

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Master en Ingeniería Acústica



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR DE GANDIA

**“Diseño y modelado de pantallas acústicas
basadas en cristales de sonido 2D para ruido de
ferrocarril”**

TESIS DE MÁSTER

Autor:

Rober Atiénzar Navarro

Tutor/es:

D. Juan V. Sánchez Pérez

D. Joan A. Martínez Mora

GANDIA, 06/08/2016

Diseño y modelado de pantallas acústicas basadas en cristales de sonido 2D para ruido de ferrocarril

Autor: Rober Atiénzar Navarro

Director1: Juan Vicente Sánchez Pérez

Director2: Juan Antonio Martínez Mora

Resumen — En la presente Tesina Fin de Máster se va a realizar un trabajo de simulación del comportamiento acústico de una nueva generación de pantallas acústicas basadas en cristales de sonido (CS) para controlar el ruido de ferrocarril en la fase de transmisión. Los CS son medios heterogéneos formados por una red periódica de dispersores acústicos inmersos en un fluido, que en nuestro caso será aire, para reducir la propagación de las ondas acústicas. El objetivo que se persigue es maximizar el espectro de atenuación del CS con el fin de atenuar el siguiente rango de frecuencias: 500 Hz – 2000 Hz; que es donde se encuentra localizado la mayor parte del ruido de ferrocarril. Por tanto, en este sentido, se va a utilizar un modelo de superposición de dos modelos 2D que resultan en un modelo 3D. Se han empleado dos modelos bidimensionales para poder analizar con detalle cada uno de los mecanismos de control de ruido presentes por separado. Por una parte, se tiene el modelo plano en donde se estudiarán los efectos de BG, resonancias y absorción; por otra parte, se tiene el modelo vertical en donde se analizará el efecto de la difracción por el borde superior de una matriz periódica 2D formada por cilindros rígidos finitos. En este estudio el diseño de pantallas acústicas basadas en cristales de sonido se llevará a cabo mediante simulaciones realizadas con el método de los elementos finitos (MEF) implementado en el software *Comsol Multiphysics v.4.4a*.

Palabras clave — Cristal de sonido (CS), barrera acústica, ruido de ferrocarril, control del ruido en transmisión y difracción de ondas acústicas.

Abstract — In this master's thesis a simulation work will be carried out in order to evaluate the acoustic behaviour of a new generation of acoustical barriers. These noise barriers are composed of sonic crystals (SC), designed for controlling railway noise during its transmission. SC are heterogenic media consisting of a periodic net of acoustic scatterers immersed in a fluid, which in our case would be air, to reduce propagation of acoustic waves. The objective is to maximise the spectral attenuation to attenuate the following frequency range: 500 Hz – 2000 Hz; since that is where most of the railway noise is located. Therefore, in this regard, a superposition model will be used where two 2D models results in a 3D model. To analyse with detail each of the noise control mechanisms separately, 2 two-dimensional models were used. On one hand, the plane model where the effects of the Band Gaps (BG), resonances and absorption will be studied; on the other hand, the vertical model in which the diffraction effect will be analysed by the upper edge of a periodic 2D array formed by finite rigid cylinders. In this study, the design of acoustic barriers based on sonic crystals will be carried out through simulations using the finite element method (FEM) implemented in *Comsol Multiphysics software v4.4a*.

Keywords — Sonic Crystal (SC), acoustic barrier, railway noise, noise control in transmission and acoustic wave diffraction.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero expresar mi agradecimiento, en general, a mi familia por el apoyo incondicional brindado, ellos me han hecho ver que no hay nada imposible. Estoy muy contento y me considero un privilegiado con la familia que tengo.

Gracias, en particular, a mis padres y hermanos por la educación y formación que me han dado y el mensaje transmitido: “Si luchas sin descanso triunfarás, si te esfuerzas y sabes sufrir más que todos los demás ganarás y serás el mejor, sólo debes creer en ti e intentar dar lo mejor de uno mismo cada día”.

Mi madre, Vicenta Navarro, ha estado ahí las 24 horas de los 365 días del año. Gracias, mamá, por haber estado ahí siempre que lo he necesitado.

Mención especial a mis tutores Juan V. Sánchez Pérez y Joan A. Martínez Mora por darme la oportunidad de poder realizar un proyecto de esta envergadura y sobre todo por los conocimientos, orientaciones, sugerencias y motivación prestada por llevar adelante el proyecto.

Durante este año de máster me llevo amigos inolvidables como Sergio Jiménez, José M. Palazuelos, Juan D. Rodríguez, Raquel Bailén, Lorena González, Dhéric Mutel, Dani Zahonero, Rafa Arques, Adrián Rosa, Xavi Banyuls, Cyril Bernard y Clement Jost. Ellos también han hecho posible este trabajo.

Agradecer el apoyo de mis amigos/as Paula Pérez, Marta Andrés, Celia Valero, Diana Vitoria, Àngel Llopis, Àlvar Llopis, Toni Fernández, Àlex Mestre, Adam Kamarudin, Rubén Guillén, David García, Salva García, Jordi Ripoll, Alba Olasso, Sara Salelles, Noni Huguet, Laura Roig, Sandra Moll, Javi Rius, Marta Sevilla, Emma Martínez, Lorena Banyuls, Nerea Peiró, Patri Ordóñez, Raquel Mengual, Sara Moncho, Fernando Lora, Joan Mata, Esteve Mestre, Lucía Serer, Mireia Cotaina, Laura Morell, Laura Rus, Mónica Pérez, Zaira Girau, Óscar Roca, Sandra Miralles, Àlex Salort, Victor Parra, Iván Herrero, María Saldaña, Raquel Bartual, Amàlia Gregori, Xesc Canet, Pau Aguilar, Carlos Pérez, Paula Bernabeu, Mar Girau, Àngela Serrano, Jordi Martínez, Irene Garí, Núria Almiñana, Arnau Miró, Patricia Guarque, Marina Ballester, David Guirado, Juanrra Briones, Joan Marc Pérez, Àngels Ceresola, Paloma Álvarez, Aloma Mañó, Aitana Mañó, Núria Polonio, María Signes, Andreea Moscu, Alfred Bertomeu, Paula Barriga, María Soria, Pau Salort, Marisa Císcar, Sara Hortolano, Clara Salas, Roseta Peiró, Ferran Sanchis, Rubén Padilla, Ferran Riera, Josué Morató, Marina Pi, Cristina Llacer, Jaume Cardona, Vicent Gilabert, Rubén Benimeli, Clàudia Llopis, Antoni Plà, Carlos Atienza, Óscar Morera, Albert Parra, Noelia Mollá, Raquel Carrión, Felip Timoner, Vicent Sebastià, Majo Salort, Blai Gisbert, Jethro Howard y Dani Barreres.

Mis alegrías, mis triunfos y mis éxitos no son sólo de uno, sino de todo un conjunto que hemos remado en la misma dirección como un equipo de remo.

Quiero concluir diciendo que el presente trabajo no hubiera sido posible sin la colaboración de todos vosotros, mi más sincero agradecimiento por la ayuda ofrecida. A todos, muchas gracias.

Contenido

RELACIÓN DE FIGURAS.....	II
RELACIÓN DE TABLAS.....	III
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. PRESENTACIÓN	1
1.2. OBJETO	3
1.3. ESTRUCTURA DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER	3
2. CONCEPTOS BÁSICOS.....	3
2.1. FENÓMENOS ACÚSTICOS: REFLEXIÓN Y DIFRACCIÓN SONORA	3
2.2. PANTALLAS ACÚSTICAS	5
2.2.1. INTRODUCCIÓN	5
2.2.2. TIPOS DE PANTALLAS ACÚSTICAS	6
2.2.3. ATENUACIÓN PROPORCIONADA POR LA BARRERA. <i>INSERTION LOSS (IL)</i>	8
2.3. CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE LA FÍSICA DEL ESTADO SÓLIDO	8
2.3.1. INTRODUCCIÓN A LA FÍSICA DE LOS CRISTALES	8
2.3.2. SISTEMAS PERIÓDICOS.....	9
2.3.2.1. PROPIEDADES GEOMÉTRICAS	10
2.3.2.1.1. BASE Y ESTRUCTURA CRISTALINA	10
2.3.2.1.2. RED DE BRAVAIS.....	10
2.3.3. RED RECÍPROCA	12
2.3.3.1. ASPECTOS GENERALES ACERCA DE LAS CARACTERÍSTICAS DE PROPAGACIÓN.....	12
2.3.3.2. DIFRACCIÓN DE ONDAS POR LOS CRISTALES. LEY DE BRAGG	12
2.3.3.3. TEORÍA DE BANDAS	14
2.3.3.3.1. INTRODUCCIÓN.....	14
2.3.3.3.2. FORMACIÓN DE BANDAS DE ENERGÍA	14
2.3.3.3.3. BANDAS PROHIBIDAS (<i>BAND GAPS</i>)	15
2.3.3.3.4. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS	16
2.3.4. CRISTALES DE SONIDO 2D	17
2.3.5. RESONANCIAS EN CS: RESONADOR DE HELMHOLTZ	17
3. DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO.....	18
3.1. CONSIDERACIONES PREVIAS	18
3.2. DISEÑO DE PANTALLAS ACÚSTICAS BASADAS EN CRISTALES DE SONIDO	19
4. CONCLUSIONES DEL ESTUDIO	36
ANEXO 1: MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS	39
ANEXO 2: MATERIAL POROSO (LANA DE ROCA)	42

Relación de figuras

FIGURA 1. RUIDO DE RODADURA.....	1
FIGURA 2. REFLEXIÓN Y TRANSMISIÓN DE ONDAS PLANAS EN UNA SUPERFICIE LÍMITE	4
FIGURA 3. TIPOS DE ONDAS OBTENIDAS AL COLOCAR UNA PANTALLA ACÚSTICA ENTRE EMISOR Y RECEPTOR	6
FIGURA 4. PANTALLA ACÚSTICA DE HORMIGÓN, TIPO ABSORBENTE CON UNA ALTURA $H = 3$ m Y UN ESPESOR $E = 0.17$ m..6	
FIGURA 5. PANTALLA ACÚSTICA DE METACRILATO, TIPO REFLECTANTE CON UNA ALTURA $H = 3$ m.....	7
FIGURA 6. PANTALLA ACÚSTICA MIXTA: METACRILATO-METAL PERFORADO, CON UNA ALTURA $H = 3$ m.....	7
FIGURA 7. PANTALLA ACÚSTICA BASADA EN CRISTALES DE SONIDO SITUADA EN EL CAMPUS DE GANDIA.....	7
FIGURA 8. MUESTRA LA RELACIÓN ENTRE LA FORMA EXTERIOR DE LOS CRISTALES Y LA FORMA DE LOS BLOQUES DE CONSTRUCCIÓN	9
FIGURA 9. EJEMPLOS DE SISTEMAS PERIÓDICOS	9
FIGURA 10. REDES DE BRAVAIS MÁS COMUNES EN DOS DIMENSIONES (2D): (1) RED OBLICUA; (2) RED RECTANGULAR – CENTRADA; (3) RED RECTANGULAR; (4) RED HEXAGONAL; (5) RED CUADRADA	10
FIGURA 11. MUESTRA EL CONCEPTO DE CELDA UNIDAD. EL CONJUNTO DE CELDAS UNIDAD FORMA LA ESTRUCTURA CRISTALINA	11
FIGURA 12. CONSTRUCCIÓN DE UNA CELDA HEXAGONAL DE WIGNER-SEITZ EN UNA RED 2D	12
FIGURA 13. DIFRACCIÓN DE BRAGG	13
FIGURA 14. INTERFERENCIA CONSTRUCTIVA (IZQ.) Y DESTRUCTIVA (DCHA.) SEGÚN EL ÁNGULO DE DESVIACIÓN (2θ).....	13
FIGURA 15. MUESTRA UN ESQUEMA SOBRE LA DISPOSICIÓN DE LA BANDAS DE ENERGÍA	15
FIGURA 16. MUESTRA UN PSEUDOGAP Y UN GAP COMPLETO EN FUNCIÓN DEL TIPO DE CS EMPLEADO.....	15
FIGURA 17. MUESTRA EL ESQUEMA BÁSICO DE BANDA PROHIBIDA	16
FIGURA 18. EJEMPLOS DE FACTOR DE LLENADO PARA RED TRIANGULAR (IZDA.), RED CUADRADA (CENTRO) Y RED HEXAGONAL (DCHA.)	16
FIGURA 19. ESQUEMA DE CRISTAL DE SONIDO 2D FORMADO POR CILINDROS DE DISTINTAS LONGITUDES EN UNA RED CUADRADA.....	17
FIGURA 20. EJEMPLOS DE RESONADORES DE HELMHOLTZ SIMPLES	18
FIGURA 21. ESPECTRO DE RUIDO DE UN TREN ELÉCTRICO MODERNO, MEDIDO EN CAMPO LIBRE A 10 m DE DISTANCIA Y A 150 km/h	19
FIGURA 22. CURVAS DE ATENUACIÓN POR DIRECTIVIDAD PARA TREN DE VIAJEROS Y TREN DE MERCANCÍAS	19
FIGURA 23. MUESTRA EL MODELO DE PANTALLA 3D.....	21
FIGURA 24. RESUMEN DE LOS MULTI-FENÓMENOS APARECIDOS EN LA VISTA EN PLANTA Y SECCIÓN	22
FIGURA 25. ESQUEMA DEL SISTEMA UTILIZADO EN EL MODELO PLANO: CILINDRO SIN RESONADOR	23
FIGURA 26. ESQUEMA DE LA GEOMETRÍA DISEÑADA MEDIANTE COMSOL	24
FIGURA 27. CAMPO TOTAL DE PRESIÓN CENTRADO EN LA FRECUENCIA DE 1000 Hz	25
FIGURA 28. IL CON CILINDROS TOTALMENTE RÍGIDOS SIN LANA DE ROCA.	26
FIGURA 29. MUESTRA, EN AZUL, LA CAPA DE LANA DE ROCA EMPLEADA DE ESPESOR 15 mm	26
FIGURA 30. IL CON CILINDROS TOTALMENTE RÍGIDOS CON LANA DE ROCA	26
FIGURA 31. CILINDRO CON RANURA QUE ACTÚA COMO RESONADOR.....	27
FIGURA 32. ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LA ABERTURA DEL RESONADOR	28
FIGURA 33. MUESTRA EL PICO DE RESONANCIA EN 1100 Hz Y 1800 Hz.....	28

FIGURA 34. IL DEL CILINDRO RÍGIDO CON RESONADOR MÁS LANA DE ROCA.....	29
FIGURA 35. GEOMETRÍA MODELO 2D VERTICAL	30
FIGURA 36. CAMPO TOTAL DE PRESIÓN ACÚSTICA (PA) CENTRADO EN LA FRECUENCIA DE 1200 Hz	31
FIGURA 37. DISTINTOS MODELOS GEOMÉTRICOS PARA TRATAR DE REDUCIR LA DIFRACCIÓN POR EL BORDE SUPERIOR DEL CS.....	32
FIGURA 38. CAMPO TOTAL DE PRESIÓN ACÚSTICA (PA) CENTRADO EN LA FRECUENCIA DE 1200 Hz CON 3 CILINDROS HORIZONTALES.....	33
FIGURA 39. COMPARACIÓN DEL <i>INSERTION LOSS</i> ENTRE EL MODELO B) Y E) DE LA FIGURA 37.....	34
FIGURA 40. ESQUEMA CONJUNTO PARA ESTUDIAR LOS EFECTOS DE DIFRACCIÓN, ABSORCIÓN, RESONANCIA Y BG CONJUNTAMENTE	34
FIGURA 41. COMPARACIÓN DE LOS MODELOS BAJO ESTUDIO.....	35

Relación de tablas

TABLA 1. ESPECTRO NORMALIZADO DEL RUIDO FERROVIARIO, PONDERADO A.....	18
TABLA 2. NIVEL DE RUIDO PRODUCIDO POR UN TREN ELÉCTRICO MODERNO.....	18
TABLA 3. MÓDULO DE LA PRESIÓN COMPLEJA DE CADA UNO DE LOS MODELOS ANALIZADOS.....	33

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Presentación

El ruido se define como cualquier sonido de carácter desagradable que puede llegar a provocar serios problemas fisiológicos o psicológicos sobre las personas afectando a su calidad de vida provocando la pérdida de audición temporal a corto y permanente a largo plazo, el estrés, el insomnio, la fatiga y otros muchos factores a tener muy en cuenta [1] [2].

En concreto, en la presente tesina se va a considerar el ruido generado por el tráfico ferroviario y como atenuar su efecto, sobre la población, mediante el uso de pantallas acústicas. Dependiendo de la explotación ferroviaria y de la proximidad de los receptores, se pueden llegar a producir niveles de inmisión acústica no deseados. Las operaciones más destacadas son: la circulación de trenes de viajeros y de mercancías [3].

Las principales fuentes de ruido vienen de la vía y del propio tren. Es conocido que el tren es un transporte de tipo guiado, por tanto, su ruido está localizado en el espacio. Se ha de tener presente que el ruido procedente de la circulación de trenes corresponde a sucesos discretos, por tanto hay que tener en cuenta, en el análisis global del ruido ferroviario, los siguientes aspectos:

- Frecuencia de paso de los trenes por los entornos urbanos.
- Velocidad de circulación (aceleraciones, velocidad continua y desaceleraciones).
- Estado de la vía.

