



Informe de vigilancia Tecnológica 2024

Control acústico, vibratorio y de impactos mediante simulación, diseño y experimentación de METAmateriales



Sobre el informe

Este informe ha sido elaborado por la Asociación Empresarial de Investigación Centro Tecnológico Naval y del Mar (CTN) gracias al Convenio suscrito con el Instituto de Fomento de la Región de Murcia con el apoyo del fondo FEDER.

Autores: Isabel Hernández,

Más información: www.ctnaval.com



Fondo Europeo de
Desarrollo Regional

"Una manera de
hacer Europa"

Índice

1.	Introducción.....	4
2.	Metodología.....	5
3.	Estado del arte.....	7
	3.1 Metamateriales para control acústico.....	7
	3.2 Metamateriales para control de vibraciones.....	9
	3.3 Metamateriales para control de impacto.....	10
	3.4 Potenciales procesos de fabricación de metamateriales.....	12
	3.5 Técnicas de envejecimiento e inspección para metamateriales.....	13
4.	Tendencias.....	15
	4.1 Literatura Científica.....	15
	4.1.1 Análisis de tendencias en literatura.....	24
	4.2 Proyectos.....	25
	4.2.1. Análisis de la financiación europea.....	25
	4.2.2 Análisis de la financiación europea.....	29

1. Introducción

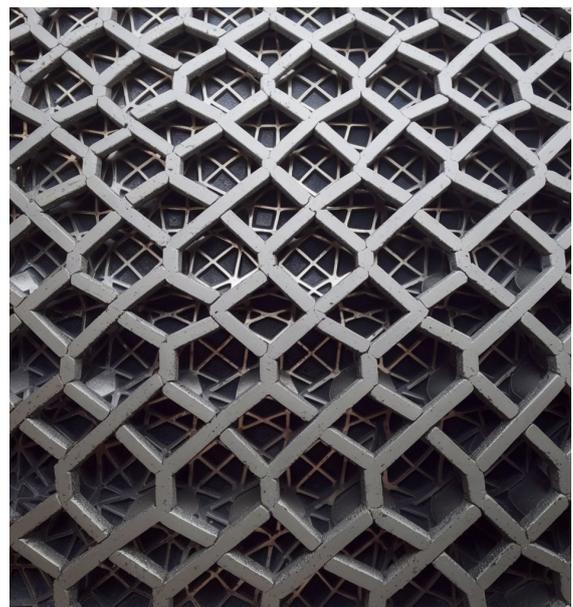
Este informe, elaborado por el equipo del Centro Tecnológico Naval y del Mar, tiene como finalidad ofrecer al tejido empresarial una mejora en el conocimiento del entorno que permita detectar tendencias y desarrollar estrategias adecuadas, basadas en niveles superiores de certidumbre a través de la captación y divulgación de información y conocimiento de importancia estratégica en los ámbitos social, tecnológico y económico, que incidan en la detección de nuevas oportunidades de desarrollo regional.

Los contenidos de este informe están estrechamente relacionados con el desarrollo del proyecto *Control acústico, vibratorio y de impactos mediante simulación, diseño y experimentación de metamateriales*.

Este proyecto aborda una investigación teórica y experimental sobre distintas configuraciones de metamateriales diseñados para obtener elevadas prestaciones de control del sonido, de vibraciones y bajo impactos. La consolidación de esta tecnología teniendo en cuenta procesos de fabricación avanzados e industrializados, así como el estudio pormenorizado del envejecimiento sobre la integridad de los metamateriales y sus capacidades de control, permitirá la materialización de soluciones a mayor escala.

Para la ejecución de COMETA se diseñará una metodología que integre los últimos avances en la modelización y simulación del control acústico, de vibraciones y de impactos basados en metamateriales (capitalizando resultados de investigaciones previas, tanto en agua como en aire), así como procesos de fabricación industrializada y ensayos de envejecimiento e inspección estructural, de modo que cada configuración testada en laboratorio pueda replicarse a un nivel y escala industrial.

Así, el verdadero potencial de los metamateriales pasa por desarrollar tecnologías y métodos de fabricación escalables para transferir los descubrimientos realizados por los investigadores a materiales producibles en masa para cubrir las necesidades de la industria.



Para la realización de este informe se han aplicado técnicas de Vigilancia Tecnológica, una herramienta al servicio de las empresas y organizaciones que permite detectar oportunidades y amenazas aportándoles ventajas competitivas y fundamentos para la toma de decisiones estratégicas mediante la selección y análisis de información de diversos tipos (científica, tecnológica, comercial, de mercado, social...).

Para ello, se parte de una introducción metodológica sobre las técnicas y fases de la Vigilancia Tecnológica que se han aplicado para el desarrollo del informe. A continuación, se introduce la Economía Azul como iniciativa europea con el fin de contextualizar los contenidos temáticos del informe. Seguidamente se realiza un análisis del estado de la técnica, proyectos y literatura científica.

2. Metodología

La vigilancia tecnológica se define como un proceso organizado, selectivo y continuo de captar información externa sobre tecnología, analizarla y transformarla en **conocimiento útil para la toma de decisiones**, reduciendo riesgos y permitiendo anticiparse a los cambios. Su objetivo principal es **generar una ventaja competitiva** para la empresa al proporcionar datos clave.

Los datos clave que genera la vigilancia tecnológica para generar una ventaja competitiva frente a la competencia son:



Ilustración 1. Finalidad de la Vigilancia Tecnológica

Para el desarrollo de la Vigilancia Tecnológica el primer paso es plantear los aspectos básicos : ¿Cuál es el objeto de la vigilancia? ¿Qué debemos vigilar? ¿Qué información buscar? ¿Dónde localizarla?



Cuando el objetivo de la VT está claramente delimitado, se procede a planificar la estrategia de búsqueda. Para el despliegue de esta fase conviene tener en cuenta que la información puede presentarse de dos formas: estructurada y no estructurada. La primera es propia de las bases de datos, conjuntos de datos homogéneos, ordenados de una forma determinada, que se presenta en forma legible por ordenador. Su unidad es el registro o ficha de un artículo científico o una patente- que presenta la información ordenada en campos: autor, título, fecha de publicación, titular de la patente, inventores, etc. En cambio, la información no estructurada se presenta en textos sin un formato determinado (noticias de periódicos, sitios web, blogs, correos electrónicos) cuyo tratamiento requerirá de nuevas herramientas capaces de “leer” y analizar estos textos. Estas herramientas son útiles también para analizar la información de textos completos de artículos científicos o de patentes. Hoy se considera que el texto es la mayor fuente de información y conocimiento para las empresas..

Tras la selección de las palabras clave se automatiza la búsqueda en función de las diferentes tipologías de fuentes a utilizar, se lanza la misma y se filtran los resultados en términos de pertinencia, fiabilidad, relevancia, calidad y capacidad de contraste.

Una vez comprobada la calidad de la información, los métodos de análisis han de garantizar su valor para la explotación de los mismos. El objetivo del análisis es transformar la información en bruto recogida en un producto con alto valor añadido. A partir de aquí, la aportación de los expertos es crítica para crear información avanzada, para generar conocimiento. Pasamos de una masa ingente de información en distintos formatos y lugares a una etapa en la que se captura la información más relevante, se organiza, indexa, almacena, filtra y, finalmente, con la opinión del experto que aporta en este punto del proceso un máximo valor añadido.

A continuación, se incluye un esquema con las distintas fases de la metodología empleada durante la generación de este informe.



3. Estado del arte

3.1 Metamateriales para control acústico

Un metamaterial acústico (MA) es un material diseñado para optimizar propiedades acústicas como absorción, transmisión o dispersión, superando las limitaciones de materiales convencionales. Estos materiales pueden exhibir propiedades anómalas, como densidad y módulo de Young negativos, lo que permite crear sistemas acústicos innovadores. Entre sus aplicaciones potenciales están las capas acústicas (que logran invisibilidad acústica), lentes acústicas de alta resolución, diodos acústicos y recolectores de energía acústica¹.

Muy relacionado con los metamateriales, existe el concepto de **metasuperficie acústicas** que, aunque no hay una definición unívoca^{2,3,4}, se emplea específicamente para aquellos MAs con grosor por debajo de la longitud de onda típica de la aplicación de dicho sistema.

