

Metamateriales para uso en Aislamiento Acústico: Estado del Arte

Liseth Johana Ferreira Rojas

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniera Civil

Director

Oscar Javier Begambre Carrillo

PhD en Ingeniería Civil

Codirectores

Ricardo Alfredo Cruz Hernández

PhD en Ciencias Técnicas

Sergio Ruiz Martínez

Ingeniero Civil

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físico – Mecánicas
Escuela de Ingeniería Civil
Bucaramanga
2020

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado primeramente a Dios y mis padres Alberto Ferreira Useche y Gloria Raquel Rojas, principales motores y soportes que me ayudaron a mantenerme firme en cada paso dado. A mis sobrinos Natalia, Andrés, Dana, Shareth y Valentina, y a toda mi familia en general por ser uno de los motivos para seguir adelante en cada momento de dificultad. De manera muy especial a Richard José Niño Martínez y su familia por ser un apoyo incondicional en cada momento de mi vida y carrera profesional.

Agradecimientos

En primera instancia quiero agradecer a Dios por permitirme llegar a cada logro en mi proceso como profesional y darme las fuerzas necesarias para seguir luchando por cada objetivo propuesto en mi vida. Agradezco a los docentes Oscar Javier Begambre Carrillo, Ricardo Alfredo Cruz Hernández y al ingeniero Sergio Ruiz Martínez por todo su apoyo, coordinación y enseñanza aportado para el desarrollo de esta investigación. A la escuela de Ingeniería Civil y todo su cuerpo de docentes por guiarme y contribuir en el proceso de formación profesional. Al docente Álvaro Viviescas Jaimes por haberme brindado la oportunidad de crecer como profesional en mi experiencia como auxiliar. A la profesional Nury Salcedo Díaz por todo su apoyo y ayuda brindada a lo largo de mi carrera. A la Universidad Industrial de Santander por ser el alma máter de mi proceso y haberme ayudado a crecer tanto en lo personal y profesional. A mis padres por todo el apoyo incondicional brindado en toda mi carrera, por impulsarme a seguir creciendo como persona, profesional y cumplir cada meta propuesta.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	11
1. Objetivos.....	15
1.1 objetivo genera.....	15
1.2 objetivos específicos	15
2. Marco teórico y referencial.....	16
2.1 Marco teórico.....	16
2.1.1 Metamateriales.....	16
2.1.2 Aislamiento acústico.....	18
2.1.2.1 Coeficiente de absorción.....	18
2.1.2.2 Refracción y reflexión.....	19
2.1.3 Impedancia de un material.....	20
2.1.4 Ancho de banda.....	20
2.1.5 Banda prohibida.....	21
2.1.6 Índice de refracción negativo y doble negatividad	21
2.1.7 Cristales sónicos y fonónicos.....	22
3. Introducción a los metamateriales acústicos (MMA).....	22
3.1 Metamateriales acústicos pasivos	24
3.1.1 MMA localmente resonantes	24
3.1.2 MMA no resonantes.....	26
3.2 Metamateriales acústicos activos.....	28

3.2.1 MMA no hermitianos.....	28
3.2.2 MMA con sesgo externo.....	28
4. Aplicaciones de los MMA.....	29
5. Diseño y técnicas de fabricación de los (MMA).....	37
6. Algunos ensayos y resultados obtenidos de los (MMA).....	44
7. Aportes más importantes en el estudio de los MMA.....	52
8. Propuesta de clasificación de los metamateriales.....	56
9. Conclusiones.....	61
Referencias bibliográficas.....	64

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Ventajas y Desventajas de los Metamateriales Acústicos pasivos	59
Tabla 2. Ventajas y Desventajas de los Metamateriales Acústicos activos.....	60

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Parámetros constitutivos de los metamateriales acústicos	14
Figura 2. Prototipo de MMC.....	17
Figura 3. Distintos diseños de MMA localmente resonantes	27
Figura 4. Tipos de metamateriales acústicos 3D	29
Figura 5. Esquema de simulación sísmica	31
Figura 6. Geometrías utilizadas para los modelos	35
Figura 7. Diseño para ensayo.....	36
Figura 8. Modelo con varillas piezoeléctricas cilíndricas incrustadas en un fondo de aire.....	38
Figura 9. Modelos de diseño del metamaterial	40
Figura 10. Montaje de ensayo del MMA tipo membrana con sistema de preestiramiento.....	41
Figura 11. Diseño de MMA con simetría biaxial	42
Figura 12. Esquema del sistema del MMA.....	43
Figura 13. Esquema simplificado del sistema del MMA.....	43
Figura 14. Esquema de relación de dispersión con fracciones de llenado de 0,64 y 0,52, respectivamente.....	45
Figura 15. Montaje experimental para la propagación de ondas longitudinales en el sistema de viga del Metamaterial	46
Figura 16. Muestras con distintas medidas en parámetros geométricos	46
Figura 17. representa el radio de sección del resonador	47
Figura 18. Ensayo de Compresión de las muestras del MMA.....	48

Figura 19. Anchos de banda resultados de los ensayos	49
Figura 20. Montaje experimental del tubo de impedancia y foto del Metamaterial	50
Figura 21. Montaje del ensayo en cámara reverberante	51
Figura 22. Esquemas del Metamaterial virtualizado.....	54
Figura 23. Muestra fabricada para pruebas diseñadas con renderizados	55
Figura 24. Estructuras impresas con sistema en 3D	56
Figura 25. Esquema de clasificación de los Metamateriales Acústicos.....	57
Figura 26. Esquema de generalidades de lo Metamateriales Acústicos	58

Resumen

Título: Metamateriales para uso en Aislamiento Acústico: Estado del Arte *

Autor: Liseth Johana Ferreira Rojas **

Palabras Clave: Metamateriales, Acústica, Filtros, Aislamiento acústico, Propagación, Vibraciones, Absorción, Bandas Prohibidas.

Descripción: Los metamateriales acústicos (MMA) se destacan por tener propiedades acústicas mejoradas con relación a los materiales convencionales en aspectos como la propagación y manipulación del sonido. Los MMA tienen aplicaciones como filtros y reducción de vibraciones y ruido a bajas frecuencias específicas (30 [Hz] a 300 [Hz]), lo que conduce a futuros usos en la ingeniería civil como aislamientos de edificaciones residenciales, comerciales o educativas que necesitan de un control del ruido o vibraciones acústicas a las que están expuestas. En el presente estado del arte se desarrolló una revisión bibliográfica de los metamateriales para uso en aislamiento acústico con base a un procedimiento de selección de la bibliografía analizando distintos aspectos como propuestas de diseño y fabricación de un MMA, aportes de interés a futuras investigaciones y conceptos importantes al presente estudio consiguiendo como referencia 36 artículos relacionados con el tema, de esta manera, se abordan temas como clasificaciones, diseños, propiedades, técnicas de fabricación, tipo de ensayo, resultados obtenidos, aplicaciones y algunos principios en los que se basa cada MMA. De acuerdo a toda la información revisada en los artículos seleccionados se encontró que en el futuro este tipo de materiales tendrían un posible impacto en aplicaciones dentro de la ingeniería civil dado los múltiples beneficios que pueden brindar como la presencia de altos niveles de absorción, amplios espacios de bandas prohibidas las cuales representan rangos de frecuencia donde las ondas no pueden pasar, altos picos en las pérdidas de transmisión del sonido, y la mitigación de vibraciones acústicas, haciéndolo aún más factible por su modo de fabricación implicando mejoras en los procesos constructivos.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Oscar Javier Begambre Carrillo. Doctor en Ingeniería Civil. Codirectores: Ricardo Alfredo Cruz Hernández. Doctor en Ciencias Técnicas. Sergio Ruiz Martínez. Ingeniero Civil.

Abstract

Title: Metamaterials for use in Acoustic Insulation: State of the Art*

Author: Liseth Johana Ferreira Rojas**

Key Words: Metamaterials, Acoustics, Filters, Acoustic Insulation, Propagation, Vibrations, Absorption, Forbidden Bands.

Description: Acoustic metamaterials (MMA) stand out for having improved acoustic properties in relation to conventional materials in aspects such as sound propagation and manipulation. The MMA have applications such as filters and vibration and noise reduction at specific low frequencies (30 [Hz] to 300 [Hz]), leading to future uses in civil engineering such as insulation of residential buildings, commercial or educational activities that require control of the noise or acoustic vibrations to which they are exposed. In the present state of the art, a bibliographic review of the metamaterials for use in acoustic insulation was developed based on a bibliography selection procedure analyzing different aspects such as proposals for the design and manufacture of an MMA, contributions of interest to future research and important concepts in this study, making reference to 36 articles related to the topic, thus addressing topics such as classifications, designs, properties, manufacturing techniques, type of test, results obtained, applications and some principles on which each MMA is based. According to all the information reviewed in the selected articles it was found that in the future this type of materials would have a possible impact on applications within civil engineering given the multiple benefits they can provide such as the presence of high levels absorption, wide areas of prohibited bands which represent frequency ranges where waves cannot pass, high peaks in sound transmission losses, and the mitigation of acoustic vibrations, making it even more feasible by its manufacturing method involving improvements in the construction processes.

* Degree Work

**Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Oscar Javier Begambre Carrillo. Doctor en Ingeniería Civil. Co-directors: Ricardo Alfredo Cruz Hernández. Doctor en Ciencias Técnicas. Sergio Ruiz Martínez. Civil Engineer.

Introducción

En el campo del estudio clásico de los materiales se han empleado aquellos que presentan ciertas propiedades (mecánicas, químicas, eléctricas, entre otros) de forma natural y que se pueden clasificar funcionalmente como: estructurales; materiales inteligentes; materiales ópticos; materiales magnéticos; tecnología energética y ambiental; materiales electrónicos; biomédicos y aeroespaciales (Askeland & Wright, 2017). No obstante, en la búsqueda constante de nuevos materiales ha surgido un nuevo enfoque, que consiste en obtener nuevos materiales que presenten propiedades diferentes de las propiedades naturales, dando así paso a los metamateriales, también llamados inicialmente materiales “artificiales”, cuya característica principal es la definición previa de la propiedad deseada y la obtención de esta propiedad mediante la manipulación directa de su arquitectura o geometría a niveles macro y meso, en lugar de variar su composición química (S. Zhu & Zhang, 2018). En un inicio estos materiales se dieron a conocer en el campo de la óptica y la fotónica, siendo los primeros estudios reportados por Jagadis Chunder Bose en 1898 a finales del siglo XIX cuando llevó a cabo el primer experimento de microondas sobre estructuras retorcidas con formas cilíndricas, con este avance también nacen las particularidades de configuraciones geométricas que son comunes en el diseño de un metamaterial, como por ejemplo los metamateriales acústico con diseño tipo laberinto normalmente presentan formas en espiral pensados para ralentizar las ondas de sonido y poder lograr altos índices de refracción (Zangeneh-Nejad & Fleury, 2019). A raíz de ello se empezaron a trabajar distintos medios artificiales como lo fue el caso de Winston E. Kock en 1948 el cual fabricó lentes de microondas ligeras organizando esferas, discos y tiras de conducción de forma periódica y efectiva adaptando el índice de refracción efectivo de los medios mencionados, entendiendo el índice de refracción como la

relación entre la velocidad de la onda en el medio del que viene y su velocidad en un medio de referencia (Zilkowski & Engheta, 2006). Desde entonces, los metamateriales han ido desarrollándose en distintos campos de investigación incluyendo nuevos conceptos en síntesis y nuevas técnicas de fabricación que logran sustituir y mejorar propiedades que no se producen ni se pueden encontrar fácilmente en la naturaleza.

Luego de los primeros hallazgos, mencionados anteriormente, empezaron a conocerse metamateriales de distintas tipologías y funcionalidades, de los cuales los más destacados han sido los llamados metamateriales con índices de refracción negativos, más conocidos como Negative Index Metamaterials (NIMs) o Left Handed Materials (LHMs), propuestos por primera vez por el físico Victor Veselago en 1968, dando paso a los cristales fotónicos y metamateriales de línea de transmisión para diferentes longitudes de ondas, frecuencias de radio, infrarrojos y luz visible donde sus técnicas de fabricación eran inicialmente con materiales como el cobre usados en formas de anillos y alambres rectos actuando como antenas que interactuaban con los campos eléctrico y magnético (Veselago, Braginsky, Shklover, & Hafner, 2006).

Los metamateriales acústicos (MMA) han sido propuestos desde sus inicios para lograr grandes niveles de aislamiento de ruido, ayudando en gran parte a los avances en los aspectos de la propagación y manipulación del sonido. Si bien el aislamiento acústico hace referencia a un grupo de materiales, técnicas y tecnologías creadas para aislar el nivel sonoro en un determinado espacio, aislar se define por impedir que un sonido penetre o salga de un medio, por lo tanto, para poder conseguir dicha característica normalmente se usan materiales cuya capacidad sea la de absorber o reflejar gran parte de la energía de la onda sonora incidente. De acuerdo a lo anteriormente mencionado, y a las características propias que tiene un metamaterial acústico se pueden lograr grandes niveles de aislamiento como las mejoras reportadas en un MMA 3D basado

en una membrana el cual reportó incrementos de aislamiento en un rango de frecuencias de 50 [Hz] a 5000 [Hz] pasando de valores de aislamiento de por ejemplo a una frecuencia de 250 [Hz] con sistema de pared sencillo 38.20 [dB] a 42.00 [dB] con sistema de membrana, logrando la protección de un determinado espacio ante el sonido que se emita (Tobio & Departamento de Metrología del I.E.T.c.c., 1970)(Pérez, 2018). De manera general, se conoce que la ecuación que rige la propagación de las ondas de presión dentro un fluido lineal homogéneo se expresa de la siguiente manera:

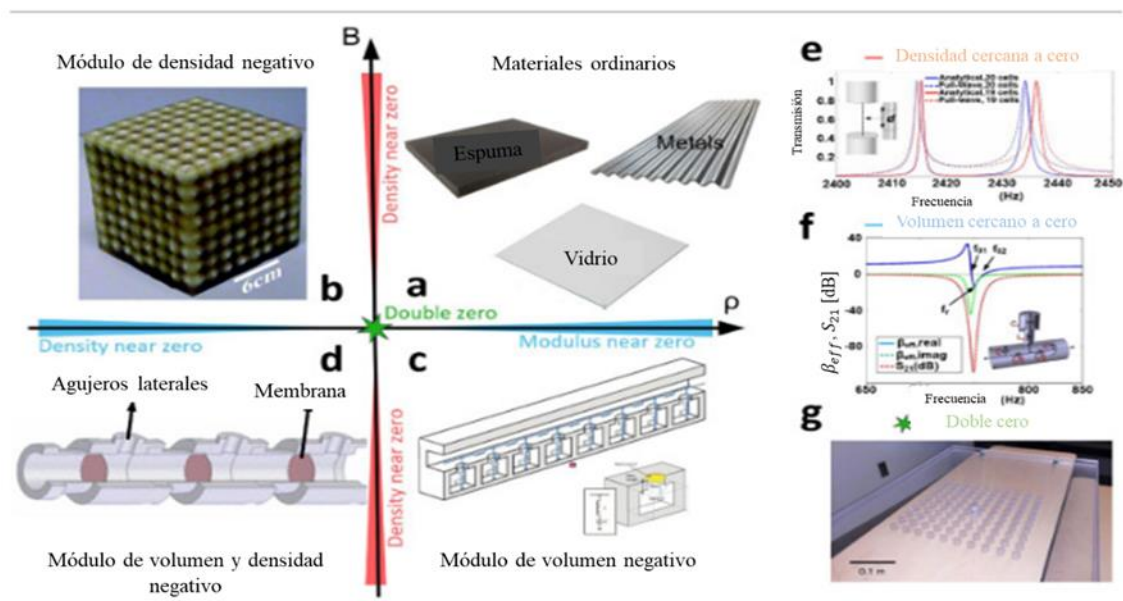
$$\nabla^2 P(r) - \frac{\rho}{\beta} \frac{\partial^2 P(r)}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

Donde P es la presión acústica, los parámetros ρ y β representan la densidad y el módulo de volumen del material, siendo el módulo de volumen una relación de aumento de presión necesaria para causar una disminución relativa en términos de volumen, y el módulo de masa definido como la masa por unidad de volumen de un determinado cuerpo (Zangeneh-Nejad & Fleury, 2019). Estos parámetros comúnmente en los medios naturales sólo pueden tomar valores positivos, pero que en los metamateriales acústicos se pueden dar tanto negativos como positivos por medio de la resonancia que se presente en él, como ejemplo de ello se tiene en cuenta la simetría de la geometría (sea por incrustaciones de resonadores o figuras cilíndricas) que presente un metamaterial como medio de dispersión de la onda, permitiendo un mayor rango de efectividad (Zangeneh-Nejad & Fleury, 2019). Este efecto le permite precisamente a los metamateriales acústicos (MMA) soportar fenómenos físicos distintos que conllevarían a poder controlar la propagación del sonido (Zangeneh-Nejad & Fleury, 2019). Lo anteriormente descrito se puede apreciar en la Figura 1, en la que se muestran cuatro cuadrantes y se comparan los distintos parámetros constitutivos que puede llegar a tener un metamaterial con respecto a un material ordinario. Para el caso del metamaterial con módulo de masa negativo como se aprecia en la figura

(1, b) se ha mostrado que al ser un material que rompe la ley de masas se puede comportar como un reflector total de ondas logrando esto una posible aplicación en la acústica (Liu et al., 2012). En la Figura (1, c) se muestra el caso de un metamaterial con módulo dinámico negativo, el cual puede presentar ventajas como la refracción acústica negativa y aplicaciones como superlentes por debajo del límite de difracción (Fang et al., 2006). Del mismo modo, en la figura (1, d) se puede observar un metamaterial doblemente negativo, que puede ser relacionado con los efectos de invisibilidad para sus aplicaciones (Lee, Park, Seo, Wang, & Kim, 2010).