Además, se tienen 3 fuentes de ruido fundamentales que contribuyen a crear el ruido ferroviario: ruido de rodadura, ruido mecánico y ruido aerodinámico [4].

- **Ruido de rodadura:** Es producido debido al rozamiento entre el raíl y la rueda del tren. Es un tipo de ruido de banda ancha, y aumenta debido a imperfecciones y rugosidades en el camino. La velocidad es un factor determinante en este ruido, predominante entre los 50 y 100 km/h.

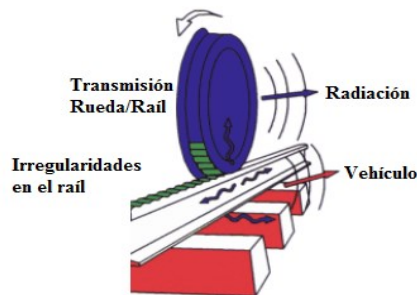


Figura 1. Ruido de rodadura.

También debe de considerarse el **ruido de impacto** que se produce principalmente debido al deslizamiento entre el carril y la rueda que pueden ser provocados por deslizamientos de la rueda sin rodar sobre el carril, o por rozar la pestaña con el carril. Estos deslizamientos y roces, a baja frecuencia, pueden provocar chirridos de alta frecuencia en curvas con un radio de curvatura pequeño.

- **Ruido de tracción y elementos auxiliares:** Es el ruido generado debido al motor del tren ($v < 20$ km/h). Es predominante a bajas frecuencias y a medida que aumenta la velocidad, es enmascarado por el ruido de rodadura.

Como elementos auxiliares en trenes, se tiene el sistema de ventilación y climatización, además de la conocida voz que avisa de las paradas en las estaciones.

- **Ruido aerodinámico:** Generado por el rozamiento del tren con el aire. Es el tipo de ruido predominante a velocidades máximas, y más aún en los trenes de alta velocidad AVE ($v > 200$ km/h).

Debido a la complejidad que supone el ruido generado por el ferrocarril, se ha optado en el presente estudio por trabajar con el espectro normalizado y se va a intentar atenuar el ruido en la fase de propagación mediante el uso de pantallas acústicas.

Si se opta por la opción de pantallas convencionales, se tendrá el problema de que no serán del todo efectivas debido a que si se sitúan dos pantallas en ambos lados de la vía se produce un efecto de reflexión múltiple entre ambas, produciendo un aumento en el nivel sonoro, además de provocar un impacto visual, resulta antiestético, por tanto se va a hacer uso de difusores basados en redes cristalinas ya que, por una parte, presentan permeabilidad visual, al agua y al viento y, por otra parte, solo necesitan cimentación mínima debido a que se mantienen estables con su propio peso.

Se puede definir el cristal de sonido (CS) como cualquier tipo de dispersor para el sonido, con cualquier forma geométrica, en nuestro caso se utilizarán cilindros rígidos debido a que, por una parte, presentan simetrías infinitas: axial y espejo; y por otra parte, presentan facilidad para poder simularlos. Por tanto, se tiene una serie de dispersores cilíndricos rígidos y ordenados periódicamente que se encuentran inmersos en un fluido, que en nuestro caso será aire.

A diferencia de las pantallas convencionales, el uso de elementos periódicos basados en CS puede ser diseñado a la carta para poder atenuar las frecuencias problemáticas y así poder tener un mejor control de las ondas sonoras procedentes del conjunto tren-raíl.

De facto, cuando un tren pasa sobre un viaducto, en el cual se encuentran casas debajo, no se puede poner una pantalla convencional con mucha altura ya que el viento que pegaría en ella produciría un momento de vuelco muy grande, que se transmitiría a toda la estructura, obligando a reforzarla y, como consecuencia, encareciendo la obra. Por tanto, se han de buscar otras soluciones, como los CS, que dejan pasar el aire, y por tanto, los esfuerzos transmitidos son hasta un 50% menores [5].

La característica principal de los CS viene dada por su colocación de forma periódica como una estructura cristalina, produciendo un fenómeno de dispersión múltiple, es decir, la onda incidente se dispersa por cada uno de los cilindros que se encuentra y dependiendo de la separación entre los cilindros, existen bandas de frecuencia que se reflejan y otras que se transmiten [6].

Se definen los *band gaps* (BG) como aquellas bandas de frecuencia que se reflejan, es decir, no se transmiten a través del cristal [6].

Por último, la estructura de bandas es la relación existente entre la frecuencia de la onda transmitida con respecto a la dirección en la que incide sobre el cristal.

1.2. Objeto

La presente tesina de máster tiene como principal objetivo la variación de la forma geométrica y la posición de los dispersores dentro de la red para poder incrementar la capacidad de atenuación de los cristales de sonido aplicados a la atenuación del ruido ferroviario. En las pantallas basadas en CS se pueden habilitar mecanismos para poder reducir la difracción por su borde superior utilizando mecanismos de interferencia destructiva de ondas, de manera más sencilla que en el caso de las pantallas tradicionales.

El diseño de pantallas acústicas basadas en cristales de sonido se llevará a cabo mediante simulaciones basadas en el Método de los Elementos Finitos (FEM).

1.3. Estructura del trabajo fin de máster

El presente estudio se ha dividido en 4 bloques principales. En el primer bloque temático denominado **introducción** se presenta el problema a tratar en esta tesina, que es el ruido ocasionado por los trenes y, además, se plantea el objetivo que se persigue.

En un segundo bloque temático se hará una breve descripción de los **conceptos básicos** sobre pantallas acústicas y cristales de sonido.

En un tercer bloque temático se procede a describir el **tipo de estudio** realizado mediante la herramienta FEM y, una vez planteados los modelos de simulación 2D, se procederá a **analizar los resultados** obtenidos.

Finalmente, se presentarán las **conclusiones** y se propondrán **futuras líneas de investigación**.

2. CONCEPTOS BÁSICOS

2.1. Fenómenos acústicos: reflexión y difracción sonora

Para estudiar estos fenómenos acústicos es conveniente recordar la definición de impedancia acústica específica z : cociente entre presión sonora p y la velocidad de las partículas u en el medio, dada por la siguiente expresión $z = p/u = \rho \cdot c$, que dependerá de la velocidad del sonido c y su densidad ρ en el medio, tal y como se muestra en la figura que sigue:

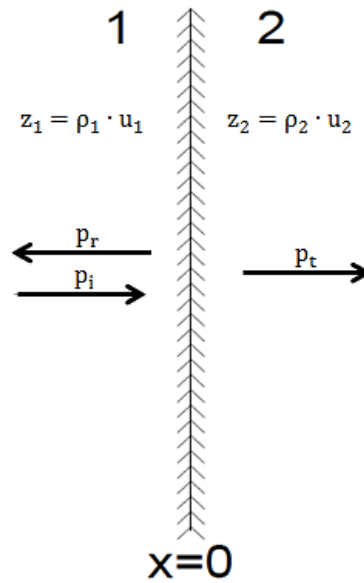


Figura 2. Reflexión y transmisión de ondas planas en una superficie límite [7].

Por tanto, la onda reflejada p_r se produce cuando hay un cambio de impedancia elevada entre dos medios y es dependiente de la frecuencia, es decir, no actúa igual a altas frecuencias (pequeñas longitudes de onda, se produce un buen aislamiento) que a bajas frecuencias (grandes longitudes de onda y efectos de borde, se tiene mal aislamiento).

En nuestro estudio de CS¹, los difusores (elementos que constituyen el cristal) tienen una impedancia acústica mucho más alta que la del fluido en el cual están inmersos. Por tanto, cuando las ondas sonoras se propagan en el medio, los difusores provocan reflexiones que interfieren con las ondas directas.

En CS, el *band gap* (BG)² viene dado por la *Ley de Bragg* debido a un fenómeno de dispersión múltiple.

La longitud de onda (λ) está directamente relacionada con el tamaño del CS. Si éste es más pequeño comparado con la longitud de onda, el sonido lo rodeará, produciendo el fenómeno de la difracción, en caso contrario, el sonido se verá reflejado.

Una vez visto el fenómeno acústico de la reflexión se procede a describir la difracción por el borde superior de una pantalla acústica. Cuando la onda sonora choca con un obstáculo o encuentra una abertura, la dirección de la onda sonora deja de ser rectilínea. A este fenómeno se le denomina **difracción**, y es muy importante cuando se emplean pantallas acústicas para la creación de una sombra acústica detrás de la barrera acústica.

Es conveniente considerar, en el caso de las pantallas acústicas, la relación entre la longitud de onda (λ), las características direccionales de la fuente y una buena modelización del terreno. El efecto de sombra acústica se aplica prácticamente en lugares al aire libre para reducir el ruido de tráfico o de ferrocarril.

¹ Denominado en inglés Sonic Crystals. A lo largo de la tesina se empleará CS o cristales de sonido.

² A lo largo del presente estudio aparecerá la denominación en inglés. Bandas prohibidas (BG), en español.

Una base teórica para la descripción de la difracción de la onda acústica y los fenómenos que tienen lugar en la zona de sombra acústica se pueden encontrar en estas tres publicaciones: (1) difracción de Huygens-Fresnel, (2) difracción de Helmholtz-Kirchhoff y (3) teoría geométrica de la difracción (GDT) propuesta por Keller.

Fresnel fue uno de los primeros en intentar explicar los fenómenos de difracción (1818) a partir de una serie de modificaciones del principio de Huygens [19].

En 1882, Kirchhoff propuso que los fenómenos de difracción se explicaran mediante la teoría escalar. Su teoría fue corregida en 1894 por Sommerfeld que introdujo una serie de modificaciones [18].

J. B. Keller se basó en los trabajos realizados por Young, que fue el primero que propuso que el problema de difracción se tenía que tratar como un problema de interferencia de la onda producida en el borde de la barrera acústica [16]. Por tanto, Keller, añadió los fenómenos de difracción en su teoría geométrica de la difracción (GDT). Y, mediante el principio de Fermat, fue capaz de predecir el campo acústico en la zona de sombra acústica de la barrera mediante la suma de todos los rayos acústicos que llegaban a un punto específico.

El método trata el borde de la barrera acústica como una segunda fuente de rayos acústicos, que puede emitir en la zona de sombra acústica y, estos rayos acústicos, pueden ser difractados o reflejados de forma consecutiva antes de que alcancen al receptor (en nuestro caso, el receptor será un micrófono situado a una determinada distancia de la pantalla acústica).

De este modo, el método GDT puede aplicarse para solucionar los problemas de difracción en el borde superior de la pantalla acústica basada en CS.

Después de haber descrito los principales fenómenos acústicos, se describirá, a continuación, las características de las pantallas acústicas.

2.2. Pantallas acústicas

2.2.1. Introducción

Se entiende por pantalla acústica todo aquel dispositivo capaz de atenuar el sonido en su propagación al colocarse en el camino entre la fuente y receptor, es decir, el ruido transmitido viaja en línea recta desde la fuente al receptor y, al colocar una barrera acústica entre la fuente y receptor, esta trayectoria se interrumpe, en donde, parte de la energía acústica que se ha emitido es reflejada o dispersada hacia la fuente y otra parte que se transmite a través de la pantalla acústica, es difractada por el borde superior de la barrera acústica o es absorbida en función del tipo de material con el cual se ha construido la pantalla acústica.

Sus principales aplicaciones son para controlar el ruido (tráfico, ferroviario etc.). El aislamiento proporcionado por la pantalla dependerá de múltiples factores como: dimensiones y tipo de material de pantalla, situación, nivel de ruido, tipo de suelo y topografía del terreno [7].

En la figura que sigue se muestra un esquema de una pantalla acústica en donde se pueden ver los distintos tipos de ondas que aparecen: transmitida, reflejada, absorbida y difractada reflejada en el suelo.

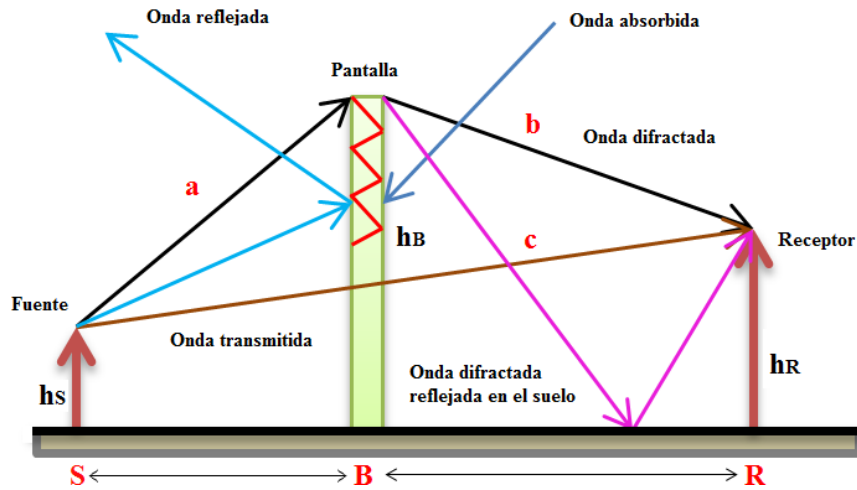


Figura 3. Tipos de ondas obtenidas tras colocar una pantalla acústica entre emisor y receptor [7].

Finalmente, es conocido que el mecanismo que más reduce el rendimiento de la pantalla acústica es la difracción por el borde superior. Cada uno de los puntos situados en el borde superior de la barrera acústica se convierte en un nuevo foco sonoro puntual, generando ondas esféricas de acuerdo con lo expuesto en el *principio de Huygens*. Por tanto, la onda difractada reduce la capacidad de atenuación de la pantalla ya que elimina la sombra acústica formada entre la pantalla y el receptor.

2.2.2. Tipos de pantallas acústicas

A continuación, dependiendo del grado de atenuación o la cantidad de energía de la onda incidente reflejada, las pantallas acústicas convencionales se clasifican en tres tipos: absorbentes, reflectantes y mixtas [7].

- **Absorbente:**



Figura 4. Pantalla acústica de hormigón, tipo absorbente con una altura $h = 3$ m y un espesor $e = 0.17$ m.

- **Reflectante:**



Figura 5. Pantalla acústica de metacrilato, tipo reflectante con una altura $h = 3$ m.

- **Mixta:**



Figura 6. Pantalla acústica mixta: metacrilato-metal perforado, con una altura $h = 3$ m.

Sin embargo, para el presente estudio, se va a abordar un nuevo tipo de pantalla acústica basada en cristales de sonido (CS), que se define como un medio heterogéneo formado por una red periódica de dispersores acústicos inmersos en aire, tal y como se muestra en la **Fig. 7**:



Figura 7. Pantalla acústica basada en cristales de sonido situada en el Campus de Gandia.

Ambos tipos de pantallas, tanto convencionales como las basadas en CS, atenúan el sonido en su fase de transmisión cuando se interponen entre la fuente y el receptor. Pero, mientras que las pantallas clásicas únicamente trabajan con los mecanismos de absorción y reflexión, los CS utilizan más mecanismos como la resonancia y la dispersión múltiple.

La principal novedad que presentan los CS es la posibilidad de crear pantallas a la carta, es decir, poder utilizar nuevas tecnologías y diseños para satisfacer los criterios específicos, por tanto se tiene una mayor efectividad en el control del ruido. Y, se puede atenuar cualquier banda de frecuencias mediante el uso de los mecanismos de control de ruido presentes en un CS (dispersión múltiple o resonancia) [8].

A continuación, se procede a describir como evaluar la atenuación que proporciona una pantalla acústica.

2.2.3. Atenuación proporcionada por la barrera. Insertion Loss (IL)

Para poder evaluar la capacidad de atenuación de las barreras acústicas se suele emplear un parámetro denominado pérdidas por inserción³ que se define como la diferencia de dos niveles de presión sonora que son medidos en el mismo punto, antes y después de insertar el CS. Viene regido por la siguiente expresión matemática:

$$IL(\text{dB}) = LP_{\text{después}} - LP_{\text{antes}} \rightarrow IL = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{|P_i|}{|P_d|} \right) \quad (\text{Ec. 1})$$

En donde P_i se corresponde con el valor de la presión eficaz medida cuando se encuentra presente el CS (elemento dispersor), mientras que P_d se refiere al valor de presión eficaz que llega de forma directa de la fuente al receptor, sin ningún obstáculo de por medio.

2.3. Conceptos básicos sobre la física del estado sólido

Se van a explicar una serie de conceptos básicos relacionados con las propiedades de los cristales de sonido para entender e interpretar mejor el fin del trabajo realizado en la presente tesina.

2.3.1. Introducción a la física de los cristales

La física del estado sólido empezó a estudiarse a principios del siglo XX después del descubrimiento de la difracción de los rayos X en los sólidos cristalinos. Cuando un cristal crece en un medio ambiente constante, se comporta como si se empezaran a formar bloques constructivos idénticos de forma continua, tal y como se observa en la figura siguiente:

³ *Insertion Loss* (IL), en inglés. En la presente tesina se denominará a este parámetro como pérdida por inserción o mediante sus siglas en inglés, IL. Su unidad es el decibelio (dB).