La teoría de los metamateriales acústicos está bien establecida⁵, lo que ha permitido su desarrollo para aplicaciones militares^{6,7,8} y civiles^{9,10,4}. Sin embargo, la demanda de materiales ligeros y delgados para absorción de ruido e insonorización impulsa la investigación continua en este campo.

¹ W.S.Gan. New Acoustic based on Metamaterials. Eng. Materials. Springer, Acoustical Technologies, Singapore Pte Ltd (2018)

² Lee, et al. Acoustically sticky topographic metasurfaces for underwater sound absorption. J Acoust Soc Am, vol. 143, 1318 (2018)

³ H. Zhong, et al. 2D underwater acoustic metamaterials incorporating a combination of particle-filled polyurethane and spiral-based local resonance mechanisms. Composite Structures, Vol. 220, pp. 1-10 (2019)

⁴ J.Me, X.Zhang, Y.Wu. Ultrathin metasurface with high absorptance for waterborne sound. Journal of Applied Physics 123, 091710 (2018)

⁵ Dirección General de Armamento y Material. Subdirección General de Tecnología e Innovación. Los metamateriales y sus aplicaciones en defensa. Ministerio de Defensa, monografías del SOPT (2011)

⁶ C.Audoly, F.Reynard, Y.Renou. Acoustic metamaterials and possible applications for naval systems. Metamaterials 2017, Marseilles (Aug.2017)

⁷ Ch.Qian, Y.Li. Review on Multi-scale Structural Design of Submarine Stealth Composite. 2nd International Conference on Architectural Engineering and New Materials (2017)

⁸ Q.Chen, et al. Review of Phononic crystals and acoustic metamaterials. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 788, 012052 (2020)

⁹ V.Rpmero-García, A-Ch. Hladky-Hennion. Fundamentals and Applications of Acoustic Metamaterials: From Seismic to Radio Frequency. Part 3: Applications of Acoustic Metamaterials. Wiley (2019)

¹⁰ R.Kumar, et al. Overview on metamaterial: History, types and applications. Materials Today: Proceedings, vol. 56, Part 5 (2022)

En aplicaciones submarinas, los metamateriales tienen un desarrollo más reciente y limitado debido a las condiciones complejas del entorno marino, como las altas presiones hidrostáticas. Pese a ello, ofrecen un gran potencial para mejorar la reducción de ruido, vibraciones y eco, relacionado con una mayor discreción acústica y un menor impacto ambiental.

La discreción acústica mide qué tan indetectable es una embarcación, considerando dos factores principales: el ruido radiado, generado por propulsores, cavitación, vibraciones del casco y otros elementos, y la fuerza del blanco, que refleja el eco de la embarcación al ser detectada por sonar.

Para abordar estos aspectos, los metamateriales submarinos se utilizan principalmente en recubrimientos acústicos, divididos en dos tipos: recubrimientos de desacople acústico, diseñados para reducir las vibraciones transmitidas desde el interior del casco al agua, disminuyendo la eficiencia de radiación acústica mediante una baja impedancia acústica; y recubrimientos anecoicos, enfocados en absorber la mayor cantidad posible de energía acústica en un rango específico de frecuencias, lo que ayuda a reducir la fuerza del blanco de la nave.

Recientes investigaciones han demostrado que se puede conseguir un alto coeficiente de absorción en bajas frecuencias usando metasuperficies acústicas^{6,11} o cristales fonónicos apilados, que permiten estos recubrimientos acústicos. Aplicaciones más exóticas, como capas de invisibilidad acústica o absorbentes omnidireccionales se han propuesto y realizado en algunos casos^{12,13,14}, aunque es necesaria más investigación. Y, aunque nos hemos centrado en absorción, también hay dispositivos que facilitan la transmisión acústica entre interfases, por ejemplo, entre agua y aire, permitiendo una comunicación no encontrada naturalmente.

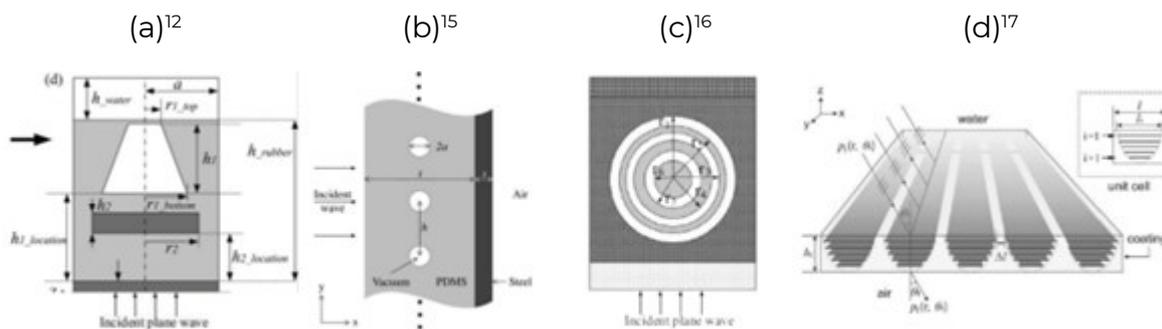


Figura 1. Algunos diseños innovadores de metamateriales con elementos sólidos. Los modelos (a), (b) y (c) corresponden a paneles con distintos tipos de inserciones; el modelo (d) corresponde a un metamaterial basado en un gradiente de capas.

¹¹ A.J.Hicks, M.R.Haberman, P.S.Wilson. Subwavelength acoustic metamaterial panels for underwater noise isolation. J Acoust Soc Am, vol.138, n°3 (2015)

¹² N. Gao, K. Lu. An underwater metamaterial for broadband acoustic absorption at low frequency. Applied Acoustics, vol. 169, p. 107500 (2020)

¹³ Y.Bi, et al. Experimental demonstration of three-dimensional broadband underwater acoustic carpet cloak. App. Phys. Lett. 112, 223502 (2018)

¹⁴ J.Chen, J.Liu, X.Liu. Broadband underwater acoustic carpet cloak based on pentamode materials under normal incidence. AIP Advances 8, 085024 (2018)

¹⁵ G. S. Sharma, et al. Acoustic performance of gratings of cylindrical voids in a soft elastic medium with a steel backing. J Acoust Soc Am, vol. 141, n° 6, pp. 4694–4704 (2017)

¹⁶ K. Shi, et al. Underwater sound absorption characteristics of metamaterials with steel plate backing. Applied Acoustics, vol. 153, pp. 147–156, (2019)

¹⁷ Y. Zhang, et al. Subwavelength and quasi-perfect underwater sound absorber for multiple and broad frequency bands. J Acoust Soc Am, vol. 144, n° 2, p. 648, (2018)

Por último, destacamos, a nivel nacional, la relevancia en este estado del arte del proyecto MetaSub (Metamateriales acústicos para la reducción de firma de Submarinos), financiado por la convocatoria COINCIDENTE del Ministerio de Defensa, y liderada por el CTN que, aunque se encuentra en la primera fase de su ejecución, sienta las bases y avanza en el desarrollo de metamateriales para aplicaciones subacuáticas.

3.2 Metamateriales para control de vibraciones

En los últimos años, ha aumentado el interés en el uso de técnicas de control pasivo para reducir la vibración y suprimir la inestabilidad aeroelástica.

Aunque las medidas clásicas de control pasivo son confiables, no se adaptan de manera óptima al entorno de vibración. En este contexto, los metamateriales elásticos han surgido como una solución innovadora. Estas estructuras, basadas en elementos localmente resonantes, pueden inhibir la propagación de ondas en ciertos rangos de frecuencia, logrando así la supresión de vibraciones.

Los metamateriales ofrecen ventajas significativas en términos de rendimiento y adaptabilidad, y se espera que jueguen un papel importante en el control de vibraciones en diversas aplicaciones industriales y estructurales.

