



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Departamento de Física Aplicada

TESIS DOCTORAL

**Análisis y modelado de la fenomenología
ondulatoria asociada al diseño de barreras acústicas
basadas en conjuntos de dispersores aislados.
Homologación de dispositivos**

Memoria de Tesis Doctoral presentada por
Sergio Castiñeira Ibáñez

Dirigido por el Doctor
Juan Vicente Sánchez Pérez

Valencia, Septiembre de 2014

AGRADECIMIENTOS

Esta Tesis doctoral es el resultado del trabajo realizado con un equipo maravilloso de investigadores que como personas y compañeros me han apoyado y animado en todo momento.

En primer lugar, agradezco a mi director de Tesis el Dr. Juan Vicente Sánchez-Pérez todo el trabajo que ha hecho por mí durante estos años. Me ha apoyado, animado y compartido todo su buen hacer dentro del campo de la Física. Le agradezco la paciencia que ha tenido y le doy mil gracias por todo lo que me ha enseñado.

Agradezco a la Dra. Constanza Rubio la dedicación hacia mi. Hemos pasado juntos momentos inolvidables en congresos, en la cámara anecoica midiendo y en las reuniones científicas. Siempre ha estado ahí: gracias por tu apoyo y confianza.

Durante este largo camino he tenido el honor de conocer grandes profesionales y compañeros. En especial, agradezco al Dr. Lluís García-Raffi el interés y apoyo que mostró por mí en mis inicios junto a sus sabios consejos. Gracias a él, me introduje en el grupo de investigación de cristales de sonido y fue uno de mis maestros. También agradezco el interés y apoyo del Dr. Vicente Romero-García, gran físico e investigador y maravillosa persona.

Agradezco con mucho cariño a Amparo, mi mujer y a mis dos hijas, Marta y Sonia la paciencia y apoyo moral que me han dado para realizar esta Tesis. Desde el principio me he sentido respaldado y animado, a sabiendas que tenía que compaginar muchas horas de estudio con mi trabajo como docente y mi vida familiar. Por ello mismo, dedico a mis tres chicas, esta Tesis.

También agradezco el apoyo recibido por el resto de mi familia, por su interés sobre mi persona, en especial a mi madre. Siempre, en mi recuerdo más interior está, como no, mi padre. Gracias a ellos, soy persona.

Para finalizar, quisiera también mostrar mi agradecimiento al Ministerio de Educación y Ciencia, al Departamento de Física Aplicada de la Universitat Politècnica de València, al Departamento de Matemàtica Aplicada de la Universitat Politècnica de València, al Centro de Tecnologías Físicas: A.M.A. y al Departamento de Algebra de la Universitat de València.

*A Amparo con cariño
y a mis hijas Marta y Sonia
orgullosos de ellas .*

*El estudio y, en general, la búsqueda de la verdad
y la belleza es un campo en el que se nos permite
ser niños toda la vida.
Albert Einstein.*

RESUM DE LA TESI DOCTORAL

Anàlisi i modelat de la fenomenologia ondulatoria associada al diseny de barreres acústiques basades en conjunts de dispersors aïllats. Homologació de dispositius

per

D. Sergio Castiñeira Ibáñez

Departament de Física Aplicada

Universitat Politècnica de València. Setembre 2014

Una de les solucions per al control del soroll ambiental en la fase de transmissió ve donada per la utilització de barreres acústiques. En els últims anys, la possibilitat de manipular el so a través d'estructures periòdiques va motivar la idea d'utilitzar aquests mitjans com una alternativa a les barreres acústiques clàssiques. Aquests sistemes presenten una propietat interessant que permet el seu ús com a barreres acústiques: l'existència de rangs de freqüències en què el so no es transmet a través de l'estructura, a causa de la difracció Bragg, és a dir, a un procés de dispersió múltiple relacionat amb la periodicitat del sistema. No obstant això, a causa de les característiques d'aquest fenomen d'interferències, el seu ús exclusiu no és suficient per garantir l'existència d'altres atenuacions sonores en amplis rangs de freqüència. Dos han sigut les línies d'investigació clàssiques seguides en la literatura per augmentar la capacitat d'atenuació d'aquests sistemes: (i) introduir nous mecanismes de control de la transmissió acústica en els dispersors i (ii) introduir nous ordenaments de dispersors per maximitzar la difracció Bragg. En aquest treball es mostra la realització i caracterització acústica de dos prototips de barrera acústica basats en sistemes de dispersors segons les dues línies d'investigació exposades, una a la qual s'han afegit els mecanismes d'absorció i ressonància als centres dispersors, i una altra que a més afegeix ordenaments fractals. L'objectiu de tots dos prototips és el seu ús com a dispositiu real de reducció de soroll de trànsit. Ambdós barreres han sigut analitzades, patentades i homologades per a la seua posada al mercat.

D'altra banda es presenta un model teòric de disseny per superposició de pantalles basades en sistemes periòdics que analitza per separat cadascun dels fenòmens involucrats en la propagació acústica a través de la barrera, seguint el principi de tunejat. Aquest principi considera que cada fenomen acústic actua de forma independent sense afectar els altres. El model de superposició proposat, desenvolupat mitjançant el mètode d'elements finits, constitueix un model integral ja que permet, d'una manera molt senzilla, transformar un model en tres dimensions en la suma de dos models bidimensionals, reduint d'aquesta manera el cost computacional. Així

mateix, permet triar quins fenòmens acústics es volen considerar en el disseny d'aquestes pantalles, afegint una important càrrega tecnològica i de disseny al camp de les pantalles acústiques.

RESUMEN DE LA TESIS DOCTORAL

**Análisis y modelado de la fenomenología
ondulatoria asociada al diseño de barreras acústicas
basadas en conjuntos de dispersores aislados.**

Homologación de dispositivos

por

D. Sergio Castiñeira Ibáñez

Departamento de Física Aplicada

Universitat Politècnica de València. Septiembre 2014

Una de las soluciones para el control del ruido ambiental en la fase de transmisión viene dada por la utilización de barreras acústicas. En los últimos años, la posibilidad de manipular el sonido a través de estructuras periódicas motivó la idea de utilizar estos medios como una alternativa a las barreras acústicas clásicas. Estos sistemas presentan una propiedad interesante que permite su uso como barreras acústicas: la existencia de rangos de frecuencias en las que el sonido no se transmite a través de la estructura, debido a la difracción Bragg, es decir, a un proceso de dispersión múltiple relacionado con la periodicidad del sistema. Sin embargo, debido a las características de este fenómeno de interferencias, su uso exclusivo no es suficiente para garantizar la existencia de altas atenuaciones sonoras en amplios rangos de frecuencia. Dos han sido las líneas de investigación clásicas seguidas en la literatura para aumentar la capacidad de atenuación de estos sistemas: (i) introducir nuevos mecanismos de control de la transmisión acústica en los dispersores y (ii) introducir nuevos ordenamientos de dispersores para maximizar la difracción Bragg. En este trabajo se muestra la realización y caracterización acústica de dos prototipos de barrera acústica basados en sistemas de dispersores según las dos líneas de investigación expuestas, una en la que se han añadido los mecanismos de absorción y resonancia a los centros dispersores, y otra que además añade ordenamientos fractales. El objetivo de ambos prototipos es su uso como dispositivo real de reducción de ruido de tráfico. Ambas barreras han sido analizadas, patentadas y homologadas para su puesta en el mercado.

Por otro lado se presenta un modelo teórico de diseño por superposición de pantallas basadas en sistemas periódicos que analiza por separado cada uno de los fenómenos involucrados en la propagación acústica a través de la barrera, siguiendo el principio de tuneado. Este principio considera que cada fenómeno acústico actúa de forma independiente sin afectar a los otros. El modelo de superposición propuesto, desarrollado mediante el método de elementos finitos, constituye un modelo integral ya que permite, de una manera muy sencilla, transformar un modelo en tres

dimensiones en la suma de dos modelos bidimensionales, reduciendo de esta manera el coste computacional. Asimismo, permite elegir qué fenómenos acústicos se quieren considerar en el diseño de estas pantallas, añadiendo una importante carga tecnológica y de diseño al campo de las pantallas acústicas.

ABSTRACT OF THE DOCTORAL THESIS

**Analysis and modeling of wave phenomena
associated to the design of noise barriers based on
sets of insulated scatterers. Device Homologation**

by

D. Sergio Castiñeira Ibáñez

Applied Physics Department

Polytechnic University of Valencia. September 2014

One of the most common solutions for the control of environmental noise during its transmission is given by the use of acoustic barriers. In recent years, the ability to manipulate sound by means of periodic structures of scatterers led to the idea of using these media as an alternative to classical noise barriers. These systems present an interesting property that allows their use as noise barriers: the existence of frequency ranges in which the sound is not transmitted through the structure due to Bragg's diffraction, that is, due to a multiple scattering process associated with the periodicity of the structure. However, due to its own characteristics, the interference phenomenon is not enough, by itself, to ensure the existence of a high sound attenuation at broad frequency ranges. Two research lines have been followed in classical literature to increase the attenuation capability of these systems: (i) adding new acoustic mechanisms in the scatterers to control the transmission of sound and (ii) searching for new arrangements of scatterers to maximize Bragg's diffraction. Here we show the construction and characterization processes of two prototypes of acoustic barriers based on arrays of scatterers following the two research lines named before: (i) adding resonances and absorption materials in the scatterers and (ii) presenting a new arrangement of scatterers based on fractal geometries. The goal of both prototypes is their use as real traffic noise reduction devices and, accordingly, both barriers have been tested, patented and standardized.

Secondly, a theoretical overlapping design model for this kind of acoustic barrier is presented. The model, based on tunability, analyzes each one of the acoustic mechanisms involved in the acoustic propagation throughout the barriers. The tunability principle considers that each acoustic phenomenon acts independently without affecting the others, and therefore can be analyzed separately. Thus, the comprehensive model proposed, developed using the finite elements method, is a simplified model that allows the transformation of a real situation (3-dimensional case) into the sum of several two-dimensional cases, thereby reducing the computational cost. Finally, the developed model allows the choice of the acoustic phenomena involved in the design of this kind of barrier, providing interesting technological and design procedures in the field of acoustic barriers.

Contenido

1	Introducción	1
1.1	Introducción	1
1.2	Motivación y objeto del trabajo	2
1.3	Estructura de la Memoria de Tesis	2
2	Fundamentos teóricos	5
2.1	Pantallas acústicas. Generalidades y tipos	5
2.2	Difracción por el borde superior de una pantalla acústica clásica	9
2.2.1	Modelo de difracción para barrera delgada	10
2.2.2	Mejora del rendimiento acústico de pantallas clásicas	13
2.2.3	Métodos numéricos para el estudio del comportamiento acústico de pantallas acústicas	16
2.3	Sistemas de dispersores acústicos	17
2.3.1	Generalidades y definiciones	17
2.3.1.1	Propiedades geométricas	18
2.3.1.2	Propagación de ondas. Bandas prohibidas de transmisión	20
2.4	Maximización de las bandas de atenuación	23
2.4.1	Actuación sobre el fenómeno de la dispersión múltiple	24
2.4.1.1	Cuasi-cristales	24
2.4.1.2	Estructuras cuasi-ordenadas	25
2.4.1.3	Fractales y cuasi-fractales	26
2.4.1.3.1	Conjunto Fractal y Dimensión Fractal	27
2.4.1.4	Cuasi-fractal	29
2.4.2	Actuación sobre los dispersores. Dispersores multifenómeno	33
2.5	Modelos teóricos de análisis de sistemas de dispersores acústicos	36
2.5.1	Método de expansión de ondas planas. Introducción	36
2.5.1.1	Método de expansión de ondas planas	37
2.5.2	Teoría de la dispersión múltiple. Introducción	38
2.5.2.1	Teoría de la dispersión múltiple	39
2.5.3	Método de los elementos finitos. Introducción	42

2.5.3.1	Método de los elementos finitos	43
2.5.3.1.1	Ecuación de ondas	43
2.5.3.1.2	Condiciones de contorno	44
2.5.3.1.3	Condiciones de contorno coincidentes o adaptadas: PMLs	45
2.5.3.1.4	Módulo acústico	46
3	Sistemas de medida, instrumental y muestras	49
3.1	Introducción	49
3.2	Cámara anecoica	50
3.3	Sistema de adquisición de datos: 3DReAMS	51
3.3.1	Robot y control de movimiento	51
3.3.1.1	Sistema de sujeción de la muestra	51
3.3.1.2	Sistema de posicionamiento	52
3.3.2	Sistema de adquisición de datos	54
3.3.3	Fuente sonora y micrófonos	55
3.4	Muestras	56
4	Técnicas de maximización del efecto de la dispersión múltiple. Utilización de conjuntos de dispersores rígidos ordenados como estructuras cuasi-fractales	59
4.1	Introducción	59
4.2	Técnicas de maximización del efecto de la difracción Bragg	60
4.2.1	Ordenamiento cuasi-fractal: Triángulo de Sierpinski	61
4.2.2	Variación de radios para el aumento de la banda de atenuación en la estructura cuasi-fractal Triángulo de Sierpinski	63
4.2.3	Resultados experimentales	65
4.3	Caracterización cuantitativa de las propiedades de las bandas prohibidas de transmisión para grupos de dispersores acústicos aislados dispuestos según geometrías fractales	68
4.3.1	Triángulo de Sierpinski	69
4.3.1.1	Cálculos teóricos	69
4.3.1.2	Resultados experimentales	71
4.3.2	Alfombra de Sierpinski	72
4.3.2.1	Cálculos teóricos	72
4.3.2.2	Resultados experimentales	75
4.4	Conclusiones	76
5	Modelo real de pantalla acústica basada en conjuntos de dispersores aislados de segunda generación	79
5.1	Introducción	79

5.2	Dispersores ordenados periódicamente	80
5.3	Dispersores ordenados de forma cuasifractal	84
5.4	Homologación de la pantalla acústica basada en conjunto de dispersores de segunda generación.	86
5.4.1	Prueba 1: características intrínsecas de absorción acústica: EN 1793-1:1997	87
5.4.2	Prueba 2: características intrínsecas de aislamiento acústico a ruido aéreo: EN 1793-2:1997	88
5.4.3	Resultados de la homologación	90
5.4.3.1	Pantalla acústica basada en conjunto de dispersores de segunda generación con ordenamiento periódico	90
5.4.3.2	Pantalla acústica basada en conjunto de dispersores de segunda generación con ordenamiento cuasi-fractal	91
5.5	Conclusiones	93
6	Difracción en el borde superior de pantallas acústicas formadas por conjuntos de dispersores aislados	95
6.1	Introducción	95
6.2	Difracción en el borde superior de una pantalla acústica basada en cilindros rígidos ordenados periódicamente	96
6.2.1	Modelo numérico	96
6.2.1.1	Geometría	97
6.2.1.2	Condiciones de contorno	97
6.2.1.3	Parámetros de la solución numérica	98
6.2.2	Montaje experimental	98
6.2.3	Análisis de los resultados	99
6.3	Conclusiones	102
7	Modelo integrado de pantalla acústica basada en conjuntos de dispersores aislados	103
7.1	Introducción	103
7.2	Modelo numérico para una pantalla acústica basada en dispersores aislados de primera generación	104
7.2.0.1	Parámetros del cálculo numérico	106
7.2.1	Modelo de superposición. Resultados obtenidos	106
7.3	Modelo numérico para una pantalla acústica basada en dispersores aislados de segunda generación	108
7.3.1	Análisis y mejora de la actuación de los dispersores aislados añadiendo nuevos mecanismos de control (modelo 2D plano <i>OXY</i>)	109

7.3.1.1	Dispersores totalmente rígidos	109
7.3.1.1.1	Parámetros del cálculo numérico	111
7.3.1.2	Dispersores rígidos con cavidad resonante	111
7.3.1.2.1	Parámetros del cálculo numérico	113
7.3.1.3	Dispersores rígidos con cavidad resonante y recubier- tos con material absorbente	113
7.3.1.3.1	Parámetros del cálculo numérico	115
7.3.2	Análisis y reducción de la difracción por el borde superior de sistemas formados por dispersores aislados (modelo 2D plano <i>OXZ</i>)	115
7.3.2.1	Dispersores totalmente rígidos	116
7.3.2.1.1	Parámetros del cálculo numérico	116
7.3.2.2	Dispersores rígidos y cavidad resonante	117
7.3.2.2.1	Parámetros del cálculo numérico	118
7.3.2.3	Dispersores rígidos con cavidad resonante y recubier- tos con material absorbente	118
7.3.3	Modelo de superposición. Resultados obtenidos	119
7.4	Modelo numérico para una pantalla acústica basada en dispersores aislados de segunda generación tuneado	122
7.4.1	Modelo de superposición. Resultados Obtenidos	123
7.4.1.1	Dispersores totalmente rígidos tuneado	123
7.4.1.2	Dispersores rígidos con cavidad resonante tuneado	125
7.4.1.3	Dispersores rígidos con cavidad resonante y material absorbente tuneado	126
7.5	Modelo integrado de diseño de pantalla acústica basada en conjuntos de dispersores aislados	126
7.5.1	Modelo de superposición integral	127
7.5.1.1	Parámetros del cálculo numérico	130
7.5.2	Resultados experimentales	131
7.6	Conclusiones	132
8	Conclusiones y trabajos futuros	135
8.1	Conclusiones	135
8.1.1	Maximización de la atenuación acústica. Homologación	135
8.1.2	Difracción por el borde superior. Modelo integral	137
8.2	Trabajos futuros	138
	Apéndices	139
	A Abreviaturas	141

B Superposición con Matlab	143
C Publicaciones	145
C.1 Revistas internacionales	145
C.2 Congresos internacionales	146
C.3 Revistas Nacionales	148
C.4 Congresos Nacionales	148
C.5 Publicaciones Docentes	149
C.6 Proyecto de investigación	150
C.7 Homologaciones	150
C.8 Patentes	151
Bibliografía	165

Capítulo 1

Introducción

1.1 Introducción

El ruido ambiental se define como un sonido exterior no deseado o desagradable generado por el transporte y la industria. Es uno de los principales problemas ambientales de ámbito local en los países de la Unión Europea [1] y en general de todos los países industrializados. Como consecuencia de esto, se han detectado algunos problemas de salud, como trastornos del sueño o cardiovasculares y una disminución en el rendimiento en el trabajo y en los centros educativos. Cuando no es posible reducir la emisión del ruido generado por la fuente, una manera de reducir los niveles de transmisión del ruido ambiental entre la fuente y el receptor es la utilización de barreras acústicas (BA) [2]. Una BA clásica es básicamente un material continuo rígido que está interpuesto entre la fuente y el receptor de ruido [3].

En los últimos años, la posibilidad de manipular el sonido a través de estructuras periódicas, motivó la idea de utilizar estos medios como una alternativa a la barrera acústica clásica [4]. Estas estructuras periódicas son los cristales de sonido. Un cristal de sonido¹ (SC) se puede definir como un medio heterogéneo constituido por un sistema de dispersores acústicos ordenados de forma periódica inmersos en aire [5]. Estos sistemas presentan una propiedad interesante que permiten su uso como BA: la existencia de rangos de frecuencias en las que el sonido no puede transmitirse en el interior del cristal. Estos rangos se llaman bandas prohibidas (BG) y el mecanismo de control de ruido utilizado por estos dispositivos se basa en el fenómeno de interferencias destructivas debidas a la difracción Bragg, es decir, a un proceso de dispersión múltiple relacionado con la periodicidad del sistema.

¹Sonic crystal (SC), en inglés

1.2 Motivación y objeto del trabajo

El uso exclusivo del fenómeno de interferencias destructivas debido a la difracción Bragg no es el único mecanismo para evitar la transmisión de ondas. Por lo tanto, este fenómeno no es suficiente para asegurar un alto rendimiento de una barrera acústica basada en cristales de sonido. En este sentido, parece necesario añadir en el diseño de estos dispositivos, mecanismos que maximicen el fenómeno de interferencias destructivas, además de introducir otros mecanismos de atenuación del ruido. Para conseguir ambos objetivos se han llevado a cabo dos líneas de investigación: (i) aumentar al máximo las interferencias destructivas buscando nuevos ordenamientos de dispersores cilíndricos basados en geometrías fractales que permitan la superposición de bandas acústicas [7] y (ii) la adición de nuevos mecanismos de control de ruido en el diseño de los dispersores tales como la absorción y resonancia [6]. En este trabajo se muestra la realización y caracterización acústica de dos prototipos de barrera acústica basada en cristales de sonido, una en la que se han añadido los mecanismos de absorción y resonancia a los centros dispersores, y otra que además añade ordenamientos fractales. El objetivo de ambos dispositivos es su uso como dispositivo de reducción de ruido de tráfico. Las pruebas acústicas de normalización para la homologación de ambos prototipos de barrera han sido llevadas a cabo en un laboratorio autorizado para este propósito [8].

Otro fenómeno que reduce el rendimiento acústico de una BA es la difracción por sus bordes. Este fenómeno provoca un aumento del nivel de presión detrás de la barrera. En este trabajo, se analiza la eficiencia acústica de una barrera, formada por cilindros rígidos de altura finita inmersos en aire. Esta barrera se considera lo suficientemente larga para sólo tener que considerar la difracción por el borde superior de la misma. Este análisis se lleva a cabo con un doble propósito: en primer lugar, caracterizar el campo acústico resultante en la zona de sombra debido al fenómeno de difracción en su borde superior, y en segundo lugar, y con el fin de controlar la propagación de ondas acústicas, el desarrollo de un modelo integral para el diseño de dispositivos eficientes basados en estructuras periódicas. Este modelo, basado en el concepto de tunabilidad [9], permite el estudio y análisis de los efectos acústicos implicados, por separado [10].

1.3 Estructura de la Memoria de Tesis

Con el fin de exponer el trabajo realizado con claridad, éste se ha estructurado de la siguiente forma:

- En el capítulo 2, se realiza una descripción de las pantallas acústicas clásicas y de las pantallas basadas en dispersores acústicos aislados. De las pantallas clásicas se analiza el fenómeno de la difracción y se muestran los últimos avances

tecnológicos para aumentar su eficiencia. Además, se muestran los modelos numéricos más utilizados para su análisis. Respecto a las pantallas acústicas basadas en dispersores acústicos aislados, se definen las características de los cristales de sonido, se detalla cual es el comportamiento de los mismos y cuales son los diferentes ordenamientos existentes: ordenamiento como cristales de sonido, Cuasi-Cristales, Cuasi-Ordenadas y Cuasi-Fractales, indicando los parámetros acústicos más típicos que los caracterizan. Los ordenamientos Cuasi-Fractales, se pueden obtener siguiendo varias geometrías: se analizan las obtenidas mediante ordenamientos basados en la alfombra de Sierpinski y mediante ordenamientos basados en el triángulo de Sierpinski. Se muestran las diferentes actuaciones realizadas sobre los dispersores acústicos, para la mejora del rendimiento acústico de este tipo de pantallas, además de los últimos avances tecnológicos para aumentar su efectividad como pantallas. Por último, se muestran los modelos teóricos de análisis de sistemas de dispersores acústicos, más utilizados.

- El capítulo 3, constituye la presentación y caracterización del sistema experimental que se ha utilizado en este trabajo. Se detalla las características de la cámara anecoica, donde se realizaron las medidas, así como el sistema de adquisición de datos y principales características de las muestras utilizadas.
- En el capítulo 4, se proponen nuevas técnicas de maximización del efecto de la dispersión en sistemas de dispersores acústicos aislados, utilizando geometrías fractales. En concreto, se han utilizado las geometrías: triángulo de Sierpinski y alfombra de Sierpinski. En la primera parte del capítulo, se muestra de forma cualitativa, como se aumenta el tamaño de las bandas de atenuación debidas a la dispersión múltiple y en la segunda parte, se cuantifica esta mejora.
- En el capítulo 5, se presenta el diseño de dos pantallas acústicas reales basadas en cristales de sonido formadas por dispersores que incorporan múltiples fenómenos. Además, se presenta el proceso de homologación que se ha llevado a cabo, para poner a estos sistemas a niveles comparables a las pantallas tradicionales y así tenerlas normalizadas y homologadas como dispositivos de reducción de ruido de tráfico. En la primera pantalla, se utilizan dispersores ordenados de forma periódica y en la segunda, los dispersores se ordenan siguiendo la geometría fractal triángulo de Sierpinski.
- En el capítulo 6, se caracteriza la difracción en el borde superior de una pantalla acústica formada por dispersores acústicos aislados ordenados de forma periódica. Se tiene en cuenta que los dispersores son cilindros rígidos de altura finita y que la pantalla es lo suficientemente larga para no considerar los bordes laterales. Se analiza la interacción entre la dispersión múltiple que sucede en

el plano de la pantalla que presenta periodicidad y la difracción por el borde superior, que se produce en planos perpendiculares al anterior. Este análisis se realiza para rangos de frecuencia dentro y fuera de la zona gap.

- El capítulo 7, constituye la presentación de un modelo numérico integral para el diseño de dispositivos eficientes basados en 2DSCs para controlar la propagación de ondas acústicas. El modelo de superposición desarrollado, incluye el fenómeno de la difracción por el borde superior de la pantalla acústica analizado en el capítulo 6.

Este capítulo se divide en cuatro secciones. En cada una se presenta y analiza un modelo numérico para una pantalla acústica basada en dispersores aislados que incorpora diferentes fenómenos acústicos. Para cada modelo, una vez analizados y obtenidos los resultados parciales, por superposición se obtienen los resultados globales. En la primera sección, los dispersores que forman la pantalla acústica son totalmente rígidos, mientras que en la segunda sección son dispersores multifenómeno. En la tercera sección, se utilizan dispersores multifenómeno a los que se les ha añadido mecanismos de interferencias para reducir el efecto de la difracción por el borde superior de la pantalla. Por último, se presenta el modelo numérico de pantalla acústica basada en dispersores aislados que integra a los anteriores.

- En el capítulo 8, se resumen las conclusiones más importantes obtenidas a lo largo de todo este trabajo y se exponen la perspectivas futuras de este trabajo de investigación.

Capítulo 2

Fundamentos teóricos

2.1 Pantallas acústicas. Generalidades y tipos

El ruido es un problema medioambiental de primera magnitud. Las administraciones y los ciudadanos han tomado conciencia de que la contaminación acústica es uno de los factores que causa un gran deterioro en la calidad de vida de las personas. Por ello, son varias las actuaciones que se han llevado a cabo. Así, por ejemplo, sobre la fuente de ruido (tráfico) se suelen utilizar pavimentos menos ruidosos, neumáticos especiales, etc., y sobre el receptor de ruido (viviendas) cerramientos más aislantes, dobles ventanas, etc.. Cuando no es posible, o es demasiado caro, reducir la emisión de ruido de la fuente, una de las soluciones para el control del ruido en su transmisión viene dada por la utilización de pantallas acústicas, también denominadas pantallas antirruído o barreras acústicas. Estas consisten, básicamente, en un medio continuo de material rígido que se interpone entre la fuente emisora de ruido y el receptor [3]. Esta reducción del nivel de ruido, que habitualmente se denomina atenuación, es debida fundamentalmente a la Ley de Masas. Esta ley establece que la reducción de la intensidad acústica a través de un cerramiento simple¹ crece linealmente con el logaritmo de la frecuencia y la masa superficial del cerramiento. Así, cada vez que se duplica la masa o la frecuencia, el aislamiento aumenta en 6 dB.

La medida que se utiliza para estimar la efectividad de la barrera es la pérdida por inserción² (IL), que es la diferencia de niveles sonoros antes y después de colocar la barrera [2]:

$$IL = LP_{antes} - LP_{despues} = 20 \log_{10} \left| \frac{P_{directa}}{P_{Interferida}} \right| \quad (2.1)$$

¹Es aquel que aunque esté compuesto de diferentes materiales, no existe cambio brusco de la densidad entre la diferentes capas que lo conforman.

²Insertion Loss (IL), en inglés. En este trabajo se nombra indistintamente este parámetro como pérdida por inserción o atenuación acústica. Su unidad es el decibelio (dB)

El efecto acústico de la barrera se puede explicar de la siguiente forma: el ruido transmitido viaja desde la fuente al receptor en línea recta. Esta trayectoria se interrumpe por la barrera acústica cuando se sitúa entre la fuente y el receptor. Una porción de la energía acústica emitida es o bien reflejada o dispersada hacia la fuente, otra porción es transmitida a través de la barrera, difractada por el borde de la barrera o absorbida por el material del que está construida la misma (Figura (2.1)). La difracción por los bordes de la pantalla (superior o laterales) es considerado el mecanismo acústico que más reduce la efectividad de una pantalla acústica.

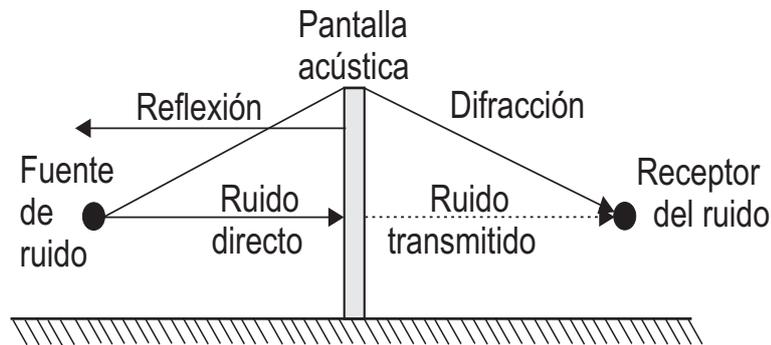


Figura 2.1: Pantalla acústica tradicional [11].

Esta región donde el ruido no llega de manera directa desde la fuente, se conoce con el nombre de zona de sombra, (Figura (2.2)). La zona de sombra es mayor conforme aumenta la frecuencia, produciendo pues, mayor atenuación para altas frecuencias [2].

En el diseño de pantallas acústicas, es necesario considerar dos factores: uno de ellos son las consideraciones acústicas de diseño que involucran aspectos como el material, localización, dimensión y forma de las barreras, y el otro son los aspectos no acústicos que incluye aspectos estéticos, mantenimiento, integridad estructural, peso, etc..

Las pantallas acústicas se pueden clasificar en función de la absorción de ruido y por su aislamiento, siguiendo las normas UNE-EN-1793-1 y UNE-EN-1793-2, respectivamente. Los tipos de pantallas acústicas más habituales son en su mayoría modulares, siendo las más típicas [12]:

- (1) Pantallas de módulos de hormigón. Pueden ser reflectantes o absorbentes. Las de tipo reflectante, están realizadas por módulos prefabricados de hormigón armado con diferentes formas y relieves que, junto con la posibilidad de conseguir diferentes colocaciones del hormigón, permiten soluciones arquitectónicas con una adecuada estética. En cambio, las de tipo absorbente, suelen tener forma plana o curva. Están constituidas por una placa de hormigón armado

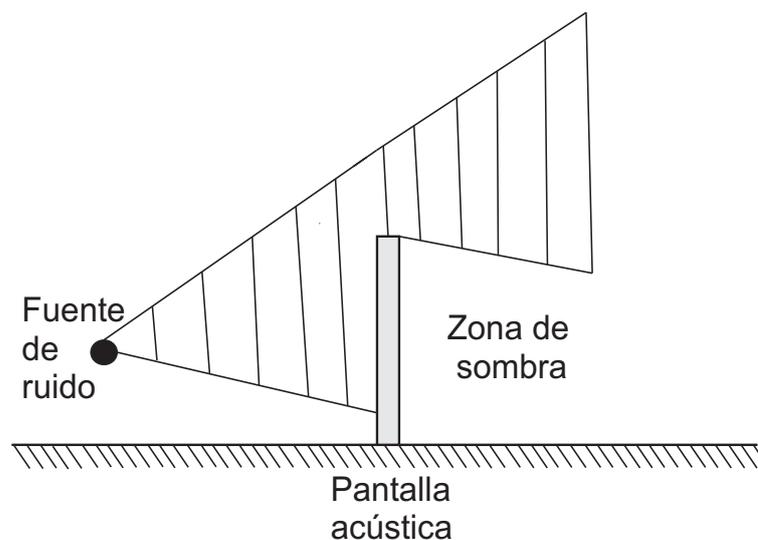


Figura 2.2: Zona de sombra de una pantalla acústica tradicional.

de espesor suficiente para asegurar su resistencia mecánica, que dota al módulo de capacidad de aislamiento acústico. Sobre esta placa, se dispone una capa realizada en hormigón poroso, con acabado normalmente en relieve. Esta capa es la que confiere al módulo su capacidad de absorción acústica, siendo de diferente grado según los elementos utilizados.

También existen pantallas de elementos prefabricados de hormigón reforzado con fibra de vidrio. Están formadas de un cuerpo sólido moldeado, de forma que permite alojar unas planchas de lana mineral y una rejilla de hormigón reforzado con fibra de vidrio. Esta rejilla, presenta una perforaciones que son suficientes para evitar las reflexiones acústicas, además de proteger a las planchas de lana mineral.

En la Figura (2.3(a)) se muestra un ejemplo de este tipo de pantalla. La vida media de estas pantallas es mayor de 20 años.

- (2) Pantallas de módulos de madera. Este tipo de pantallas, se construyen a base de paneles modulares realizados en madera tratada convenientemente para asegurar su conservación a la intemperie, tal y como se observa en la Figura (2.3(b)). Los paneles modulares pueden ser reflectantes o absorbentes, según lleven o no material altamente absorbente adosado por su cara expuesta a la fuente de ruido. Presentan buenas posibilidades estéticas y una gran integración en el medio ambiente.
- (3) Pantallas de módulos transparentes. Desde el punto de vista acústico, son pantallas reflectantes, utilizándose planchas de policarbonato, polimetacrilato

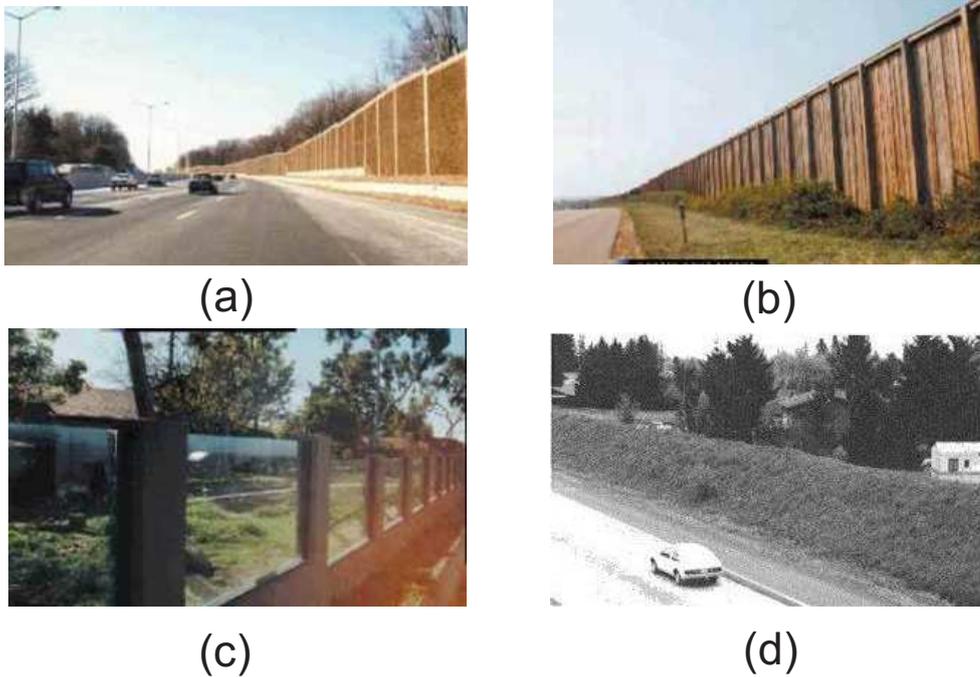


Figura 2.3: Algunos ejemplos de pantallas acústicas: (a) pantalla de módulos de hormigón, (b) pantalla de módulos de madera, (c) pantalla de módulos transparentes y (d) dique de tierra. Fotografías propiedad de la Federal Highway Administration (USA).

o vidrio para su construcción. Las exigencias de estabilidad y resistencia mecánica, implican el empleo de unos espesores de planchas de material ($e = 15$ mm) que confieren a la pantalla una masa superficial suficiente para asegurar la atenuación requerida. Este tipo de pantallas transparentes, tienen la ventaja de interferir mínimamente en la visibilidad del entorno. En la Figura (2.3(c)) se muestra un ejemplo de este tipo de pantalla. La vida media de estas pantallas es moderada (15-20 años).

- (4) Pantallas de módulos metálicos, tipo "sandwich". Suelen ser altamente absorbentes y están constituidas por paneles modulares metálicos con un material absorbente acústico en su interior. Están constituidas por tres elementos: (i) Carcasa, realizada con chapa plegada, de acero o aleación de aluminio de alta resistencia, con acabado pintado. Le confiere al módulo su capacidad de aislamiento acústico. (ii) Placa, o material absorbente, constituida por lana mineral o fibra de vidrio baquelizada. Confiere al módulo su capacidad de absorción acústica y junto a la carcasa, la capacidad de aislamiento a ruido aéreo. (iii) Rejilla de protección, realizada con chapa perforada, de acero o de

aleación de aluminio de alta resistencia con acabado pintado. Protege el material absorbente y aporta el acabado superficial a la pantalla. La coloración de la pantalla permite una integración estética razonable, siendo la vida media moderada (15-20 años).

Como ejemplo de pantalla acústica no modular, está la denominada dique de tierra. En la Figura (2.3(d)) se muestra un ejemplo. Este tipo de pantalla está constituida por montículos de tierra que pueden provenir de la misma obra que se realizó en el trazado de la autovía, carretera o camino, presentando menor coste, y dando un aspecto natural al entorno. Además, tienen una vida media ilimitada [13].

Con la finalidad de reducir la difracción por el borde de las pantallas, mecanismo que reduce su efectividad, se han desarrollado en la última década dispositivos difractivos montados en la parte superior de las barreras acústicas tradicionales [14] [15] [16] [17] [18]. Estos dispositivos no aumentan el peso de la barrera, sin embargo disminuyen el sonido difractado en la zona de sombra. En la sección (2.2.2), se muestran los diferentes métodos que se aplican para reducir la difracción por el borde superior de las pantallas tradicionales, con la finalidad de aumentar su efectividad.

2.2 Difracción por el borde superior de una pantalla acústica clásica

Cuando una onda se encuentra un obstáculo o pasa a través de un orificio, la dirección de la onda deja de ser rectilínea, presentando la onda anomalías acústicas en diferentes puntos. Este fenómeno recibe el nombre de **difracción**. En términos generales, la difracción puede ser estudiada teniendo en cuenta el Principio de Huygens, de tal manera que cada punto alcanzado por la onda incidente se convierte en una fuente nueva de ondas acústicas, y la envolvente de estas nuevas ondas forman el nuevo frente de ondas [19]. Varias obras se han hecho desde Keller [20] que propuso la teoría geométrica de la difracción, que trata a los bordes como fuentes secundarias de rayos difractados que pueden propagarse detrás del dispositivo considerado. Por lo tanto, la teoría de la difracción de sonido en un borde ha sido ampliamente estudiada, y se han desarrollado diferentes soluciones analíticas para modelar el fenómeno. En esta sección se muestra un modelo para el estudio de la difracción por el borde superior de una pantalla acústica delgada clásica y las mejoras más importantes del rendimiento acústico que se han implementado a este tipo de pantallas. Además se presentan los métodos numéricos más utilizados para el estudio de pantallas acústicas clásicas.

2.2.1 Modelo de difracción para barrera delgada

Se considera que una barrera es delgada si el grosor t de la misma es menor a 3λ y la longitud de onda cumple: $\lambda > \frac{t}{5}$ pudiendo decir que en el borde superior sólo existe una única difracción [2].

Suponiendo la barrera acústica clásica semi-infinita y que el campo acústico total que existe en la zona de sombra de la barrera es debido a la difracción por el borde superior de la misma, es importante conocer que forma tiene dicho campo y que energía ha llegado a esta zona para introducir mejoras que consigan aumentar la efectividad de la barrera. Respecto a la forma del campo difractado por una barrera acústica clásica, con una línea recta como borde, el frente de onda difractado es generado por infinitas fuentes puntuales emitiendo en fase unas con las otras y con la misma amplitud. Como resultado, el frente de ondas difractado es uniforme en la dirección OY , siendo su forma círculos concéntricos con el borde de la pantalla, tal y como se muestra en la Figura (2.4).

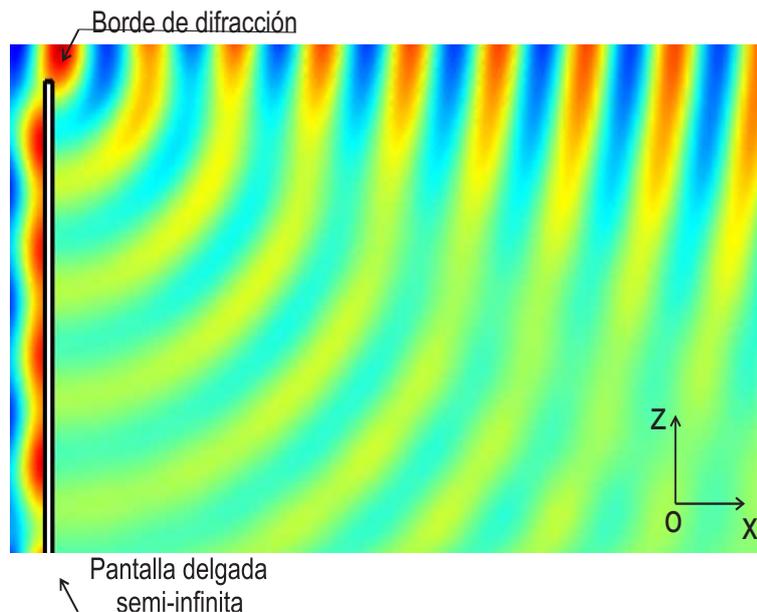


Figura 2.4: Difracción por el borde superior en una barrera clásica delgada semi-infinita: el campo difractado tiene forma circular. Se representa el mapa de presión total real.

Para valorar la cantidad de energía que llega a la zona de sombra se utiliza el parámetro pérdida por inserción (2.1), parámetro que para una barrera delgada, depende principalmente de la longitud de onda λ de la frecuencia emitida, además de los siguientes factores:

- a) Posición de la fuente y el receptor respecto al borde superior de la barrera. En

la Figura (2.5) se muestra la posición relativa entre fuente, receptor y barrera. Esta dependencia, se evalúa con el denominado número de Fresnel (N), que se define como:

$$N = \frac{2}{\lambda}[d_1 + d_2 - d] \quad (2.2)$$

donde d_1 es la distancia entre la fuente y el borde de difracción, d_2 es la distancia entre el receptor y el borde de difracción y d es la distancia directa entre la fuente y el receptor. Cuando se cumple la relación:

$$d = d_1 + d_2 \quad (2.3)$$

el valor de N se considera nulo. Esta situación ocurre cuando el receptor observa a la fuente justo alineada con el borde superior de la barrera.

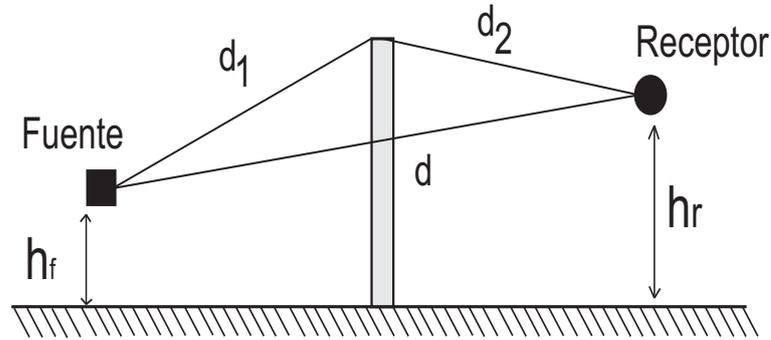


Figura 2.5: Barrera delgada.

Cuanto más se extiende la barrera por encima de la línea de visión, mayor es el valor de N .

- b) El tiempo atmosférico, que viene reflejado por un factor de corrección (K) que para distancias pequeñas se toma igual a 1. En general si se tiene en cuenta la temperatura y el efecto del viento, este factor se tiene que calcular según [21]:

$$K = e^{-0.0005\sqrt{\frac{d_1 d_2 d}{N\lambda}}} \quad (2.4)$$

donde d_1 , d_2 , d , N y λ son los parámetros descritos anteriormente.