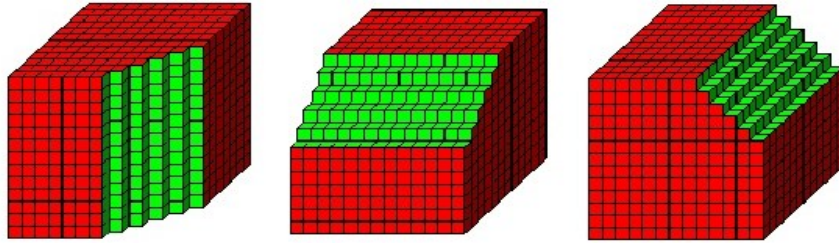


Figura 8. Muestra la relación entre la forma exterior de los cristales y la forma de los bloques de construcción.

Estos bloques constructivos son átomos, o grupos de átomos, por tanto, se puede decir que un cristal es una distribución periódica tridimensional de átomos. En 1912, se presentó en Munich el artículo “Efectos de interferencia con rayos Röntgen” por M. Von Laüe (llevó a cabo la teoría elemental de la difracción de los rayos X), Friedrich y Knipping (llevaron a cabo los primeros estudios experimentales de la difracción de rayos X por cristales) [6].

2.3.2. Sistemas periódicos

Cuando un material, en el espacio, presenta una distribución regular y repetitiva, se dice que es una estructura periódica. La mayor parte de sólidos existentes en la naturaleza, a escala atómica, presenta un tipo de estructura periódica y suelen llamarse sólidos cristalinos.

Por consiguiente, un sistema periódico se caracteriza por poseer una estructura cristalina, es decir, cuando se tiene una distribución periódica de un material situado en un medio con propiedades físicas distintas.

Se pueden encontrar estructuras cristalinas en cualquier dimensión ya que depende de en cuantas direcciones se produzca la repetición. En la **Fig. 9** se pueden observar algunos ejemplos de sistemas reales que pueden considerarse periódicos. Los sistemas periódicos 1D presentan la periodicidad en una sola dirección; en 2D, la periodicidad aparece en dos direcciones debido a la homogeneidad de la tercera dimensión. Finalmente, un sistema periódico 3D presenta su periodicidad en tres dimensiones del espacio.

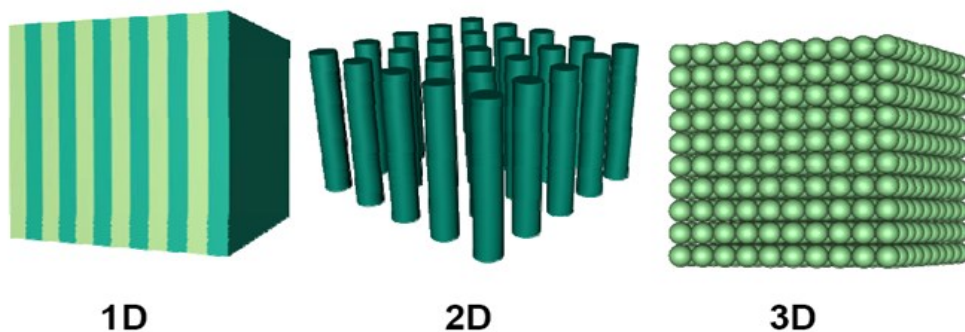


Figura 9. Ejemplos de sistemas periódicos [6].

Se ha de destacar que el concepto de sistema periódico es una abstracción matemática ya que implica la existencia de una estructura infinita, en la práctica, los sistemas infinitos no pueden ser alcanzados, pero bajo ciertas suposiciones una estructura finita puede simular un sistema periódico infinito. Por ejemplo, en el caso de las estructuras cristalinas, pueden ser estudiadas usando condiciones límite periódicas si el tamaño del cristal es mucho más grande que la longitud de onda usada para evaluar el cristal.

2.3.2.1. Propiedades geométricas

2.3.2.1.1. Base y estructura cristalina

Se entiende por red aquella distribución periódica regular de puntos en el espacio. La estructura cristalina se forma cuando la base de átomos se une, de forma idéntica, a todos los puntos de la red, por tanto, se tiene la siguiente relación [6]:

$$\text{red} + \text{base} = \text{estructura cristalina}$$

2.3.2.1.2. Red de Bravais

A continuación, se procede a definir los elementos necesarios para formar una estructura cristalina.

Se define el término **bases** como aquellas unidades elementales que constituyen el conjunto de la estructura. Y, al tipo de red periódica de puntos, se le denomina *red de Bravais*, que está formada a partir de una disposición infinita de puntos discretos con la particularidad de que su estructura y orientación es invariante indistintamente del punto de orientación.

Como conclusión, el conjunto de la estructura cristalina puede definirse a partir de una base y la *red de Bravais*.

El nombre *red de Bravais* se utiliza para denominar a un tipo de red diferente, es decir, existen cinco *redes de Bravais* en dos dimensiones, tal y como se muestra en la siguiente imagen:

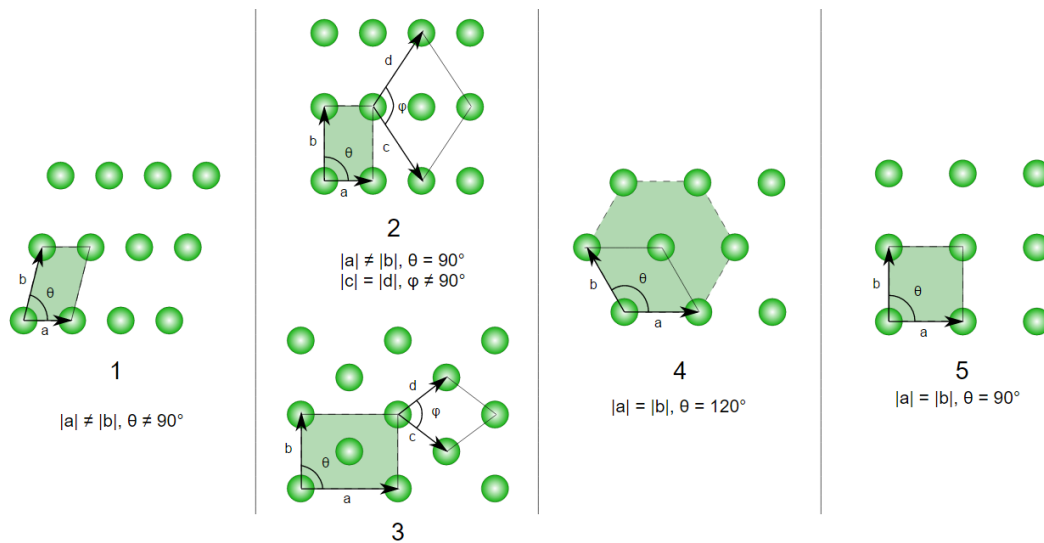


Figura 10. Redes de Bravais más comunes en dos dimensiones (2D): (1) Red oblicua; (2) Red rectangular – centrada; (3) Red rectangular; (4) Red hexagonal; (5) Red cuadrada.

La presente *red de Bravais* viene definida por la siguiente expresión matemática [9]:

$$\vec{R} = \{ \sum_{i=1}^n v_i \vec{a}_i | v_i \in \mathbb{Z} \} \quad (\text{Ec. 2})$$

Siendo $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ una base en el espacio R^n , v_i un número de enteros y n número natural que va de 1 (red de puntos unidimensional) hasta 3 (red de puntos tridimensional).

Una vez conocidos los tipos de *red de Bravais* más comunes se define el factor de llenado como la fracción de volumen que en una celda unitaria está ocupada por átomos con respecto al volumen total, este factor es adimensional y viene dado por la siguiente expresión matemática:

$$ff = \frac{N_{\text{átomos}} V_{\text{átomo}}}{V_{\text{celdaunidad}}} \quad (\text{Ec. 3})$$

Siendo $N_{\text{átomos}}$ el número total de átomos en la celda unitaria, $V_{\text{átomo}}$ el volumen del átomo y $V_{\text{celdaunidad}}$ el volumen ocupado por cada una de las celdas unitarias.

Otro concepto importante son las denominadas **celdas unitarias** (ver **Fig. 11**) que pueden ser definidas mediante vectores 2D ó 3D, que consisten en una mínima parte del cristal y, al repetirse, forma el cristal completo.

Hay un tipo de celda unitaria, denominada **celda primitiva**. Una celda se encarga de llenar todo el espacio a base de repetir operaciones de traslación del cristal, de forma adecuada. Por tanto, se puede definir la celda primitiva como una celda de volumen mínimo y de densidad de puntos de la *red de Bravais* igual a 1. Existe siempre un punto de la red, por cada celda primitiva [6].

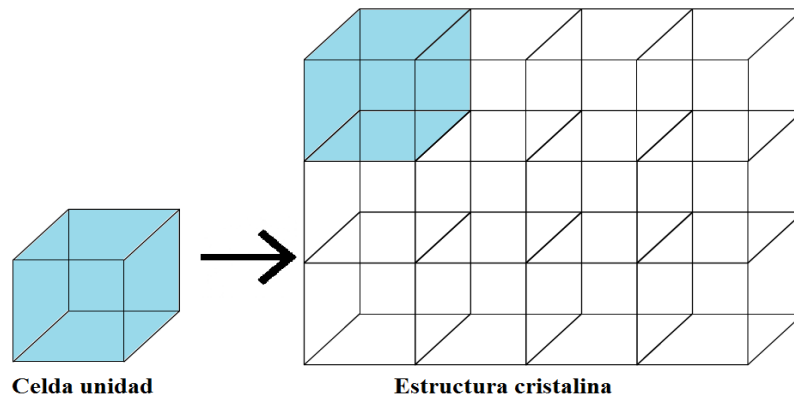


Figura 11. Muestra el concepto de celda unidad. El conjunto de celdas unidad forma la estructura cristalina.

Por ejemplo, si la celda primitiva tiene forma de paralelepípedo con puntos de la red en cada uno de sus 8 vértices, cada punto de la red se distribuye entre 8 celdas, por tanto, como ya se ha mencionado antes, el número total de puntos de la red en la celda es igual a uno.

Por otra parte, hay un tipo de celda unitaria que se construye de forma diferente denominada celda de *Wigner-Seitz*. Presenta ciertas ventajas en la visualización de la red, es decir, tiene la misma simetría que la red ya que el centro de cada celda está ocupado por un punto de la red.

El proceso de construcción de este tipo de celdas es sencillo, a continuación se explican los pasos de forma más detallada. En primer lugar, se procede a dibujar líneas rectas que unan un punto de la red cualquiera, con todos los puntos de la red próximos. Seguidamente, en el punto

medio de estas líneas y perpendicular a ellas se dibujan nuevas líneas. Finalmente, el volumen encerrado más pequeño obtenido a raíz de este procedimiento es lo que se considera la celda primitiva de *Wigner-Seitz* (véase **Fig. 12**).

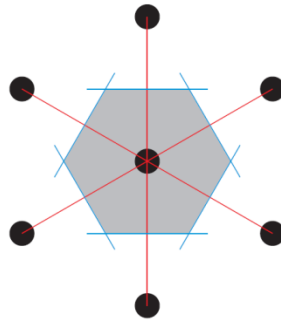


Figura 12. Construcción de una celda hexagonal de Wigner-Seitz en una red 2D [9].

2.3.3. Red recíproca

2.3.3.1. Aspectos generales acerca de las características de propagación

Las ondas cuando viajan a través de un medio formado por elementos periódicos, como un sistema cristalino, al chocar con los elementos de la estructura cristalina, comienzan a dispersarse y, éstas, vuelven a dispersarse nuevamente al encontrar otros elementos, por tanto se está delante de una dispersión múltiple y, principalmente, depende de la forma de la estructura cristalina y de la longitud de onda incidente.

Sí la longitud de onda $\lambda \cong$ distancia entre planos de la estructura cristalina, la dispersión múltiple genera haces en otras direcciones diferentes a la incidente, debido al hecho de que existe interferencia destructiva y constructiva entre ondas.

A continuación, se procede a explicar el fenómeno de propagación de rayos X sobre sólidos cristalinos estudiado por W. L. Bragg.

2.3.3.2. Difracción de ondas por los cristales. Ley de Bragg

La difracción está ligada con la estructura del cristal y la longitud de onda. W. L. Bragg explicó la forma de propagación de los haces en un cristal.

Seguidamente, se va a proceder a explicar la fórmula obtenida por Bragg, suponemos que las ondas incidentes en la estructura cristalina son reflejadas especularmente en cada uno de los planos paralelos de átomos de cristal, de esta forma, cada uno de los planos, solamente refleja una pequeña porción de radiación. Además, se cumple que en la reflexión especular, el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión. Si las reflexiones provienen de planos de átomos paralelos, éstos interfieren constructivamente dando lugar a la aparición de haces difractados, tal y como se muestra en la figura que sigue [9]:

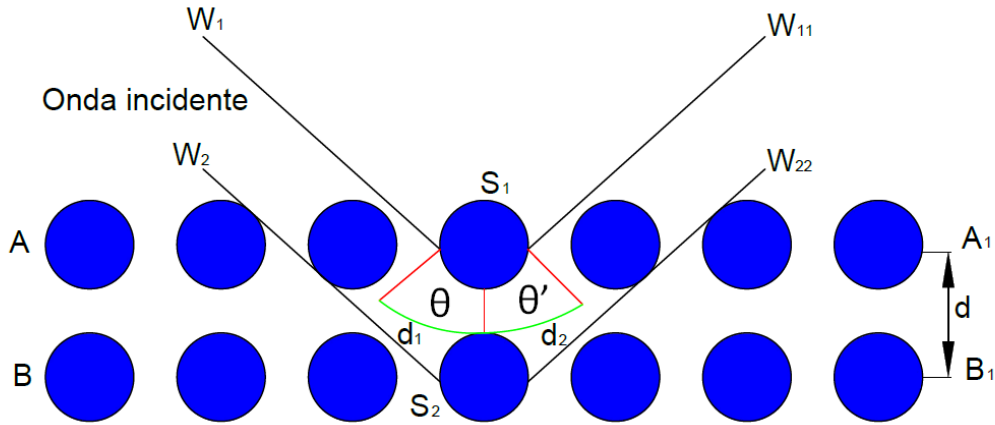


Figura 13. Difracción de Bragg.

En la **Fig. 13** se tiene dos planos de cilindros paralelos A-A₁ y B-B₁, separados una distancia L. Suponemos que la onda plana, con longitud de onda λ , incide en los dos planos con un ángulo θ . Por la ley de Snell se tiene que $d_1 = d_2$ y $\theta = \theta'$. Las ondas W_1 y W_2 son dispersadas por los cilindros S_1 y S_2 . La interferencia constructiva de las ondas de sonido dispersadas W_{11} y W_{22} ocurren en un ángulo θ y θ' respectivamente, si la diferencia de caminos entre $W_1 \rightarrow S_1 \rightarrow W_{11}$ y $W_2 \rightarrow S_2 \rightarrow W_{22}$, cumple la relación $n \lambda = d_1 + d_2$. En conclusión, la interferencia es constructiva cuando la diferencia de fases es múltiplo de 2π .

Además, es conveniente considerar la dispersión elástica en la cual la energía de los rayos X, en la reflexión, no varía. Si se considera que todos los planos paralelos de la red, están equidistantes entre sí, una distancia d , la diferencia de trayectos, que se corresponden con los rayos reflejados en planos adyacentes, es $2 d \sin \theta$, donde el ángulo θ es el ángulo de incidencia de la onda sonora (ver **Fig. 13**).

Existirá interferencia constructiva (ver **Fig. 14**) en la radiación que procede de planos sucesivos, cuando la diferencia de caminos es igual a un número entero n de longitudes de onda λ , por tanto, se llega a la fórmula deducida por Bragg:

$$2 d \sin \theta = n \lambda \quad (\text{Ec. 4})$$

En donde d es la distancia existente entre los planos cristalográficos, θ es el ángulo de incidencia de la onda sonora, n es el orden de difracción y λ es la longitud de onda de sonido.

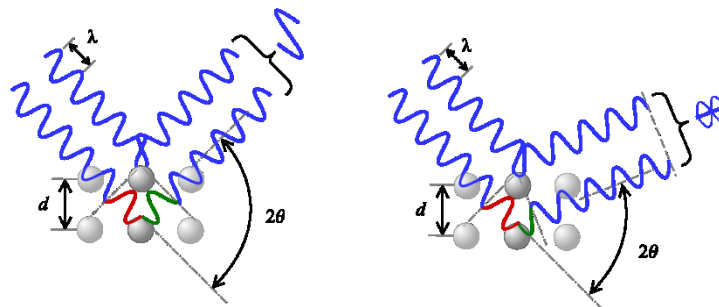


Figura 14. Interferencia constructiva (izq.) y destructiva (dcha.) según el ángulo de desviación (2θ).

Únicamente, se puede producir la *ley de Bragg* para longitudes de onda $\lambda \leq 2d$ y para ciertos valores del ángulo θ , aunque en cada plano se tiene una reflexión especular, las reflexiones procedentes del conjunto de planos paralelos se sumarán en fase, para conseguir así un haz reflejado intenso [6].

Se puede concluir que la *ley de Bragg* viene determinada por la periodicidad de la red, por tanto habrá determinados rangos de frecuencia en la cual la onda se pueda propagar (bandas permitidas) y en otros no (bandas prohibidas), a través de la estructura periódica. Como analogía a la aparición de este tipo de bandas es lo que sucede al estudiar la conducción eléctrica de los electrones en un sólido cristalino.