Diversos estudios recientes han explorado el diseño y las aplicaciones de metamateriales para mejorar la supresión de vibraciones. Hao¹⁸ investigó un haz metamaterial con resonadores locales y soportes periódicos, logrando ampliar las brechas de banda mediante el acoplamiento entre resonancia local y brechas de Bragg. Banerjee utilizó una disposición graduada de frecuencias de resonancia en lugar de una periódica, ofreciendo soluciones para el aislamiento de vibraciones de baja frecuencia y banda ancha. Hu¹⁹ diseñó un haz metamaterial graduado y analizó cómo el espaciado de frecuencia y la amortiguación influyen en la supresión de vibraciones. Basta²⁰ evaluó haces metamateriales con resonadores lineales y no lineales, mostrando que un ajuste adecuado de los parámetros mejora la absorción de vibraciones multimodo. Li²¹ diseñó una placa sándwich con resonadores de haz de masa, demostrando una destacada atenuación de vibraciones. Por otro lado, Wang²² propuso una placa sándwich con resonadores distribuidos periódicamente, investigando los mecanismos de formación de bandas prohibidas mediante el análisis de modos resonantes.

Jin²³ diseñó una metaestructura multifuncional con estructura de nido de abeja y resonado-

¹⁸ S. Hao, et al. Numerical and experimental investigations on the band-gap characteristics of metamaterial multi-span beams. *Physics Letters A*, Vol.383 (2019)

¹⁹ G. Hu, et al. Metamaterial beam with graded local resonators for broadband vibration suppression, *MSSP*, Vol.146, (2021)

²⁰ E.E. Basta, M. Ghommem, S.A. Emam, Vibration suppression and optimization of conserved-mass metamaterial beam, *Int. J. Non Linear Mech.* Vol.120, (2020)

²¹ J. Li, X. Fan, F. Li, Numerical and experimental study of a sandwich-like metamaterial plate for vibration suppression, *Composite Structures*, Vol.238, (2020)

²² Q. Wang, et al. Bandgap properties in metamaterial sandwich plate with periodically embedded plate-type resonators, *MSSP*, Vol.151, (2021)

²³ Y. Jin, et al. A multifunctional honeycomb metastructure for vibration suppression, *Int. J. of Mech. Sciences*, Vol.188, (2020)

res locales, logrando un control superior de vibraciones y sintonización. Xiao²⁴ desarrolló fórmulas para estimar bandas prohibidas y analizó los mecanismos de formación de bandas en estructuras periódicas, enfocándose en la propagación de ondas de flexión y mitigación de vibraciones. Ambos estudios profundizan en las propiedades de los metamateriales para la supresión de vibraciones.

Los cristales fonónicos localmente resonantes son estructuras artificiales periódicas con gran potencial para controlar vibraciones de baja frecuencia. Una propuesta es una estructura de tablero de cristal fonónico que, utilizando el teorema de Bloch y el método de elementos finitos, permite calcular la estructura de banda y las características de banda prohibida. Los resultados muestran que la estructura de placa sándwich, con doble periodicidad, puede inhibir la transmisión de ondas de flexión y aislar la vibración de baja frecuencia.

En la mayoría de los estudios sobre metamateriales localmente resonantes, se ha utilizado el análisis de dispersión basado en células unitarias para obtener la estructura de banda. Sin embargo, este enfoque es limitado, ya que no proporciona información sobre el comportamiento modal ni es aplicable al análisis dinámico de estructuras de ingeniería con restricciones de límite.

Sugino desarrolló un método que utiliza el análisis modal para entender las bandas prohibidas en metaestructuras con condiciones de frontera especificadas, mejorando la comprensión del comportamiento dinámico y la supresión de vibraciones. El-Borgi²⁵ aplicó el análisis modal para estudiar la supresión de vibraciones en un haz de metamaterial elástico, analizando la formación de múltiples bandas prohibidas y considerando la geometría finita y un número limitado de resonadores locales.

Los avances en tecnologías aditivas, como la impresión tridimensional, permiten crear metamateriales para estructuras elásticas y protección contra vibraciones y golpes. Sin embargo, hay pocos estudios sobre su uso en estructuras de ingeniería comunes, como placas y carcasas reforzadas, especialmente para la supresión de vibraciones y características aeroelásticas. Se necesitan más investigaciones para explorar su potencial en estas aplicaciones y abordar los desafíos específicos de las estructuras convencionales.

3.3 Metamateriales para control de impacto

Los impactos repentinos causan grandes daños, por lo que es esencial desarrollar dispositivos resistentes a impactos para aviones, automóviles y buques. Se necesita combinar la capacidad de ajuste flexible y el comportamiento mecánico eficiente, algo difícil de lograr con los diseños actuales. Las estructuras de paredes delgadas, como las de tipo panal de abeja, son

²⁴Y. Xiao, et al. A feature interaction learning approach for crowdfunding project recommendation, Applied Soft Computing, Vol.122, (2021)

²⁵S. El-Borgi, Multiple bandgap formation in a locally resonant linear metamaterial beam: Theory and experiments, J. of Sound and Vibration, Vol.488, (2020)

resistentes a los choques debido a su ligereza y alto módulo específico, pero sus propiedades mecánicas no se pueden ajustar después de la fabricación.

Los metamateriales mecánicos tienen propiedades ajustables mediante el diseño de microestructuras, aunque su rango sintonizable puede verse limitado por el acoplamiento entre topologías estructurales y mecánica. Para mejorar la capacidad de compresión, se han utilizado unidades quirales con inestabilidades elásticas para crear metamateriales con relación de Poisson negativa, lo que aumenta su capacidad de carga en comparación con materiales de relación de Poisson positiva.

Un enfoque innovador para ensamblar metamateriales utiliza módulos de paredes delgadas con ranuras, eliminando el pico de impacto inicial y mostrando una resistencia al impacto comparable a los paneles cargados fuera del plano. Estos metamateriales forman puntos de bloqueo auxéticos discretos, evitando deformaciones indeseadas y garantizando alta eficiencia de absorción de energía. Además, permiten ajustar propiedades bajo demanda incluso después de la fabricación, adaptándose a diversas condiciones de carga y geometrías. Exhiben rigidez isotrópica y pueden mejorar la rigidez en una dirección específica sin aumentar la densidad, ofreciendo mayor eficiencia y versatilidad en aplicaciones cotidianas.

Los experimentos y simulaciones de modelado de elementos finitos (FEM) confirman la eficacia de los metamateriales propuestos, destacando su resistencia al impacto y capacidad de ajuste de propiedades. Estos avances ofrecen nuevas perspectivas para desarrollar dispositivos resistentes a impactos más eficientes y personalizables, con aplicaciones en protección personal, la industria automotriz y otras áreas donde la seguridad es crucial.

Los procesos de montaje y desmontaje de los metamateriales han demostrado ser convenientes, dotándolos de una capacidad de ajuste de propiedades bajo demanda para adaptarse a las características de carga mediante el control de parámetros básicos y la disposición distribuida de los módulos^{26, 27}.



²⁶ K. Yang, et al. Flexible, efficient and adaptive modular impact-resistant metamaterials. *Int J Mech Sci.* Vol. 239 (2023)

²⁷ H. Kocharyan, N. Karanjgaokar, Development of adaptive granular metamaterials for impact mitigation, *Extreme Mechanics Letters*, Vol58, (2023)

3.4 Potenciales procesos de fabricación de metamateriales

Las técnicas de fabricación de prototipos de metamateriales utilizadas en investigaciones son efectivas pero solo viables en laboratorios debido a su alto costo, tiempo requerido y aplicabilidad a pequeñas muestras. Sin embargo, existen otras tecnologías de fabricación en laboratorio con potencial para ser escalables a nivel industrial y viables para la producción de metamateriales tras ser adaptadas. A continuación, se mencionan algunas de estas tecnologías.