Figura 1

Parámetros constitutivos de los metamateriales acústicos



Nota. Tomado de (Zangeneh-Nejad & Fleury, 2019).

Dado que el uso de estos materiales no ha presentado un amplio uso en la industria de la construcción por razones como la falta de información en el campo, este proyecto busca a partir de una revisión bibliográfica, presentar las aplicaciones de los metamateriales en la ciencia de la acústica y mostrar los beneficios que pueden llegar a brindar estos nuevos materiales, solucionando

incluso problemas a nivel de ingeniería. Por medio del análisis de las diferentes configuraciones, técnicas de fabricación, propiedades, ensayos realizados y posibles usos reportados en la literatura científica, se expone lo logrado con los metamateriales acústicos. En la sección 2 se describen los aspectos que se tuvieron en cuenta al hacer la selección de la bibliografía, en la sección 3 se encuentra la introducción a los metamateriales acústicos (MMA) con las tipologías que se pueden encontrar, en la sección número 4 se mencionan las aplicaciones de los metamateriales acústicos, en la sección 5 se muestran algunos diseños y técnicas de fabricación de los mismos, en la sección 6 se muestran algunos ensayos realizados con los resultados obtenidos, en la sección 7 se mencionan los aportes más importantes en el estudio de estos metamateriales y, finalmente, en la sección 8 una propuesta de clasificación de los metamateriales acústicos.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Realizar un estado del arte sobre el uso de metamateriales para aislamiento acústico, mediante una revisión literaria.

1.2 Objetivos Específicos

- Identificar los metamateriales más comunes para uso en aislamiento acústico.
- Describir las distintas técnicas de análisis, diseño y fabricación de los metamateriales acústicos.
- Determinar, con base en la literatura, las aplicaciones de estos materiales en el campo de la ingeniería civil.

2. Marco teórico y referencial

2.1 Marco Teórico

2.1.1 *Metamateriales*

Un metamaterial es un material cuyas propiedades dependen de la estructura macroscópica y no de la composición química. Esto permite variar su régimen de comportamiento modificando la configuración geométrica del mismo. En general se habla de metamateriales cuando se constituyen por una estructura periódica o cuasi-periódica. Los primeros metamateriales fueron desarrollados en el campo del electromagnetismo a partir del desarrollo de los primeros materiales dieléctricos artificiales para microondas luego de la segunda guerra mundial (Spiouzas, 2017).

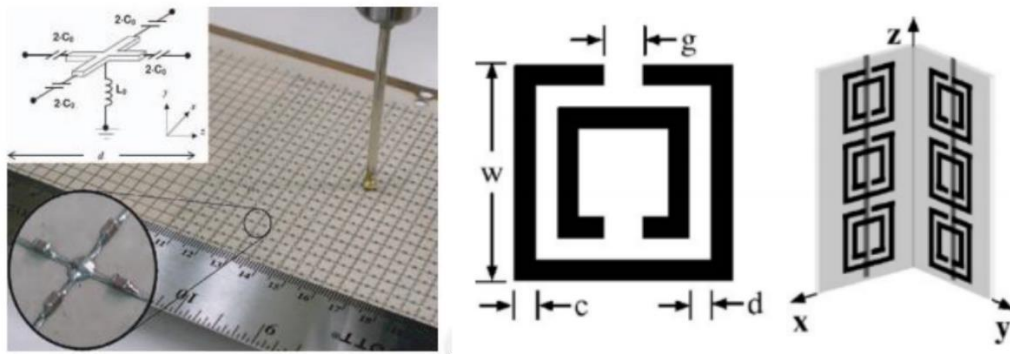
El concepto de metamaterial ha abierto una nueva frontera en el campo de la acústica porque está permitiendo obtener materiales con parámetros que no se pueden encontrar en los materiales acústicos convencionales. Por ejemplo, metamateriales que presenten un módulo de compresibilidad negativo han sido demostrados por diferentes grupos de manera independiente. Se ha demostrado que el módulo de compresibilidad negativo se obtiene de forma efectiva gracias a la existencia de una resonancia monopolar embebida en las unidades que se repiten (García Salgado, Sánchez, & Torrent Martí, 2014).

Con respecto a los metamateriales acústicos, en un principio, fueron propuestos originalmente por el físico Victor Veselago en 1967, el cual publica un análisis teórico de materiales con permitividad y permeabilidad negativos. Del mismo modo estos metamateriales se dieron a conocer con índices de refracción negativos, llamados Negative Index Metamaterials (NIMs) o Left Handed Materials (LHMs) (Veselago et al., 2006). En el año 2000 Smith, Schultz

y algunos de sus compañeros realizaron un trabajo pionero en donde se muestra que es posible fabricar un material artificial con características electrodinámicas que pueden describirse por un índice de refracción negativo (n), publicaciones como esa fueron las primeras en considerar este tipo de propiedades en un material, dando paso también a lo que se conoce hoy en día como cristales fotónicos y metamateriales de línea de transmisión para diferentes longitudes de ondas, frecuencias de radio, infrarrojos, luz visible, entre otros (Veselago et al., 2006). Con respecto a la fabricación, los primeros modelos consistían en anillos de cobre y alambres rectos (ver figura 2), cuya función son las antenas que interactúan con el campo eléctrico y campo magnético (Veselago et al., 2006).

Figura 2

Prototipo de MMC



Nota. Tomado de (Veselago et al., 2006).

En los últimos años, la ciencia ha buscado avanzar en este tipo de investigaciones, por lo cual se han conocido nuevos modelos distintos tipos de configuraciones y fabricación, que han permitido dar paso a diversas aplicaciones acústicas, como lo pueden ser los aislamientos acústicos. Tal es el caso de uno de los recientes estudios publicado en la revista de la Sociedad Estadounidense de Física (APS), un grupo de científicos de la Universidad de Boston lograron

crear una estructura que logra bloquear el ruido y al mismo tiempo permite el paso del aire, llamado Silenciador Metamaterial Ultraabierto (UOM), el cual además tuvo su forma de fabricación por medio de las impresiones 3D (Ghaffarivardavagh, Nikolajczyk, Anderson, & Zhang, 2019), este tipo de avance puede ser aplicado en un amplio campo de la industrial, como lo puede ser en la industria aeroespacial, la automotriz, y hasta en algunos aparatos domésticos. Estudios como el anteriormente mencionado, o como el recientemente en publicado la Universidad de Manchester, donde se investiga también absorbentes y estructuras plasmónicas (Noor, 2010).

2.1.2 Aislamiento acústico

El aislamiento acústico hace referencia a un grupo de materiales, técnicas y tecnologías creadas para aislar el nivel sonoro en un determinado espacio, aislar se define por impedir que un sonido penetre o salga de un medio, por lo tanto, para poder conseguir dicha característica normalmente se usan materiales cuya capacidad sea la de absorber o reflejar gran parte de la energía de la onda sonora incidente (Tobio & Departamento de Metrología del I.E.T.c.c., 1970).

2.1.2.1 Coeficiente de absorción. Cuando una onda sonora incide sobre una superficie, una parte de la energía es absorbida, otra se refleja y otra se transmite. El coeficiente de absorción sonora (α), representa la fracción de la energía sonora absorbida por un material. El valor de α está directamente relacionado con las propiedades físicas del material y varía con la frecuencia. Habitualmente se lo especifica para frecuencias centrales de bandas por octava y tercio de octava (Flores et al., 2013). En el campo de los metamateriales acústicos, las estructuras usadas para la absorción acústica de baja frecuencia son de fibra absorbente de sonido, materiales porosos y estructuras microperforadas, en materiales comunes, se puede estudiar el coeficiente, tal como se

evidencia en estudios basados en espumas de aluminio para evaluar la absorción acústica que se puede lograr con ellas, en donde la principal incidencia que se encontró depende principalmente de la densidad y espesor de la espuma de aluminio (Díaz, Navacerrada, Pedrero, & García, 2006), y en el caso de los metamateriales la absorción perfecta del sonido de bajas frecuencias ha sido observada recientemente usando metamateriales de membrana decorada, resonadores acoplados en una guía de ondas, o mediante el uso de resonadores (Jiménez, Romero-García, Pagneux, & Groby, 2017).

2.1.2.2 Refracción y Reflexión. Cuando la luz incide sobre la superficie de separación de dos medios que poseen velocidades de luz diferentes, parte de la energía luminosa se transmite (refracción) y parte se refleja (reflexión), la refracción Sólo se produce si la onda incide oblicuamente sobre la superficie de separación de los dos medios y si éstos tienen índices de refracción distintos. El índice de refracción, n , es un número adimensional que caracteriza a un medio transparente, y se define por: $n=c/v$ donde c es la velocidad de la luz en el vacío, y v la velocidad de la luz en el medio (Casado Segura, 2015). La reflexión es el cambio de dirección de un rayo o una onda que ocurre en la superficie de separación entre dos medios, de tal forma que regresa al medio inicial (Casado Segura, 2015). El conocimiento de este tipo de fenómenos ha dado paso a nuevas investigaciones, tal como se describe en un artículo de verificación experimental de un índice de refracción negativo, donde por medio de celdas unitarias repetidas de tiras de cobre y resonadores de anillo, se logra un metamaterial que consiste en una matriz bidimensional (Shelby, Smith, & Schultz, 2001).

2.1.3 Impedancia de un material

El método de tubo acústico permite también el cálculo de la impedancia de un material, dicha magnitud se define como la relación entre las amplitudes de la presión del sonido y de la velocidad de las partículas de aire en la superficie del material, su expresión está dada por:

$$z = i + jx \quad (2)$$

Siendo, Z la impedancia normal específica, r la resistencia normal específica, $j = \sqrt{-1}$, y x la reactancia normal específica (Muñoz Díaz, 1985). Este tipo de propiedades juegan un papel importante en el estudio de los materiales y el análisis de sus futuras aplicaciones, de este modo, se han realizado importantes trabajos que analizan el comportamiento de antenas construidas con capas de materiales distribuidas de forma periódica y sobre sustratos FR4 (Tauseef Asim & Ahmed, 2015), celdas de las cuales también se han fabricado pantallas en un modelo tipo parche y así estudiar los efectos sobre la impedancia y otro tipo de propiedades (Castellanos, López, & Reyes-vera, 2016).

2.1.4 Ancho de banda

Se refiere a ancho de banda a la diferencia entre las frecuencias superior e inferior dentro de un conjunto continuo de frecuencias, su unidad se da en Hertz. El ancho de banda puede referirse a una banda de paso o a una banda base de ancho de banda, dependiendo del contexto, algunos ejemplos de ancho de banda de banda de paso pueden ser un filtro de paso de banda, un canal de comunicación, o un espectro de señal. Para el caso de una banda base, su ancho de banda es igual a su frecuencia de corte superior. Una característica de un ancho de banda, puede ser que cualquier banda de anchura dada puede llevar la misma cantidad de información,

independientemente del lugar en que la banda se encuentra en el espectro de frecuencia (Musiki, 2019).

2.1.5 Banda prohibida

Una banda prohibida es el rango de frecuencias que no se transmiten a través del cristal o medio de propagación, este tipo de conceptos ayuda en los procesos de transmisión y reflexión de una onda incidente en un medio el cual puede ser denominado guía de ondas acústicas (Ramírez García, 2018).

2.1.6 Índice de refracción negativo y doble negatividad

Los parámetros característicos de un medio son la densidad de masa ρ y el módulo de volumen β , los cuales hacen parte de la expresión del índice de refracción en ondas sonoras el cual está dado por:

$$n^2 = \frac{\rho}{\beta} \quad (3)$$

Cuando alguno de los dos parámetros es negativo, se dice que se presenta un índice de refracción negativo, lo cual significa que para el caso del módulo negativo a ciertas frecuencias el medio se expande cuando experimenta una compresión, y para el caso de la densidad negativa se muestra una aceleración hacia la izquierda cuando se está ejerciendo una fuerza hacia la derecha (García Salgado et al., 2014). Para el caso de la doble negatividad en un material se presenta cuando tanto ρ y β son simultáneamente negativos, esto es consecuencia de la resonancia y propiedades de refracción negativa resultantes en un material o metamaterial de estudio (García Salgado et al., 2014).

2.1.7 Cristales sónicos y fonónicos

Primeros modelos usados en el campo de los metamateriales fueron los cristales sónicos, los cuales exhiben brechas espectrales dos órdenes de magnitud menores que la longitud de onda del sonido, lo cual mostró grandes resultados al impedir la transmisión de ondas a ciertas frecuencias y que al mismo tiempo esas frecuencias se podían ajustar a los parámetros de diseño variando sus tamaños y geometría, sus aplicaciones se centran en la reflexión de ondas sísmicas y los ultrasonidos (García Salgado et al., 2014).

Los cristales fonónicos son materiales sintéticos formados por variaciones periódicas de las propiedades acústicas del material como la elasticidad y masa, una de las propiedades más destacadas es la posibilidad de tener una banda prohibida fonónica evitando la transmisión de ciertos rangos de frecuencias seleccionados a través del material (García Salgado et al., 2014).

3. Introducción a los Metamateriales Acústicos (MMA)

Los metamateriales acústicos tuvieron sus inicios gracias al físico Victor Veselago en 1967 por medio de un análisis teórico de materiales con índices de permitividad y permeabilidad negativos, los cuales también fueron propuestos inicialmente para poder anular la propagación de las ondas sonoras. Normalmente, los metamateriales acústicos son usados para controlar el sonido en un medio. Para entender un poco su particularidad se puede analizar la ecuación que rige la propagación de las ondas de presión escalar dentro de un fluido lineal homogéneo (ecuación 4), en la que los valores de densidad de masa y módulo de volumen (ρ y β , respectivamente) en materiales comunes toman valores positivos, no obstante, esos valores pueden variar en los metamateriales según el cuadrante en el que se encuentre (ver figura 1) (Zangeneh-Nejad & Fleury,

2019). Cabe resaltar que estas capacidades ofrecen aplicaciones potenciales para aislamiento a bajas frecuencias, modulación de campo de sonido espacial, perfecta absorción definida como el valor de la unidad en el coeficiente de absorción, refracción negativa la cual se da en condiciones del módulo de densidad de masa y de volumen negativos dando como resultado el efecto contrario de la refracción, dispositivos acústicos no recíprocos los cuales implican una transmisión de onda no simétrica entre dos puertos, entre otros.

De manera general, existen distintos tipos de metamateriales acústicos. En un estudio publicado por Zangeneh, Farzad; Fleury, Romain (Zangeneh-Nejad & Fleury, 2019), se habla de metamateriales acústicos pasivos y activos, y esta clasificación presenta distintas propuestas y tipologías que se logran posicionar según su condición de acuerdo a las mismas. Por un lado, los metamateriales acústicos MMA pasivos pueden distinguirse por ser un medio artificial que no puede proporcionar ninguna energía a la onda y tampoco implica ninguna forma de entrada o sesgo externo. Dentro de la terminología de MMA pasivos se encuentran los MMA localmente resonantes y MMA no resonantes (Zangeneh-Nejad & Fleury, 2019).

