

- **Pantalla acústica de Cristal de Sonido**
- **Guías Sonoras Longitudinales Fresadas: Presente y futuro**
- **La carretera es la cantera: 100% reciclado**
- **Impacto del incremento del peso máximo de los vehículos pesados**
- **Control del hormigón del pavimento**
- **Cuadro de Mando Integral para mejorar la movilidad en centros históricos**
- **Sostenibilidad de las inversiones en carreteras en África sub-sahariana**



La vía más rápida para  
conseguir una junta segura.

**TOK®-Band SK**

Desarrollado para aumentar la rapidez de su trabajo. El perfil para juntas **TOK®-Band SK** sella las conexiones de forma segura y duradera. Sin imprimación. Cumple con la directriz ZTV Fug-StB 15 (Alemania).  
[denso-group.com](https://denso-group.com)

**TOK®-Band. El nº 1 de los perfiles de juntas.**





nº 233 / may-jun 2021

**EMPRESAS COLABORADORAS**

 **EIFFAGE**

 **PROBISA**

## 4 editorial

¿Y quién paga esta fiesta?

## artículos

- 6 Investigación del fenómeno acústico producido por redes de dispersores aislados y su aplicabilidad como dispositivos reductores de ruido en infraestructuras viarias**  
M.P. Peiró-Torres / J.V. Sánchez-Pérez / J. Redondo / J.M. Bravo / M. Ferri / M. Ballester-Ramos / F.J. Veja-Folch
- 15 Guías Sonoras Longitudinales Fresadas (GSLF): presente y futuro**  
Pedro Tomás Martínez
- 26 La carretera es la cantera: 100% reciclado**  
Nuria Uguet / Teresa Marín / Yannick Marquet / Olivier Petry / Jacques-Antoine Decamps / Nathalie Paquet
- 35 Impacto y repercusión del incremento del peso máximo de los vehículos pesados a 44 toneladas en España**  
José Manuel Vassallo Magro / Javier Tarrío Ortiz / José María Pérez Doval
- 48 Control del hormigón de pavimento. Avance en el uso del hormigón UHPC**  
Jesús Díaz Cuevas / Jaime C. Gálvez / Marcos García Alberti
- 59 Plan de mejora de accesibilidad y movilidad en el centro histórico de Matanzas (Cuba)**  
Orlando Santos Pérez / Homero Morciego Esquivel / Maylín Marqués León / Reynier Moll Martínez / Dianelys Nogueira Rivera
- 68 El impacto de la combinación de préstamos y subvenciones en la efectividad y sostenibilidad de las inversiones en carreteras en el África subsahariana**  
Antonio José Torres Martínez
- tribunas**
- 77 Redes viales bajo estrés: El caso de Uruguay**  
Christian Dunkerley
- 80 Carreteras de plástico reciclado: el camino hacia una infraestructura más sostenible**  
Friederike Voigt
- 82 área de servicio** más noticias en nuestra web: [www.aecarretera.com](http://www.aecarretera.com)
- desde el arcén**
- 94 Medallas de Honor de la Carretera 2020-2021**  
Javier Piedra Cabanes
- 98 guía profesional de empresas colaboradoras**



### CONSEJO DE REDACCIÓN

#### Vocales

José Manuel Alameda Villamayor  
M<sup>a</sup> Yolanda Alcaraz Nuño  
Fernando Argüello Álvarez  
Eduardo Ayuso Barrios  
Rosálía Bravo Antón  
Francisco García Sánchez  
Jesús Leal Bermejo  
M<sup>a</sup> Eugenia Martínez Donaire  
Enrique Miralles Olivar  
Elena de la Peña González  
Vicente Pérez Mena  
Juan José Potti Cuervo  
Sebastián de la Rica Castedo  
Miguel Ángel Salvia  
Ángel Sampedro Rodríguez  
Ana Serrano de la Fuente  
Pedro Tomás Martínez  
Francisco José Veja Folch  
Iñaki Zabala Zuazo  
Ángel Zarabozo Galán

### PRESIDENTE

José Vicente Martínez Sierra

### DIRECTOR

Jacobo Díaz Pineda

### DIRECTORA EJECUTIVA

Marta Rodrigo Pérez

### REDACTORA JEFE

Susana Rubio Gutiérrez

### DISEÑO Y MAQUETACIÓN

José María Gil

### EDICIÓN Y PUBLICIDAD

#### COMUNICACIÓN Y DISEÑO

O'Donnell, 18 - 5º H  
28009 Madrid  
Tel.: +34 91 432 43 18  
[comdis@cydiseno.com](mailto:comdis@cydiseno.com)  
[www.cydiseno.com](http://www.cydiseno.com)

#### ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE LA CARRETERA

Goya, 23 - 4º Derecha  
28001 MADRID  
Tel.: +34 91 577 99 72  
[aec@aecarretera.com](mailto:aec@aecarretera.com)  
[www.aecarretera.com](http://www.aecarretera.com)

### SUSCRIPCIÓN ANUAL

(Año 2020)

España:  
66 Euros (IVA incluido)

Europa:  
109 Euros

América:  
160 \$ / 155 Euros

Depósito Legal:  
M- 19.439-1975

ISSN: 0212 - 6389

Las opiniones vertidas en las páginas de *Carreteras* no coinciden necesariamente con las de la Asociación Española de la Carretera o las del Consejo de Redacción de la publicación.



## ¿Y quién paga esta fiesta?

**L**a Comisión Europea ha adoptado un conjunto de propuestas para adaptar las políticas de la UE en materia de clima, energía, uso del suelo, transportes y fiscalidad, a fin de reducir las emisiones netas de gases de efecto invernadero en al menos un 55% de aquí a 2030”, reza el comunicado de prensa emitido el 14 de julio.

Dichas propuestas constituyen un programa que se ha dado en llamar Fit to 55.

Se trata de un paquete de medidas desproporcionadas que abarcan, entre otras: la aplicación del comercio de derechos de emisiones a nuevos sectores –léase *aéreo* y *marítimo*–, mayor uso de las energías renovables –léase *eliminación de combustibles fósiles*–, despliegue acelerado de modos de transporte de bajas emisiones y de su red de infraestructuras –léase *electricidad e hidrógeno*–, ajuste de las políticas fiscales –léase *impuestos verdes*– y potenciación de los sumideros naturales de carbono –léase *plantar 3.000 millones de árboles*<sup>(\*)</sup>–.

Sin entrar en peleas bizantinas que poco acercan posturas, ya se han oído voces alertando básicamente de dos cuestiones no menores: primero, una clara evidencia de efectos muy perniciosos en el corto y medio plazo sobre los hogares vulnerables, las microempresas y los usuarios del transporte por carretera -cuestiones que la propia Comisión asume como ciertas-; y segundo, que todo este encomiable esfuerzo puede significar, en su globalidad, un menor incremento de la temperatura media del planeta, estimado entre

-0,004 y -0,008 grados centígrados, -por aquello de ser el único continente con semejantes compromisos adquiridos<sup>(\*\*)</sup>–.

