Error Relativo [LinErr]	1E-13	1E-13

## 2.2. Modelo ideal 2D

Con la finalidad de hacer un modelo que simplifique de algún modo el descrito en el apartado 2.1, se presenta otro constituido por una única fila de dispersores, que gracias a una condición periódica en las paredes laterales del modelo se convierte en una matriz virtual infinita de dispersores hacia el eje Y, colocados a ambos lados de la fila que aparece en la Figura 3(a) y evitando así los efectos de borde laterales.

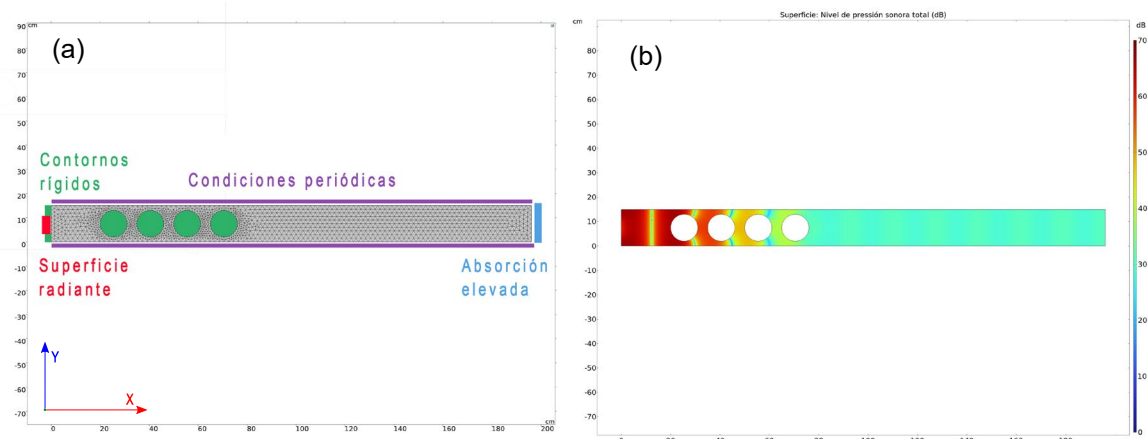


Figura 3 – (a) Detalle del mallado y condiciones de contorno. (b) Mapa de niveles de presión acústica a 1140 Hz (frecuencia Bragg).

En la Figura 3(a) se representan las condiciones del estudio, a la derecha, en la Figura 3(b) el mapa de presiones a frecuencia Bragg. Este modelo debería presentar unos resultados similares a los anteriormente mostrados, reduciendo notoriamente su coste computacional. Se simula de nuevo con una fuente sonora lineal y se resuelve con MUMPS usando un mallado extremadamente fino. Los datos computacionales de la simulación son los que figuran en la Tabla 3.

Tabla 3 – Detalles computacionales de la simulación del modelo ideal 2D.

	Con cristal	Sin cristal
Nº Elementos	3.000	2.200
Nº Grados de libertad	6.300	4.600
Tiempo de cálculo (s)	16	10
RAM consumida (GB)	8	8
Error Relativo [LinErr]	1E-13	1E-13

## 2.3. Modelo anecoico 3D

Este modelo supone un desafío para el hardware sobre el que se calcula, aunque debería proporcionar los mejores resultados y ser el más versátil de todos. Gracias al trabajo de optimización y configuración adecuada del resolutor de COMSOL, se ha conseguido que pueda ser calculado en un ordenador personal, sin necesidad de una estación de trabajo. En este modelo 3D se simula la cámara anecoica y el cristal de sonido a escala real; como en los casos anteriores, se utilizará una fuente lineal en emisión y las paredes con coeficientes de absorción de 0,90. Para conseguir que el hardware pudiese procesar el modelo, se tuvieron que realizar una serie de simplificaciones:

- Reducción de la profundidad de la cámara (eje Y).
- Uso del plano de simetría, de esta forma se consigue reducir a la mitad el dominio de cálculo.

- Optimización de la calidad del elemento, reduciendo el número de puntos en mallado.