Por otro lado, los MMA activos son medios donde la onda sí puede recibir energía del material; es decir, se obtiene una ganancia acústica. No obstante, se pueden presentar medios que no transmiten la energía a la onda pero que requieren de una entrada externa para su respectivo funcionamiento (Zangeneh-Nejad & Fleury, 2019), esta tipología tiene una ventaja sobre los pasivos en cuanto a las pérdidas que se pueden llegar a dar en ellos como las ocasionadas por la naturaleza resonante de los localmente resonantes, lo que probablemente conlleve a mejoras en la aplicación de los metamateriales en el mundo real al superar este tipo de desafíos. Dentro de esta clasificación de metamateriales se encuentran los MMA no hermitianos y los MMA con sesgo externo que se presentan en la sección 3.2.

3.1 Metamateriales acústicos pasivos:

3.1.1 MMA localmente resonantes:

Entre las características más particulares de estos metamateriales se encuentra la presencia de densidad de masa negativa y módulos de dispersión en masa. Normalmente, los paneles de bloqueo del sonido se rigen por la ley de densidad de masa, expresada por:

$$STL \propto \rho d \omega \quad (4)$$

La ecuación 2 expresa que la pérdida de transmisión del sonido (STL) a través de una pared es proporcional a el espesor (d), la densidad de masa de la pared (ρ) y a la frecuencia angular (ω) (Zangeneh-Nejad & Fleury, 2019). Del mismo modo, se conoce que las ondas propagadas a bajas frecuencias (las cuales se transmiten fácilmente a través de las paredes), son mayormente transmitidas cuando el espesor de la pared es delgado o similar a la longitud de la onda acústica asociada, lo cual conllevaría a una solución de aumentar espesores, sin embargo, eso no sería viable en aspectos de fabricación (Zangeneh-Nejad & Fleury, 2019). Dada la presencia de estos problemas en la transmisión del sonido, se pensó inicialmente en la implementación de cristales sónicos, básicamente formados por dispersores sólidos distribuidos periódicamente, los cuales suelen ser barras cilíndricas sólidas. Sin embargo, los parámetros que más predominan en esta propuesta son la periodicidad y cantidad de planos cristalinos necesarios para lograr una interferencia, lo cual hizo que se necesitara de una gran cantidad y se obtuviera una estructura voluminosa. Por lo anteriormente dicho surgió la necesidad de lograr este tipo de estructuras pero siendo más delgadas, como lo fue el caso del estudio que se realizó en el año 2000 reportado por Zhengyou Liu, Xixiang Zhang, Yiwei Mao, Y. Y. Zhu, Zhiyu Yang, C. T. Chan y Ping Sheng (Liu

et al., 2012), en el que se pudo exponer lo siguiente: en lugar de depender de la fase dispersiva de la onda a medida que esta viaja por medio de los planos cristalinos, se pensó en que el material obtuviera respuesta fuera de la fase de dispersión de los resonantes (lo cual se observó que ocurrió por encima de su frecuencia de resonancia) y de esta manera poder obtener la interferencia deseada, en otras palabras se creó un nuevo sistema de interferencia “fano” al mismo nivel de las pequeñas incrustaciones resonantes llamadas “meta átomos” como se puede apreciar en el ejemplo de la figura 1-b (Liu et al., 2012). Se entiende por efecto de interferencia “fano” como una densidad de masa efectiva negativa, evitando la propagación de la onda lo cual se puede analizar en la ecuación que rige las ondas (Ecuación 1), cualquier masa efectiva negativa debe ser dispersiva. Estos aspectos permiten tener un poco de claridad en cuanto a lo que diferencia un metamaterial acústico de los cristales sónicos propuestos inicialmente, y muestra de manera general la forma en cómo trabajan los metamateriales que poseen la particularidad de masa negativa.

Así mismo, también existe otra estrategia de MMA localmente resonantes, como lo es el caso de aquellos materiales que poseen la particularidad de módulo de dispersión en masa. Estos han mostrado importantes resultados en la búsqueda de obtener altos niveles de aislamiento acústico. Uno de los metamateriales más nombrados y conocidos hasta la fecha de este tipo son los resonadores Helmholtz, demostrando en ellos que los módulos de masa de la estructura propuesta podrían volverse negativos, obteniendo de esta manera altos niveles de aislamiento acústico (Zangeneh-Nejad & Fleury, 2019).

Sin embargo, estas características no son las únicas que se pueden encontrar en los MMA localmente resonantes. Otros estudios han logrado abarcar la parte doble negativa y casi nula de la imagen mostrada (ver figura 1), teniendo de esta manera MMA dobles negativos y MMA casi nulos. Los MMA doblemente negativos, dan paso a lo que hoy en día se conoce como índice de

refracción negativo. En diferentes estudios se ha mostrado que al superponer los espectros de frecuencia de dos modos con diferente simetría es posible realizar medios artificiales cuya densidad de masa y módulo de masa efectivos son dispersivos y pueden volverse negativos dentro del mismo rango, lo cual explicaría el fenómeno de doble negatividad (Zangeneh-Nejad & Fleury, 2019). Este tipo de MMA tienen aplicaciones en los fenómenos de imágenes de longitud de onda inferior, efecto Doppler inverso, encubrimientos y dispositivos de arco iris acústico de onda con fugas. Por otro lado, los MMA casi nulos se pueden entender de manera general y explicativa por medio de un estudio reportado por R. Fleury and A. Alù (Fleury & Alù, 2013) en el que se expone este tipo de material por medio de un fenómeno conocido como superacoplamiento en electromagnetismo, el cual permite un túnel perfecto del sonido por medio de tuberías muy estrechas, siendo la principal característica presentada en estos modelos que el sonido podría transmitirse muy bien a través de un canal estrecho siempre y cuando el fluido o medio que se encuentre dentro tenga una densidad de masa efectiva cercana a cero.

3.1.2 MMA no resonantes:

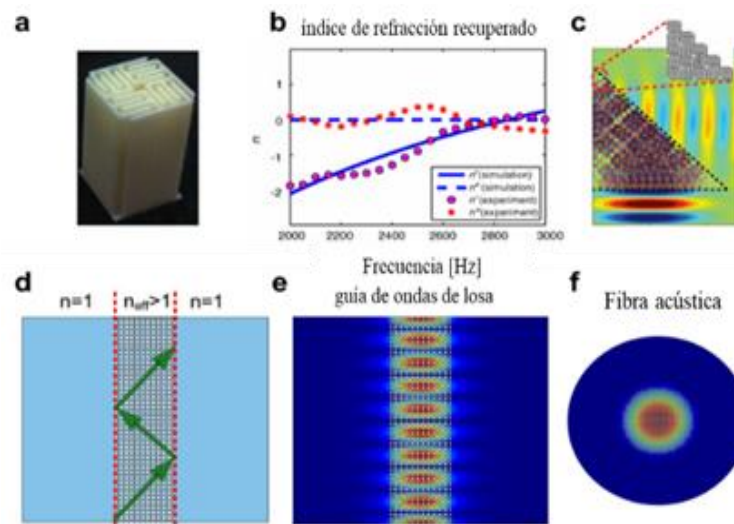
Si bien, lo que limita a los MMA localmente resonantes es el bajo ancho de banda que presentan debido a su naturaleza resonante, el cual hace referencia a un espacio comprendido entre dos frecuencias dadas. Por esta razón se tuvo la necesidad de dar posibles soluciones ante esto y crear materiales que no tuvieran esta naturaleza resonante. En ellos surgieron nuevas técnicas como diseños tipo laberinto (Xie, Popa, Zigoneanu, & Cummer, 2013) y tipo Holey (J. Zhu et al., 2011) como se muestra en la figura 3. El primer tipo de diseño muestra dos ventajas importantes:

- Proporcionan un mayor ancho de banda.
- Evitan altos niveles de atenuación del sonido asociados con picos de resonancia.

Estos diseños presentan formas en espiral pensados para ralentizar las ondas de sonido y poder lograr altos índices de refracción sin embargo se debe tener en cuenta que dicha propiedad es difícil de manipular debido a que la velocidad del sonido en el aire es menor que la de cualquier material sólido (Zangeneh-Nejad & Fleury, 2019).

Figura 3

Distintos diseños de MMA localmente resonantes



Nota. a) Metamaterial diseño tipo laberinto (espacio en espiral). (b) y (c) Respuestas acústicas del montaje de elementos finitos. (d) Montaje de elementos finitos de diseño de metamaterial tipo holey. (e) y (f) esquemas de respuestas acústicas de simulaciones numéricas. Tomado de (Zangeneh-Nejad & Fleury, 2019).

Del mismo modo existen los MMA tipo holey mostrado también en la figura 2-d, los cuales están fabricados a partir de un bloque rígido perforado con poros de forma arbitraria de sub-ondas, para los que una de sus principales características es que la densidad de masa efectiva es menor que el aire homogéneo, es decir, el aire que lo llena ocupa menos volumen (Zangeneh-Nejad & Fleury, 2019).

3.2 Metamateriales acústicos activos:

3.2.1 *MMA no hermitianos:*

En esta tipología presentada se encuentra que con ellos se ha logrado ganancia acústica, lo cual altera fuertemente la propagación de las ondas. Dentro de este tipo de materiales se han utilizado varios mecanismos, sin embargo, uno de los más conocidos es la implementación de materiales piezoeléctricos logrando así ganancia acústica cuya amplificación fue adoptada también para fabricar MMA simétricos de PT (simetrías de paridad (P) y tiempo (T)) (Aurégan & Pagneux, 2017). Otros mecanismos usados dentro de los MMA no herméticos son el uso de circuitos electroacústicos, acoplamiento entre el sonido y las inestabilidades hidrodinámicas y efectos termoacústicos (Zangeneh-Nejad & Fleury, 2019) (Coppolaro et al., 2020).

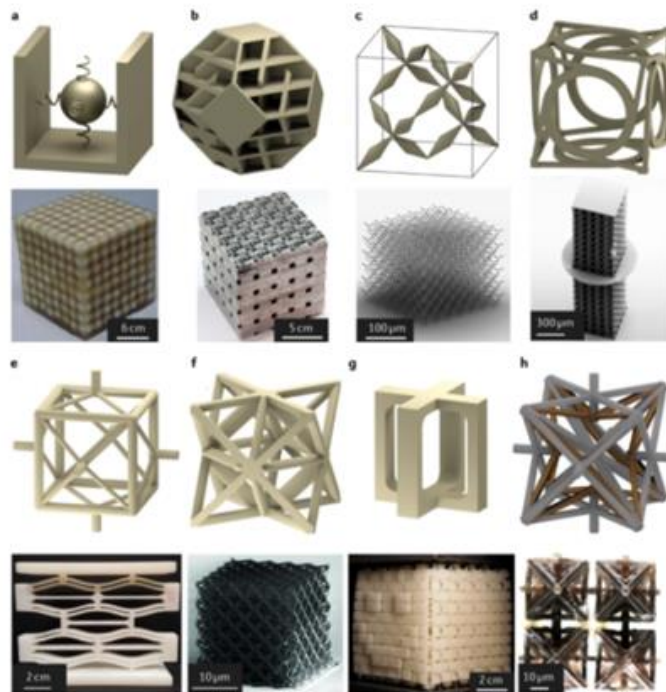
3.2.2 *MMA con sesgo externo:*

Los MMA con sesgo externo tienen propiedades de reconfigurabilidad dinámica (Ma, Fan, Sheng, & Fink, 2018), es decir, se podrían manipular distintas características del metamaterial sin tener dependencia a unas frecuencias fijas y sin intercambiar energía con la onda. Dentro de esta tipología se encuentran las metasuperficies reconfigurables sugeridas para aplicaciones como el control y la mitigación del ruido, y los metaátomos no recíprocos con los que se busca modificar el sistema de propagación de la onda de un punto a otro, es decir un comportamiento no recíproco en la propagación de la onda de una fuente A hacia un punto B (Fleury, Sounas, Sieck, Haberman, & Alú, 2014) (Chaunsali, Li, & Yang, 2016). Debido a las distintas investigaciones que se dieron en la clasificación anteriormente explicada se dio paso a nuevos diseños como se puede apreciar en la figura 4, basados en el principio según sea su clasificación los cuales buscan aprovechar al

máximo sus propiedades y con ello el reporte de varias tipologías que influyan de manera positiva al avance de los mismos, lo que se busca es tener una idea clara de las posibles aplicaciones de los metamateriales acústicos acorde a los resultados obtenidos con cada uno de los diseños propuestos.

Figura 4

Tipos de metamateriales acústicos 3D



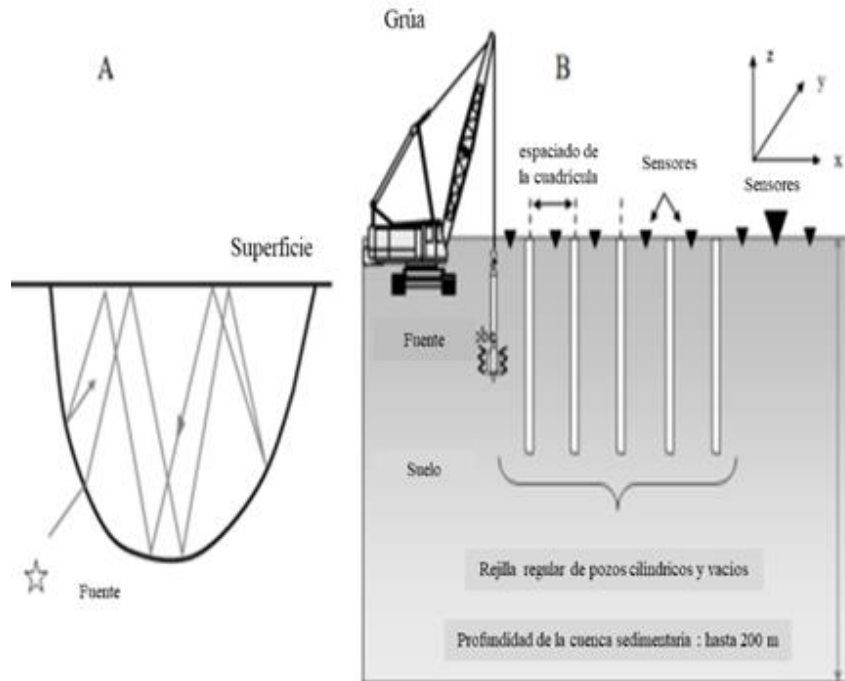
Nota. Tomado de (Muamer, Graeme W, Hecke, & Wegener, 2019).

4. Aplicaciones de los MMA

Una primera aplicación de los MMA se encuentra en la mitigación del impacto que pueden producir las ondas sísmicas en las estructuras. Hasta el momento se han conocido distintas técnicas de diseño para que en una estructura se puedan disipar de manera segura las ondas sísmicas a las

que está expuesta, como es el caso de los aisladores sísmicos, cuyo fin es el de transmitir la menor cantidad de movimiento a la estructura en el momento de ocurrencia del sismo, es decir, se disminuirían las vibraciones. De manera general, se pueden encontrar de dos tipos como los elastoméricos conformados por materiales flexibles y los de deslizamiento basados en apoyos con planchas metálicas que permitan desplazamientos relativos entre ambas (Lafuente & Genatios, 2016).

Sin embargo, una reciente alternativa tiene la posibilidad de brindar nuevas soluciones ante los mencionados retos. En un estudio realizado por la compañía Menard en Francia (Brûlé, Javelaud, Enoch, & Guenneau, 2013), se hicieron simulaciones sísmicas que presentaron una gran reflexión de la onda sísmica ante una fuente de 50 Hz en suelos blandos logrando contrarrestar las señales sísmicas con la modificación de su distribución mediante un metamaterial formado por una rejilla de inclusiones verticales, cilíndricas y vacías perforadas en el suelo de estudio como se puede apreciar en la figura 5. Este estudio se realizó con base a investigaciones realizadas con cristales fonónicos enfocados en ondas acústicas con la implementación de medios resonantes, de este modo conllevó a los ingenieros buscar una nueva ruta de los metamateriales para la propagación de ondas sísmicas (Brûlé et al., 2013).