- c) Atenuación aportada por el suelo antes de insertar la barrera: A_{suelo} en decibelios (dB). Esta atenuación, es el resultado de la interferencia entre el sonido directo y el reflejado por el suelo y depende en gran medida del tipo de superficie del este último, el ángulo de rozamiento, la diferencia de camino seguido por el sonido directo y reflejado, además de la frecuencia.

El estandar ISO/DIS 9623-1 [22] muestra el cálculo de A_{suelo} , siempre que se cumplan las siguientes condiciones:

- (i) propagación sobre un suelo que es casi en su totalidad acústicamente blando³,
- (ii) espectro de ruido amplio y gradual (que es lo que ocurre en plantas industriales o arterias de tráfico rodado),
- (iii) el espectro de ruido no contiene componentes destacados de frecuencias discretas,
- (iv) sólo es de interés el nivel de ponderación A⁴ en la posición del receptor.

La expresión según el estandar ISO/DIS 9623-1, es independiente de la frecuencia y resulta ser:

$$A_{suelo} = 4.8 - \frac{2h_m}{d} \left(17 + \frac{300}{d} \right) \quad (2.5)$$

siendo d la distancia entre la fuente y el receptor en metros, y h_m que para un suelo plano resulta ser:

$$h_m = \frac{h_f + h_r}{2} \quad (2.6)$$

siendo h_f y h_r las alturas respecto del suelo, de la fuente y el receptor respectivamente, tal y como se puede ver en la Figura (2.5).

Para valores negativos de A_{suelo} , obtenidos a partir de la ecuación (2.5), se toma $A_{suelo} = 0$.

La expresión para el cálculo de la pérdida por inserción de una barrera delgada, con todos los parámetros que intervienen comentados anteriormente, resulta ser según [2]:

$$IL_{barrera} = 10 \log[3 + 10NK] - A_{suelo}(dB) \quad (2.7)$$

Si la barrera es gruesa, la pérdida por inserción se calcula con la expresión [2]:

$$IL_{barrera} = 10 \log[3 + 30NK] - A_{suelo}(dB) \quad (2.8)$$

resultando en este caso, un número de Fresnel:

$$N = \frac{2}{\lambda} [d_1 + d_2 + t - d] \quad (2.9)$$

donde se observa que se ha añadido en la expresión (2.9), la anchura t de la barrera.

³Los suelos blandos son suelos cubiertos por hierba, árboles u otra vegetación y todos los suelos porosos adecuados para el crecimiento de vegetación, como por ejemplo tierras cultivables.

⁴El oído humano no percibe igual las distintas frecuencias, alcanzando el máximo de percepción a frecuencias medias. El decibelio A (dBA), es una unidad de nivel sonoro medido con un filtro para conservar solamente las frecuencias más dañinas para el oído

2.2.2 Mejora del rendimiento acústico de pantallas clásicas

En las barreras acústicas clásicas, la difracción en su borde superior y lateral se considera uno de los principales mecanismos que reduce su rendimiento como barrera, ya que provoca un aumento del nivel de presión sonora detrás de la barrera. Esta zona en la que el sonido no llega directamente y el nivel de presión es principalmente debido a la difracción (zona de sombra), depende de la altura de la barrera y de la forma del borde. La reducción de la difracción modificando el borde superior de las barreras acústicas clásicas ha sido estudiada por varios autores [15] [17] con el fin de reducir su efecto y, por lo tanto, obtener barreras acústicas más eficaces. Así, las pantallas típicas se pueden clasificar atendiendo a la forma del borde, forma que intenta aumentar el rendimiento de la barrera. Estas son [23]:

- a) Arista de la barrera en forma de T o Y.

Son barreras que tienen una arista recta pero disponen de elementos añadidos con el objeto de dificultar la difracción del sonido, Figura (2.6). Las que terminan en T o Y son las que mejor resultado dan. Incluso cuando se incorporan materiales absorbentes sobre estas terminaciones, los resultados mejoran considerablemente [24] [25].

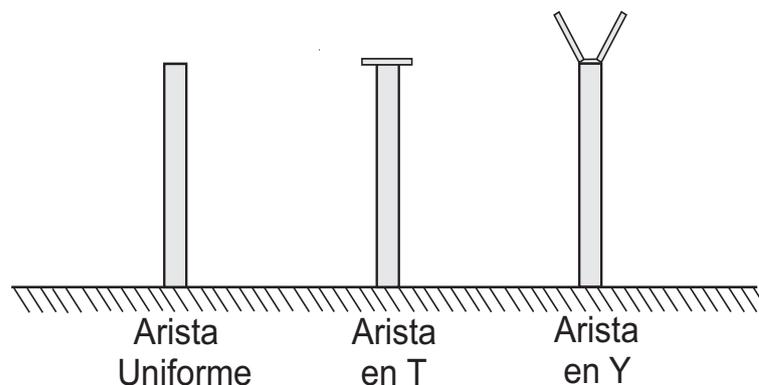


Figura 2.6: De izquierda a derecha: pantalla con arista uniforme, en T y en Y.

- b) Arista de la barrera irregular.

La arista de la barrera adopta formas irregulares con la finalidad de que se forme un campo difuso debido a la aparición de señales de diferente fase, haciendo perder el carácter lineal de la fuente, Figura (2.7).

- c) Arista de la barrera con elementos interferentes.

Existen varios procedimientos para conseguir interferencias sobre la difracción. Así por ejemplo, una opción es utilizar cavidades resonantes para una determinada frecuencia, [26]. Es un procedimiento selectivo, ya que el tamaño

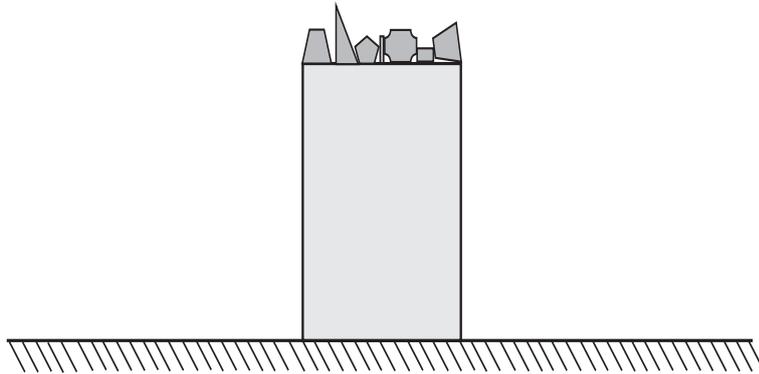


Figura 2.7: Arista de la barrera con formas irregulares.

de las cavidades determina la frecuencia que se quiere atenuar. El comportamiento de estas cavidades es similar al de un absorbente acústico, pero es el efecto de difusión acústica el que posibilita el fenómeno de interferencias, Figura (2.8(a)). Otra posibilidad es disponer elementos sólidos (satélites) cerca del borde superior con el fin de producir un campo difractado que se superpondrá, en la zona de sombra, al campo difractado producido en el borde superior de la pantalla, Figura (2.8(b)). Esto es debido al hecho de que el camino recorrido por ambas perturbaciones es diferente y por lo tanto provoca un desfase entre ellas. Se consigue de esta manera que la interferencia sea destructiva. Al igual que el caso anterior, es un procedimiento selectivo ya que la posición del satélite determina que frecuencia se quiere atenuar. Este procedimiento es el que utiliza en este trabajo para abordar el problema de la difracción en cristales de sonido, como se verá en el apartado (7.4).

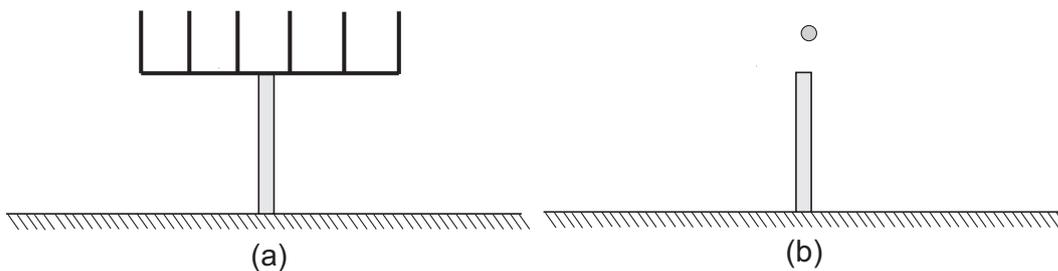


Figura 2.8: (a) Pantalla con arista con cavidades resonantes, (b) pantalla con arista uniforme con elemento interferente situado a una cierta altura del borde superior.

d) Arista de la barrera absorbente.

Consiste, como se observa en la Figura (2.9), en añadir una superficie absorbente sobre la arista, normalmente con forma saliente y que además incrementa

en cierta manera la altura de la barrera. Básicamente está formada por una lámina exterior curvada de policarbonato con capa perforada. En su interior hay un material absorbente recubierto de una película resistente a la intemperie. Cierra la arista, por su parte interior, una chapa galvanizada cogida al borde de la pantalla. La altura de la forma del material absorbente suele ser 650 cm y la anchura sobre 600 cm, [27].

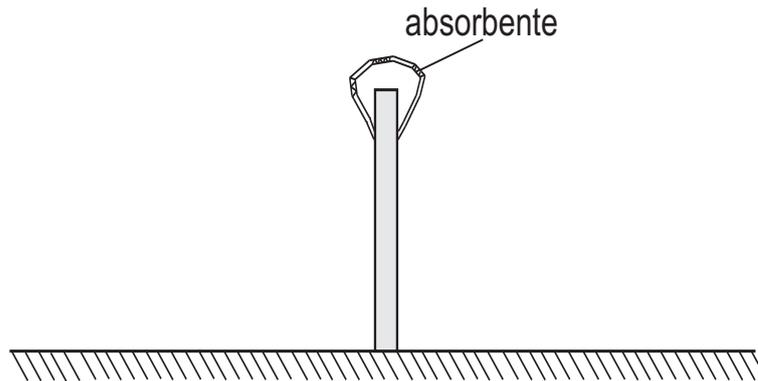


Figura 2.9: Arista de la barrera con absorbente.

e) Sistemas de cancelación activa del ruido.

El control activo de ruido (CAR)⁵ consiste en la cancelación activa de un campo de ruido primario mediante la inserción de un campo secundario en contrafase. Un sistema CAR consta básicamente de unos sensores para medir el campo de ruido, unos actuadores para generar el campo secundario y un controlador que gobierna el proceso de cancelación [28]. Como se muestra en el esquema de la Figura (2.10), la fuente de ruido primaria genera un campo primario que es captado por unos sensores de referencia. Estos sensores de referencia son básicamente unos pequeños micrófonos que captan la señal para que la unidad de control la procese. Esta unidad de control genera una señal que a través de unos altavoces inserta en el entorno de la pantalla un campo secundario, que es el que interfiere con el campo primario. Unos sensores, denominados de error, toman muestras para que la unidad de control pueda analizar si el resultado de la cancelación es el deseado. En su caso, la unidad de control reacciona ajustando el campo secundario y por lo tanto intentando producir un resultado con el menor error posible.

Algunos autores han demostrado que se produce la difracción, para longitudes de onda mucho mayor que el espesor de la barrera, al final de la parte superior de la barrera, en un punto llamado fuente puntual imaginaria (IPS) [18].

⁵En inglés Active Noise Control (ANC)

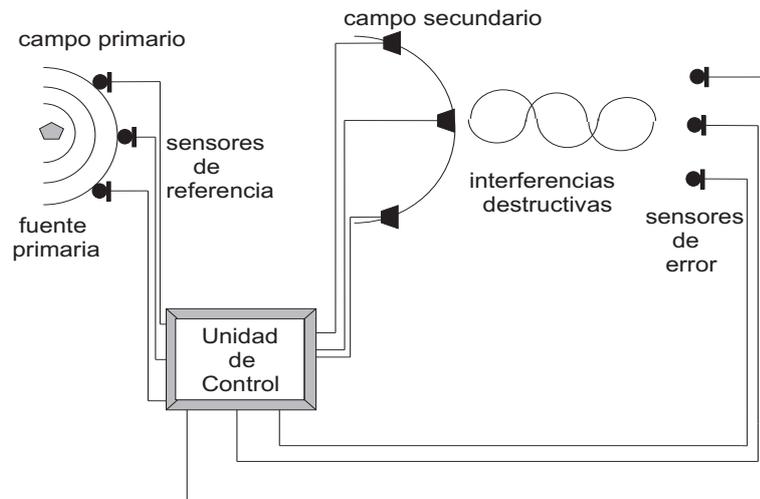


Figura 2.10: Esquema de un sistema CAR según [28].

2.2.3 Métodos numéricos para el estudio del comportamiento acústico de pantallas acústicas

Varios han sido los métodos propuestos para el estudio del comportamiento acústico de las pantallas acústicas. Los más utilizados son:

El Método de los Elementos Frontera (BEM)[29] es un método numérico para resolver ecuaciones en derivadas parciales lineales que han sido formuladas como ecuaciones integrales (en forma de integral sobre la frontera). Se utiliza, generalmente, cuando las geometrías son complejas, ya que BEM solamente requiere la aproximación de las variables y la geometría del problema, en la frontera del modelo.

El Método de Secuencias de Máxima Longitud (MLS)[30], se basa en la correlación cruzada entre una excitación de entrada y una señal de salida. Se utiliza, generalmente, para obtener muchas características de un sistema acústico, mediante post-procesado (función de transferencia, respuesta en frecuencia, respuesta de fase, retardo de grupo, etc..).

El Método de trazado de rayos 3D [31], que busca de que forma la onda va ser reflejada y cual va ser su ángulo de incidencia en los diferentes contornos del problema.

En este trabajo, se utiliza el Método de los Elementos Finitos (FEM). En la sección (2.5.3) se desarrolla este método.

2.3 Sistemas de dispersores acústicos

Algunos autores [4], han demostrado la posibilidad de utilizar redes de dispersores cilíndricos rígidos para construir pantallas acústicas (Figura (2.11)). Estos dispersores ordenados periódicamente forman los llamados cristales de sonido, materiales desarrollados en los años 90 [5] [32], que consisten en distribuciones periódicas de dispersores acústicos aislados, inmersos en un fluido con propiedades físicas diferentes, como se explica con detalle a continuación.



Figura 2.11: Pantalla acústica formada por redes de dispersores aislados. Esta pantalla está situada en el Campus de la Universitat Politècnica de València [11].

2.3.1 Generalidades y definiciones

Los **cristales de sonido**⁶ están formados por dos medios, dispersor periódico y transmisor, ambos con velocidades de propagación y propiedades elásticas diferentes. Gracias a estas diferencias entre ambos medios, es posible el fenómeno de la dispersión múltiple, que se verá con detalle en la sección (2.5.2.1). Según la forma y la ordenación de los dispersores, los SC pueden ser unidimensionales, bidimensionales o tridimensionales: son unidimensionales cuando la periodicidad sólo se produce en una dirección; si la periodicidad existe en la dirección de dos ejes ortogonales pero el cristal es homogéneo en la dirección del tercer eje ortogonal, el cristal es bidimensional; cuando existe periodicidad en los tres ejes se dice cristal tridimensional. A lo largo de todo este trabajo se consideran solamente sistemas bidimensionales.

⁶En este trabajo se utiliza SC como abreviatura de cristal de sonido

Atendiendo a las propiedades de transmisión, los SC se pueden clasificar según la **topología**, entendiendo ésta como la relación estructural que existe entre los dispersores y el medio transmisor. Se pueden distinguir dos tipos de topologías, según la forma del elemento dispersor:

- (A) **Topología Cermet**, donde el material dispersor consiste en inclusiones aisladas, cada una de las cuales está completamente rodeada por el material huésped.
- (B) **Topología Network**, donde el material dispersor está conectado y forma una red continua a lo largo de toda la estructura.

En este trabajo se utiliza cristales bidimensionales con topología Cermet, ya que los cristales de sonido estarán construidos mediante cilindros de diferentes tipos de material rígido envueltos en aire. En estas condiciones el aire (medio transmisor), que es el medio que presenta una mayor velocidad, forma un continuo. Esta geometría es la más favorable para obtener atenuación [33].

2.3.1.1 Propiedades geométricas

La estructura de todos los cristales puede escribirse en función de una **red**, con un grupo de átomos o moléculas ligados a cada punto de la misma. A este grupo se le denomina **base** y cuando se repite en el espacio conforma la **estructura cristalina**. La estructura de un cristal, pues, se obtiene por superposición de la red con la base. La red es la parte fundamental para el estudio del cristal [34].

El vector de traslación cristalino \vec{T} , se define como:

$$\vec{T} = u_1 \cdot \vec{a}_1 + u_2 \cdot \vec{a}_2 + u_3 \cdot \vec{a}_3 \quad (2.10)$$

siendo u_i números enteros. Los vectores $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \vec{a}_3$ son los vectores primitivos o vectores de traslación fundamental.

Las redes más comunes son las denominadas **redes de Bravais**, que sirven para especificar la forma en que átomos o grupos de ellos (llamados bases), se ordenan periódicamente en el espacio. Se pueden obtener 28 redes cristalinas posibles. En realidad, como puede demostrarse, sólo existen 14 configuraciones básicas, pudiéndose el resto obtener a partir de ellas.

En dos dimensiones existen cinco redes de Bravais. Estas se muestran en la Figura (2.12) y son:

- 1) **red cuadrada** $a_1 = a_2 \quad \alpha = 90^\circ$
- 2) **hexagonal** $a_1 = a_2 \quad \alpha = 120^\circ$
- 3) **rectangular centrada** $a_1 \neq a_2 \quad \alpha = 90^\circ$

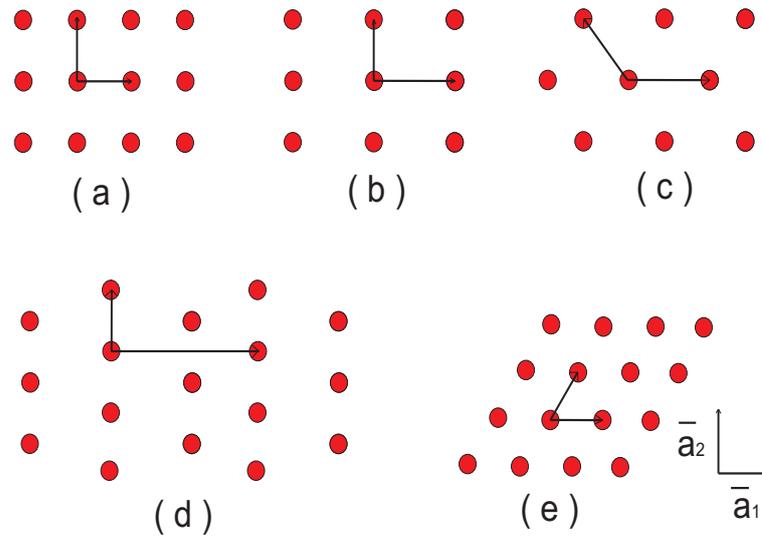


Figura 2.12: Redes de Bravais en dos dimensiones.

4) **rectangular primitiva** $a_1 \neq a_2$ $\alpha = 90^\circ$

5) **oblicua** $a_1 \neq a_2$ $\alpha \neq 90^\circ$

Los cristales son estructuras periódicas formadas por la repetición en el espacio de una unidad básica un número muy elevado de veces. Esta unidad básica se denomina **celda unidad** o celda.

La celda primitiva es una celda pero de volumen mínimo. Todas tienen el mismo número de átomos.

La celda de Wigner-Seitz es una celda primitiva que posee un sólo átomo en el centro. En el caso bidimensional corresponde a la región que queda entre las perpendiculares a los puntos medios de las líneas que unen un punto de la red con sus vecinos.

Trasladando esta ideas de cristalografía al caso de dispersores acústicos, la simetría de la red cristalina utilizada indica cómo están distribuidos los dispersores en el medio transmisor formando redes de difracción. Estas redes, se construyen a partir de la repetición periódica espacial de la celda unidad. La celda unidad se puede caracterizar por el parámetro de red, a .

En la Figura (2.13), se muestra el proceso esquemático de construcción de un SC. A partir de un centro dispersor, se construye una celda unidad y la repetición periódica mediante operaciones de giro y traslación de la celda unidad, permite crear el cristal.

Las redes más utilizadas en cristales bidimensionales son la triangular y la cuadrada. Como se observa en la Figura (2.14), para el caso de la celda cuadrada (a), el parámetro de red se define como la longitud entre centros de los dispersores de un

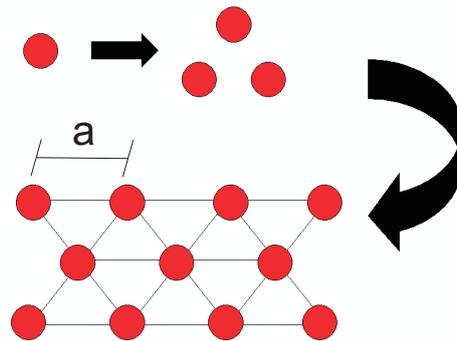


Figura 2.13: Construcción de un SC.

lado de la celda, mientras que para el caso de la celda triangular (b), el parámetro de red se define como la base del triángulo equilátero.

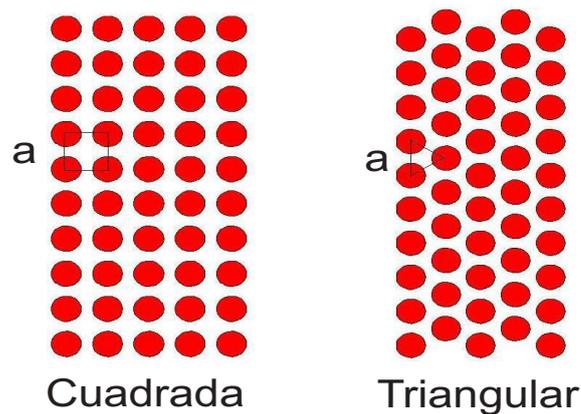


Figura 2.14: Redes típicas en los SC 2D: cuadrada (a) y triangular (b).

2.3.1.2 Propagación de ondas. Bandas prohibidas de transmisión

En los cristales de sonido se ha comprobado la existencia de bandas de frecuencia en las que no existe propagación del sonido [5]. El parámetro de red es crucial ya que determina la posición de dichas bandas de atenuación⁷ acústica. A partir de la ley de Bragg o del cálculo de las zonas de Brillouin, se pueden conocer las expresiones matemáticas que proporcionan el valor de dichas frecuencias en función del parámetro de red [35]. Estas expresiones dependen también de la dirección de propagación del sonido e igualmente se ha comprobado que existen unas direcciones,

⁷Bands gaps, en inglés

que se denominan direcciones principales, que fijan los límites de las frecuencias en las que aparece gap. En la Figura (2.15), están señaladas las direcciones principales para las redes cuadrada y triangular. Para red cuadrada, las direcciones principales son ΓX y ΓM que se corresponden con 0° y 45° respectivamente. Para red triangular, las direcciones principales son ΓX y ΓJ , que se corresponden con 0° y 30° respectivamente.

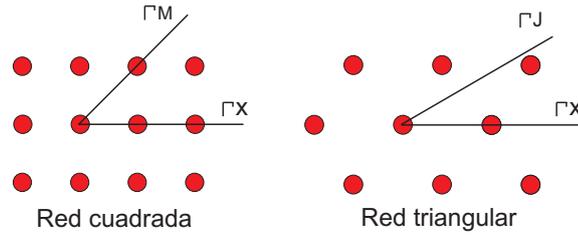


Figura 2.15: Direcciones principales de propagación en red cuadrada y triangular.

Cuando la propagación de la onda es en la dirección principal ΓX , la frecuencia que es atenuada, que se denomina frecuencia Bragg, es para la **red cuadrada**:

$$f_{Bragg} = \frac{c}{2a} \quad (2.11)$$

y para el caso de la **red triangular** se tiene:

$$f_{Bragg} = \frac{c}{\sqrt{3}a} \quad (2.12)$$

donde c es la velocidad del sonido en aire y a el parámetro de red del SC. Para otras direcciones de propagación se puede consultar la referencia [35].

Las bandas de frecuencias aparecen en el caso acústico debido a que los dispersores no son puntuales. Esto implica que la atenuación no aparezca sólo para una única frecuencia, sino para una banda alrededor de la frecuencia Bragg que se pueden determinar por la ecuación (2.11), para la red cuadrada, o por la ecuación (2.12), para la red triangular⁸. Para que exista un gap completo⁹ en un cristal es necesario que exista una zona de frecuencias común entre los picos Bragg correspondientes a las dos direcciones principales de simetría del cristal [35]. En la Figura (2.16) se muestra un ejemplo donde se produce un gap completo. Se corresponde con un 2DSC formado por una red triangular de dispersores circulares.

En general, para este trabajo y salvo que se indique lo contrario, la onda incidente será plana y con incidencia ΓX (0°).

Entre todos los posibles parámetros que influyen en la aparición de Gaps en los SCs, los más importantes¹⁰ [33] [36] son:

⁸también denominadas picos Bragg

⁹Full band gap, en inglés

¹⁰Existen otros, pero aquí se presentan los necesarios para este trabajo

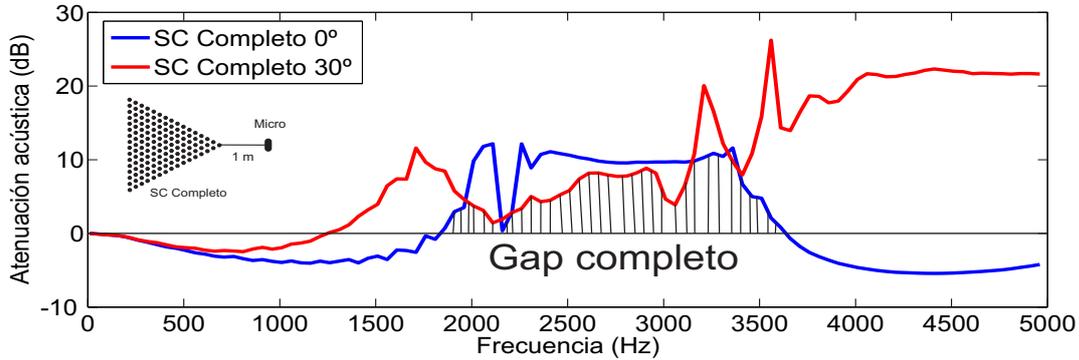


Figura 2.16: SC con forma externa triangular formado por dispersores circulares en red triangular: espectro de atenuación acústica (dB) en las dos direcciones principales 0° y 30°. Se observa los BG para las dos direcciones de incidencia y se produce un solape entre estos: gap completo.

(a) **Cociente de densidades** $y = \rho_s/\rho_h$ (donde ρ es la densidad, el subíndice s hace referencia al medio dispersor¹¹ y el subíndice h hace referencia al medio transmisor¹²). Se ha demostrado que el contraste de densidades de los componentes del SC juega un papel crucial para la aparición de Gaps [37]. El aumento del Band Gap es favorecido para dispersores de alta densidad, inmersos en un medio transmisor de baja densidad.

(b) **Factor de llenado, ff**¹³, que representa el volumen ocupado por el medio dispersor respecto del volumen total del cristal. Las expresiones del **ff** para las redes típicas se han reflejado en la Tabla (2.1), donde r representa el radio del dispersor, D su diámetro y a el parámetro de red del SC. En general, para una muestra 2D se puede definir como la suma de las áreas de todos los dispersores que forman cada muestra dividida por el área total ocupada por la muestra. En general, cuanto mayor es el ff más ancho es el pico Bragg en el dominio de la frecuencia.

(c) **Área de atenuación, AA**, valora la capacidad de atenuación de la red dentro de un rango de frecuencias establecido. Se define como el área comprendida entre el rango positivo de los espectros de atenuación (IL) y el umbral de la línea 0 dB en el rango de frecuencias seleccionado. Este parámetro ha sido ya utilizado para comparar las propiedades de

¹¹scatter, en inglés

¹²huésped, host en inglés

¹³Filling Factor, en inglés

Red	ff
Cuadrada	$\frac{\pi D^2}{4a^2}$
Triangular	$\frac{\pi 4r^2}{2\sqrt{3}a^2}$

Tabla 2.1: Factor de llenado de redes típicas.

atenuación de pantallas acústicas basadas en SC [38]. Sus unidades son dB·Hz e interesa que tenga un valor elevado.

(d) **Atenuación media**, \overline{A}_t , que representa en el rango de frecuencias en estudio, el valor medio de la atenuación.

(e) **Topología utilizada**. Es la relación estructural que existe entre los dispersores y el medio transmisor, como ya se ha comentado en la sección (2.3.1).

2.4 Maximización de las bandas de atenuación

Es la dispersión de la onda incidente en todos y cada uno de los dispersores que forman el cristal, junto a la dispersión de la onda dispersada por cada cilindro sobre el resto, lo que produce que aparezcan las bandas de atenuación detrás del cristal. Las características de estas bandas de atenuación han sido estudiadas en profundidad [38]. Sin embargo, el tamaño y la posición de estas bandas en el espectro de frecuencias dependen de varios factores. Algunos de estos factores son: (i) tipo de ordenamiento de los dispersores; (ii) separación entre los dispersores; (iii) contraste de densidades y velocidades de propagación entre el medio y los dispersores; y (iv) cantidad de dispersor existente por unidad de área. Esta dependencia hace que la implementación de los cristales de sonido como pantallas acústicas no sea sencilla.

Tradicionalmente se han seguido dos líneas de investigación para el desarrollo de pantallas acústicas basadas en cristales de sonido, con el fin de aumentar su capacidad de atenuación, haciéndolas competitivas con las clásicas bajo el punto de vista acústico:

- (i) maximizar el mecanismo de la dispersión múltiple mediante la búsqueda de nuevas ordenaciones de dispersores cilíndricos [38] [39] y
- (ii) añadir nuevos mecanismos de control de ruido tales como la resonancia y la absorción en el diseño de los dispersores [9].

Estas son las dos líneas que se van a desarrollar en las secciones siguientes para llegar a la pantalla acústica basada en cristales de sonido más avanzada.

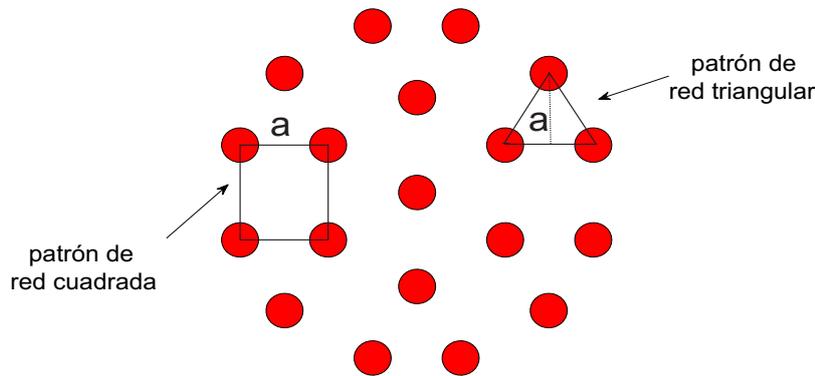


Figura 2.17: Construcción de un Cuasi-Cristal.

2.4.1 Actuación sobre el fenómeno de la dispersión múltiple

Como se ha dicho en la sección anterior, las bandas de atenuación dependen fuertemente de la posición de los dispersores y es en este punto donde surge la idea de modificar estos ordenamientos para conseguir maximizar las bandas de atenuación encontrando nuevas formas de ordenamientos que maximice el fenómeno de la dispersión múltiple. Algunos investigadores han desarrollado sistemas con dispersores ordenados como cuasi-cristales [40]. Son estructuras ordenadas pero sin periodicidad, en las que se ha demostrado el aumento de las propiedades acústicas en comparación con el ordenamiento cristalino. Otra estrategia, es la creación de vacantes a partir de un ordenamiento cristalino, generando una estructura cuasi-ordenada. En este caso, se han incorporado algoritmos para conseguir optimizar la estructura y así producir una mejora de las propiedades de atenuación [38][41] [40]. Otros investigadores, han propuesto el uso de simetrías cuasi-fractales como una herramienta para aumentar las propiedades de atenuación de los conjuntos de dispersores acústicos [42] [7]. En esta sección se exponen los diferentes ordenamientos antes comentados, poniendo mayor hincapié en el caso cuasi-fractal.

2.4.1.1 Cuasi-cristales

Un Cuasi-Cristal (QC)¹⁴ es un ordenamiento cristalino que está formado por la superposición de varias estructuras que presentan una simetría de traslación local, pero que en conjunto carecen de esta simetría. Así, en la Figura (2.17), se puede ver como se ha creado un cuasi-cristal a base de superponer redes cuadradas con triangulares.

¹⁴Quasi-Crystal en inglés

Estas estructuras han sido estudiadas, demostrando que superponiendo redes cristalinas una tras otra con diferentes pasos de red, se consigue un super-filtro de ruido de banda ancha dentro del rango audible [43]. Esta estructura es un cuasi-cristal, ya que carece de periodicidad global, pero dentro de la misma existen diferentes periodicidades. En otro trabajo se ha comprobado que ciertas estructuras QCs, como la representada en la Figura (2.17), producen mayor atenuación y ancho de banda para factores de llenado bajos que los que producirían los SC en esas mismas condiciones [44].

2.4.1.2 Estructuras cuasi-ordenadas

Un SC inicial con cualquier configuración en el que se generan vacantes, produce las llamadas estructuras Cuasi-Ordenadas (QOS)¹⁵. La creación de vacantes a partir de un SC es relativamente sencilla, ya que incluso de forma aleatoria se pueden eliminar dispersores. La estructura que resulta puede tener simetría en un eje, en los dos ejes e incluso ser asimétrica. Por ejemplo, en la Figura (2.18), se han creado vacantes de forma que la estructura resultante tiene simetría respecto al eje horizontal pasando por su centro.

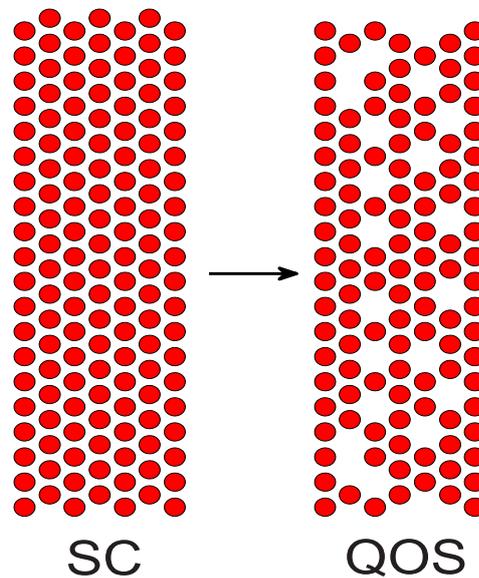


Figura 2.18: Construcción de un QOS a partir de un SC.

Lo que no resulta tan sencillo es llegar a una estructura con vacantes que presente ciertos resultados condicionados, es decir, que la estructura esté optimizada bajo el punto de vista acústico. Así por ejemplo, se ha comprobado que con estas

¹⁵Quasi-Ordered Structures, en inglés



Figura 2.19: Fractales en la Naturaleza (Public-Domain-Photos.com).

estructuras, se pueden obtener bandas de atenuación en zonas de frecuencias que no se corresponden con la periodicidad del cristal original [41] [40].

Algunas ventajas que presentan estas estructuras son su facilidad de construcción, resistencia y reducción de volumen [38].

2.4.1.3 Fractales y cuasi-fractales

Toda estructura que revele como propiedad de simetría la invarianza de escala aunque sea solamente en varios rangos es susceptible de poseer propiedades fractales. Esto es, el todo se parece a sus partes [50]. En consecuencia esta auto-similitud ¹⁶, es como ver un objeto y encontrar la misma forma en su interior, cuando es visto con detalle a otra escala. Muchas formas naturales presentan esos parecidos, restringidos a algunos pocos cambios de escala. Así por ejemplo como se puede observar en la Figura (2.19), se tiene una col rumana que en su conjunto parece que es la copia de pequeños trozos que están contenidos en su interior.

En estos ejemplos, presentes en la naturaleza, se pueden observar propiedades típicas de figuras fractales que son:

- i) la auto-semejanza,
- ii) que contienen copias de sí mismas,
- iii) se definen de forma recursiva,

aunque se observa que la auto-similitud en la naturaleza suele desaparecer tras algunas iteraciones.

Si el objeto que se estudia es auto-similar en el sentido mencionado, puede ser considerado fractal y se le puede caracterizar por un parámetro característico denominado **dimensión fractal** (D), que se define a continuación.

¹⁶self-similar en inglés

2.4.1.3.1 Conjunto Fractal y Dimensión Fractal La dimensión fractal es un concepto genérico que tiene su origen en las métricas matemáticas. Hay que recordar que las dimensiones de líneas, cuadrados y cubos son respectivamente de uno, dos y tres. La generalización hecha por Mandelbrot, aprovechando la obra de Hausdorff, a la posible existencia de objetos geométricos de dimensiones intermedias entre esos valores enteros, permitió introducir el concepto de dimensión fractal [49] [50].

Un conjunto se considera fractal cuando:

$$N_s = \frac{C}{r_s^D} \quad s \neq 0 \quad (2.13)$$

donde C es una constante de proporcionalidad, N_s es el número de objetos de dicho conjunto con una dimensión lineal característica r_s , y D es la dimensión fractal [51]. El parámetro s representa un número entero y se corresponde con la iteración o etapa¹⁷ del proceso de creación del fractal.

Para calcular el valor de D hay que tener en cuenta que con dos iteraciones es suficiente ya que C es constante y se puede eliminar de la ecuación, quedando:

$$D = \frac{\ln\left(\frac{N_{s+1}}{N_s}\right)}{\ln\left(\frac{r_s}{r_{s+1}}\right)} \quad (2.14)$$

donde $s = 1, 2, 3, \dots$ representa el orden de iteración o stage,

r_s representa el cociente entre la unidad y número de partes en los que ha quedado dividido el segmento unidad¹⁸ en el stage s ,

N_s representa el número de copias que quedan en el stage s .

La dimensión fractal puede ser un número entero, en cuyo caso es equivalente a la dimensión euclídea, pero en general es no entero¹⁹ e inferior a esta última. Se presentan a continuación, algunos ejemplos de fractales que ilustren de manera más práctica, el proceso de cálculo de la dimensión fractal D.

(a) **Conjunto de Cantor**, para construirlo se toma un segmento unidad ($s=0$) y se divide en tres partes iguales. Eliminando el segmento central se tiene el stage $s=1$. De cada uno de los segmentos que han quedado, se vuelve a repetir el proceso de dividir en tres cada uno de ellos y eliminar el central. Este proceso se itera hasta el infinito tal y como se observa en la Figura (2.20).

La dimensión fractal se calcula teniendo en cuenta que $r_1 = \frac{1}{3}$ y $r_2 = \frac{1}{9}$ para $N_1 = 2$ y $N_2 = 4$, que a partir de la ecuación (2.13) se obtiene:

$$D = \frac{\ln\left(\frac{N_{s+1}}{N_s}\right)}{\ln\left(\frac{r_s}{r_{s+1}}\right)} = \frac{\ln 2}{\ln 3} = 0.6309 \quad (2.15)$$

¹⁷ iteración o etapa se ha traducido de la palabra *stage* del inglés

¹⁸Tengase en cuenta que r_s es una dimensión lineal característica de la estructura

¹⁹fractus en latín significa quebrado o fracturado



Figura 2.20: Construcción del Fractal Conjunto de Cantor.

(b) **Alfombra de Sierpinski**, sería la extensión al plano del Conjunto de Cantor. Se considera un cuadrado de lado unidad lleno ($s=0$) y se divide cada lado en tres, lo cual divide el cuadrado en nueve. Si se retira el cuadrado central, queda la figura (b), ($s=1$), como se puede ver en la Figura (2.21). Iterando el proceso hasta el infinito se está generando de nuevo un conjunto fractal.

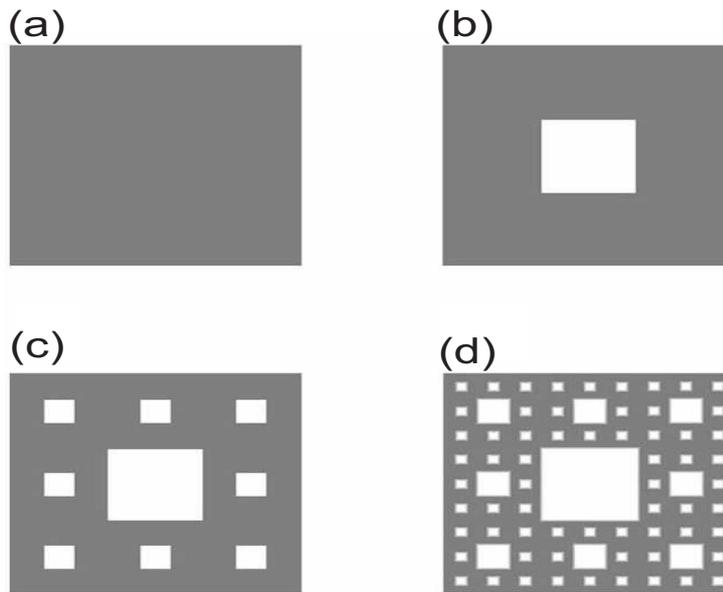


Figura 2.21: Construcción del Fractal Alfombra de Sierpinski.

La dimensión fractal se calcula teniendo en cuenta que $r_1 = \frac{1}{3}$, ya que se ha dividido el lado del inicial en 3 y $r_2 = \frac{1}{9}$, ya que se ha dividido el lado del inicial en 9, para $N_1 = 8$, porque se dejan 8 cuadrados de lado $\frac{1}{3}$ del inicial y $N_2 = 64$, porque se dejan 64 cuadrados de lado $\frac{1}{9}$ del inicial, que a partir de la ecuación (2.13) se obtiene:

$$D = \frac{\ln\left(\frac{N_{s+1}}{N_s}\right)}{\ln\left(\frac{r_s}{r_{s+1}}\right)} = \frac{\ln 8}{\ln 3} = 1.8928 \quad (2.16)$$

(c) **Triángulo de Sierpinski.** Se considera un triángulo de lado unidad (a) y se divide en cuatro de lado la tercera parte cada uno y se retira el central (b), Figura (2.22). Iterando el proceso hasta el infinito se está generando de nuevo un conjunto fractal.

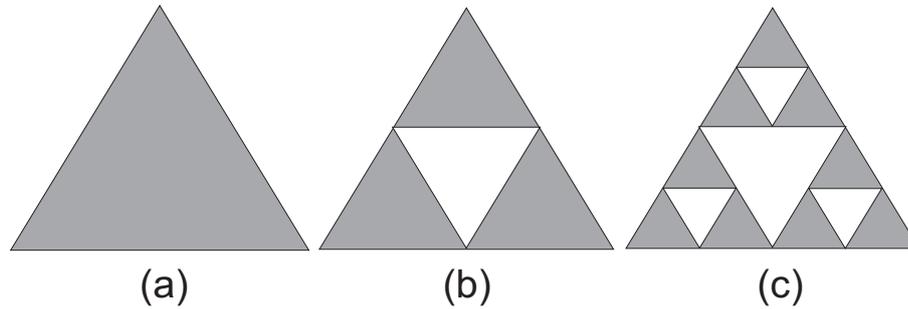


Figura 2.22: Construcción del Fractal Triángulo de Sierpinski.

La dimensión fractal se calcula teniendo en cuenta que $r_1 = \frac{1}{2}$ y $r_2 = \frac{1}{4}$ para $N_1 = 3$ y $N_2 = 9$, que a partir de la ecuación (2.13) se obtiene:

$$D = \frac{\ln\left(\frac{N_{s+1}}{N_s}\right)}{\ln\left(\frac{r_s}{r_{s+1}}\right)} = \frac{\ln 3}{\ln 2} = 1.5850 \quad (2.17)$$

2.4.1.4 Cuasi-fractal

Hay que resaltar que los valores de iteración no suelen ser elevados debido a la imposibilidad física de llegar al infinito del proceso fractal. Por esta razón y después de esta aclaración, las estructuras que se van a construir y posteriormente analizar deben denominarse **cuasi-fractales**²⁰, ya que está en el camino de ser fractal, pero no lo son totalmente.