- **Impresión litográfica:** proceso de fabricación que permite obtener patrones a escala mili, micro o nanométrica. Este sistema de alta resolución las estructuras nanométricas se forman por deformación mecánica de un polímero fundido y su posterior enfriamiento o de un monómero o prepolímero para su curado mediante temperatura o luz.
- **Transferencia de patrones:** creación de elementos en un sustrato compatible antes de transferirlos al sustrato deseado. Por ejemplo, las superredes de nanocristales se pueden fabricar primero usando fuerzas de interfaz líquido para crear un conjunto, transfiriendo el conjunto a un molde estructurado topológicamente utilizando la técnica Langmuir-Schaefer y luego moviendo el conjunto estructurado a un sustrato final con técnicas de impresión de transferencia²⁸.
- **Fabricación aditiva:** ha avanzado rápidamente y es valiosa para crear prototipos de metamateriales²⁹. Aunque los métodos y equipos actuales no son suficientes para la producción comercial, una adaptación de la tecnología podría hacerla viable para la producción industrial de metamateriales. .
- **Self assembly processes:** a pesar de ser un concepto difícil de definir, a nivel básico se entiende como un proceso por el cual un sistema desordenado de componentes forma una estructura o un patrón organizado como consecuencia de una serie de interacciones entre dichos componentes. Numerosos estudios demuestran que es posible desarrollar sistemas de fabricación 3D para ensamblar nanopartículas y así conseguir estructuras complejas^{30,31,32}, lo cual ofrece muchas posibilidades para el futuro de cara a la fabricación de metamateriales.

²⁸ T. Paik, et al. Hierarchical Materials Design by Pattern Transfer Printing of Self-Assembled Binary Nanocrystal Superlattices, *NANO Lett.* (2017)

²⁹ M.R. Haberman, A.N. Norris, Acoustic metamaterials expand the parameter space of materials available for new acoustical devices by manipulating sound in unconventional ways. *Acoustics Today*, Vol.12, (2016)

³⁰ K.M. Young, Transdimensional inversion of ambient seismic noise for 3D shear velocity structure of the Tasmanian crust, *Geophysics*, Vol.78, nº3, (2013)

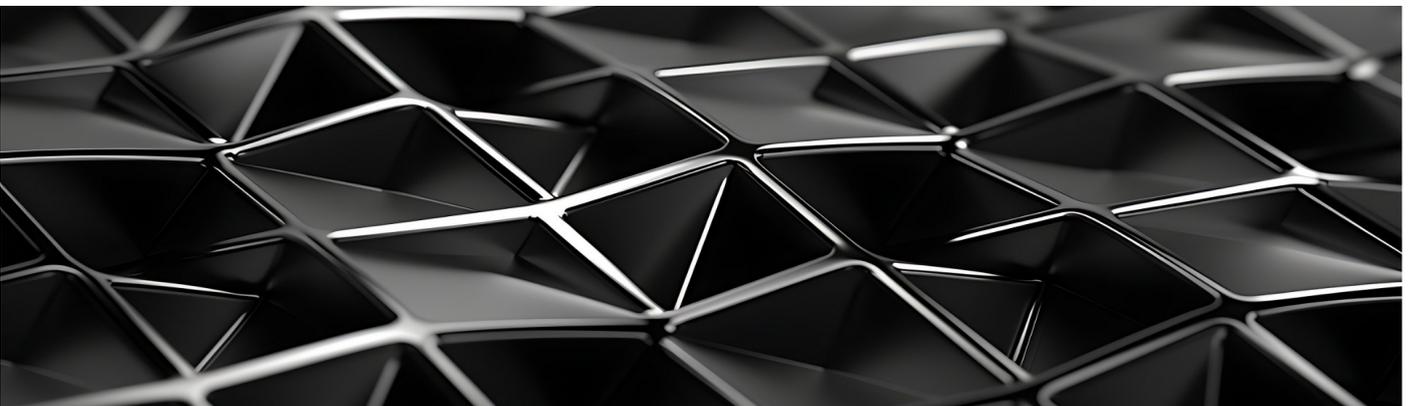
³¹ M. Li, C.K. Ober, Block copolymer patterns and templates, *Materials Today*, Vol.9, nº9, (2006)

³² M.A. Boles, et al. The surface science of nanocrystals, *Nature materials*, vol15, nº2, pp141-153, (2016)

Dependiendo del tipo de metamaterial en cuanto a geometría y clase de materiales empleados para su fabricación, serán más susceptibles unas técnicas de fabricación u otras. Por ejemplo, dada la experiencia del CTN en fabricación de paneles submarinos, las primeras probetas de metamateriales para el control acústico son más susceptibles de fabricar por colada, mientras que los paneles de mayores dimensiones pueden ser fabricadas por inyección o transferencia de patrones, según el caso. En cuanto a los materiales para control de vibración e impacto, los procesos de fabricación aditiva y fabricación 3D con impresión de metal son más típicamente empleados.

3.5 Técnicas de envejecimiento e inspección para metamateriales

Los metamateriales pueden reemplazar materiales clásicos al ofrecer propiedades mejoradas como resistencia, ductilidad, amortiguación y aislamiento. Proporcionan un comportamiento mecánico diferente bajo cargas dinámicas en comparación con el acero, permitiendo un mejor control de las respuestas mecánicas. Es crucial caracterizar completamente sus propiedades internas según su diseño, composición y estructura para futuras condiciones de funciona-



miento. Se investigarán sus propiedades en comparación con materiales convencionales utilizando diversas técnicas:

- Estudio del efecto de exposición del metamaterial a acondicionamientos ambientales que reproduzcan sus condiciones de trabajo, que constarán de:
 - Exposición a condiciones ambientales combinadas en ciclos variables de temperatura y humedad: permite analizar el comportamiento del metamaterial tras estar sometido a diferentes tiempos de exposición en ambientes controlados.
 - Deposición de condensación: se somete al metamaterial a entornos con deposición de agua en la superficie, simulando las condiciones de un ambiente exterior (como puede ser el efecto de la humedad, lluvia, nieve, etc.).



- Deposición de condensación ácida: la exposición es similar al anterior, pero generando una deposición en ambiente ácido, como puede ser un ambiente industrial.
- Corrosión en ambiente salino: se analiza el comportamiento del material en un ambiente salino como zonas de costa, playas, etc.
- Exposición a impactos: los metamateriales se someten a impactos cuantificables para, en fases posteriores, comprobar tanto el efecto ocasionado, como la respuesta del material dañado a la exposición de las atmósferas anteriores.
- Abrasión: se exponen de los metamateriales a ciclos de abrasión que emulen los daños provocados por roces de partículas. Posteriormente se evalúa el comportamiento de las muestras frente a la exposición a las atmósferas anteriores una vez provocado el ciclo de abrasión.
- Estudio del comportamiento de los metamateriales frente a cargas dinámicas. Para realizar este estudio se construye una estructura dispuesta con cilindros neumáticos, en cuyos extremos tienen dinamómetros de presión que traducirán la fuerza ejercida sobre el módulo. Este equipo permite realizar aplicaciones puntuales o de superficie sobre los metamateriales objeto del estudio y, mediante el uso de relojes comparadores, observar las deformaciones producidas sobre el módulo.

Tanto antes como después de realizar estos ensayos, se analiza el efecto de los ciclos de exposición ambiental y a cargas dinámicas sobre la estructura del material, mediante:

- Inspección visual para la detección de defectos evidentes.
- Inspección por ultrasonidos para la detección de defectos en la estructura interna de los metamateriales.
- Inspección del estado de la muestra mediante la aplicación de líquidos penetrantes para detección de defectos.
- Estudio micrográfico para determinar el efecto de los ensayos sobre la microestructura del metamaterial.
- Ensayo de tracción para determinar la influencia de la exposición en las propiedades mecánicas de los metamateriales.
- Ensayo de microdureza para determinar la influencia de la exposición sobre la dureza superficial del metamaterial.
- Ensayo de rugosidad para determinar cómo afecta la exposición a las propiedades mecánicas del metamaterial.
- Examen radiográfico para determinar si existen defectos en la estructura interna de los metamateriales.
- Estudio metalográfico de las zonas de los metamateriales en las que se ha encontrado algún defecto para comprobar la naturaleza del mismo.

4. Tendencias

4.1 Literatura Científica

1 Introduction to the special issue on acoustic metamaterial

Autores: Michael R. Haberman; Andrew N. Norris

Publicado en: The Journal of Acoustical Society of America 139, 3239 (2016)

DOI: 10.1121/1.4952413

Abstrac: Acoustic metamaterials research is an exciting and rapidly expanding topic in the field of acoustics. It has captured the imagination of the scientific community because of the promise to realize physical phenomena which had previously been deemed impossible such as acoustical lenses that defeat the diffraction limit, acoustic cloaks, and devices that enable non-reciprocal wave propagation...