Figura 5*Esquema de simulación sísmica*

Nota. (a) Onda sísmica en cuenca de aluvión; (b) Sección transversal del dispositivo de prueba sísmica en el plano x - z . Tomado de (Brûlé et al., 2013).

Entre los principios que se encuentran en el concepto de refracción que se pueden encontrar en las ondas sísmicas se encuentra el principio de Snell también conocido como la ley de refracción: cuando una onda se propaga en un medio y se encuentra con una interfaz entre medio y medio, una parte de la onda incidente se refleja y la otra es refractada durante la misma transmisión (García Salinas, 2016). No obstante, como ya se ha mencionado, en los metamateriales acústicos se puede obtener una refracción total de la onda debido a que presentan índices de refracción negativos.

Lo que normalmente se busca es que estos metamateriales permitan una absorción parcial o total de las ondas debido a que en una estructura se adopta un sistema donde las ondas pueden ser reflejadas en su totalidad, y en consecuencia estas serían redireccionadas alrededor de las zonas donde se encuentre lo cual afectaría a estructuras vecinas lo cual sería más perjudicial en zonas urbanas (Canqui Anquise, 2013). De esta manera, se han venido conociendo metamateriales acústicos con altos niveles de absorción destinados a incluirse en sistemas de aislamientos acústicos en edificaciones de todo tipo de uso. En un estudio realizado por Z. Iñesta en 2018 (Zahonero Iñesta, 2018) se analizaron metamateriales acústicos absorbentes por medio de estructuras periódicas usando, además, materiales adicionales como el textil para ser incorporado como membrana permeable al aire, permitiendo que el metamaterial trabaje como resonador de membrana. También, buscaron optimizar al máximo el espacio ocupado por los elementos absorbentes siendo esto una ventaja en la construcción en condiciones de montaje además de la superioridad que se puede obtener en términos de absorción en comparación con los materiales usados normalmente.

Otra aplicación consiste en la implementación de los MMA ante los efectos del ruido aéreo, por lo que en un estudio realizado por T. Pérez en 2018 (Taborga Pérez, 2018) en España, se propuso el diseño nombrado como HM-3D, un metamaterial acústico en 3D utilizado para aislamiento ante el ruido aéreo, y se estableció que este tipo de material considera todo el rango de frecuencias que influyen en las ponderaciones R_w (índice de reducción sonora), y no sólo enfocado en zonas dominadas por la ley de masas y frecuencia de coincidencia (Taborga Pérez, 2018). Esta propuesta también es considerada como una “Membrana Acústica”, la cual logró mostrar mejoras que alcanzan los 1,80 [dB] a bajas frecuencias y los 23,70 [dB] a altas frecuencias. Este modelo sería utilizado como barrera ante el sonido obteniendo una estructura tridimensional

(muelle-masa-muelle) (ver figura 12) mostrando, además, una ventaja al requerir espesores de pared de material mucho menores, lo que permite reemplazar sistemas convencionales de multicapas, con varias placas de materiales, disminuyendo así el peso de la estructura y mejorando el aislamiento a bajas frecuencias. Este tipo de metamateriales se puede clasificar dentro de los MMA pasivos.

Otro tipo de metamaterial que se ha trabajado bajo el concepto de membranas fue propuesto por Z. Lu, X. Yu, S. K. Lau, B. C. Khoo, y F. Cui en 2020 (Z. Lu, Yu, Lau, Khoo, & Cui, 2019), siendo un metamaterial acústico de tipo membrana con masas excéntricas, pensado normalmente para uso en aislamientos acústicos, dando como ejemplo de aplicación su adaptación como capa exterior de las ventanas de un edificio para evitar el ruido y su propagación en el interior de cualquier espacio dentro del mismo, o como capa interna en los submarinos para reducir el ruido de bajas frecuencias generado por las instalaciones de energía en ellos.

Del mismo modo, S. Castiñeira Ibáñez, C. Rubio Michavila, y A. Uris Martínez en 2018 (Castiñeira Ibáñez, Rubio Michavila, & Uris Martínez, 2018), presentaron una pantalla acústica abierta, modular, sintonizable y con una banda ancha de atenuación basada en ranuras de sublongitud de onda logrando reemplazar los conocidos cristales de sonido. También se conoce que este diseño, al ser modular, permite su construcción de una manera más factible y se pueden trasladar de un lugar a otro sin gran complicación, lo cual es un gran ahorro dentro de las obras civiles. Adicionalmente, se utilizó el principio de resonadores de Helmozt: otro tipo de metamaterial acústico que permite la absorción acústica selectiva en un rango de bajas frecuencias y su diseño consiste en postes rectangulares dispuestos periódicamente. Este tipo de pantalla se pensó para atenuar ruidos de bajas frecuencias, con la variación de la longitud de las cavidades del resonador se logra seleccionar la frecuencia de resonancia permitiendo así tener una estructura

sintonizable a frecuencias que se deseen atenuar para reducir un ruido en una banda de frecuencias sin necesidad de diseñar paredes de espesores excesivos, lo cual puede tener aplicaciones en aquellas instalaciones que requieran de aberturas para el flujo del aire, como lo es el caso de torres de enfriamiento, calderas, plantas técnicas o instalaciones eléctricas (Castiñeira Ibáñez et al., 2018).

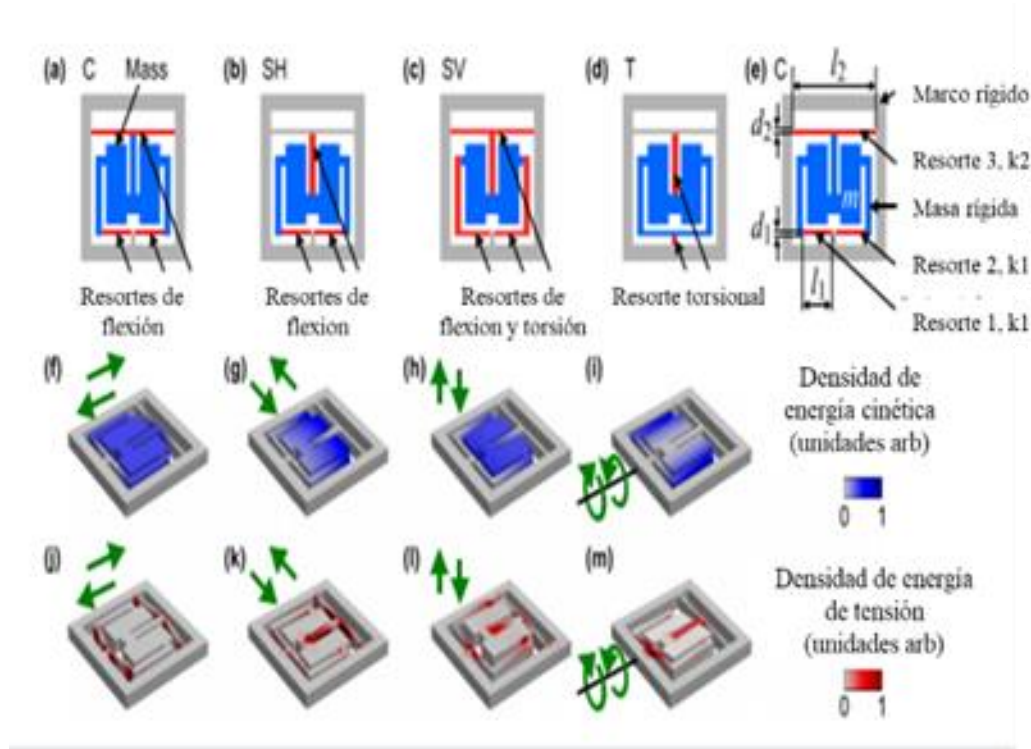
Los metamateriales acústicos de estructuras cilíndricas, más conocidos como conductos periódicos, se han destacado por funcionar como filtros y por la reducción de vibraciones y ruido a bajas frecuencias específicas, que se ven en fuselajes de aviones y cohetes (Oliveira Sousa, 2018). Precisamente es el tema de vibraciones el que influye en los estudios de los metamateriales localmente resonantes. En un estudio realizado por X. An, C. Lai, W. He, y H. Fan en 2019 (An, Lai, He, & Fan, 2019), se muestra una nueva estructura de celosías cúbicas con resonadores locales y se estudió su comportamiento dinámico y el espectro de transmisión dando resultados positivos ante un aislamiento de vibraciones. Esta estructura llamada “Meta-truss” puede actuar también como filtro de onda a causa de haber mostrado una buena estabilidad en la generación de espacios de banda a bajas frecuencias cuando se requiera la capacidad de carga de la estructura (An et al., 2019). Lo que también llama la atención es el método de fabricación, el cual está basado en impresiones 3D y es referente a toda la tecnología de manufactura aditiva.

Con estos estudios se ha demostrado que los metamateriales acústicos no sólo tienen aplicaciones en aislamiento acústico, si no también múltiples aplicaciones como lo puede ser el aislamiento de vibraciones. Un estudio presentado por K. Fujita, M. Tomoda, O. B. Wright, y O. Matsuda en 2019 (Fujita, Tomoda, Wright, & Matsuda, 2019) muestra un metamaterial de banda acústica perfecta fabricado con una sección transversal rectangular en forma de una matriz de resonador cuádruple (modo periódico) como se muestra en las figuras 6 y 7, el cual logra

amortiguar eficazmente las vibraciones de corte, compresión, torsión y flexión en el plano (Fujita et al., 2019). Por último, en un estudio hecho por S. Rezaei, M. Eskandari-Ghadi, y M. Rahimian en 2016 se pueden encontrar aplicaciones en la comunicación infrasónica para largas distancias con bajo consumo de energía en los metamateriales acústicos piezoeléctricos (Rezaei, Eskandari-Ghadi, & Rahimian, 2016).

Figura 6

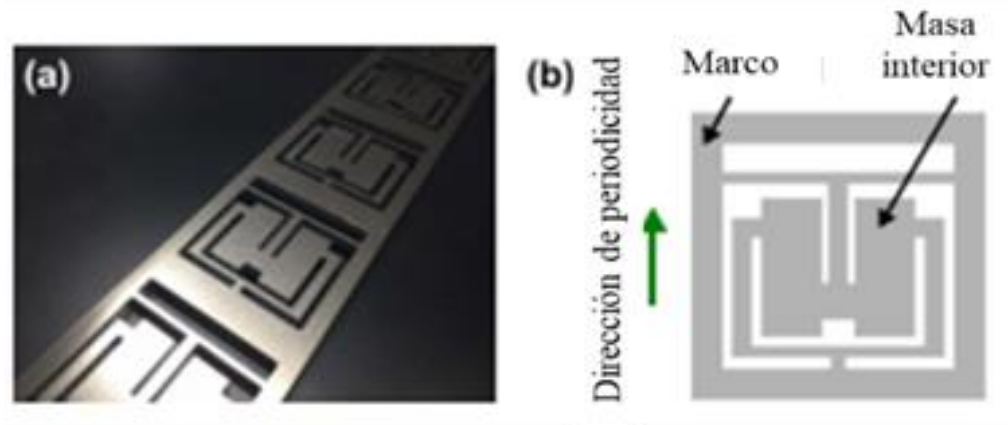
Geometrías utilizadas para los modelos



Nota. Las regiones azules y las nervaduras rojas actúan como masas y resortes, respectivamente, que se muestran para los siguientes modos: (a) compresivo, (b) cortante horizontal, (c) cortante vertical y (d) torsional. (e) Geometría detallada para el modo compresivo, mostrando la masa interior rígida m y los resortes 1, 2 y 3. Las flechas verdes muestran los desplazamientos. Tomado de (Fujita et al., 2019).

Figura 7

Diseño para ensayo



Nota. (a) Fotografía del metamaterial. (b) Esquema de la vista superior de la celda unitaria. La región gris es de aluminio y las áreas blancas interiores son agujeros. La geometría de celda unitaria comprende un marco, una masa interior y varias nervaduras.

De manera general, se pueden encontrar numerosas tipologías de MMA que difieren de su propósito de aplicación según las propiedades que presenten, sin embargo, la mayoría de estudios revisados solo han tenido éxito en los laboratorios o en las etapas iniciales de desarrollo, lo que significa que aún existe un muy amplio camino que recorrer en la investigación de estos materiales; de acuerdo a ello, varias empresas e investigadores han realizado estudios y demostrado nuevos avances en la acústica bajo el concepto de los metamateriales, como por ejemplo la compañía “Acoustic Metamaterials Group”, pioneros en el desarrollo de la tecnología de control del ruido de metamateriales (Chen, Fong, & Yang, 2017). Finalmente, se puede deducir que se logra encontrar MMA según la necesidad que se tenga, algunos son sintonizables, otros multifuncionales o también los MMA a nanoescala y de la misma manera se pueden seguir clasificándolos gracias

a las múltiples propiedades que se pueden lograr encontrar bajo estos nuevos conceptos y con ello, nuevos beneficios a aplicar.

5. Diseño y técnicas de fabricación de los (MMA)

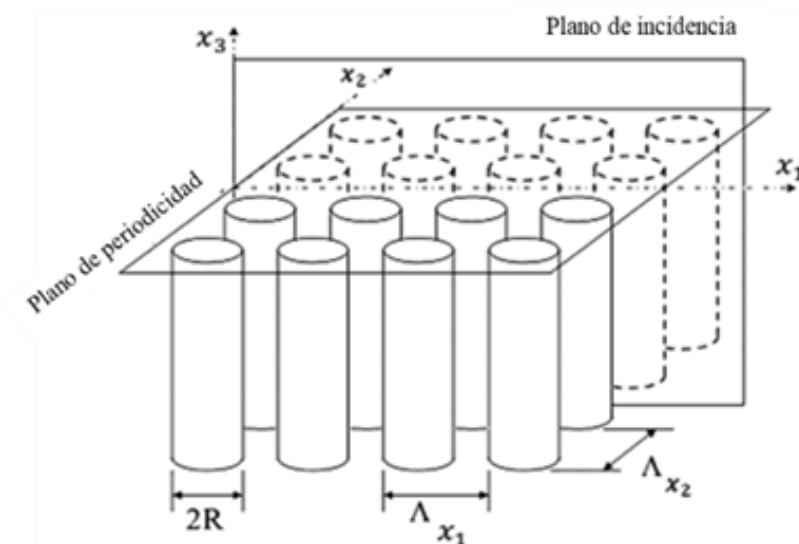
Por lo general, para poder diseñar un metamaterial acústico es necesario definir la aplicación y factores que se desean controlar para luego poder identificar a que familia puede pertenecer y posteriormente basarse en las distintas metodologías de fabricación existentes para su tipología, esto con el fin de tener las bases necesarias para obtener un diseño apropiado con las propiedades deseadas.

En un primer caso, de técnicas y diseños, se encuentran los metamateriales basados en los diseños de cristales fonónicos. En el estudio hecho por S. Rezaei, M. Eskandari-Ghadi, y M. Rahimian en 2016 (Rezaei et al., 2016), se estudia un MMA compuesto por un material piezoeléctrico de forma cilíndrica en una matriz cuadrada (ver figura 8) y para su diseño se tuvo en cuenta un concepto de propagación de la onda en materiales de este tipo: las ondas elásticas se pueden dar en tres planos de polarización es decir, perpendiculares con un tipo de onda distinta, ondas transversales longitudinales, ondas transversales en el plano y ondas transversales fuera del plano, lo cual indica que los materiales piezoeléctricos deben eliminar la propagación en todas sus direcciones para así lograr una estructura con un espacio de banda completo. La disposición de las varillas cilíndricas se hizo de acuerdo a una configuración especial funcionando como materiales de dispersión e incrustadas en un esqueleto en forma de panal con espacios de aire formando, de esta manera, la matriz cuadrada. En este modelo la profundidad de los cilindros juega un papel importante para poder mitigar la propagación de la onda, al ser menor que la longitud de la onda

propagada actuarían como un obstáculo infinitamente largo para el proceso de dispersión. La fabricación del metamaterial se hizo inicialmente por medio de análisis y simulaciones numéricas con las propiedades del material piezoeléctrico, sin embargo, se sugiere el método de fabricación de impresiones 3D debido a la precisión que se puede llegar a tener en términos de forma y especificaciones requeridas (Rezaei et al., 2016).