Dentro del campo acústico, se puede definir una disposición de dispersores en forma cuasi-fractal²¹(QFS), como una agrupación de los mismos que están inmersos en aire y en conjunto se corresponde con una iteración²² no nula de cualquier geometría fractal. Estas estructuras están formadas por elementos aislados, no formando un área continua de la que se va eliminando pequeñas áreas tal y como sucede en la

²⁰En trabajos recientes se utiliza pre-fractales

²¹Quasi-Fractal Structure, en inglés

²²stage en inglés. Se corresponde con la iteración del proceso de creación del fractal

construcción mostrada en la Figura (2.21) o en la Figura (2.22). Este es otro motivo por el que a estas estructuras se les debe denominar cuasi-fractales.

La estructura cuasi-fractal, se puede obtener de dos formas posibles:

a) Ordenación Fractal.

Consiste en generar vacantes en un SC, siguiendo una de las secuencias establecidas por el tipo de fractal que se quiera producir. Esta es la forma que se ha utilizado para crear los fractales anteriormente citados.

b) Ordenación Clustering-Fractal.

Consiste en un proceso de *clustering*: a partir de una estructura mínima que se denomina celda unidad fractal, se hace crecer la estructura repitiendo la celda en el espacio, mediante giros y traslaciones, pero ordenándola fractalmente.

Así pues, se tiene dos posibles ordenamientos para llegar a una estructura cuasi-fractal. Entre ellas, existe una gran diferencia, aunque se pueda llegar a la misma geometría. En el caso ordenación fractal, se produce un vaciado de la estructura no cambiando el tamaño total de la misma, mientras que en ordenamiento clustering-fractal, el tamaño crece con la iteración. Por el primer camino, se está limitando el número de iteraciones, ya que el vaciado está determinado por el tamaño de la muestra, mientras que por el segundo procedimiento, no hay límite en el tamaño total de la estructura y por lo tanto en el número de iteraciones. Estos ordenamientos se van a explicar con detalle a continuación. Se van a utilizar como geometrías fractales la Alfombra de Sierpinski y el Triángulo de Sierpinski, ya que son dos casos que llevan a una estructura muy compacta. En ambos casos, se utilizan las características mostradas en la Tabla (2.2) para los dispersores.

Estructura	Ordenación	$r_{cilindro}$ (cm)	Tipo de ordenación	Parámetro de red a(cm)	etapas
Alfombra	Fractal	2	cuadrada	5.5	3
Alfombra	Clustering	2	cuadrada	5.5	3
Triángulo	Fractal	2	triangular	6.35	3
Triángulo	Clustering	2	triangular	6.35	4

Tabla 2.2: Ordenamientos cuasi-fractales.

Alfombra de Sierpinski Se utiliza ahora la alfombra de Sierpinski que se ha explicado en la sección (2.4.1.3.1), pero utilizando dispersores cilíndricos. El

procedimiento de creación es el mismo siendo la única diferencia que el espacio lo van rellenando los dispersores ya comentados.

Ordenación Fractal

La ordenación fractal que se ha diseñado, parte de un SC de 729 cilindros de radio 2 cm, red cuadrada y parámetro de red $a = 5.5$ cm ($s = 0$). El número de dispersores, lo impone el conjunto experimental de las instalaciones donde se han desarrollado las medidas. Se retiran 81 de la parte central para obtener $s = 1$ (Figura (2.23(a))). La figura que resulta está compuesta de 8 cuadrados de 81 cilindros. Si se retiran de cada uno de estos ocho cuadrados su parte central formada por 9 cilindros, se obtiene la iteración $s = 2$. La última iteración que se puede realizar es retirar la parte central formada por 1 cilindro de los 64 cuadrados más pequeños que han quedado, llegando a $s = 3$.

Ordenación Clustering Fractal

En este ordenamiento se parte de un SC de 9 cilindros de radio 2 cm, red cuadrada y paso de red 5.5 cm (Figura (2.23(b))), del cual se elimina el cilindro central generando la celda unidad fractal ($s = 1$). La celda unidad fractal es elemento mínimo²³ que se va a repetir para generar la estructura por ordenamiento cluster-fractal. Esta celda inicialmente puede tener cualquier tamaño. Uniendo 8 celdas unidad por traslación y siguiendo la geometría fractal tenemos el estado $s = 2$. Si ahora esta estructura $s = 2$ se repite de nuevo se llega a $s = 3$. Como se puede observar, se ha realizado un crecimiento cristalino mediante operaciones de traslación únicamente, pero siguiendo un ordenamiento fractal.

Triángulo de Sierpinski

Ordenación Fractal

La ordenación fractal del triángulo de Sierpinski, parte de un SC de 528 cilindros de radio 2 cm, red triangular y paso de red 6.35 cm ($s = 0$). Para obtener $s = 1$ se eliminan 120 cilindros de la parte central creando un vacío de forma triangular. La figura que resulta, Figura (2.24(a)), está compuesta de 3 triángulos de 136 cilindros cada uno. Si ahora de los 3 triángulos que quedan se retiran sus triángulos centrales en grupos de 34, se obtiene $s = 2$. La última iteración que puede ser realizada consiste en retirar los triángulos centrales formados por 6 cilindros, de los 9 triángulos que han quedado. Así se llega a la iteración $s = 3$.

Ordenación Clustering Fractal

En este ordenamiento se parte de un SC de 3 cilindros (clúster inicial) de radio 2 cm, red triangular y paso de red 6.35 cm. A partir de este clúster inicial se unen tres de ellos por traslación y se llega a 10 cilindros ($s = 0$). Se elimina el cilindro central generando la denominada celda unidad fractal ($s = 1$). Uniendo 3 celdas unidad por traslación de forma fractal se tiene $s = 2$. Si esta estructura $s = 2$ se repite de nuevo se llega a $s = 3$. En este caso se puede llegar hasta $s = 4$

²³El número de cilindros para crear la celda unidad fractal es arbitrario

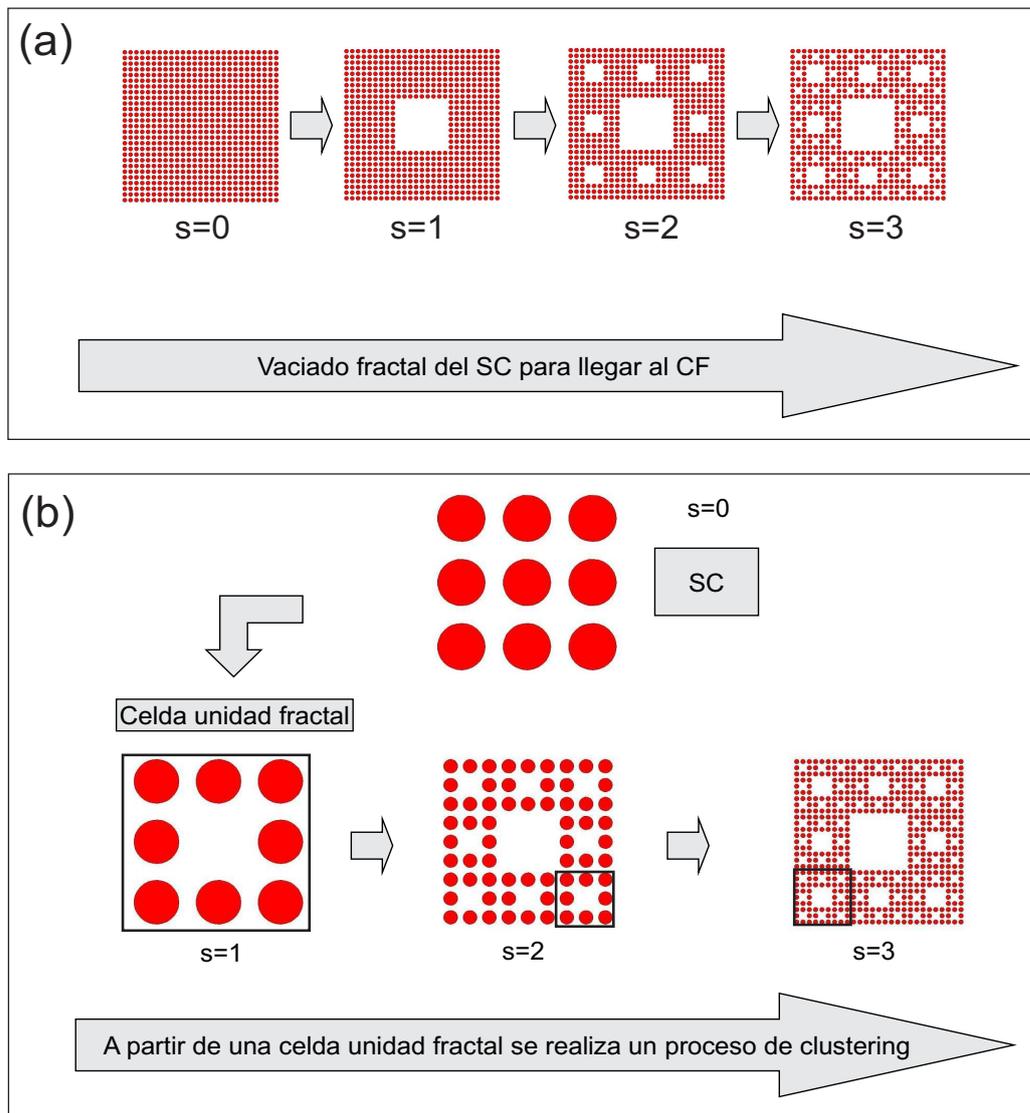


Figura 2.23: Alfombra de Sierpinski: (a) Proceso de Ordenación Fractal; (b) Proceso de Ordenación Clustering Fractal.

por repetición del $s = 3$. Como se puede observar en la Figura (2.24(b)), se ha realizado un crecimiento utilizando traslaciones de la celda unidad pero siguiendo un ordenamiento fractal.

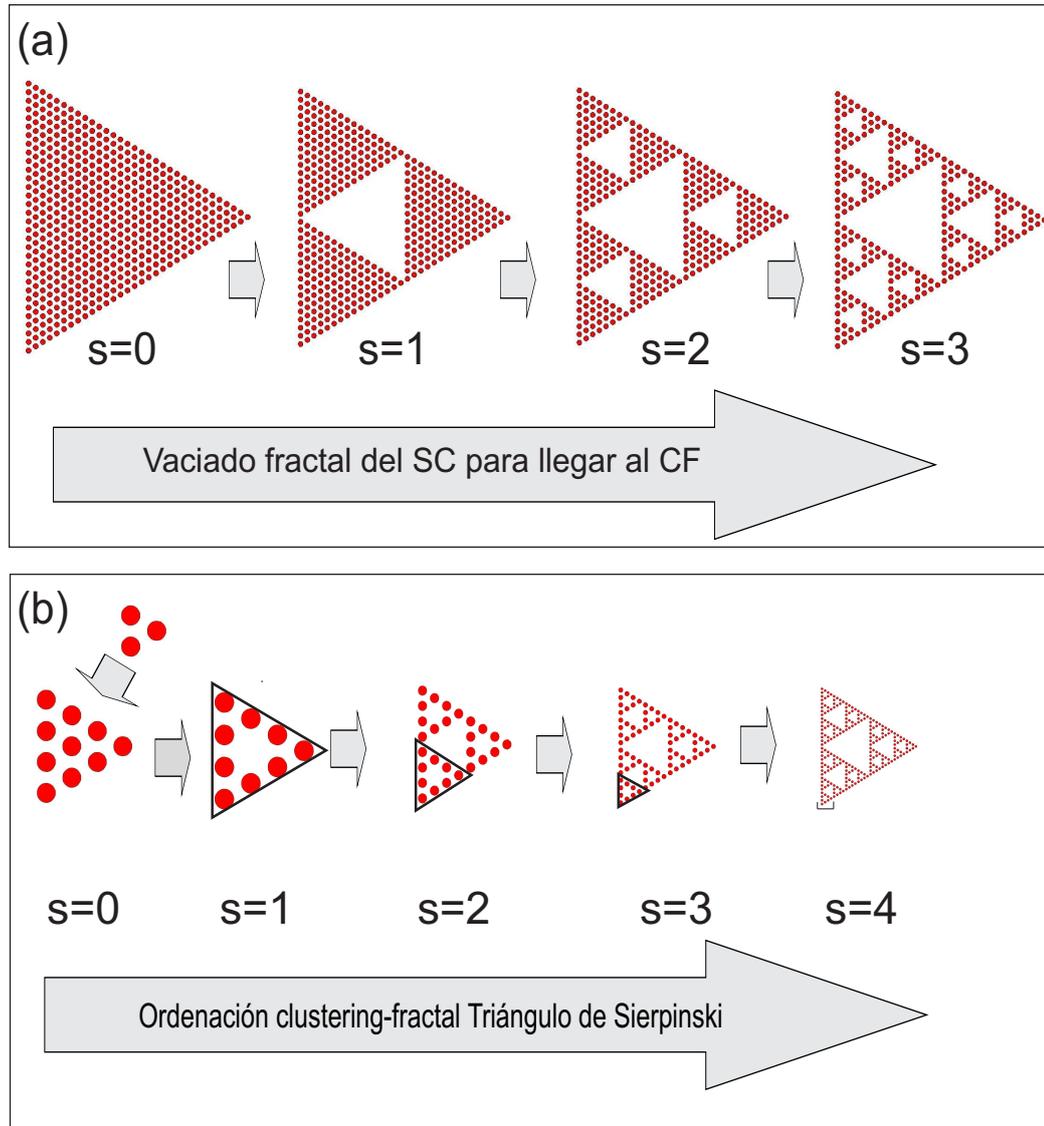


Figura 2.24: Triángulo de Sierpinski: (a)Proceso de Ordenación Fractal; (b) Proceso de Ordenación Clustering Fractal.

2.4.2 Actuación sobre los dispersores. Dispersores multifenómeno

Como ya se ha comentado en la sección (2.3), a finales de la década del siglo pasado, varios autores [52] [4] demostraron que se podían construir pantallas acústicas basadas en cristales de sonido utilizando únicamente el mecanismo de la dispersión múltiple. A este tipo de pantallas se les denomina de **primera generación** (ver Figura (2.25)) [8].

A las pantallas basadas en cristales de sonido, con dispersores que añaden nuevos

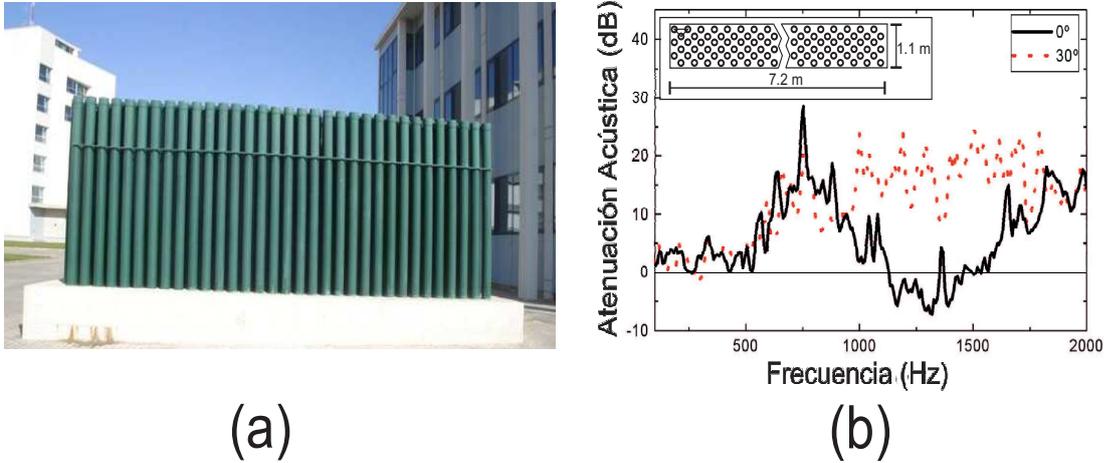


Figura 2.25: (A) Pantalla acústica basada en cristales de sonido de primera generación formada por dispersores cilíndricos dispuesto en red triangular. (B) Espectros de atenuación acústica (IL) correspondientes a dicha pantalla medidos en banda fina y en el rango de bajas frecuencias para las dos direcciones principales ΓX y ΓJ que se corresponden con 0° y 30° respectivamente [11].

mecanismos de control de ruido, se les denomina de **segunda generación** [8].

Varios han sido los diseños propuestos hasta la fecha. Así, Umnova et al [46] propusieron un dispersor cilíndrico multifenómeno formado por un núcleo rígido y rodeado de material absorbente bajo el punto de vista acústico (Figura (2.26(a))). Los mecanismos de control de ruido utilizados, son para este tipo de dispersor, la dispersión múltiple y la absorción. La atenuación debida al fenómeno de la dispersión múltiple se caracteriza por que la posición de la banda de atenuación acústica en el rango de frecuencias puede ser elegida variando los parámetros geométricos de la disposición de los dispersores. En cambio, el fenómeno de la absorción introduce, a partir de 500 Hz, un aumento de la atenuación acústica para todo el rango de frecuencias. Otro diseño de dispersor propuesto consiste en la utilización de materiales rígidos, que presenten propiedades resonantes [53] [54] [47]. En este tipo de dispersores, la posición del pico de resonancia en el rango de frecuencias puede ser elegida variando las propiedades geométricas del resonador. Aquí, los mecanismos de control involucrados son la dispersión múltiple y la resonancia, Figura (2.26(b)). Otro diseño de dispersor que utiliza los mecanismos de control anteriormente comentados, consiste en la utilización de dispersores rígidos en los que aparezcan dos picos de resonancia debidas a fenómenos físicos distintos [6], como se puede ver en la Figura (2.26(c)).

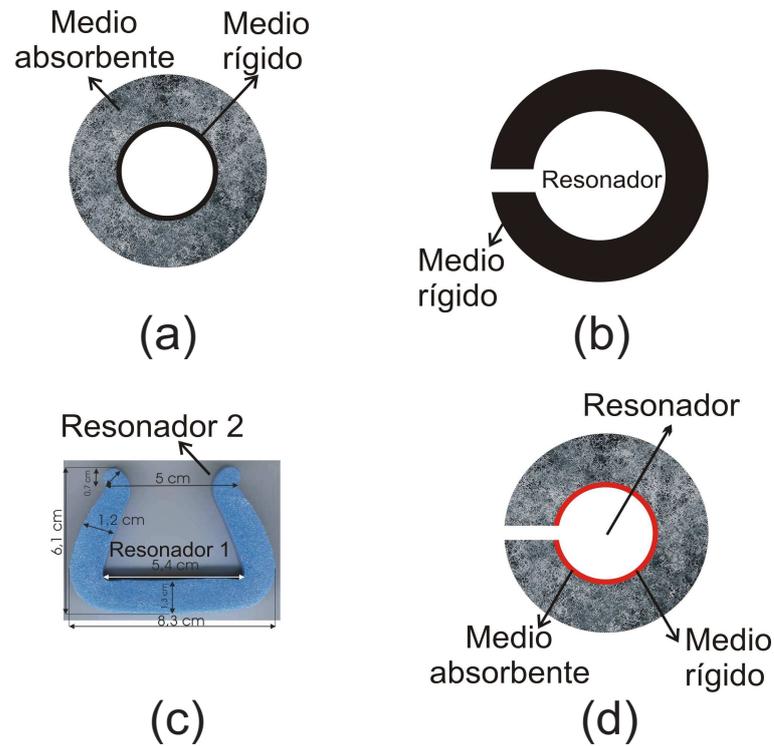


Figura 2.26: Esquema de la sección de los cuatro diseños de dispersores multifenómeno: (a) Dispersor rígido recubierto de absorbente [46] (b) Dispersor rígido y resonador [53] [54] [47] (c) Dispersor que presenta dos frecuencias de resonancia [6] (d) Dispersor multifenómeno: rígido, resonancia y absorbente [9].

En este caso, al igual que el caso anterior, la posición de los picos de resonancia se puede variar dentro de un cierto rango cambiando la geometría del dispersor. Por último, uno de los diseños más avanzado ha sido presentado por Romero-García et al [9] que proponen un dispersor formado por material rígido, absorbente y con comportamiento de resonador, siendo en este caso tres los mecanismos de control de ruido involucrados, Figura (2.26(d)).

La característica más importante de la implementación de pantallas acústicas basadas en cristales de sonido de segunda generación consiste en las amplias posibilidades de diseño que ofrecen para atenuar el ruido en distintos rangos de frecuencia. Efectivamente, la posición de los picos de atenuación debidos a la dispersión múltiple depende de la ordenación de los dispersores y de la distancia entre ellos, la posición de los picos de resonancia depende básicamente de las características de la cavidad resonante y por último los niveles de absorción dependen del volumen de material absorbente utilizado. Además, se ha demostrado que los efectos de control de ruido de los mecanismos implicados no interfieren destructivamente, sino que se

superponen constructivamente aumentando la capacidad global de atenuación del dispositivo en un amplio rango de frecuencias [9].

2.5 Modelos teóricos de análisis de sistemas de dispersores acústicos

El desarrollo de modelos teóricos que explican la interacción de ondas acústicas con diferentes objetos, es uno de los pilares fundamentales del desarrollo de la acústica, pues permite entender tanto la física subyacente en nuevos sistemas y dispositivos, como estudiar sus posibles aplicaciones tecnológicas. En este apartado se desarrollan brevemente los modelos teóricos más utilizados en el estudio de sistemas de dispersores acústicos, aunque como se verá más adelante en este trabajo, se utilizará básicamente FEM.

2.5.1 Método de expansión de ondas planas. Introducción

En 1987 Yablonovitch [55] y John [56] introdujeron la idea de que las ondas sean del tipo que sean siempre se comportan de la misma manera cuando se transmiten en el interior de sistemas periódicos adaptados a sus características. Siguiendo esta idea, las ondas que se transmiten por el interior de un cristal se pueden estudiar utilizando la teoría de bandas desarrollada para ser aplicada a cristales de sonido. Mediante el método de Expansión de ondas planas (PWE)²⁴, se obtiene un problema de valores propios relacionados con el vector de onda y con la frecuencia de la onda incidente, teniendo en cuenta la periodicidad del cristal y el Teorema de Bloch. La ecuación de valores propios se puede obtener tanto para la parte real como para la parte imaginaria del vector de onda. La parte real, solución del problema en $w(\vec{k})$, está relacionada con la propagación de los modos en el interior del cristal o sistema periódico, mientras que la parte imaginaria, solución del problema inverso $k(w)$, está relacionada con el decaimiento del modo al atravesar dicho sistema.

La ecuación de ondas para las ondas de presión que se propagan $p(\vec{r})$, se puede escribir

$$\frac{1}{\rho c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho} \nabla p \right) \quad (2.18)$$

donde c es la velocidad del sonido y ρ la densidad del medio.

La estructura de bandas se obtiene resolviendo la ecuación (2.18) utilizando un método variacional [32] en el que la presión se desarrolla como combinación lineal de ondas localizadas y el problema diferencial se transforma en un problema de matrices. Existen en la literatura, muchos trabajos donde estos métodos han sido

²⁴Plane Wave Expansion (PWE) en inglés

utilizados con éxito, tanto para cristales fotónicos como para cristales de sonido [33] [57] [58] [52] [59].

2.5.1.1 Método de expansión de ondas planas

Un cristal tiene asociados dos espacios, el directo y el recíproco. Una fotografía de la estructura cristalina, mostraría el espacio directo; una fotografía de un patrón de difracción sería una imagen del espacio recíproco. La red en el espacio recíproco es una red en el espacio de Fourier asociado al cristal.

Las variables asociadas al espacio directo serían los vectores de posición \vec{R} , mientras que en el espacio recíproco las variables son las \vec{G} , las longitudes de onda. Ambos espacios están relacionados mediante una transformada de Fourier. Se puede decir que las propiedades físicas en el espacio recíproco son las series de Fourier²⁵ de las propiedades físicas en el espacio directo. Así pues, una propiedad $\alpha(\vec{r})$ se puede expresar como

$$\alpha(\vec{r}) = \sum_{\vec{G}} \beta(\vec{G}) e^{i\vec{G}\vec{r}}, \quad (2.19)$$

donde \vec{G} son los vectores en el espacio recíproco y $\beta(\vec{G})$ son los coeficientes del desarrollo en serie de Fourier de la propiedad α .

Teorema de Bloch

Bloch probó un importante teorema que tiene mucha aplicación en los sistemas periódicos. El teorema se enunció en el contexto de la mecánica cuántica y dice: *Las funciones propias de una ecuación de ondas para un potencial periódico son el producto de una onda plana $e^{i\vec{k}\vec{r}}$ por una función $u_k(\vec{r})$ con la misma periodicidad que la red cristalina.*

Por lo tanto la solución de la ecuación de ondas para un sistema periódico tiene las siguiente forma,

$$\psi_k(\vec{r}) = e^{i\vec{k}\vec{r}} u_k(\vec{r}) \quad (2.20)$$

donde, $u_k(\vec{r})$ presenta la periodicidad de la red y por tanto podrá desarrollarse en series de Fourier (ondas planas), y por tanto,

$$\psi_k(\vec{r}) = e^{i\vec{k}\vec{r}} \sum_{\vec{G}} w_k(\vec{G}) e^{i\vec{G}\vec{r}} \quad (2.21)$$

²⁵La transformada de Fourier es una extensión al continuo de las series de Fourier. Así, algunas expresiones serán utilizadas aquí indistintamente.

PWM para sistemas elásticos periódicos

Simultáneamente Kushwaha et al. [57] y, Economou y Sigalas [33] fueron los primeros en aplicar el PWE para la obtención de la estructura de bandas en sistemas elásticos periódicos. En ambos casos se supone que los dispersores tienen simetría cilíndrica (cilindros de radio r_0) y que son sistemas infinitos. Para este desarrollo se supone que en estos sistemas aparece invarianza traslacional en el eje de simetría de los cilindros, que aquí se definen como eje z .

Si se supone variación armónica temporal, del tipo $e^{i\omega t}$, la ecuación de ondas que se tiene que resolver adquiere la siguiente forma:

$$\nabla\left(\frac{1}{\rho(\vec{r})}\nabla p(\vec{r})\right) + \frac{\omega^2}{B(\vec{r})}p(\vec{r}) = 0, \quad (2.22)$$

donde $p(\vec{r})$ representa la presión acústica, $\rho(\vec{r})$ la densidad en el medio periódico, y $B(\vec{r}) = \rho(\vec{r})c^2(\vec{r})$ es el módulo de compresibilidad.

Aplicando el teorema de Bloch, la solución de la ecuación 2.22 es de la forma:

$$p(\vec{r}) = e^{i\vec{k}\cdot\vec{r}} \sum_{\vec{G}} \Phi_k(\vec{G}) e^{i\vec{G}\cdot\vec{r}} \quad (2.23)$$

donde \vec{G} son los vectores del espacio recíproco de la red cristalina.

Por otra parte, la densidad, $\rho(\vec{r})$, y el módulo de compresibilidad, $B(\vec{r})$, pueden desarrollarse en series de Fourier debido a la periodicidad de la red. Desarrollando las expresiones correspondientes a las inversas de estas variables, simplemente por una razón de facilidad de cálculo posterior. Este desarrollo en series de Fourier es el que se conoce como desarrollo en ondas planas, y es de donde el método recibe su nombre. Así quedan estos desarrollos:

$$\frac{1}{\rho(\vec{r})} = \sum_{\vec{G}} \sigma_k(\vec{G}) e^{i\vec{G}\cdot\vec{r}} \quad (2.24)$$

$$\frac{1}{B(\vec{r})} = \sum_{\vec{G}} \eta_k(\vec{G}) e^{i\vec{G}\cdot\vec{r}} \quad (2.25)$$

2.5.2 Teoría de la dispersión múltiple. Introducción

Cuando las ondas se propagan a través de un medio que contiene un gran número de dispersores, éstas pueden interferir con cada uno de ellos un número infinito de veces produciendo un proceso de dispersión múltiple²⁶. La dispersión múltiple es la responsable de un gran abanico de fenómenos: Desde el resplandor del cielo en

²⁶Multiple scattering, en inglés

el atardecer, hasta el transporte de electrones en sólidos impuros. Un fenómeno interesante ocurre cuando los dispersores están colocados de forma periódica. En este caso, la dispersión múltiple produce los denominados Band Gaps o bandas de frecuencia de propagación prohibida. En ciertas situaciones los Band Gaps aparecen en la misma banda de frecuencias para todas las direcciones de incidencia de la onda sobre el cristal, denominándose bandas de atenuación completa, tal y como se ha comentado en la sección (2.3.1.2). El desarrollo de la teoría de la dispersión múltiple en el caso acústico, empezó a desarrollarse a finales del siglo XX, poco después de que algunos autores observaran Band Gaps en una escultura formada por elementos periódicos rodeados de aire, y verificaran estos resultado en condiciones controladas [4]. En esta sección se presenta la teoría de la dispersión múltiple 2D de forma general, mostrando las fórmulas matemáticas clave y los razonamientos físicos que permiten definir las condiciones de contorno. Mas información acerca de esta teoría se puede encontrar en las referencias [60] [61] [62].

2.5.2.1 Teoría de la dispersión múltiple

Cuando una onda incide sobre un SC, es dispersada en su interior por los dispersores que lo forman un número indefinido de veces. La Teoría de la dispersión múltiple (MST)[61] [62] proporciona el valor del campo de presión acústica en cualquier punto, teniendo en cuenta que el campo que incide sobre cada dispersor está formado por el que crean los demás dispersores y por el de la onda incidente. Por ello se dice que es una teoría autoconsistente. La MST presenta todos los órdenes de dispersión mediante una matriz de dispersión. En este trabajo, como ya se ha comentado anteriormente, se utilizan conjuntos de dispersores cilíndricos aislados. Así pues, se presenta aquí una versión de la MST que únicamente es válida para estructuras con simetría cilíndrica, por su sencillez. En términos matemáticos esto queda reflejado en que la onda incidente sería representada mediante una expansión en serie de funciones de Bessel de primera especie, mientras que la onda dispersada sería representada mediante otra serie de funciones de Hankel de primera especie. Los coeficientes de estos desarrollos en serie, que serían las incógnitas del problema, vendrían determinados por las condiciones de contorno para cilindros rígidos, que se considerarán posteriormente. Si se tiene en cuenta la variación temporal de una onda plana²⁷ que incide sobre el SC ($e^{-i\omega t}$), su expresión desde el sistema de referencia del cilindro l sería

$$P_0 = \sum_{q=-\infty}^{\infty} S_{lq} J_q(kr_l) e^{iq\theta_l} \quad (2.26)$$

²⁷En general y salvo que se indique lo contrario, en este trabajo la onda que incide sobre la muestra es plana y lo hace a 0°

donde se define

$$S_{lq} = \sum_{p=-\infty}^{\infty} A_s^0 e^{i(s-q)\theta_l} J_{s-q}(kr_l) \quad (2.27)$$

$$r_j = \sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2} \quad (2.28)$$

$$\theta_j = \arcsin\left[\frac{(y - y_j)}{r_j}\right] \quad (2.29)$$

k representa el número de ondas la onda incidente y r la distancia al punto donde se desea calcular la presión, ver Figura (2.27).

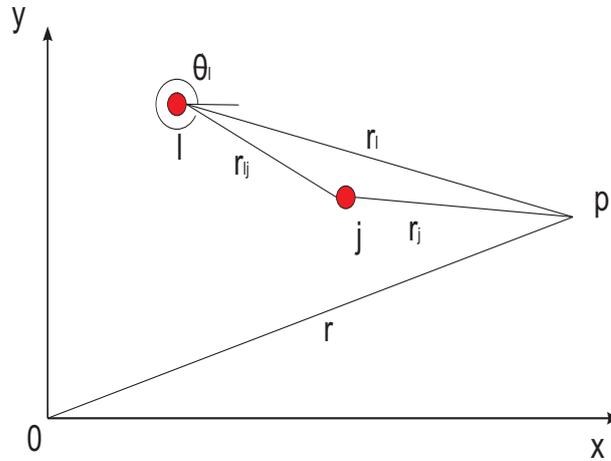


Figura 2.27: Disposición espacial de dos dispersores cualesquiera [60].

Los A_s^0 son los coeficientes que determinan el tipo de onda incidente que se quiere representar, para este trabajo en el que se consideran ondas planas, estos coeficientes valen $A_s^0 = i^s$.

Considerando las mismas hipótesis sobre la variación temporal, la onda dispersada por el cilindro j se puede expresar mediante,

$$PP_{lj} = \sum_{q=-\infty}^{\infty} C_{ljq} J_q(kr_l) e^{iq\theta_l} \quad (2.30)$$

donde se define

$$C_{ljq} = \sum_{s=-\infty}^{\infty} A_{js} e^{i(s-q)\theta_l} H_{q-s}(kr_{lj}) \quad (2.31)$$

Sea la presión incidente sobre este cilindro $i \neq j$:

$$P_l = \sum_{q=-\infty}^{\infty} B_{lq} J_q(kr_l) e^{iq\theta_l} \quad (2.32)$$

La onda incidente sobre este cilindro está formada por la incidente y por la dispersada por los demás cilindros, por tanto (2.32) se puede expresar como

$$P_l = P_0 \sum_{j=1, j \neq l}^N P P_j \quad (2.33)$$

Sustituyendo (2.32), (2.26) y (2.30) en (2.33) se obtiene que los coeficientes cumplen la siguiente relación:

$$B_{lq} = S_{lq} + \sum_{j=1}^N \sum_{s=-\infty}^{\infty} A_{js} \alpha_{ljq_s} \quad (2.34)$$

donde se ha definido al tensor como

$$\alpha_{ljq_s} = (1 - \delta_{lj}) e^{i(s-q)\theta_{lj}} H_{q-s}(kr_l j) \quad (2.35)$$

A continuación, para obtener el valor de los coeficientes de los desarrollos en serie se debe introducir la condición de contorno para cilindros rígidos:

$$\frac{\partial}{\partial r_l} [P_l + P P_l]_{r_l = \alpha_l} = 0 \quad (2.36)$$

Es decir, desde el punto de vista físico, se ha considerado que la velocidad de las partículas en el contorno del cilindro es proporcional a la derivada de la presión en la dirección normal a la superficie. Así pues, la ecuación (2.36) significa que, si se considera la pared del cilindro totalmente rígida, se considera nula la velocidad de las partículas en la superficie del mismo. Aplicando esta condición sobre el cilindro l se obtiene una relación entre los coeficientes del desarrollo en serie de funciones de Bessel:

$$A_{lq} = \frac{J_{q+1}(k\alpha_l) - J_{q-1}(k\alpha_l)}{H_{q+1}(k\alpha_l) - H_{q-1}(k\alpha_l)} B_{lq} = t_{lq} B_{lq} \quad (2.37)$$

que de forma matricial se puede expresar:

$$A_l = T_l B_l \quad (2.38)$$

$$T_{lqq'} = \frac{J_{q+1}(k\alpha_l) - J_{q-1}(k\alpha_l)}{H_{q+1}(k\alpha_l) - H_{q-1}(k\alpha_l)} \delta_{qq'} \quad (2.39)$$

donde T se define como la matriz de dispersión²⁸. La matriz de dispersión depende únicamente de la posición de los cilindros, de sus radios y de la frecuencia de la

²⁸matriz de scattering

onda incidente. Sustituyendo la ecuación (2.37) en (2.34) y haciendo las operaciones oportunas, se puede obtener la relación entre los coeficientes,

$$A_{lq} - \sum_{j=1}^N \sum_{s=-\infty}^{\infty} t_{jq} A_{js} \alpha_{l_{jq}s} = t_{lq} S_{lq} \quad (2.40)$$

Con (2.40) se puede obtener el valor de los coeficientes del desarrollo en serie de funciones de Bessel que representan a la onda dispersada, y por tanto se puede conocer la presión en un punto del espacio debido al orden n de dispersión de las ondas acústicas en el interior de una estructura formada por dispersores rígidos. Esta presión es:

$$P(x, y) = P_0 + \sum_{l=1}^N P P_l = P_0 + \sum_{j=1}^N \sum_{s=-\infty}^{\infty} A_{lq} H_{lq}(kr_l) e^{iq\theta_l} \quad (2.41)$$

Desde el punto de vista numérico, para el cálculo del valor de la presión es una buena aproximación considerar únicamente la suma de los cinco primeros términos de la serie, ya que la contribución de los términos de orden superior a cinco es prácticamente despreciable frente a la contribución de los términos anteriores [63]. Además, este método es tanto aplicable a estructuras formadas por cilindros rígidos situados periódicamente, como para estructuras de cilindros rígidos situados aleatoriamente. El tiempo de cálculo de la presión acústica en un punto del espacio y para una frecuencia determinada depende, una vez fijado el orden de aproximación en la series de la ecuación (2.41), del número de dispersores que conforman la estructura.

Para el cálculo de los espectros acústicos se debe tener en cuenta que en esta teoría se supone una onda incidente plana de amplitud unidad. Desde el punto vista experimental es muy complicado obtener una onda plana unitaria. Así pues, para poder comparar los resultados teóricos con los experimentales, se debe hacer una pequeña manipulación en la expresión de la atenuación acústica, de forma que

$$L_{teorico} = 20 \log \frac{\alpha}{P(x, y)} \quad (2.42)$$

sería la atenuación acústica teórica, donde α es un parámetro ajustable que tiene en cuenta que la onda incidente experimental no es unitaria.

2.5.3 Método de los elementos finitos. Introducción

Actualmente existe un gran número de técnicas matemáticas para resolver problemas que tengan en cuenta la interacción de las ondas con conjuntos de dispersores acústicos aislados. En este trabajo se ha utilizado el Método de los Elementos Finitos (FEM)²⁹, en concreto el programa comercial Comsol Multiphysics 3.5a, que

²⁹Finit Elements Method, en inglés

implementa este método, para analizar el comportamiento de las ondas acústicas al interaccionar con sistemas de dispersores aislado inmersos en aire. Este método resuelve, de manera sencilla, formas geométricas complejas que incorporan múltiples fenómenos acústicos.

Para resolver el problema es necesario definir la geometría que se está considerando, implementar las condiciones de contorno y discretizar el dominio de resolución.

2.5.3.1 Método de los elementos finitos

2.5.3.1.1 Ecuación de ondas La ecuación de ondas, ecuación en derivadas parciales (PDE), viene dada por la expresión [64]:

$$\frac{1}{\rho_0 c_s^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \nabla \left(\frac{1}{\rho_0} (\nabla p - \vec{q}) \right) = \vec{Q} \quad (2.43)$$

donde ρ_0 es la densidad del medio ($\frac{kg}{m^3}$), c_s es la velocidad del sonido ($\frac{m}{s}$), \vec{q} es la fuente dipolar ($\frac{N}{m^3}$) y \vec{Q} es la fuente monopolar ($\frac{1}{s^2}$).

En este trabajo se realiza un análisis armónico temporal (**Time-harmonic analysis**) para poder obtener espectros en frecuencia y mapas de presión acústica, estos últimos para una frecuencia dada. Con este tipo de análisis, la ecuación (2.43) queda de la siguiente manera:

$$\nabla \left(-\frac{1}{\rho_0} (\nabla p - \vec{q}) \right) - \frac{w^2}{\rho_0 c_s^2} p = \vec{Q} \quad (2.44)$$

con la presión dependiendo ahora de la posición y la frecuencia:

$$p = p(\vec{x}, w) \quad (2.45)$$

donde w es la frecuencia angular ($\frac{rad}{s}$) y f es la frecuencia lineal (Hz), cuya relación es:

$$w = 2\pi f \quad (2.46)$$

Para el caso 2D, y considerando que la onda incidente es plana, tal y como se ha comentado anteriormente, la ecuación (2.45) adopta la forma:

$$p(\vec{r}) = p(x, y) e^{-ik_z z} \quad (2.47)$$

siendo k_z el número de onda fuera del plano (out-of-plane wave number), que por defecto es nulo. Como en este caso no existen ni monopolos ni dipolos, también serán nulos \vec{q} y \vec{Q} , con lo que la ecuación de ondas para el análisis armónico temporal queda simplificada como sigue:

$$\nabla\left(-\frac{1}{\rho_0}(\nabla p)\right) - \frac{w^2}{\rho_0 c_s^2} p = 0 \quad (2.48)$$

2.5.3.1.2 Condiciones de contorno Se muestran a continuación, las condiciones de contorno para el modelo de Ecuaciones en Derivadas Parciales dado por la expresión (2.48), que se utilizan en este trabajo:

a) Contorno rígido (muro)

La condición contorno rígido³⁰ es una condición de contorno de tipo Neumann, lo que implica que la derivada parcial de la presión en la superficie es nula (2.49). Esto quiere decir que, la amplitud de la presión en la superficie será máxima o mínima.

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0 \quad (2.49)$$

b) Contorno blando

La condición contorno blando³¹ es una condición de contorno de tipo Dirichlet, lo que implica que la amplitud de la presión en la superficie es nula (2.50). Es una aproximación apropiada para una interfase líquido-gas.

$$p = 0 \quad (2.50)$$

c) Fuente de presión

Esta condición³², significa que se especifica la presión acústica en el contorno:

$$p = p_0 \quad (2.51)$$

Para el análisis armónico temporal, p_0 es la amplitud de la presión de origen.

d) Impedancia

La condición de contorno impedancia³³ es la generalización de (2.49) y (2.50). $Z \left(\frac{Pas}{m}\right)$ es la impedancia de entrada acústica al dominio externo. Desde un punto de vista físico, la impedancia de entrada acústica es la relación entre la presión acústica y la velocidad normal de las partículas. La condición límite de impedancia es una buena aproximación para una superficie que localmente

³⁰Sound-Hard Boundary (Wall), en inglés

³¹Sound-Soft Boundary, en inglés

³²Pressure Source, en inglés

³³Impedance Boundary Condition, en inglés

puede reaccionar, es decir, una superficie en la que la velocidad normal en cualquier punto depende sólo de la presión en ese punto. Se puede utilizar por ejemplo, para que no haya cambio de medio en las superficies frontera, definiendo esa superficie con la misma impedancia del medio del cual proviene la onda. Con esto se consigue transmisión total ya que estaría adaptado el cambio de medio, evitando así las posibles reflexiones.

Para el estudio en frecuencia, esta condición queda:

$$\nabla\left(\frac{1}{\rho_0}(\nabla p - \vec{q})\right) + \frac{i\omega p}{Z} = 0 \quad (2.52)$$

e) Radiación

La condición de contorno radiación ³⁴ permite a la onda salir del dominio de modelado, con reflejos mínimos o nulos, es decir, el campo dispersado consiste sólo en ondas salientes. Esta condición es también llamada condición de Sommerfeld. Se puede aplicar para ondas planas, cilíndricas y esféricas.

Para incluir una onda plana en el contorno, existen dos posibilidades:

- Utilizar $p_0 = 0$, valor por defecto pero que se puede cambiar. Este valor es el que se impone en el contorno y en la dirección dada por un vector unitario normal a la superficie \vec{n}_x .
- Utilizar $p_0 = p_i$, donde la presión en la superficie toma el valor que se haya definido en la opción **Physics/Scalars Variables** del menú de Comsol.

La ecuación correspondiente a esta condición de contorno, viene dada por la expresión (2.53),

$$\vec{n}\left(\frac{1}{\rho_0}(\nabla p - \vec{q})\right) + \frac{ikp}{\rho_0} + \frac{i}{2k}\Delta_T p = \left(\frac{i}{2k}\Delta_T p_0 e^{-i(\vec{k}\vec{r})} + (ik - i(\vec{k}\vec{n}))\frac{p_0 e^{-i(\vec{k}\vec{r})}}{\rho_0}\right) \quad (2.53)$$

2.5.3.1.3 Condiciones de contorno coincidentes o adaptadas: PMLs En el módulo acústico estudiado se pueden incluir subdominios auxiliares en la geometría, que sirven como capas perfectamente adaptadas (Perfectly Matched Layers, en inglés). En situaciones donde no se puede describir de forma simple la radiación saliente de una onda con un número de onda conocido y dirección de propagación, las capas perfectamente adaptadas (PML) ofrecen una alternativa de gran alcance: mientras que una PML cumple la misma función, no es una condición de contorno, pero si un dominio adicional que absorbe la radiación incidente sin producir reflexiones. PML proporciona un buen rendimiento para una amplia gama de ángulos

³⁴Radiation Boundary Condition, en inglés

de incidencia siendo poco sensibles a la forma de los frentes de onda. PML pues, es capaz de emular a los límites evitando reflexiones.