Para solventar la primera gran pega, este paquete de propuestas se ha aderezado con una ingente cantidad de recursos económicos -incluido un nuevo Fondo Social para el Clima- que, supuestamente, garantiza su ejecutabilidad. La segunda pega se arreglará llamando “negacionista” el autor del micro-dato que ha hecho correr el modelo predictivo y ha llamado la atención al respecto.

Desde estas páginas avistamos de una tercera: ¿quién paga la fiesta? “Usted, señora”, se podría responder recurriendo al sarcasmo. Pero, lamentablemente, no se trata solo de un chiste fácil.

Poca duda ofrece la mencionada nota de prensa al respecto: “El nuevo Fondo Social para el Clima se financiará con cargo al presupuesto de la UE, utilizando un importe equivalente al 25% de los ingresos previstos del comercio de derechos de emisión para los combustibles de la construcción y el transporte por carretera. Aportará 72.200 millones de euros en concepto de financiación a los estados miembros en el período 2025-2032”.

Así las cosas, el Pacto Verde Europeo recién presentado podría resumirse como sigue: *La transición socialmente justa, que convertirá a Europa en el primer continente climáticamente neutro del mundo en 2050, la pagará “la señora carretera”.*

Todo en orden. ¡Circulen, circulen! ■

(\*) A España le corresponde plantar unos 270 millones de árboles; unas 243.000 Ha; unos 486.000 campos de fútbol con árboles...

(\*\*) La Unión Europea supone el 9% de las emisiones del planeta, frente al 44,6% de las emisiones que representan otras grandes potencias que han dado la espalda a medidas de esta índole.

**30** AÑOS  
1991-2021



# PROSEÑAL

- SEÑALIZACIÓN VERTICAL
- PÓRTICOS Y BANDEROLAS
- BARRERAS DE SEGURIDAD
- SISTEMAS DE CONTENCIÓN DE VEHÍCULOS
- PROYECTOS INTEGRALES DE SEÑALIZACIÓN
- CONSERVACIÓN DE CARRETERAS
- SEÑALIZACIÓN HORIZONTAL
- SEÑALIZACIÓN LUMINOSA
- SEMÁFOROS
- OBRA CIVIL



**PROFESIONALIDAD,  
EFICACIA Y SERVICIO**

**C/ COMTE DE BORRELL, N° 230, 5° 1ª - CP. 08029 - BARCELONA**



93.451.86.22



prosenal@prosenal.es-presupuestos@prosenal.es



www.prosenal.es

# Investigación del fenómeno acústico producido por redes de dispersores aislados y su aplicabilidad como dispositivos reductores de ruido en infraestructuras viarias

*Research of the acoustic phenomenon produced by arrays of isolated scatterers and its applicability as a noise reducing device in transport infrastructures*

Peiró-Torres, M.P.

*Técnico del Departamento de Innovación y Nuevas Tecnologías en BECSA.*

Sánchez-Pérez, J.V.

*Catedrático de Universidad en la Universitat Politècnica de València. Centro de Tecnologías Físicas, Acústica, Materiales y Astrofísica. División Acústica.*

Redondo, J.

*Profesor Titular en la Universitat Politècnica de València. Instituto de Investigación para la Gestión Integrada de Zonas Costeras.*

Bravo, J.M.

*Profesor Titular en la Universitat Politècnica de València. Centro de Tecnologías Físicas, Acústica, Materiales y Astrofísica. División Acústica.*

Ferri, M.

*Profesor Titular en la Universitat Politècnica de València. Centro de Tecnologías Físicas, Acústica, Materiales y Astrofísica. División Acústica.*

Ballester-Ramos, M.

*Técnico del Departamento de Innovación y Nuevas Tecnologías en BECSA.*

Vea-Folch, F.J.

*Director del Departamento de Innovación y Nuevas Tecnologías en BECSA.*

## RESUMEN

El ruido y, concretamente, el ruido generado por las infraestructuras viarias es un problema de contaminación ambiental de primera magnitud que causa numerosos problemas de salud a los ciudadanos de las sociedades avanzadas. Para combatirlo, la solución más comúnmente adoptada, que actúa en la fase de transmisión del ruido, es la instalación de pantallas acústicas en los bordes de las carreteras.

El desarrollo de las investigaciones realizadas en nuevos materiales, como son los cristales de sonido, ha posibilitado el avance tecnológico de unas nuevas pantallas acústicas basadas en estos materiales, que están formados por redes de dispersores acústicos aislados.

En este artículo se recogen los últimos avances realizados en esta área de investigación y cómo las pantallas acústicas basadas en cristales de sonido constituyen ya una alternativa viable a las barreras acústicas tradicionales, formadas por paramentos continuos.

**PALABRAS CLAVE:** Pantallas acústicas, Soluciones medioambientales, Control de ruido de tráfico, Cristales de sonido.

## ABSTRACT

*Noise, and specifically noise generated by road infrastructure, is a major environmental pollution problem that causes many health problems for citizens in advanced societies. To reduce these environmental problems, the most commonly adopted solution acting on the noise transmission phase is installing noise barriers on roadsides.*

*The development of research carried out on new materials, such as sonic crystals, made possible the technological advancement of new acoustic screens based on these materials, which are formed by arrays of isolated acoustic scatterers.*

*This publication includes the latest advances made in this field of research, and how acoustic screens based on sonic crystals are now a viable alternative to traditional acoustic barriers formed by continuous walls.*

**KEY WORDS:** Acoustic barrier, Environmental solutions, Traffic noise control, Sonic crystals.

## Introducción

Definimos ruido como cualquier sonido que incomoda al receptor, es decir, una sensación auditiva molesta para el mismo. El ruido es considerado como un tipo de contaminación ambiental, aunque posee ciertas características que lo diferencian de otro tipo de contaminaciones. La principal es que el ruido se puede considerar como una contaminación "limpia", puesto que desaparece totalmente cuando la fuente que la produce cesa. No obstante, un solo vehículo circulando por la ciudad por la noche con un motor que produzca altos niveles de ruido puede molestar a un gran número de ciudadanos.

Ya desde hace varias décadas, los ingenieros encargados de la gestión de las infraestructuras de transporte han demostrado una mayor implicación por atajar los problemas de ruido generados, ya que esta actividad de movilidad, junto con la actividad industrial y la de ocio, son las que mayores niveles de ruido generan. Este cambio de actitud se debe a que las sociedades avanzadas demandan ambientes cada vez más silenciosos, y la normativa publicada al respecto exige medidas que atajen este problema de primera magnitud. Esto ha derivado en el desarrollo de técnicas y dispositivos que permitan un control de este tipo de contaminación.

