



TENDENCIAS EN EL USO DE METAMATERIALES EN ACÚSTICA APLICADA: EJEMPLOS EN ACÚSTICA DE EDIFICIOS, ACÚSTICA DE SALAS Y ELECTROACÚSTICA

Vicente Cutanda Henríquez^{1}*

¹Technical University of Denmark
Centre for Acoustic-Mechanical Micro Systems (CAMM)
Ørstedes Plads, Building 352, 2800 Kgs. Lyngby, Dinamarca

RESUMEN

Los metamateriales acústicos son estructuras que presentan propiedades y comportamientos que no se pueden realizar con materiales ordinarios. Estas propiedades se deben a la complejidad interna con la que están diseñados. En muchos casos están inspirados en metamateriales ópticos o electromagnéticos, reemplazando la luz o las ondas electromagnéticas por sonido. Los metamateriales acústicos han sido estudiados desde el punto de vista de la física teórica durante más de dos décadas y esta sigue siendo la tendencia dominante en la literatura. Las aplicaciones prácticas de los mismos están cobrando importancia, aunque en su mayoría están por desarrollar. Sin embargo, a menudo el metamaterial es desarrollado primero y luego justificado con aplicaciones ad-hoc, en lugar de motivarse por un problema acústico real. Esta comunicación presenta una selección de trabajos previos en los campos de acústica de edificios, acústica de salas y electroacústica. Estos ejemplos sirven de motivación para una discusión sobre las tendencias futuras de la acústica aplicada con metamateriales.

ABSTRACT

Acoustic metamaterials are structures that display properties and behaviors not found in ordinary materials. Such properties are the result of the internal complexity they are designed with. Very often, such designs are inspired by optical or electromagnetic metamaterial counterparts, by replacing light or other electromagnetic waves by sound. Acoustic metamaterials have been studied from the point of view of theoretical physics for more than two decades, and this approach is still dominant in the literature. Practical applications are gaining ground, but there is still a lot of work ahead in this direction. More often than not, the acoustic

metamaterial is developed first and ad hoc practical applications are proposed afterwards to justify it, rather than taking a real acoustic application as the starting point. This communication presents a selection of previous work in the fields of building acoustics, room acoustics and electroacoustics. These examples are used as the background for a discussion about the future trends in applied acoustics using metamaterials.

Palabras Clave—Metamateriales acústicos, acústica de edificios, acústica de salas, electroacústica.

1. INTRODUCCIÓN

Durante más de veinte años, los metamateriales acústicos han sido objeto de atención en la literatura científica. De forma general, nos referimos aquí a un amplio grupo de estructuras que incluyen cristales fonónicos, metamateriales basados en ondas acústicas en fluidos (aire, agua) y metamateriales donde ondas mecánicas viajan por un material sólido, así como combinaciones de todos ellos. Se trata de un campo en rápida evolución que ha venido generando una gran cantidad de publicaciones.

En esta comunicación no entraremos a clasificar y explicar los principales desarrollos en este campo, que se pueden consultar en excelentes artículos recopilatorios [1-3]. Utilizaremos algunos desarrollos, algunos realizados en la Universidad Técnica de Dinamarca, para motivar una discusión acerca del posible rumbo futuro de la ciencia y la ingeniería de los metamateriales acústicos. Estos ejemplos representan en nuestra opinión la aplicación de los metamateriales a problemas bien definidos y conocidos en ingeniería acústica.

* *Autor de contacto:* vcuhe@dtu.dk

Copyright: ©2023 Vicente Cutanda Henríquez. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

2. EJEMPLOS DE METAMATERIALES APLICADOS

2.1. Metamaterial para aislamiento acústico

En una serie de artículos y comunicaciones, Vázquez Torre y colegas han propuesto soluciones al problema de la transmisión de sonido a través de particiones en edificios [4,5]. Las investigaciones se originan en las bien conocidas limitaciones de los paneles usados en la construcción: 1) están sujetos a la ley de masa, que dicta un pobre aislamiento a bajas frecuencias y 2) existe un rango de frecuencias alrededor de la llamada frecuencia de coincidencia en el que el aislamiento se degrada debido a que hay un acoplamiento de las ondas acústicas y mecánicas en el aire y en el panel.