2.3.3.3. Teoría de bandas

A continuación, para entender este fenómeno, se va a explicar la teoría cuántica de bandas referida a sólidos.

2.3.3.3.1. Introducción

Dentro de un material cristalino se encuentran bandas de energía en las cuales los electrones se mueven libremente, estas bandas son el resultado de superponer los niveles atómicos de los átomos que forman el cristal. Cuando, de forma individual, se juntan los átomos para formar el cristal, se colocan de forma periódica dando lugar a una red cristalina. Una vez se tiene la estructura cristalina, los niveles de energía atómicos comienzan a interactuar entre ellos, dando lugar a bandas de energía.

2.3.3.3.2. Formación de las bandas de energía

Para el análisis de la formación de bandas solamente se va a considerar la banda s , en el que se asocia cada estado s con cada átomo, por tanto se habla de banda de estados. La presente explicación se centrará sólo en los electrones de valencia [9].

En estado sólido, a presión normal, cada uno de los estados permanece enlazado al núcleo y por ende no elevan las bandas de energía. Como consecuencia, existe una banda por cada estado de valencia en una celda unitaria de un cristal. Es decir, si existen N_a átomos en la celda unitaria y N_v estados de valencia ligados a cada átomo, se tienen $N_a N_v$ bandas.

Los *gaps* de cada una de las bandas son rangos de energía donde no caen las bandas de energía, es muy importante en el tema de estabilización del cristal en una determinada estructura.

Dicho esto, cada uno de los electrones de un sólido cristalino se dividen en bandas de energía separadas a través de regiones para las cuales no existen estados electrónicos permitidos. Son denominadas, como ya se ha adelantado, *gaps* de energía.

La disposición de las bandas de energía se divide en metales, semiconductores y aislantes dependiendo del estado de las bandas de energía, es decir, si están vacías o llenas y de aquellos intervalos de energía que presenten *gaps*, tal y como se muestra en el siguiente esquema:

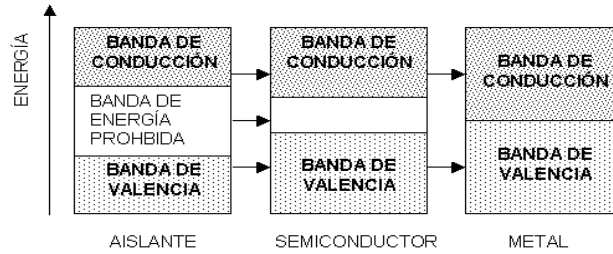


Figura 15. Muestra un esquema sobre la disposición de las bandas de energía.

Una vez vista la formación de las bandas de energía se procede a describir el concepto de bandas prohibidas.

2.3.3.3.3. Bandas prohibidas (Band gaps)

En función de la frecuencia de la señal emitida y de la separación entre difusores, puede haber interferencias constructivas, pero también destructivas por lo que la onda nunca llega a salir del interior del cristal. Por tanto, se denomina banda prohibida al rango de frecuencias en las cuales aparece este efecto.

Resulta muy interesante dicha propiedad en el diseño de filtros acústicos para poder guiar o encerrar ondas de determinadas bandas de frecuencias.

Para poder entender e interpretar mejor la estructura de bandas se consideran dos ejemplos de cristal sónico 2D. En la Fig. 16 se puede observar la estructura de bandas con *pseudogap* en la parte de la izquierda y con *gap* completo, en la parte derecha [9].

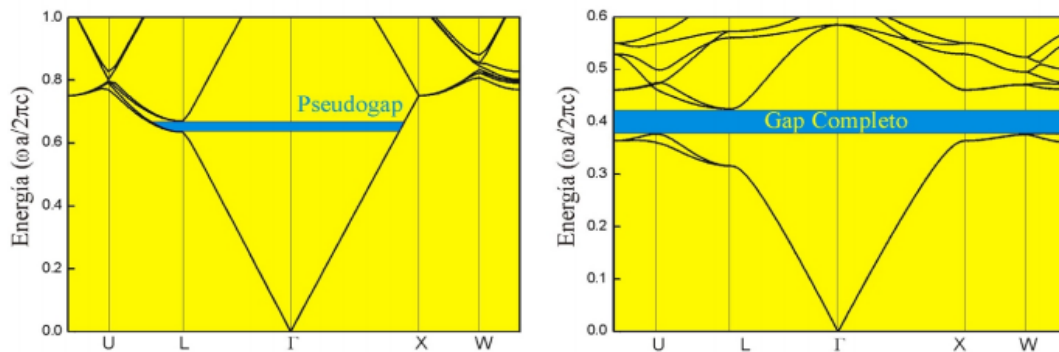


Figura 16. Muestra un *pseudogap* y *gap* completo en función del tipo de CS empleado.

Se puede ver en la Fig. 16 que alrededor de una banda prohibida completa o parcial, las bandas de transmisión tienen una gran curvatura, esto significa que en dichas frecuencias, la dispersión es más fuerte.

El *pseudogap* aparece cuando en una dirección determinada en la propagación de las ondas aparecen bandas prohibidas, por tanto el sonido no se propaga a través del cristal.

El *gap* completo se produce cuando aparecen bandas prohibidas en cualquier dirección en la cual se propaga la onda a través del cristal de sonido, esto ocurre cuando se solapan los picos de Bragg, correspondientes a las direcciones de simetría principales del cristal, en un determinado rango de frecuencias.

Algunos parámetros más destacados que influyen en la aparición de un *gap* completo en un cristal de sonido 2D:

- Factor de llenado: A mayor *filling factor*, el *gap* es más ancho.
- Diferencia de densidades de los elementos que constituyen el cristal.
- Tipo de forma geométrica de los dispersores.
- Simetría de la red: Si la celda de *Wigner-Seitz* se asemeja a un círculo, la probabilidad de que exista un *gap* completo es mayor.

En conclusión, la banda prohibida se considera como la diferencia de energía existente entre la parte superior de la banda de valencia y la parte inferior de la banda de conducción, tal y como se muestra en el siguiente esquema:

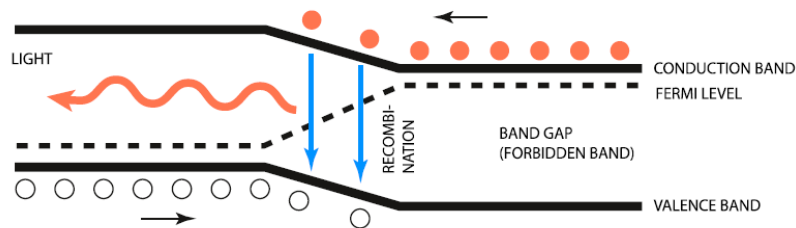


Figura 17. Muestra el esquema básico de banda prohibida.

2.3.3.3.4. Características geométricas

En este apartado se procede a explicar los parámetros geométricos básicos que se necesitan para poder calcular el factor de llenado de la red o más conocido en inglés como *filling factor*.

En primer lugar, se ha de destacar el parámetro de red o paso, a , que viene definido como la distancia de separación entre celdas unitarias (distancia entre 2 puntos de la *red de Bravais*) o como la dimensión de cada celda con respecto a su estructura cristalina. Y, para poder calcular el ff (*filling factor*) hay que conocer también el tamaño de los elementos que en su conjunto componen la red [9].

De forma breve, este parámetro se obtiene a partir del cociente entre el área cubierta por la celda unidad con respecto al área total de dicha celda.

A continuación, se muestran, de forma gráfica, tres ejemplos correspondientes a los parámetros de red cuadrada, triangular y hexagonal:

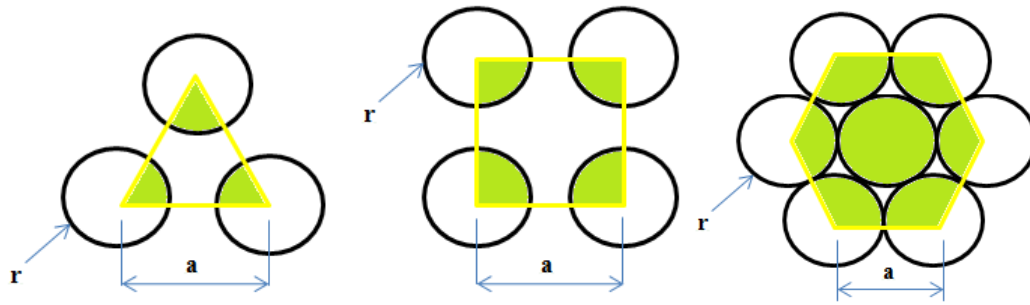


Figura 18. Ejemplos de factor de llenado para red triangular (izda.), red cuadrada (centro) y red hexagonal (dcha.).

De forma matemática, para los ejemplos expuestos anteriormente se obtiene el factor de llenado de la siguiente manera:

$$ff_{\Delta} = \frac{2\pi r_0^2}{\sqrt{3} \cdot a^2}; \quad ff_{\square} = \frac{\pi r_0^2}{a^2}; \quad ff_{\hexagon} = \frac{\pi r_0^2}{2\sqrt{3} \cdot a^2} \quad (\text{Ec. 5})$$

2.3.4. Cristales de sonido 2D

El presente estudio se realizará mediante simulación de cristales de sonido bidimensionales, por tanto se va a explicar, de forma general, la creación de estos cristales.

Un cristal 2D se forma a partir de la periodicidad de la estructura en dos direcciones, concretamente, en X e Y, siendo homogéneo en la dirección del eje Z.

A continuación, se presenta una imagen que muestra la simulación de un cristal de sonido bidimensional formado por una serie de cilindros periódicos dispuestos en una red cuadrada sobre el plano XY para poder atenuar el ruido ferroviario.

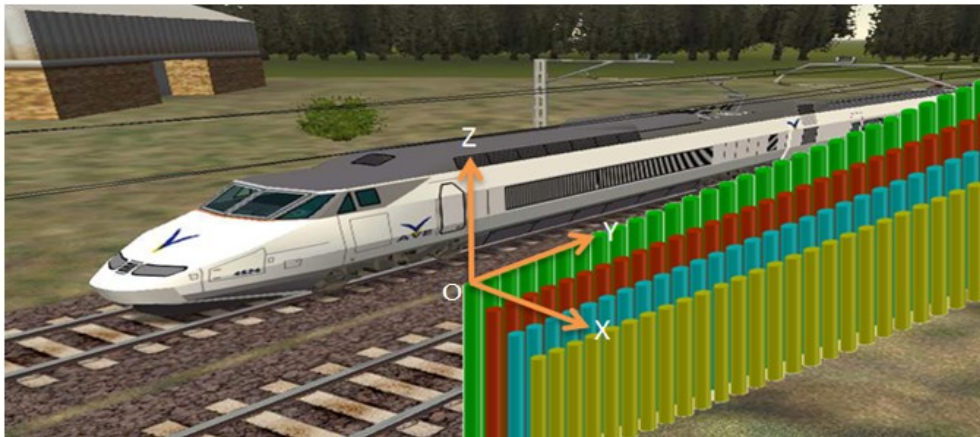


Figura 19. Esquema de cristal de sonido 2D formado por cilindros de distintas longitudes dispuestos en una red cuadrada.

2.3.5. Resonancias en CS: resonador de Helmholtz

Con el fin de aumentar el rendimiento de las pantallas acústicas basadas en CS, se abordaron nuevas estrategias como el uso de material absorbente (ver ANEXO 2: Material poroso (lana

de roca)) y cilindros rígidos con cavidades que actúan como resonadores. Por tanto, en la presente tesina, además del BG, se estudiarán los rangos de frecuencia relacionados con las propiedades de absorción y de resonancia.

Un resonador está constituido por una cavidad rígida con un cuello de área S y longitud L , además de un volumen V . Por tanto, un resonador de cavidad está formado por un volumen de aire confinado en el recinto interior por una abertura estrecha. En el presente estudio basado en CS, nos vamos a centrar en los resonadores de tipo **a)** (ver **Fig. 20**) que actúan como resonadores Helmholtz ya que absorben la energía acústica de forma más eficiente cerca de la frecuencia de resonancia.

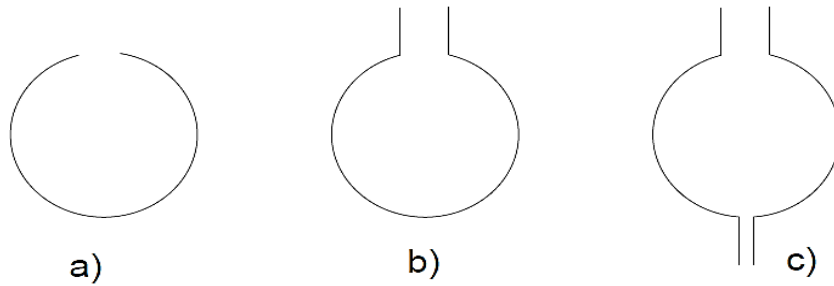


Figura 20. Ejemplos de resonadores de Helmholtz simples.

Después de haber visto los conceptos básicos sobre cristales de sonido se procede a explicar el estudio realizado.

3. DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO

3.1. Consideraciones previas

Las primeras pantallas acústicas basadas en CS fueron teóricamente propuestas por Kushwaha (1997) y más tarde fueron diseñadas, desarrolladas y construidas en el presente siglo [15].

En el presente estudio, se va a trabajar con el ruido de trenes eléctricos normalizado de 93 dB @ 1 kHz, por tanto, habrá que sumar para cada una de las bandas de frecuencia de tercio de octava el espectro normalizado del ruido ferroviario, ponderado A, dado por el código técnico de la edificación tal y como se muestra en la tabla que sigue [10]:

f_i (Hz)	$L_{Aef,i}$ (dB(A))	f_i (Hz)	$L_{Aef,i}$ (dB(A))
100	-20	800	-9
125	-20	1000	-8
160	-18	1250	-9
200	-16	1600	-10
250	-15	2000	-11
315	-14	2500	-13
400	-13	3150	-15
500	-12	4000	-16
630	-11	5000	-18

Tabla 1. Espectro normalizado del ruido ferroviario, ponderado A [10].

A continuación, se muestra una tabla con el nivel de ruido en dB ponderado A producido por un tren eléctrico moderno, normalizado a 93 dB @ 1 kHz [1]:

f_i (Hz)	L_{Aeq} (dB(A))	f_i (Hz)	L_{Aeq} (dB(A))
100	73	800	84
125	73	1000	85
160	75	1250	84
200	77	1600	83
250	78	2000	82
315	79	2500	80
400	80	3150	78
500	81	4000	77
630	82	5000	75

Tabla 2. Nivel de ruido producido por un tren eléctrico moderno.

Se va a trabajar con el espectro de ruido de un tren eléctrico moderno, tal y como se muestra en la Fig. 21, pero dentro de este espectro de ruido, como es muy amplio, ya que abarca de 63 Hz hasta los 5 kHz, se va a intentar trabajar en las bandas donde se concentre la mayor cantidad de energía acústica.

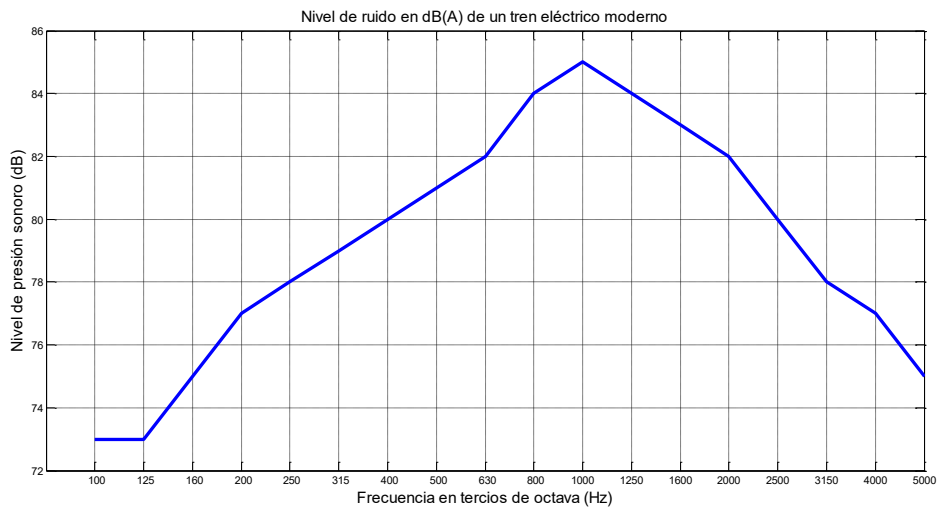


Figura 21. Espectro de ruido de un tren eléctrico moderno, medido en campo libre a 10 m de distancia y a 150 km/h.

Una vez obtenido el nivel de ruido del ferrocarril ($L_{p_{global}} = 93,2$ dB (A)), en la figura que sigue, se puede ver la propagación del ruido de ferrocarril y como se va atenuando con la distancia.

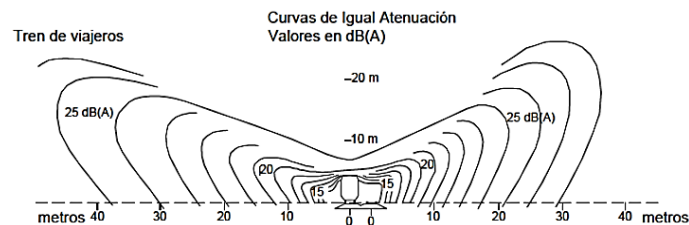


Figura 22. Curvas de atenuación por directividad para tren de viajeros y tren de mercancía [10].