De todas las infraestructuras de transporte, el transporte por carretera es la actividad que produce más ruido, seguido del transporte aéreo y ferroviario. Debido a ello, es en la carretera donde se han desarrollado más medidas para minimizar el problema. El principal factor que determina el nivel de ruido en este tipo de infraestructuras es la densidad del tráfico, pero también influyen otros como el estado del parque automovilístico que utiliza las carreteras, la tipología de vehículos, la velocidad a la que circulan e incluso la tipología de la superficie de rodadura que ofrecen.

La preocupación por el ruido no es una problemática de los últimos tiempos; existen registros que documentan que ya en el Imperio Romano, en tiempos de Julio César, se dispuso de normativas que trataban de mitigar el ruido nocturno que producían los carros al circular por las vías romanas adoquinadas en Roma y otras ciudades de Italia<sup>®</sup>. No obstante, el problema no fue tratado en profundidad hasta mucho más tarde. No fue hasta finales del Siglo XIX, con la invención del motor de combustión y la revolución del transporte, cuando se evidenciaron los problemas de ruido que generaría dicho avance tecnológico. Así, ya en la década de los años 60 del siglo pasado, con el objetivo de atajar esta problemática, comenzaron a instalarse las primeras barreras acústicas en Reino Unido, que estaban formadas por paneles de madera y montículos de tierra<sup>®</sup>.

Actualmente, la comunidad científica ya ha reconocido el ruido ambiental como un problema de primera magnitud, y la Organización Mundial de la Salud (OMS) ha publicado las graves consecuencias que conlleva para la salud la exposición prolongada a este tipo de contaminación<sup>®</sup>. La publicación de la OMS recomendaba limitar el ruido ambiental a niveles de 55 dBLAeq para el día, y 35 dBLAeq para la noche, y esto supuso un punto de partida para el desarrollo de toda la normativa y legislación que se ha publicado respecto al ruido en Europa, adaptadas después a nuestro país con la publicación de la Ley del Ruido en 2003<sup>®</sup>.

Así pues, tras la declaración de la OMS, se consideró al ruido como una tipología más de contaminación ambiental y, como tal, un problema grave que debía ser tratado por parte de las distintas administraciones. La lucha contra el ruido es una tarea multidisciplinar, en la cual están involucrados distintos actores de diferentes ámbitos, tanto políticos que dictan y regulan la normativa a cumplir, como médicos, sociólogos, científicos y, por supuesto, ingenieriles.

**El principal factor que determina el nivel de ruido en las carreteras es la densidad del tráfico, pero también influyen otros como el estado del parque automovilístico, la tipología de vehículos, la velocidad a la que circulan e incluso la tipología de la superficie de rodadura**



Así, son varias las medidas de control que se pueden implementar: administrativas, educacionales, informativas y técnicas. Siendo éstas últimas en las que nos centraremos en la presente publicación.

Las medidas técnicas de control del ruido se clasifican en función de la fase de transmisión del ruido, en donde actúan con el fin de mitigarlo. Así, la actuación puede realizarse en la fuente de emisión del ruido, en la fase de transmisión entre la fuente y el receptor o en el receptor.

Entre las medidas que se adoptan para atajar el problema desde la fuente de ruido, destacamos la mejora de la tecnología de los motores de los vehículos, que cada vez son más silenciosos, llegándose a niveles muy bajos en el caso de los coches eléctricos. También las medidas de control de la densidad o velocidad del tráfico son efectivas, así como atajar el ruido de rodadura empleando tipologías de pavimento fono-reductoras o fono-absorbentes, tales como el asfalto poroso o con agregados de goma o residuo plástico, que absorben y mitigan parcialmente el ruido emitido<sup>(V, VI, VII)</sup>.

Por lo que respecta a las medidas de actuación en el receptor, estas se centran en avances realizados en la mejora de materiales de cerramiento de edificios, con el fin de conseguir un mejor aislamiento acústico de las viviendas.

La planificación urbanística que diferencia usos y dispone de distancias adecuadas entre usos residenciales e infraestructuras viarias es una de las medidas adoptadas en la fase de transmisión del ruido. Sin embargo, cuando dicha planificación urbanística no se ha realizado correctamente, es el apantallamiento acústico la medida de control de ruido más comúnmente utilizada. En este artículo exponemos los fundamentos de este tipo de dispositivos de control de ruido y presentaremos una nueva tipología de pantallas basada en unos nuevos materiales denominados Cristales de Sonido (CS).

## Principios físicos del apantallamiento

Una pantalla acústica es un dispositivo instalado entre la fuente de emisión de ruido y el receptor que pretendemos proteger, de forma que se interpone en la línea de avance de las ondas acústicas y atenúa así el sonido en su fase de transmisión.

El funcionamiento de este tipo de dispositivos reductores de ruido se encuentra esquematizado en la Figura 2. Tal y como se observa, la pantalla acústica es instalada interrumpiendo la línea de transmisión del ruido desde la fuente hasta el receptor, de forma que gran parte de la energía acústica es reflejada de nuevo hacia la fuente del ruido. Otra parte es transmitida a través de la pantalla y/o es absorbida por la propia pantalla. Por último, una buena parte de la energía incidente será difractada por los bordes de la pantalla, tanto los superiores como los laterales. De hecho, este fenómeno de difracción por el borde es uno de los efectos que más reduce la efectividad de las pantallas acústicas. Dicha efectividad está deter-

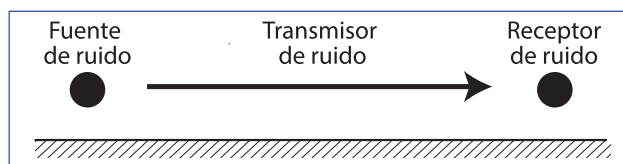


Figura 1. Esquema de propagación del ruido.

minada por la cantidad de energía que finalmente llega al receptor. La efectividad de las barreras varía según la frecuencia del sonido que es emitido por la fuente, siendo las bajas frecuencias las más difíciles de apantallar.

La evaluación de la efectividad de las pantallas acústicas está determinada por normativa a su capacidad de absorción del ruido y a su capacidad de aislamiento a ruido aéreo. La forma de medir estas capacidades intrínsecas de las barreras está regulada en las normas correspondientes que describen, no sólo la metodología de ensayo, sino cómo agrupar la capacidad de apantallamiento de las distintas frecuencias del ruido en un solo número, y cómo se pondera la importancia de las distintas frecuencias.