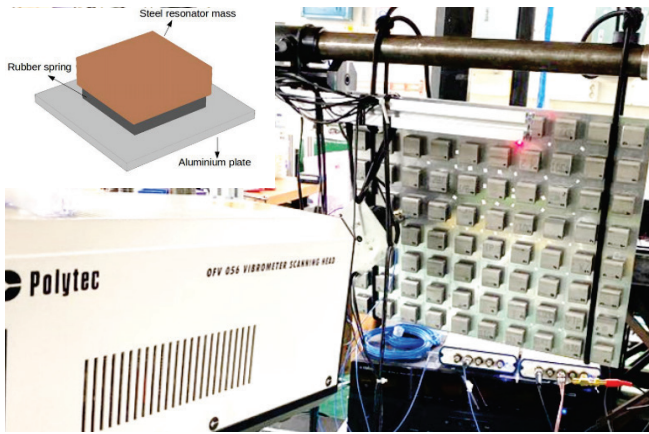


Figura 1. Un montaje experimental con un panel de aluminio incorporando resonadores mecánicos (figura insertada).

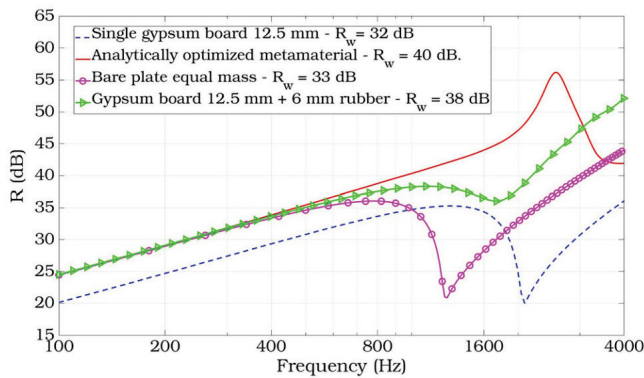


Figura 2. Pérdidas de inserción de un panel optimizado con resonadores y un panel simple de la misma masa total. La técnica convencional con goma también se muestra.

Las soluciones propuestas, especialmente para el caso de la coincidencia, emplean:

- Resonadores mecánicos unidos al panel consistentes en una masa unida mediante un elemento elástico (Fig. 1). Estos resonadores, adecuadamente

diseñados, pueden crear una banda de frecuencia en la que las ondas de flexión son atenuadas (band gap).

- Modelos híbridos numéricos y analíticos para reducir el cálculo a un tamaño y duración manejables.
- Técnicas de optimización basadas en algoritmos genéticos, y basadas en gradiente.
- Verificación mediante mediciones y simulaciones detalladas.

El método que parece más obvio para atacar el problema de la coincidencia puede ser adaptar el metamaterial para que produzca un band gap en la zona problemática. Sin embargo, los resultados muestran que el metamaterial reduce la transmisión a ciertas frecuencias y la aumenta en otras, por lo que no se logra fácilmente una mejora global. La solución adoptada finalmente consiste en maximizar el parámetro R_w definido en el estándar ISO 717. Este parámetro proporciona una estimación del comportamiento de un panel en un único resultado. Los resultados se pueden ver en la Fig. 2.

2.2. Metamaterial absorbente a múltiples ángulos

Una de las aplicaciones que más se utilizan para justificar y demostrar nuevos metamateriales acústicos es la absorción de ondas sonoras. Citamos como ejemplo el artículo seminal de Jiménez y colegas sobre la utilización de un conjunto de resonadores de Helmholtz convenientemente sintonizados para cubrir un ancho de banda mayor [6]. En la mayoría de los casos esta absorción se optimiza para una incidencia normal al metamaterial. La investigación llevada a cabo por Garza Agudelo y colegas estudia y propone soluciones para una situación real en acústica de salas: a menudo las ondas sonoras llegan al material absorbente a distintos ángulos, incluso rasantes, o bien el campo se puede asimilar como difuso [7,8]. Garza Agudelo parte de un metamaterial basado en resonadores de Helmholtz y coloca una estructura basada en cilindros frente al mismo (Fig. 3).

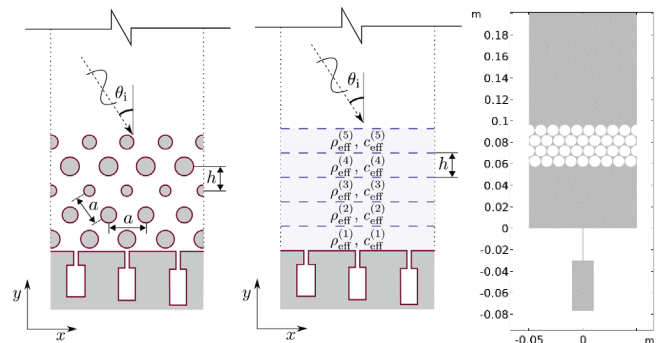


Figura 3. Metamaterial bidimensional basado en resonadores de Helmholtz con varias capas de cilindros añadidas (izquierda); versión equivalente con capas homogeneizadas (centro); Resultado optimizado para un solo tipo de resonador (derecha).