Como se observa en la Fig. 21, la mayor contribución al ruido se encuentra en la banda de 1 kHz, además se considerarán las bandas adyacentes de 500 Hz y 2 kHz (en bandas de octava) para poder atenuar más del 40% del ruido de ferrocarril, es decir, la mayor parte del ruido se concentra entre esas tres bandas.

Por tanto, se va a diseñar una pantalla basada en cristales de sonido (CS) que atenúe esas bandas de frecuencia.

3.2. Diseño de pantallas acústicas basadas en cristales de sonido

Se van a llevar a cabo varios diseños de pantallas acústicas basadas en CS. Para ello, y debido a la forma geométrica tipo cilindro de los dispersores y los diferentes elementos físicos que hay involucrados en el diseño, se ha considerado conveniente para el diseño de este tipo de pantallas de CS utilizar la herramienta de software basada en el Método de los Elementos Finitos (FEM).

Para tener una visión más detallada del software FEM es muy recomendable consultar el **Anexo 1- “Método de elementos finitos”**.

Para el presente trabajo, se va a estudiar la propagación del sonido mediante la resolución, en el dominio de la frecuencia, de la ecuación de Helmholtz (**Ec. 6**) debido a que la geometría de los dispersores diseñados y los distintos mecanismos físicos involucrados en su diseño se analizan mejor solucionando la ecuación de Helmholtz mediante la herramienta teórica de diseño denominada Método de los Elementos Finitos (FEM):

$$\frac{1}{\rho_0 c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \nabla \left(\frac{1}{\rho_0} \nabla p \right) \quad (\text{Ec. 6})$$

De forma simplificada, se tiene la siguiente expresión de Helmholtz:

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0 \quad (\text{Ec. 7})$$

La **Ec. 7** representa la ecuación de dispersión cilíndrica de ondas acústicas en un medio fluido sin pérdidas en donde $k = \omega/c$ es el número de onda y viene expresado como la relación entre la frecuencia angular $\omega = 2\pi f$, y la velocidad del sonido en el medio c ; $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2}$ representa el laplaciano; y la función de valor complejo p satisface la ecuación de Helmholtz en donde el medio aire abarca el dominio exterior sin límites [7].

Al resolver la **Ec. 7**, se obtiene el campo de presión sonora resultante y, mediante el uso del software MATLAB se procederá a construir el espectro de frecuencias.

Además, se va a trabajar en banda fina para analizar con precisión la aparición de *band gaps* (se emplearán pasos de 1 Hz). Por consiguiente, los aspectos más importantes que se tendrán en cuenta en la simulación son: (1) Para obtener las predicciones numéricas se va a emplear el módulo de la presión acústica proporcionado por el programa comercial COMSOL 4.4 [11]; (2) Considerando las características del método numérico, primeramente se va a diseñar la geometría de la estructura de la barrera acústica y, posteriormente, se obtendrán las soluciones (presiones complejas) a partir de la resolución numérica de la **Ec. 6**, en cada uno de los puntos del dominio seleccionado, considerando cada uno de los efectos acústicos presentes como las resonancias o absorciones.

El modelo que se va a emplear en el presente estudio proviene de la superposición de dos modelos 2D con el fin de (i) reducir el tiempo de computación; (ii) disponer de una herramienta de diseño de pantallas acústicas basadas en CS que permita analizar cada mecanismo por separado (2D horizontal: BG, resonancias y absorción; 2D vertical: Difracción por el borde) [5].

En las simulaciones tanto del modelo plano como del modelo vertical en 2D se utilizará, como condición de contorno, una capa PML (*Perfectly Matched Layer*). El método PML fue presentado en 1994 por Berenger [18] y es muy útil para poder emular la condición de radiación de Sommerfeld en las soluciones numéricas de problemas de dispersión y radiación de onda, es decir, este método se basa en una transformación de coordenadas (Liu, 1999). Dentro del PML, las ondas acústicas disminuyen de forma exponencial.

Las diferentes partes de la barrera acústica basada en CS se modelarán a partir de la condición de contorno de Neumann para materiales rígidos mientras que se usará el modelo de Delany-Bazley para el material absorbente con una resistencia al flujo $23.000 \text{ Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$.

Al final de todo el proceso, una vez calculadas las presiones complejas, se procede a calcular las pérdidas por inserción (IL), mediante este parámetro se evaluarán las características de atenuación de cada una de las pantallas acústicas con CS propuestas.

Una vez visto los pasos a seguir, se procede a determinar los modelos a diseñar mediante el software COMSOL. En el presente estudio se va a trabajar con dos modelos 2D que resultan en un modelo 3D:

(1) **Modelo plano 2D:** donde se va a tratar, por una parte, con cilindros totalmente rígidos sin resonador al cual se le añade una capa de lana de roca y, por otra parte, con cilindros con una abertura en su parte delantera para actuar como un resonador y, al igual que en el caso anterior, también dispone de una capa de lana de roca exterior al cilindro.

(2) **Modelo vertical 2D:** donde se va a trabajar con un cristal de sonido (CS) que va a tener cuatro filas perpendiculares a la dirección de propagación y todos los elementos cilíndricos tendrán la misma altura que corresponderá a la longitud de onda (λ) de la frecuencia que se quiera atenuar, además se tendrá una disposición de cilindros horizontales colocados a una determinada altura con respecto al borde superior de los dispersores para poder así reducir la difracción por el borde superior [5] [12].

El caso particular de cristales de sonido 2D (2DCSs) formado a partir de cilindros rígidos inmersos en el aire es ampliamente utilizado en investigación por varios motivos: **1)** Un modelo 3D exige un gran coste computacional, por tanto, el modelo 2D lo reduce mucho y permite analizar cada fenómeno por separado; **2)** Los cilindros presentan gran simetría que permite el desarrollo de métodos teóricos para el estudio de esos sistemas con bajo coste computacional; **3)** Su simplicidad permite explicar la realidad física con buenos resultados y en donde dos modelos 2D resultan en un modelo 3D (ver Fig. 23).

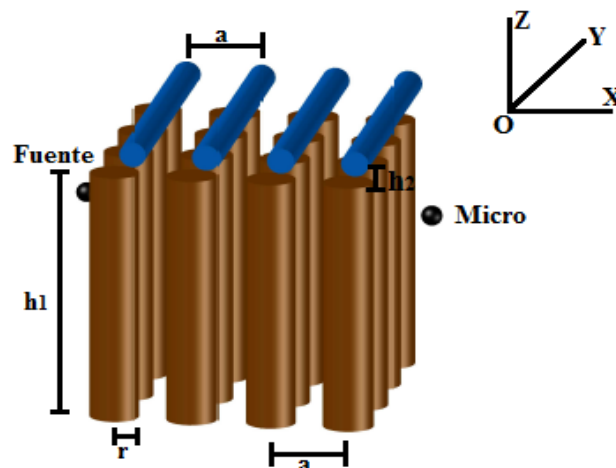
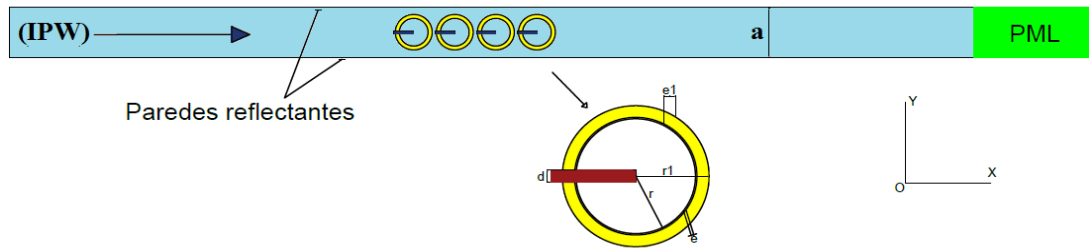
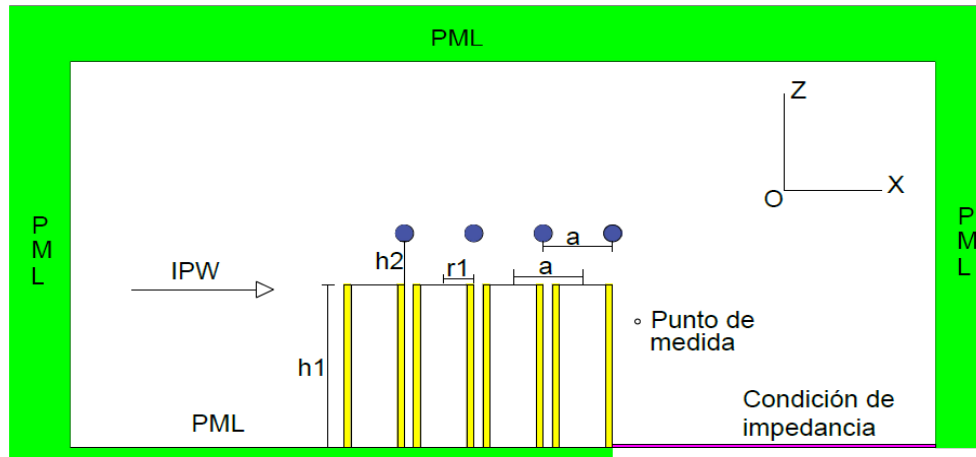


Figura 23. Muestra el modelo de pantalla 3D [5] [12] [14]. Siendo h_1 la altura de los cilindros rígidos, r el radio de los dispersores, a es el parámetro de red y h_2 es la separación existente entre los cilindros horizontales y verticales.



a) Vista en Planta



b) Vista en Sección

Figura 24. (a) En la vista de planta (OXY, caso 2D) se incluye los multi-fenómenos de control de la transmisión a través del CS; resonancias (a baja frecuencia), absorción (medias-altas frecuencias) y dispersión (mediante el uso de la interferencia de Bragg). Además, se puede ver, en el plano OXY, los dispersores cilíndricos, las paredes laterales reflectantes y el PML que define el límite del dominio; (b) Se presenta una vista en sección del modelo (OXZ, caso 2D) donde se va a considerar la difracción por el borde superior de los dispersores, y en esta vista se puede observar el problema real en 3D. Los límites de contorno están formados por PML e impedancia [5] [12] [13].

Por tanto, los efectos de difracción por el borde superior de una matriz periódica de cilindros rígidos finitos en 2D inmersos en aire y los efectos de BG, debidos a la longitud finita de los cilindros y la periodicidad de la matriz, son los fenómenos que se considerarán a la hora de diseñar dispositivos reales con el fin de poder controlar la propagación de las ondas.

A continuación, se presentan las configuraciones de las simulaciones para los modelos de los puntos (1) y (2).

- **Modelo plano 2D:**

Como ya se ha comentado, se procede a diseñar y resolver numéricamente los dos modelos mediante la herramienta FEM: con y sin resonador junto con una capa de lana de roca.

- **Cilindros totalmente rígidos:**

- **Geometría, simetrías del problema y tipo**

Se tienen cuatro filas de cilindros limitados por dos líneas totalmente reflectantes, que corresponde a la condición de contorno de Neumann, en donde $dp/dn = 0$ (velocidad normal = 0), montados en red cuadrada 2D, estando a una distancia de un parámetro de red (a) = 17 cm. Por tanto,

cuando la primera reflexión de la onda plana incide sobre los cilindros, refleja sobre la pared lateral y vuelve a reflejar sobre el cilindro, esa primera reflexión se puede asociar a otra posible reflexión del cilindro contiguo, la segunda reflexión viene dada a partir de la siguiente fila etc. por tanto, como cada vez se tienen reflexiones, se está delante de un cristal de sonido semi-infinito en la dirección perpendicular a la transmisión de la onda plana.

Los cilindros empleados tienen un diámetro de 126 mm y un espesor de 5 mm, como se emplea una columna, la superficie total ocupada por la muestra es de 0.05 m². Además, para cubrir el cilindro rígido se instalará material absorbente, en concreto, lana de roca de espesor 15 mm y de densidad 100 kg/m³, para poder absorber las ondas acústicas. Por tanto, mediante el uso de la **Ec. 5** para red cuadrada, se tiene un factor de llenado de 0,43. Se busca obtener un factor de llenado lo más grande posible, esto permitirá tener un rango de frecuencias más amplio del *band gap* del cristal de sonido, pero hay que tener presente que a mayor ff , los elementos que constituyen el cristal de sonido cada vez están más cerca, por tanto, el CS empezaría a perder propiedades como el paso del viento y del agua a través de ellos.

Se ha decidido que los cilindros sean de acero inoxidable ya que es un material reflectante al sonido con una impedancia acústica $Z = 45.3$ Mrayls. Por tanto, este sólido es perfectamente reflectante ya que $Z_{\text{acero}} \gg Z_{\text{aire}}$. Se asume que la velocidad del sonido en el aire bajo condiciones atmosféricas normales es $c = 343$ m/s y la densidad 1,21 kg/m³, por tanto $Z_{\text{aire}} \approx 415$ rayls.

Por otra parte, se identifican dos tipos de simetrías infinitas: axial y espejo. Pero, para el presente estudio, no se van a tener en cuenta. Destacar que cuanto mayor sea la simetría, mayor es el factor de llenado.

Como fuente emisora, se va a emplear una onda plana, conocida en inglés como *Plane Wave* (PW), con una amplitud $p_0 = 1$ Pa, que va a viajar de izquierda a derecha en el dominio escogido.

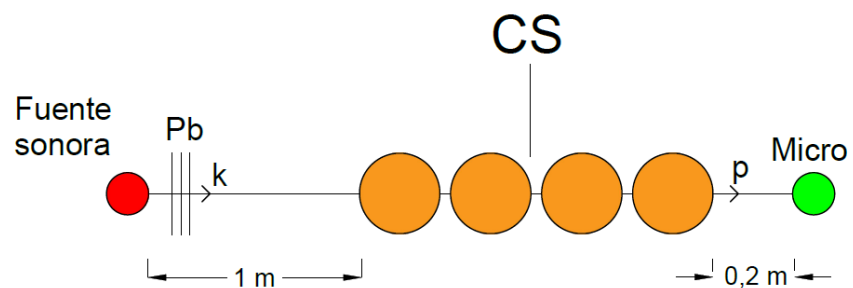


Figura 25. Esquema del sistema utilizado en el modelo plano: cilindro sin resonador.

El campo acústico total \mathbf{p}_t viene determinado por la superposición del campo de presión de fondo \mathbf{p}_b (*background pressure field*) y el campo de presión dispersado \mathbf{p} , expresándolo en forma matemática:

$$\mathbf{p}_t = \mathbf{p}_b + \mathbf{p} \quad (\text{Ec. 8})$$

$$\mathbf{p}_b = p_0 e^{-i(k \cdot \mathbf{x})} \quad (\text{Ec. 9})$$

En donde p_b es una onda plana de amplitud p_0 que se mueve en la dirección del vector de ondas \mathbf{k} dado por el número de ondas $|\mathbf{k}| = \frac{2\pi f_0}{c_0}$, donde f_0 es la frecuencia y c_0 es la velocidad del sonido.

A continuación, como se puede ver en la **Fig. 26**, la geometría diseñada mediante COMSOL está formada por una sección de CS, perpendicular a los ejes de los dispersores cilíndricos, por tanto se representan a partir de dispersores circulares en el cual se incluyen todos los mecanismos considerados de control de ruido:



Figura 26. Vista en planta del CS diseñado mediante COMSOL.

En la **Fig. 26**, en el diseño de la geometría, los dispersores circulares están limitados tanto por la parte superior como por la parte inferior por dos líneas completamente reflectantes y, además, están separados una distancia igual al parámetro de red, a . Al emplear este tipo de geometría se produce un efecto como si fuese un CS semi-infinito. Este tipo de diseño ha sido empleado con éxito en varios análisis relacionados con CS [20] [21], y en donde se puede conseguir una disminución del coste computacional a cambio de reducir el dominio numérico.

- **Procesado:**

a) Tipo de estudio

Cálculo de la presión compleja detrás de la pantalla acústica basada en cristales de sonido.

b) Frecuencia de interés

El mayor nivel de ruido producido por un tren eléctrico abarca un rango desde los 500 Hz hasta los 2000 Hz, por tanto, éstos son los límites que se van a tener en cuenta a la hora de realizar la simulación mediante COMSOL.

Además, también se analizará la frecuencia de Bragg (que define el BG), que viene dada por la siguiente expresión matemática:

$$f_{\text{Bragg}} = \frac{c}{2a} \quad (\text{Ec. 10})$$

Siendo c es la velocidad del sonido en el aire y a es el parámetro de red, en nuestro caso, $a=17$ cm.

Por tanto, la distancia entre los cilindros ha sido escogida para disminuir la difracción a la frecuencia de 1000 Hz, que es la frecuencia de Bragg del primer *band gap*.

c) Tamaño del elemento de malla y tiempo de cálculo

Al modelar un problema de este tipo, la malla de cálculo ha de proporcionar suficiente resolución, por tanto se ha empleado una malla con un tamaño $\Delta x = 0.021$ m. Esta malla es suficiente para obtener un cálculo preciso hasta los 2 kHz tal y como se puede apreciar en los cálculos siguientes [11]:

$$\lambda = \frac{c}{f_{\max}} = \frac{343}{2000} = 0.172 \text{ m} \quad (\text{Ec. 11})$$

$$\Delta x < \frac{\lambda}{8} < \frac{0.172}{8} \approx 0.021 \text{ m} \quad (\text{Ec. 12})$$

En donde, c es la velocidad del sonido en el aire, f es la frecuencia máxima que se tiene en cuenta, y Δx es el tamaño de malla.