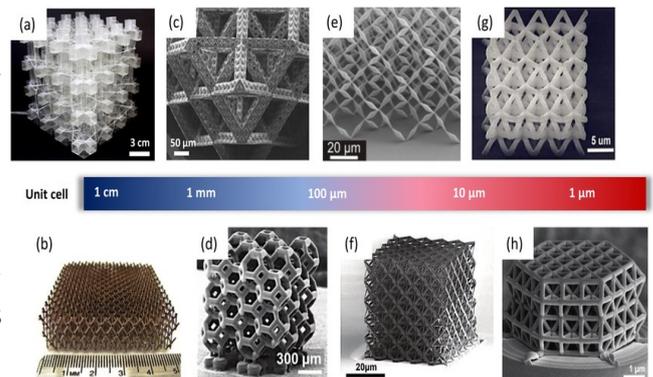
2 Mechanical metamaterials and their engineering applications

Autores: James Utama Surjadi, Libo Gao, Huifeng Du, Xiang Li, Xiang Xiong, Nicholas Xuanlai Fang, Yang Lu

Publicado en: Advanced engineering materials 21(3), (2019)

DOI: 10.1002/adem.201800864

Abstrac: In the past decade, mechanical metamaterials have garnered increasing attention owing to its novel design principles which combine the concept of hierarchical architecture with material size effects at micro/nanoscale...



3 Acoustically sticky topographic metasurfaces for underwater sound absorption

Autores: Hunki Lee, Myungki Jung, Minsoo Kim, Ryung Shin, Shinill Kang, Won-Suk Ohm, Yong Tae Kim

Publicado en: J Acoust Soc Am 143, 1318(2018)

DOI: 10.1121/1.5027247

Abstrac: A class of metasurfaces for underwater sound absorption, based on a design principle that maximizes thermoviscous loss, is presented. When a sound meets a solid surface, it leaves a footprint in the form of thermoviscous boundary layers in which energy loss takes place...

4

2D underwater acoustic metamaterials incorporating a combination of particle-filled polyurethane and spiral-based local resonance mechanisms

Autores: Haibin Zhong, Yinghong Gu, Bin Bao, Quan Wang, Jiuwei Wu

Publicado en: Composite Structures 220, 1-10(2019)

DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.03.091

Abstrac: This paper develops an underwater acoustic metamaterial plate with potential advantages of low-frequency broadband sound absorption and high hydrostatic pressure resistance...

5

Ultrathin metasurface with high absorptance for waterborne sound

Autores: Jun Mei, Xiujuan Zhang, Ying Wu

Publicado en: Journal of Applied Physics 123(9), (2018)

DOI: 10.1063/1.5009382

Abstrac: We present a design for an acoustic metasurface which can efficiently absorb low-frequency sound energy in water...

6

Acoustic metamaterials and possible applications for naval systems

Autores: Christian Audoly, François Reynard, Ygaal Renou

Publicado en: Metamaterials 2017

7

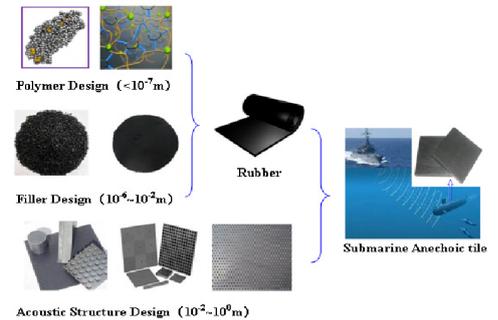
Review on multi-scale structural design of submarine stealth composite

Autores: Jun Mei, Xiujuan Zhang, Ying Wu

Publicado en: 2nd International Conference on Architectural Engineering and New Materials (2017)

DOI: 10.12783/dtetr/icaenm2017/7834

Abstrac: Research on the acoustic stealth structures of submarines primarily strives for low frequency, pressure resistance, and broad frequency domain absorption...



8 Review of phononic crystals and acoustic metamaterials

Autores: Qiqi Chen, Bo Zhang, Yutian Bai, Liheng Wang, M R M Rejab

Publicado en: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, (2020)

DOI: 10.1088/1757-899X/788/1/012052

Abstrac: As a new type of acoustic functional material, phononic crystal has great research value and application environment...

9 Overview on metamaterials: History, types and applications

Autores: Rakesh Kumar, Manoj Kumar, Jasgurpreet Singh Chohan, Santosh Kumar

Publicado en: Materials Today: Proceedings, 56(5), (2022)

DOI: 10.1016/j.matpr.2021.11.423

Abstrac: Metamaterial has received great interest during the last ten years in distinct field, owing of its key characteristics such as enhancement in bandwidth, radiated power, directivity and controls the direction of electromagnetic radiation...

10 Acoustic coatings for maritime systems applications using resonant phenomena

Autores: Pierre Méresse, Christian Audoly, Charles Croënne, Anne-Christine Hladky-Hennion

Publicado en: Comptes Rendus. Mécanique 343(12), 645-655(2015)

DOI: 10.1016/j.crme.2015.07.004

Abstrac: There is a great interest in the availability of acoustic coatings for maritime systems applications, in particular for the reduction of radiated noise in water...

11 Subwavelength acoustic metamaterial panels for underwater noise isolation

Autores: Ashley J. Hicks, Michael R. Haberman, Preston S. Wilson

Publicado en: The Journal of the acoustical society of America 138(3), (2015)

DOI: 10.1121/1.4929730

Abstrac: Acoustically thin metamaterial underwater noise isolation panels have been developed that provide as much as 16dB of noise isolation for a panel with a thickness just 160th of the wavelength in the host medium (fresh water) at 2.5 kHz...

12 An underwater metamaterial for broadband acoustic absorption at low frequency

Autores: Nansha Gao, Kuan Lu

Publicado en: Applied Acoustics 169, 107500(2020)

DOI: 10.1016/j.apacoust.2020.107500

Abstrac: In order to study and further develop underwater acoustic absorption structures, we present an underwater metamaterial for broadband acoustic absorption in this study, which is composed of viscoelastic rubber, conical cavity, cylindrical oscillator and backing steel...

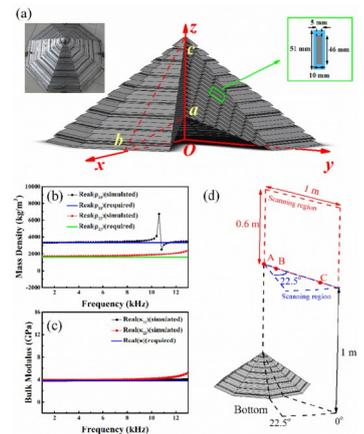
13 Experimental demonstration of three-dimensional broadband underwater acoustic carpet cloak

Autores: Yafeng Bi, Han Jia, Zhaoyong Sun, Yuzhen Yang, Han Zhao, Jun Yang

Publicado en: Applied Physics 112(22), 223502(2018)

DOI: 10.1016/j.apacoust.2020.107500

Abstrac: We present the design, architecture, and detailed performance of a three-dimensional (3D) underwater acoustic carpet cloak (UACC). The proposed system of the 3D UACC is an octahedral pyramid, which is composed of periodical steel strips...



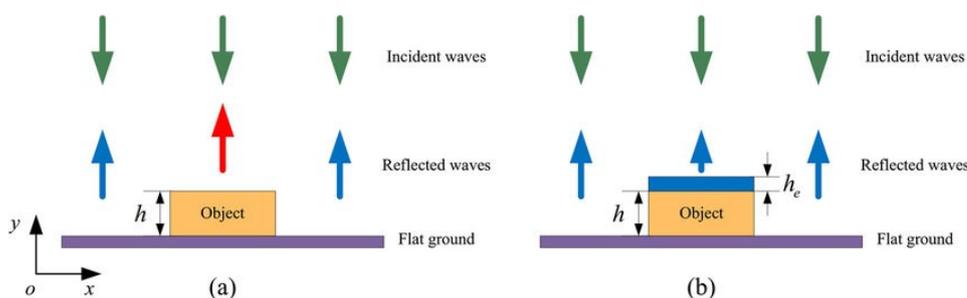
14 Broadband underwater acoustic carpet cloak based on pentamode materials under normal incidence

Autores: Jueguang Chen, Jiehui Liu, Xiaozhou Liu

Publicado en: AIP Advances 8(8), (2018)

DOI: 10.1063/1.5042451

Abstrac: Acoustic carpet cloak in air has become an attractive topic in the past few years and has been realized in many feasible ways...