Figura 8

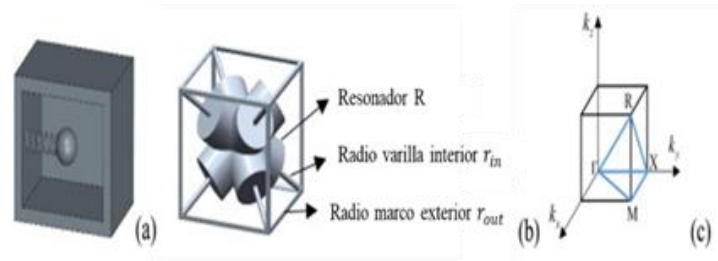
Modelo con varillas piezoeléctricas cilíndricas incrustadas en un fondo de aire



Nota. Tomado de (Rezaei et al., 2016).

Por otro lado, se encuentran los diseños basados en estructuras localmente resonantes como es el caso de los metamateriales acústicos de tipo membrana. En el estudio realizado por X. An, C. Lai, W. He, y H. Fan en 2019 (An et al., 2019), se propuso un metamaterial basado en estructuras tridimensionales de celosía con rendimiento en aislamiento de vibraciones que, básicamente, contiene unas barras, denominadas puntales, con secciones transversales variables que cumplen con la función de los modos resonantes. Cada celda unitaria contiene ocho puntales delgados

conectados desde una masa central (resonador central) hasta el marco externo de la celda (ver figura 9). Uno de los principales desafíos que presenta el diseño es lograr bandas prohibidas en donde se presentan rangos de frecuencias en los que la onda no puede pasar, dicho fenómeno se ha logrado durante la dispersión y reflexión de ondas elásticas que se propagan en estructuras periódicas para las que la longitud de la onda incidente debe ser de igual o mayor magnitud que la de la red (An et al., 2019). Del mismo modo, se conocen otras alternativas para generar bandas prohibidas como por ejemplo, cambiar las uniones en la estructura de celosía introduciendo esferas en las uniones reticulares o usando quiralidad por medio del reemplazo de los nodos sólidos con anillos circulares. En el estudio realizado por X. An, C. Lai, W. He, y H. Fan en 2019 (An et al., 2019), se optó por incluir una masa central suspendida y estirada por los puntales, no obstante, para lograr las bandas prohibidas a bajas frecuencias se necesitan de resonadores pesados y para ello se considera el método de amplificación inercial con el fin de disminuir la fracción de masa total de cada unidad celular. Este sistema está pensado también para obtener un rendimiento simultáneo entre rigidez y atenuación de las vibraciones acústicas, problema resuelto con condiciones estáticas y dinámicas, de ahí la idea de tener un marco de celosía rígido con microestructuras agregadas resonantes. El modelo se fabricó mediante tecnología de impresión 3D basada en sinterización selectiva por láser, lo que significa que la estructura está hecha de un solo material, lo que disminuye en gran parte el peso de la misma y amplía las aplicaciones en la ingeniería como estructuras base de máquinas que soporten las vibraciones y ruidos de impacto generado por las mismas.

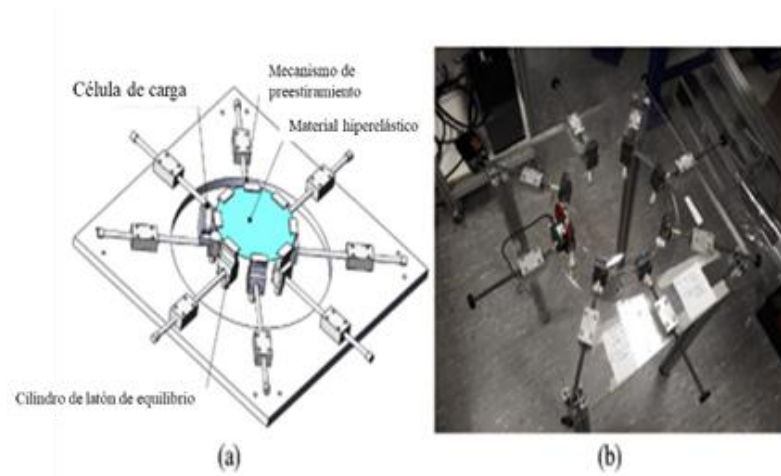
Figura 9*Modelos de diseño del metamaterial*

Nota. (a) Esquema simplificado del metamaterial, (b) la celda unitaria de celosía meta-truss diseñada (c) la parte irreducible de la primera zona de Brillouin. Tomado de (An et al., 2019).

Los metamateriales de tipo membrana también han logrado propiedades de aislamiento y absorción del sonido, su mecanismo de masas ajustables en la membrana con límites fijados logran densidades de masa negativa en un rango de frecuencias considerable rompiendo además con la ley de masas, lo que se puede visualizar en el diseño propuesto por Z. Lu, X. Yu, S. K. Lau, B. C. Khoo, y F. Cui en 2020 (Z. Lu et al., 2019), en el que se logró una membrana elástica correctamente tensada con una distribución uniforme del espacio interno, se utilizó un mecanismo de preestiramiento de ocho direcciones logrando una condición de tensión interna bien equilibrada, es decir, una distribución uniforme de tensión interna (ver figura 10); el material usado para su fabricación fue un material hiperelástico denominado película de elastómero dieléctrico para ser el absorbente acústico sintonizable.

Figura 10

Montaje de ensayo del MMA tipo membrana con sistema de preestiramiento

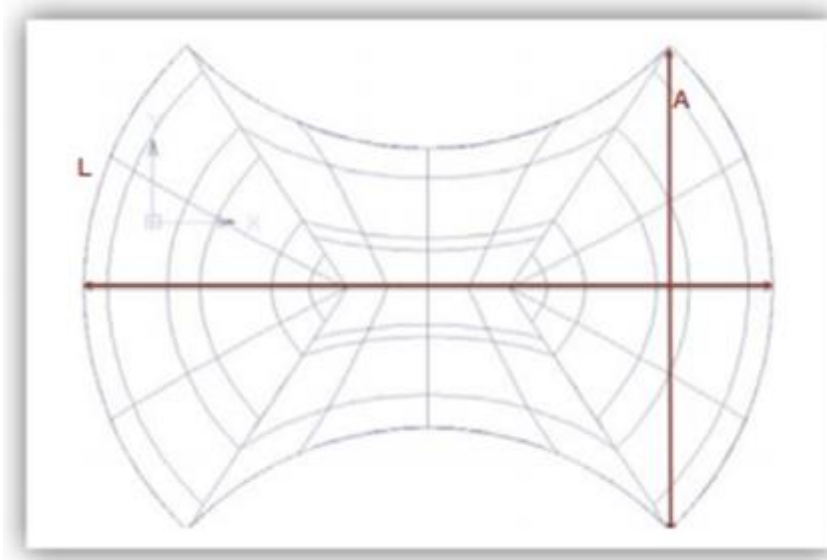


Nota. (a) Diseño del mecanismo de preestiramiento de ocho direcciones para la membrana hiperelástica; (b) Foto de la práctica experimental del mecanismo. Tomado de (Z. Lu et al., 2019).

Uno de los factores que influye significativamente en las propiedades obtenidas en un metamaterial es la configuración geométrica y la variación de cada una de sus dimensiones. En el caso de Z. Iñesta en 2018 (Zahonero Iñesta, 2018) se estudió el diseño de un metamaterial acústico basado en estructuras periódicas para lograr absorción total del sonido, donde se hizo un barrido de las posibles configuraciones geométricas del material y se definió la forma circular ordenada con simetría biaxial que ayude a ocupar los espacios vacíos con el fin de evitar los espaciamentos sin absorción, obteniendo finalmente una pieza simétrica en dos ejes que conserva la periodicidad de los mismos con altos niveles de absorción (ver figura 11).

Figura 11

Diseño de MMA con simetría biaxial

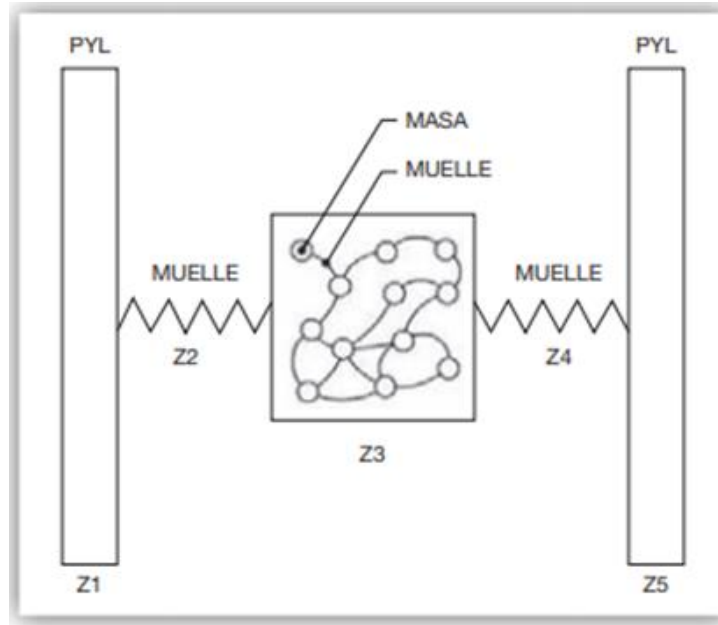


Nota. Dimensiones de fabricación $L=25$ [cm], $A(\text{ancho})=18$ [cm]. Tomado de (Zahonero Iñesta, 2018).

Finalmente se tiene el diseño de metamateriales multicapa para los que, dependiendo de la aplicación, se pueden encontrar diversas propuestas. En (Taborga Pérez, 2018) se presenta un metamaterial tridimensional para uso de aislamiento al ruido aéreo, en su diseño también se consideró la ley de masas y la rigidez de las paredes dado que es un sistema tipo sándwich que se pueda implementar a modo de barreras de sonido. El sistema multicapa estuvo compuesto de la siguiente manera: muelle-masa-muelle y se usaron los materiales látex-poliuretano-látex (ver figuras 12 y 13). Este tipo de diseños también ha mostrado aumentar la impedancia de un material. La razón por la cual se tiene en cuenta la ley de masas es debido a que cuando existe elasticidad entre dos masas rígidas que en el caso sería el látex, se disiparía la energía por viscosidad, y se podría obtener la curva semejante a la de la ley de masas, es decir, al obtener una curva más lineal se disminuyen las resonancias que afectan al aislamiento del metamaterial (Taborga Pérez, 2018).

Figura 12

Esquema del sistema del MMA

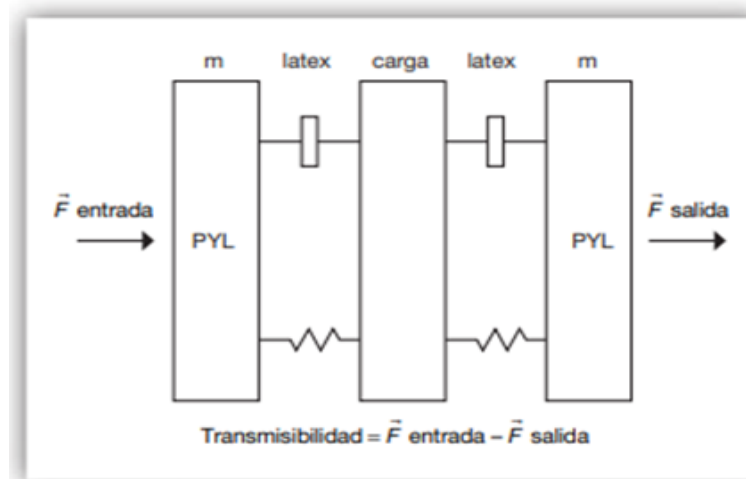


Nota. Configuración de tres capas, $Z_{tot}=Z1+Z2+Z3+Z4+Z5$ (Suma de todos los cambios de impedancias).

Tomado de (Taborga Pérez, 2018).

Figura 13

Esquema simplificado del sistema del MMA



Nota. Tomado de (Taborga Pérez, 2018).

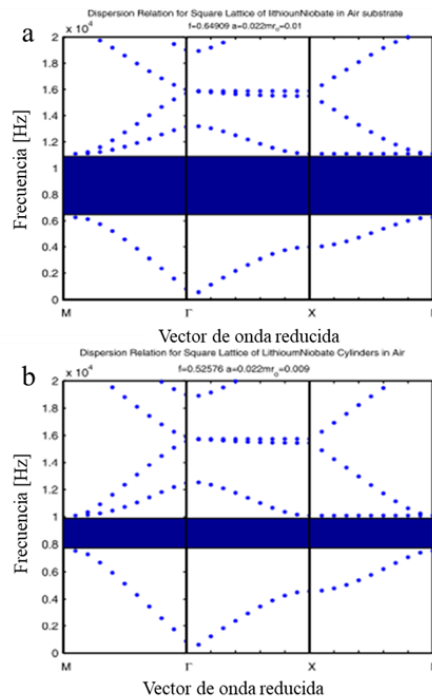
6. Algunos ensayos y resultados obtenidos de los (MMA)

De los diseños propuestos y mencionados anteriormente se lograron obtener resultados positivos y dejan las puertas abiertas a nuevas posibilidades de estudios que aporten significativamente a los avances de los metamateriales acústicos.

En primera instancia, el diseño presentado de un metamaterial acústico basado en cristales fonónicos mostró de manera efectiva que cada onda en su plano presenta un intervalo de banda completo en el rango de frecuencia de 8 a 10 [kHz], de este modo se demostró que ningún tipo de onda como las mencionadas anteriormente se propaga a través de la estructura (Rezaei et al., 2016). Esto se logró teniendo en cuenta los conceptos de velocidades de las ondas acústicas y las densidades de masa y es por ello que los cilindros estaban compuestos de materiales resistentes a las altas velocidades que las ondas pueden presentar. Adicionalmente, se presentaron los resultados de la correlación entre las velocidades, la anisotropía del material y el efecto de acoplamiento electromecánico; dichos puntos fueron claves para definir parámetros de diseño como la disposición de las incrustaciones de las barras en la matriz. Lo que se observó experimentalmente que tiene influencia en el ancho de banda dentro del metamaterial son algunos factores de en los parámetros de diseño, uno de ellos es el factor de llenado que con fracciones de relleno de 0.64 a 0.52 se presentan aumentos de ancho de banda de (8 a 10 [kHz]) a (6.5 a 11 [kHz]) lo que significa que es un diseño que puede ser ajustable en donde la posibilidad de variación sea de factores de impresión, como el llenado en este caso, y otros parámetros de red (ver figura 14) (Rezaei et al., 2016). Los ensayos se realizaron por medio de análisis de elementos finitos y para representar las velocidades de las ondas acústicas soportadas por las barras piezoeléctricas se usó la ecuación de Christoffel (Rezaei et al., 2016).

Figura 14

Esquema de relación de dispersión con fracciones de llenado de 0,64 y 0,52, respectivamente



Nota. Tomado de (Rezaei et al., 2016).

Los metamateriales tipo celosía se estudiaron de manera experimental con la obtención de los modelos en impresiones 3D basada en sinterización selectiva por láser (SLS) y fueron verificados mediante simulaciones de elementos finitos, se realizó el montaje de la pieza a manera de viga suspendida por cuatro cadenas que se unen a un marco de soporte en las cuatro esquinas de la sección de manera que se garantice también la nivelación total a el plano horizontal para poder tener condiciones de contorno libre (ver figura 15). Para la generación de la onda se adaptaron los sensores de aceleración a los extremos de la muestra en donde en uno de los dos extremos se generó una señal de vibración por medio de un agitador obteniendo una onda longitudinal que se propaga a lo largo de la viga; los rangos de frecuencias usados para este caso

fueron de 1 a 5000 [Hz] para lograr obtener el espectro de transmisión expresado como la relación entre la respuesta de aceleración del extremo de salida al extremo de entrada (An et al., 2019).