El tiempo de cálculo empleado para el análisis de este modelo es de 300 segundos.

d) Condiciones de contorno del problema

En el presente modelo se ha empleado, para las paredes del cilindro, el contorno rígido al sonido y también se ha implementado una capa de PML óptima en los límites del dominio para poder minimizar las reflexiones en un medio continuo.

- Post-procesado:

Tras pautar las condiciones de la simulación se procede a la implementación de la misma y, por ende, al análisis de los resultados.

a) Resultados

En esta sección se ha analizado el IL de los cilindros totalmente rígidos con y sin lana de roca.

Los resultados han sido obtenidos a una distancia de 0,2 metros con respecto al cristal de sonido.

A continuación, en la **Fig. 27** se puede observar la presencia de la onda plana que viaja de izquierda a derecha y, una vez se encuentran con los cilindros rígidos, empiezan a aparecer las reflexiones y, como se puede ver, a la frecuencia deseada de 1000 Hz, la transmisión es nula, marcada en el gráfico en color verde turquesa.

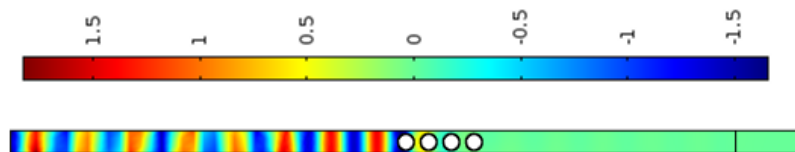


Figura 27. Campo total de presión acústica (Pa) centrado en la frecuencia de 1000 Hz.

En la **Fig. 28**, se muestra la gráfica de IL en donde se puede comprobar que el primer pico de BG aparece en 1000 Hz con una amplitud de 34,5 dB y un ancho de banda que abarca de 600 Hz a 1300 Hz. Entre *band gaps* la

transmisión es prácticamente total y, finalmente, aparece el segundo pico con una amplitud de 47,5 dB centrado en 2000 Hz. El efecto de absorción acústica se puede constatar a partir de los 600 Hz, aproximadamente.

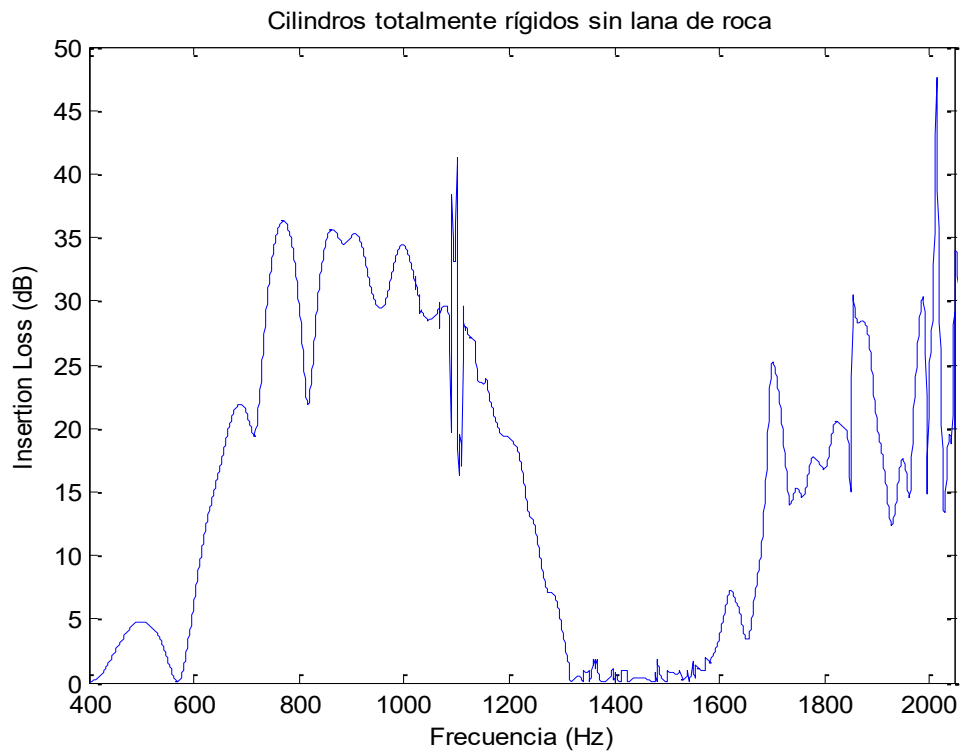


Figura 28. IL con cilindros totalmente rígidos sin lana de roca.

Una vez visto el correcto funcionamiento del modelo de superposición con los cilindros totalmente rígidos, se procede a poner una capa de lana de roca, tal y como se muestra en la Fig. 29. Después de estudiar varios tipos de grosores, se decidió optar por una capa con un espesor de 15 mm porque es la que mejor respuesta ofrecía en cada una de las frecuencias en términos de atenuación.

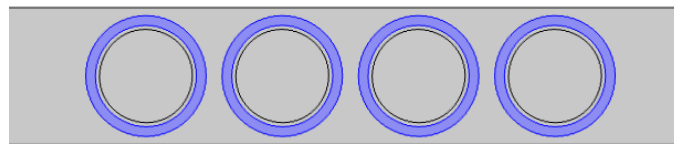
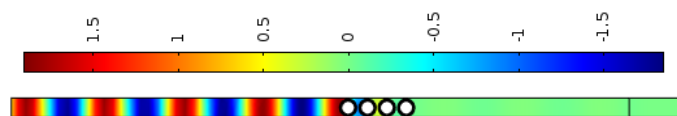


Figura 29. Muestra, en azul, la capa de lana de roca empleada, de espesor 15 mm [5] [12].

En la Fig. 30, se muestra el resultado de añadir una capa de lana de roca en el exterior del cilindro rígido. Como se puede ver, se tiene un BG que va desde 300 Hz hasta más allá de 2000 Hz, y una banda de atenuación entre 30 y 40 dB, esto se ha conseguido mediante la suma de la lana de roca con el cilindro rígido.



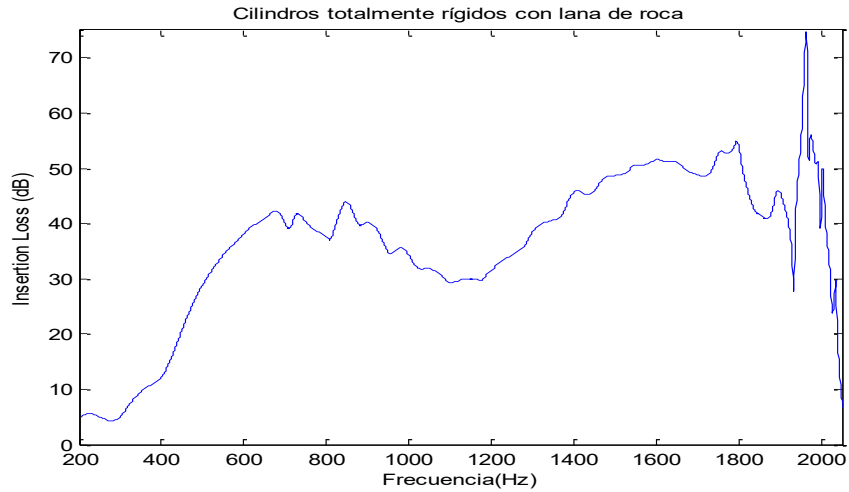


Figura 30. IL con cilindros totalmente rígidos con lana de roca.

○ **Cilindros con resonador:**

El tipo de mallado, el rango de frecuencias y las condiciones de contorno del problema no cambian con respecto al caso anterior, a excepción de la geometría debido a que los cilindros no serán totalmente rígidos. El comportamiento del dispersor se ha diseñado teniendo en cuenta la abertura, el radio del interior de la cavidad y, el espesor de la abertura (ver Fig. 24: vista en planta).

Si se pretende obtener una mayor atenuación se han de emplear elementos absorbentes selectivos (resonadores), se trata de elementos que presentan una curva de atenuación con un valor máximo a una determinada frecuencia, dicha frecuencia recibe el nombre de frecuencia de resonancia, y dependerá tanto de las características físicas como geométricas del resonador. En el presente trabajo, se va a emplear el resonador como complemento al material absorbente, es decir, se va a combinar el BG con el fenómeno de resonancia en el diseño del CS.

Si se observa la Fig. 31, en la banda de trabajo de nuestro interés, es decir, de 500 Hz a 2000 Hz, se tiene menos atenuación en 1100 Hz. Por tanto, aprovechando el modelo anterior, se pondrá un pico de resonancia en 1100 Hz y otro, en 1800 Hz, este último viene determinado por la geometría de los cilindros.

En primer lugar, se tiene que utilizar obligatoriamente la geometría de los cilindros escogidos en el diseño de los BG, por tanto, se estudiará el tamaño de la abertura L , para poder centrar los picos de resonancia.

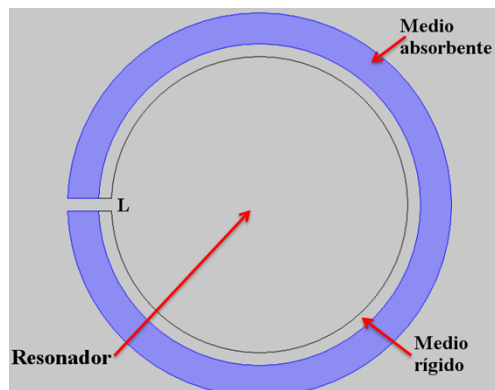


Figura 31. Cilindro con ranura L que actúa como resonador [5] [12].

Seguidamente, se presenta una gráfica donde se puede observar como varía la frecuencia de resonancia con la abertura L: a mayor abertura, la frecuencia de resonancia del sistema se sitúa en frecuencias más altas, es decir, para $L = 5 \text{ mm}$, el pico de resonancia se sitúa en 1800 Hz , mientras que para $L = 15 \text{ mm}$, el pico de resonancia se sitúa en 2100 Hz .

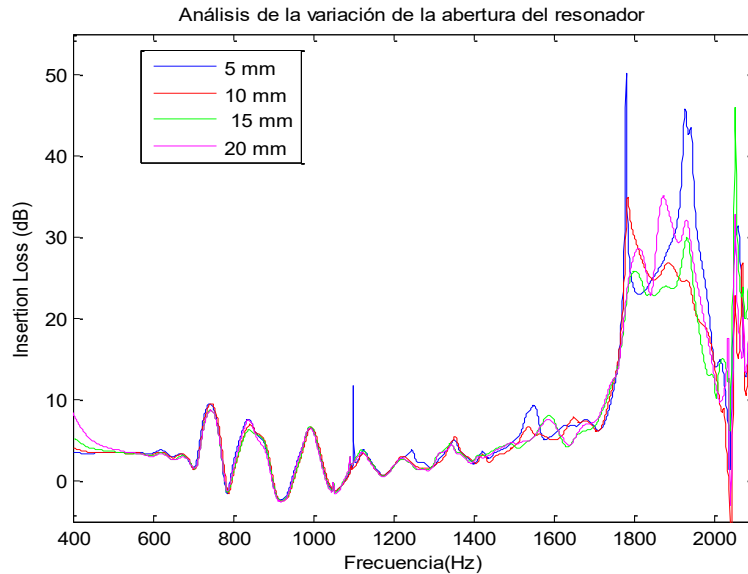


Figura 32. Análisis de la variación de la abertura del resonador.

Una vez realizado el análisis de la frecuencia de resonancia mediante COMSOL, se ha visto que el tamaño de la ranura debe de ser de 5 mm , ya que es el único caso que nos ofrece dos picos de resonancia y, concretamente, en la frecuencia 1100 Hz , donde se tiene menos atenuación, tal y como muestra la figura que sigue:

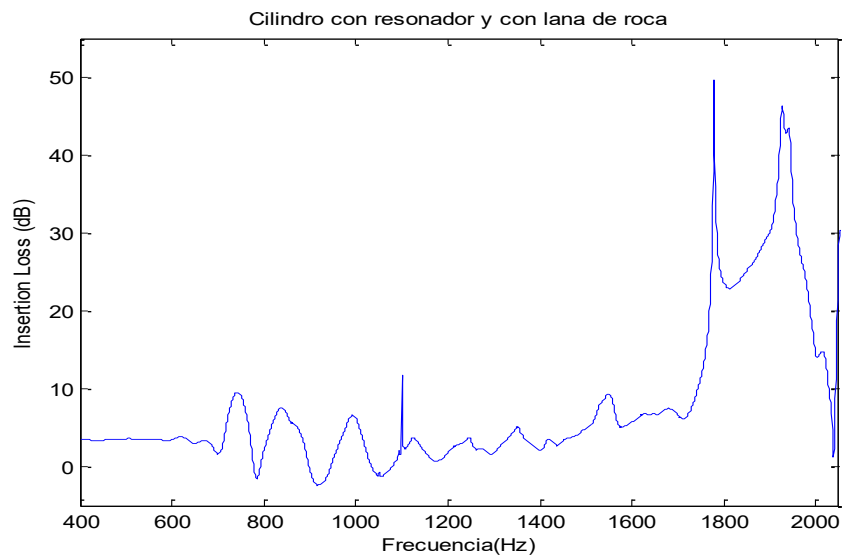


Figura 33. Muestra el pico de resonancia en 1100 Hz y 1800 Hz .

Como se puede ver, el pico de resonancia asociado a la geometría del cilindro, $f = 1800 \text{ Hz}$, tiene una amplitud de 49.7 dB mientras que el asociado al variar el tamaño de la ranura, $f = 1100 \text{ Hz}$, tiene una amplitud de 11.8 dB .

A continuación, se muestra el resultado final de combinar los cilindros rígidos con el resonador y la lana de roca. En la **Fig. 34**, se puede observar que se obtiene una mayor atenuación que en el caso anterior, gracias a los picos de resonancia. Por tanto, el efecto de resonador en el cristal de sonido hace que de nuevo los CS obtengan mejores resultados como pantalla acústica.

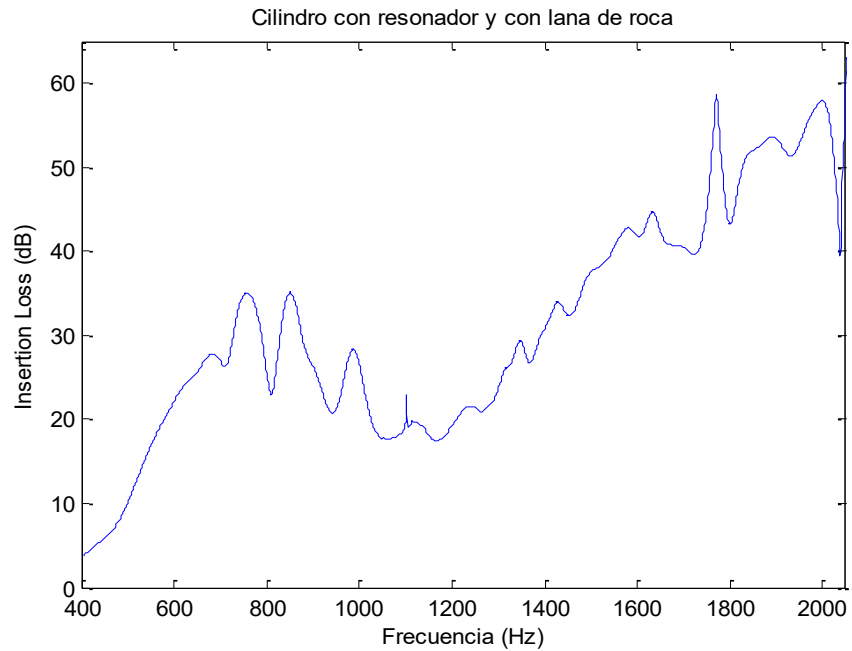


Figura 34. IL del cilindro rígido con resonador más lana de roca.

Por último, se ha de recalcar, que tal y como se muestra en la **Fig. 34**, los efectos de los distintos mecanismos de atenuación empleados no se anulan entre sí, sino que todos los efectos son visibles y, en este caso, claramente diferenciables [15].

Como resumen del modelo plano, se va a describir el algoritmo de cálculo que se ha empleado para llevar a cabo este estudio:

- 1) Determinar la banda de frecuencias donde ha de trabajar la pantalla acústica.
- 2) Diseño de una red cuadrada de dispersores rígidos para ver donde situar los picos de BG (primer mecanismo de control).
- 3) Asignar un factor de llenado y un parámetro de red de forma que los BG aparezcan en la zona donde se quiere trabajar (atenuar). El diámetro de los cilindros lo más pequeño posible para que el aire y el agua pasen lo mejor posible.
- 4) Finalmente, diseñados los cilindros, se le añade la lana de roca y, si se quiere conseguir más atenuación en determinadas frecuencias, se utiliza el cilindro con resonador.