2.5.3.1.4 Módulo acústico En este trabajo se van a utilizar dos módulos:

- a) Módulo Presión Acústica (PA)³⁵, donde la ecuación de ondas (2.43) resuelve la presión total.
- b) Módulo Onda Dispersada (SW)³⁶, donde la ecuación de ondas (2.43) resuelve la presión dispersada. Esto es posible ya que la onda incidente p_0 es en sí misma una solución de la ecuación de onda. Por lo tanto, el campo acústico total se obtiene mediante la suma de la onda incidente con la onda dispersada, es decir:

$$p_{total} = p_{incidente} + p_{dispersada} \quad (2.54)$$

A continuación, se expone un ejemplo para contrastar ambos módulos. Este consiste en valorar el espectro de presiones cerca del borde superior de una barrera clásica y representar el mapa de presión para 1000 Hz. Ambos módulos producen resultados similares, en general, tal y como se puede ver en la Figura (2.28).

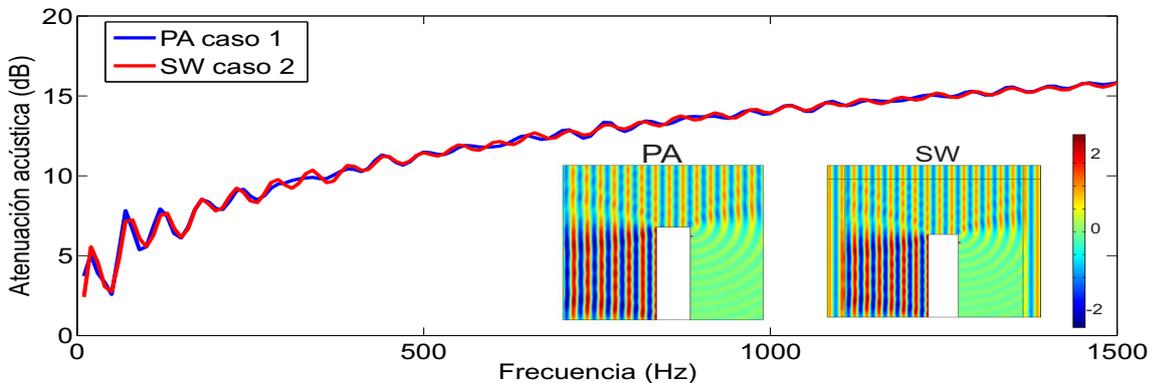


Figura 2.28: Espectros y mapas de presión ($\text{real}(p)$) a 1000 Hz obtenidos con: PA y SW. Condiciones de contorno (Radiation Boundary Condition) $p_0 = p_i$ excepto en el suelo de la zona de sombra donde: para PA se utiliza (Radiation Boundary Condition) $p_0 = 0$ y para SW se utiliza condición de impedancia (Impedance Boundary Condition).

Para el modelo PA es posible imponer en el suelo de la derecha de la barrera, condición de radiación $p_0 = 0$, pero esta opción no está disponible en el modelo

³⁵De las opciones de Comsol 3.5a corresponde a Pressure Acoustics (Time Harmonic Analysis)

³⁶De las opciones de Comsol 3.5a corresponde a Pressure Acoustics (Time Harmonic Analysis, Scattered Wave)

SW. Por ello se compara PA (caso 1) con SW (caso 2): así, para el modelo PA se impone condición de radiación $p_0 = p_i$ en todos los contornos exteriores, excepto en el suelo de la derecha de la barrera que se impone condición de radiación $p_0 = 0$ y para el modelo SW se impone condición de radiación $p_0 = p_i$ en todos los contornos exteriores, excepto en el suelo de la derecha que se impone condición de impedancia. Los resultados que se muestran en la figura (2.28) justifican que estas dos simulaciones son prácticamente equivalentes.

Normalmente, a la hora de evaluar el tiempo de cálculo de un análisis numérico, se ha comprobado que el módulo SW es más rápido, ya que resuelve la ecuación de ondas con la onda dispersada únicamente. Pero se ha comprobado que en el caso de trabajar con materiales absorbentes, el módulo SW no trabaja bien. Por este motivo, en este trabajo se va a utilizar el módulo SW mientras no implique material absorbente. Cuando sea preciso utilizar material absorbente, se utilizará el módulo PA.

Capítulo 3

Sistemas de medida, instrumental y muestras

3.1 Introducción

Uno de los pilares fundamentales del desarrollo de la acústica, es la obtención de modelos teóricos que expliquen la interacción de ondas acústicas con diferentes objetos, pues permite entender tanto la física subyacente en nuevos sistemas y dispositivos, como estudiar sus posibles aplicaciones tecnológicas. Estos modelos, tienen que ser contrastados con otro tipo de resultados como pueden ser las simulaciones numéricas o la experimentación. De esta forma, se puede comprobar la validez de los modelos teóricos, pudiendo ser aplicados como posibles soluciones de problemas reales.

En este sentido, la obtención de resultados experimentales, tanto en campo libre como en condiciones controladas, constituye una fuente potente de validación de modelos teóricos. No obstante, el creciente interés del estudio de las ondas acústicas ha provocado la necesidad de obtener medidas experimentales en condiciones complicadas, en especial, la obtención de resultados experimentales en acústica medioambiental, constituye uno de los hándicaps a los que se enfrenta actualmente el desarrollo de esta parte de la Ciencia.

En este capítulo, se hace una breve descripción del sistema experimental de medida utilizado en este trabajo. La mayoría de las medidas experimentales, se han realizado en condiciones controladas en una cámara anecoica perteneciente al Centro de Tecnologías Físicas de Universitat Politècnica de València. Se presentan, en primer lugar las principales características de dicha cámara, aunque puede consultarse un estudio más detallado en las referencias [35][65]. A continuación, se presenta el sistema de adquisición y tratamiento de datos experimentales para su aplicación en el campo de la acústica ambiental. Está formado por un sistema robotizado, tridimensional, de posicionamiento del micrófono y de movimiento de la muestra

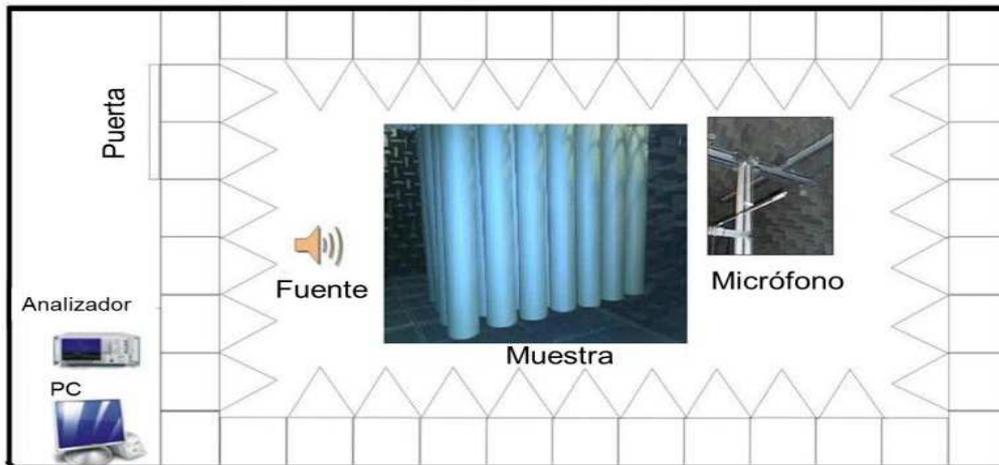


Figura 3.1: Sistema experimental de medida. Esquema de la cámara y de la disposición de los elementos para llevar a cabo las medidas.

(3DReAMS)¹. Los resultados experimentales así obtenidos, permiten validar y refutar predicciones teóricas con una gran precisión.

3.2 Cámara anecoica

Una cámara anecoica, es una cámara de medidas acústicas donde se pretende que el campo creado en su interior sea lo más parecido al campo acústico libre, evitando asimismo, las posibles interferencias sonoras provenientes del exterior que podrían distorsionar los resultados. Es pues, una habitación diseñada para poder reproducir las condiciones de un campo libre, pudiendo por tanto, efectuar en su interior medidas experimentales en condiciones controladas [35]. El tamaño de los objetos y el rango de frecuencias que se pueden analizar dependen de las dimensiones de la cámara. En este trabajo, la cámara que se utiliza tiene unas dimensiones de $8 \times 6 \times 3 m^3$, estando comprendida la longitud de los dispersores cilíndricos utilizados, entre 10 y 20 veces la periodicidad del sistema a analizar. Con estas longitudes, se consigue evitar las posibles reflexiones que contaminen las medidas. Además, se ha comprobado que el nivel sonoro decae 6 dB, cada vez que se duplica la distancia entre la fuente y el receptor (Ley de la inversa de la distancia) y que la fase aumenta linealmente con la distancia. El rango de frecuencias que se ha utilizado en este trabajo va de 48 Hz a 6500 Hz. Los resultados de la calibración y sus principales características pueden ser consultados en las referencias [35] [65].

¹3 Dimensional Robotised e-Acoustic Measurement System

En la Figura (3.1), se muestra un esquema de la cámara y la disposición de los distintos elementos utilizados para llevar a cabo las medidas. La muestra a analizar se sitúa entre la fuente y el micrófono. Se dispone de un sistema robotizado, tridimensional, de posicionamiento del micrófono y de movimiento de la muestra (3 DReAMS). Este sistema robotizado está sincronizado con el sistema de adquisición de datos. El micrófono está conectado a un analizador donde se registra la señal temporal. Este analizador está conectado a un ordenador (PC), donde se realiza, en este trabajo, la Transformada Rápida de Fourier (FFT). Esta FFT se representa por pantalla.

En los apartados siguientes, se desarrolla cada una de las partes comentadas.

3.3 Sistema de adquisición de datos: 3DReAMS

La motivación para desarrollar un sistema automatizado de adquisición y tratamiento de datos viene dada por la necesidad de obtener medidas espaciales precisas, que permitan entender mejor el comportamiento de distintos dispositivos acústicos, susceptibles de ser utilizados en aplicaciones tecnológicas. El Sistema Robotizado Tridimensional de Medidas Acústicas (3DReAMS), es un sistema de adquisición de datos acústicos desarrollado por este grupo de investigación ².

3DReams [60], se puede considerar integrado por dos partes. Por un lado, el robot y el sistema de control de su movimiento, y por otro, el sistema de adquisición de datos. Cada una de estas partes se desarrollan a continuación.

3.3.1 Robot y control de movimiento

3DReAMS es un robot cartesiano, con tres ejes (X,Y,Z), que posee un brazo móvil vertical que recorre, según las necesidades de posicionamiento del micrófono, una guías o carriles fijos adosados al techo de la cámara anecoica. El robot consta fundamentalmente de dos partes: el sistema de sujeción de las muestras y el sistema tridimensional de posicionamiento de un conjunto de micrófonos (hasta cuatro, todos ellos obligados a recorrer la misma trayectoria).

3.3.1.1 Sistema de sujeción de la muestra

El sistema de sujeción de muestras consiste en una columna rotatoria, instalada en el techo de la cámara anecoica, en la que se ensambla un bastidor del que se suspenden las muestras a estudio. Este bastidor admite colocar tanto muestras constituidas por una única pieza (p.e. prototipos de pantallas tradicionales), como otras constituidas por varias piezas, como por ejemplo, los cristales de sonido. Existen dos tipos

²Sonic Crystal Technologies, grupo perteneciente a la Universitat Politècnica de València (UPV)

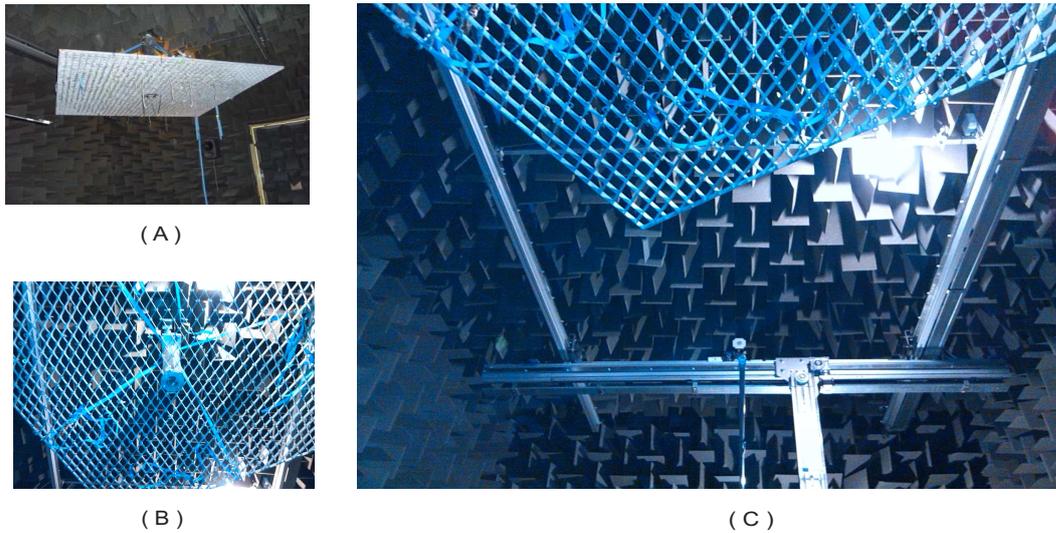


Figura 3.2: Sistema experimental de medida. (A) Bastidor (B) Rótula (C) Brazo robotizado, sistema de posicionamiento y micrófono.

diferentes de bastidores, uno con simetría cuadrada y otro con simetría triangular y ambos permiten montar SC con distintos parámetros de red (variable fundamental en el diseño y construcción de los SC [32] y que indica la distancia entre dispersores). Este hecho hace que se puedan montar SC con distinta simetría y distinto factor de llenado.

Estos bastidores tienen un espesor de 5 cm y una superficie de $2 \times 2 \text{ m}^2$ y permiten colgar muestras de hasta 1000 kg. El mínimo parámetro de red del que dispone el bastidor con simetría cuadrada es de 5.5 cm, siendo para el caso del bastidor con simetría triangular de 6.35 cm. Por tanto, las muestras a analizar, podrán tener un parámetro de red múltiplo de estos valores. La rotación del bastidor, con una precisión de 1.8° , permite analizar el comportamiento acústico de la muestra para distintos ángulos de incidencia del sonido.

La Figura (3.2), muestra uno de los bastidores utilizados en las medidas y un detalle de la rótula giratoria.

3.3.1.2 Sistema de posicionamiento

El esquema del mecanismo de control del robot es el siguiente: cada uno de los ejes del robot está conectado a un motor que tiene asociado un controlador ³, el cual limita la corriente suministrada a la bobina del motor indicándole el sentido en el que debe moverse el eje. Los controladores a su vez se encuentran conectados a una placa base encargada de controlar los desplazamientos del robot. Este hardware

³Driver en inglés

de National Instruments (NI-PCI 7334), es capaz de controlar de forma coordinada cuatro ejes de movimiento (tres para la traslación del sistema de posicionamiento y uno para la rotación del sistema de colocación de muestras). En la Figura (3.3) se puede observar un esquema del control del robot.

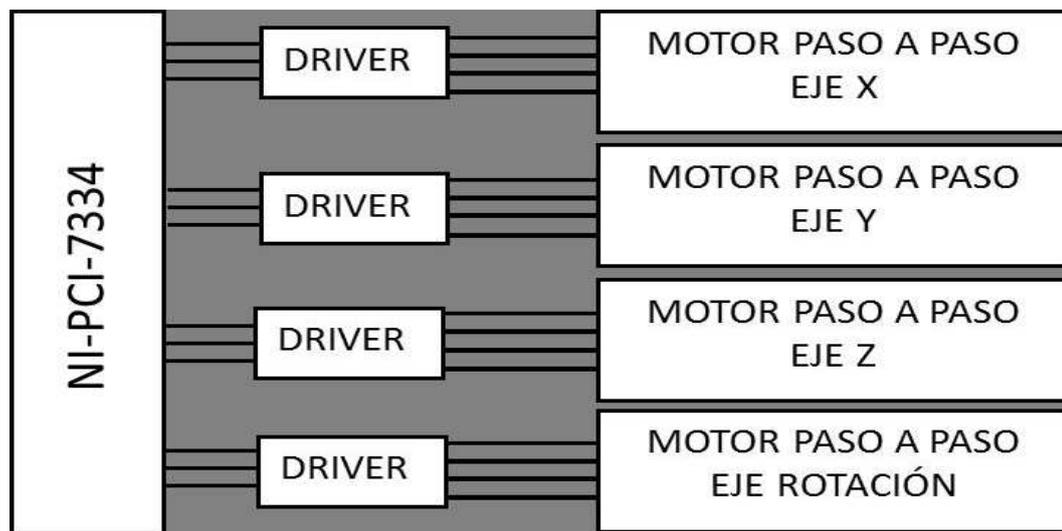


Figura 3.3: Esquema del control del Robot.

Una vez configurada la placa que controla el movimiento (NI-PCI 7334), el robot 3DReAMS es capaz de realizar las siguientes funciones: mover cada uno de los ejes de forma independiente o varios de manera simultánea, controlar la trayectoria desde una posición inicial hasta la posición que se determine (salvándola en el controlador), detener el robot al detectar el final de la cámara anecoica en cualquiera de las tres direcciones, gracias a unos sensores que indican el final de carrera, y situar el robot en una posición que determinemos como posición de referencia. Esta funcionalidad, posibilita el barrido de trayectorias de medida 3D, dentro de la cámara anecoica. La interface que ofrece el ordenador, se puede observar en la Figura (3.5).

Con todo lo indicado anteriormente, el proceso de funcionamiento del robot es el siguiente: al encender 3DReAMS, el robot se encuentra en la posición que va a tomar de referencia y que el controlador graba como el cero absoluto de la cámara anecoica. A partir de aquí, se le puede indicar un nuevo punto, o una matriz de puntos en los que se desea que el robot se vaya situando, eligiendo el controlador correspondiente la dirección del movimiento para hacer ese barrido de puntos y los parámetros necesarios (cantidad de pulsos y frecuencia a enviar al motor), de acuerdo con la velocidad y aceleración programada previamente. La precisión de movimiento del robot es de 1 cm. De igual forma, si lo que se quiere es que la columna donde se sitúan las muestras realice alguna rotación, también se le debe indicar al inicio de

todo el proceso. La posibilidad de barridos que ofrece este sistema se puede observar en la Figura (3.4). Se puede apreciar que el sistema ofrece información del punto de medida, así como el tiempo restante para acabar el experimento programado.

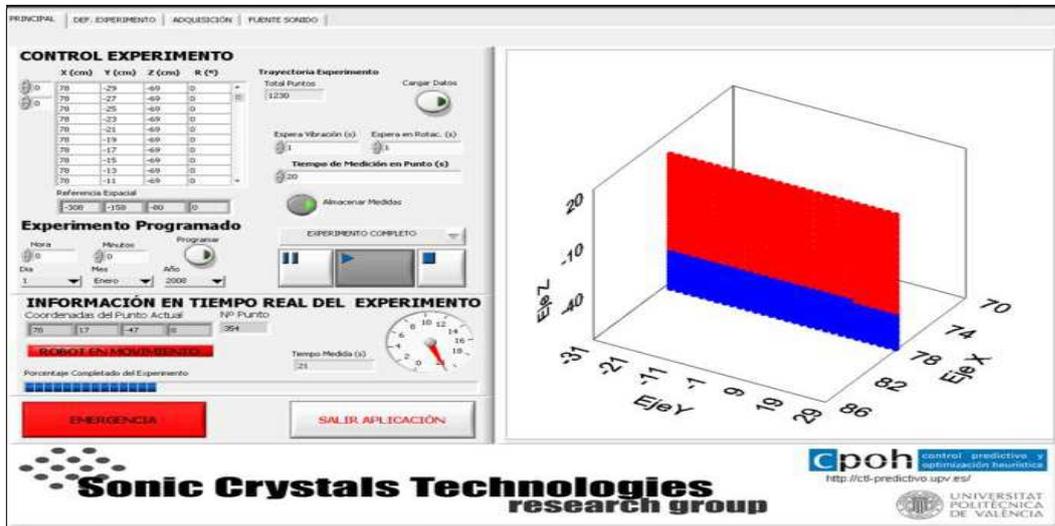


Figura 3.4: Vista de la pantalla para controlar el número de puntos del experimento.

3.3.2 Sistema de adquisición de datos

Para la adquisición de datos, se ha utilizado la tarjeta PCI-4474 de National Instruments. Esta tarjeta, permite la adquisición dinámica de datos por 4 canales simultáneamente. Está diseñada para el análisis, tanto de señales de ruido aéreo como de vibración, consiguiendo poca distorsión y bajo ruido de fondo. En la actualidad, 3DReAMS no está totalmente desarrollado, y solamente están operativos dos de los canales de la tarjeta. Aun así, la versatilidad y precisión conseguida en la toma de datos de presión acústica obtenidos con un solo micrófono, permite la obtención de resultados experimentales significativos en condiciones complicadas [66].

Las tarjetas de National Instruments, PCI-4474 y PCI-7334, se utilizan de manera conjunta con dos paquetes de LabVIEW⁴ para la adquisición de datos y control del movimiento del robot, respectivamente. Cuando el micrófono se encuentra en la posición de medida, los motores que mueven los ejes del robot se apagan para

⁴Plataforma y entorno de desarrollo para diseñar sistemas, con un lenguaje de programación visual gráfico. Este programa fue creado por National Instruments (1976) y está recomendado para sistemas hardware y software de pruebas, control y diseño, simulado o real y embebido, pues acelera la productividad. El lenguaje que usa se llama lenguaje G (lenguaje Gráfico).

prevenir posibles distorsiones y acoplamiento con las medidas acústicas. A continuación, la fuente sonora y los micrófonos se activan, adquiriendo este último la señal temporal. El análisis de esta señal grabada, se realiza mediante un analizador FFT que permite obtener espectros, respuesta en frecuencia y niveles sonoros. El tiempo que transcurre entre que comienza a emitir la fuente y empieza la toma de medidas, viene indicado por el usuario, variando en función de las características del ensayo.

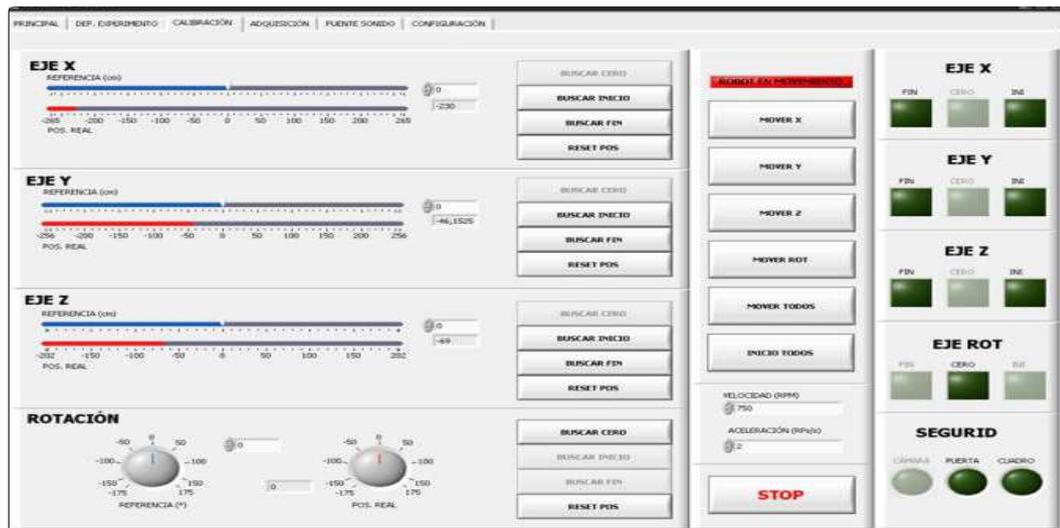


Figura 3.5: Vista de la pantalla para controlar el movimiento del robot y el sistema de sujeción de las muestras.

Un aspecto importante de este sistema es que está diseñado para que una vez situada la muestra a analizar, se pueda activar su puesta en marcha y posterior recogida de datos de forma remota, permitiendo realizar medidas de larga duración con mayor agilidad, así como continuar con la recogida de datos mientras se sitúan nuevas muestras a ensayar. Esto permite colaboraciones y ejecución de experimentos a distancia. Así pues, es posible realizar experimentos completos sin necesidad de que haya personal en la cámara, excepto un operario para situar las muestras.

3.3.3 Fuente sonora y micrófonos

La fuente sonora utilizada para llevar a cabo los experimentos es la GENELEC 8040A que emite un nivel de presión sonora alto, con una respuesta plana en frecuencias, para el rango audible. Se han utilizado micrófonos prepolarizados de 1/2" tipo 4189 B & K con una sensibilidad de 49.5 mV/Pa, que permiten analizar un amplio rango de frecuencias. Una ventaja de este tipo de micrófonos, es que debido a sus dimensiones (diámetro $d = 1.32$ cm y longitud $l = 1.76$ cm) se pueden utilizar para medir el campo de presiones, en frecuencias donde $\lambda \gg d$, en el interior de

ciertos dispositivos cuyo tamaño es mucho mayor que el micrófono, produciendo este último poca distorsión en la medida. El equipo se completa con un ecualizador (dbx Graphic Equalizer 1231) de doble canal que permite el refinado de la señal emitida.



Figura 3.6: Muestras formadas por cilindros rígidos de aluminio. De izquierda a derecha: Cristal de sonido, estructura cuasi-fractal (alfombra de Sierpinski) y estructura cuasi-fractal (triángulo de Sierpinski).

3.4 Muestras

En esta sección, se presenta un resumen de las muestras experimentales utilizadas en este trabajo. Cada estructura que se presenta, está desarrollada en su apartado correspondiente. Así en la Figura (3.6), se pueden ver muestras formadas por dispersores rígidos, de aluminio y con diferentes ordenamientos. Son cilindros de radio pequeño y por lo tanto permiten trabajar con pasos de red también pequeños. Por contra, se requieren muchos dispersores si se quiere tener una estructura grande.

En la Figura (3.7) se puede ver una muestra formada por dispersores rígidos de cartón prensado. Son cilindros de radio grande y por lo tanto, no se requieren demasiados dispersores para conseguir una estructura de tamaño considerable.

En la Figura (3.8) se pueden ver los dispersores multifenómeno utilizados en este trabajo. Son dispersores con forma cilíndrica, rígidos en su interior. Presentan una ranura en su sección longitudinal y están recubiertos de material absorbente (lana de roca). Se les protege con una superficie cilíndrica de metal perforado. El absorbente utilizado pertenece a las familias de las lanas minerales, material cuya estructura multidireccional y elástica, frena el movimiento de las partículas de aire disipando la energía sonora. Las características elásticas de este absorbente, se muestran en la Tabla (3.1).

En la Tabla (3.2) se muestra el parámetro de red y el tipo de red utilizado para cada uno de los SC experimentales utilizados en este trabajo.



Figura 3.7: Cilindros rígidos de cartón prensado de 1.20 m de altura. De izquierda a derecha: estructura completa formada por 28 dispersores y vista del ordenamiento utilizado: red cuadrada.



Figura 3.8: Cilindros rígidos con cavidad resonante y recubiertos de material absorbente (lana de roca). De izquierda a derecha: detalle de las partes del dispersor, de la chapa perforada cilíndrica utilizada para dar consistencia y proteger al dispersor, de los dispersores multifenómeno listos para ser utilizados y de un dispersor multifenómeno sin chapa perforada.

Propiedad	Lana de roca
Densidad kg/m^3	100
Resistencia al flujo $Pa s m^{-2}$	23000

Tabla 3.1: Propiedades elásticas del absorbente (lana de roca).

Dispersor	Parámetro de red a (cm)	Tipo de red	Diámetros (cm)
Aluminio	6.35	Triangular	4
Multifenómeno	28	Triangular	24.7, 19.6
Cartón prensado	22, 33	Cuadrada	18, 28

Tabla 3.2: SC experimentales analizados en este trabajo.

Capítulo 4

Técnicas de maximización del efecto de la dispersión múltiple. Utilización de conjuntos de dispersores rígidos ordenados como estructuras cuasi-fractales

4.1 Introducción

En los últimos años, tal y como se ha comentado en la sección (2.4.2), se han desarrollado dos formas de maximizar el efecto de la difracción Bragg en un SC completo que son, en primer lugar, desarrollando nuevos ordenamientos de dispersores diferentes a las simetrías cristalinas típicas, y en segundo lugar variando las propiedades acústicas intrínsecas de los dispersores. Este capítulo se centra en la primera forma.

Los fractales han sido objeto de estudio en una amplia gama de aplicaciones prácticas, desde medicina o biología [67] a economía [68]. Así, recientemente se han utilizado nuevos ordenamientos de dispersores, basados en el concepto de hiperuniformidad, para obtener bandas prohibidas completas y más grandes, con materiales fotónicos amorfos [69]. Sin embargo, los fractales sólo se han utilizado en el campo de SC para diseñar diferentes formas de dispersores pero utilizándose en ordenamientos clásicos [42]: la estructura fractal se obtiene iterando sobre un dispersor de forma cuadrada, tal y como muestra la Figura (4.1).

En este capítulo, se propone un nuevo procedimiento para aumentar las bandas de atenuación obtenidas mediante la difracción Bragg, basado en la redistribución de los elementos del cristal de sonido sobre la base de geometrías fractales, ya introducidas teóricamente en la sección (2.4.1.3). Se han elegido estas geometrías, ya que



Figura 4.1: A partir de un elemento con forma cuadrada y siguiendo un procedimiento de iteración se muestra uno de los patrones fractales utilizados para este estudio [42].

pueden ser modeladas matemáticamente y constituyen una buena herramienta de diseño de estructuras más efectivas, tal y como se explica en las siguientes secciones.

El capítulo, se distribuye en dos partes: en la primera, se muestra cualitativamente como, mediante la disposición de dispersores siguiendo geometrías fractales, se aumenta el tamaño de las bandas de atenuación debidas a la difracción Bragg en el espectro de atenuación acústica. En la segunda parte, se cuantifica esta mejora, analizando como varían las propiedades de las bandas de transmisión prohibidas para las estructuras propuestas.

4.2 Técnicas de maximización del efecto de la difracción Bragg

En esta sección se desarrolla una técnica en dos pasos de maximización del efecto de la difracción Bragg [7]: i) introducir redes de dispersores dentro de otras redes y ii) variar los radios de los dispersores de cada subred. Para ello, se utiliza el fractal de Sierpinski. En primer lugar se diseña un dispositivo pequeño y compacto que contenga en su interior varias redes de dispersores. Así se obtiene que la banda de atenuación producida por la distribución fractal de como resultado la suma de los picos Bragg de cada periodicidad. Por otro lado, es conocido que el tamaño de las bandas prohibidas de los SC en el rango de frecuencias dependen del factor de llenado (2.3.1.2). Por lo tanto, y en segundo lugar, los radios de los dispersores cilíndricos de cada subred se han variado para que el factor de llenado (ff) de cada subred se distribuya de una forma más eficiente. La finalidad de esta técnica es la de solapar las bandas prohibidas de cada una de las periodicidades para la obtención de una atenuación completa de todo el ancho de banda.

4.2.1 Ordenamiento cuasi-fractal: Triángulo de Sierpinski

El primer paso que se ha considerado es el diseño de una disposición de dispersores en el interior de un triángulo equilátero de lado L basado en un fractal 2D llamado triángulo de Sierpinski (véase la sección (2.4.1.3.1))[7]. Se ha elegido como patrón una simetría triangular 2D porque entre las periodicidades típicas es la que presenta la banda prohibida más ancha como consecuencia de su grado de hiperuniformidad [69].

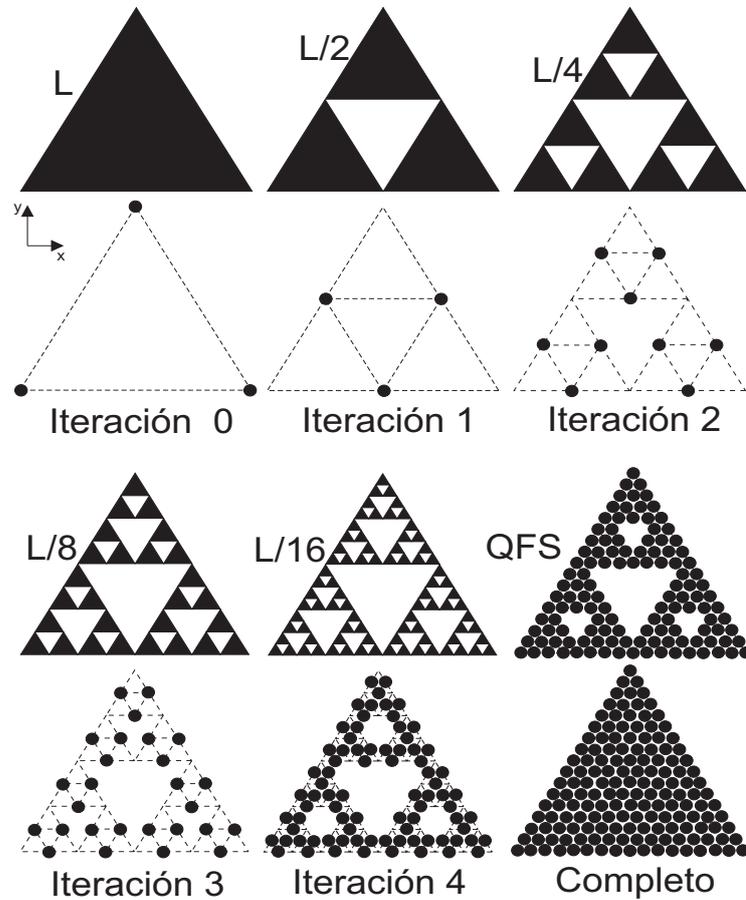


Figura 4.2: Ordenamiento cuasi-fractal de dispersores. Se muestra las cinco iteraciones de redes de cilindros basadas en la geometría triángulo de Sierpinski, la estructura completa SC y la estructura QFS. En cada caso se presenta su correspondiente nivel del triángulo de Sierpinski [7].

En la Figura (4.2), se representa una sección transversal (en el plano XY) del nuevo ordenamiento, considerando cilindros de longitud infinita, paralelos al eje Z y de radio r . A esta estructura, como se comentó en la sección (2.4.1.4), se le ha llamado estructura cuasi-fractal (QFS) porque, aunque la construcción sigue el proceso

iterativo de un fractal infinito, sólo se muestran aquí las primeras cinco iteraciones (o etapas) para la obtención del fractal. Estas estructuras cuasi-fractales no se construyen eliminando áreas de la figura, sino que se construyen con cilindros. Además, las QFS que se muestran aquí están limitadas por los parámetros geométricos L y r . La Figura (4.2) muestra, además, que excepto en la iteración cero que tiene tres cilindros en los vértices del triángulo completo, en el resto de iteraciones cada cilindro se coloca en el vértice de los triángulos vacíos (triángulo blanco). También, se puede comparar en la Figura (4.2), la estructura completa SC y las QFS resultantes de la suma de las diferentes iteraciones. A primera vista, se podría considerar que la QFS es un SC clásico triangular con algunas vacantes, sin embargo, la simetría subyacente sigue un patrón fractal. Por lo tanto, se puede considerar, para validar los resultados teóricos, que las QFS están formadas por una suma independiente de redes triangulares, con diferentes constantes de red (L , $L/2$, $L/4$, $L/8$ y $L/16$), correspondiendo cada una de ellas a un nivel fractal diferente. Esto proporciona un dispositivo pequeño y compacto donde la banda de atenuación resulta de la suma de los picos Bragg correspondientes a la periodicidad de cada iteración. Esta idea es consistente con la naturaleza de geometrías fractales que se basan en la repetición de patrones idénticos a escalas de diferentes tamaño [50].

La existencia de una gran banda completa de atenuación se puede explicar a partir de la relación entre los diferentes parámetros de red de cada iteración en las estructuras cuasi-fractales. Como se puede observar en la Figura (4.2), los parámetros de red son proporcionales a $1/2^M$, siendo M el número de orden de la iteración. Esto produce una superposición de muchos picos Bragg en diferentes iteraciones y un aumento de las bandas de atenuación.

Es posible encontrar una expresión para obtener el número de veces que se repiten los picos Bragg en las diferentes iteraciones [7]. Las siguientes funciones $S_\alpha(n, M)$, $\alpha = 0^\circ, 30^\circ$ dan el valor de la frecuencia para la que el n -ésimo pico Bragg aparece en las diferentes iteraciones M ($M = 0, 1, 2, 3, 4$), en función de L y de las dos direcciones principales ΓX y ΓJ de la red triangular:

$$\begin{aligned} S_{0^\circ}(n, M) &= C_{0^\circ}(n+1)2^M \\ S_{30^\circ}(n, M) &= C_{30^\circ}(n+2)2^{M-1} \end{aligned} \quad (4.1)$$

donde $C_{0^\circ} = \sqrt{3}/3$ y $C_{30^\circ} = 2/3$ debido a la ley de Bragg. A partir de las ecuaciones (4.1), es directo encontrar la relación de la aparición de un pico Bragg predeterminado para cualquiera dos iteraciones diferentes:

$$\begin{aligned} (0^\circ) \quad n &= (n'+1)2^V - 1 \\ (30^\circ) \quad n &= (n'+2)2^V - 2 \end{aligned} \quad (4.2)$$

donde V es la diferencia entre el par de etapas que se desea comparar ($V = 1, 2, 3, 4$). Las ecuaciones (4.2) muestran la relación entre la n -posición de un pico Bragg en la iteración M en función de las n' -posiciones del mismo pico en otra iteración M' , tal que $V = M' - M$. Hay que tener en cuenta que ciertos picos Bragg se repiten un gran número de veces en las distintas iteraciones, de acuerdo con las ecuaciones (4.2), produciendo un refuerzo de la atenuación y, como consecuencia, un aumento en la banda completa de atenuación. Hay que señalar que las fórmulas anteriores son válidas si la iteración considerada tiene un número mínimo de celdas.

4.2.2 Variación de radios para el aumento de la banda de atenuación en la estructura cuasi-fractal Triángulo de Sierpinski

El segundo paso constituye una parte importante de esta técnica de diseño [7]. Se ha diseñado el tamaño de los radios de los cilindros que forman cada iteración de forma independiente, con la finalidad de distribuir el factor de llenado (ff) de cada iteración de una manera más eficiente: aumentando el tamaño en las iteraciones bajas y reduciéndolos en las más altas, proporcionando, por tanto, para cada iteración el valor adecuado del ff para la maximización de sus picos Bragg (2.3.1.2). Como consecuencia de ello, se produce un aumento adicional de la banda de atenuación.

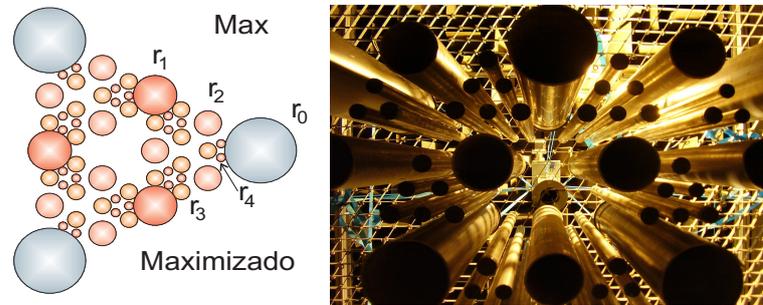


Figura 4.3: Izquierda: Disposición maximizada de los dispersores basada en el triángulo de Sierpinski con diferentes relaciones entre los radios de los cilindros (QFS_{Max}). Derecha: Fotografía tomada de debajo de la estructura comercial (QFS_{Exp}) utilizada para validar los resultados teóricos [7].

Para el proceso de maximización se ha utilizado la proporción áurea¹ entre los radios de los cilindros. En la Figura (4.3) se muestra el cuasi-fractal propuesto

¹El número áureo o de oro (también llamado razón áurea) es un número irracional: 1,61803398874... fue descubierto en la antigüedad como proporción entre dos segmentos de una recta. Esta proporción se encuentra tanto en algunas figuras geométricas como en la naturaleza: la relación entre la cantidad de abejas macho y abejas hembra en un panal, en las nervaduras de las

(QFS_{Max}), construido con una relación áurea entre los radios de los cilindros que pertenecen a las diferentes iteraciones M ($M = 0, 1, 2, 3, 4$). Estos cilindros presentan los siguientes radios para cada iteración: $r_0 = 14.8$ cm, $r_1 = 9$ cm, $r_2 = 5.6$ cm, $r_3 = 3.5$ cm y $r_4 = 1.9$ cm. Hay que señalar que ha sido necesario eliminar algunos de los cilindros del QFS de partida, mostrado en la Figura (4.2), con el fin de colocar los cilindros más grandes (radios mayores) de las primeras iteraciones. Por supuesto, para otras aplicaciones, podría ser apropiada otras relaciones entre los radios de los cilindros.

Los resultados teóricos se han obtenido utilizando MST (2.5.2.1).

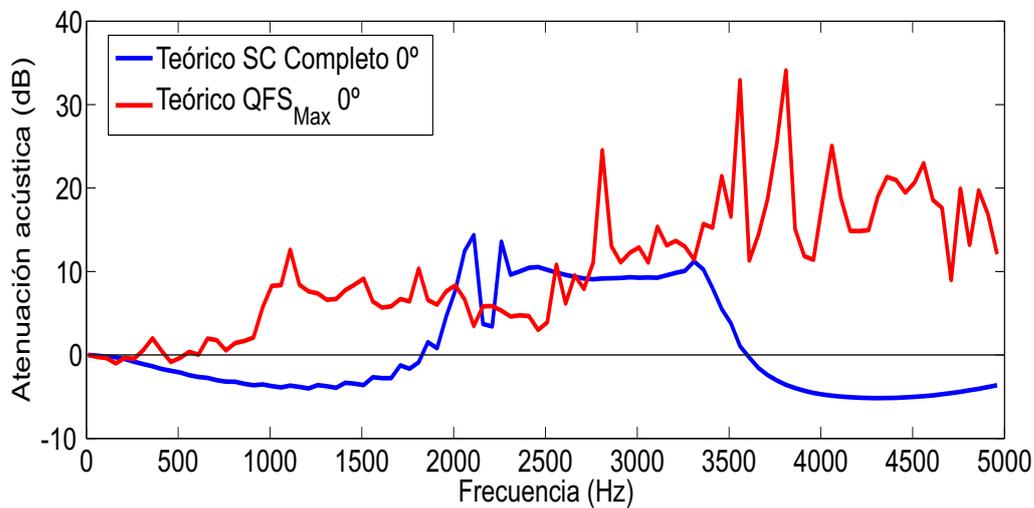


Figura 4.4: Espectro teórico de atenuación acústica (IL) en la dirección principal de simetría ΓX para un SC Completo y el QFS_{Max} [7].

Comparando el valor de AA para el QFS_{Max} con el correspondiente a un SC con el mismo tamaño y forma externa, realizado con cilindros rígidos (radio $r = 2$ cm) dispuestos en red triangular ($a = 6.35$ cm), se obtienen resultados interesantes: el parámetro AA crece para el caso QFS_{Max} ($AA_{Max} = 51048$ Hz·dB) más de 340% en comparación con el de la red triangular clásica ($AA_{SC} = 14705$ Hz·dB).

En la Tabla (4.1) se muestra el número de cilindros utilizados, sus radios, el factor de llenado y el área de atenuación para el caso QFS_{Max} Figura (4.4).

Es importante señalar que QFS_{Max} ha sido diseñado bajo la premisa de no aumentar en exceso el ff. Así, se ha obtenido un incremento alto en el tamaño de la banda atenuación sin un gran aumento del ff del dispositivo con respecto al SC original dispuesto en red triangular. Hay que señalar el hecho de que los resultados

hojas de algunos árboles, en el grosor de las ramas, en el caparazón de un caracol, en los flósculos de los girasoles, etc.

Muestra	N ^a de cilindros	Radios (cm)	ff(%)	AA (dB·Hz)
SC completo	136	2	36	14705
QFS_{Max}	60	14.8, 9, 5.6, 3.5, 1.9	45.8	51048

 Tabla 4.1: Valores geométricos, ff(%) y AA para el SC completo y QFS_{Max} .

obtenidos son válidos para cualquier rango de frecuencias en las que el comportamiento del sistema acústico sea lineal. Por otra parte, debido a la naturaleza de esta técnica, las propiedades de cristal de sonido del dispositivo diseñado permanecen intactas en cada iteración, ya que se pueden considerar como una suma de las redes triangulares. Esto significa que la banda de atenuación obtenida a lo largo de la otra dirección principal, ΓJ (30°) y la banda completa de atenuación de la QFS también crecen en comparación con la banda prohibida correspondiente y la banda prohibida del SC completo, respectivamente (la banda completa de atenuación de los QFS es un 200% más alta que el gap completo del SC).