Figura 15

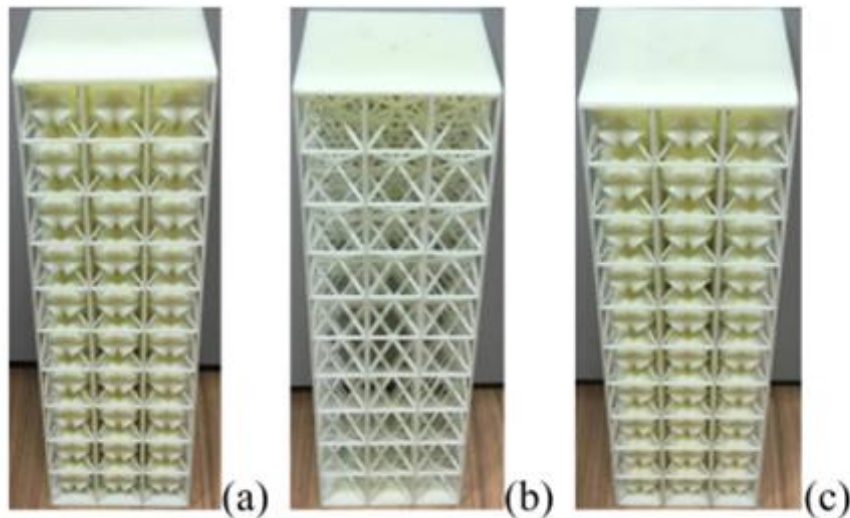
Montaje experimental para la propagación de ondas longitudinales en el sistema de viga del Metamaterial



Nota. Tomado de (An et al., 2019).

Figura 16

Muestras con distintas medidas en parámetros geométricos

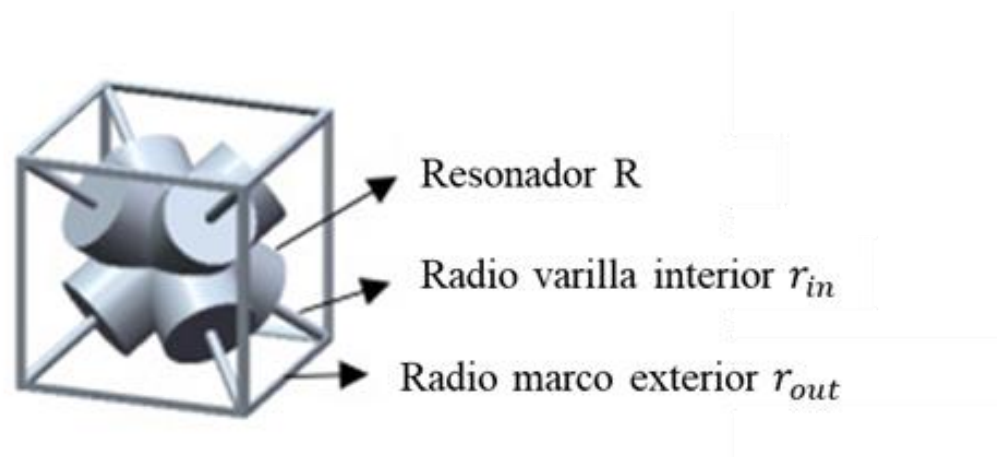


Nota. Tomado de (An et al., 2019).

Adicionalmente, se practicaron pruebas de resistencia a la compresión uniaxial en una máquina de ensayo Instron (EE.UU.) de 30 [kN] a una velocidad de carga de 1 [mm/min], sus resultados se pueden apreciar en la figura 18, y se fabricaron dos muestras de sólo una celda unitaria con distintos tamaños del parámetro radio del marco exterior (r_{out}) (ver figura 17) de esta manera se realizaron ocho conjuntos de experimentos para cada configuración para obtener como resultado un promedio de cada par y compararlos en las curvas de aplastamiento uniaxiales (An et al., 2019). El motivo por el cual se varia el parámetro r_{out} es para evitar reducir el intervalo de banda al tiempo que se aumenta la capacidad de carga de la estructura por lo que se planteó aumentar dichos radios y, al hacer esto, se evidenció un aumento del módulo de compresión, capacidad de carga y el desplazamiento de fluencia.

Figura 17

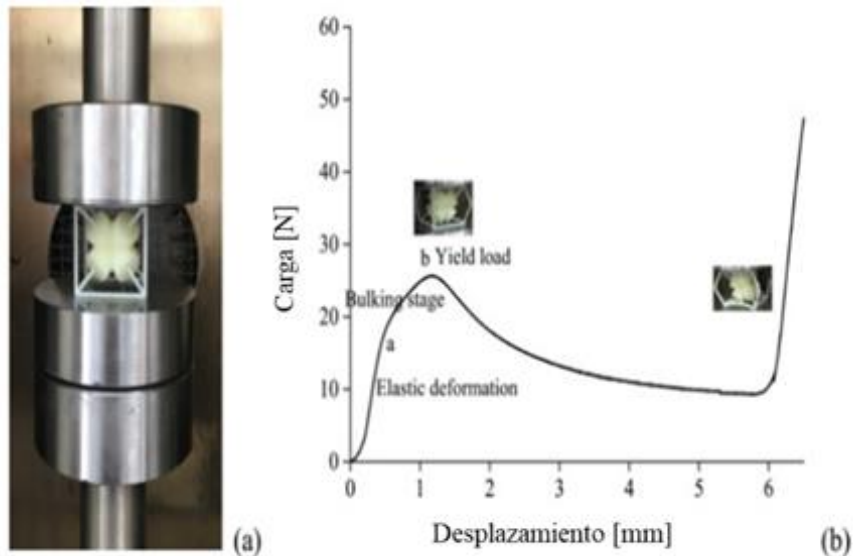
representa el radio de sección del resonador



Nota. (r_{in}) representa el radio de sección del puntal de conexión delgado, (r_{out}) representa el radio de sección del marco exterior. Tomado de (An et al., 2019).

Figura 18

Ensayo de Compresión de las muestras del MMA

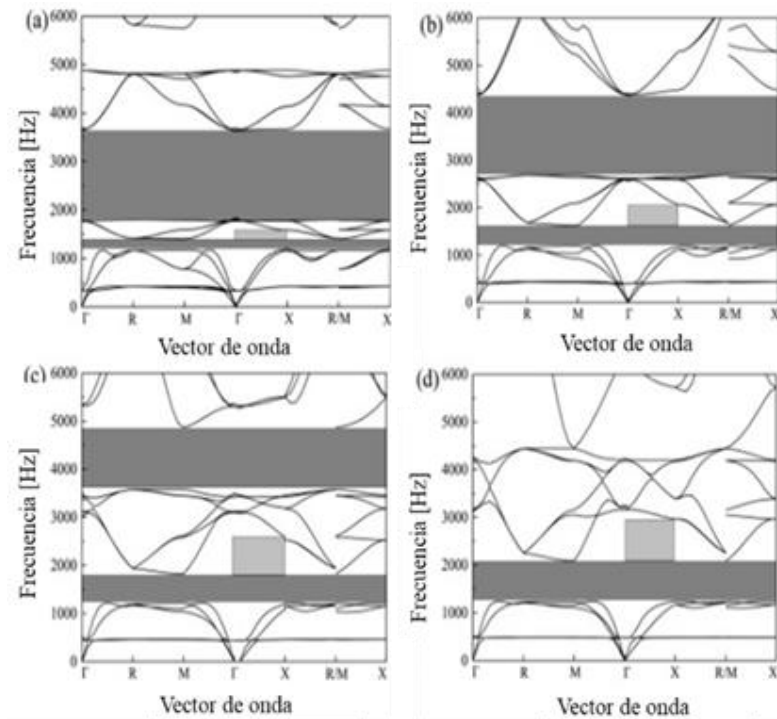


Nota. a) La configuración de la prueba de compresión uniaxial y (b) los comportamientos de compresión uniaxial de la celda unitaria de celosía meta-truss cuando $r_{out} = 1$ [mm]. Tomado de (An et al., 2019).

Finalmente se obtuvo que la estructura con mayor radio $r_{out} = 2.5$ [mm] mostró un aumento en la primera banda prohibida y una disminución en la segunda banda prohibida, es decir, mientras que la primera banda se vuelve más ancha la segunda se vuelve más estrecha (ver figura 19), lo que traduce en que este tipo de metamaterial acústico presenta una buena estabilidad en la generación de espacios de banda a bajas frecuencia al mismo tiempo que se requiera la capacidad de carga del mismo (An et al., 2019).

Figura 19

Anchos de banda resultados de los ensayos



Nota. Anchos de banda para (a) $r_{out} = 1[\text{mm}]$, (b) $r_{out} = 1.5[\text{mm}]$, (c) $r_{out} = 2[\text{mm}]$, (d) $r_{out} = 2.5[\text{mm}]$.

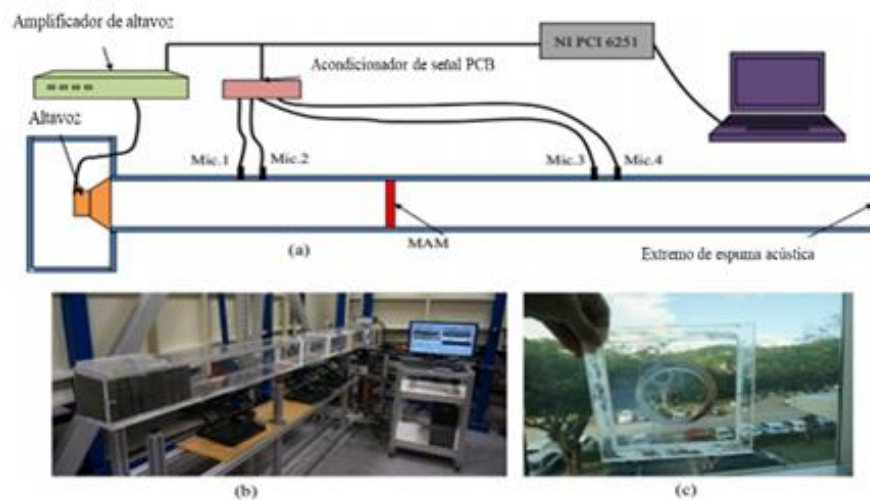
Tomado de (An et al., 2019).

Los ensayos realizados en metamateriales acústicos de tipo membrana se centran mayoritariamente en las pérdidas de transmisión, en el estudio realizado por Z. Lu, X. Yu, S. K. Lau, B. C. Khoo, y F. Cui en 2020 (Z. Lu et al., 2019) se analizaron de manera experimental las pérdidas de transmisión del metamaterial mediante el ensayo del tubo de impedancia instalando un altavoz en un extremo del conducto el cual actúa como fuente de sonido para la generación de la onda sinusoidal, la muestra del metamaterial se coloca en el centro de la sección del tubo teniendo ambos las mismas dimensiones. Se usaron cuatro micrófonos para medir la presión del sonido dentro del sistema y el método usado para medir la transmisión fue el de dos cargas a un

rango de frecuencias de 50 [Hz] a 1060 [Hz] según dimensiones de la sección transversal del tubo (ver figura 20) (Z. Lu et al., 2019).

Figura 20

Montaje experimental del tubo de impedancia y foto del Metamaterial



Nota. Tomado de (Z. Lu et al., 2019).

Teniendo en cuenta que se fabricaron diversas muestras con variaciones en sus parámetros se concluyó lo siguiente: el rendimiento de este metamaterial puede ser manipulado por medio de la optimización de la distribución de masas excéntricas como lo es el grosor, el peso, la forma, el número de divisiones y tamaños de la masa del anillo. Como muestra de ello se observó que a altas frecuencias de (200 Hz a 1000 Hz) con una membrana más gruesa presenta un mejor rendimiento acústico y a bajas frecuencias de (40 Hz a 300 Hz) solo tendrían un cambio significativo en el rendimiento con varios cambios y combinaciones de configuraciones de masa en el diseño, como por ejemplo, la masa de 4 anillos divididos con un radio exterior de 60 [mm] e interior de 50 [mm] que fue la mejor configuración al reportar un aumento de banda de 5 dB-TL en 13.25 % (Z. Lu et

al., 2019). Las divisiones propuestas de masa de anillo permiten obtener dos submembranas diferentes que ayuden a producir más antirresonancias, el espacio entre cada masa de anillo dividido se denomina “bolsillo” el cual actúa como un enlace entre ambas submembranas lo que mejoraría su interacción causando al mismo tiempo un aumento más alto de la banda para un mejor aislamiento acústico (Z. Lu et al., 2019).

En el estudio realizado por Z. Iñesta en 2018 (Zahonero Iñesta, 2018) aplican a su propuesta una superficie de 12 m² basada en estructuras periódicas con simetría biaxial, el ensayo realizado consistió en una cámara reverberante bajo la norma ISO 354 (ISO 354, 2006) de 235[m³] como se puede apreciar en la figura 21. Este tipo de ensayo es empleado para obtener el coeficiente de absorción en un campo difuso, Se logró obtener incrementos en la energía absorbida y demostrar el rendimiento de absorción del metamaterial propuesto para frecuencias que van desde 300 [Hz] a 3000 [Hz].

Figura 21

Montaje del ensayo en cámara reverberante



Nota. El montaje se realizó bajo las indicaciones de la norma ISO 354. Tomado de (Zahonero Iñesta, 2018).

7. Aportes más importantes en el estudio de los MMA

Cada aporte dado en los estudios de los metamateriales ha presentado nuevas alternativas que permitan mejorar las propiedades normalmente conocidas en los materiales convencionales y dar paso a nuevas investigaciones que den continuidad a los avances logrados. En primer lugar, uno de los trabajos más significativos en los avances de metamateriales acústicos tipo membrana se dio en el año 2008 (Z. Lu et al., 2019), en el que se mostraron metamateriales ligeros de tipo membrana con masa efectiva negativa reportado como un material capaz de romper la ley de densidad de masa de atenuación del sonido en rangos entre los 100 Hz a 1000 Hz, mostrando altos picos de transmisión del sonido con un modelo basado en una membrana circular elástica impuesta por una rejilla relativamente rígida con un pequeño peso (masa) unido en la parte central.

Uno de los aportes más importantes en el campo de los metamateriales acústicos es la demostración de materiales con densidad efectiva y módulo volumétrico negativos. Como se ha mencionado, Victor Veselago fue quien introdujo los primeros aspectos y definiciones de los metamateriales en primera instancia en el área del electromagnetismo y luego de sus hallazgos se buscó implementar esos conceptos en la acústica, En 2004 (Li & Chan, 2004) se mostró por primera vez un metamaterial acústico doblemente negativo, en la acústica la doble negatividad se deriva de resonancias a bajas frecuencias como también sucede en los materiales electromagnéticos con la diferencia de que la densidad y el módulo de volumen negativo se derivan de fuentes distintas mientras que en los materiales acústicos sucede en estructuras de resonancia, en los materiales electromagnéticos la permeabilidad y permitividad negativa se originan en distintos mecanismos de resonancia, bajo estos conceptos se implementó la resonancia local de una misma estructura encontrando en ello la propiedad de la doble negatividad en resonancias

monopolares y dipolares. Del mismo modo, a partir de las investigaciones de Veselago se han dado reportes y evidencias experimentales de nuevas propiedades en la parte acústica, como por ejemplo la demostración experimental de la existencia de espacios de banda acústica absolutos en medios compuestos periódicamente en su primer caso bidimensionales (Vasseur et al., 1998) o los primeros cálculos completos de materiales elásticos periódicos con grandes espacios de banda logrando proporcionar un entorno libre de vibraciones acústicas; dichos trabajos han sido pioneros en investigaciones que busquen estructuras con huecos de banda a bajas frecuencias.

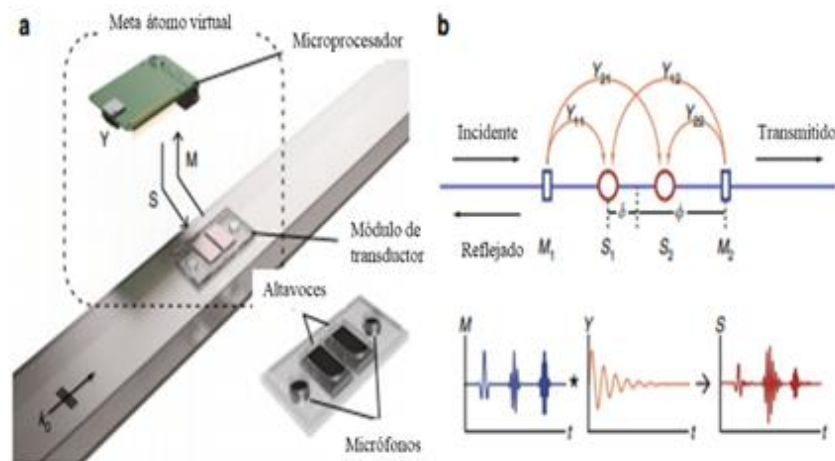
Con la llegada del concepto de resonancia local en estructuras se dieron los primeros trabajos basados en dicho concepto. Uno de ellos fue la fabricación de metamateriales acústicos basados en la idea de estructuras resonantes exhibiendo constantes elásticas efectivas negativas a ciertos rangos de frecuencias, las resonancias locales inducen constantes de celosía de sublongitud de onda, es decir, constantes de dos órdenes de magnitud menor que la longitud de onda (Liu et al., 2012). Igualmente, se dio a conocer la primera demostración experimental de enfoque de ondas de ultrasonido en un metamaterial de red plana de resonadores Helmholtz con dimensiones de sublongitud de onda, estudio que aporta a un nuevo camino hacia camuflajes del sonido (Zhang, Yin, & Fang, 2009). Del mismo principio, se conoció la implementación de resonadores Helmholtz integrados en una matriz porosa con el fin de encontrar bandas prohibidas en la estructura propuesta (Boutin, 2013).