Las capas de cilindros y los resonadores se someten a un proceso de optimización para adaptarlos a un rango de frecuencias y de ángulos de incidencia definido. Para facilitar el cálculo, se utiliza un modelo basado en el método de matrices de transmisión (TMM), que es unidimensional. El resultado es validado tanto numéricamente como experimentalmente.

La estructura optimizada consiste en una capa de cilindros sobre una zona libre de ellos. Los resultados demuestran una absorción que se mantiene alta para ángulos de incidencia que casi llegan hasta la incidencia rasante (Fig. 4).

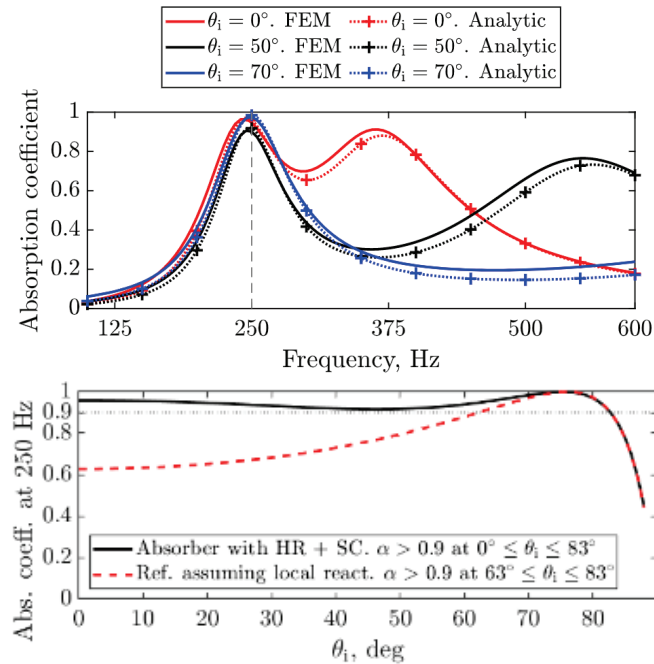


Figura 4. Comportamiento según la frecuencia (arriba) y el ángulo de incidencia (abajo) del metamaterial optimizado para un solo tipo de resonador.

La optimización se ha realizado también para un metamaterial conteniendo varios tipos de resonadores de Helmholtz, diseñados para cubrir un rango más amplio de frecuencia al estilo de la referencia [6]. Los resultados se muestran en la Fig. 5.

2.3. Metamaterial empleado en una unidad de altavoz

En esta sección describimos brevemente la aplicación de un metamaterial acústico al diseño de una unidad de altavoz por parte de Degraeve y Oclew-Brown [9]. Este diseño fue aplicado a un producto de la empresa de altavoces KEF.

La motivación surge del hecho de que las unidades de altavoz montadas en cajas radian sonido tanto al exterior como al interior. La radiación interior solamente puede ser

útil cuando se usa para reforzar las bajas frecuencias mediante una abertura o puerto. A frecuencias más altas, produce el indeseable efecto de crear resonancias en el interior de la caja. Tradicionalmente se introduce un material absorbente en el interior para amortiguar estas resonancias internas.

La idea propuesta en [9] consiste en absorber esta radiación trasera utilizando un metamaterial del tipo multiresonador. Los resonadores están construidos como tubos de distintas longitudes doblados y compactados para ocupar poco espacio. Esta es una idea tomada de la literatura de metamateriales. Se puede obtener información adicional (descripciones y videos) de la página web de la empresa KEF: <https://us.kef.com/pages/metamaterial>.

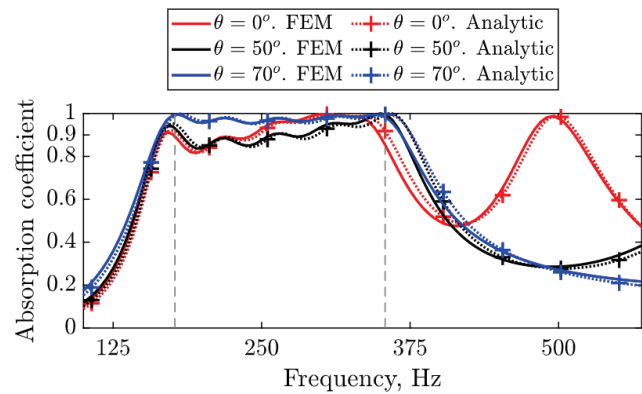


Figura 5. Comportamiento según la frecuencia del metamaterial optimizado con varios tipos de resonadores.