4.2.3 Resultados experimentales

Para confirmar los cálculos teóricos realizados, experimentalmente se ha construido un nuevo dispositivo, similar a QFS_{Max} , pero con cilindros huecos disponibles comercialmente, QFS_{Exp} (Figura (4.5)). En la parte derecha de la Figura (4.3) se puede ver una foto de la QFS_{Exp} montada en el bastidor de la cámara anecoica.

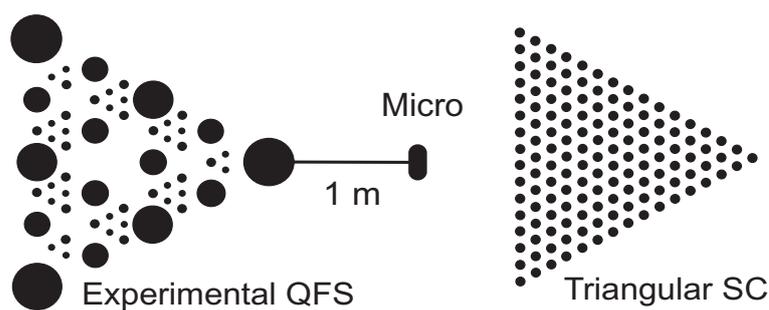


Figura 4.5: Estructura cuasi-fractal experimental (QFS_{Exp}) y SC triangular utilizada. Los radios de los cilindros para el primer caso son: $r_0 = 10$ cm, $r_1 = 8$ cm, $r_2 = 5.5$ cm, $r_3 = 3$ cm y $r_4 = 1.75$ cm, siendo $ff_{Exp} = 33,24\%$ [7].

La muestra QFS_{Exp} ha sido diseñada bajo la premisa de no aumentar en exceso el ff : QFS_{Exp} posee un $ff_{Exp} = 33,24\%$ siendo este menor que el ff del SC ($ff_{SC} = 36\%$). Se ha utilizado MST (2.5.2.1) para obtener los espectros teóricos de

4. Técnicas de maximización del efecto de la dispersión múltiple. Utilización de conjuntos de dispersores rígidos ordenados como estructuras cuasi-fractales

atenuación acústica (IL), para la dirección principal de simetría ΓX (0°), para un SC completo del mismo tamaño que la QFS_{Exp} (ver Figura (4.6)). Estos espectro de atenuación acústica se han calculado a una distancia de 1 m desde el vértice de la muestra a 0° , tal y como se puede ver en la Figura (4.5). En la Tabla (4.2) se muestra el número de cilindros utilizado, sus radios, el factor de llenado y el área de atenuación obtenidos. Con estos datos, se puede romper la regla de la relación entre el ff y el tamaño de las bandas prohibidas: se ha obtenido un incremento alto en el tamaño de la banda de atenuación sin aumentar (disminuyendo) el ff del dispositivo con respecto al SC original dispuesto en red triangular. Así, comparando el valor de AA para la QFS_{Exp} con el correspondiente al SC se obtiene que el parámetro AA crece para el caso QFS_{Exp} ($AA_{Exp} = 42391$ Hz·dB) más de 340% en comparación con el de la red triangular clásica ($AA_{SC} = 14705$ Hz·dB).

Muestra	N ^a de cilindros	Radios (cm)	ff(%)	AA (dB · Hz)
SC completo	136	2	36	14705
QFS_{Exp}	60	10, 8, 5.5, 3, 1.75	33.24	42391

Tabla 4.2: Valores geométricos, $ff(\%)$ y AA para el SC completo y QFS_{Exp} en la dirección principal de simetría ΓX (0°).

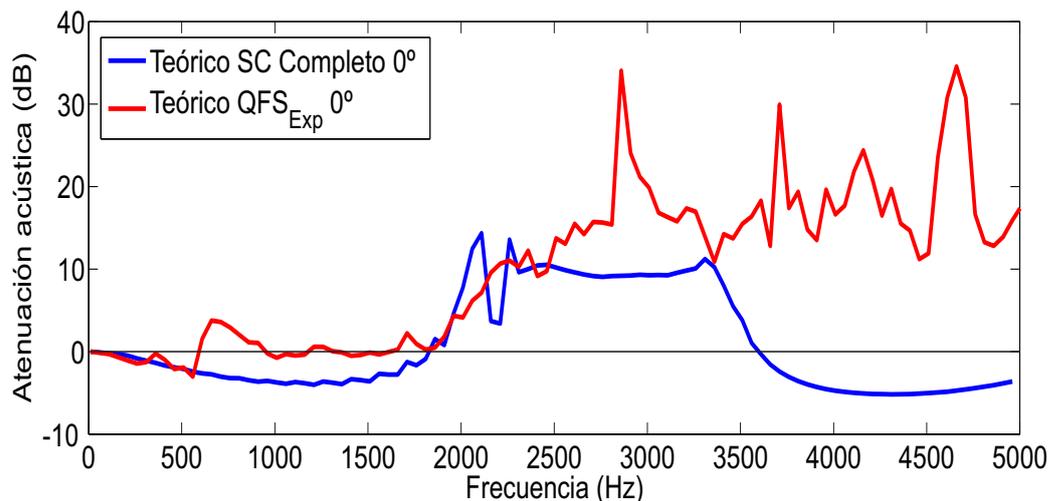


Figura 4.6: Espectro teórico de atenuación acústica (IL) en la dirección principal de simetría ΓX para un SC Completo y la QFS_{Exp} [7].

Igualmente, en la Figura (4.7), se comparan los espectros teóricos de atenuación

acústica (IL), para la dirección principal de simetría ΓJ (30°) para un SC completo del mismo tamaño que el QFS_{Exp} definido en la Figura (4.5).

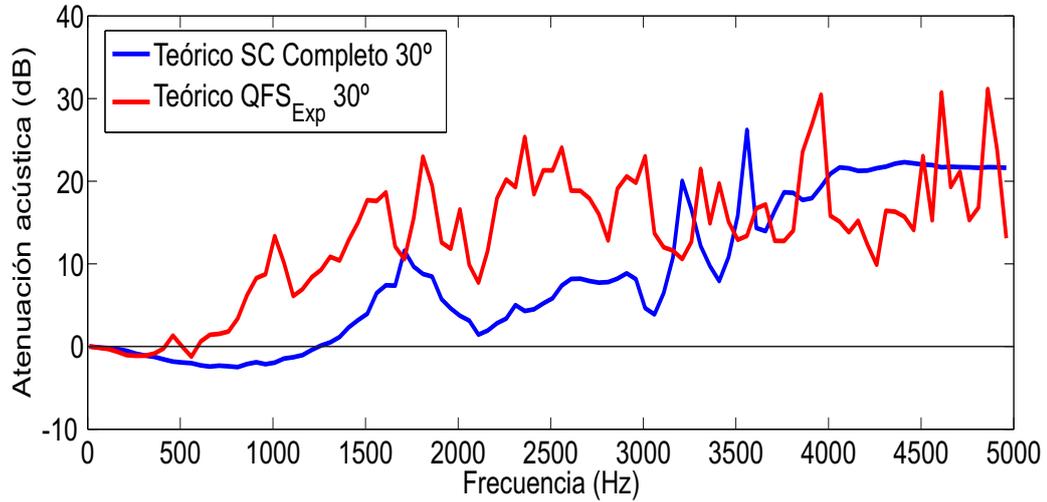


Figura 4.7: Espectro teórico de atenuación acústica (IL) en la dirección principal de simetría ΓJ para un SC Completo y la QFS_{Exp} [7].

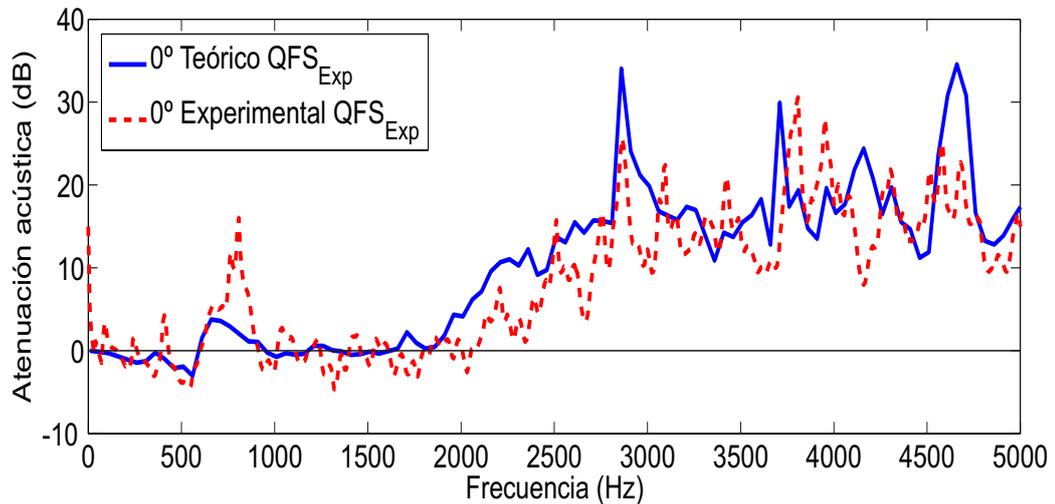


Figura 4.8: Espectro teórico y experimental de atenuación acústica (IL) del QFS_{Exp} en la dirección ΓX [7].

Las medidas experimentales, en condiciones controladas, se han realizado en cámara anecoica, tal y como se ha explicado en el Capítulo (3). La fuente de sonido direccional, está situada a 1m de la muestra, con el fin de que la onda incidente sobre

ella sea plana. Esta fuente emite de forma continua ruido blanco. En la Figura (4.8) se puede observar la buena concordancia que existe entre los resultados teórico y experimental cuando la incidencia es 0° .

4.3 Caracterización cuantitativa de las propiedades de las bandas prohibidas de transmisión para grupos de dispersores acústicos aislados dispuestos según geometrías fractales

En las secciones anteriores se ha demostrado cualitativamente que el tamaño de las bandas de atenuación aumenta cuando se disponen los dispersores siguiendo una geometría cuasi-fractal. Desde un punto de vista tecnológico parece interesante cuantificar esta mejora, y así poder comprobar las posibilidades acústicas reales de diseño de estos dispositivos formados por dispersores aislados.

De acuerdo con este último argumento se presenta en este apartado un estudio teórico, verificado experimentalmente [70], dedicado a cuantificar el aumento en el tamaño de las bandas de atenuación de un conjunto de dispersores aislados rígidos dispuestos siguiendo una geometría fractal 2D. El estudio se realiza para las geometrías fractales: triángulo de Sierpinski y alfombra de Sierpinski y se organiza en cada caso en tres fases: en primer lugar, se miden las variaciones en las propiedades de las bandas de atenuación durante todo el proceso de crecimiento de una estructura cuasi-fractal creada a partir de una estructura inicial, denominada clúster, según vió en la sección (2.4.1.4). En este proceso de crecimiento el grupo de partida, clúster inicial, se repite tantas veces como sea necesario siguiendo la geometría fractal seleccionada. En segundo lugar, se sigue un crecimiento cristalino clásico, según vió en la sección (2.4.1.4), también a partir del clúster inicial. En este caso, lo habitual es hacer traslaciones y rotaciones del clúster inicial. Ambos procesos de crecimiento tienen que parar en el cuarto nivel para el triángulo de Sierpinski y en el tercer nivel para la alfombra de Sierpinski, ya que existe una limitación en el tamaño de las estructuras creadas debido a la capacidad computacional y experimental de que se dispone. En tercer lugar, se comparan cuantitativamente las propiedades de las bandas de atenuación de ambos tipos de muestras, cuasi-fractal y cristalina con el mismo nivel de crecimiento. Para ello hay que tener en cuenta que el tamaño de la muestra debe ser el mismo y además con la misma forma externa.

Por último, se validan los resultados teóricos mediante experimentos realizados en la cámara anecoica descrita en la sección (3.2).

4.3.1 Triángulo de Sierpinski

4.3.1.1 Cálculos teóricos

Se ha elegido un clúster de inicio formado por tres cilindros de aluminio con un radio de 0,02 m como dispersores, Tabla (2.2). Estos cilindros están dispuestos de acuerdo con un patrón triangular con parámetro de red de 0.0635 m. Los cálculos teóricos se han llevado a cabo utilizando el Método de los Elementos Finitos (2.5.3). Para cuantificar las propiedades de atenuación de las muestras consideradas se ha utilizado el parámetro área de atenuación (AA) en el rango analizado de frecuencias (0 – 6500 Hz) y a lo largo del eje OX (ΓX -dirección del SC).

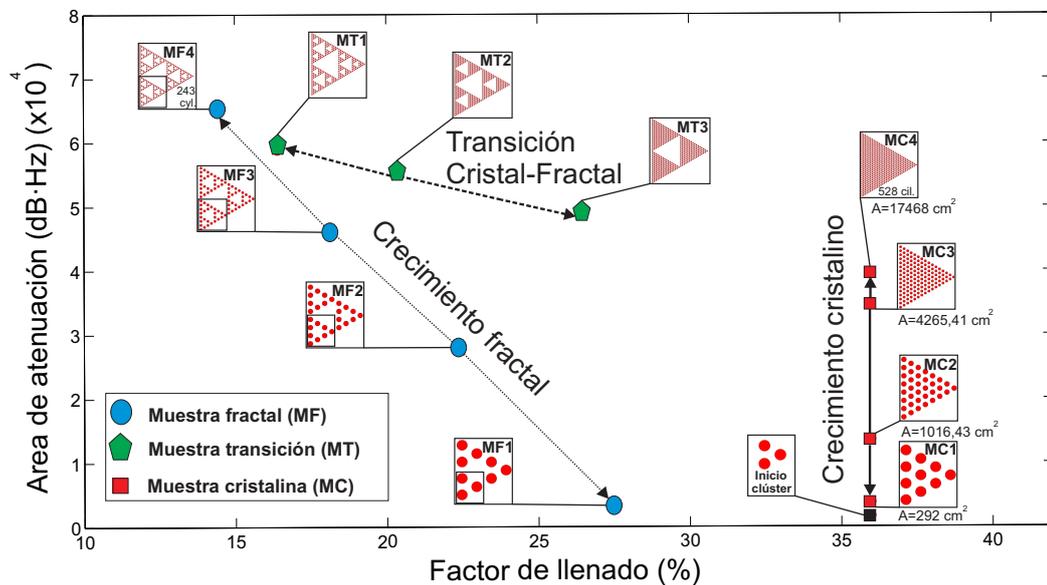


Figura 4.9: Capacidad de atenuación (AA) frente al factor de llenado (ff%) de ambos procesos de crecimiento considerados: crecimiento cristalino (cuadrados rojos conectados por un línea negra continua) y crecimiento cuasi-fractal (círculos azules conectados por una línea punteada negra). Además, se indica el proceso que se ha llamado transición cristal-fractal (pentágonos verdes conectados por una línea discontinua negra). También se presenta una vista de la sección transversal de cada muestra, incluyendo la muestra que inicia (clúster) el proceso. Las áreas ocupadas aparecen en cada muestra cristalina. El resto de muestras les corresponde un valor de área ocupada igual al de la muestra cristalina que tenga la misma numeración [70].

Para analizar la capacidad de atenuación de las muestras, en la Figura (4.9) se ha representado AA como una función del ff para las distintas muestras analizadas. Como todas las muestras tienen su forma exterior triangular, debido a la geometría

4. Técnicas de maximización del efecto de la dispersión múltiple. Utilización de conjuntos de dispersores rígidos ordenados como estructuras cuasi-fractales

fractal elegida y en cada nivel de crecimiento, el área ocupada por las muestras es la misma, es posible comparar los tamaños de las bandas de atenuación entre las parejas de muestras del mismo nivel. Se utiliza como notación para diferenciar las muestras entre si dos letras y un número. Las dos letras hacer referencia al tipo de muestra y el número, al nivel de iteración del crecimiento correspondiente. En la Tabla (4.3) se indica el significado de los códigos utilizados.

Código de la Muestra	Significado
MC	Muestra crecimiento cristalino
MF	Muestra crecimiento cuasi-fractal
MT	Muestra transición cristalina-fractal

Tabla 4.3: Nomenclatura utilizada para las diferentes muestras analizadas.

Por lo tanto, las parejas de MC1-MF1, MC2-MF2, MC3-MF3, MC4-MF4 tienen un área ocupada igual, que es mayor cuando el nivel de crecimiento (1, 2, 3 y 4 ascendente) es mayor. El valor numérico de estas áreas ocupadas se muestra en la Figura (4.9) debajo de la vista de la sección transversal de cada muestra cristalina considerada.

Como se puede ver en la Figura (4.9), se muestran ambos casos de crecimiento. A la derecha, se puede observar el patrón de crecimiento de las muestras cristalinas a partir del cluster (cuadrados conectados por una línea continua negra). En este caso, el ff se mantiene constante durante todo el proceso de crecimiento (36%), mientras que las AA aumentan al mismo tiempo que el área de las muestras, siendo este el comportamiento típico de un crecimiento cristalino. Así, la muestra cristalina más grande (MC4) que está formada por 528 cilindros, ocupa un área $A = 17468 \text{ cm}^2$, posee un valor de AA igual a 39580 Hz·dB.

Por otro lado y a la izquierda de la gráfica, se puede observar el patrón de crecimiento de las muestras cuasi-fractales (círculos conectados por una línea de puntos negro). En el caso cuasi-fractal, la tendencia observada en el proceso de crecimiento indica una disminución del ff , de 28% al 14%, mientras que el AA se incrementa significativamente en este proceso de 3158 Hz·dB (MF1) a 64954 Hz·dB (MF4).

Por lo tanto la capacidad de atenuación de la muestra MF4 supera claramente el valor obtenido por la muestra cristalina equivalente (MC4) siendo un 164% mayor. Por otra parte, la muestra MF4 está formada por 243 cilindros, que representa una disminución de dispersores respecto a la muestra MC4 de un 46%. Los resultados numéricos para ambos casos se muestran en la Tabla (4.4).

Los resultados obtenidos muestran que en sólo cuatro niveles de crecimiento, las

4.3. Caracterización cuantitativa de las propiedades de las bandas prohibidas de transmisión para grupos de dispersores acústicos aislados dispuestos según geometrías fractales

Estructura	Número de dispersores	AA (Hz·dB)	ff%
MC4	528	39.580	36
MF4	243	64.954	14

Tabla 4.4: Capacidad de atenuación de las dos muestras mayores del crecimiento cristalino (MC4) y crecimiento fractal (MF4), siendo el área ocupada por ambas muestras la misma (17468 cm²).

propiedades de atenuación de las muestras cuasi-fractales han mejorado significativamente utilizando menos dispersores que en el caso cristalino.

Además, en el gráfico de la Figura (4.9), se puede observar la transición en el proceso de crecimiento cristal-fractal (pentágonos verdes conectados por una línea de trazos negro). En esta transición, que puede ser entendida como la creación del cuasi-fractal MF4 a partir de una muestra cristalina completa (MC4), donde las muestras MT3, MT2, MT1 y MF4 son los cuatro niveles de los cuasi-fractales creados, se puede observar la disminución del ff mientras aumenta el AA, manteniendo constante el área externa a lo largo de la transición.

4.3.1.2 Resultados experimentales

En el recuadro de la Figura (4.10),(a)) puede verse una vista de la sección transversal del clúster utilizado. A partir de este clúster, se pueden obtener muestras cristalinas siguiendo un ordenamiento cristalino clásico (triangular) o muestras cuasi-fractales si se hace crecer siguiendo la geometría del fractal triángulo de Sierpinski. La forma de esta estructura cuasi-fractal también se muestra en la Figura (4.10),(a)). Al lado de esta forma, en la Figura (4.10),(a)), se muestra la estructura cuasi-fractal formada a partir de la agrupación de partida (clúster) y la muestra experimental construida para validar los resultados teóricos, hasta el cuarto nivel fractal.

Los experimentos, realizados para determinar la validez de los resultados analíticos, se han llevado a cabo en la cámara anecoica descrita en la sección (3.2). Se ha obtenido la presión en un punto situado a 1 m detrás de la muestra de acuerdo con el esquema que se muestra en el recuadro de la Figura (4.10),(b)). En esta figura, además, se muestra la comparativa entre el espectro experimental y el teórico, donde puede verse la buena concordancia entre los resultados, que permite validar el modelo teórico utilizado y los resultados obtenidos.

4. Técnicas de maximización del efecto de la dispersión múltiple. Utilización de conjuntos de dispersores rígidos ordenados como estructuras cuasi-fractales

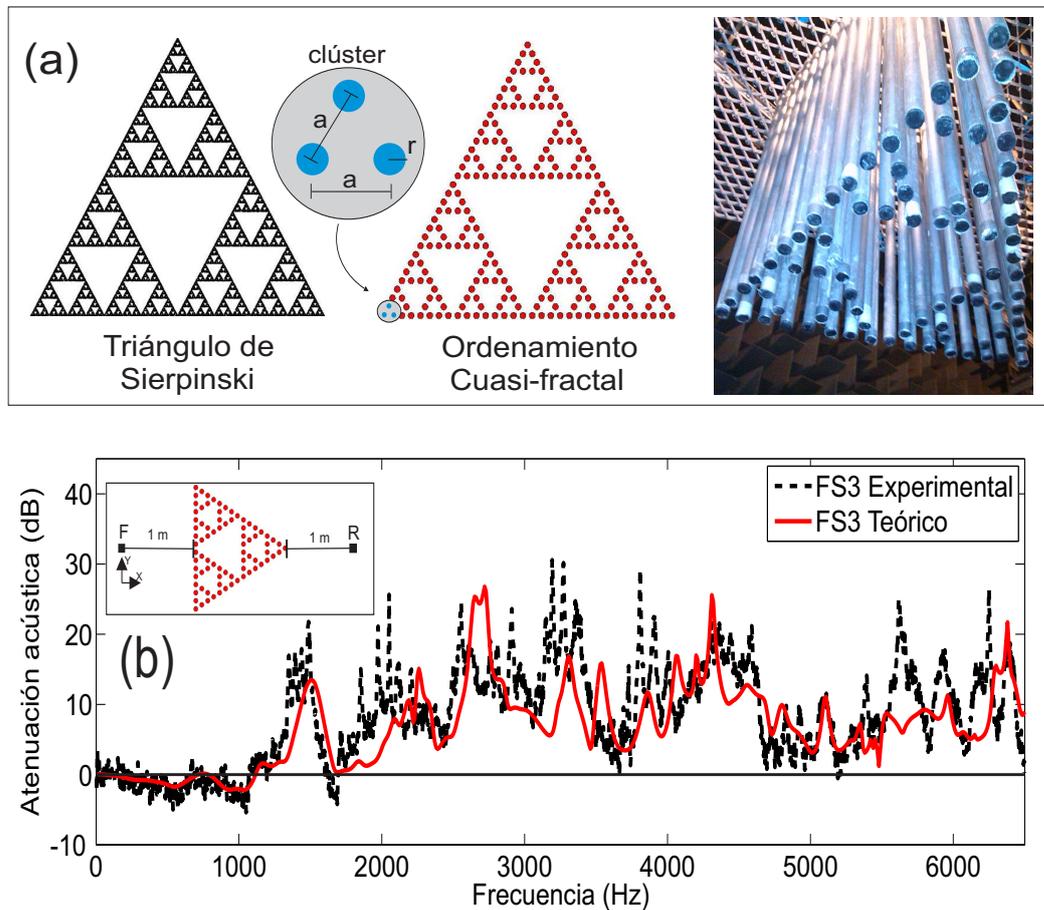


Figura 4.10: (a) La geometría fractal triángulo de Sierpinski hasta el quinto nivel. Al lado está la vista en sección transversal de la disposición cuasi-fractal más grande de cilindros considerado (cuarto nivel fractal). La imagen es de la muestra experimental utilizada para las mediciones. En el recuadro se puede ver el clúster de comienzo considerado; (b) Comparación de los espectros de atenuación acústica (IL) (dB) obtenido (i) teóricamente por medio de Elementos Finitos (línea continua roja) y (ii) de forma experimental (línea negra discontinua) para una orientación 0° en la geometría cristalina [70].

4.3.2 Alfombra de Sierpinski

4.3.2.1 Cálculos teóricos

Se ha elegido un clúster de inicio formado por nueve cilindros de aluminio con un radio de 0,02 m como dispersores, Tabla (2.2). Estos cilindros están dispuestos de acuerdo con un patrón de red cuadrada con parámetro de red de 0.055 m. Los cálculos teóricos se han llevado a cabo utilizando el Método de los Elementos Finitos (2.5.3). Para cuantificar las propiedades de atenuación de las muestras conside-

4.3. Caracterización cuantitativa de las propiedades de las bandas prohibidas de transmisión para grupos de dispersores acústicos aislados dispuestos según geometrías fractales

radar se ha utilizado el parámetro área de atenuación (AA) en el rango analizado de frecuencias (0 – 5000 Hz) y a lo largo del eje OX (TX-dirección del SC).

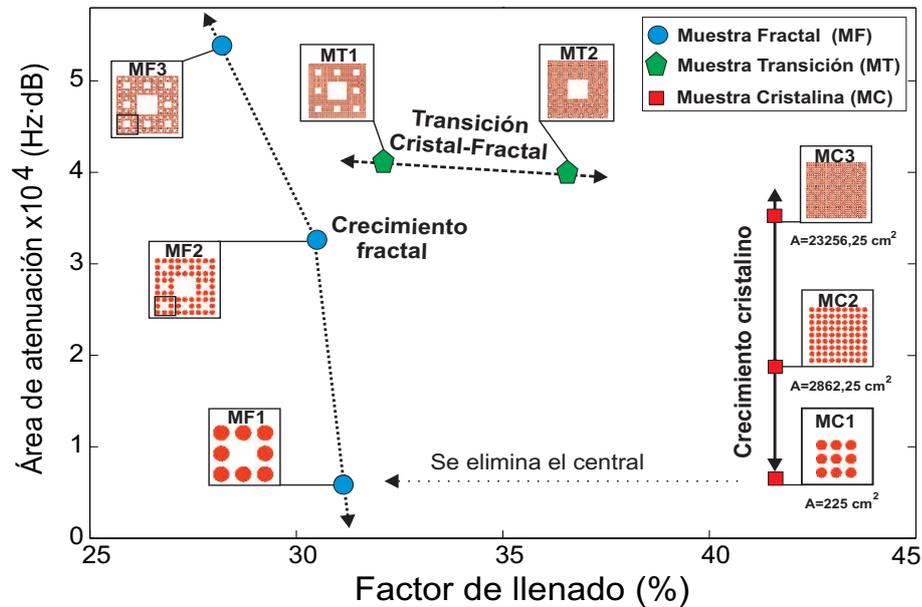


Figura 4.11: Capacidad de atenuación (AA) frente al factor de llenado (ff%) de ambos procesos de crecimiento considerados: crecimiento cristallino (cuadrados rojos conectados por un línea negra continua) y crecimiento cuasi-fractal (círculos azules conectadas por una línea punteada negra). Además, se indica el proceso que se ha llamado transición cristal-fractal (pentágonos verdes conectados por una línea discontinua negra). También se presenta una vista de la sección transversal de cada muestra, incluyendo la muestra que inicia (clúster) el proceso. Las áreas ocupadas aparecen en cada muestra cristallina. El resto de muestras les corresponde un valor de área ocupada igual al de la muestra cristallina que tenga la misma numeración.

Para analizar la capacidad de atenuación de las muestras, en la Figura (4.11) se ha representado AA como una función del ff para las distintas muestras analizadas. Al igual que en el caso anterior, como todas las muestras tienen su forma exterior cuadrada, debido a la geometría fractal elegida y en cada nivel de crecimiento, el área ocupada por las muestras es la misma, es posible comparar los resultados de las bandas de atenuación entre las parejas de muestras del mismo nivel. La notación utilizada se corresponde, al igual que en la sección anterior, a la mostrada en la Tabla (4.3).

Por lo tanto, las parejas de MC1-MF1, MC2-MF2 y MC3-MF3 tienen un área ocupada igual, que es mayor cuando el nivel de crecimiento (1, 2 y 3 ascendente) es mayor. El valor numérico de estas áreas ocupadas se muestra en la Figura (4.11) debajo de la vista de la sección transversal de cada muestra cristallina.

4. Técnicas de maximización del efecto de la dispersión múltiple. Utilización de conjuntos de dispersores rígidos ordenados como estructuras cuasi-fractales

Como se puede ver en la Figura (4.11), se muestran ambos casos de crecimiento. A la derecha, se puede observar el patrón de crecimiento de las muestras cristalinas a partir del cluster (cuadrados conectados por una línea continua negra). En este caso, el ff se mantiene constante durante todo el proceso de crecimiento (41.54%), mientras que las AA aumentan al mismo tiempo que el área de las muestras, siendo este el comportamiento típico de un crecimiento cristalino. Así, la muestra cristalina más grande (MC3) que está formada por 729 cilindros, ocupa un área de $A = 23256.25 \text{ cm}^2$, posee un valor de AA igual a 35475 Hz·dB.

Por otro lado y a la izquierda de la gráfica, se puede observar el patrón de crecimiento de las muestras cuasi-fractales (círculos conectados por una línea de puntos negro). En el caso cuasi-fractal, la tendencia observada en el proceso de crecimiento indica una disminución del ff , de 31.14% al 28.2%, mientras que el AA se incrementa significativamente en este proceso de 5990 Hz·dB (MF1) a 53869 Hz·dB (MF3).

Por lo tanto la capacidad de atenuación de la muestra MF3 supera claramente el valor obtenido por la muestra cristalina equivalente (MC3) siendo un 151% mayor. Por otra parte, la muestra MF3 está formada por 520 cilindros, que representa una disminución de dispersores respecto a la muestra MC3 de un 140%. Se ha analizado experimentalmente la muestra cuasi-fractal MC2, debido a las limitaciones en el número de cilindros disponible. Los resultados teóricos de las muestras analizadas MC2 y MF2 se pueden ver en la Tabla (4.5).

Estructura	Número de dispersores	AA (Hz·dB)	$ff\%$
MC2	81	21060	41.54
MF2	64	32633	30.50

Tabla 4.5: Capacidad de atenuación de las dos muestras mayores del crecimiento cristalino (MC3) y crecimiento fractal (MF2), siendo el área ocupada por ambas muestras la misma (2862.25 cm^2).

Los resultados obtenidos muestran que en sólo dos niveles de crecimiento, las propiedades de atenuación de las muestras cuasi-fractales han mejorado significativamente la banda de atenuación obtenida utilizando menos dispersores que en el caso cristalino. Además, en el gráfico de la Figura (4.11), se puede observar la transición en el proceso de crecimiento cristal-fractal (pentágonos verdes conectados por una línea de trazos negro). En esta transición, que puede ser entendida como la creación del cuasi-fractal MF3 a partir de una muestra cristalina completa (MC3), donde las muestras MT2, MT1 y MF3 son los tres niveles de los cuasi-fractales creados, se puede observar la disminución del ff mientras aumenta el AA, manteniendo

constante el área externa a lo largo de la transición.

4.3.2.2 Resultados experimentales

En el recuadro de la Figura (4.12),(a)) puede verse una vista de la sección transversal de la estructura cuasi-fractal hasta el segundo nivel fractal. Al lado de esta

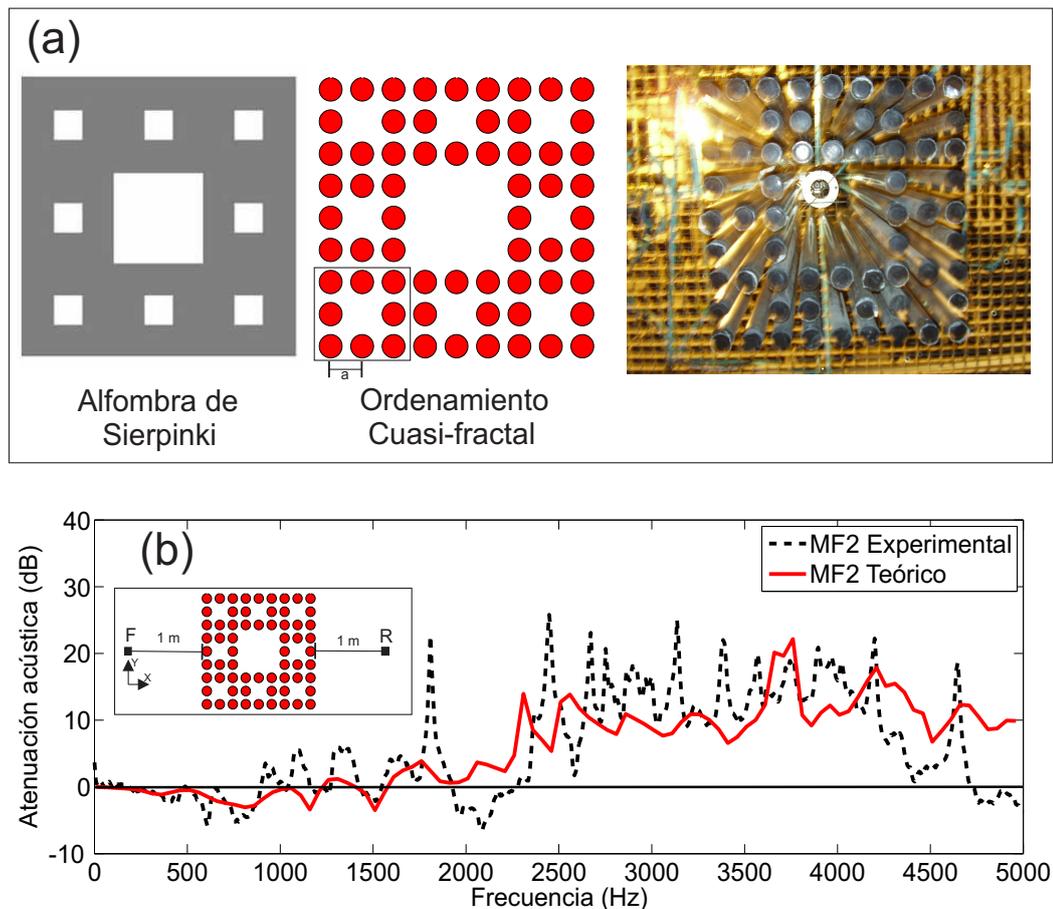


Figura 4.12: (a) La geometría fractal alfombra de Sierpinski hasta el segundo nivel. Al lado está la vista en sección transversal de la disposición cuasi-fractal de cilindros considerado (segundo nivel fractal). La imagen es de la muestra experimental utilizada para las mediciones. (b) Comparación de los espectros de atenuación acústica (IL) (dB) obtenido (i) teóricamente por medio de Elementos Finitos (línea continua roja) y (ii) de forma experimental (línea negra discontinua). En el recuadro se ve la posición de la fuente (F) y del micrófono (R) respecto de la muestra experimental analizada.

forma, en la Figura (4.12),(a)), se muestra la estructura cuasi-fractal formada a partir del elemento remarcado (MF1) al hacerlo crecer siguiendo la geometría del

fractal alfombra de Sierpinski y la muestra experimental construida para validar la resultados teóricos, hasta el segundo nivel fractal.

Los experimentos realizados para determinar la validez de los resultados teóricos, se han llevado a cabo en la cámara anecoica descrita en la sección (3.2). Se ha obtenido la presión en un punto situado a 1 m detrás de la muestra de acuerdo con la esquema que se muestra en el recuadro de la Figura (4.12),(b)). En esta figura, además, se muestra la comparativa entre el espectro de atenuación acústica experimental y el teórico, donde puede verse la buena concordancia entre los resultados. Una vez más, estos resultados permiten validar el modelo teórico utilizado y los resultados obtenidos.

4.4 Conclusiones

En este capítulo, en su primera parte, se ha presentado una técnica de diseño que consigue que una red de dispersores rígidos obtenga un gran aumento de la banda de atenuación acústica maximizando el fenómeno de la difracción Bragg. Esto se consigue en dos fases. La primera de ellas consiste en la utilización de patrones fractales para disponer espacialmente los dispersores. El dispositivo resultante, denominado QFS, se puede considerar como la suma de varias redes cristalinas independientes superpuestas. En una segunda fase se realiza la maximización de los QFS variando el ff de cada iteración fractal de forma independiente variando los radios de los cilindros correspondientes. Como resultado, se han obtenido unos dispositivos eficientes y compactos. Detrás de esta mejora, está la suma de los picos Bragg pertenecientes a las diferentes redes de dispersores (iteraciones). El proceso de aumento de las bandas de atenuación es debido a la existencia de diferentes constantes de red y la redistribución de los cilindros en las diferentes etapas.

En una segunda parte, se ha demostrado cuantitativamente que con ordenamientos de los dispersores siguiendo geometrías fractales se obtienen bandas de atenuación mayores que si se ordenan siguiendo crecimientos cristalinos. Se han comparado los resultados de atenuación, usando el parámetro AA obtenido para un conjunto de cilindros inmersos en aire dispuestos según geometrías fractales o cristalinas (triangular y cuadrada). Estos resultados confirman que:

- i) en el caso de un conjunto de dispersores dispuestos siguiendo un patrón fractal, se produce un rápido aumento en las propiedades de atenuación en comparación con el caso cristalino;
- ii) si un dispositivo formado por un conjunto de dispersores tiene que ocupar un área predeterminada, una disposición cuasi-fractal proporciona mucha más atenuación utilizando menos dispersores que si los dispersores están dispuestos siguiendo un patrón cristalino.

Estos resultados puede ser tecnológicamente relevantes para diseñar dispositivos de control de ondas más competitivos, que utilizarían ordenamientos cuasi-fractales, con respecto a otros dispositivos basados en diferentes principios físicos. -

Capítulo 5

Modelo real de pantalla acústica basada en conjuntos de dispersores aislados de segunda generación

5.1 Introducción

Continuando con la idea introducida en la sección (2.4.2) donde se expuso las dos formas de cambiar las características de las bandas de atenuación de un SC completo y habiendo desarrollado la primera de ellas en el Capítulo (4), se presenta en este capítulo la implementación de una pantalla acústica utilizando los dos mecanismos mencionados con el fin de homologar dispositivos basados en conjuntos de dispersores aislados para conocer el rendimiento de este tipo de pantallas. Para ello, se presenta el diseño y el proceso de fabricación de dos pantallas acústicas formadas por un conjunto de dispersores cilíndricos que incorporan múltiples fenómenos físicos para el control del ruido como, la dispersión múltiple por ser rígidos, resonancias y absorción [9].

En la primera pantalla, se han utilizado estos dispersores ordenados de forma periódica. En la segunda pantalla, y también utilizando dispersores multifenómeno, se ha cambiado la disposición de los mismos siguiendo geometrías fractales, para como se ha explicado en el Capítulo (4), maximizar el fenómeno de la dispersión Bragg.

Para finalizar el capítulo, se presentan las pruebas acústicas de normalización para la homologación de ambas pantallas acústicas, llevadas a cabo por este grupo de investigación [8].

5.2 Dispersores ordenados periódicamente

El prototipo diseñado, consiste en un ordenamiento periódico 2D formado por dispersores multifenómeno dispuestos en una red triangular. El parámetro de red es $a = 0.28$ m y las direcciones principales de simetría son $\Gamma X(0^\circ)$ y $\Gamma J(30^\circ)$. Para esta constante de red, la primera frecuencia central BG (frecuencia Bragg) en la dirección $\Gamma X(0^\circ)$ es $f_{BG} = 772$ Hz y la segunda $f_{BG} = 1500$ Hz.

En la Figura (5.1) se muestra la sección transversal del dispersor multifenómeno utilizado [9]. Básicamente es un anillo rígido ranurado, cubierto por un material absorbente. Este anillo está formado por tres partes:

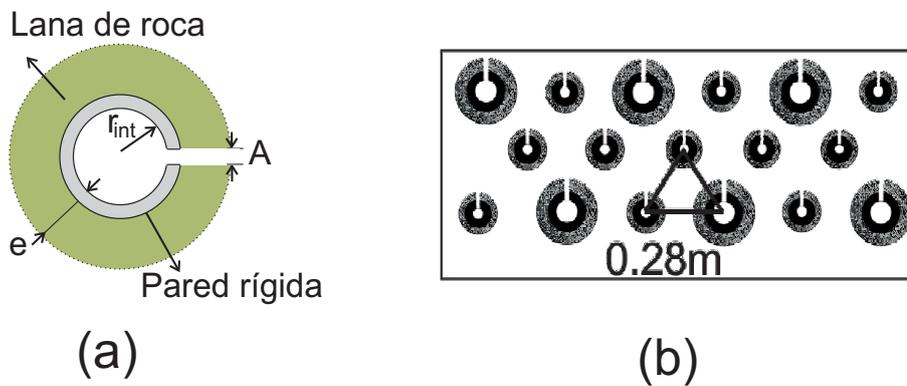


Figura 5.1: Diseño y características acústicas de la pantalla acústica propuesta; (a) Sección transversal del dispersor diseñado, (b) Vista transversal del conjunto analizado [11].

- Núcleo duro: Constructivamente, el núcleo duro sirve como soporte estructural para los dispersores, su interior es una cavidad resonante acústica y su exterior contribuye al fenómeno de interferencias Bragg que aparece cuando todos los dispersores se colocan periódicamente. El material elegido es el hierro debido a sus buenas características de construcción y también porque presenta las propiedades reflectantes apropiadas bajo el punto de vista acústico. Las características geométricas específicas de los dos cilindros de hierro utilizados como núcleos duros internos son: diámetro externo 165 mm (114 mm) y espesor de 4,85 mm (4,5 mm), respectivamente. Los cilindros están ranurados a lo largo de toda su longitud con un tamaño de ranura, A , igual a 20 mm, lo que crea una cavidad resonante.
- El material absorbente: El papel de esta capa consiste en absorber las ondas acústicas, y se coloca de tal manera que cubre al núcleo duro. Se ha elegido lana de roca con 100 kg/m^3 de densidad (Tabla (3.4), que tiene la consistencia

necesaria para ser instalada en condiciones al aire libre, junto con una óptima capacidad acústica. De acuerdo con el tamaño de los núcleos duros, se han utilizado dos diámetros internos diferentes, 169 mm y 114 mm, siendo el espesor igual a 40 mm en ambos casos.

- Chapa perforada: Este elemento no juega un papel estructural pero protege la lana de roca del medio ambiente y tiene una influencia mínima en el proceso de dispersión. Esto preserva el rendimiento acústico tanto del núcleo duro como del material absorbente. Por otra parte, el grado de perforación de esta cubierta externa ha sido elegido para preservar las propiedades de atenuación de la cubierta de lana de roca. Se ha utilizado una placa perforada de hierro de 1 mm de espesor y perforaciones de 5 mm de diámetro. El porcentaje de perforación es de alrededor del 51%.

El diseño de la base donde se colocan los dispersores se ha realizado como sigue: utilizando técnicas de láser, han sido perforadas dos láminas de hierro (espesor 3 mm) siguiendo el patrón de colocación de los dispersores. Las dos láminas han sido colocadas una encima de la otra con una separación de 200 mm de distancia, de tal manera que cada núcleo duro de cualquier cilindro cruza ambas placas. Esto da como resultado una posición vertical perfecta para los dispersores. Se han dispuesto varias barras de hierro verticalmente entre las dos láminas para evitar que el peso de los dispersores deforme la estructura. Para la construcción del dispositivo se han distribuido 14 cilindros multifenómeno, de 247 mm de diámetro exterior y 28 de 196 mm de diámetro exterior. La superficie total ocupada por la muestra es $4,00 \times 0,76 \text{ m}^2$, y la altura de los dispersores es de 3 m. La Figura (5.2) muestra el proceso de fabricación del dispositivo. También en la Figura (5.2(c)) se puede ver el comportamiento acústico de los diferentes elementos que forman los dispersores multifenómeno. Los espectros de atenuación acústica mostrados se han obtenido midiendo en cámara anecoica (3.2) para evitar efectos acústicos indeseados, como los reflejos en las paredes. Se puede observar la transparencia acústica que presenta la chapa perforada en la gama de las frecuencias analizadas, los dos primeros picos de resonancia del núcleo rígido de tamaño mayor (alrededor de 300 Hz y 600 Hz) y de los elementos acústicos activos (absorbente y resonador).