15

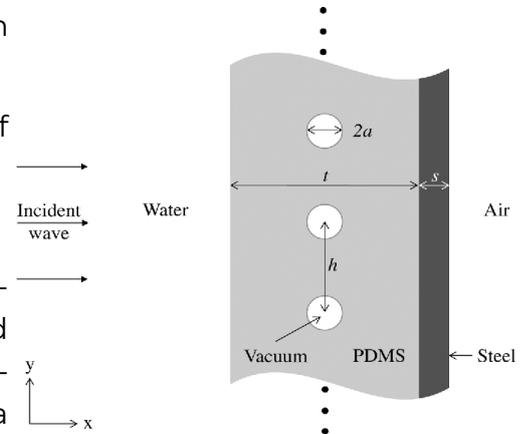
Acoustic performance of gratings of cylindrical voids in a soft elastic medium with a steel backing

Autores: Gyani Shankar Sharma, Alex Skvortsov, Ian MacGillivray, Nicole Kessissoglou

Publicado en: The journal of the acoustical society of America 141(6), (2017)

DOI: 10.1121/1.4986941

Abstrac: An approximate analytical model is presented to investigate sound transmission, reflection and absorption of a rubber-like medium comprising a single layer of periodic cylindrical voids attached to a steel backing...



16

Underwater sound absorption characteristics of metamaterials with steel plate backing

Autores: Kangkang Shi, Guoyong Jin, Tiangui Ye, Yantao Zhang, Mingfei Chen, Yaqiang Xue

Publicado en: Applied Acoustics 153, 147-156(2019)

DOI: 10.1016/j.apacoust.2019.04.016

Abstrac: Generally, the better sound absorption characteristics can be achieved in the low frequency band by embedding resonance units into the conventional anechoic coating...

17

Subwavelength and quasi-perfect underwater sound absorber for multiple and broad frequency bands

Autores: Yanni Zhang, Jie Pan, Kean Chen, Jie Zhong

Publicado en: The journal of the acoustical society of America 144(2), (2018)

DOI: 10.1121/1.5048797

Abstrac: A structure for an underwater sound absorber with subwavelength thickness and a quasi-perfect absorption property at multiple frequency bands is reported. This absorber consists of a viscoelastic coating layer embedded with periodically distributed plate scatterers (PSs)...

18

Numerical and experimental investigations on the band-gap characteristics of metamaterial multi-span beams

Autores: Shuaimin Hao, Zhijing Wu, Fengming Li, Chuanzeng Zhang

Publicado en: Physics Letters A 383(27)

DOI: 10.1016/j.physleta.2019.126029

Abstrac: A novel metamaterial multi-span beam with periodic simple supports and local resonators is designed and investigated. The frequency responses of the proposed metamaterial multi-span beam are computed by the spectral element method (SEM)...

19 Metamaterial beam with graded local resonators for broadband vibration suppression

Autores: Guobiao Hu, Andrew C. M. Austin, Vladislav Sorokin, Lihua Tang

Publicado en: Mechanical systems and signal processing 146(1), 106982(2021)

DOI: 10.1016/j.ymssp.2020.106982

Abstrac: This paper investigates a technique for broadband vibration suppression using a graded metamaterial beam. A series of local resonators with the same mass but different natural frequencies are attached to the beam...

20 Vibration suppression and optimization of conserved-mass metamaterial beam

Autores: Ehab E. Basta, Mehdi Ghommem, Samir A. Emam

Publicado en: International journal of non-linear mechanics 120, 103360(2020)

DOI: 10.1016/j.ijnonlinmec.2019.103360

Abstrac: In this paper, we investigate the nonlinear vibrations of a metamaterial structure that consists of a host Euler–Bernoulli beam attached to a periodic array of spring–mass–damper subsystems deployed for vibration absorption...

21 Numerical and experimental study of a sandwich– like metamaterial plate for vibration suppression

Autores: Jinqiang Li Jinqiang, Xinlei Fan, Fengming Li

Publicado en: Composite Structures 238(15), 111969(2020)

DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.111969

Abstrac: This paper presents a design for a sandwich-like plate containing mass-beam resonators to obtain a specific and low-frequency stopband...

22 Bandgap properties in metamaterial sandwich plate with periodically embedded plate-type resonators

Autores: Qiang Wang, Jinqiang Li, Yao Zhang, Yu Xue, Fengming Li

Publicado en: Mechanical systems and signal processing 151, 107375(2021)

DOI: 10.1016/j.ymssp.2020.107375

Abstrac: In this study, a novel plate-type resonator is proposed, and the bandgap properties of a metamaterial sandwich plate containing a two-dimensional periodic array of these plate-type resonators are numerically and experimentally investigated...

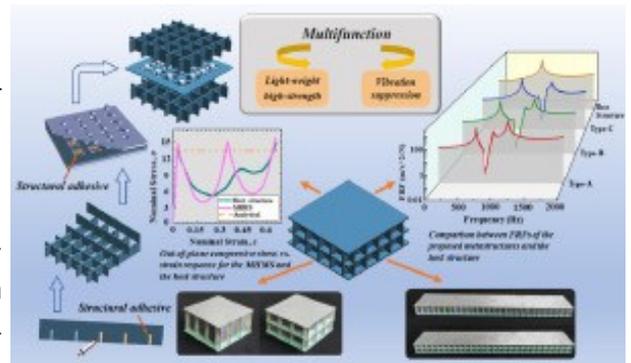
23 A multifunctional honeycomb metastructure for vibration suppression

Autores: Yang Jin, Yan Shi, Guo-Cai Yu, Guang-Tao Wei, Bin Hu, Lin-Zhi Wu

Publicado en: International journal of mechanical sciences 188(15), 105964(2020)

DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2020.105964

Abstrac: In this study, a multifunctional metastructure is proposed for vibration suppression by combining a honeycomb sandwich structure and a locally resonant metastructure...



24 Multiple bandgap formation in a locally resonant linear metamaterial beam: Theory and experiments

Autores: S. El-Borgi, R. Fernandes, P. Rajendran, R. Yazbeck, J.G. Boyd, D.C. Lagoudas

Publicado en: Journal of sound and vibration 488(8), 115647(2020)

DOI: 10.1016/j.jsv.2020.115647

Abstrac: This study presents a strategy of vibration suppression of a beam when multiple resonant frequencies of the structure are excited...

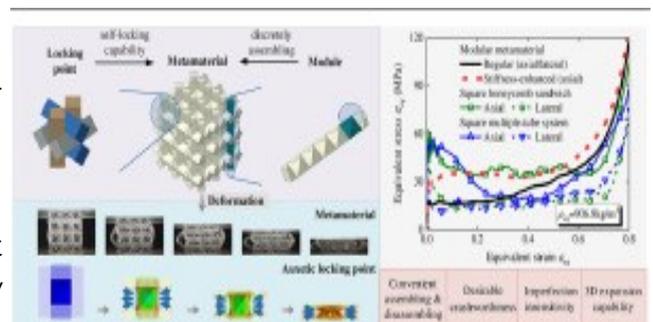
25 Flexible, efficient and adaptive modular impact-resistant metamaterials

Autores: Kuijian Yang, Liyu Rao, Lingling Hu, Fei Pan, Qiuyun Yin, Yuli Chen

Publicado en: International Journal of mechanical sciences 239, 107893(2023)

DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2022.107893

Abstrac: The mechanical properties of most impact-resistant devices cannot be flexibly adjusted after manufacture to adapt to complex engineering requirements...



26 Development of adaptive granular metamaterials for impact mitigation

Autores: Hrachya Kocharyan, Nikhil Karanjgaokar

Publicado en: Extreme mechanics letters

DOI: 10.1016/j.eml.2022.101943

Abstrac: Granular crystals exhibit highly nonlinear impulse responses and are therefore excellent candidate materials for applications such as vibration absorption, impact mitigation, and shock protection...