En las infraestructuras viarias públicas tan sólo pueden instalarse aquellas pantallas que hayan sido previamente homologadas mediante los ensayos descritos en esta normativa aplicable<sup>(VIII)</sup>. Para el caso de las carreteras, estas normas son redactadas por *The European Committee for Standardization* (CEN) y, concretamente, por el comité CTN135/SC6. Este comité se reúne de forma periódica y realiza una revisión de la normativa vigente, además de publicar nuevos documentos que tratan de mejorar la calidad de los dispositivos de control de ruido que se instalan a los márgenes de nuestras carreteras.

La instalación de este tipo de pantallas requiere un estudio específico que determine la adecuación de la tipología de pantalla a instalar, sus dimensiones y ubicación para minimizar el ruido emitido y tratar de proteger adecuadamente a las viviendas colindantes.

Así, de forma general, se deberán tener en cuenta los siguientes requisitos<sup>(9)</sup>:

- Ha de ser efectiva acústicamente.
- Ha de cumplir los requerimientos estructurales.

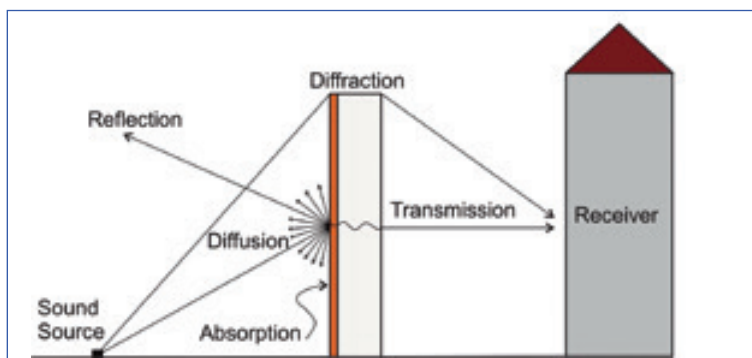


Figura 2. Esquema de funcionamiento de una pantalla acústica.



- Ha de cumplir los requerimientos de durabilidad.
- Ha de cumplir los requerimientos de seguridad.
- Ha de cumplir los requerimientos medioambientales.
- Ha de tener un mínimo impacto paisajístico y contar con la aceptación de la población colindante.
- Ha de adaptarse al entorno donde es instalada.
- Ha de requerir las mínimas labores de mantenimiento.
- El coste de fabricación y de instalación ha de estar acorde con otras soluciones existentes en el mercado.

Para alcanzar todos estos objetivos, el mercado dispone de distintas tipologías de pantallas que serán presentadas en el siguiente apartado.

## Tipología de pantallas acústicas

Existen distintas formas de clasificar a las pantallas acústicas, pero si atendemos a la clasificación determinada según los mecanismos de control de ruido, son tres las tipologías principales: las pantallas reflexivas, las absorbentes y las reactivas. En este apartado se describirán las más comúnmente instaladas en cada una de ellas.

### 1. Pantallas reflexivas

Las pantallas reflexivas son aquellas que emplean principalmente el mecanismo de reflexión para el apantallamiento acústico. Así, la mayor parte del sonido se refleja nuevamente hacia la fuente del mismo. Debido a que este es el único mecanismo que emplean, su rendimiento es limitado. Estas pantallas acústicas están compuestas por paramentos continuos de cualquier material rígido, como la madera, el hormigón, el plástico...

Dentro de esta tipología se encuentran las pantallas transparentes, hasta ahora las únicas que eran capaces de ofrecer transparencia de visión. Gracias al empleo de cristal laminado, acrílico, policarbonato, metacrilato... se minimiza el impacto paisajístico, aunque sea de forma parcial. No obstante, la principal desventaja son las labores de mantenimiento que precisan, ya que la limpieza es fundamental para evitar que degraden el entorno urbano en el que son instaladas.

También las pantallas de hormigón son reflexivas. El hormigón es un material muy versátil, por lo que permite la formación de distintas texturas en su superficie, lo cual posibilita diferentes diseños de pantalla. Además, el empleo de hormigón poroso hace posible una absorción parcial del sonido, aportando un nuevo mecanismo y mejorando ligeramente su efectividad.

### 2. Pantallas absorbentes

Esta tipología de pantallas continuas presenta un material poroso en la cara expuesta al tráfico, de forma que se produzca una absorción

de parte de la energía acústica que es apantallada. Este material poroso puede estar compuesto por lana de roca (el más efectivo) o cualquier otro material con propiedades fono-absorbentes. Estas propiedades posibilitan el empleo de un mecanismo de control de ruido adicional, la absorción, por lo que proporcionan rendimientos acústicos algo más elevados que las pantallas, que son reflexivas exclusivamente.

Entre las pantallas acústicas más empleadas en esta tipología, se encuentran las pantallas metálicas tipo sándwich. Así, el metal es el material más comúnmente empleado para albergar y proteger de la intemperie al material absorbente utilizado. El uso de esta tipología de pantallas se ha extendido mucho en las últimas décadas debido a sus altos rendimientos acústicos, sus ventajas estructurales y el mínimo mantenimiento que precisan. No obstante, las principales desventajas son la degradación del material absorbente empleado y los procesos corrosivos que pueden presentar a medio plazo en tornillería, soldaduras y demás uniones.

### 3. Pantallas reactivas

Estas pantallas continuas son las que incorporan distintos mecanismos de ruido en la cara expuesta al tráfico, tales como difusores o cavidades resonantes.

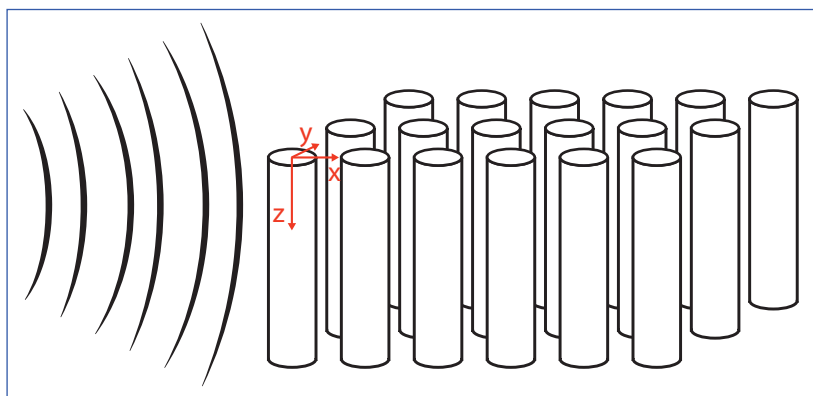
Los difusores son instalados con el fin de variar la dirección del sonido reflejado y evitar reflexiones especulares no deseadas que pudieran conducir el sonido a las zonas que se pretendían proteger. Las cavidades resonantes atenúan el sonido a una frecuencia determinada, dependiendo de sus características geométricas (volumen de la cavidad resonante y longitud y anchura de la entrada a dicha cavidad resonante), de forma que dichas frecuencias no son transmitidas ni reflejadas. Estos mecanismos de control de ruido, combinados con la reflexión como mecanismo principal, aumentan la efectividad de las pantallas.