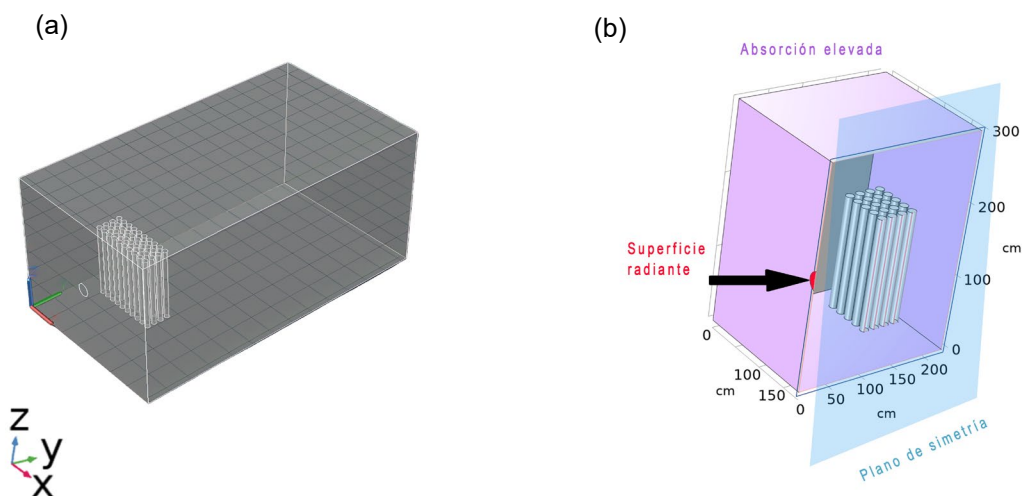


Figura 4 – (a) Modelo en AutoCAD de la geometría completa. (b) Detalle de la geometría y condiciones de contorno en COMSOL.

En la Figura 4(a), se representa el modelo anecoico 3D completo, diseñado en AutoCAD. A la derecha, en Figura 4(b), se presenta el modelo llevado a COMSOL con las simplificaciones comentadas. A continuación, en la figura 5, se expone la representación de resultados afectados por la simplificación de simetría.

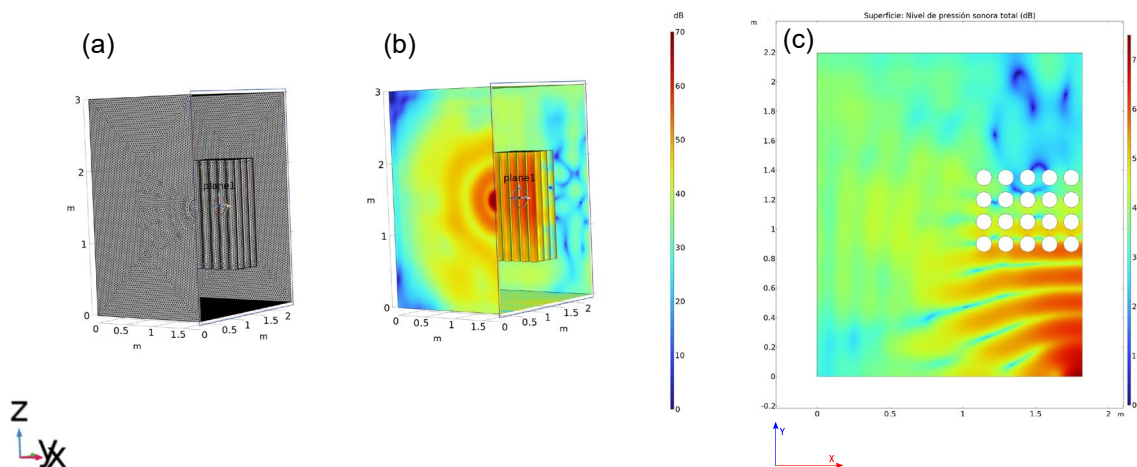


Figura 5 – (a) Detalle del mallado en COMSOL. (b) Mapa tridimensional de niveles de presión acústica a frecuencia Bragg. (c) Mapa de niveles de presión a frecuencia Bragg (1140 Hz) en un plano XY a la altura del centro de la superficie de emisión.