Actualmente se han conocido aportes que buscan optimizar procedimientos experimentales de cada propuesta de diseño. En (L. Lu et al., 2013) se propuso la optimización de la topología de metamateriales acústicos lo cual permite tener un diseño directo basado en conjuntos de niveles, en esta propuesta se puede determinar características de diseño como el número, ubicación y forma de los agujeros o figuras geométricas dentro de una estructura, estos métodos han demostrado ser

herramientas de diseño flexibles y fiables sin la necesidad de acudir a experimentos físicos o enfoques de prueba y error expandiendo además la posibilidad de hacerlo para diseños tridimensionales. La misma intención se busca bajo el concepto de virtualización de metamateriales útiles para usos en aislamiento acústico (ver figura 22), en ello se reemplaza la respuesta de resonancia de frecuencia de un metamaterial acústico en forma física por una dispersión de frecuencias diseñada matemáticamente lo cual permite una mayor especificación de la respuesta de frecuencia de resonancia deseada, este tipo de trabajos han buscado encaminarse hacia la mayor obtención de propiedades físicas que se pueden encontrar en los metamateriales (Cho, Wen, Park, & Li, 2020).

Figura 22

Esquemas del Metamaterial virtualizado



Nota. Tomado de (Cho et al., 2020).

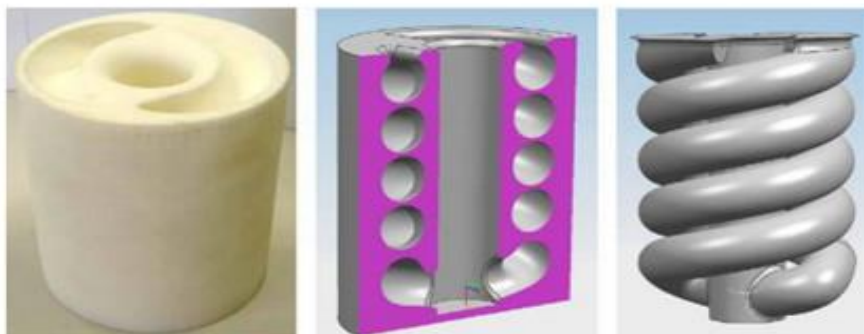
El modo de fabricación también ha sido clave en el proceso de los metamateriales acústicos, por lo que se busca cada vez más optimizar su producción con la ventaja de que en varios casos lo importante no es el material que compone la estructura si no la configuración

geométrica que el mismo contenga donde priman factores de ubicación, tamaños y espesores de las figuras adoptadas. Con la llegada de la sinterización selectiva por láser (SLS) se dio paso a una nueva visión de los métodos de obtención de los metamateriales permitiendo fácilmente la fabricación de cualquier diseño propuesto sin limitaciones en su forma, se puede decir que la SLS es un antecesor de las impresiones 3D con la que se pueden fabricar distintos tipos de piezas tridimensionales con múltiples tipos de materiales como polímeros, metales, plásticos, cerámicas o cristales por medio de un láser, esto dio paso a la optimización en producción reduciendo factores de peso y material (Godbold, Soar, & Buswell, 2007).

Más adelante, con la llegada de las impresiones 3D se adoptó la técnica a la fabricación de nuevos metamateriales acústicos como por ejemplo la producción de un absorbente del sonido basado en una estructura porosa (Godbold et al., 2007), o un metamaterial acústico de tipo membrana con propiedades acústicas de absorción (Aslan & Turan, 2020) (ver figuras 23 y 24). El aporte significativo de estos avances radica en que permiten evitar procesos de producción como ensamblaje de piezas o la implementación de distintas técnicas de fabricación para una sola muestra.

Figura 23

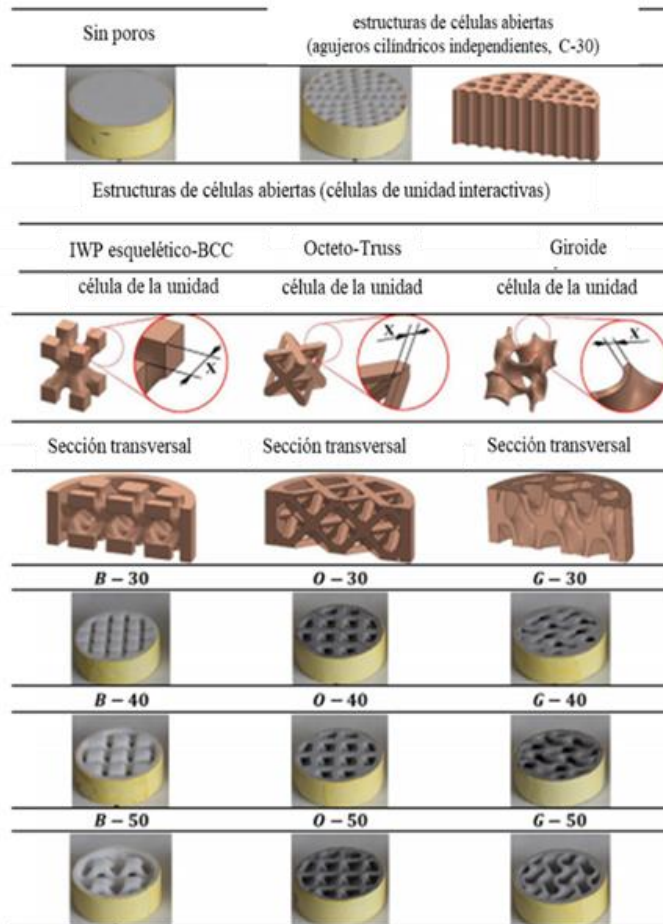
Muestra fabricada para pruebas diseñadas con renderizados



Nota. Tomado de (Godbold et al., 2007).

Figura 24

Estructuras impresas con sistema en 3D



Nota. Tomado de (Aslan & Turan, 2020).

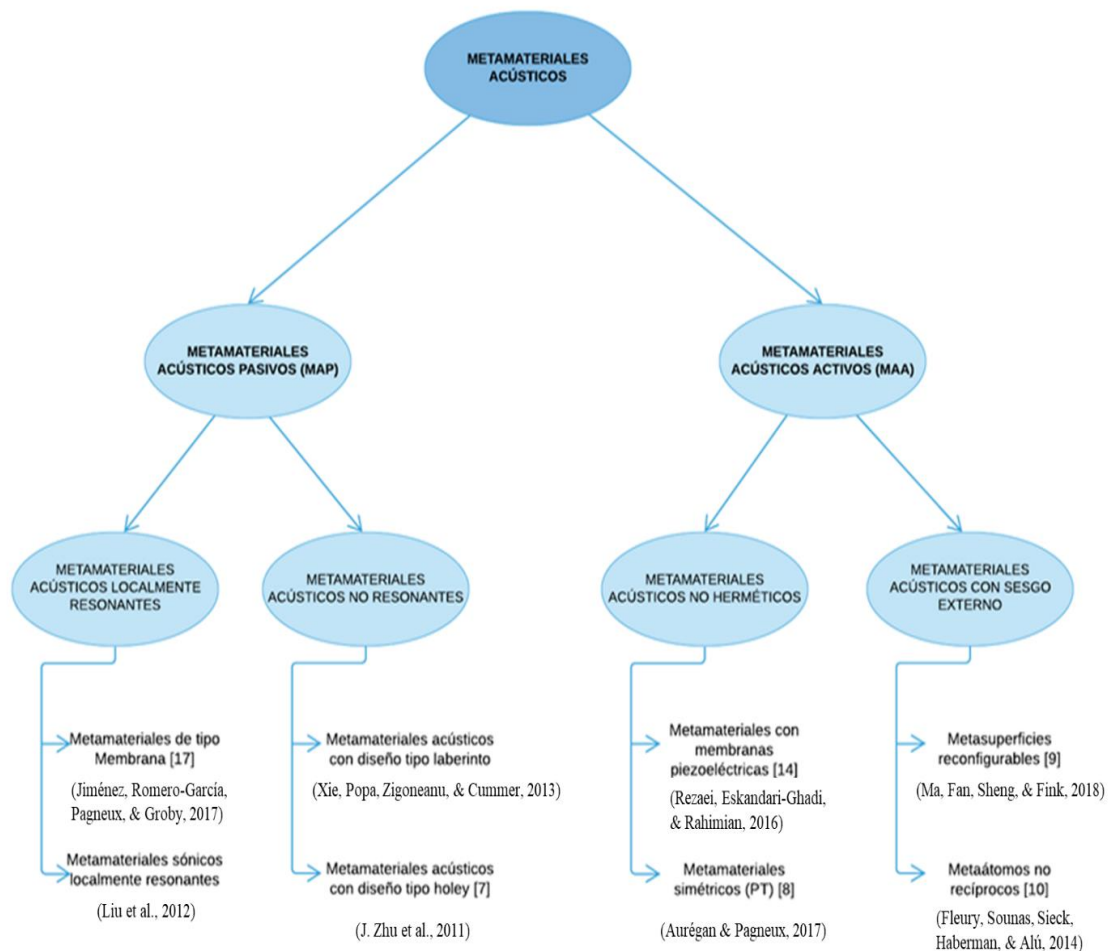
8. Propuesta de clasificación de los Metamateriales

Con el fin de brindar una herramienta de guía y un resultado de lo que se puede encontrar en el campo de los metamateriales acústicos, se proponen los siguientes mapas conceptuales y tablas, donde en la figura 25 se muestran los distintos tipos de MMA que se pueden encontrar, en la figura 26 las ideas principales y aspectos más importante dentro de cada sección tratada en el

estado del arte, y por último en las tablas 1 y 2 se observan las distintas ventajas y desventajas que se pueden presentar en los MMA según su clasificación .

Figura 25

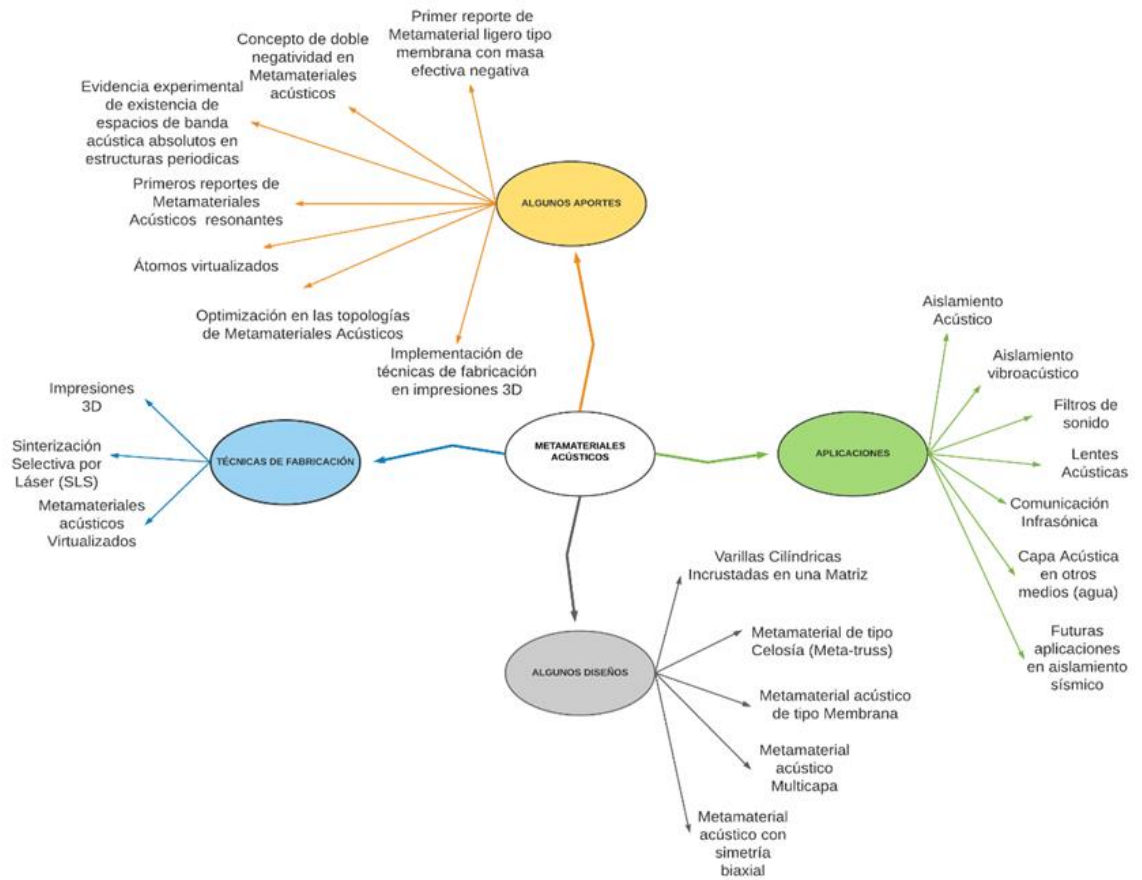
Esquema de clasificación de los Metamateriales Acústicos



Nota. Elaboración propia.

Figura 26

Esquema de generalidades de lo Metamateriales Acústicos



Nota. Elaboración propia.

Tabla 1*Ventajas y Desventajas de los Metamateriales Acústicos pasivos*

	Localmente resonantes	No resonantes
Ventajas	Se pueden conseguir altos niveles de absorción del sonido, para estos casos los metamateriales más comunes son los de tipo membrana, los que incluyen resonadores Helmholtz y los metamateriales porosos.	Proporcionan un mayor ancho de banda, con ellos se pueden lograr altos niveles de refracción. Los metamateriales normalmente usados son los de configuración geométrica tipo laberinto y los tipo Holey.
Desventajas	Aún no se ha garantizado un amplio cubrimiento de ancho de banda por lo que suelen presentar muchas pérdidas.	Se pueden presentar pérdidas internas, sin embargo se ha demostrado que dichas pérdidas pueden ser insignificantes lo cual implica que no sean consideradas dentro del análisis.

Nota. Elaboración propia. Información tomada de (Tobio & Departamento de Metrología del I.E.T.c.c., 1970).

Tabla 2*Ventajas y Desventajas de los Metamateriales Acústicos activos*

	No hermitianos	Con sesgo externo
Ventajas	Se puede conseguir una ganancia acústica y presentan menos pérdidas en comparación de los metamateriales pasivos.	Tienen propiedades de reconfigurabilidad dinámica.
Desventajas	Se pueden presentar pérdidas por efectos no locales del metamaterial, sin embargo se ha adoptado una interacción y aprovechamiento entre las pérdidas y las ganancias logrando grandes resultados como lo es la presencia de anisotropía extrema.	Al necesitar un sesgo externo para presentar la propiedad deseada limita a la estructura a acoplarse o adaptarse a dicha condición, hay excepciones de estructuras que no pueden acoplarse a un sesgo externo debido a las condiciones del material por el que esté compuesto el modelo como lo son sus propiedades elásticas.

Nota. Elaboración propia. Información tomada de (Tobio & Departamento de Metrología del I.E.T.c.c., 1970)(Coppolaro et al., 2020)(Chaunsali et al., 2016).

9. Conclusiones

Hasta el momento se ha logrado tener una cobertura de investigación amplia en el campo de los metamateriales acústicos, sin embargo aún existe un largo camino que recorrer hacia los distintos beneficios que estos puedan brindar como la construcción de nuevas estructuras que cuenten con un buen sistema de aislamiento sin necesidad de aumentar costos ni tiempos en su fabricación. En el presente trabajo se introdujeron varios conceptos que abarcan la manera en cómo pueden funcionar estos materiales y lo que se ha logrado con ello haciendo una revisión sistemática de este avance tecnológico.