## Pantallas acústicas basadas en Cristales de Sonido

Si atendemos al escaso número de publicaciones en revistas científicas relativas a esta temática de los últimos 15 años, podría considerarse que el grado de evolución tecnológica en el campo del apantallamiento acústico no es muy alto. No obstante, la incorporación de nuevos materiales para el apantallamiento ha posibilitado el desarrollo de pantallas acústicas mucho más evolucionadas tecnológicamente, como es el caso de aquellas basadas en Cristales de Sonido (CS).

Los CS son materiales heterogéneos formados por dos medios con propiedades físicas distintas, los dispersores acústicos y el aire como medio transmisor en el que están embebidos, disponiéndose los dispersores en forma de estructuras periódicas.

La densidad del aire y de los dispersores acústicos es muy diferente, lo que conlleva a que las velocidades de propagación del sonido en ambos medios también sean distintas, y es en estas diferencias de



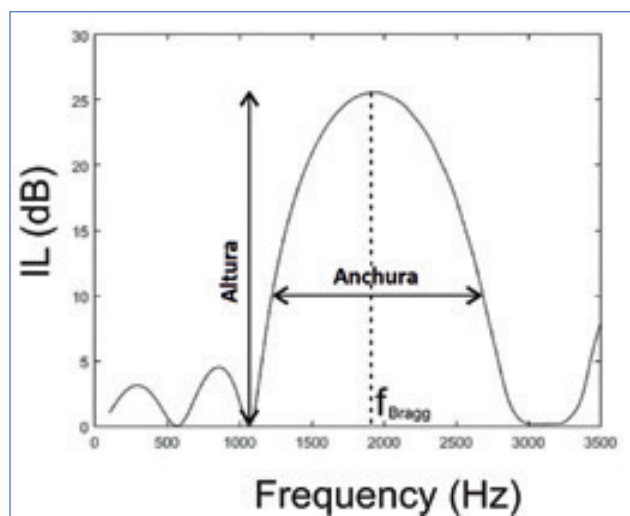
**Figura 3.** Cristal de sonido compuesto por dispersores acústicos cilíndricos embebidos en aire.

propiedades físicas, junto con la periodicidad con la que están ordenados los dispersores, en las que está basado el nuevo mecanismo de control de ruido que aportan estos materiales, denominado dispersión múltiple.

La dispersión múltiple se produce cuando una onda acústica que viaja por el aire incide sobre un CS y es reflejada debido a la presencia de los dispersores acústicos periódicamente ordenados<sup>[9]</sup>. Así, el campo acústico total que incide sobre cada dispersor estará formado por la combinación de las ondas dispersadas en todos los órdenes por el resto de dispersores y la onda incidente. Esta superposición de campos produce la dispersión múltiple, un fenómeno físico basado en la Ley de Bragg que posibilita la aparición de bandas prohibidas de propagación, esto es, rangos de frecuencia en los cuales las ondas no se transmiten a través de los CS. Estas bandas prohibidas de propagación son denominadas genéricamente *bandgaps* (BG).

La posición de estos BG en el espectro de frecuencias viene determinada por la denominada frecuencia Bragg ( $f_{Bragg}$ ), que es función de la distancia entre las distintas filas de dispersores, conocida como parámetro de red<sup>[9]</sup>.

Por lo que respecta a la altura y la anchura de los BG, dependerá del número de filas que componen el CS y del cociente entre el volumen ocupado por el medio dispersor y el volumen total del cristal, parámetro denominado *factor de llenado*.



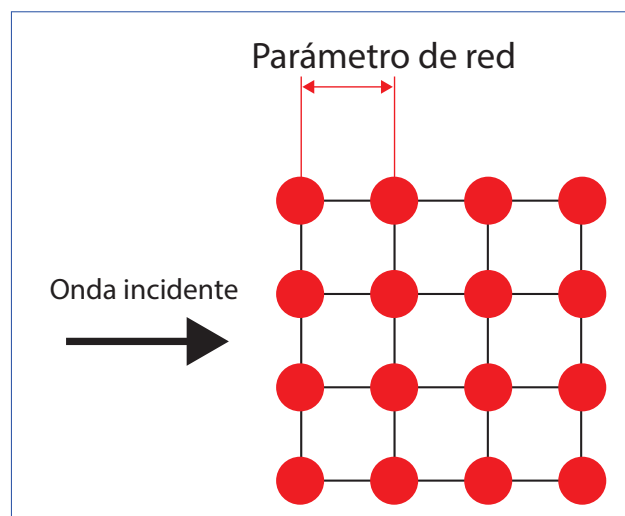
**Figura 4.** Atenuación medida como Pérdidas por Inserción (dB) dependiendo de la frecuencia (Hz) de un CS. Se observa la existencia de un BG centrado a 1800 Hz.

La principal ventaja que presenta este tipo de materiales es su permeabilidad, debido a su propia estructuración. Por ello, mientras que las pantallas acústicas tradicionales están formadas por paramentos continuos, las formadas por CS presentan una permeabilidad al viento y al agua que posibilita su instalación en ubicaciones donde no es posible instalar las tradicionales.

Por un lado, debido a la permeabilidad al viento, las cargas que las pantallas basadas en CS transmiten a la cimentación son mucho menores que las transmitidas por las pantallas tradicionales<sup>[9]</sup>. Esta ventaja permite, en primer lugar, instalar pantallas acústicas basadas en CS en zonas con fuertes regímenes de vientos, como en viaductos, donde no es posible instalar pantallas tradicionales debido a la imposibilidad de transmitir a la estructura cargas tan importantes; y, en segundo lugar, permite reducir volúmenes de cimentación en ubicaciones donde la fuerte carga aerodinámica de los vehículos requiere cimentaciones profundas para pantallas tradicionales, como es el caso de los trenes de alta velocidad<sup>[xii, xiii]</sup>.

Por otro lado, debido a la permeabilidad al agua, la utilización de esta nueva tipología de pantallas supone una ventaja respecto a las tradicionales en zonas inundables, o junto a barrancos y torrentes, donde se precisa una rápida evacuación de aguas en episodios de lluvia intensa, o en cualquier otra ubicación donde las pantallas tradicionales dificulten el drenaje de las infraestructuras de transporte. Para evitar problemas de drenaje de las carreteras, en el caso de las pantallas tradicionales se interrumpe la continuidad de estas, con la consiguiente reducción de su rendimiento acústico. Las pantallas basadas en CS permitirían el drenaje de aguas pluviales manteniendo el rendimiento acústico del dispositivo.