La Figura 5(a) representa el mallado utilizado para el cálculo del modelo. En las Figuras 5(b) y 5(c) se representan los niveles de presión sonora para la frecuencia Bragg (1140 Hz). El mapa de niveles de presión de la Figura 5(c) debería ser equivalente a la Figura 2(b) ya que se trata de un plano de corte a la altura del emisor, que es lo que se calcula en el modelo anecoico 2D. Uno de los puntos clave de este modelo es que, al ser a tamaño real y tridimensional, nos permite estudiar mejor la propagación acústica en el espacio, pudiendo por ejemplo ver si existen difracciones en los bordes del cristal o disponer de un mapa de presiones en las tres dimensiones del espacio, si se desea. Las características computacionales de este modelo son las que aparecen en la Tabla 4.

Tabla 4 – Detalles computacionales de la simulación del modelo anecoico 3D.

	Con cristal	Sin cristal
Nº Elementos	5.100.000	4.800.000
Nº Grados de libertad	6.700.000	6.500.000
Tiempo de cálculo (h)	28	18
RAM consumida (GB)	28 - 45	28 - 45
Error Relativo [LinErr]	1E-4 - 1E-6	1E-4 - 1E-6

#### 2.4. Modelo ideal 3D

El último modelo será un intento por obtener resultados similares al modelo 3D con un tiempo de computación varios órdenes de magnitud por debajo del que se ha conseguido en la simulación anterior. Así, se presenta un modelo que aporta las ventajas de ser tridimensional y de menor coste computacional. Se presenta una generalización del modelo ideal 2D pasado a las tres dimensiones. Como se puede ver en la Figura 6(b), la fuente se modeliza como un pistón circular, y las condiciones de contorno serán de periodicidad en los planos adyacentes a los dispersores, para que de forma práctica el modelo se comporte como una matriz infinita de dispersores infinitamente largos.

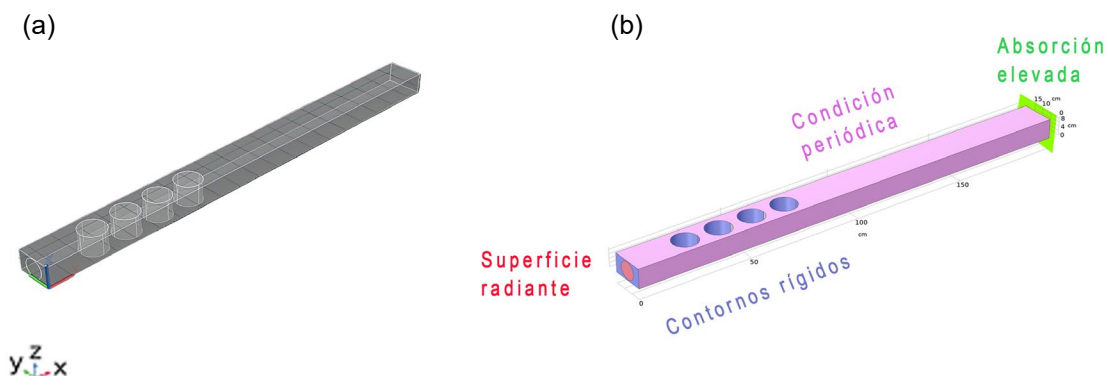


Figura 6 – (a) Detalle de la geometría en AutoCAD. (b) Geometría en COMSOL con condiciones de contorno.

Este modelo se calcula mediante el uso de un mallado extremadamente fino y resolvidor directo MUMPS.

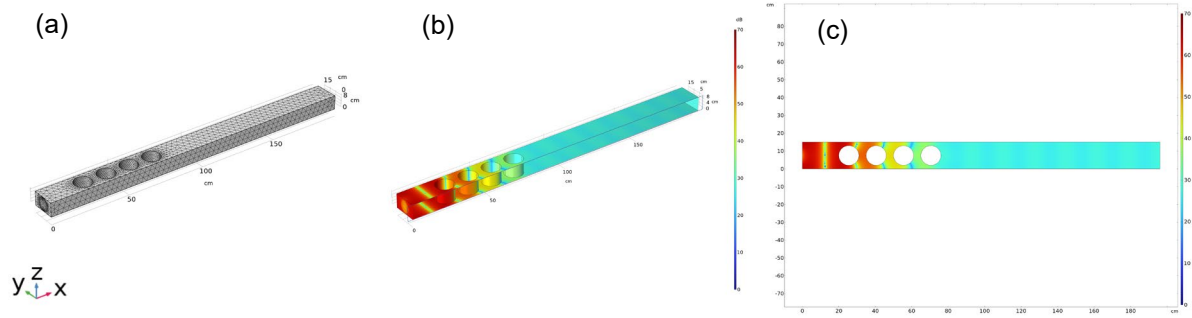


Figura 7 – (a) Detalle del mallado en COMSOL. (b) Mapa de nivel de presión 3D a 1140 Hz. (c) Mapa de nivel de presión a 1140 Hz en un corte en plano XY a la altura del centro de la superficie de emisión.