De acuerdo a lo investigado, los metamateriales acústicos pueden llegar a tener múltiples propiedades con la manipulación de ondas sonoras difiriendo en su técnica de diseño o sistema del cual se base. Sus aplicaciones a la ingeniería civil se logran evidenciar en varios aspectos mencionados como la presencia de altos niveles de absorción, amplios espacios de bandas prohibidas y altos picos en las pérdidas de transmisión del sonido, todos enfocados a lograr un aislamiento acústico en espacios cerrados. Esta alternativa no solo presenta ventajas ante los materiales convencionales en su capacidad acústica, sino que también brinda mejoras en sus procesos constructivos dada las distintas formas de fabricación y la reducción en factores de peso y material que conllevaría su producción, lo cual es positivo en partes como obras civiles donde lo que más se busca es optimizar cada proceso constructivo y conseguir una reducción de costos de manera significativa y eficiente.

Adicionalmente, se logró encontrar en varios reportes la aplicación a la mitigación de vibraciones acústicas que se puedan llegar a producir por fuentes como máquinas que generen ondas de impacto en una construcción que puedan llegar a comprometer la estructura, para estos

casos se ha demostrado la buena estabilidad en la generación de espacios de banda a bajas frecuencias al mismo tiempo que se requiera la capacidad de carga del metamaterial.

Entre las ventajas que se pueden encontrar está, en primer lugar, el modo de fabricación de cada modelo, al ser un material que no depende de su composición química ni resistencia que tenga su estructura molecular sino de la forma, la ubicación y cantidad de patrones geométricos que contenga su diseño como también la tipología que se adopte ya sea por resonancia local o incrustaciones periódicas, esto implica una reducción en material, tiempo y costos a la hora de obtener un sistema de aislamiento acústico comparado con los sistemas convencionales ya existentes. Por otro lado, las propiedades nunca antes vistas de cada sistema propuesto es una gran ventaja, tales como la doble negatividad, índices de refracción negativos y módulos de masa efectiva negativa, es decir son propiedades que sólo se consiguen en metamateriales, lo que implica su uso en múltiples ramas de la ingeniería.

La estructura de un diseño, en la mayoría de los casos, se basa en la réplica de patrones geométricos formando, en algunos, una estructura de matriz, lo que permite obtener estructuras de tipo arquitectónico que ofrecen un aspecto visual agradable y al tiempo siguen siendo funcionales. Dado que los inicios de los metamateriales en la parte acústica se dieron luego de la implementación en el electromagnetismo, existe una relación con el modo de dispersión y otros fenómenos físicos que ocurren en ambos medios lo cual muestra un amplio espacio de conceptos nuevos por descubrir y estudiar a partir de dicha rama que pueden ser positivos para futuros avances e investigaciones.

Una de las desventajas que se conoce de estos metamateriales son las pérdidas que pueden ser producidas por distintos factores como resonancias en estructuras rígidas o el medio en el que se esté dando la propagación de la onda, sin embargo, se han realizado investigaciones que buscan

mejorar estas pérdidas. Otro aspecto en contra es el rango de frecuencia al cual puede estar limitado un modelo específico, es decir que para el caso de los metamateriales acústicos absorbentes sólo se conseguirían altos niveles de absorción en un rango de frecuencias específicas. Del mismo modo, son contados los estudios que han llevado su modelo al campo aplicativo dado que por lo general los avances sólo llegan a la fase experimental, esto puede deberse a que sus resultados han sido eficientes para muestras de tamaños relativamente menores que los que se utilizarían en espacios aplicativos como por ejemplo en sistema de paredes de una edificación.

Referencias Bibliográficas

- An, X., Lai, C., He, W., & Fan, H. (2019). Three-dimensional meta-truss lattice composite structures with vibration isolation performance. *ELSEVIER (Extreme Mechanics Letters)*, 33(September), 1–27. <https://doi.org/10.1016/j.eml.2019.100577>
- Askeland, D. R., & Wright, W. J. (2017). Introducción a La Ciencia e Ingeniería De Materiales. In J. Reyes Martínez (Ed.), *Ciencia e ingeniería de los materiales (séptima edición)* (pp. 1–15). Retrieved from <http://latinoamerica.cengage.com>
- Aslan, R., & Turan, O. (2020). Gypsum-based sound absorber produced by 3D printing technology. *ELSEVIER (Applied Acoustics)*, 161(December), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.107162>
- Aurégan, Y., & Pagneux, V. (2017). PT -Symmetric Scattering in Flow Duct Acoustics. *Physical Review Letters*, 174301(APRIL), 1–5. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.118.174301>
- Boutin, C. (2013). Acoustics of porous media with inner resonators. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 134(May), 1–13. <https://doi.org/10.1121/1.4824965>
- Brûlé, S., Javelaud, E., Enoch, S., & Guenneau, S. (2013). *Seismic metamaterial: how to shake friends and influence waves?* Retrieved from <http://arxiv.org/abs/1301.7642>

- Canqui Anquise, T. B. (2013). *Sísmica de refracción y microtemores para caracterización de parámetros dinámicos superficiales en un estudio geotécnico en la quebrada Caramolle, Distrito de Pocollay - Tacna*. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann-TACNA.
- Casado Segura, M. (2015). Refracción y Reflexión. Retrieved June 17, 2019, from Módulo 5 website: <https://docplayer.es/4034091-Modulo-5-reflexion-y-refraccion.html>
- Castellanos, L. M., López, F., & Reyes-vera, E. (2016). Metamateriales : principales características y aplicaciones. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 40(156), 395–401.
- Castiñeira Ibáñez, S., Rubio Michavila, C., & Uris Martínez, A. (2018). *Diseño de una pantalla acústica modular con una banda de atenuación sintonizable en bajas frecuencias*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Chaunsali, R., Li, F., & Yang, J. (2016). Stress Wave Isolation by Purely Mechanical Topological Phononic Crystals. *Scientific Reports*, 6(August), 1–10. <https://doi.org/10.1038/srep30662>
- Chen, S., Fong, V. T., & Yang, M. (2017). Acoustic Metamaterials Group. Retrieved July 11, 2020, from Pioneer of Acoustic Metamaterials website: <https://acousticmetamaterials.org/>
- Cho, C., Wen, X., Park, N., & Li, J. (2020). Digitally virtualized atoms for acoustic metamaterials. *Nature Communications*, 11(1), 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-14124-y>

- Coppolaro, M., Moccia, M., Caligiuri, V., Castaldi, G., Engheta, N., & Galdi, V. (2020). Extreme-Parameter Non-Hermitian Dielectric Metamaterials. *ASC Photonics*, 7, 11. <https://doi.org/10.1021/acsphotonics.0c00924>
- Díaz, C., Navacerrada, Á., Pedrero, A., & García, L. (2006). Absorción Acústica a Incidencia Normal De Espuma De Aluminio. *Tecni Acústica*, 1, 1–6.
- Fang, N., Xi, D., Xu, J., Ambati, M., Srituravanich, W., Sun, C., & Zhang, X. (2006). Ultrasonic metamaterials with negative modulus. *Nature Materials*, 5(June), 1–5. <https://doi.org/10.1038/nmat1644>
- Fleury, R., & Alù, A. (2013). Extraordinary sound transmission through density-near-zero ultranarrow channels. *Physical Review Letters*, 111(5), 1–5. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.055501>
- Fleury, R., Sounas, D. L., Sieck, C. F., Haberman, M. R., & Alú, A. (2014). Sound Isolation and Giant Linear Nonreciprocity in a Compact Acoustic Circulator. *Science*, 316, 5. <https://doi.org/10.1126/science.1246957>
- Flores, M. D., Ferreyra, S. P., Cravero, G. A., Budde, L., Longoni, H. C., Ramos, O. A., & Tommasini, F. C. (2013). Base De Datos De Coeficientes De Absorción Sonora De Diferentes Materiales. *Asciación Argentina de Mecánica Computacional*, 19(22), 2901–2908. Retrieved from <http://www.amcaonline.org.ar>

Fujita, K., Tomoda, M., Wright, O. B., & Matsuda, O. (2019). Perfect acoustic bandgap metabeam based on a quadruple-mode resonator array. *Applied Physics Letters*, 115(August), 1–6. <https://doi.org/10.1063/1.5117283>

García Salgado, R., Sánchez, J., & Torrent Martí, D. (2014). *Diseño y caracterización de metamateriales acústicos basados en guías de onda* (Universidad Politécnica de Valencia). Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=90032>

García Salinas, M. J. (2016). *Determinación del índice de refracción de Materiales Transparentes*. Retrieved from <https://w3.ual.es/~mjgarcia/practica9.pdf>

Ghaffarivardavagh, R., Nikolajczyk, J., Anderson, S., & Zhang, X. (2019). Ultra-open acoustic metamaterial silencer based on Fano-like interference. *Physical Review B*, 99(2), 1–10. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.99.024302>

Godbold, O. B., Soar, R. C., & Buswell, R. A. (2007). Implications of solid freeform fabrication on acoustic absorbers. *Rapid Prototyping Journal*, 13(May), 1–8. <https://doi.org/10.1108/13552540710824805>

ISO 354. (2006). Acoustics — Measurement of sound absorption in a reverberation room. In *61010-1 © Iec:2001* (Vol. 2006).

- Jiménez, N., Romero-García, V., Pagneux, V., & Groby, J.-P. (2017). Absorción perfecta de baja frecuencia por paneles acústicos ultrafinos basados en metamateriales. *48º Congreso Español de Acústica, Encuentro Ibérico de Acústica, Tecniaústica, 1, 9*.
- Lafuente, M., & Genatios, C. (2016). Aisladores sísmicos ¿Una innovación en la ingeniería sismorresistente? In Banco de Desarrollo de América Latina (Ed.), *Introducción al uso de aisladores y disipadores en estructuras*. (p. 190). Retrieved from file:///C:/Users/Lenovo/Downloads/Usodeaisladoresydisipadoresenestructuras.pdf%0Aascioteca.caf.com
- Lee, S. H., Park, C. M., Seo, Y. M., Wang, Z. G., & Kim, C. K. (2010). Composite Acoustic Medium with Simultaneously Negative Density and Modulus. *Physical Review Letters*, *054301*(FEBRUARY), 1–4. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.104.054301>
- Li, J., & Chan, C. T. (2004). Double-negative acoustic metamaterial. *Physical Review E*, *70*(May), 4. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.70.055602>
- Liu, Z., Zhang, X., Mao, Y., Zhu, Y. Y., Yang, Z., Chan, C. T., & Sheng, P. (2012). Locally resonant sonic materials. *Science*, *289*(May), 1734–1736. <https://doi.org/10.1126/science.289.5485.1734>
- Lu, L., Yamamoto, T., Otomori, M., Yamada, T., Izui, K., & Nishiwaki, S. (2013). Topology optimization of an acoustic metamaterial with negative bulk modulus using local resonance.

ELSEVIER (Finite Elements in Analysis and Design), 72(May), 1–12.
<https://doi.org/10.1016/j.finel.2013.04.005>

Lu, Z., Yu, X., Lau, S. K., Khoo, B. C., & Cui, F. (2019). Membrane-type acoustic metamaterial with eccentric masses for broadband sound isolation. *ELSEVIER (Applied Acoustics)*, 157(August), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.107003>

Ma, G., Fan, X., Sheng, P., & Fink, M. (2018). Shaping reverberating sound fields with an actively tunable metasurface. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(26), 6. <https://doi.org/10.1073/pnas.1801175115>

Muamer, K., Graeme W, M., Hecke, M. van, & Wegener, M. (2019). 3D metamaterials. *Nature Reviews Physics*, 1(January), 198–210. Retrieved from <https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:2320/articles/s42254-018-0018-y#citeas>

Muñoz Díaz, P. (1985). Determinación de la absorción e impedancia acústica del corcho: método del tubo de impedancia. *Boletín de Información Técnica - AITIM*, 1(1998), 8–13.

Musiki. (2019). MUSIKI. Retrieved from Ancho de Banda (Δf) website: [http://musiki.org.ar/Ancho_de_banda_\(\$\Delta f\$ \)](http://musiki.org.ar/Ancho_de_banda_(\Delta_f))

Noor, A. (2010). *Metamaterial Electromagnetic Absorbers and Plasmonic Structures* (The University of Manchester). Retrieved from <https://core.ac.uk/download/pdf/40032749.pdf>

Oliveira Sousa, R. W. (2018). Vibroacoustic Modeling of Periodic Cylindrical Shells with Internal Fluid via Wave Finite Element Method. Universidad de Estadual de Campinas.

Pérez, T. (2018). Metamaterial 3D para el aislamiento a ruido aéreo. *Revista de Acústica*, 49(Agosto), 14–20.

Ramírez García, G. (2018). *Diseño de guías de onda utilizando cristales fonónicos para aplicaciones de la disipación local de energía acústica*. Universidad Autónoma del Estado de México.

Rezaei, S., Eskandari-Ghadi, M., & Rahimian, M. (2016). Simulation-based conceptual design of an acoustic metamaterial with full band gap using an air-based 1-3 piezoelectric composite for ultrasonic noise control. *ELSEVIER (Comptes Rendus - Mecanique)*, 345(February), 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.crme.2016.11.003>

Shelby, R. A., Smith, D. R., & Schultz, S. (2001). Experimental verification of a negative index of refraction. *Science*, 292(5514), 77–79. <https://doi.org/10.1126/science.1058847>

Spiouzas, I. (2017). *Aplicaciones de cristales sónicos a cavidades resonantes y localización de fuentes sonoras* (Universidad Nacional de Quilmes). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10391.68008>

- Taborga Pérez, M. (2018). Metamaterial 3D para el aislamiento a ruido aéreo. *Revista de Acústica*, 49(August), 14–20.
- Tauseef Asim, M., & Ahmed, M. (2015). Metamaterial inspired microstrip antenna investigations using metascreens. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2015(December), 11. <https://doi.org/10.1155/2015/236136>
- Tobio, J. M., & Departamento de Metrología del I.E.T.c.c. (1970). aislamiento acústico. *Instituto de Ciencias de La Construcción Eduardo Torroja*, 23(5), 31. Retrieved from <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/>
- Vasseur, J. O., Deymier, P. A., Frantziskonis, G., Hong, G., Djafari-Rouhani, B., & Dobrzynski, L. (1998). Experimental evidence for the existence of absolute acoustic band gaps in two-dimensional periodic composite media. *Journal of Physics Condensed Matter*, 10(April), 2–15. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/10/27/006>
- Veselago, V., Braginsky, L., Shklover, V., & Hafner, C. (2006). Negative Refractive Index Materials. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 3(5), 603–623. <https://doi.org/10.1166/jctn.2006.002>
- Xie, Y., Popa, B. I., Zigoneanu, L., & Cummer, S. A. (2013). Measurement of a broadband negative index with space-coiling acoustic metamaterials. *Physical Review Letters*, 110(17), 1–4. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.110.175501>

- Zahonero Iñesta, D. (2018). Absorción de metamateriales en estructura periódica. *Revista de Acústica*, 49(August), 20–25.
- Zangeneh-Nejad, F., & Fleury, R. (2019). Active times for acoustic metamaterials. *Elsevier B.V.*, 4(November 2018), 100031. <https://doi.org/10.1016/j.revip.2019.100031>
- Zhang, S., Yin, L., & Fang, N. (2009). Focusing ultrasound with an acoustic metamaterial network. *Physical Review Letters*, 102(May), 1–4. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.102.194301>
- Zhu, J., Christensen, J., Jung, J., Martin-Moreno, L., Yin, X., Fok, L., ... Garcia-Vidal, F. J. (2011). A holey-structured metamaterial for acoustic deep-subwavelength imaging. *Nature Physics*, 7(1), 52–55. <https://doi.org/10.1038/nphys1804>
- Zhu, S., & Zhang, X. (2018). Metamaterials: Artificial materials beyond nature. *National Science Review*, 5(February), 131–131. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwy026>
- Zilkowski, R. W., & Engheta, N. (2006). Three-dimensional volumetric DNG metamaterials. In J. Wiley & Sons & IEEE (Eds.), *Metamaterials: Physics and Engineering Explorations* (p. 40). Estados Unidos.