3. TENDENCIAS EN METAMATERIALES

La investigación en metamateriales acústicos ha estado dominada durante años por los descubrimientos acerca de los principios físicos que los gobiernan [1,2]. Se trata de ciencia básica más que aplicada. Se han descrito efectos sorprendentes que a menudo recuerdan otros análogos observados en óptica o ondas electromagnéticas en general, donde tienen lugar a una escala mucho menor. A menudo se alude a posibles futuras aplicaciones de estos descubrimientos sin demasiada concreción.

En los últimos años, sin embargo, hay una corriente creciente hacia diseños acústicos motivados por problemas concretos en ingeniería. Esta tendencia se ve en investigaciones más recientes como los tres ejemplos resumidos en este artículo y en artículos recopilatorios como [3], donde se hace más énfasis en las aplicaciones. Otros signos apuntan en esta dirección: en el reciente congreso *Phononics 2023* celebrado en Manchester, que es un congreso dominado por la física teórica, se decidió dar más énfasis a las aplicaciones en próximas ediciones.

La impresión del autor de este artículo es que la ciencia de metamateriales está entrando en una fase de madurez. Los

conceptos físicos están llegando a las mesas de trabajo de ingenieros y desarrolladores y dando lugar a productos que solucionan problemas. Todos debemos contribuir a que esta tendencia continúe.

4. CONCLUSIONES

Esta comunicación describe brevemente tres ejemplos de desarrollos que utilizan metamateriales acústicos y que están motivados por una aplicación acústica concreta. Existen muchos otros ejemplos. El autor postula que demuestran que existe una tendencia a investigaciones motivadas por casos reales en acústica y que ahora disponen de un cuerpo de teoría suficientemente sólido para generar resultados útiles.

5. REFERENCIAS

- [1] M. R. Haberman, M. D. Guild, Acoustic metamaterials. *Physics Today*, 69(6), 42–48 (2016). <https://doi.org/10.1063/PT.3.3198>.
- [2] S. A. Cummer, J. Christensen, A. Alù, Controlling sound with acoustic metamaterials. *Nature Reviews. Materials*, 1(3), 16001 (2016). <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2016.1>.
- [3] J. Zhang, B. Hu, S. Wang, “Review and perspective on acoustic metamaterials: From fundamentals to applications”, *Applied Physics Letters*, 123(1), 010502 (2023). <https://doi.org/10.1063/5.0152099>.
- [4] J. H. Vazquez Torre, J. Brunskog, V. Cutanda Henriquez, V., “An analytical model for broadband sound transmission loss of a finite single leaf wall using a metamaterial”, *Journal of the Acoustical Society of America*, 147(3), 1697–1708 (2020). <https://doi.org/10.1121/10.0000923>.
- [5] J. H. Vazquez Torre, J. Brunskog, V. Cutanda Henriquez, J. Jung, “Hybrid analytical-numerical optimization design methodology of acoustic metamaterials for sound insulation”, *Journal of the Acoustical Society of America*, 149(6), 4398–4409 (2021). <https://doi.org/10.1121/10.0005316>.
- [6] N. Jiménez, V. Romero-García, V. Pagneux, J.-P. Groby, “Rainbow-Trapping Absorbers: Broadband, Perfect and Asymmetric Sound Absorption by Subwavelength Panels for Transmission Problems”, *Scientific Reports* 7 (2017) 13595, <https://doi.org/10.1038/s41598-017-13706-4>.
- [7] D. M. Garza-Agudelo, V. Cutanda Henriquez, C. H. Jeong, P. R. Andersen, “Characterization and optimization of the angle dependent acoustic absorption of 2D infinite periodic surfaces of helmholtz resonators”, *Journal of Theoretical and Computational Acoustics* (2023). <https://doi.org/10.1142/S2591728522500104>.
- [8] D. M. Garza-Agudelo, V. Cutanda Henriquez, C. H. Jeong, P. R. Andersen, M. Ibarias, “Extending the angle range of high absorption of metasurfaces by adding a multilayered medium”, *Proceedings of the 24th International Congress of Acoustics*, 24th - 28th October 2022, GyeonGju (Korea).
- [9] S. Degraeve, J. Oclec-Brown, “Metamaterial Absorber for Loudspeaker Enclosures”, 148th Convention of the Audio Engineering Society, Convention Paper 10341, 2nd-5th June 2020.
- [10] V. Cutanda Henriquez, J. Sánchez-Dehesa, “Viscothermal Effects in a Two-Dimensional Acoustic Black Hole: a Boundary Element Approach”, *Phys. Rev. Applied* 15 (2021) 064057. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevApplied.15.064057>.
- [11] V. Cutanda Henriquez, V.M. Garcia-Chocano, J. Sánchez-Dehesa, “Viscothermal losses in double-negative acoustic metamaterials”, *Phys. Rev. Appl.* 8 (2017) 014029, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevApplied.8.014029>, <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevApplied.8.014029>.