La Figura 7(a) representa el mallado utilizado para el cálculo del modelo. En las Figuras 7(b) y 7(c) se representan los niveles de presión sonora para la frecuencia Bragg (1140 Hz). El mapa de niveles de presión de la Figura 7(c) debería ser equivalente al de la Figura 3(b) ya que se trata de un plano de corte a la altura del emisor, que es lo que se calcula en el modelo ideal 2D. El coste computacional de este nuevo modelo puede consultarse en la Tabla 5.

Tabla 5 - Detalles computacionales de la simulación del modelo ideal 3D.

	Con cristal	Sin cristal
Nº Elementos	25.000	11.000
Nº Grados de libertad	40.000	16.000
Tiempo de cálculo (s)	175	73
RAM consumida (GB)	8	8
Error Relativo [LinErr]	1E-13	1E-13

### 3. COMPARATIVA ENTRE MODELOS Y MEDIDAS EN CONDICIONES CONTROLADAS

Para evaluar la calidad de las diferentes simulaciones presentadas se comparan los resultados del espectro de las pérdidas por inserción con los resultados experimentales medidos en cámara anecoica con el modelo de idénticas características a las simuladas, en cuanto a diámetro de dispersores y colocación geométrica en red.

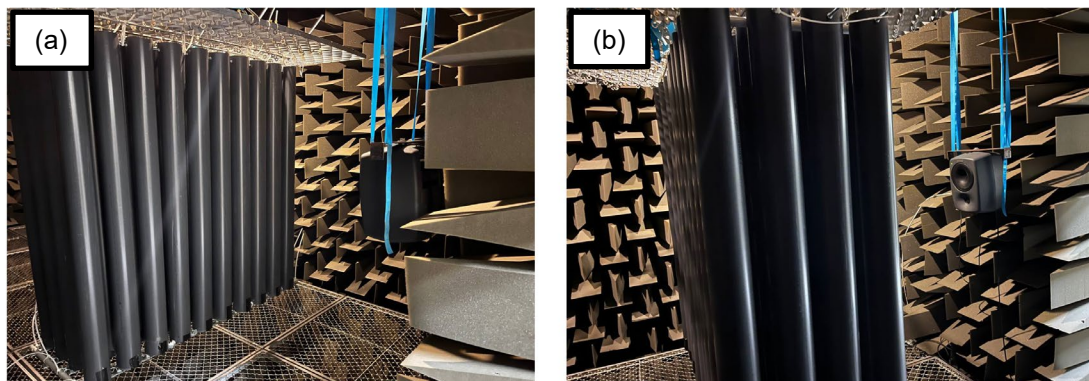


Figura 8 – (a) Vista frontal del cristal de sonido real en cámara anecoica. (b) Vista lateral.

Para realizar las medidas en condiciones controladas se ha utilizado el robot de medida 3DReAMS [6] con un micrófono situado a la altura de la mitad del cono del altavoz y centrado en el punto central relacionado con la altura de los dispersores y a 20 cm de la superficie del último dispersor del cristal. En las simulaciones, se ha obtenido el nivel de presión sonora con y sin cristal en el mismo punto comentado en el montaje experimental. A continuación, en la Figura 9, se exponen los resultados que comparan la medida experimental con los modelos de estudio presentados.