Para los cálculos con FEM (Comsol Multiphysics 3.5a) se ha considerado una fuente puntual. El dominio de la solución se ha discretizado a $8.1 \cdot 10^5$ elementos. Para simular las características de este problema, se ha considerado que las ondas no se reflejan, es decir, la propagación de las ondas se realiza en condiciones de espacio libre (dominio acústico sin límites) (2.5.3.1.2). La resolución de estos tipos de problemas utilizando FEM es sólo posible mediante la aplicación de algunos límites artificiales en el dominio numérico (PML) (2.5.3.1.3). En la Figura (5.3(a)) se muestra el dominio de resolución del problema numérico. El espacio está rodeado

5. Modelo real de pantalla acústica basada en conjuntos de dispersores aislados de segunda generación

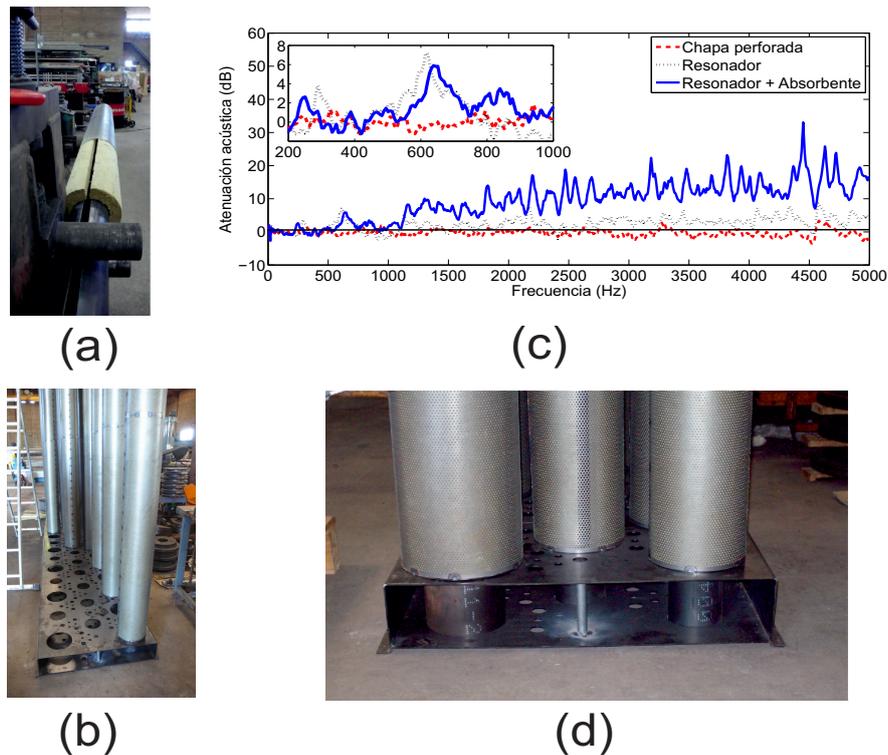


Figura 5.2: Las figuras (a),(b) y (d) muestran el proceso de fabricación de la pantalla acústica basada en cristales de sonido de segunda generación; (c) Espectro de atenuación acústica (IL) para los diferentes elementos que forman los dispersores multifenómeno: con línea discontinua (color rojo) chapa perforada, con línea de puntos (color negro) resonador y con línea continua (color azul) resonador mas absorbente [11].

de cuatro PML para evitar reflexiones de las ondas. En la Figura (5.3(b)) se muestra con detalle, el dispersor utilizado, indicando las partes que lo forman tal y como se ha comentado anteriormente. Los valores de los parámetros geométricos utilizados para la simulación se muestran en la Tabla (5.1).

En la Figura (5.4) se muestra el resultado del espectro de atenuación acústica (IL) de la pantalla triangular diseñada con el receptor situado a 1 m de la misma y para la dirección principal ΓX (0°) de incidencia obtenido mediante la simulación numérica. Se puede observar la existencia de los diferentes picos de atenuación debido a los diferentes mecanismos considerados. Así, los picos de atenuación (1) y (2) son debidos a las resonancias correspondientes a los dos tamaños de las cavidades

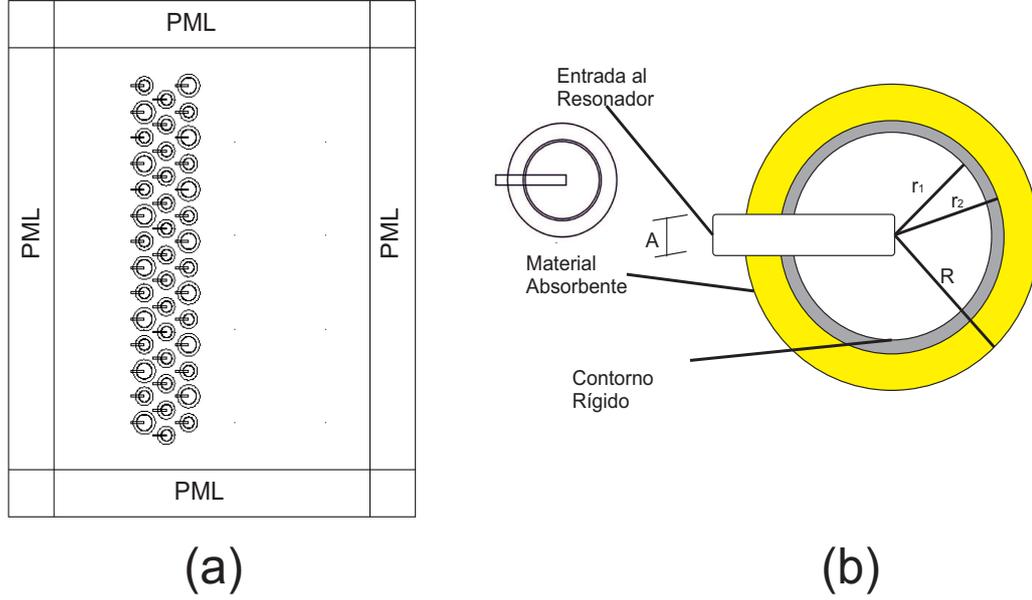


Figura 5.3: (a) Dominio de resolución del modelo numérico (Comsol Multiphysics 3.5a) y (b) modelo del dispersor multifenómeno: A es la anchura del cuello de la cavidad resonante circular de radio r_1 y que está rodeada de una capa rígida, también circular de radio interior r_1 y radio exterior r_2 . La corona de radio interior r_2 y radio exterior R , está formada de material absorbente (lana de roca).

Dispersor	r_1 (cm)	r_2 (cm)	R (cm)	A (cm)
Grande	7.76	8.25	12.45	2
Pequeño	5.7	6.1	9.7	2

Tabla 5.1: Parámetros geométricos del modelo numérico para los dos dispersores multifenómeno utilizados.

de los resonadores considerados. Los picos de atenuación (3) y (4) corresponden a la primera y segunda bandas prohibidas para la dirección de incidencia considerada en la red triangular. Por último, el nivel continuo de atenuación que aparece a partir de 500 Hz en adelante corresponde al efecto del absorbente utilizado en cada cilindro de la estructura. Para evaluar la respuesta acústica de la barrera diseñada, se ha incluido en la Figura (5.4) el nivel de atenuación teórico para un pantalla acústica clásica con la misma altura y anchura usando el método de Maekawa[71]. Se puede observar el aumento de la atenuación de la pantalla diseñada, respecto a una clásica de las mismas dimensiones externas, en la mayoría del rango de frecuencias considerado en este estudio previo.

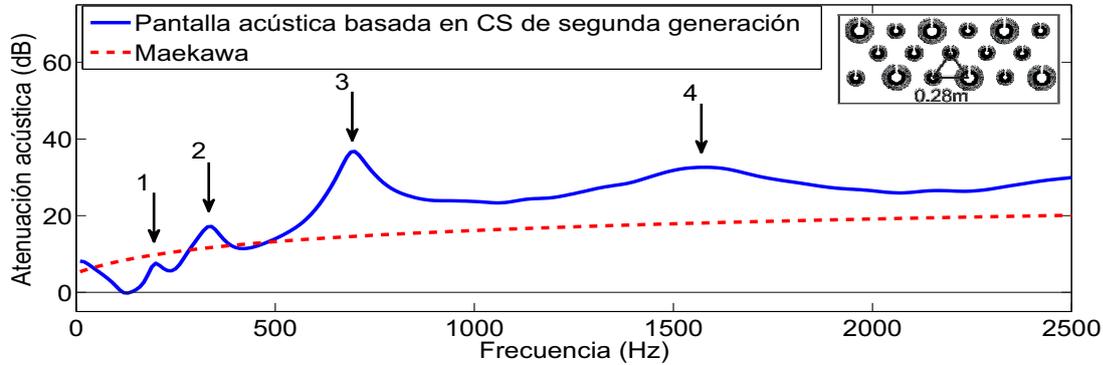


Figura 5.4: Espectro de atenuación acústica (IL) en el punto de medida simulado mediante FEM a 0° (ΓX) de incidencia. El recuadro muestra una vista transversal del conjunto analizado [11].

Hay que destacar que el comportamiento resonante del dispersor está diseñado teniendo en cuenta su abertura A , el radio interior r_{rint} y el espesor de la abertura, $\Delta e + \Delta r$ [9]. El material absorbente añadido produce un incremento del espesor de la cavidad que hace que el pico debido a la frecuencia de resonancia se desplace en el espectro de atenuación hacia bajas frecuencias debido a la modificación de la geometría del resonador, siendo este un resultado positivo ya que proporciona otra herramienta de diseño para atenuar bajas frecuencias. Para más información sobre los dispersores multifenómeno, se puede consultar la referencia [9].

En resumen se observa una suma de los tres efectos de control de ruido, la dispersión múltiple de los cilindros rígidos, la resonancia debido a la abertura longitudinal realizada en cada uno de ellos y la capacidad absorbente del material que rodea a los dispersores.

5.3 Dispersores ordenados de forma cuasifractal

Con el fin de maximizar el mecanismo de la dispersión múltiple se ha diseñado una barrera acústica utilizando un ordenamiento de dispersores basado en el fractal "triángulo de Sierpinski" visto en la sección 4.2.1.

La base geométrica para la construcción de la pantalla, que se puede observar en la Figura (5.5), es el resultado de un ordenamiento no periódico de los dispersores. Este ordenamiento cuasi-fractal lleva a una estructura final, con forma externa rectangular, formada por cilindros de cuatro diámetros diferentes, dos de ellos con las características de los dispersores mencionados en la sección anterior (5.2) y los otros dos más pequeños simplemente formados por cilindros rígidos. Los dispersores más grandes están diseñados de forma que trabajen como resonadores, presenten

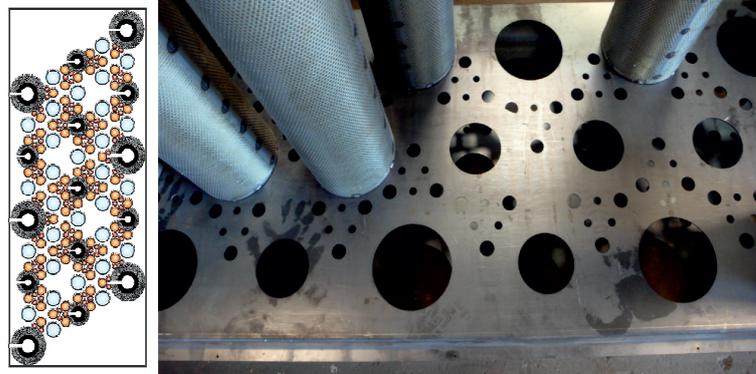


Figura 5.5: Izquierda: Representación en planta de la disposición de los cilindros en la pantalla acústica basada en geometrías fractales. Derecha: Detalle de la base de la estructura donde se observa el ordenamiento cuasi-fractal seguido.

comportamiento absorbente y actúen como elementos de una red que añada el fenómeno acústico de la dispersión múltiple, debido a su rigidez. Estos dispersores tienen tres partes: núcleo, cubierta y chapa perforada, que son los que se han descrito con detalle en la sección anterior. Cada tamaño de los dispersores así construido introduce un pico de resonancia situado en una frecuencia distinta. Los dispersores más pequeños están formados únicamente por hierro y contribuyen exclusivamente al fenómeno de la dispersión múltiple.

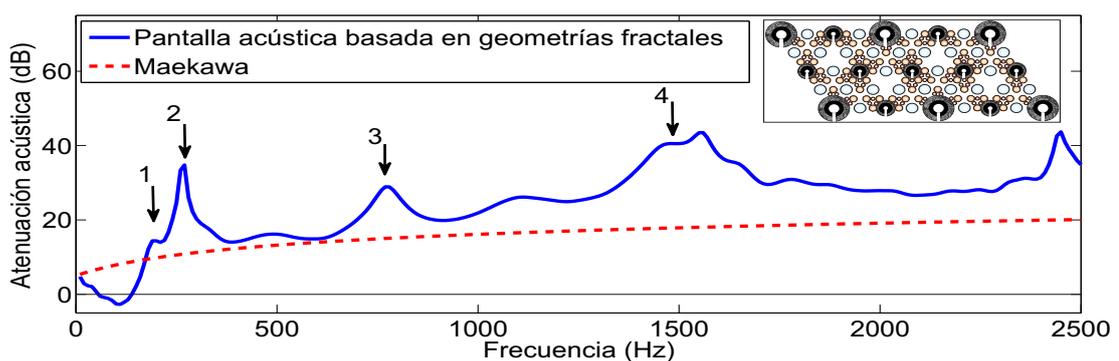


Figura 5.6: Espectro de atenuación acústica calculado en un punto situado a 1 m detrás de la barrera, medido en banda fina y para la orientación 0° . El recuadro muestra una vista transversal del conjunto analizado [8].

Los cálculos con FEM (Comsol Multiphysics 3.5a) se han realizado con el modelo numérico presentado en la sección anterior. Se ha sustituido la muestra por la estructura cuasi-fractal manteniendo las mismas condiciones de contorno. En la

Figura (5.6) se puede observar un ejemplo de simulación numérica del espectro de atenuación acústica calculado a un metro de distancia para la pantalla diseñada y a incidencia 0° . En este se observa la atenuación producida por las cavidades resonantes (220 y 310 Hz), los dos primeros picos de atenuación debidos a la dispersión múltiple (800 y 1600 Hz) y el aumento en el nivel de atenuación (a partir de 500 Hz) debida al material absorbente.

Este nuevo prototipo de Barrera Acústica, basado en cristales de sonido, donde se maximizan las reflexiones Bragg mediante ordenamientos basados en geometrías fractales con el fin de aumentar el ancho de banda de atenuación, y que además incluye los dispersores multifenómeno, se les denomina Barreras Acústicas basadas en Cristales de Sonido ordenados de forma Fractal (FSCAB)¹ [8].

Las dos barreras descritas, si aspiran a competir en el mercado, al igual que cualquier otro tipo de barrera acústica, debe de pasar un proceso de homologación acústico. Dicho proceso se ha llevado a cabo en la empresa homologadora Applus+ (Barcelona), compañía dedicada a ensayo, inspección, certificación y servicios tecnológicos. En la sección siguiente se va a ver con detalle, el proceso de homologación de ambas barreras.

5.4 Homologación de la pantalla acústica basada en conjunto de dispersores de segunda generación.

Se han realizado dos tipos de ensayos con el fin de caracterizar acústicamente las barreras diseñadas. Las pruebas, se utilizan para caracterizar barreras acústicas convencionales para el ruido de tráfico de acuerdo con la norma europea. En particular, la norma EN 1793: 1997 en relación con los dispositivos para la reducción del ruido de tráfico por carretera [72] [73] [74], método de prueba para la determinación del rendimiento acústico: Parte 1: características intrínsecas de absorción acústica (EN 1793-1: 1997), Parte 2: características intrínsecas de aislamiento acústico a ruido aéreo (EN 1793-2: 1997), y la Parte 3: espectro de ruido de tráfico normalizado (EN 1793-3: 1997). Las dos primeras normas definen la prueba realizada, en relación con la absorción de ruido y su comportamiento con respecto a la propagación al ruido aéreo, mientras que la tercera define el espectro de ruido de tráfico normalizado, que se utiliza como una referencia para obtener una clasificación de las barreras sobre la base de sus características acústicas. Las pruebas se han llevado a cabo en el laboratorio de la empresa mencionada anteriormente, para este tipo de pruebas, Applus+ (Barcelona). En esta sección se van a desarrollar brevemente estas pruebas, además de mostrar los resultados obtenidos por las dos barreras: la primera con dispersores ordenados periódicamente y la segunda con dispersores ordenados

¹En inglés Fractal-based Sonic Crystal Acoustic Barriers.

de forma cuasi-fractal.

5.4.1 Prueba 1: características intrínsecas de absorción acústica: EN 1793-1:1997

El objetivo de esta prueba consiste en medir el coeficiente de absorción acústico (α_S) en una cámara de reverberación y evaluar los resultados de acuerdo con los estándares de uso. Estos son la norma ISO 354:2004 (ISO, 2003), donde determina el procedimiento de prueba [75], y la ISO 11654:1997 (ISO, 1997) para evaluar los resultados y clasificar el rendimiento acústico de la barrera [76].

La norma EN 1793-1:1997 especifica la situación del dispositivo (que debe estar situado junto a una de las paredes de la cámara de reverberación), y el método de fijación y el montaje debe ser el mismo que se utiliza en la práctica. Durante toda la prueba se utiliza ruido rosa. Frente al dispositivo, han sido colocados cinco micrófonos en los puntos M1, M2, M3, M4 y M5 (véase la Figura (5.7a)). A lo largo de las medidas, la fuente de sonido omnidireccional, se sitúa en las posiciones S1 y S2, como se puede ver en la esquema mostrado en la Figura (5.7a). Para cada tercio de octava, se obtienen en el rango de 100 Hz a 5000 Hz los tiempos de reverberación en función de la frecuencia.

El área de absorción equivalente (A_T), para cada tercio de octava, se ha calculado utilizando la ecuación de Sabine:

$$A_T = A_2 - A_1 = 55.3V\left(\frac{1}{c_2T_2} - \frac{1}{c_1T_1}\right) - 4V(m_2 - m_1) \quad (5.1)$$

donde c_i es la velocidad de propagación del sonido en el aire para la temperatura t ; V es el volumen de la cámara de reverberación en vacío; T_i es el tiempo de reverberación de la cámara, que varía con la frecuencia, y m es el coeficiente de absorción acústica de la cámara de reverberación calculado de acuerdo con la Norma Internacional ISO 9613-1 (ISO, 1993), teniendo en cuenta las condiciones climáticas de la cámara durante las mediciones [77]. Los subíndices 1 y 2 corresponden a la situación con y sin el dispositivo, respectivamente.

El coeficiente de absorción acústica (α_S), se obtiene a partir de la expresión:

$$\alpha_S = A_T/S \quad (5.2)$$

donde S es la superficie de la barrera y A_T el área de absorción equivalente. Este parámetro también depende de la frecuencia.

Con el fin de clasificar la barrera con respecto a su características de absorción acústica, se debe evaluar el índice de absorción acústica, DL_α . A partir de la norma EN 1793-1: 1998, DL_α se calcula mediante la expresión:

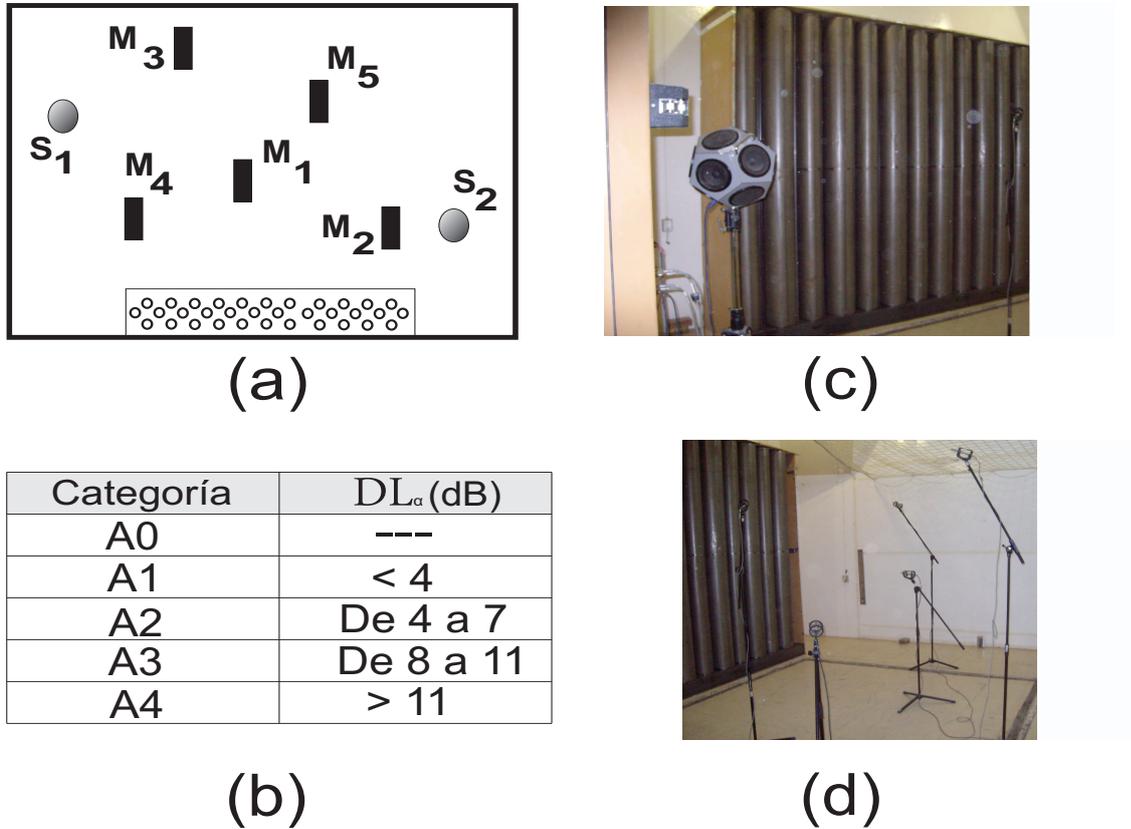


Figura 5.7: (a) Esquema de los puntos de medida (M_1 a M_5) y posición de las fuentes (S_1 y S_2). (b) Categoría y clasificación de barreras acústicas en función de DL_α , según la norma EN 1793-1: 1997. (c) Detalle de la disposición de la barrera acústica a valorar en la cámara reverberante. (d) Detalle de posición de los micrófonos justo en el momento de la medida [11].

$$DL_\alpha = -10 \log \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{18} \alpha_{s_i} 10^{0.1L_i}}{\sum_{i=1}^{18} 10^{0.1L_i}} \right) \quad [dB] \quad (5.3)$$

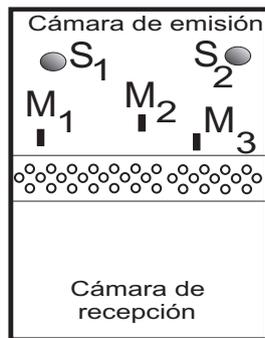
donde L_i es el nivel de ruido en cada banda de tercio de octava del espectro de ruido de tráfico normalizado (dB) propuesta por el norma EN 1793-3 1997.

5.4.2 Prueba 2: características intrínsecas de aislamiento acústico a ruido aéreo: EN 1793-2:1997

Los procedimientos de medida para realizar esta prueba se indican en la norma EN 1793-2:1997, y el índice de evaluación del aislamiento acústico a ruido aéreo

5.4. Homologación de la pantalla acústica basada en conjunto de dispersores de segunda generación.

DL_R (dB) se calcula de acuerdo con la norma ISO 10140:2011 (ISO, 2010). Las medidas se han llevado a cabo en una cámara de transmisión donde la muestra se debe instalar de la misma manera a como se utiliza en la práctica. La pantalla acústica analizada se sitúa en el centro de la cámara cerrando totalmente el espacio y dividiendo a ésta en dos partes. En la Figura (5.8) se muestran algunos detalles de la configuración experimental utilizada. En la cámara de emisión (una de las dos partes de la cámara) se genera un nivel de presión sonora de forma que en la cámara de recepción (la otra parte de la cámara) el nivel de sonido debe ser de 15 dB mayor que el ruido de fondo para todas las frecuencias de la banda analizada (de 110 Hz a 5000 Hz). Un esquema del montaje experimental utilizado se muestra en la Figura (5.8(c)).



(a)

Categoría	DL_R (dB)
B0	---
B1	< 15
B2	De 15 a 24
B3	>24

(b)



(c)



(d)

Figura 5.8: (a) Esquema de los puntos de medida (M_1 a M_3) y posición de las fuentes (S_1 y S_2). (b) Categoría y clasificación de barreras acústicas en función de DL_R , según la norma EN 1793-2:1997. (c) y (d) Detalle de la disposición de la barrera acústica a valorar en la cámara de transmisión y posición de los micrófonos justo en el momento de la medida [11].

Con estas condiciones, el nivel de presión de sonido (dB) se mide tanto en la

cámara de emisión (L_1) como en la de recepción (L_2) para tres posiciones de los micrófonos. La diferencia (D) se puede calcular, a partir de estos dos niveles promedio:

$$D = L_1 - L_2 \quad (5.4)$$

La diferencia D se debe corregir usando un factor que depende del tiempo de reverberación (T)², del volumen de la cámara de recepción (V) y de la superficie común de separación entre las dos cámaras, es decir, la superficie de la muestra (S). Por lo tanto, este parámetro corregido, que se denomina índice de reducción acústica, R , resulta ser:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log\left(\frac{ST}{0.163V}\right) \quad (5.5)$$

Por último, el índice de evaluación del aislamiento al ruido aéreo DL_R , se calcula mediante la siguiente expresión (EN 1793-2:1997):

$$DL_R = -10 \log \left| \frac{\sum_{i=1}^{18} 10^{0.1L_i} 10^{0.1R_i}}{\sum_{i=1}^{18} 10^{0.1L_i}} \right| \quad [dB] \quad (5.6)$$

donde L_i representa el nivel de ruido en cada banda de tercio de octava del espectro de ruido de tráfico normalizado (dB) dada por la norma EN 1793-3: 1997. El valor de este índice permite clasificar la capacidad de aislamiento acústico a ruido aéreo de la barrera analizada.

5.4.3 Resultados de la homologación

5.4.3.1 Pantalla acústica basada en conjunto de dispersores de segunda generación con ordenamiento periódico

En la Figura (5.9(a)) se muestra la variación de α_s en función de la frecuencia, en bandas de tercios de octava³, para la pantalla acústica basada en conjunto de dispersores de segunda generación con ordenamiento periódico. Según la expresión (5.3), el valor del parámetro DL_α para esta pantalla es, $DL_\alpha = 8$ dB. La clasificación de la pantalla bajo el punto de vista de la absorción, tal y como aparece en el estándar EN 1793-1:1997 resulta ser *A3*.

En la Figura (5.9(b)) se muestra la variación de R en función de la frecuencia para la misma pantalla. Según la expresión (5.6), el valor del parámetro DL_R para

²El tiempo de reverberación de la sala se define como el tiempo necesario para que el nivel de presión acústica medido disminuya 60 dB una vez parada la fuente de ruido.

³Las bandas de tercios de octava son aquellas en las que $f_s = \sqrt[3]{2}f_i$, siendo f_s y f_i las frecuencias superior e inferior que definen la banda respectivamente

5.4. Homologación de la pantalla acústica basada en conjunto de dispersores de segunda generación.

esta pantalla es, $DL_R = 20$ dB. El valor de este índice permite clasificar la capacidad de aislamiento acústico a ruido aéreo de la pantalla analizada. La clasificación de la pantalla resulta ser *B2* según especifica la norma EN 1793-2:1997.

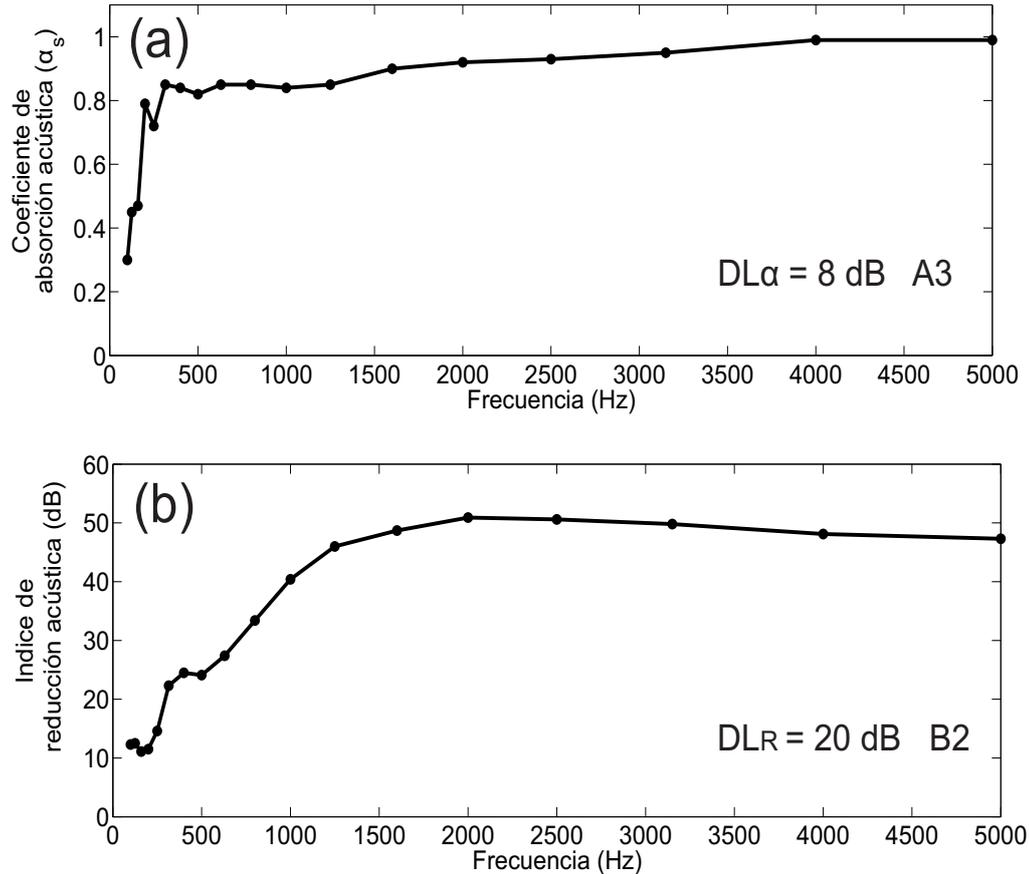


Figura 5.9: Resultados del prototipo de la pantalla basada en ordenamientos periódicos. (a) Variación de α_s en función de la frecuencia en bandas de tercios de octava. (b) Variación del índice R en función de la frecuencia en bandas de tercios de octava [11].

5.4.3.2 Pantalla acústica basada en conjunto de dispersores de segunda generación con ordenamiento cuasi-fractal

En la Figura (5.10(a)) se muestra la variación de α_s en función de la frecuencia para la pantalla acústica basada en conjunto de dispersores de segunda generación con ordenamiento cuasi-fractal. Según la expresión (5.3), el valor del parámetro DL_α resulta ser $DL_\alpha = 8$ dB para esta pantalla. La clasificación de la pantalla bajo el

5. Modelo real de pantalla acústica basada en conjuntos de dispersores aislados de segunda generación

punto de vista de la absorción, tal y como aparece en el estándar EN 1793-1:1997 resulta ser *A3*.

En la Figura (5.10(b)) se muestra la variación de R en función de la frecuencia para la misma pantalla. Según la expresión (5.6), el valor del parámetro DL_R es, en este caso, $DL_R = 22$ dB. El valor de este índice permite clasificar la capacidad de aislamiento acústico a ruido aéreo de la pantalla analizada. La clasificación de la pantalla resulta ser *B2* según especifica la norma EN 1793-2:1997.

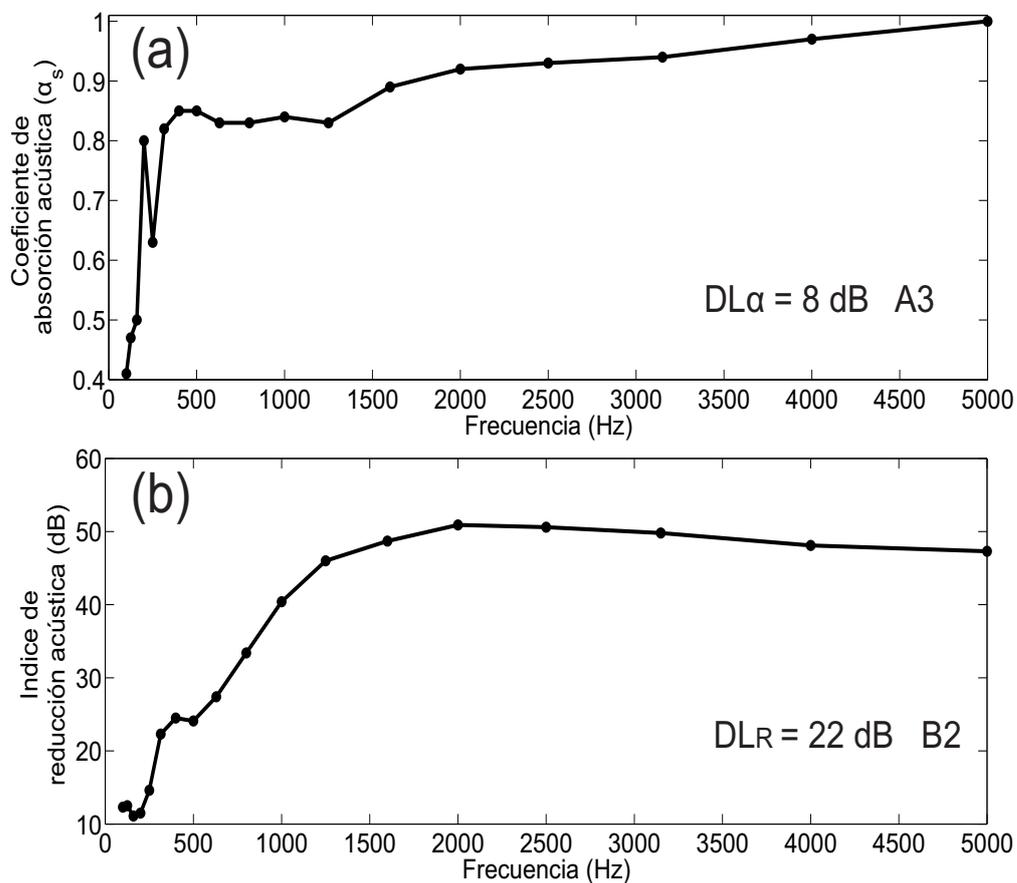


Figura 5.10: Resultados del prototipo de la pantalla basada en geometrías fractales. (a) Variación de α_s en función de la frecuencia en bandas de tercios de octava. (b) Variación del índice R en función de la frecuencia en bandas de tercios de octava [8].

5.5 Conclusiones

Con el fin de construir una pantalla acústica alternativa a las pantallas clásicas se han diseñado dos estructuras formadas por dispersores de paredes rígidas, que tienen cavidades resonantes y que están envueltos en material absorbente. Estas estructuras muestran una superposición constructiva de los mecanismos físicos que intervienen en la atenuación del sonido (dispersión múltiple, resonancia y absorción) en el rango audible. La primera pantalla se ha realizado siguiendo ordenamientos periódicos, mientras que para la segunda pantalla se ha seguido un ordenamiento fractal, con el fin de maximizar el efecto de la dispersión múltiple.

Los resultados del índice de absorción acústica DL_α (dB) y del índice de evaluación del aislamiento a ruido aéreo DL_R (dB) para ambas pantallas homologadas se muestran en la Tabla (5.2). El valor del índice de evaluación del aislamiento a ruido aéreo es mayor para el caso de la pantalla cuasi-fractal ya que al contener más dispersores que la pantalla con ordenamiento periódico aumenta la dispersión múltiple disminuyendo la transmisión.

Ordenamiento	DL_α (dB)	DL_R (dB)
Cristalino	8	20
Cuasi-fractal	8	22

Tabla 5.2: Resultados Homologación para ordenamiento cristalino y ordenamiento cuasi-fractal.

En primer lugar y siguiendo ordenamientos periódicos, se ha diseñado un prototipo experimental de pantalla que produce niveles de atenuación comparables a los de las pantallas tradicionales, pudiendo competir con éstas bajo el punto de vista acústico. Esta pantalla se ha ensayado en una sala reverberante (ISO 1793-1:1998) para verificar el nivel de absorción de la pantalla y en una sala de transmisión (ISO 1793-2:1998) para clasificarla ante el aislamiento a ruido aéreo. Los resultados obtenidos por este prototipo experimental han sido clasificados en *A3* y *B2* respectivamente.

En segundo lugar, se ha diseñado un prototipo experimental de pantalla acústica basada en dispersores aislados siguiendo ordenamientos fractales. Esta pantalla se ha ensayado en una sala reverberante (ISO 1793-1:1998) para verificar el nivel de absorción de la pantalla y en sala de transmisión (ISO 1793-2:1998) para clasificarla ante el aislamiento a ruido aéreo. Los resultados obtenidos por este prototipo experimental han sido clasificados en *A3* y *B2* respectivamente.

La pantalla acústica basada en dispersores acústicos de segunda generación y la basada en ordenamientos fractales homologadas permiten ser utilizadas, pues, como una alternativa a las pantallas acústicas tradicionales en determinadas condiciones y

5. Modelo real de pantalla acústica basada en conjuntos de dispersores aislados de segunda generación

supuestos, introduciendo un avance tecnológico en el campo de las pantallas acústicas donde el diseño geométrico está directamente relacionado con el control de ruido conseguido por las mismas.

La normativa actual no está diseñada para el tipo de pantallas que aquí se han homologado, aún así, los resultados obtenidos son competitivos acústicamente con las pantallas tradicionales. Incluso el diseño de los dos prototipos se ha realizado para que el control del ruido por debajo de 1000 Hz sea efectivo, mientras que la norma prima sobre todo las frecuencias próximas a 1000 Hz.

La pantalla acústica basada en conjunto de dispersores de segunda generación con ordenamiento cuasi-fractal ha sido protegida y sus derechos corresponden a la Universitat Politècnica de València (ref:R13346-2009).

Capítulo 6

Difracción en el borde superior de pantallas acústicas formadas por conjuntos de dispersores aislados

6.1 Introducción

Una de las principales características en el análisis de las pantallas acústicas basadas en cristales de sonido es la de considerar la longitud de los cilindros como infinita y, por lo tanto, la propagación de la onda sólo se analiza en planos donde existe periodicidad. Con este enfoque, el problema real que tiene tres dimensiones se convierte en un caso de dos dimensiones, lo que implica algunas ventajas tales como el uso de modelos simplificados para explicar con buenos resultados la realidad física, además de presentar un bajo coste computacional. Sin embargo, la adaptación de estos dispositivos para aplicaciones tecnológicas concretas implica algunas consideraciones que hasta ahora no se han tenido en cuenta y que sólo pueden ser introducidas con el modelo real en tres dimensiones. Por lo tanto la longitud de los cilindros para un caso real es finita y, como consecuencia, las técnicas existentes no explican por completo esta nueva situación ya que aparece un nuevo fenómeno acústico, la difracción en los bordes superiores de los cilindros.

Aunque algunas líneas de investigación han sido desarrolladas para establecer la respuesta acústica de un cilindro con longitud finita [45], parece necesaria la caracterización de la difracción en condiciones de campo cercano en redes de cilindros finitos y así poder determinar la respuesta acústica real de tales sistemas.

En la Figura (6.1) se representa una pantalla acústica formada por dispersores cilíndricos finitos de altura h en tres dimensiones. Se considera que es lo suficiente larga para no considerar los bordes laterales. Por lo tanto, y debido a condiciones de simetría, sólo se tienen en cuenta la difracción Bragg que se produce en el plano OXY y la difracción por el borde superior que se produce en el plano OXZ .

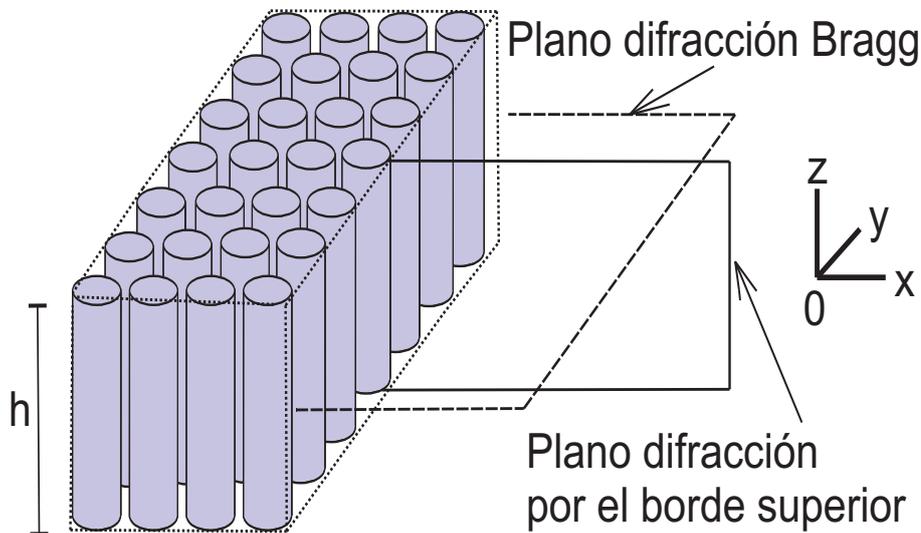


Figura 6.1: Con línea discontinua se muestra el plano donde se realiza el análisis de la difracción Bragg y con línea continua el plano donde se realiza el análisis de la difracción por el borde superior [10]

En este capítulo, se analiza el rendimiento acústico de un cristal de sonido 2D formado por cilindros rígidos con longitud finita en el aire, para caracterizar el campo resultante debido a la interacción entre la difracción Bragg y la difracción por el borde superior de la pantalla. Se ha utilizado un modelo numérico 3D simplificado realizado con FEM, donde las predicciones que se obtienen son validadas por resultados experimentales precisos medidos en condiciones controladas [10].

6.2 Difracción en el borde superior de una pantalla acústica basada en cilindros rígidos ordenados periódicamente

6.2.1 Modelo numérico

Para obtener las predicciones numéricas se ha utilizado el software comercial COMSOL 3.5a. A continuación se detalla la geometría utilizada, las condiciones de contorno impuestas y los parámetros más importantes de la resolución numérica.

6.2.1.1 Geometría

Para la resolución del problema numérico se ha definido la geometría que se muestra en la Figura (6.2(a)). Se ha diseñado un cristal de sonido 2D con 4 filas con el fin de obtener un alto nivel de atenuación. El dominio en el que se obtiene la solución está formado por 4 cilindros con radio $r = 0.09$ m y altura $h = 1.20$ m, separados por la constante de red, $a = 0.22$ m, y confinados completamente entre dos paredes reflectantes, también separadas por una constante de red, siendo paralelas a la dirección de propagación de la onda plana incidente que viaja de izquierda a derecha. Con estas condiciones, las ondas dispersadas por los cilindros son reflejadas por las paredes que reproducen el efecto de un cristal de sonido 2D semi-infinito formado por 4 filas de cilindros dispuestos en una red cuadrada con paso de red $a = 0.22$ m. Al mismo tiempo, la onda plana incidente no se refleja por las paredes. Esta geometría permite el estudio de redes semi-infinitas usando un volumen reducido de el dominio numérico disminuyendo así el coste computacional [79]. Sólo se analiza la incidencia en la dirección principal ΓX (0°), siendo la frecuencia Bragg para esta orientación 772 Hz.

6.2.1.2 Condiciones de contorno

Como se puede observar en la Figura (6.2(a)), tres de los límites del dominio están rodeados de capas perfectamente adaptadas (PML) (2.5.3.1.3) para evitar reflexiones. Los cilindros se consideran acústicamente rígidos y, como consecuencia, a las superficies de los mismos se les aplica la condición de contorno Neumann (velocidad del sonido cero) (2.5.3.1.2). Por último, en el límite inferior de la zona posterior de la pantalla, se considera condición de impedancia para así conseguir simular condición de transmisión libre (2.5.3.1.2).