A continuación, se va a presentar el estudio de la difracción por el borde superior.

▪ **Modelo vertical 2D:**

El objetivo que se persigue es intentar reducir la difracción por el borde superior de los dispersores. Es conocido que este fenómeno acústico es el mecanismo que más reduce el rendimiento de las barreras acústicas.

Por tanto, se va a estudiar el tipo de configuración que más ayude a reducir la difracción por el borde superior.

- **Geometría, simetrías del problema y tipo**

Se tienen cuatro filas de dispersores y cilindros limitados por las condiciones de contorno PML e impedancia, tal y como se muestra en la siguiente figura:

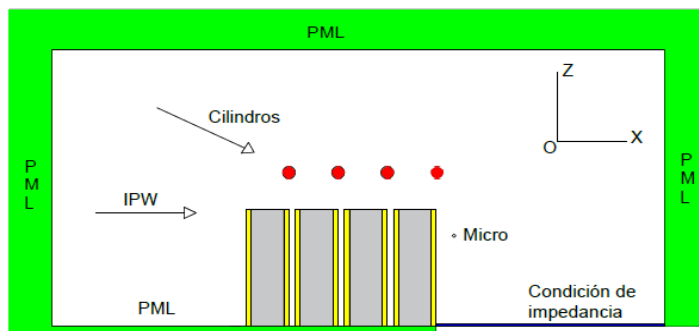


Figura 35. Geometría modelo 2D vertical [5] [12].

Los dispersores están formados de acero inoxidable de radio 63 mm y con 5 mm de espesor, además los cilindros rígidos están cubiertos por una capa de lana de roca como material absorbente, de 15 mm de espesor.

La altura de los cilindros rígidos es $h = 1,20$ m [5]. Además, como en el modelo plano, los dispersores están separados una distancia igual al parámetro de red, a . Por otra parte, con la idea de poder reducir la difracción por el borde superior de los cilindros, un conjunto de 4 cilindros horizontales de acero inoxidable de radio $r_1 = 30$ mm y con un espesor $e_1 = 5$ mm serán colocados a una distancia de $\lambda/2$ por encima de la muestra, para poder tener una interferencia destructiva (la onda llega en oposición de fase), como se puede ver en la Fig. 35, el valor de (λ) viene determinada por la frecuencia que se quiere atenuar, en nuestro caso, será 1200 Hz, correspondiéndole una longitud de onda $(\lambda) = 285,8$ mm, por lo tanto, los cilindros horizontales estarán separados una distancia de 142,9 mm con respecto a los cilindros verticales.

Finalmente, se identifican dos tipos de simetrías infinitas: axial y espejo. Pero, al igual que en el caso anterior, no se van a tener en cuenta.

- **Tamaño del elemento de malla y tiempo de cálculo**

De forma similar al modelo plano, se busca una malla que obtenga un cálculo preciso hasta 1200 Hz, por tanto se usará una malla de tamaño $\Delta x = 0.036$ m; los cálculos se obtienen a partir del uso de las Ec. 11 y Ec. 12.

El tiempo de cálculo empleado para el análisis de este modelo es de 580 segundos.

- **Procesado:**

a) Tipo de estudio y frecuencia de interés

Cálculo de la presión compleja detrás de la pantalla acústica basada en CS para llevar a cabo el estudio de la difracción por borde superior a la frecuencia de 1200 Hz, es decir, se aprovecha la energía de la onda plana que le viene y la transforma en una onda que está en contrafase a la onda plana que le viene en el punto que nosotros queremos, que es el borde de difracción.

b) Condiciones de contorno del problema

Para el modelo vertical 2D se ha empleado, en las paredes del cilindro, el contorno rígido al sonido y también se han implementado tres capas de PML con un espesor de 25 mm, y otra capa PML más fina, de 10 mm de espesor, en los límites del dominio para poder minimizar las reflexiones en un medio continuo (ver **Fig. 35**) y además, se ha colocado una condición de impedancia debido a las reflexiones que se producían al colocar una capa PML detrás de los cilindros rígidos (marcada de color azul oscuro en la **Fig. 35**).

- **Post-procesado:**

Una vez se han visto las condiciones de contorno del modelo, se procede a calcular numéricamente la presión acústica compleja total p_t , para el modelo 2D vertical, determinada por la siguiente expresión:

$$p_t = p_o + p_s \quad (\text{Ec. 13})$$

En donde, p_o es la presión acústica compleja de la onda plana incidente que viene determinada por las condiciones iniciales del problema; p_s es la presión compleja dispersada dada por la onda dispersada que se produce en el interior del dominio a raíz de la interacción entre la onda plana incidente junto con las propiedades físicas y la geometría del modelo.

a) Resultados

Dado que se va a analizar la difracción por el borde los resultados se van a obtener a 0,2 m del cilindro, como en el caso del modelo plano, debido a que la onda difractada que se forma es una onda esférica como se puede observar en la figura siguiente:

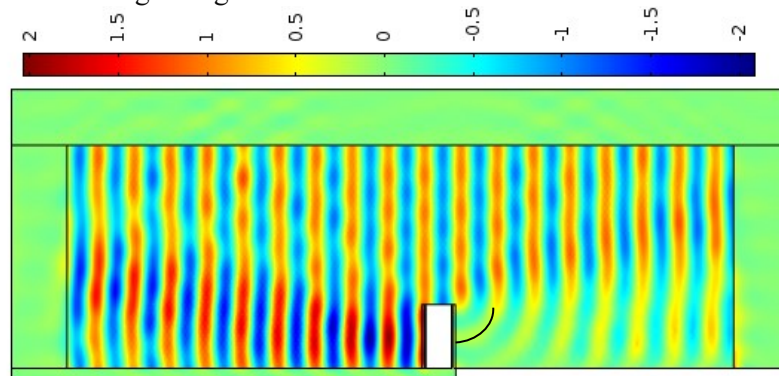


Figura 36. Campo total de presión acústica (Pa) centrado en la frecuencia de 1200 Hz.

Se ve un patrón perfecto de difracción por el borde. Sólo se produce difracción por el borde, por tanto el patrón es perfectamente cilíndrico.

El procedimiento a seguir va a ser la de poner algún tipo de obstáculo de forma que al borde de difracción le llegue una onda en contrafase utilizando la energía de la onda plana incidente.

Como obstáculos se emplearán dispersores circulares y en el cual la onda plana incidente chocará con ellos y entonces, se empieza a generar de nuevo una onda cilíndrica que estará en contrafase con la onda plana que le llega directamente, por tanto se está aprovechando la energía de la propia onda incidente para poder anular esa propia onda incidente.

Es decir, se está usando la energía de la onda plana incidente que choca con ese nuevo obstáculo para crear otra onda mediante el principio de Huygens y, en el punto de difracción, estará en contrafase con la onda incidente, por lo tanto, en dicho punto (borde de difracción) se tendrá la suma de dos ondas: la onda plana incidente con su amplitud y su fase y la onda que ha chocado con los dispersores cilíndricos con su amplitud y su fase, por tanto, en el borde de difracción se tendrá una presión menor, ya que se suman dos ondas distintas.

Es decir, se va a emplear la propia energía de la onda incidente para reducir la difracción por el borde.

Y, para crear una onda que esté en contrafase de la que se produce en el borde de difracción, se emplearán los dispersores cilíndricos.

A continuación, se va a presentar un estudio para analizar el tipo de modelo, de los presentes en la **Fig. 37**, que nos garantiza una mayor atenuación a la frecuencia deseada.

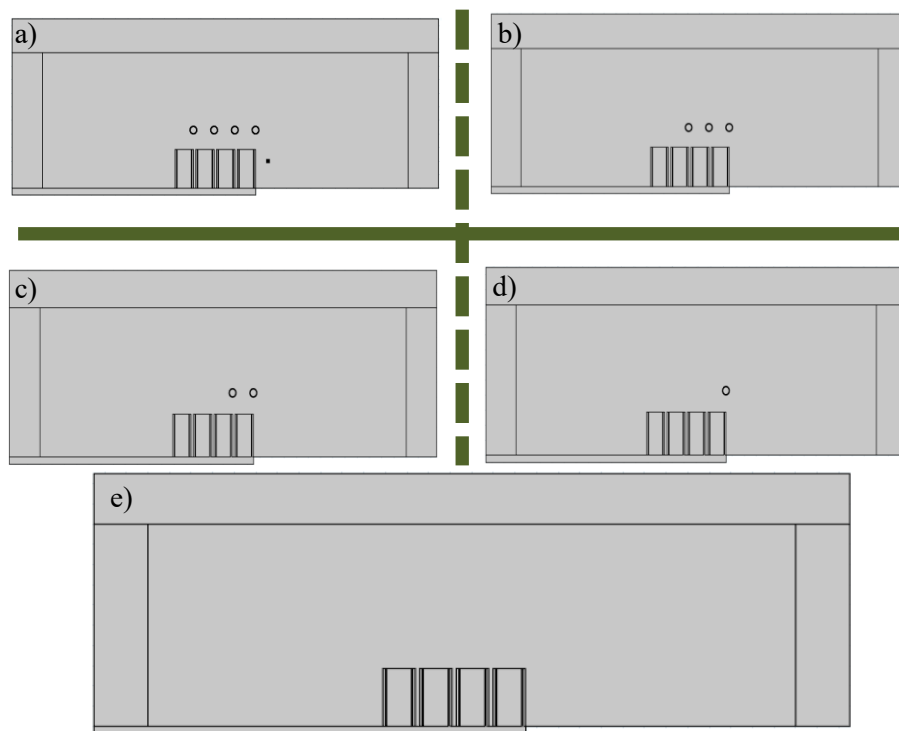


Figura 37. Distintos modelos geométricos para tratar de reducir la difracción por el borde superior del CS.

Uno de los objetivos a tratar en esta sección consiste en diseñar un modelo para encontrar una solución que reduzca la difracción por el borde superior del CS. Para ello, se emplearán interferencias destructivas dadas a raíz de rígidos cilindros vacíos (color rojo, **Fig. 35**) con un radio $r_1 = 30$ mm y un espesor $e_1 = 5$ mm, estos cilindros se colocarán por arriba de los dispersores cilíndricos a una altura de $\lambda/2$, para conseguir la interferencia destructiva.

Por tanto, como se puede ver en la **Fig. 37**, se procede a realizar un estudio que consiste en ir quitando cilindros horizontales y comprobar, en cada caso, que a la frecuencia de 1200 Hz, el valor de presión compleja que se obtenga sea mayor que el modelo vertical 2D sin cilindros horizontales. En nuestro caso, tal y como se puede comprobar en la **tabla 3**, el modelo de la **Fig. 37 b)** es el que mejor resultado nos ofrece, por tanto se ha encontrado la forma de reducir la difracción por el borde superior.

Figura 37	L_p (dB)
a)	76.7
b)	73.6
c)	77.6
d)	78.9
e)	81.1

Tabla 3. Módulo de la presión compleja de cada uno de los modelos analizados.

A continuación, se muestra un mapa de presión compleja para el caso **b)** de la **Fig. 37** a la frecuencia de 1200 Hz. Tal y como se observa en la siguiente figura, aparece una onda esférica, por tanto, el receptor ha de estar lo más cerca posible de los dispersores.

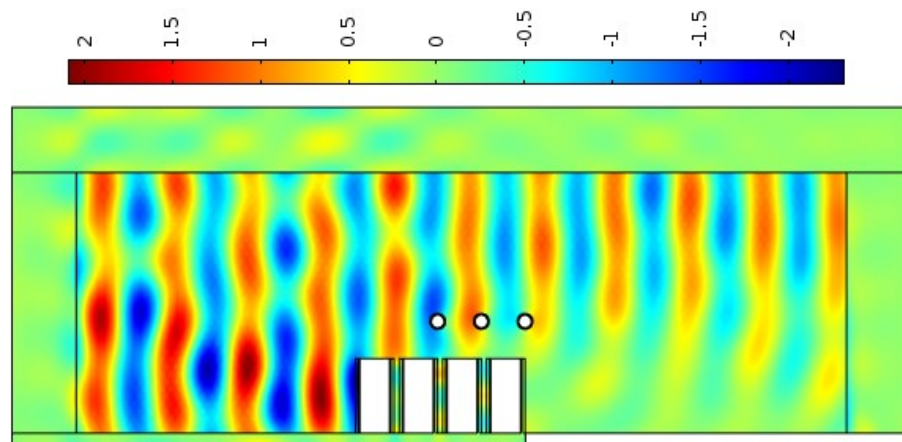


Figura 38. Campo total de presión acústica (Pa) centrado en la frecuencia de 1200 Hz con 3 cilindros horizontales.

Seguidamente, se procede a comparar la gráfica de *Insertion Loss* (IL) para el caso **b)** y **e)** de la **Fig. 37**; Debido a que se producen combinaciones de interferencias constructivas y destructivas dependiendo de la longitud de onda (λ), en la zona en la que nosotros queremos que aparezca una interferencia destructiva, que es en la zona entre 1200 Hz y 1500 Hz, sí que obtenemos un incremento de la atenuación (color azul – con 3 cilindros horizontales de la **Fig. 39**), por tanto este mecanismo, que se ha diseñado, se puede utilizar cuando se tienen problemas en las frecuencias de 1200 Hz a 1500 Hz.

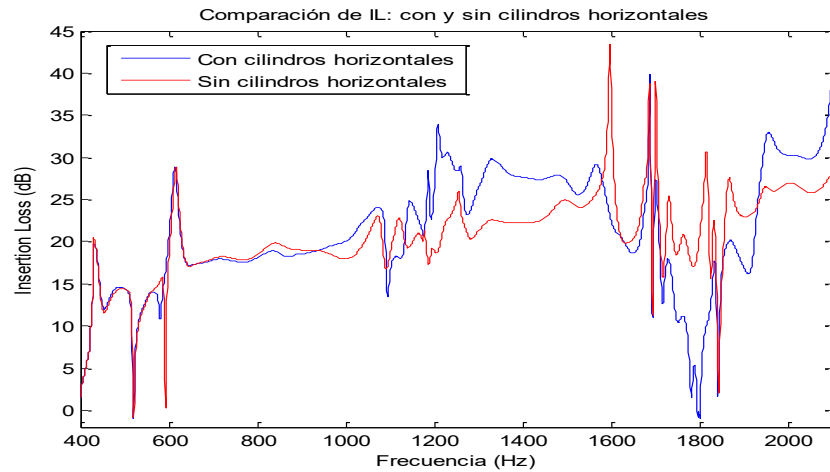


Figura 39. Comparación del *Insertion Loss* entre el modelo b) y e) de la Figura 37.

Finalmente, se presenta la combinación de los dos modelos 2D (ver Fig. 40), en los cuales se ha asumido la longitud finita de los dispersores cilíndricos con el fin único de considerar las condiciones reales del modelo 3D.

Los dispersores están constituidos por un material rígido (acero inoxidable), con una abertura longitudinal (resonadores) y cubiertos por una capa de material absorbente (lana de roca). Por tanto, hay cuatro mecanismos acústicos actuando en el presente modelo: BG, resonancias, difracción y absorción. El objetivo perseguido es la reducción de la difracción en el borde superior de los dispersores usando el mecanismo de interferencia destructiva.

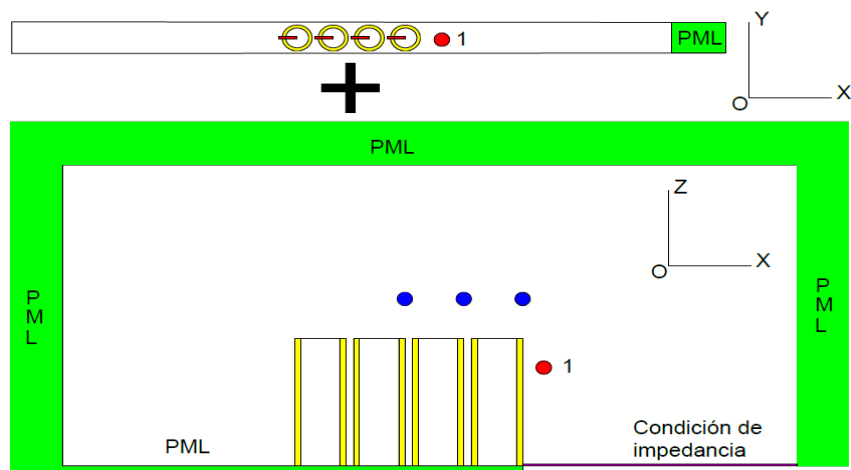


Figura 40. Esquema conjunto para estudiar los efectos de difracción, absorción, resonancia y BG conjuntamente.

A continuación, para representar la suma de los dos modelos 2D de la Fig. 40 se procede al uso de la siguiente expresión matemática:

$$IL(\text{dB}) = 20 \log_{10} \left(\frac{|P_{\text{directo}}|}{|P_{\text{interferido}}|} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{|P_0|}{|2P_0 + P_S(\text{BRAGG} + \text{RES} + \text{ABS}) + P_S(\text{DIF})|} \right) \quad (\text{Ec. 14})$$

En donde, P_o es la presión incidente compleja, $P_{S(BRAGG+RES+ABS)}$ es la presión dispersada compleja debido a los mecanismos de control de ruido: BG (BRAGG), resonancias (RES) y absorción (ABS) y $P_{S(DIF)}$ es la presión compleja dispersada debido a la difracción.