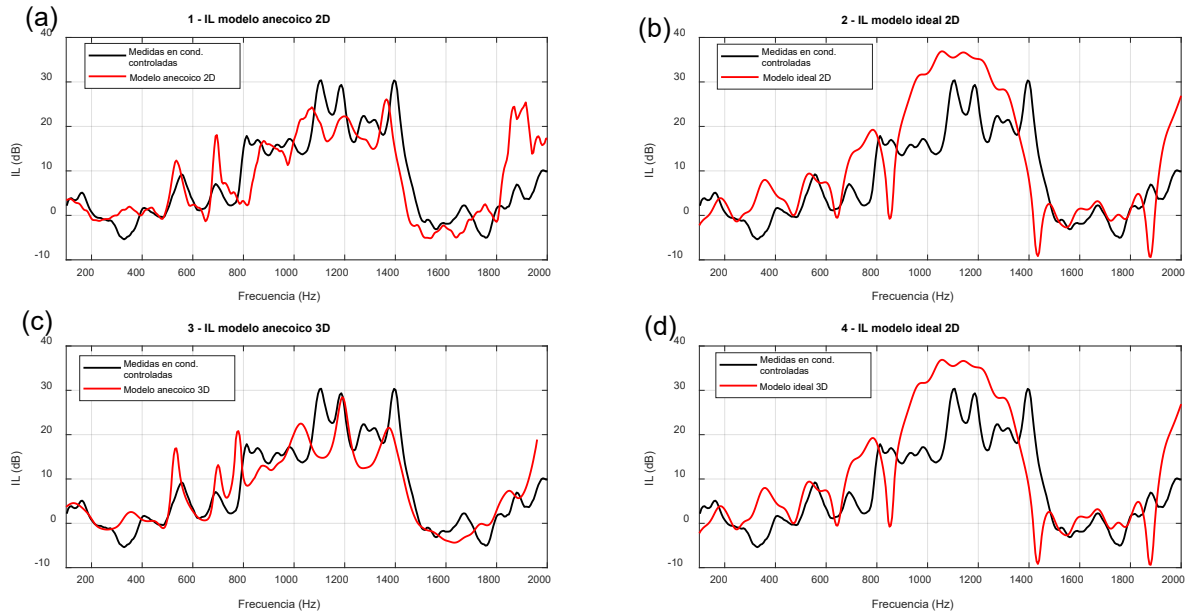


Figura 9 – Comparación entre las medidas obtenidas en condiciones controladas y: (a) IL para el modelo anecoico 2D. (b) IL para el modelo ideal 2D. (c) IL para el modelo anecoico 3D. (d) IL para el modelo ideal 3D.

En lo referente al análisis de resultados, desde el punto de vista del ajuste entre simulación/medida experimental se puede decir que ambos modelos anecoicos [Figuras 9(a) y 9(c)] son acordes a las medidas en cámara anecoica. El *band gap* que cubre el cristal se ajusta algo mejor al modelo 3D anecoico que al 2D anecoico y en las frecuencias mas altas parece que el modelo 3D proporciona mejores resultados. Los modelos ideales presentan prácticamente la misma curva en 2D y 3D, con un *band gap* cuya forma se corresponde mas con lo que suele encontrarse en los modelos teóricos de la literatura [7] (en los cuales hay banda de atenuación con forma de campana quasi-perfecta acompañada de lóbulos antes y después). Sin embargo, la frecuencia central del *band gap* y su ancho de banda se ajustan bien a la realidad y a los demás modelos. Estos modelos ideales de bajo coste computacional pueden ser útiles para visualizar como sería el *band gap* que cubre el cristal a estudiar, no obstante, es preferible hacer uso de los modelos reales ya que como se ha visto se ajustan mejor a la realidad. El modelo anecoico 3D optimizado, aunque computacionalmente mas intenso que los demás, permite un estudio en profundidad de la propagación acústica tras el cristal al poder medir los niveles en un espacio tridimensional.

En lo referente al análisis de requerimientos computacionales, las diferencias principales entre los diferentes modelos pueden verse en la Tabla 6.



Tabla 6 – Comparativa entre principales métricas computacionales.