Existe en este último límite una PML parcialmente situada para evitar la difracción en la parte inferior de los bordes de los cilindros. Hay que tener en cuenta que tanto la geometría como las condiciones de contorno del modelo han sido diseñadas de tal forma que sólo los dos efectos en estudio (difracción Bragg y difracción en el borde superior) aparezcan en el dominio, evitando algunos otros efectos que podrían enmascarar los resultados. Por lo tanto, la consideración de un cristal de sonido semi-infinito evita la existencia de otros efectos físicos no deseados, tales como la difracción en el borde lateral de la estructura. Así mismo la condición de contorno de impedancia en el límite inferior evita la existencia de reflexiones no deseadas en el dominio de interés (zona de sombra). Esta geometría ha sido utilizada con éxito en algunas investigaciones que resuelven situaciones relacionadas con cristales de sonido 2D [79].

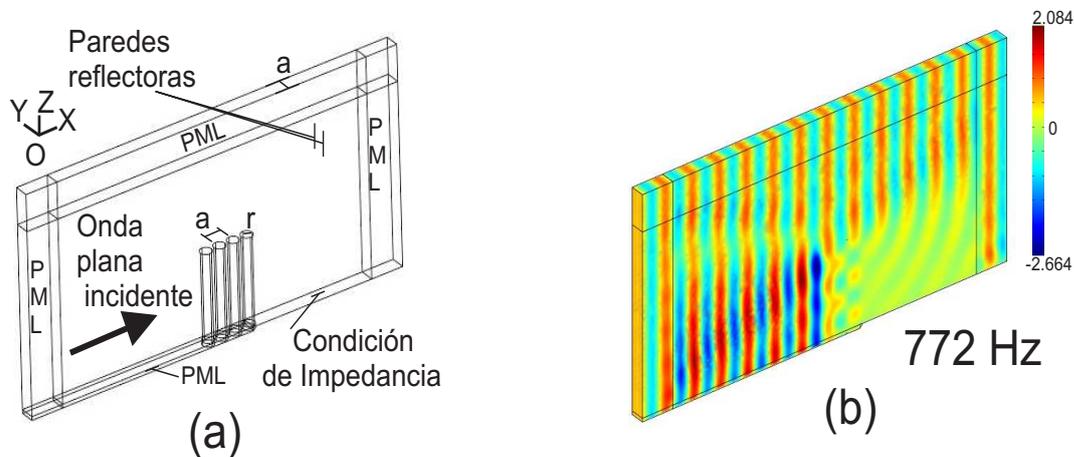


Figura 6.2: (a) Geometría y dominio numérico para el análisis de la difracción por el borde superior de una pantalla acústica basada en cilindros rígidos ordenados periódicamente y (b) simulación numérica del problema de dispersión para la frecuencia 772 Hz. Se representa el mapa de presión total real, $Re(P)$ [10].

6.2.1.3 Parámetros de la solución numérica

Se ha utilizado el módulo de COMSOL 3.5a, onda dispersada (SW), que resuelve el problema mediante la onda dispersada p_s (2.5.3.1.4). Por lo tanto, el campo acústico total se obtiene mediante la suma de la onda incidente con la onda dispersada. Como consecuencia de este procedimiento, la PML sólo actúa sobre la onda dispersada. En la Figura (6.2(b)) se muestra un ejemplo de la simulación numérica a 772 Hz. El problema resuelto tiene $1.14 \cdot 10^6$ grados de libertad, y se han utilizado para resolverlo $1.2 \cdot 10^6$ elementos. Hay que tener en cuenta que tanto el modelo numérico como el experimental tienen las mismas características geométricas, por lo que las predicciones obtenidas mediante elementos finitos se puede comprobar con los resultados experimentales. Sin embargo, van a aparecer algunas diferencias en la comparación, debido al tamaño finito del modelo experimental.

6.2.2 Montaje experimental

Los experimentos, en condiciones controladas, se han realizado en cámara anecoica, tal y como se ha explicado en el Capítulo (3). La fuente de sonido direccional, está situada a 1m de la muestra, con el fin de que la onda incidente sobre ella sea plana. Esta fuente emite de forma continua ruido blanco.

Utilizando el sistema de posicionamiento 3DREAMS (3.3), se ha mapeado la zona de tamaño $0.1920 m^2$ tal y como se muestra en la la Figura (6.3). Estas medidas se toman en pasos de 0.03 m. Hay que tener en cuenta que las medidas se

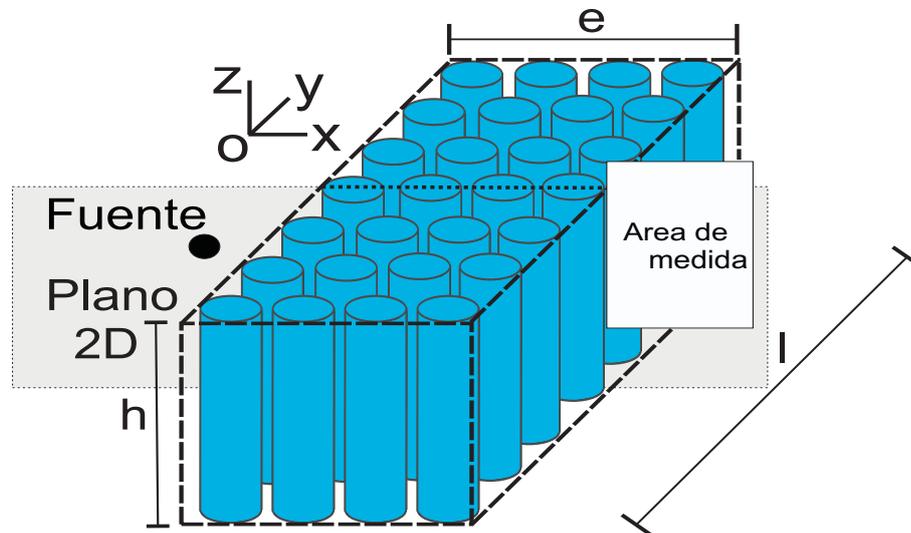


Figura 6.3: Montaje experimental [10].

han tomado en el rectángulo gris marcado detrás de la pantalla y que se muestra en la Figura (6.3). De esta forma la línea fuente-receptor es siempre perpendicular a la longitud de la muestra.

Con el fin de poder comparar los resultados obtenidos de la pantalla acústica basada en cristales de sonido con los resultados de una pantalla continua clásica, se hace coincidir las dimensiones externas de ambas pantallas (ver en la Figura (6.3) la línea discontinua superpuesta a la pantalla formada por dispersores cilíndricos rígidos) siendo estas dimensiones: $h = 1.20$ m, $e = 0.84$ m y $l = 1.50$ m. Esta pantalla, se ha construido con 28 cilindros dispuestos de forma periódica en red cuadrada. Los cilindros (7 columnas \times 4 filas), son rígidos de radio 0.09 m y la constante de red utilizada tiene el valor 0.22 m.

6.2.3 Análisis de los resultados

Con los resultados que se muestran a continuación, se caracteriza el campo acústico en la zona de sombra de una pantalla acústica basada en cristales de sonido 2D donde los efectos estudiados, difracción Bragg y difracción en el borde superior, actúan de manera conjunta. Debido al interés por caracterizar el patrón del campo difractado, se ha seleccionado para esta investigación una gama de frecuencias en las que el efecto de difracción Bragg se maximiza, de modo que la onda transmitida a lo largo de la 2DSC se reduce al mínimo en la zona de sombra. Esta gama de frecuencias se define en este estudio por el primer BG del 2DSC, y se ha elegido específicamente la primera frecuencia Bragg (772 Hz) en la dirección de propagación principal ΓX (0°). Hay que tener en cuenta que las frecuencias dentro del BG no

6. Difracción en el borde superior de pantallas acústicas formadas por conjuntos de dispersores aislados

son canceladas por completo cuando se transmiten a lo largo del cristal debido al número finito de filas del mismo, y por lo tanto el campo difractado 2DSC en la zona de sombra puede ser perturbado por la onda transmitida. Aun así, este campo puede ser fácilmente caracterizado a estas frecuencias, como se verá más adelante.

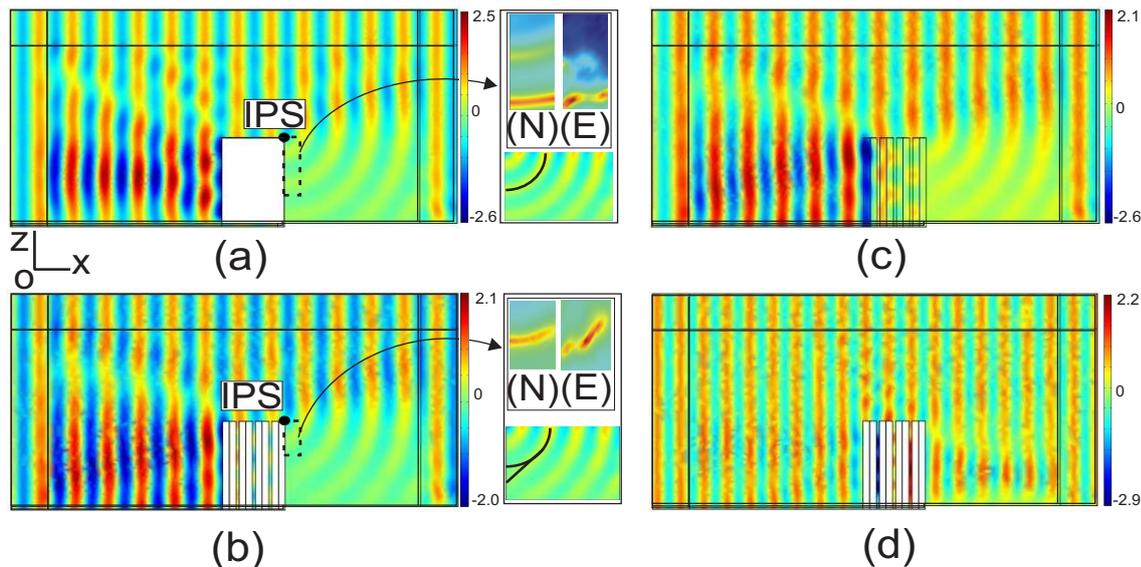


Figura 6.4: Resultados numéricos del campo de presión acústico. (a) Pantalla acústica rígida continua semi-infinita obtenida con modelo 2D con las dimensiones externas igual a la de la pantalla de SC. (b) 2DSC semi-infinito para $y = a/2$ m a 772 Hz. En ambas figuras, en la parte superior se muestra un recuadro que representa la comparación de la atenuación acústica (IL) entre el numérico (N) y el experimental (E) en el área señalada con línea discontinua negra en las figuras (a) y (b). En la parte inferior se muestra el detalle de la zona de sombra. La línea continua negra muestra el patrón circular del campo acústico en la zona de sombra. (c) 2DSC semi-infinito para $y = 0.1a$ m a 772 Hz. (d) 2DSC semi-infinito para $y = a/2$ m a 1100 Hz. Los resultados para el sistema periódico han sido obtenidos utilizando el modelo 3D desarrollado. En todos los casos se dibuja la presión total, $Re(p_0 + p_s)$ [10].

En la Figura (6.4(a)) se presenta la simulación numérica, a 772 Hz, del campo difractado en la zona de sombra de una pantalla rígida continua semi-infinita con el mismo ancho externo que el 2DSC considerado. La representación de una sección transversal (caso 2D) de la pantalla es suficiente para comprobar el patrón circular clásico del campo difractado, cuyo origen se encuentra en la IPS de la pantalla, debido a que la longitud de onda considerada es mayor que el espesor de la pantalla. Un detalle del campo puede ser visto en el recuadro de la parte inferior de la Figura (6.4(a)). La forma de este patrón se puede entender fácilmente teniendo en

cuenta tanto el Principio de Huygens como la longitud semi-infinita de la pantalla. Por otro lado, en la Figura (6.4(b)) se muestra el plano OXZ la simulación numérica a la frecuencia de 772 Hz para la 2DSC semi-infinita en $y = a/2$ m obtenida mediante el uso del modelo numérico expuesto. En la Figura (6.4(b)) se puede observar la interacción entre los campos transmitido y difractado: la máxima presión del campo presenta forma circular, característico de un campo difractado, cerca del extremo superior del último cilindro, de modo que este punto actúa como el IPS del 2DSC. Sin embargo, al desplazarse lejos del IPS, la presión difractada disminuye con el patrón de una onda cilíndrica y el campo transmitido prevalece, aunque esta última contribución es pequeña porque el análisis se centra en la frecuencia Bragg. Por lo tanto, la presión total del campo está dada por una combinación de ambos efectos, lo que da como resultado la forma mostrada en la Figura (6.4(b)). En el recuadro de la parte inferior de la Figura (6.4(b)) se puede ver con más detalle la parte analizada.

Para comprobar estos resultados experimentalmente se ha medido la atenuación acústica en las áreas marcadas con una línea negra discontinua que se puede ver en la Figura (6.4(a)) y en la Figura (6.4(b)). La atenuación acústica está dada por el parámetro pérdida por inserción (IL), ya comentado en la sección (2.1). Entonces

$$IL = 20 \log_{10} \left| \frac{P_{directa}}{P_{interferida}} \right| = 20 \log_{10} \left| \frac{p_0}{p_0 + p_s} \right| \quad (6.1)$$

donde p_0 y p_s son las presiones directa y dispersada, respectivamente.

En el recuadro de la parte superior de la Figura (6.4(a)) y de la Figura (6.4(b)) se muestra los mapas atenuación acústica (IL) obtenidos a 772 Hz para el caso numérico y experimental tanto para la pantalla clásica como para la pantalla basada en cristales de sonido 2DSC. Teniendo en cuenta las diferencias geométricas entre el modelo numérico semi-infinito y el tamaño finito del montaje experimental en ambos casos, se puede ver que los resultados son acordes. Estos resultados permiten la validación del modelo numérico 3D desarrollado.

El patrón del campo de presión completo para el 2DSC en la zona de sombra se mantiene en la dirección OY , como se puede observar en la Figura (6.4(c)), donde se presenta un mapa de presión en OXZ $y = 0.1a$ m. Este hecho se puede explicar, como en el caso de una pantalla rígida continua, por ser la muestra de naturaleza semi-infinita. Por otro lado, el patrón de presión para la interacción difracción Bragg-difracción por el borde superior se mantiene para cualquier frecuencia pero variando los valores de la presión de cada uno de los efectos considerados. Para frecuencias fuera de la zona del primer gap, la onda transmitida a través del 2DSC aumenta y la onda difractada, aunque existe, no se puede observar en la simulación numérica. Se puede decir que para estas frecuencias en la pantalla basada en cristales de sonido, predomina la transmisión frente a la difracción por el borde. Se puede

ver un ejemplo en la Figura (6.4(d)), donde se presenta un mapa de presión para OXZ $y = a/2$ m a 1100 Hz. En este caso, la frecuencia elegida está fuera del BG, y el conjunto transmite la onda incidente, ocultando el patrón de presión de la onda difractada.

6.3 Conclusiones

En este capítulo, se ha desarrollado tanto numérica como experimentalmente, un modelo de pantalla acústica basado en cristales de sonido formado por dispersores cilíndricos rígidos de longitud finita, con la finalidad de caracterizar el campo acústico en la zona de sombra. Los resultados se han comparado con los obtenidos para una pantalla clásica de las mismas dimensiones externas que el 2DSC. Se ha mostrado como el efecto de la difracción por el borde en la pantalla puede ser notorio para ciertas frecuencias y en cambio en otras, la transmisión a través del cristal, oculta este fenómeno. Los resultados experimentales obtenidos avalan el modelo desarrollado.

Con esta caracterización, el desarrollo de un modelo integral de la respuesta acústica real de los 2DSC, que incluya los diferentes fenómenos acústicos implicados y la relación entre ellos, podría ser una herramienta de diseño útil para el caso de los dispositivos reales. En el siguiente capítulo se presenta un modelo integral para el diseño de dispositivos eficientes basados en 2DSC para controlar la propagación de ondas acústicas.

Capítulo 7

Modelo integrado de pantalla acústica basada en conjuntos de dispersores aislados

7.1 Introducción

En este capítulo se presenta un modelo numérico que permite el análisis por separado de cada uno de los fenómenos físicos involucrados en la propagación de ondas a través de una pantalla acústica basada en dispersores acústicos aislados. Este modelo, incluye el fenómeno de la difracción por el borde superior de estas pantallas como un nuevo mecanismo que funciona de forma independiente como se ha visto en el Capítulo (6). Asimismo, proporciona un procedimiento general para el diseño de dispositivos más eficientes bajo el punto de vista acústico basados en redes de dispersores, siguiendo el concepto de tuneado desarrollado por algunos autores [9]. Es por lo tanto un modelo integral que además proporciona los resultados de forma rápida y con un bajo coste computacional.

En primer lugar, se desarrolla el modelo para una pantalla acústica basada en dispersores aislados rígidos. A continuación, se desarrolla el modelo considerando los dispersores multifenómeno vistos en el Capítulo (5) y, en tercer lugar, y con la finalidad de reducir el efecto de la difracción por el borde superior de estas pantallas, se añaden elementos interferentes situados en el entorno de la pantalla, tal y como se vio en la sección (2.2.2) con pantallas acústicas tradicionales. Para finalizar el capítulo se presenta un modelo numérico integral que incluye los tres modelos anteriormente descritos. La versatilidad de este modelo integral radica en la posibilidad de cambiar las propiedades de los dispersores, sin necesidad de rehacer el modelo numérico. De una manera muy sencilla constituye una herramienta de diseño de pantallas acústicas basadas en 2DSC que permite encontrar múltiples soluciones.

7.2 Modelo numérico para una pantalla acústica basada en dispersores aislados de primera generación

Tal y como se ha descrito en la sección (6.1), en una pantalla real 3D basada en dispersores aislados cilíndricos rígidos de longitud finita, los dos fenómenos físicos que se han tenido en cuenta para determinar la respuesta acústica real de la misma son la difracción Bragg y la difracción por el borde superior (Figura (7.1(c))). Para

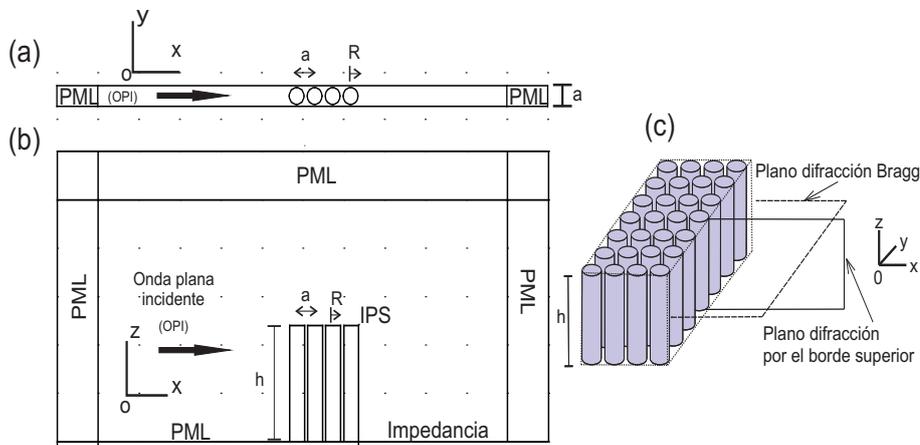


Figura 7.1: (a) Modelo numérico utilizado para analizar el efecto de la difracción Bragg, (b) modelo numérico utilizado para analizar el efecto de la difracción por el borde superior de los dispersores que forman la pantalla acústica basada en dispersores aislados de primera generación, (c) pantalla real 3D basada en dispersores aislados [10].

ello se ha utilizado un modelo numérico 3D simplificado realizado con FEM. En esta sección se presenta un modelo numérico 2D, también utilizando FEM (Comsol 3.5a), que por separado modeliza los dos mecanismos acústicos involucrados en el control de ruido y que por superposición obtiene el resultado real. Estos son:

- El efecto de la difracción Bragg, que se produce en planos perpendiculares al eje de los cilindros. Esta se calcula utilizando un modelo similar al desarrollado para el caso 3D: una red semi-infinita de 4 círculos con radio $R = 0.09$ m, separados por la constante de red, $a = 0.22$ m y confinados completamente por dos líneas reflectoras en el plano OXY , también separadas por una constante de red. La frecuencia central del primer gap se localiza en estas condiciones en $f_{Bragg} = 772$ Hz. En los límites de entrada y salida de la onda viajera se

insertan sendas PML para evitar reflexiones. Este modelo numérico se muestra en la Figura (7.1(a)).

- El efecto de la difracción por el borde superior, que es reproducido por una multicapa, teniendo en cuenta 4 rectángulos con una altura igual a la de los cilindros (1.2 m), y con una anchura igual a la de corte entre el cilindro y el plano OXZ donde se encuentra el punto de medida. El dominio (plano OXZ) 2D seleccionado está rodeado de capas perfectamente adaptadas (PML) en tres de sus límites. En el límite inferior, delante de la pantalla se utiliza una capa PML y detrás de la pantalla se introduce condición de impedancia, como en el caso 3D mostrado en el capítulo anterior. Este modelo numérico se muestra en la Figura (7.1(b)).

De esta manera, el campo de presión resultante detrás de un 2DSC real se puede obtener como la superposición de los dos efectos considerados, lo que permite actuar sobre cada efecto por separado con el fin de reducir su contribución al campo de presión total, siguiendo el concepto de tuneado [9].

Hay que señalar que la anchura de los rectángulos en la multicapa 2D propuesta depende del plano OXZ donde se realiza la simulación. En la Figura (7.2), se observa que si el punto de medida es el 1 (punto rojo), para la multicapa hay que considerar el ancho de los rectángulos igual al diámetro de los cilindros (0.18 m), ya que el corte se realiza en el eje de simetría de los cilindros. Este corte está representado en la Figura (7.2) con una línea de puntos que pasa a través punto 1. El mismo argumento se aplicaría al caso de que punto de cálculo estuviera en la posición 2 (punto amarillo), donde la multicapa incluye 4 rectángulos con una anchura que corresponde al corte que se muestra en la Figura (7.2) con una línea de trazos. Sin embargo, es posible simplificar este procedimiento si se tiene en cuenta la longitud semi-infinita del 2DSC. En el caso de una pantalla acústica clásica con una línea recta como borde según lo visto en la sección (2.2.1), todos los puntos de difracción contribuyen con la misma amplitud a el frente de ondas difractado.

Aunque la difracción por el borde de una pantalla formada por dispersores periódicos es discontinua y no lineal, se puede aplicar el mismo argumento que una pantalla clásica, porque todos los puntos emiten en fase entre sí aunque la contribución a la presión del frente de ondas es diferente. Como resultado, el frente de ondas difractado es uniforme en la dirección OY como en el caso de la pantalla acústica clásica semi-infinita, y se puede considerar, simplificando, la misma anchura de los rectángulos en la multicapa independientemente de la posición del punto de medida. Esta hipótesis, sin embargo, puede producir un ligero incremento en la presión acústica debida a la difracción por el borde, que es asumible.

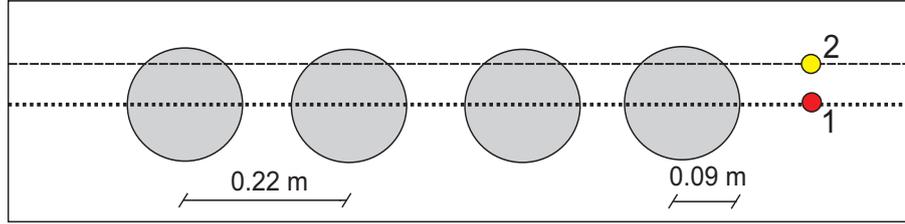


Figura 7.2: Anchura de los cilindros a considerar: para la línea de puntos (punto de medida 1), los cilindros tendrían de anchura su diámetro. Para la línea a trazos (punto de medida 2), la anchura de los cilindros para el modelo de difracción por el borde es inferior [10].

7.2.0.1 Parámetros del cálculo numérico

Se ha utilizado el programa comercial Comsol 3.5a, módulo onda dispersada (SW). Se ha seleccionado como parámetro de malla libre, fina, con método de refinamiento regular. La malla obtenida contiene 139.920 elementos con 62.861 grados de libertad.

7.2.1 Modelo de superposición. Resultados obtenidos

Para el cálculo de la atenuación acústica mediante el modelo de superposición, la expresión (2.1) se puede expresar en función de la presión compleja dispersada y de la presión compleja incidente de la siguiente forma:

$$IL = 20 \log_{10} \left| \frac{P_{directa}}{P_{Interferida}} \right| = 20 \log_{10} \left| \frac{p_0}{2p_0 + p_{sBRAGG} + p_{sDIF}} \right| \quad (7.1)$$

donde p_0 es la presión compleja incidente, p_{sBRAGG} y p_{sDIF} son las presiones complejas dispersadas y $(p_0 + p_{sBRAGG})$ y $(p_0 + p_{sDIF})$ son las presiones complejas totales detrás de la pantalla tanto en el caso de difracción Bragg como en el caso de difracción por el borde superior de la pantalla. En el Apéndice (B) se muestra con detalle las líneas de programación (Matlab) que se sigue para superponer las presiones obtenidas por separado de cada modelo 2D.

Para validar el modelo de superposición se han calculado los espectros de atenuación acústica en diferentes puntos detrás de la barrera 2DSC real tanto numérica como experimentalmente. El numérico 3D y el experimental utilizados son los vistos en el Capítulo (6). Para comparar los resultados obtenidos se ha representado de forma conjunta y en la misma Figura (7.3) los espectros de atenuación acústica obtenidos con los modelos numéricos: 3D y de superposición junto al obtenido de forma experimental. Además se han obtenido resultados en dos puntos diferentes. Estos puntos son los mostrados en la Figura (7.2), numerados como 1 y 2 de coordenadas

7.2. Modelo numérico para una pantalla acústica basada en dispersores aislados de primera generación

(0.04, 0.00, -0.30) y (0.04, 0.11, -0.30) m, respectivamente, medidos desde el IPS¹ del 2DSC. En ambos resultados se observa el primer BG centrado en la frecuencia $f_{Bragg} = 772$ Hz. Se puede observar la buena concordancia entre los resultados numéricos obtenidos para la superposición y el modelo 3D, en ambos casos.

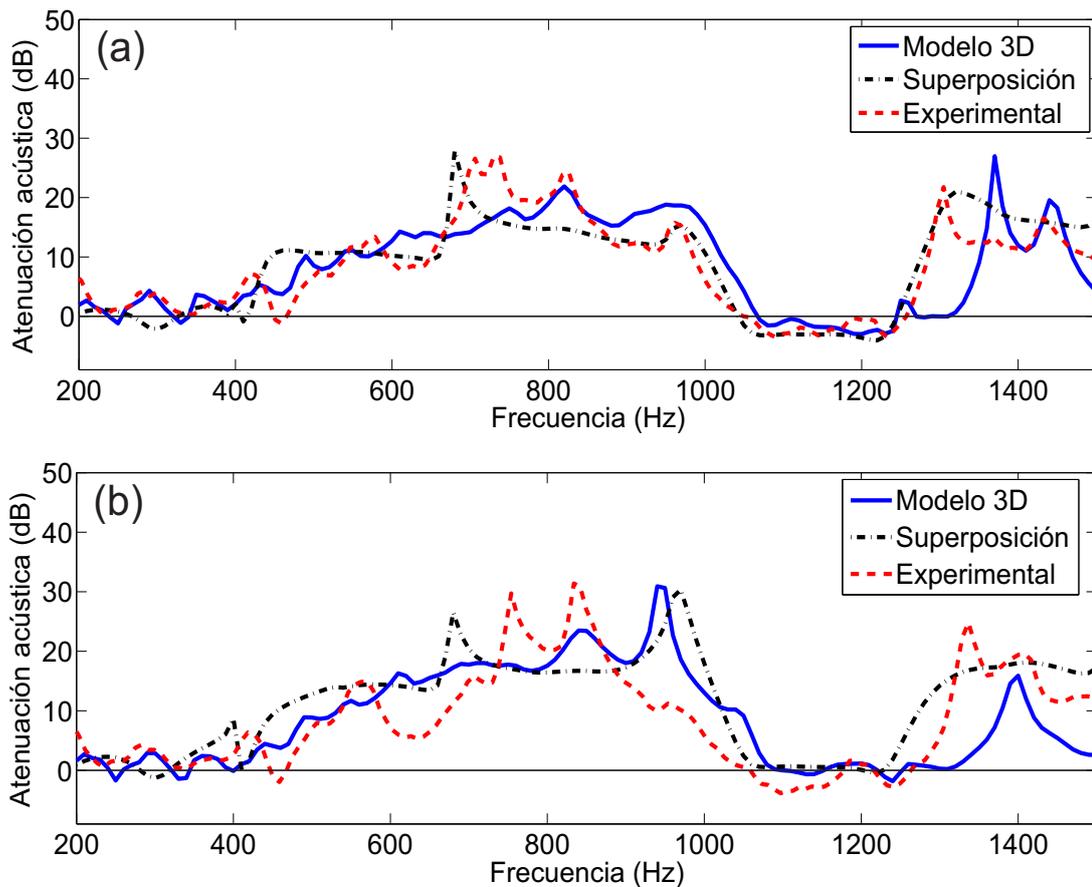


Figura 7.3: Resultados de atenuación acústica, (coordenadas medidas desde el IPS del 2DSC): (a) Punto (0.04,0.00,-0.30) m, en color azul el resultado del modelo 3D, en línea discontinua negra el resultado de la superposición y en línea discontinua roja el resultado experimental. (b) Punto (0.04,0.11,-0.30) m, en color azul el resultado del modelo 3D, en línea discontinua negra el resultado de la superposición y en línea discontinua roja el resultado experimental [10].

Además, se puede observar la coincidencia entre el resultado numérico y experimental, teniendo en cuenta las diferencias existentes entre los modelos numéricos y el montaje experimental utilizado.

¹Fuente puntual imaginaria

7.3 Modelo numérico para una pantalla acústica basada en dispersores aislados de segunda generación

Siguiendo con la línea de trabajo presentada en la sección anterior, donde se ha desarrollado un modelo numérico 2D de una pantalla acústica basada en dispersores aislados de primera generación, utilizando FEM (Comsol 3.5a), que por separado modeliza los dos mecanismos acústicos involucrados en el control de ruido y que por superposición obtiene el resultado real, se propone en esta sección analizar los dos fenómenos involucrados, e incluyendo algunos otros que permitan maximizar la atenuación acústica para conseguir que la pantalla acústica tenga mayor rendimiento.

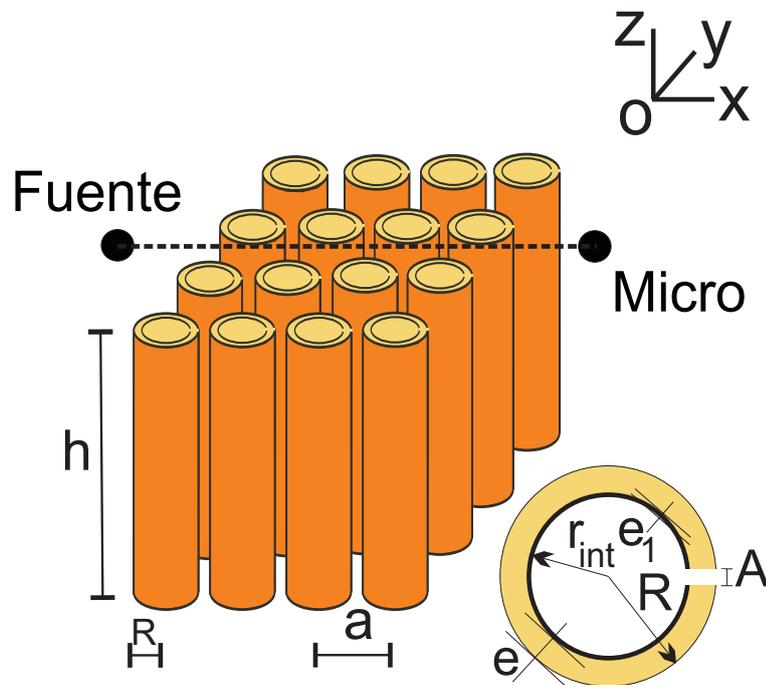


Figura 7.4: Pantalla real 3D basada en dispersores aislados de segunda generación. Detalle del dispersor multifenómeno: R es el radio exterior del dispersor, A es la anchura del cuello de la cavidad resonante, r_{int} es el radio interior de la cavidad resonante, e_1 es el espesor del núcleo rígido (corona interior) y e es el espesor del anillo de material absorbente.

En la Figura (7.4) se representa una pantalla acústica formada por dispersores cilíndricos finitos de altura h en tres dimensiones. Estos dispersores multifenómeno son los utilizados en la sección (5.2). Se considera que la pantalla es lo suficientemente larga para no considerar los bordes laterales. Por lo tanto, y debido a condiciones

de simetría, sólo se tienen en cuenta la difracción Bragg que se produce en el plano OXY y la difracción por el borde superior que se produce en el plano OXZ . Se realizan pues, los siguientes análisis:

- Análisis y mejora de la actuación de los dispersores aislados añadiendo nuevos mecanismos de control (modelo 2D plano OXY).
- Análisis y reducción de la difracción por el borde superior de sistemas formados por dispersores aislados (modelo 2D plano OXZ).

Con estos resultados, el campo de presión resultante detrás de un 2DSC real, se puede obtener por superposición de los efectos considerados, tal y como se ha hecho en la sección (7.2). A este modelo de superposición, se le denomina modelo numérico de pantalla acústica basada en conjuntos de dispersores aislados de segunda generación. En la última parte de esta sección, se aplica este modelo de superposición.

7.3.1 Análisis y mejora de la actuación de los dispersores aislados añadiendo nuevos mecanismos de control (modelo 2D plano OXY)

En esta sección, se analiza el modelo 2D que reproduce numéricamente los fenómenos que se producen en planos perpendiculares al eje de los cilindros, plano OXY . Se considera en primer lugar dispersores circulares totalmente rígidos. Seguidamente se incorpora a los dispersores una cavidad resonante. En último lugar se rodea el dispersor con cavidad resonante de material absorbente (lana de roca). Para que se puedan comparar perfectamente los tres casos propuestos, el tamaño externo del dispersor no puede cambiar, así como las características geométricas del espacio que rodea a la muestra. Por este motivo el tamaño y parámetro de red que se utiliza a partir de aquí difiere del utilizado en la sección (7.2) donde la estructura estaba pensada únicamente para ser analizada con dispersores rígidos.

7.3.1.1 Dispersores totalmente rígidos

El modelo está formado por dispersores rígidos con forma circular. El fenómeno físico involucrado es únicamente el de la difracción Bragg. Para evaluar la contribución de este mecanismo en la atenuación total obtenida por esta pantalla se ha modelizado la geometría que se muestra en la Figura (7.5). Se utiliza una geometría 2D formada por 4 filas de círculos con el fin de obtener un alto nivel de atenuación.

El dominio en el que se obtiene la solución está formado por 4 círculos rígidos (condición Neumann) con radio exterior $R = 0.14$ m, separados por la constante de red, $a = 0.33$ m, y confinados completamente entre dos líneas reflectoras, también

7. Modelo integrado de pantalla acústica basada en conjuntos de dispersores aislados

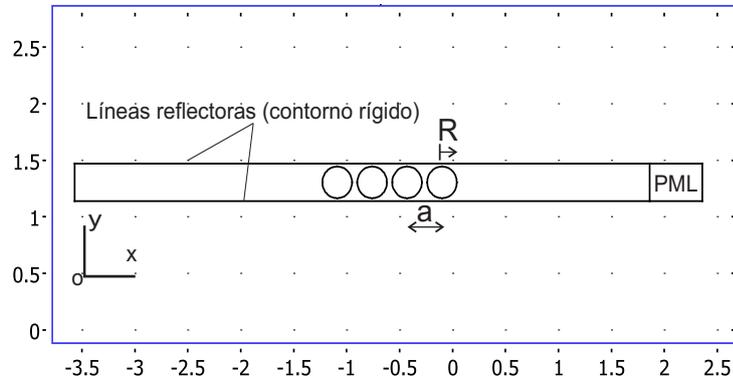


Figura 7.5: Geometría dispersores totalmente rígidos.

separadas por una constante de red, siendo paralelas a la dirección de propagación de la onda plana incidente que viaja de izquierda a derecha. Con estas condiciones, las ondas dispersadas por los círculos son reflejadas por las líneas reflectoras que reproducen el efecto de un cristal de sonido 2D semi-infinito formado por 4 filas de círculos dispuestos en una red cuadrada con paso de red $a = 0.33$ m. Al mismo tiempo, la onda plana incidente no se refleja por las líneas reflectoras. La frecuencia central del primer gap se localiza en estas condiciones en $f_{Bragg} = 515$ Hz. Esta geometría permite el estudio de redes semi-infinitas usando un volumen reducido de el dominio numérico disminuyendo el coste computacional. Para que la propagación de la onda a la salida no se encuentre ningún obstáculo se ha utilizado una PML. Con ella se evita la posible reflexión de la onda por desadaptación.

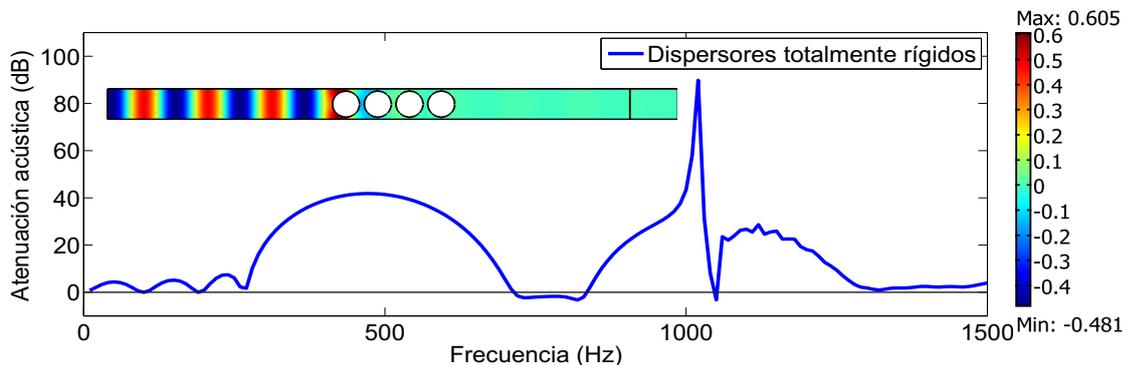


Figura 7.6: Modelo 2D (plano OXY) de dispersores totalmente rígidos: espectro de atenuación acústica en el punto de coordenadas (0.11,0.00,0.00) m medido desde el borde del último círculo y mapa de presión acústica (presión total real) a 515 Hz.

Los resultados obtenidos con este modelo, se pueden observar en la Figura (7.6).

Se muestra el espectro de atenuación acústica (dB) calculado a 0.11 m del borde del último círculo, (punto 1 de la Figura (7.1)). Se observa como la frecuencia central del primer gap se localiza en 515 Hz. Así mismo se observa el segundo gap alrededor de la frecuencia de 1100 Hz. También se muestra el resultado del mapa de presión total (presión real) obtenido con el modelo a la frecuencia 515 Hz.

7.3.1.1.1 Parámetros del cálculo numérico Se ha utilizado el programa comercial Comsol 3.5a, módulo presión acústica (PA). Se ha seleccionado como parámetro de malla libre, fina, con método de refinamiento regular. La malla obtenida contiene 83.968 elementos con 102.365 grados de libertad.

7.3.1.2 Dispersores rígidos con cavidad resonante

El modelo está formado por dispersores rígidos con una cavidad resonante de anchura de cuello A . La fenómenos físicos involucrados son: difracción Bragg, igual que el caso (7.3.1.1) más la resonancia debida a la cavidad interior del dispersor.

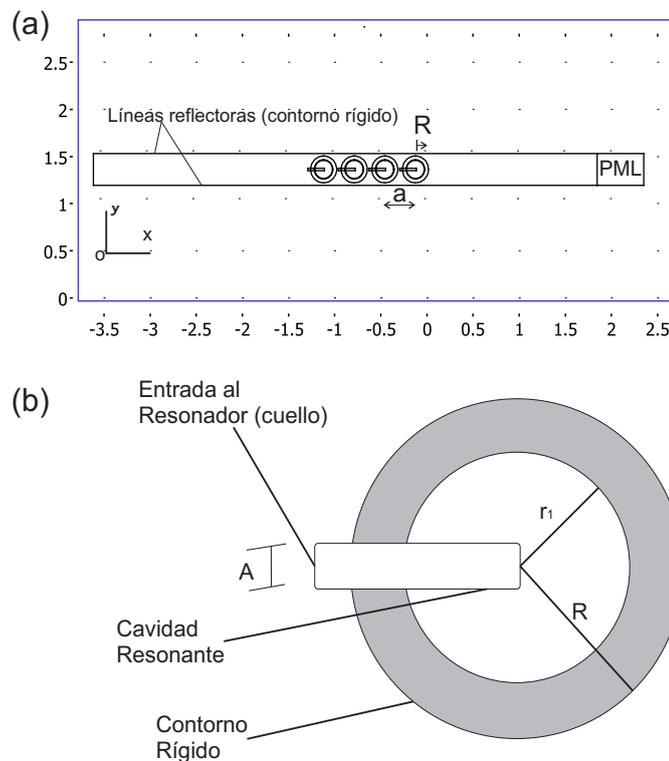


Figura 7.7: Geometría del modelo numérico formado por dispersores rígidos con cavidad resonante. Detalle del dispersor multifenómeno: A es la anchura del cuello de la cavidad resonante circular de radio r_1 y que está rodeada de una capa rígida, también circular de radio interior r_1 y radio exterior R .

7. Modelo integrado de pantalla acústica basada en conjuntos de dispersores aislados

El dominio en el que se obtiene la solución está formado por 4 círculos rígidos con radio exterior $R = 0.14$ m y separados por la constante de red $a = 0.33$ m, confinados completamente entre dos paredes reflectoras, también separadas por una constante de red, siendo paralelas a la dirección de propagación de la onda plana incidente que viaja de izquierda a derecha. Estos dispersores tienen dos partes y cada una de ellas una condición de contorno diferente. Estas condiciones son, de dentro hacia fuera:

- La cavidad resonante de radio $r_1 = 0.095$ m y cuello de anchura $A = 0.02$ m, por donde la onda pueda penetrar y producir, en su caso, el fenómeno de resonancia acústica. La condición de contorno utilizada para esta corona es rígida en la pared. El subdominio está activado con la condición de aire en su interior.
- La corona de radio interior r_1 y radio exterior R , condición de contorno Neumann (pared rígida) y subdominio desactivado.

Los demás elementos del modelo numérico han sido activados igual que para el caso de dispersores rígidos, visto en la sección anterior (7.3.1.1).

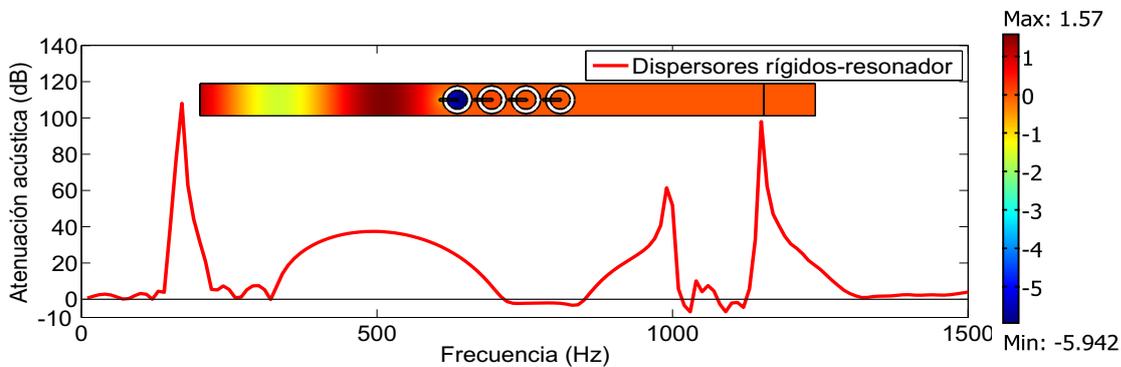


Figura 7.8: Modelo 2D (plano OXY) de dispersores rígidos con cavidad resonante: espectro de atenuación acústica en el punto de coordenadas (0.11,0.00,0.00) m medido desde el borde del último círculo y mapa de presión acústica (presión total real) a 170 Hz.