Una vez vista la Ec. 14, se procede a comparar en la Fig. 41 los siguientes modelos:

- 1) Modelo plano 2D + modelo vertical 2D sin cilindros horizontales.
- 2) Modelo plano 2D + modelo vertical 2D con cilindros horizontales.

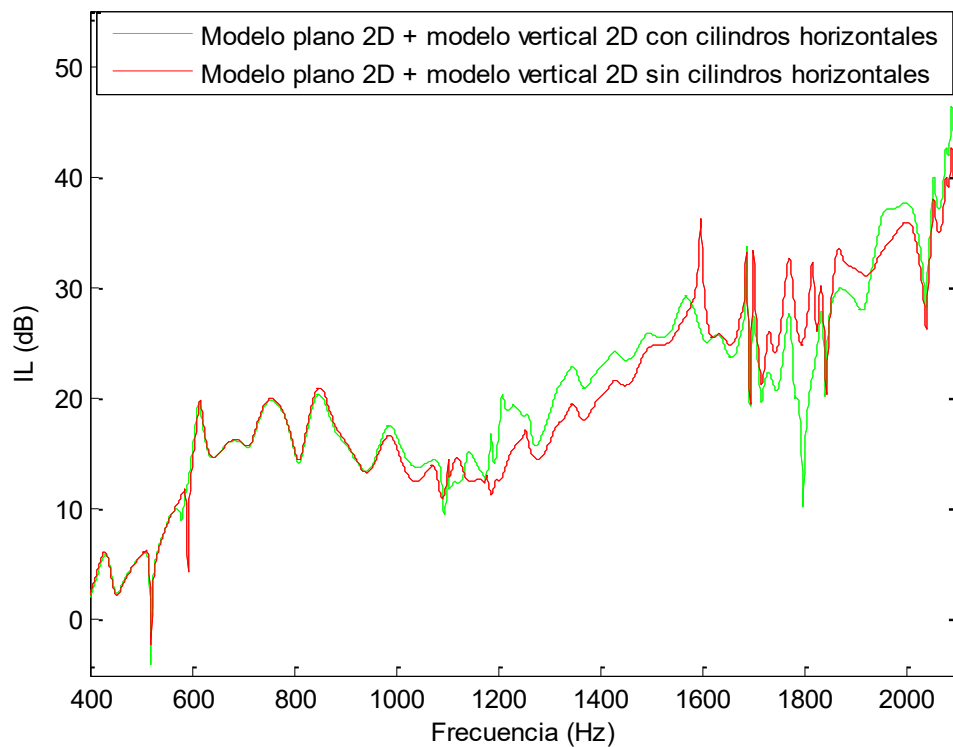


Figura 41. Comparación de los modelos bajo estudio.

Como se puede comprobar en el espectro de la Fig. 41, se tiene un aumento en el *Insertion Loss* a las frecuencias cercanas a 1200 Hz (color verde). Y en 1800 Hz, se tiene una pequeña disminución del *Insertion Loss* (existe un pico de refuerzo) debido a la interferencia constructiva vista en la Fig. 39.

4. CONCLUSIONES DEL ESTUDIO

Acto seguido, se exponen las conclusiones más importantes obtenidas una vez acabado el presente estudio.

En el presente trabajo se ha diseñado un tipo de pantalla acústica a la carta basada en cristales de sonido (CS) para poder atenuar la mayor parte del ruido de ferrocarril. Se ha seleccionado la gama de frecuencias adecuada (500 Hz – 2000 Hz) para controlar la mayor parte del ruido de ferrocarril.

La pantalla acústica diseñada puede ser empleada para atenuar el ruido cuando el ferrocarril pasa cerca de viviendas, urbanizaciones habitadas...

El uso de CS como pantalla acústica presenta muchas ventajas con respecto a las pantallas acústicas tradicionales. Los CS usan más mecanismos para poder atenuar el ruido como el caso de la resonancia y la dispersión múltiple, además permite la permeabilidad visual, al agua y al viento. Por tanto, por razones estéticas, tecnológicas y su versatilidad las hacen acústicamente competitivas con respecto a las pantallas acústicas clásicas, por tanto se ha diseñado una nueva generación de pantallas basadas en CS para poder controlar el ruido ferroviario.

Se ha trabajado con dos modelos 2D que resultan en un modelo 3D. El hecho de trabajar con dos modelos bidimensionales es debido a que nos permite analizar cada uno de los mecanismos de control de ruido que están presentes de forma independiente, es decir, por un lado en el modelo plano se han estudiado los efectos de BG, resonancias y absorción; mientras que en el modelo vertical se ha analizado la difracción por el borde superior de los dispersores. Y, combinando ambos modelos 2D, por superposición, se obtiene el modelo 3D formado por dispersores cilíndricos inmersos en el aire. Recalcar que también se ha optado por diseñar mediante COMSOL modelos bidimensionales debido a la complejidad que supone un modelo 3D en cuanto a mayor coste computacional y la dificultad del análisis de los fenómenos acústicos que aparecen.

En cuanto a resultados obtenidos mediante simulación numérica se puede concluir que la pantalla acústica diseñada basada CS cumple con los requisitos para atenuar más del 40% del ruido ferroviario, además el modelo creado permite la posibilidad de insertar cualquier otro mecanismo adicional para tener mayor atenuación en las bandas de frecuencia que se desean.

Como futuras líneas de investigación se propone realizar un estudio de nuevas pantallas basadas en CS incluyendo nuevos mecanismos de atenuación para tratar de mejorar el control del ruido ferroviario a bajas frecuencias.

REFERENCIAS

- [1] Apuntes de Acústica Urbanística y Medioambiental (2016): Prof. J. A. Martínez Mora y J. V. Sánchez-Pérez.
- [2] Organización Mundial de la Salud (OMS).
- [3] Sociedad Española de Acústica (SEA) – “*Acústica ambiental: Análisis, legislación y soluciones*” (2009).
- [4] Harris, C. M. – “*Manual de medidas acústicas y control de ruido*”. Ed. Mc Graw Hill. 1995
- [5] S. Castiñeira-Ibáñez, C. Rubio and J. V. Sánchez-Pérez - EPL, 101 (2013)
- [6] Kittel, C. – “*Introduction to Solid State Physics*” – 8ª Ed. (2004)
- [7] Kinsler L.E., Frey A. R., Coppens A. B., and Sanders J.V. – “*Fundamentals of acoustics*” – 3rd Edn. Ed. Wiley, Nueva York, 1982.
- [8] S. Expósito, J. Expósito, A. Pedrero, M. Arana, N. Oosten, M. Bueno, J.V. Sánchez, C. Díaz – “*Innovación para el control del ruido ambiental*”.
- [9] C. Chilet Murgui – “*Análisis de la variabilidad de la capacidad de atenuación de redes de dispersores bidimensionales en función de factores geométricos. Aplicación al diseño de pantallas acústicas*”. Tesina Final de Máster. EPSG. 2012
- [10] Código Técnico de la Edificación. RD 314/2006, de 17 de marzo.
- [11] COMSOL Multiphysics Modeling Guide. Versión Comsol 3.5a - Nov.2008.
- [12] S. Castiñeira-Ibáñez, C. Rubio and J. V. Sánchez-Pérez – Building and Environment, 93 (2015).
- [13] S. Castiñeira-Ibáñez, V. Romero-García, J. V. Sánchez-Pérez and L. M. García-Raffi – EEMJ, vol. 14, nº 12 (2016).
- [14] J. V. Sánchez-Pérez, D. Caballero, R. Martínez-Sala, C. Rubio, J. Sánchez-Dehesa, F. Meseguer, J. Linares, F. Gálvez. “*Sound attenuation by a two-dimensional array of rigid cylinders*”. Phys. Rev. Lett. 1998;80;5325.
- [15] J. V. Sánchez-Pérez et al. “*Acoustic barriers based on periodic arrays of scatterers*” - Appl. Phys. Lett., Vol. 81, No. 27, 30 December 2002.
- [16] Keller J.B., “*Geometrical theory of diffraction*” J. Opt. Soc. Am. Vol. 52(2) pp. 116-30, (1961)
- [17] J. Piechowicz, “*Sound Wave Diffraction at the Edge of a Sound Barrier*” Vol. 119 (2011)
- [18] Berenger J.P., (1994), A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves, *Journal of Computational Physics*, **114**, 185-200.
- [19] Fresnel, A. J., (1815), *Premier mémoire sur la diffraction de la lumière*. In Oeuvres, 1:9-34.

- [20] V. Romero-García, J.V. Sánchez-Pérez, L.M. García-Raffi, *J. Appl. Phys.* 110 (2011) 014904. <http://dx.doi.org/10.1063/1.3599886>.
- [21] A. Gupta, K.M. Lim, C.H. Chew, *J. Acoust. Soc. Am.* 132 (2012) 2909, <http://dx.doi.org/10.1121/1.4744930>.

ANEXOS

ANEXO 1: Método de los elementos finitos

A día de hoy, el método de los elementos finitos (FEM) está adquiriendo mucha importancia como herramienta de simulación, sobre todo en diferentes campos de la ingeniería, de la física, de la biomedicina, de la acústica etc. Con este software se ha dado un paso de gigante en el aspecto de la simulación para poder resolver problemas de forma más sencilla que los métodos tradicionales.

COMSOL Multiphysics (conocido anteriormente con el nombre de FEMLAB) es un paquete de software para poder analizar y resolver, mediante elementos finitos, diversas aplicaciones físicas y de ingeniería. Permite aproximar un problema continuo con infinitos grados de libertad y regido a partir de ecuaciones diferenciales parciales a un problema con finitos grados de libertad y gobernado por un sistema de ecuaciones que puede ser lineal o no.

Mediante el uso de COMSOL se pueden resolver ecuaciones integrales y problemas en el interior de los elementos de la malla tanto en el dominio temporal como en el dominio de la frecuencia. Como se puede ver en la figura que sigue, se discretiza el dominio en elementos y nodos.

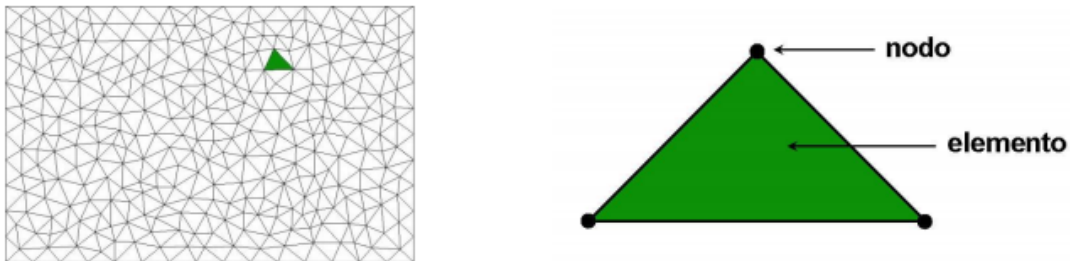


Figura 1. Muestra un mallado (izda.) y el elemento de malla formado por nodos (dcha.).

COMSOL presenta los siguientes modos de aplicación:

- **Frecuencias propias:** Análisis de los modos propios de una estructura acústica.
- **Régimen armónico:** Simulación de la respuesta de un sistema acústico a una excitación de tipo armónico ($e^{j\omega t}$).
- **Transitorios:** Respuesta temporal de un sistema con unas condiciones iniciales.

Antes de dibujar cualquier modelo en COMSOL hay que tener claro el tipo de problema que se tiene. Es muy importante identificar las simetrías del problema para poder reducir el tiempo de cálculo computacional.

Existen varios tipos de simetría, entre los que se destaca:

- **Simetría de plano:** Es la simetría que produce un espejo. El problema se puede reducir a la mitad por medio de una condición dura ($u=0$).

- **Simetría de revolución:** Simetría de tipo axisimétrico. Un problema 3D se puede reducir a uno 2D axisimétrico.

Por otra parte, se ha de tener claro el tipo de malla que se va a utilizar para resolver el problema. Cuando se escoge un tipo de malla por defecto o se define por el usuario, el sistema establece un número de elementos del problema a resolver.

Cuanto más pequeña sea la malla, el tiempo de cálculo será mayor, éste depende de los “Grados de libertad (DOF)” del problema. En 2D: $DOF \cong 2 \cdot N^\circ$ elementos, mientras que en 3D: $DOF \cong 1.5 \cdot N^\circ$ elementos.

El elemento de malla se ha de escoger tal que cumpla la siguiente relación:

$$\Delta x \approx \frac{\lambda}{8 \cdot f_{max}} \quad (\text{Ec. 1})$$

Si se cumple esta condición se evitarán inestabilidades en el modelo de simulación y se tendrá un cálculo preciso hasta la frecuencia máxima de interés.

En la presente tesina se va a resolver la ecuación de Helmholtz:

$$\nabla^2 p - k^2 p = 0 \quad (\text{Ec. 2})$$

En donde, p es la función de valores complejos y $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, es el número de onda.

Acto seguido, se muestran las fases de simulación en un esquema:

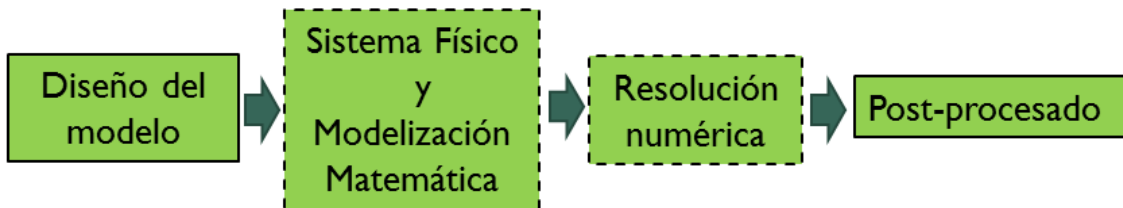


Figura 2. Muestra las fases de simulación que se han seguido en los modelos planteados en la presente tesina.

- **Pre-procesado:** Definición de la geometría. Características del dominio y condiciones de contorno del problema.
- **Procesado:** Definición de la malla y condiciones de resolución del cálculo (frecuencias de excitación o nº de modos propios).
- **Post-procesado:** Representación de las magnitudes acústicas en los puntos de interés.

Finalmente, se exponen las principales ventajas y desventajas sobre el uso de COMSOL:

- **Ventajas:**
 - Mayor **usabilidad**.
 - Posibilidad de resolución de **sistemas complejos**.
 - Accesibilidad de **conceptos matemáticos** .
 - Multitud de herramientas de **diseño**.
 - Fomenta la **creatividad** para la resolución de nuevos problemas.
- **Desventajas:**
 - Desconocimiento del proceso de **modelización**.
 - **Exceso** de opciones de menú.
 - Incomprensión de la **física** involucrada.
 - Riesgo de **tiempo de cálculo** excesivo.
 - Utilización de un **código cerrado y con licencia**.

ANEXO 2: Material poroso (lana de roca)

La lana de roca, del inglés *rockwool*, nace a partir de la roca volcánica (basalto) y pertenece a la familia de la lana mineral. Gracias a su estructura fibrosa multidireccional y elástica la lana de roca es capaz de frenar el movimiento de las partículas de aire, por tanto, disipa la energía sonora. En la presente tesina se va a emplear la lana de roca para cubrir los cilindros rígidos y, poder así, atenuar la onda sonora.

Existen autores como Zwicker, Biot y Koster que han intentado predecir el comportamiento de estos materiales, desde el punto de vista acústico. En nuestro caso, en COMSOL se empleará el modelo empírico de Delany & Bazley.

Éstos, a partir del ajuste de una gran cantidad de mediciones experimentales en materiales fibrosos con un factor de porosidad⁴ cercano a 1, presentaron unas relaciones basadas en la impedancia característica y la constante de propagación, para un conjunto de materiales absorbentes del sonido, tipo fibroso.

Las expresiones desarrolladas por Delany & Bazley dependen de la frecuencia (f) y de la resistencia específica al flujo (σ). A continuación, se presenta la expresión de la impedancia característica compleja (Z) y de la constante de propagación compleja (r):

$$Z = \rho c \left[1 + 0.0571 \left(\frac{\rho f}{\sigma} \right)^{-0.754} - j0.087 \left(\frac{\rho f}{\sigma} \right)^{-0.732} \right] \quad (\text{Rayls}) \quad (\text{Ec. 3})$$

$$r = \frac{2\pi f}{c} \left[1 + 0.0978 \left(\frac{\rho f}{\sigma} \right)^{-0.700} - j0.189 \left(\frac{\rho f}{\sigma} \right)^{-0.595} \right] \quad (\text{m}^{-1}) \quad (\text{Ec. 4})$$

En donde, ρ (kg/m^3) es la densidad del aire, c (m/s) es la velocidad del sonido en el aire, f (Hz) es la frecuencia y σ (kg/s m^3) es la resistencia específica al flujo por unidad de espesor y es directamente dependiente del diámetro de la fibra y de la densidad del material.

Finalmente, se debe de destacar que éstas ecuaciones presentadas por Delany & Bazley tienen el siguiente rango de validez frecuencial:

$$10^{-2} \leq \frac{f}{\sigma} \leq 1$$

El rango frecuencial de 500 a 2000 Hz, escogido para la presente tesina, sí cumple esta relación.

⁴ El factor de porosidad es la relación existente entre el volumen de aire en los poros y el volumen total del material.