Otra ventaja muy importante de las pantallas basadas en CS es que son "sintonizables", esto es, que su diseño es adaptable a una problemática concreta de ruido. Tal y como hemos mencionado, el rango de frecuencias en el que se produce la interferencia de



**Figura 5.** Parámetro de red de una red cuadrada de dispersores acústicos.



**Foto 1.** Primer prototipo de pantalla acústica basada en CS, situada en el campus de Vera de la Universitat Politècnica de València.

Bragg o el efecto de resonancia depende de la geometría de los dispersores acústicos y cómo estos se encuentran dispuestos. Esto posibilita la ejecución de diseños a la carta, en los que se adecúa el diseño al espectro de frecuencias concretas del ruido que se pretende apantallar. También dicha versatilidad ofrece mayores posibilidades de actuación frente a la problemática que supone la difracción producida por el borde superior<sup>(xv)</sup> y que minimiza la efectividad de las pantallas acústicas. Las pantallas acústicas basadas en CS posibilitarían diseños de dispersores a distintas alturas para tratar de minimizar dicho efecto. Esta versatilidad no la ofrecen las pantallas acústicas tradicionales.

Además, estas pantallas acústicas presentan un acabado estético muy cuidado que puede traducirse en una mayor aceptación por parte de la población, tal y como lo demuestra su origen artístico, puesto que la primera prueba experimental que demostró la existencia del fenómeno físico se realizó sobre una escultura de Eusebio Sempere<sup>(xv)</sup>. En esta demostración, se verificó la existencia de BG en la propagación de ondas acústicas a través de distribuciones periódicas de dispersores.

Desde entonces, son varios los grupos de investigación que han tratado de aplicar dicho fenómeno físico al diseño de dispositivos reductores de ruido. Así, en 2002, se diseñó y construyó el primer prototipo en el que pudo demostrarse la viabilidad de la aplicación de esta tecnología al apantallamiento acústico<sup>(xvi)</sup>. Este primer prototipo se componía de un conjunto de dispersores acústicos rígidos embebidos en el aire (Foto 1), siendo el único mecanismo de control de ruido el propio de los CS, la dispersión múltiple.

No obstante, el análisis de los datos de rendimiento acústico de estas nuevas pantallas destacó la necesidad de aumentar su capacidad de control de ruido. Para ello, una de las estrategias seguidas consistió en sumar otros mecanismos de control de ruido, aparte de la dispersión múltiple, a los dispersores de CS diseñados. Debido a ello, se propuso el diseño de lo que posteriormente se ha denominado *dispersores acústicos de segunda generación*<sup>(xvii)</sup>. Estos nuevos dispersores acústicos utilizan resonancias y mecanismos de absorción en el diseño de los dispersores, empleando así dispersores multifísicos formados por núcleos de cilindros rígidos

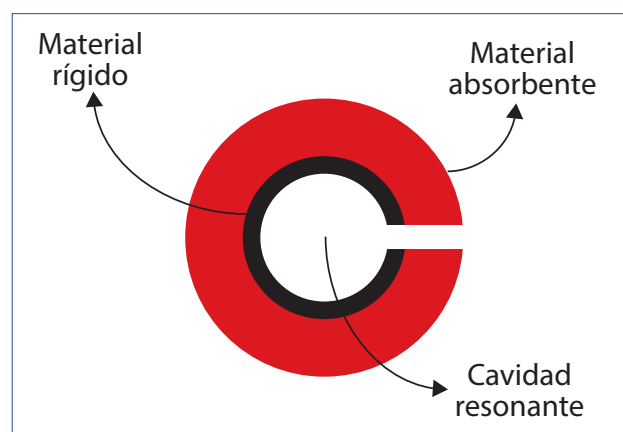
dotados con una ranura a lo largo de toda su longitud y envueltos de una capa de material absorbente (Figura 6). De esta forma, tres mecanismos de control de ruido se involucran en su diseño. Al tratarse de dispersores rígidos, estos contribuyen al control de ruido mediante el mecanismo de la dispersión múltiple, pero, a su vez, también se incluye en el diseño el mecanismo de resonancia, puesto que el interior de los dispersores actúa como una cavidad resonante acústica; finalmente, se añade al conjunto el mecanismo de absorción acústica, ya que la parte externa de los cilindros está formada por material absorbente.

Mediante este diseño de dispersor, que emplea adicionalmente a la dispersión múltiple la resonancia y la absorción, se consiguió la homologación del primer dispositivo de reducción acústica basado en CS<sup>(x)</sup>, según los ensayos de aislamiento a ruido aéreo y de absorción acústica normalizados<sup>(xviii, xix)</sup>.

Los diseños fueron mejorados, tratando de conseguir dispositivos de mayor permeabilidad y menor ancho de ocupación y, a la vez, mantener competitivos niveles de control de ruido. Así, un dispositivo de pantalla acústica optimizada basada en CS, con una anchura menor a 0,5 m y que presentaba altos niveles de permeabilidad, fue presentado a la Feria Innovacarretera de 2017, siendo merecedor del premio al mejor proyecto de I+D+i.

## Líneas de investigación actuales sobre Cristales de Sonido

Actualmente, con el objetivo de obtener dispositivos tecnológicamente más avanzados, la línea de investigación relativa a la aplicación de los CS a pantallas acústicas sigue activa. La física que subyace detrás del comportamiento de los CS está siendo estudiada desde hace más de 25 años y, hoy en día, se siguen descubriendo nuevos efectos que permiten la obtención de nuevas aplicaciones de los CS, como la aplicación a mantos de invisibilidad<sup>(xx)</sup>, lentes<sup>(xxi)</sup>, ventanas<sup>(xxii)</sup>, silenciadores en conductos, difusores<sup>(xxiii, xxiv)</sup>, etc.



**Figura 6.** Sección de dispersor acústico multifísico.



Foto 2. Imagen de pantalla acústica desarrollada por la UPV y BECSA, presentada en Innovacarretera 2017.

Por lo que respecta al campo de las barreras acústicas, se continúa con el objetivo de conseguir pantallas basadas en CS que logren una alta atenuación, efectiva en todo el espectro de ruido normalizado<sup>(xxv)</sup>. Para ello, y siguiendo la línea de investigación abierta que combina varios fenómenos físicos en un mismo diseño de dispersor, es importante continuar con el estudio de la física que subyace detrás del comportamiento de los CS, así como con el análisis de la interacción entre los efectos de control del ruido que producen los distintos mecanismos empleados cuando estos se encuentran en rangos de frecuencias cercanas. Esta línea fue retomada por el grupo de investigación autor de este artículo, analizando dicha interacción. Se observó que, cuando la resonancia y el BG se producían a frecuencias cercanas, tenían lugar interferencias destructivas entre ambos mecanismos que mermaban la capacidad de atenuación global del dispositivo (Figura 7).