	Modelo anecoico 2D	Modelo ideal 2D	Modelo anecoico 3D	Modelo ideal 3D
Grados de libertad totales resueltos	245.000	10.900	13.200.000	56.000
Tiempo de cálculo total (s)	520	26	165.600	248
RAM máxima consumida (GB)	10	8	45	8

El modelo anecoico 3D, incluso habiendo sido optimizado para calcularse en un ordenador personal, tarda 318 veces más en finalizar el cálculo que su homólogo 2D, aunque también tiene 53 veces más grados de libertad totales a resolver, además el tiempo de cálculo y los grados de libertad no están relacionados linealmente (de ser así el modelo 3D habría tardado 53 veces más en calcularse). Cabe destacar que, dado el tamaño del modelo 3D y los requerimientos de memoria que necesitaría un resolvidor directo como MUMPS (al menos 128GB de RAM) se ha utilizado el resolvidor iterativo GMRES usando precondicionado multimalla. Al usar un resolvidor iterativo en lugar de uno directo el error es algo mayor al de los métodos directos. También es un método que a medida que las iteraciones aumentan se hace cada vez más lento por solución frecuencial. A falta de un servidor de cálculo realmente potente (con un mínimo 64 hilos y 256GB de memoria RAM) es la opción que se ha decidido realizar para poder calcular la solución. De usar un resolvidor lineal directo como MUMPS o PARDISO, se entraría en modo fuera de núcleo a los pocos minutos de empezar a calcular y eso resultaría perjudicial para el ordenador (porque utilizaría más RAM de que tiene, forzando a usar el disco duro de estado sólido como RAM adicional durante el cálculo, y esto a larga reducirá considerablemente la vida útil del disco duro).

Los modelos ideales son los que más rápido se han calculado y los que menos recursos (RAM) consumen en comparación a los anecoicos.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se han estudiado dos tipos de modelos que se pueden utilizar para la predicción del comportamiento acústico de una pantalla basada en cristales de sonido: los anecoicos y los ideales. Se ha propuesto un modelo ideal 3D computacionalmente ligero con el que poder estudiar los efectos de estas barreras y otro modelo 3D optimizado que permite su estudio en detalle y puede ser resuelto por un ordenador personal. Asimismo, se han comparado los resultados numéricos con medidas en condiciones controladas y se ha visto que todos los métodos empleados se asemejan, al menos en el ancho del *band gap* y en la frecuencia Bragg. Las simulaciones de los modelos ideales, especialmente el tridimensional, permiten caracterizar el cristal y estudiar su comportamiento en el espacio de forma aproximada y rápida, aunque los resultados de pérdidas por inserción que predicen son claramente superiores a los reales. Sin embargo, el modelo anecoico 3D, además de ajustarse muy bien las medidas en condiciones controladas, permite explorar rangos de frecuencia alejados de la frecuencia Bragg y regiones del espacio tridimensional, más allá de lo que un modelo anecoico 2D proporciona. Al tratarse de un modelo optimizado pensado para ser resuelto en un ordenador persona, no se requiere el uso de estaciones de cálculo o *server farms* para su resolución.

## REFERENCIAS

- [1] Maekawa, Z. (1968, julio). Noise reduction by screens. *Applied Acoustics*, 1(3), 157-173. [https://doi.org/10.1016/0003-682x\(68\)90020-0](https://doi.org/10.1016/0003-682x(68)90020-0)
- [2] Martínez-Sala, R., Sancho, J., Sánchez, J. V., Gómez, V., Llinares, J. & Meseguer, F. (1995, noviembre). Sound attenuation by sculpture. *Nature*, 378(6554), 241-241. <https://doi.org/10.1038/378241a0>
- [3] Sigalas, M. M. & Economou, E. N. (1996, 1 noviembre). Attenuation of multiple-scattered sound. *Europhysics Letters (EPL)*, 36(4), 241-246. <https://doi.org/10.1209/epl/i1996-00216-4>
- [4] COMSOL AB, Stockholm, Sweden. (2022). COMSOL Multiphysics® (6.0) [Software]. <https://www.comsol.com>
- [5] Makarewicz, R. & Sato, Y. (1996). Representative spectrum of road traffic noise. *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)*, 17(5), 249-254. <https://doi.org/10.1250/ast.17.249>
- [6] Rubio, C., Castiñeira-Ibáñez, S., Sánchez-Pérez, J.V., Romero-García, V., García-Raffi, L.M. (2011). Sistema de adquisición de datos de alta precisión para el rango audible en condiciones controladas: 3DReAMS. Tecniacústica 2011.
- [7] Gupta, A. (2014, marzo). A review on sonic crystal, its applications and numerical analysis techniques. *Acoustical Physics*, 60(2), 231-232. <https://doi.org/10.1134/s1063771014020080>