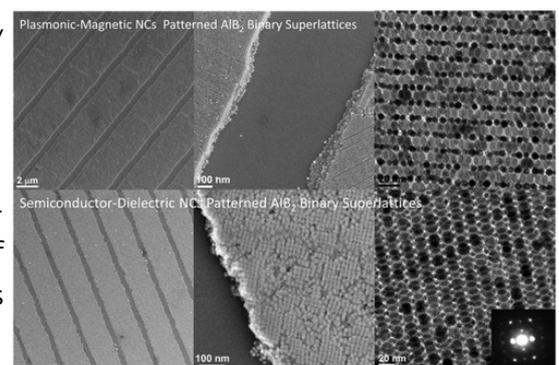
27 Hierarchical materials design by pattern transfer printing of self-assembled binary nanocrystal superlattices

Autores: Taejong Paik, Hongseok Yun, Blaise Fleury

Publicado en: Nano Lett 17(3), 1387-1394(2017)

DOI: 10.1021/acs.nanolett.6b04279

Abstrac: We demonstrate the fabrication of hierarchical materials by controlling the structure of highly ordered binary nanocrystal superlattices (BNSLs) on multiple length scales...



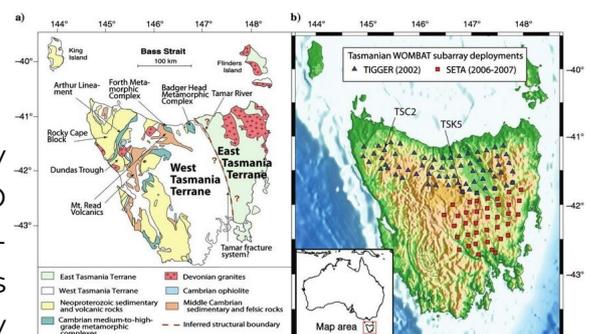
28 Transdimensional inversion of ambient seismic noise for 3D shear velocity structure of the Tasmanian crust

Autor: Mallory K. Young, Nicholas Rawlinson, Thomas Bodin

Publicado en: Geophysics 78(3), (2013)

DOI: 10.1190/geo2012-0356.1

Abstrac: Ambient seismic noise tomography has proven to be a valuable tool for imaging 3D crustal shear velocity using surface waves; however, conventional two-stage inversion schemes are severely limited in their ability to properly quantify solution...



29 Block copolymer patterns and templates

Autor: Mingqi Li, Christopher K. Ober

Publicado en: Materialstoday 9(9), 30-39(2006)

DOI: 10.1016/S1369-7021(06)71620-0

Abstrac: This review describes the chemical and physical aspects of patternable block copolymers and their use for nanostructure fabrication...

30 The surface science of nanocrystals

Autor: Michael A. Boles, Daishun Ling, Taeghwan Hyeon & Dmitri V. Talapin

DOI: 10.1038/nmat4526

Publicado en: Nature materials 15, 141-153(2016)

Abstrac: All nanomaterials share a common feature of large surface-to-volume ratio, making their surfaces the dominant player in many physical and chemical processes...

31 Estudio de la aplicación de los metamateriales en el diseño de antenas textiles

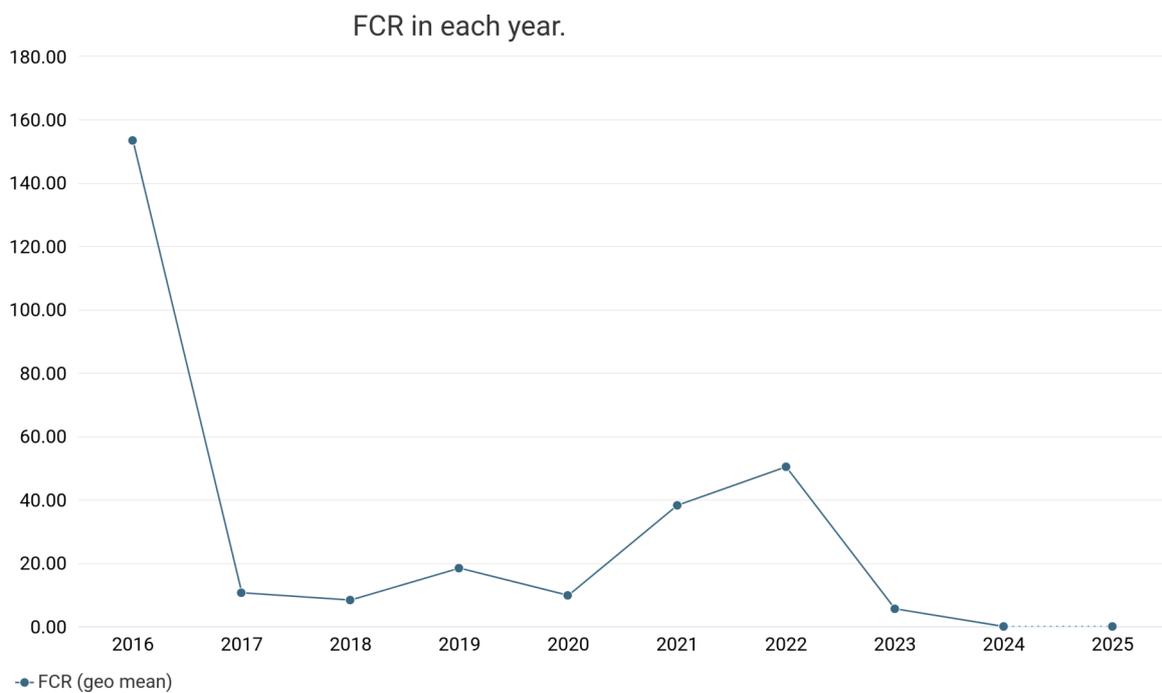
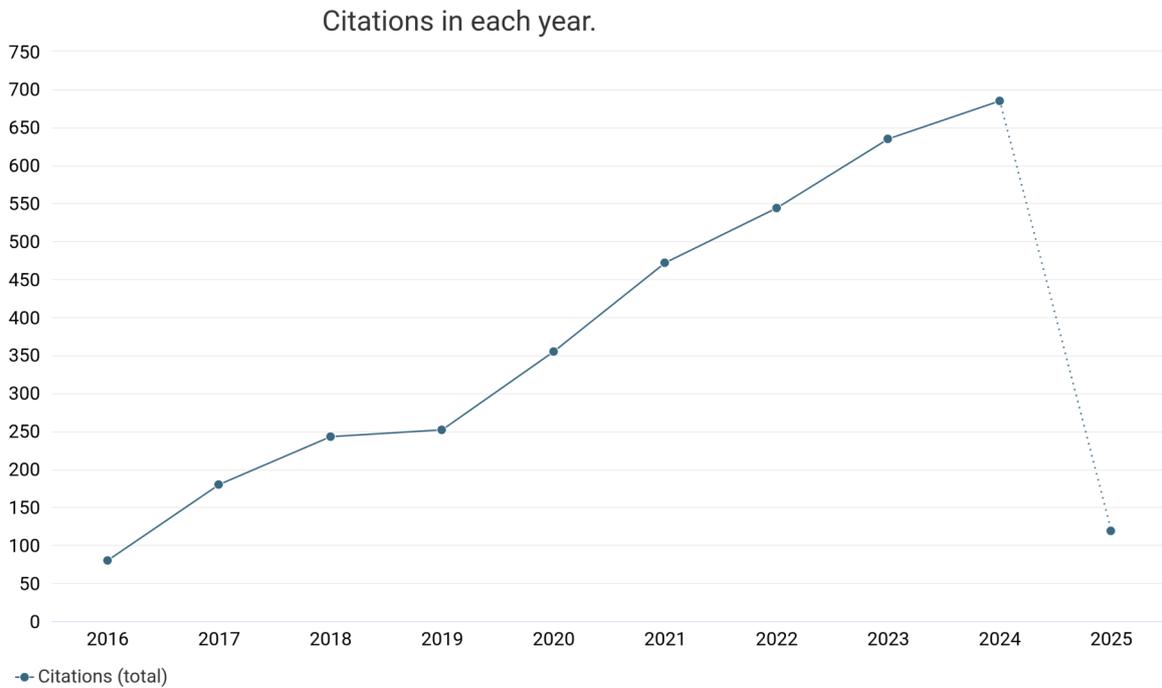
Autor: Leidy Xiomara Sanchez Torres, Claudia Herrera, María Restrepo

DOI: 10.33571/rpolitec.v15n29a9

Abstrac: Este artículo presenta una revisión documental concerniente al diseño de antenas textiles a través del uso de metamateriales; mencionando también los tipos de antenas, sus técnicas de implementación...