Concretamente, se ha estudiado la aparición de fenómenos de interferencias destructivas entre las bandas de atenuación, debidos a la resonancia y a la dispersión múltiple<sup>(xxvi)</sup>, logrando determinar la base física de esta interferencia destructiva y aportando posibles soluciones para evitarla y conseguir así mayor capacidad de control de ruido, al aumentar el rango de frecuencias atenuadas. De esta forma, se demostró que la interferencia destructiva observada se explicaba debido al cambio de fase que se produce en la onda transmitida a través de un CS formado por una red de resonadores en lugar de una red de cilindros rígidos. Para reducir estas interferencias, se propuso la definición de un parámetro de red “equivalente”.

También, y con el fin de aportar nuevas funcionalidades a las pantallas acústicas basadas en CS, se trató de desarrollar un dispositivo que, además de apantallar, presentara propiedades difusoras, de forma que se evitaran las reflexiones especulares que pudieran dirigir el ruido hacia otras zonas sensibles acústicamente. Para el diseño de

este nuevo dispositivo, se emplearon técnicas de optimización multiobjetivo basadas en algoritmos evolutivos. Así, mediante una población inicial de diseños, y su posterior combinación, se evolucionaba hacia diseños que presentaran mejores resultados en los dos objetivos establecidos (apantallamiento y difusión del sonido)<sup>(xxvii)</sup>. Se realizaron los procesos de optimización con dos configuraciones distintas, una formada por un solo cristal de cuatro filas con un solo parámetro de red (monocristal) y otra formada por dos cristales de dos filas con dos parámetros de red distintos (bicristal), arrojando el bicristal mejores resultados que el monocristal.

Por último, se realizó un estudio para averiguar si la percepción de la efectividad de las barreras era correcta. Para poder acotar un problema, es preciso medirlo. Así, de la misma forma que se ha tratado de evaluar la seguridad de las rutas de transporte y son muchos los estudios llevados a cabo para tratar de clasificar el grado de seguridad de las carreteras<sup>(xxviii)</sup>, el nivel de molestia o el grado de reducción de molestia que los dispositivos reductores de ruido ofrecen también se han tratado de medir y evaluar.

Tal y como hemos comentado, existe normativa que evalúa la capacidad de atenuación de las pantallas y, por tanto, existen unos valores objetivos que la determinan. Este grupo de investigación, en aras de recopilar y medir la percepción del usuario hacia esta nueva tipología de pantallas acústicas, ha llevado a cabo un estudio psicoacústico que permite evaluar la percepción de reducción de molestia aportada por las pantallas acústicas tradicionales y las basadas en Cristales de Sonido y, de esta forma, comparar con los parámetros objetivos que las evalúan para tratar de determinar la adecuación de estos a la realidad subjetiva percibida<sup>(xxix)</sup>.

Se observó, entre otras cosas, que, para aislamientos acústicos de más de 10 dB, dichos parámetros objetivos y subjetivos no se correlacionaban, puesto que una mejora del parámetro objetivo no era percibida de manera proporcional por los usuarios. Esta conclusión pone de manifiesto que no sólo los parámetros objetivos relativos

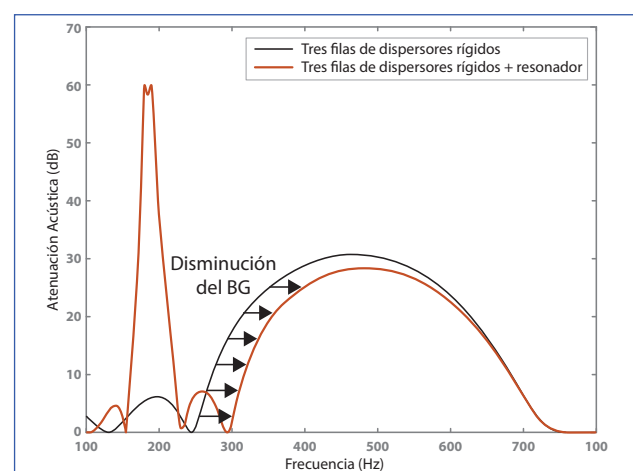
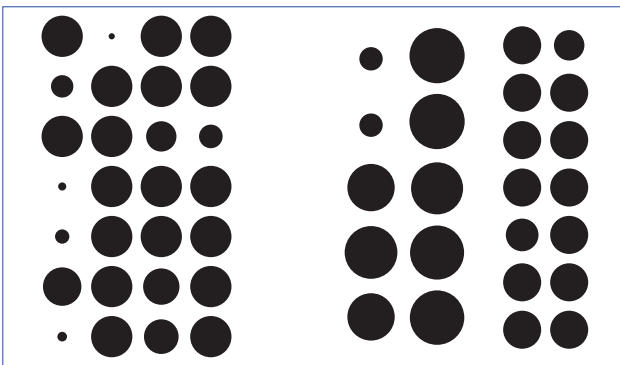


Figura 7. Fenómenos de interferencia entre mecanismos de control de ruido.

# La pantalla acústica de Cristal de Sonido es una clara alternativa a las pantallas acústicas tradicionales que habitualmente se instalan en los márgenes de las carreteras



**Figura 8.** Esquemas del monocristal y el bicristal optimizados para apantallar y difundir el sonido.

al aislamiento acústico, y determinados por la normativa vigente, deberían ser tenidos en cuenta a la hora de seleccionar una tipología de pantalla, sino que existen otros aspectos como la permeabilidad, el nivel subjetivo de molestia o la reducción del impacto visual, que también deberían ser considerados.

## Conclusiones

En el presente artículo se presenta la aplicación de los CS al apantallamiento acústico como una alternativa a las pantallas acústicas tradicionales que habitualmente se instalan en los márgenes de las carreteras para minimizar el impacto acústico de las infraestructuras viarias. Se ha recopilado un breve estado del arte sobre los avances realizados en el campo del apantallamiento acústico de dispositivos basados en CS en los últimos tiempos, destacando los resultados de las últimas investigaciones realizadas por el grupo de investigación autor del presente artículo.

Tras el estudio sobre los avances realizados en el área de las pantallas acústicas basadas en CS, se concluye que el avance de la investigación sobre CS está arrojando resultados muy prometedores, por lo que su aplicación inmediata al apantallamiento a nivel comercial debería ser un hecho a muy corto plazo. En cualquier caso, todavía existen facetas que podrían ser mejoradas y obtener dispositivos con mayores avances tecnológicos que ofrezcan rendimientos acústicos aún mejores, como puede ser la posibilidad de disminuir los efectos de difracción por el borde de esta tipología de pantallas, aumentando de forma sustancial la capacidad de control de ruido de estos dispositivos.

En cualquier caso, las pantallas basadas en cristales de sonido constituyen una realidad tecnológica y esperamos poder verlas en nuestras carreteras en los próximos años.

## Referencias bibliográficas

- I. Kotzen, B. & English, C. (2014). Environmental noise barriers: a guide to their acoustic and visual design. CRC Press.
- II. World Health Organization. (1980). Environmental health criteria 12: Noise. Geneva: WHO.
- III. Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido (<https://www.boe.es/eli/es/l/2003/11/17/37/con>).
- IV. Lastra-González, P.; Calzada-Pérez, M. A.; Castro-Fresno, D.; Vega-Zamanillo, Á. & Indacochea-Vega, I. (2016). Comparative analysis of the performance of asphalt concretes modified by dry way with polymeric waste. Construction and Building Materials, 112, 1133-1140.

Desarrollando el futuro,  
mejorando la movilidad.

[becsa.es](http://becsa.es)



**Becsa**<sup>®</sup>  
Simetría

- V. Morcillo López, M. A.; Hidalgo, M. E. & Pastrana, M. D. C. (2019, September). LIFE SOUNDLESS: New Generation of Eco-friendly Asphalt with Recycled Materials. In INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings (Vol. 259, No. 2, pp. 7852-7862). Institute of Noise Control Engineering.
- VI. Real, T.; Zamorano, C.; Hernández, C.; García, J. A. & Real, J. I. (2016). Static and dynamic behaviour of transitions between different railway track typologies. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20(4), 1356-1364.
- VII. Licitra, G.; Moro, A.; Teti, L.; Del Pizzo, A. & Bianco, F. (2019). Modelling of acoustic ageing of rubberized pavements. *Applied Acoustics*, 146, 237-245.
- VIII. Alegre-Marrades, D. M. (2008). Dispositivos reductores de ruido para carreteras. *Carreteras: Revista técnica de la Asociación Española de la Carretera*, (157), 124-133.
- IX. Castiñeira Ibáñez, S. (2015). Análisis y modelado de la fenomenología ondulatoria asociada al diseño de barreras acústicas basadas en conjuntos de dispersores aislados. Homologación de dispositivos (Doctoral dissertation).
- X. Sánchez-Pérez, J. V. (1998). Cristales de sonido basados en estructuras minimalistas (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).
- XI. Castiñeira-Ibáñez, S.; Romero-García, V.; Sánchez-Pérez, J. V. & García-Raffi, L. M. (2015). Periodic systems as road traffic noise reducing devices: prototype and standardization. *Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ)*, 14(12).
- XII. Luo, J. & Yang, Z. (2010, May). Research on the noise barrier height change of the monoline viaduct affecting the aerodynamic characteristic of high speed train. In 2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (Vol. 3, pp. 161-164). IEEE.
- XIII. Soper, D.; Gillmeier, S.; Baker, C.; Morgan, T. & Vojnovic, L. (2019). Aerodynamic forces on railway acoustic barriers. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 191, 266-278.
- XIV. Castiñeira-Ibáñez, S.; Rubio, C. & Sánchez-Pérez, J. V. (2015). Environmental noise control during its transmission phase to protect buildings. Design model for acoustic barriers based on arrays of isolated scatterers. *Building and Environment*, 93, 179-185.
- XV. Martínez-Sala, R.; Sancho, J.; Sánchez, J. V.; Gómez, V.; Llinares, J. & Meseguer, F. (1995). Sound attenuation by sculpture. *Nature*, 378(6554), 241-241.
- XVI. Sánchez-Pérez, J. V.; Rubio, C.; Martínez-Sala, R.; Sánchez-Grandía, R. & Gómez, V. (2002). Acoustic barriers based on periodic arrays of scatterers. *Applied Physics Letters*, 81(27), 5240-5242.
- XVII. Peiró-Torres, M. P.; Redondo, J.; Bravo Plana-Sala, J. M. & Sánchez Pérez, J. V. (2016). Open noise barriers based on sonic crystals. *Advances in noise control in transport infrastructures. Transportation research procedia*, 18, 392-398.
- XVIII. EN 14389-2: 2015 Road traffic noise reducing devices - Procedures for assessing long term performance - Part 2: Non-acoustical characteristics.
- XIX. EN 14389-1: 2015 Road traffic noise reducing devices - Procedures for assessing long term performance - Part 1: Acoustical characteristics.
- XX. Ergin, T.; Stenger, N.; Brenner, P.; Pendry, J. B. & Wegener, M. (2010). Three-dimensional invisibility cloak at optical wavelengths. *science*, 328(5976), 337-339.
- XXI. Espinosa, V.; Sánchez-Morcillo, V. J.; Staliunas, K.; Pérez-Arjona, I. & Redondo, J. (2007). Subdiffractive propagation of ultrasound in sonic crystals. *Physical Review B*, 76(14), 140302.
- XXII. Lee, H. M.; Wang, Z.; Lim, K. M.; Xie, J. & Lee, H. P. (2020). Novel plenum window with sonic crystals for indoor noise control. *Applied Acoustics*, 167, 107390.
- XXIII. Redondo, J.; Sánchez-Pérez, J. V.; Blasco, X.; Herrero, J. M. & Vorländer, M. (2016). Optimized sound diffusers based on sonic crystals using a multiobjective evolutionary algorithm. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 139(5), 2807-2814.
- XXIV. Redondo, J.; Picó, R.; Sánchez-Morcillo, V. J. & Woszczyk, W. (2013). Sound diffusers based on sonic crystals. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 134(6), 4412-4417.
- XXV. EN 1793-3:1998 Road traffic noise reducing devices. Test method for determining the acoustic performance. Normalized traffic noise spectrum.
- XXVI. Peiró-Torres, M. P.; Castiñeira-Ibáñez, S.; Redondo, J. & Sánchez-Pérez, J. V. (2019). Interferences in locally resonant sonic metamaterials formed from Helmholtz resonators. *Applied Physics Letters*, 114(17), 171901.
- XXVII. Peiró-Torres, M. P.; Navarro, M. P.; Ferri, M.; Bravo, J. M.; Sánchez-Pérez, J. V. & Redondo, J. (2019). Sonic Crystals Acoustic Screens and Diffusers. *Applied Acoustics*, 148, 399-408.
- XXVIII. Peiró-Torres, M. P.; Toledo, F. & Gielen, E. (2016). Clasificación de las rutas en función de su peligrosidad mediante Sistemas de Información Geográfica. Proyecto safeRoute. *Carreteras: Revista técnica de la Asociación Española de la Carretera*, (206), 51-63.
- XXIX. Redondo, J.; Peiró-Torres, M. P.; Llinares, C.; Bravo, J. M.; Pereira, A. & Amado-Mendes, P. Correlation between objective and subjective assessment of noise barriers. *Applied Acoustics*, 172, 107640. ■