4.1.1 Análisis de tendencias en literatura



4.2 Proyectos

4.2.1. Análisis de la financiación europea

1 Materiales acústicos para la reducción de firmas de submarinos

Acrónimo: MetaSub

Financiado por: COINCIDENTE

Periodo de financiación: noviembre 2021—noviembre 2024

Resumen: El proyecto está enfocado a implementar una metodología que permita obtener distintas configuraciones de paneles, basados en metamateriales, que mejoren las prestaciones acústicas de los actuales paneles de la superestructura de los buques submarinos de la Armada.

[+ INFO](#)

2 Upgrading of naval platforms



**SEA
DEFENCE**

Acrónimo: SeaDefence

Financiado por: European Defence Industrial Development Programme (EDIDP 2019)

Periodo de financiación:

Resumen: aims to provide a roadmap of technologies to be included in the next generation of naval platforms and to be pursued in future European development programmes...

[+ INFO](#)

3 Manipulating Acoustic wavefronts using metamaterials for novel user interfaces

Acrónimo: Interfaces

Financiado por: H2020-EU.1.1

Periodo de financiación: 1 de mayo de 2018 - 31 de julio de 2024

Resumen: will leverage developments in acoustic meta-materials to build interactive systems that manipulate sound to create experiences with the same ease and fidelity as we are so accustomed to doing with light...

[+ INFO](#)



4

Frontiers in Phononics: Parity-Time Symmetric Phononic Metamaterials

Acrónimo: PHONOMETA

Financiado por: H2020-EU. 1. 1

Periodo de financiación: 1 de diciembre de 2016 - 30 de noviembre de 2022

Resumen: aims to explore novel properties of sound and the ability to design Parity-Time (PT) symmetric systems that define a consistent unitary extension of quantum mechanics...

[+ INFO](#)

5

eXclusions of Environmental vibrations affected by Railway Operations using metamaterials

Acrónimo: XeRo

Financiado por: H2020-EU. 1. 3

Periodo de financiación: 21 de febrero de 2022 - 30 de diciembre de 2025

Resumen: aims to enhance understanding of the mitigation effects of metamaterials for railway-induced environmental vibrations...

[+ INFO](#)

6

Nonlinear Energy Sink Metamaterial Approaches for Flow-Induced Vibration Attenuation

Acrónimo: METASINK

Financiado por: H2020-EU. 1. 3

Periodo de financiación: 1 de octubre de 2020 - 30 de septiembre de 2022

Resumen: Flow-induced vibration can take place in many engineering systems and structures such as bridges, offshore structures and marine cables due to high flow speed...

[+ INFO](#)

7

Adaptive and smart materials and structures for more efficient vessels

Acrónimo: ADAM4EVE

Financiado por: FP7

Periodo de financiación: 1 de enero de 2013 - 31 de diciembre de 2015

Resumen: development and assessment of applications of adaptive and smart materials and structures in the shipbuilding industry...

[+ INFO](#)

8

Metamaterials with resonant inclusions for acoustic stealth under hydrostatic pressure

Acrónimo: PANAMÁ

Financiado por: ASTRID

Periodo de financiación: 2017-2020

Resumen: initiate a technological breakthrough by developing a new class of locally-resonant passive acoustic materials for stealth and discretion in underwater acoustics...

[+ INFO](#)

9

Low Signature Self-Complementary Structure for Naval Applications

Acrónimo: SAFASNAV

Financiado por: ASTRID

Periodo de financiación: 2016-2019

Resumen: replacing the dielectric layers and metallic grids of the SAFAS absorbent structure (metamaterial) by specific materials appropriate to the naval environment...

[+ INFO](#)

10 Piezoelectric damping for flow-induced vibration mitigation

Acrónimo: HYDRAVIB

Financiado por: ASTRID

Periodo de financiación:

Resumen: aims to reduce the vibration-induced noise by proposing innovative solutions intended for the control of structural resonances under hydrodynamic flow...

[+ INFO](#)

11 Realisation and Demonstration of Advanced Material Solutions for Sustainable and Efficient Ships

Acrónimo: RAMSSES

Financiado por: H2020-EU. 3. 4

Periodo de financiación: 1 de junio de 2017 - 30 de noviembre de 2021

Resumen: aims to achieve recognition and a well-defined role for advanced materials in the European maritime industry...

[+ INFO](#)

12 Functional Acoustic Coatings with Soft Metamaterials

Acrónimo: BRENNUS

Financiado por: DS0303

Periodo de financiación: 2015-2019

Resumen: aims to create passive devices adjusted to classical ultrasonic instrumentation (metasurfaces), which allow for spatial control of sound (focusing, vortex) over short distances (less than the wavelength)...

[+ INFO](#)

13

Analysis Methods and Design Measures for the Reduction of Noise and Vibration Induced by Marine Propellers



Acrónimo: ProNoVi

Financiado por: MARTERA

Periodo de financiación: 2018-2021

Resumen: improve the numerical and experimental methods for the prediction of noise and vibrations induced by a propeller operating behind ship hull in full scale conditions...

[+ INFO](#)

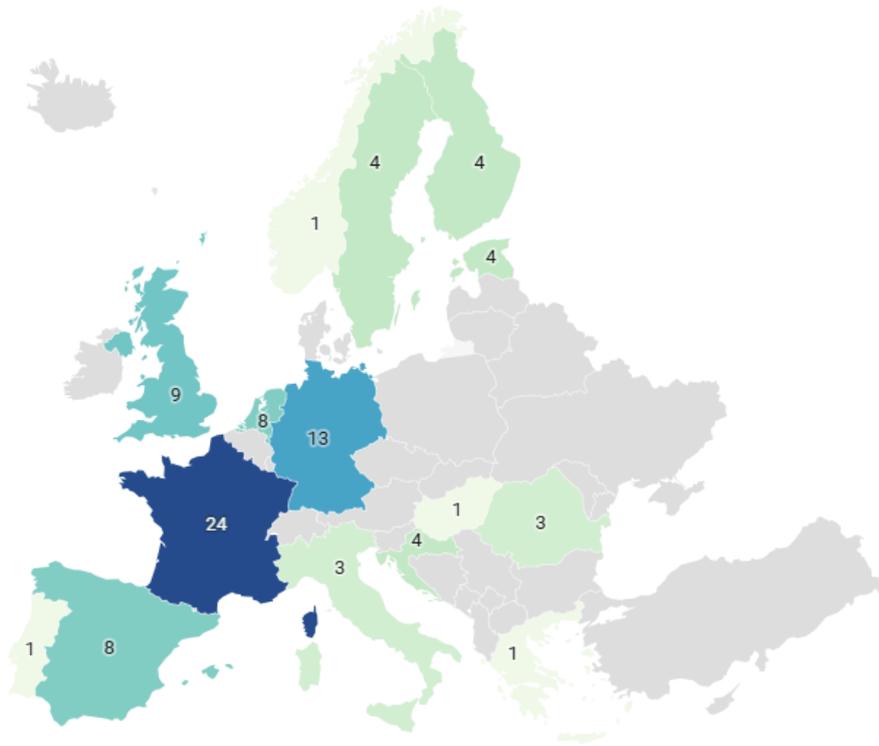
4.2.2 Análisis de la financiación europea

Los proyectos descritos en este informe están financiados bajo diversos programas como Horizonte 2020, European Defence Industrial Development Programme, FP7, ASTRID, MARTERA, entre otros. En particular, el programa Horizonte 2020 ha contado con un presupuesto total de 76.880 millones de euros.

A continuación, se presenta un mapa con el desglose de las organizaciones participantes por país.



Participantes por país



Detalle de participación en Europa