Los resultados obtenidos por este modelo, se pueden observar en la Figura (7.8). Se muestra el espectro de atenuación acústica (dB) calculado a 0.11 m del borde del último círculo, (punto 1 de la Figura (7.1)). Se observa como la frecuencia central del primer gap se localiza en 515 Hz y la del segundo gap a 1100 Hz. Además aparece un pico de resonancia en torno a 200 Hz. También se muestra el resultado del mapa de presiones (presión real) obtenido por el modelo a 170 Hz. Se puede observar en el

resultado como los dos efectos se superponen sin interactuar negativamente entre ellos.

7.3.1.2.1 Parámetros del cálculo numérico Se ha utilizado el programa comercial Comsol 3.5a, módulo presión acústica (PA). Se ha seleccionado como parámetro de malla libre, fina, con método de refinamiento regular. La malla obtenida contiene 150.720 elementos con 302.633 grados de libertad.

7.3.1.3 Dispersores rígidos con cavidad resonante y recubiertos con material absorbente

Los dispersores utilizados en este modelo son como los descritos en la sección (5.2) pero con otros valores geométricos que se muestran en la Tabla (7.1). Estos son dispersores rígidos con un cuello de la cavidad resonante de anchura A y recubiertos de material absorbente tal y como muestra la Figura (7.9(b)).

Dispersor	r_1 (cm)	r_2 (cm)	R (cm)	A (cm)
Multifenómeno	9.5	10	14	2

Tabla 7.1: Parámetros geométricos del modelo numérico para los dos dispersores multifenómeno utilizados.

La fenómenos físicos involucrados son: difracción Bragg, igual que el caso (7.3.1.1), la resonancia debida a la cavidad interior del dispersor, igual que el caso (7.3.1.2) mas el fenómeno de absorción acústica.

El dominio en el que se obtiene la solución está formado por 4 círculos con radio exterior $R = 0.14$ m y separados por la constante de red, $a = 0.33$ m, confinados completamente entre dos líneas reflectoras, también separadas por una constante de red, siendo paralelas a la dirección de propagación de la onda plana incidente que viaja de izquierda a derecha. Estos dispersores poseen una cavidad, con forma también circular, de radio interior $r_1 = 0.095$ m con un cuello de anchura $A = 0.02$ m para que la onda pueda penetrar en la cavidad resonante. La rigidez del dispersor la introduce la corona de radio interior $r_1 = 0.095$ m y radio exterior $r_2 = 0.10$ m. Por otro lado, la corona circular de radio interior $r_2 = 0.10$ m y radio exterior $R = 0.14$ m, está formada por material absorbente (lana de roca) de espesor 0.04 m. Con todo esto, el dispersor está formado por tres partes y cada una de ellas tiene una condición de contorno diferente. Estas condiciones son, de dentro hacia fuera:

- a) La cavidad resonante de radio r_1 y cuello de anchura A . La condición de contorno utilizada para esta corona es condición de contorno Neumann (contorno rígido). El subdominio está activado con la condición de aire en su interior.

7. Modelo integrado de pantalla acústica basada en conjuntos de dispersores aislados

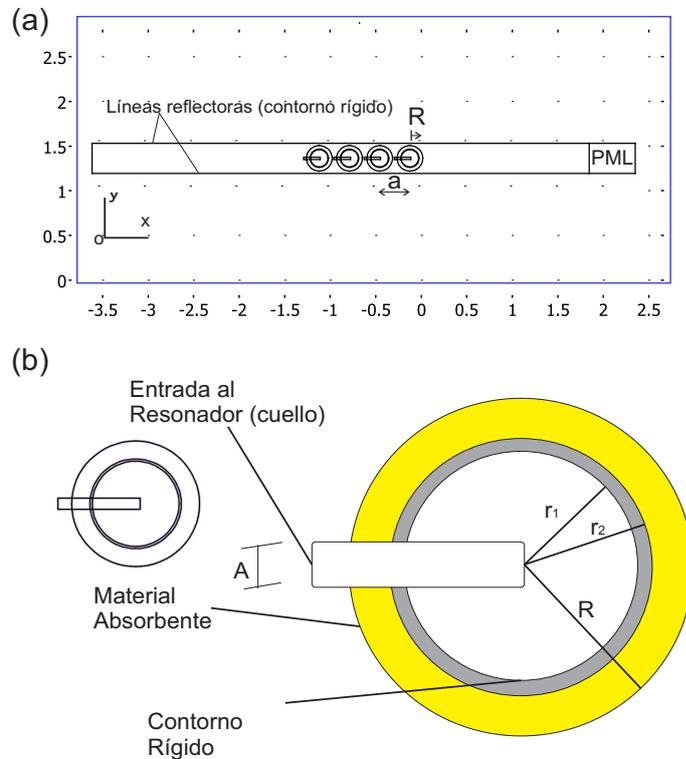


Figura 7.9: (a) Geometría del modelo numérico formado por dispersores rígidos con cavidad resonante y recubiertos con material absorbente, (b) detalle del dispersor multifenómeno: A es la anchura del cuello de la cavidad resonante circular de radio r_1 (color blanco) que está rodeada de una capa rígida (color gris), también circular, de radio interior r_1 y radio exterior r_2 . La corona de radio interior r_2 y radio exterior R , está formada de material absorbente (lana de roca)(color amarillo).

- b) La corona de radio interior r_1 y radio exterior r_2 , condición de contorno Neumann (contorno rígido) y subdominio desactivado.
- c) La corona de radio interior r_2 y radio exterior R , formada de material absorbente, condición de contorno continuidad y subdominio Delany-Bazley, que se utiliza para simular modelos con absorción (resistencia al flujo $23000 \text{ kg/m}^3 \text{ s}$).

Los demás elementos del modelo numérico han sido activados de igual forma que para el caso de dispersores rígidos, visto en la sección (7.3.1.1).

Los resultados obtenidos con este modelo, se pueden observar en la Figura (7.10). Se muestra el espectro de atenuación acústica (dB) calculado a 0.11 m del borde del último círculo, (punto 1 de la Figura (7.1)). Se observa como la frecuencia central del primer gap se localiza en 515 Hz y la del segundo gap a 1100 HZ. El pico de resonancia se localiza cerca de 200 Hz y el material absorbente introduce un aumento

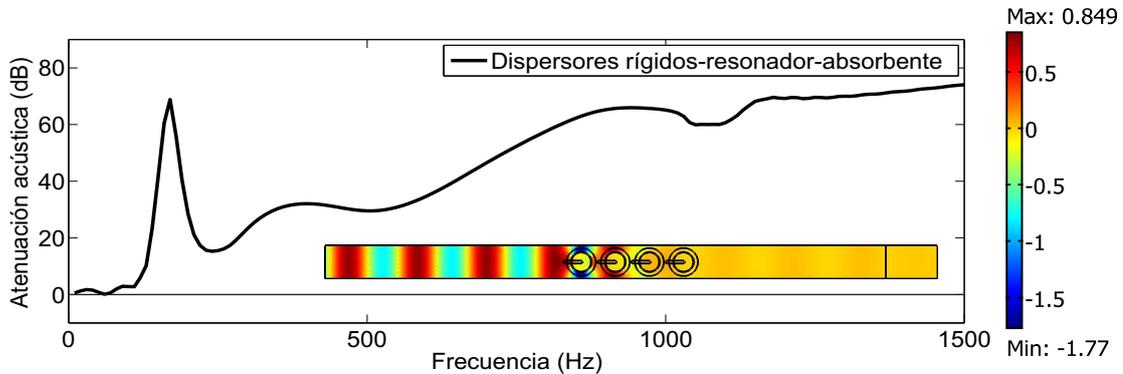


Figura 7.10: Modelo 2D (plano OXY) de dispersores rígidos con cavidad resonante y recubiertos con material absorbente: espectro de atenuación acústica en el punto de coordenadas (0.11,0.00,0.00) m, medido desde el borde del último círculo y mapa de presión acústica (presión total real) a 515 Hz.

de la atenuación en un amplio rango de frecuencias. También se muestra el resultado del mapa de presiones (presión real) obtenido por el modelo a 515 Hz.

7.3.1.3.1 Parámetros del cálculo numérico Se ha utilizado el programa comercial Comsol 3.5a, módulo presión acústica (PA). Se ha seleccionado como parámetro de malla libre, fina, con método de refinamiento regular. La malla obtenida contiene 437.184 elementos con 789.093 grados de libertad.

A modo de comparativa y para ver que los efectos que se han ido añadiendo son compatibles, en la Figura (7.11) se muestra el espectro de los tres casos estudiados, donde se observa que los efectos acústicos se van superponiendo sin interferir negativamente entre ellos.

7.3.2 Análisis y reducción de la difracción por el borde superior de sistemas formados por dispersores aislados (modelo 2D plano OXZ)

En esta sección se analiza el modelo 2D que reproduce numéricamente los fenómenos que se producen en planos paralelos al eje de los cilindros, plano OXZ. Se considera en primer lugar dispersores rectangulares totalmente rígidos de altura h . Seguidamente se incorpora a los dispersores una cavidad resonante. En último lugar se rodea el dispersor con cavidad resonante de material absorbente (lana de roca). Para que se puedan comparar perfectamente los tres casos propuestos, el tamaño externo del dispersor no puede cambiar, así como las características geométricas del espacio que rodea a la muestra.

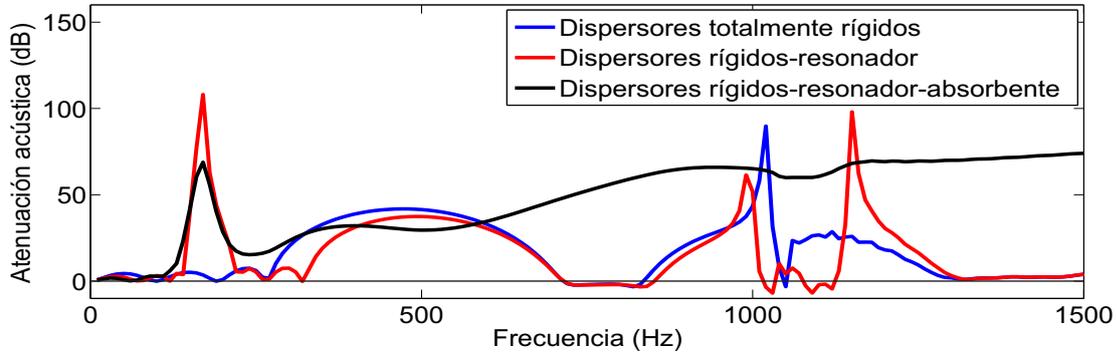


Figura 7.11: Espectros de atenuación acústica en el punto de coordenadas (0.11,0.00,0.00) m, medido desde el borde del último círculo para los tres casos estudiados.

7.3.2.1 Dispersores totalmente rígidos

El modelo está formado por dispersores rígidos con forma rectangular según la argumentación expuesta en la sección (7.2). El fenómeno físico involucrado es el de la difracción por el borde superior de los dispersores. Para evaluar esta contribución se ha modelizado una geometría 2D formada por una fila de 4 rectángulos, lo que da lugar a una multicapa de dispersores, tal y como se puede ver en la Figura (7.12).

El dominio en el que se obtiene la solución numérica, está formado de 4 dispersores rígidos (condición Neumann) con forma rectangular de altura $h = 1.20$ m y anchura² $d = 0.28$ m, separados por la constante de red, $a = 0.33$ m. Tres de los límites del dominio están rodeados de capas perfectamente adaptadas (PML) (2.5.3.1.3) para simular propagación en campo libre. En el límite inferior, delante de la multicapa, se utiliza una PML y en la parte inferior de detrás de la estructura se ha introducido la condición de impedancia.

Los resultados obtenidos por este modelo, se pueden observar en la Figura (7.13). Se muestra el espectro de atenuación acústica (dB) medido desde el borde del último rectángulo (IPS) en el punto de coordenadas: (0.11, 0.00, -0,30) m, (punto rojo de la Figura (7.12)). También se muestra el resultado del mapa de presión total (presión real) obtenido con el modelo a la frecuencia 515 Hz.

7.3.2.1.1 Parámetros del cálculo numérico Se ha utilizado el programa comercial Comsol 3.5a, módulo onda dispersada (SW). Se ha seleccionado como parámetro de malla libre, fina, con método de refinamiento regular. La malla obtenida contiene 120.128 elementos con 163.981 grados de libertad.

²La anchura d de los rectángulos se corresponde con el doble del radio R utilizado en la sección anterior, es decir, $d = 2R$.

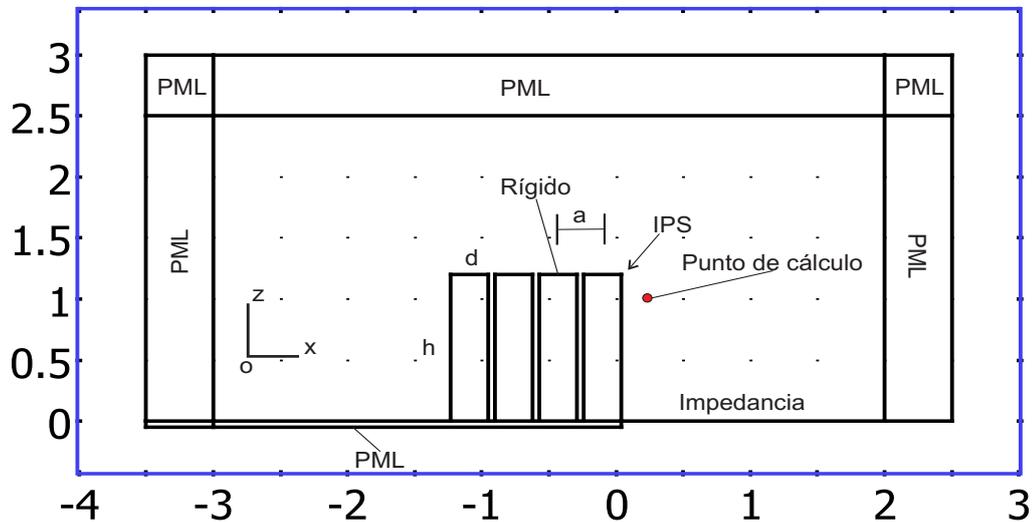


Figura 7.12: Modelo 2D (plano OXZ). Geometría de los dispersores totalmente rígidos para el análisis de la difracción por el borde superior: h es la altura de los dispersores, d es la anchura de los dispersores, a es la distancia entre centro de los dispersores. El punto de cálculo se indica en color rojo y se corresponde con el punto de coordenadas $(0.11, 0.00, -0.30)$ m, medido desde el borde del último rectángulo. También se indica el IPS.

7.3.2.2 Dispersores rígidos y cavidad resonante

El modelo está formado por dispersores rígidos con forma rectangular. El fenómeno físico involucrado es el de la difracción por el borde superior de los dispersores. Para evaluar esta contribución se ha modelizado la geometría que se puede ver en la Figura (7.14). Se utiliza una geometría 2D formada por una fila de 4 rectángulos, lo que da lugar a una multicapa de dispersores.

El dispersor modelizado, que se puede ver en la Figura (7.15) tiene una anchura de valor $d = 0.28$ m (radio $R = 0.14$ m) y está formado por dos paredes rígidas de espesor 0.045 m, quedando entre estas paredes una capa de aire. Para la simulación numérica, hay que tener en cuenta que la cavidad de aire tiene una interfase con el medio que rodea a las estructura. En esta interfase se considera condición de continuidad. El corte transversal de este dispersor es justamente el dispersor utilizado para el análisis de la actuación de los dispersores aislados realizado en la sección anterior, tal y como se puede ver en la Figura (7.15).

El dominio en el que se obtiene la solución numérica, está formado de 4 dispersores separados por la constante de red, $a = 0.33$ m. Tres de los límites del dominio están rodeados de capas perfectamente adaptadas (PML) para simular propagación en campo libre. En el límite inferior, delante de la multicapa, se utiliza

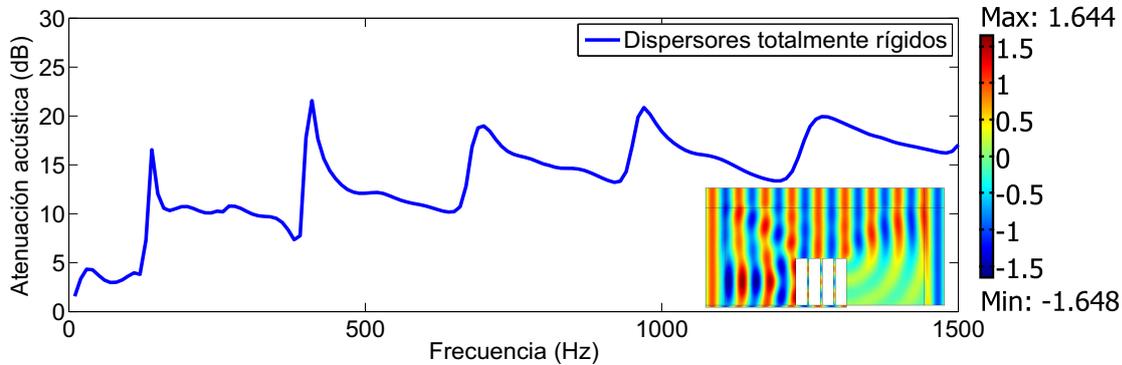


Figura 7.13: Modelo 2D (plano OXZ) de dispersores totalmente rígidos: espectro de atenuación acústica (dB) medido desde el borde del último rectángulo (IPS) en el punto de coordenadas: (0.11, 0.00, -0,30) m. Se muestra en el recuadro el mapa de presión acústica total (presión real) a la frecuencia 515 Hz.

una PML y en la parte inferior de detrás de la estructura se ha introduce condición de impedancia.

Los resultados obtenidos con este modelo, se pueden observar en la Figura (7.16). Se muestra el espectro de atenuación acústica (dB) medido desde el borde del último rectángulo (IPS) en el punto de coordenadas: (0.11, 0.00, -0,30) m, (punto rojo de la Figura (7.14)). También se muestra en el recuadro, el resultado del mapa de presión total (presión real) obtenido con el modelo a la frecuencia 515 Hz.

7.3.2.2.1 Parámetros del cálculo numérico Se ha utilizado el programa comercial Comsol 3.5a, módulo onda dispersada (SW). Se ha seleccionado como parámetro de malla libre, fina, con método de refinamiento regular. La malla obtenida contiene 516.800 elementos con 651.257 grados de libertad.

7.3.2.3 Dispersores rígidos con cavidad resonante y recubiertos con material absorbente

La geometría del modelo completo se ha considerado igual a la mostrada en la Figura (7.14) y por lo tanto el modelo de dispersor coincide con el mostrado en la Figura (7.15). Esto es debido al hecho de que este modelo sólo valora el resultado de la atenuación acústica debido a la difracción por el borde superior de la pantalla y este borde no ha cambiando ni de forma ni de tamaño.

Para poder comparar los resultados obtenidos, en la Figura (7.17) se muestra el espectro de los dos casos estudiados. Se observa que los efectos acústicos se van superponiendo sin interferir negativamente entre ellos. Como se puede observar para el caso rígido con cavidad la pérdida por inserción es mayor.

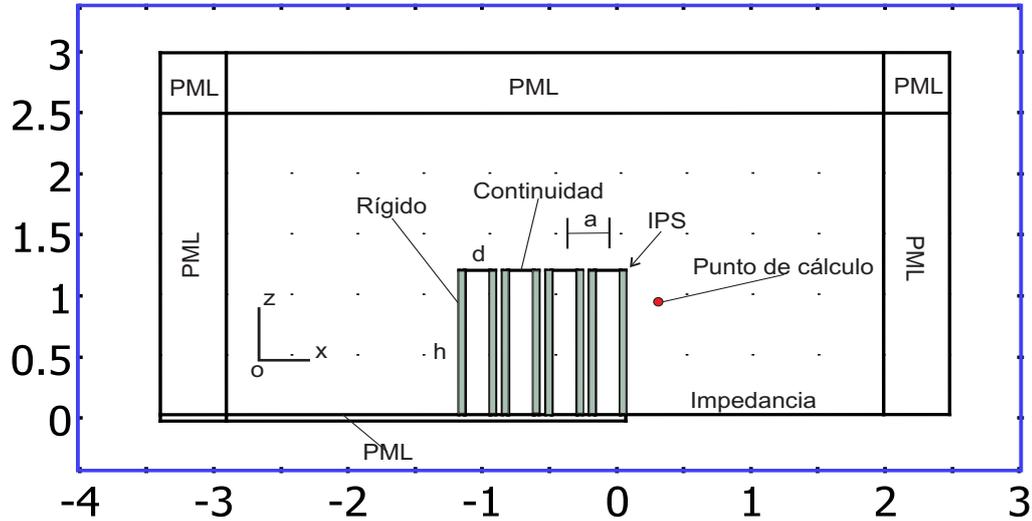


Figura 7.14: Modelo 2D (plano OXZ). Geometría de los dispersores rígidos con cavidad, para el análisis de la difracción por el borde superior: h es la altura de los dispersores, d es la anchura de los dispersores, a es la distancia entre centro de los dispersores. El punto de cálculo se indica en color rojo y se corresponde con el punto de coordenadas $(0.11, 0.00, -0.30)$ m, medido desde el borde del último rectángulo (IPS).

7.3.3 Modelo de superposición. Resultados obtenidos

Utilizando el modelo de superposición presentado en la sección anterior (7.2 se ha calculado los espectros de atenuación globales para los tres casos desarrollados: dispersores totalmente rígidos, dispersores rígidos-cavidad resonante y dispersores rígidos-cavidad resonante-absorbente.

Como se ha podido comprobar, el módulo acústico utilizado para cada análisis realizado ha variado según existía material absorbente (PA) o no (SW), según se explicó en la sección (2.5.3.1.4). Para el cálculo de la atenuación acústica mediante el modelo de superposición, se utiliza la expresión (7.1) cuando se dispone de las presión compleja dispersada y de la presión compleja incidente. Para el caso de disponer de la presión compleja total y teniendo en cuenta que se cumple:

$$p_t = p_0 + p_s \quad (7.2)$$

la expresión (7.1) se puede expresar en función de la presión compleja total y de la presión compleja incidente de la siguiente forma:

$$IL = 20 \log_{10} \left| \frac{p_0}{p_{tBRAGG} + p_{tDIF}} \right| \quad (7.3)$$

7. Modelo integrado de pantalla acústica basada en conjuntos de dispersores aislados

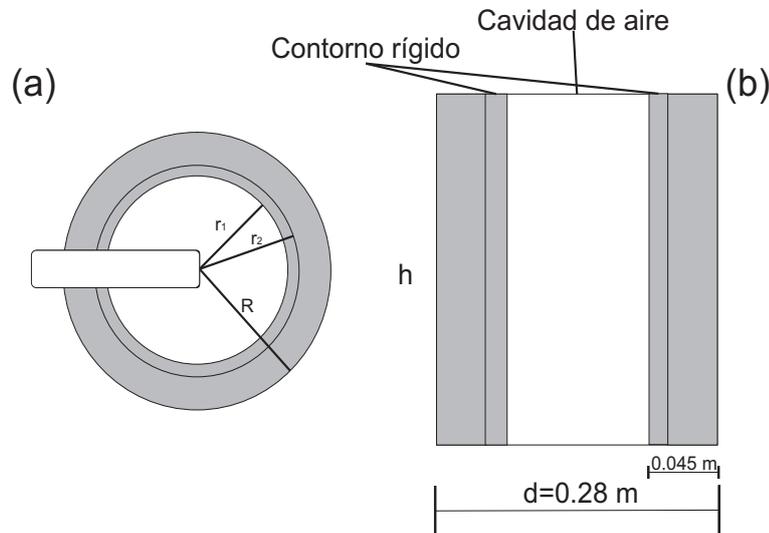


Figura 7.15: Detalle del dispersor rígido con cavidad resonante: (a) corte transversal del dispersor (da como resultado el modelo 2D (plano OXY utilizado en la sección anterior) y (b) geometría y dimensiones del dispersor utilizado para el modelo 2D (plano OXZ). En color gris se representa material rígido y en color blanco aire.

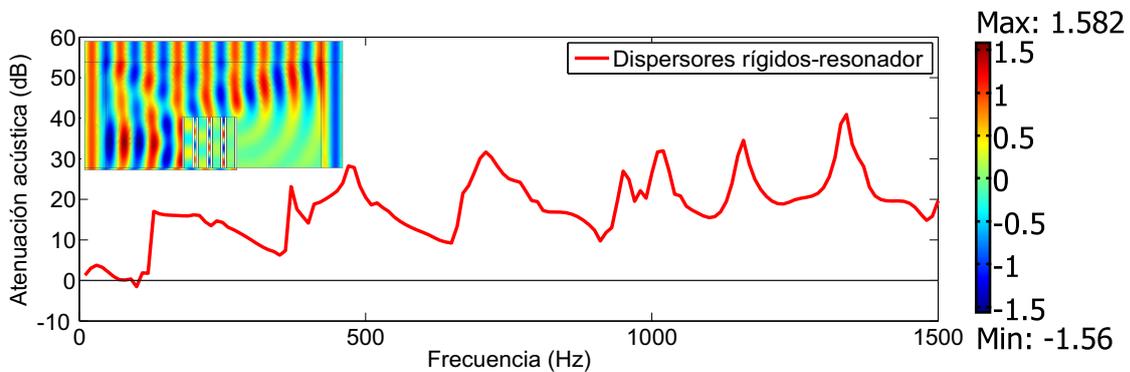


Figura 7.16: Dispersores rígidos con cavidad de aire: espectro de atenuación acústica (dB) medido desde el borde del último rectángulo (IPS) en el punto de coordenadas: (0.11, 0.00, -0,30) m. Se muestra en el recuadro el mapa de presión acústica total (presión real) a la frecuencia 515 Hz.

donde p_0 es la presión compleja incidente, p_{tBRAGG} y p_{tDIF} son las presiones complejas totales detrás de la pantalla tanto en el caso de difracción Bragg como en el caso de difracción por el borde superior de la pantalla.

En la Figura (7.18) se muestra el resultado del espectro de atenuación acústica (IL) de la pantalla diseñada con el receptor situado en el punto de coordenadas:

7.3. Modelo numérico para una pantalla acústica basada en dispersores aislados de segunda generación

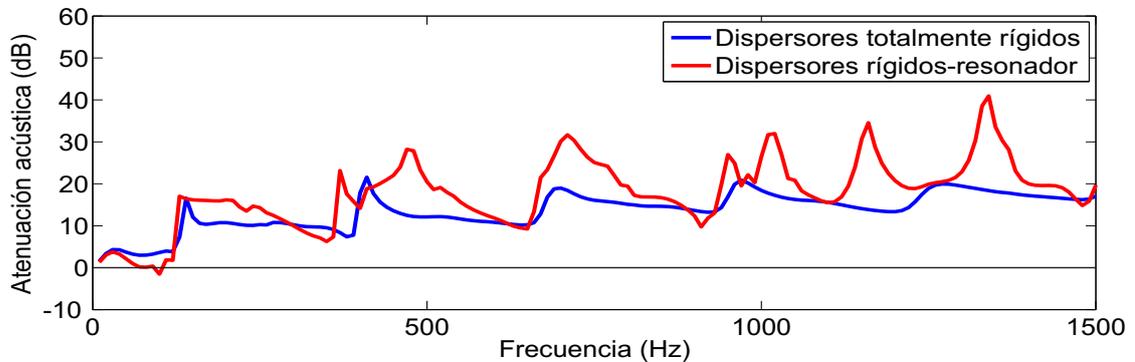


Figura 7.17: Espectro comparativo de los dos casos de multicapa estudiados: medido desde el borde del último rectángulo (IPS) en el punto de coordenadas: (0.11, 0.00, -0,30) m.

(0.11, 0.00, -0,30) m medido desde el borde del último rectángulo (IPS) y para la dirección principal ΓX (0°) de incidencia obtenido mediante la simulación numérica. Se puede observar la existencia de los diferentes picos de atenuación debido a los diferentes mecanismos considerados. Así, el pico de atenuación (1) es debido a la resonancia correspondiente al tamaño de la cavidad del resonador considerado. Los picos de atenuación (2) y (3) corresponden a la primera y segunda bandas prohibidas para la dirección de incidencia considerada en la red cuadrada. Por último, el nivel continuo de atenuación que aparece a partir de 500 Hz en adelante corresponde al efecto del absorbente utilizado en cada cilindro de la estructura.

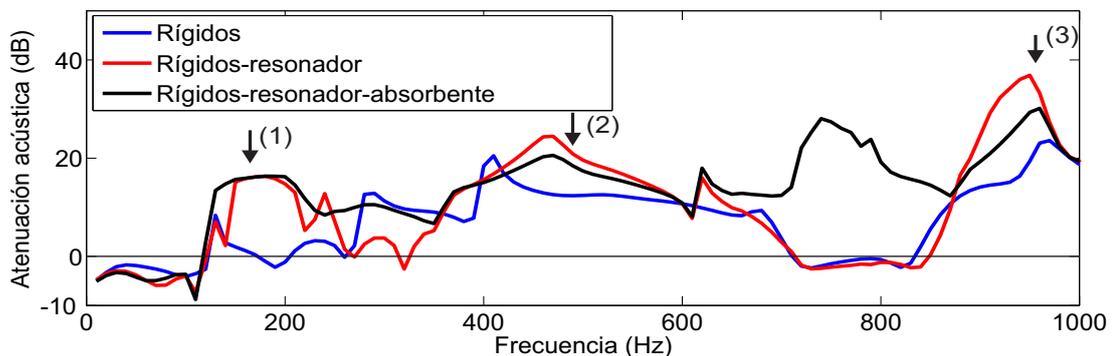


Figura 7.18: Resultados de atenuación acústica, para los tres casos desarrollados: la línea azul, dispersores totalmente rígidos, la línea roja, dispersores rígidos con cavidad resonante y la línea negra, dispersores rígidos con cavidad resonante y absorbente (lana de roca).

7.4 Modelo numérico para una pantalla acústica basada en dispersores aislados de segunda generación tuneado

Siguiendo el concepto de tuneado ya comentado en secciones anteriores, y con la finalidad de reducir el efecto de la difracción por el borde superior de la pantallas acústicas basadas en dispersores aislados, se ha diseñado una solución basada en la interferencia destructiva de ondas a la que se le aplicará el modelo de superposición desarrollado. La solución adoptada consiste en introducir unos dispersores estratégicamente situados en el entorno de la pantalla tal y como se puede observar en la Figura (7.19), donde se representa una pantalla real 3D basada en dispersores aislados de segunda generación junto a los dispersores añadidos. La finalidad de estos dispersores es que produzcan interferencias destructivas con las ondas que han llegado a la zona de sombra tal y como se vio en la sección (2.2.2).

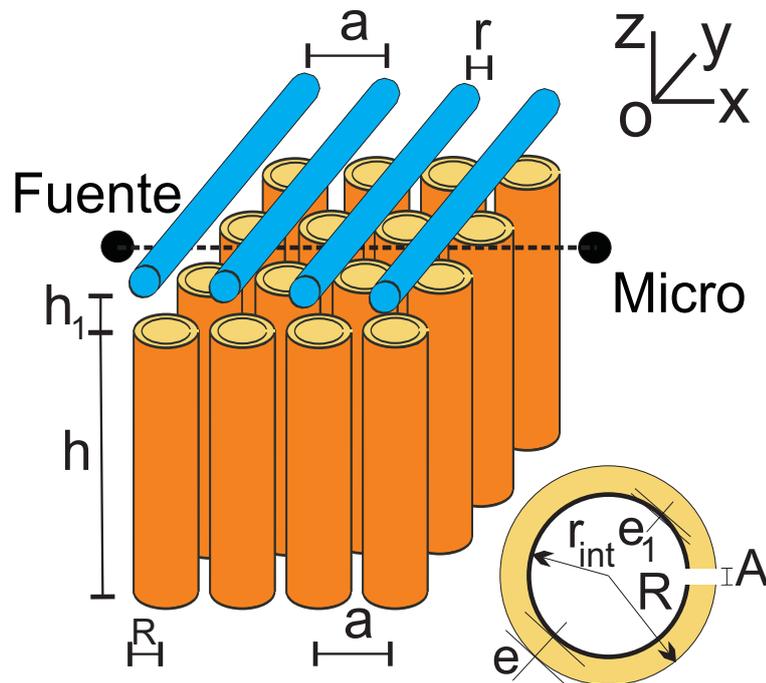


Figura 7.19: Pantalla real 3D basada en dispersores aislados de segunda generación. Detalle del dispersor multifenómeno: R es el radio exterior del dispersor, A es la anchura del cuello de la cavidad resonante, r_{int} es el radio interior de la cavidad resonante, e_1 es el espesor del núcleo rígido (corona interior) y e es el espesor del anillo de material absorbente.

En la Figura (7.19) se representa una pantalla acústica formada por dispersores

cilíndricos finitos multifenómeno de altura h en tres dimensiones. Se considera que la pantalla es lo suficientemente larga para no considerar los bordes laterales. Por lo tanto, y debido a condiciones de simetría, sólo se tienen en cuenta los mecanismos relacionados con la composición de los dispersores (BG, la absorción y resonancias) que se producen en el plano OXY , la difracción por el borde superior que se produce en el plano OXZ y la difracción en los nuevos dispersores, que también se estudia en el plano OXZ .

Hay que tener en cuenta que las pantallas acústicas basadas en dispersores aislados tienen una zona del espectro donde son más efectivas: zona alrededor de la frecuencia Bragg. La difracción por el borde superior en cambio, se produce para todas las frecuencias. Si a esto se le añade que la posición de los dispersores para que produzcan interferencias destructivas con la difracción por el borde superior es variable, la solución no es única ya que esa distancia depende de la frecuencia que se quiere atenuar. En este trabajo, la posición de los dispersores para crear interferencias destructivas con la onda difractada generada en el borde superior de la pantalla acústica, se ha calculado de forma que los dispersores trabajen cerca de la frecuencia Bragg. La altura h_1 , se ha calculado de la siguiente forma:

$$h_1 = \frac{\lambda}{2} = \frac{343/515}{2} = 0.33 \text{ m} \quad (7.4)$$

es decir, se ajusta para que produzca interferencia destructiva a la frecuencia Bragg $f_{Bragg} = 515 \text{ Hz}$, de la pantalla diseñada en la sección anterior (7.3).

Siguiendo con el método de superposición utilizado hasta ahora, el efecto de los dispersores circulares añadidos justo encima del segundo borde de cada rectángulo que forma la pantalla, aparece sobre el plano OXZ . El efecto de la difracción producida en estos dispersores circulares no afecta al plano OXY . El análisis en el plano OXY pues, es el mismo que el realizado en la sección anterior (7.3).

7.4.1 Modelo de superposición. Resultados Obtenidos

Utilizando el modelo de superposición presentado en la sección (7.2) se obtienen los espectros de atenuación globales para los tres casos estudiados: dispersores totalmente rígidos, dispersores rígidos-cavidad resonante y dispersores rígidos-cavidad resonante-absorbente, con los dispersores añadidos (satélites). Para el cálculo de la atenuación acústica global, se utiliza la expresión (7.3) a partir de los resultados obtenidos mediante FEM (Comsol 3.5a).

7.4.1.1 Dispersores totalmente rígidos tuneado

El modelo 2D (plano OXY) se corresponde con el visto en la sección (7.3.1.1), mientras que el modelo 2D (plano OXZ) está formado por dispersores rígidos con forma

7. Modelo integrado de pantalla acústica basada en conjuntos de dispersores aislados

rectangular según la argumentación expuesta en la sección (7.2) junto a los nuevos dispersores situados a cierta altura del segundo borde de cada dispersor rectangular. El fenómeno físico involucrado es el de la difracción por el borde superior de los dispersores y la difracción en los nuevos dispersores. Para evaluar esta contribución se ha modelizado una geometría 2D formada por una fila de 4 rectángulos, lo que da lugar a una multicapa de dispersores junto a 4 círculos de radio r situados a una altura h_1 de cada rectángulo, tal y como se puede ver en la Figura (7.20). Aunque esta figura muestra en general dispersores multifenómeno, a la hora de realizar el cálculo para el caso de dispersores totalmente rígidos se han activado los rectángulos como elementos rígidos siendo, como ya se ha dicho, del mismo tamaño y posición. A continuación se detallan más datos del cálculo numérico.

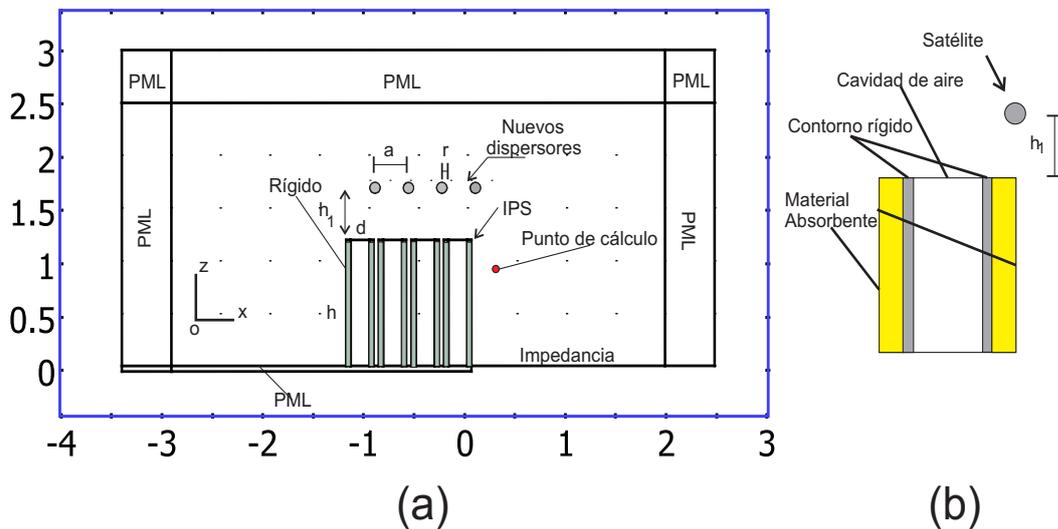


Figura 7.20: Modelo 2D (plano OXZ). (a) Geometría de los dispersores multifenómeno y de los dispersores circulares para producir interferencias destructivas detrás de la pantalla acústica. Los dispersores son de radio $r = 0.05$ m y se sitúan a una altura $h_1 = 0.33$ m del segundo borde de cada dispersor multifenómeno rectangular visto en la sección (7.3). El punto de cálculo se indica en color rojo y se corresponde con el punto de coordenadas $(0.11, 0.00, -0.30)$ m, medido desde el borde del último rectángulo (IPS). (b) Detalle del dispersor multifenómeno utilizado y posición del satélite respecto del mismo.

El dominio en el que se obtiene la solución numérica, está formado de 4 dispersores rígidos (condición Neumann) con forma rectangular de altura $h = 1.20$ m y anchura $d = 0.28$ m, separados por la constante de red, $a = 0.33$ m y 4 círculos de radio $r = 0.05$ m rígidos (condición Neumann) separados entre ellos por la constante de red, $a = 0.33$ m y situados a una altura $h_1 =$ m de los dispersores rectangulares. Tres de los límites del dominio están rodeados de capas perfectamente adaptadas

(PML) (2.5.3.1.3) para simular propagación en campo libre. En el límite inferior, delante de la multicapa, se utiliza una PML y en la parte inferior de detrás de la estructura se ha introducido la condición de impedancia (Figura (7.20)).

En la Figura (7.21) se muestran los espectros de atenuación acústica (dB) para dispersores totalmente rígidos y para dispersores totalmente rígidos-tuneado, es decir, con la solución adoptada para reducir la difracción por el borde superior de la pantalla. Se comprueba que en la zona cerca de la frecuencia Bragg $f_{Bragg} = 515$ Hz (zona recuadrada con puntos), se consigue mayor atenuación en el caso de utilizar satélites diseñados para que produzcan interferencias destructivas con el campo difractado.

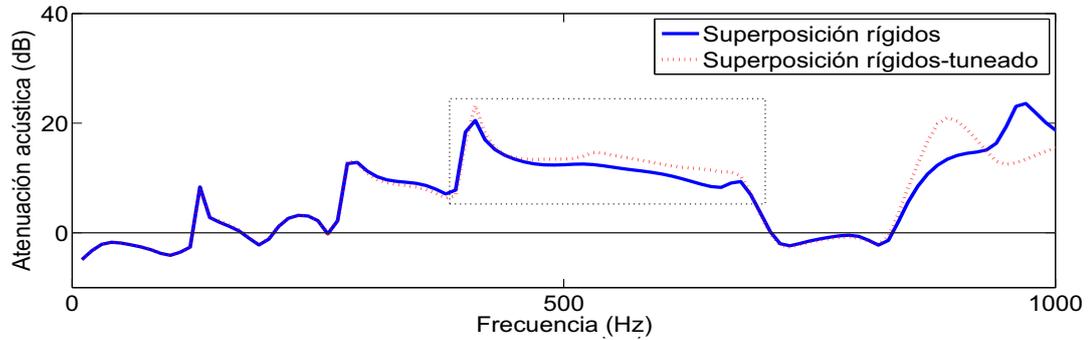


Figura 7.21: Espectros globales de atenuación acústica en dB, para dispersores totalmente rígidos (línea azul continua) y dispersores totalmente rígidos-tuneado (línea roja de puntos). La zona recuadrada de espectro, muestra que se consigue la mejora justo para las frecuencias de diseño de los dispersores añadidos (satélites).

7.4.1.2 Dispersores rígidos con cavidad resonante tuneado

El modelo 2D (plano OXY) se corresponde con el visto en la sección (7.3.1.2), mientras que el modelo 2D (plano OXZ) es idéntico al utilizado en el caso anterior excepto que el dispersor modelizado, que se puede ver en la Figura (7.15) tiene una anchura de valor $d = 0.28$ m (radio $R = 0.14$ m) y está formado por dos paredes rígidas de espesor 0.045 m, quedando entre estas paredes una capa de aire. Para la simulación numérica, hay que tener en cuenta que la cavidad de aire tiene una interfase (condición de continuidad) con el medio que rodea a las estructura. Salvo este detalle, el dominio de resolución se corresponde con el del caso anterior y que se muestra en la Figura (7.20).

En la Figura (7.22) se muestra el espectro de atenuación acústica (dB) para dispersores rígidos con cavidad resonante y para dispersores rígidos con cavidad

7. Modelo integrado de pantalla acústica basada en conjuntos de dispersores aislados

resonante tuneado. Se comprueba igualmente, que en la zona cerca de la frecuencia Bragg $f_{Bragg} = 515$ Hz, se consigue mayor atenuación en el caso de utilizar satélites.

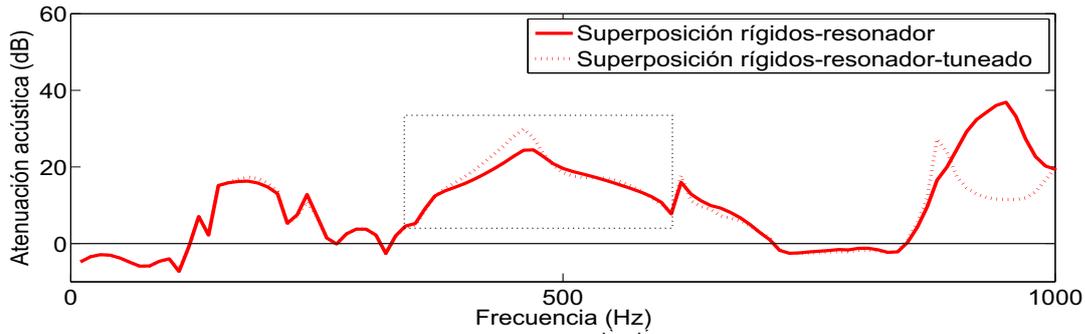


Figura 7.22: Espectros globales de atenuación acústica en dB, para dispersores rígidos-cavidad resonante (línea roja continua) y dispersores rígidos-cavidad resonante-tuneado (línea roja de puntos). La zona recuadrada de espectro, muestra que se consigue la mejora en la atenuación justo para las frecuencias de diseño de los dispersores añadidos (satélites).

7.4.1.3 Dispersores rígidos con cavidad resonante y material absorbente tuneado

El modelo 2D (plano OXY) se corresponde con el visto en la sección (7.3.1.3), mientras que el modelo 2D (plano OXZ) es idéntico al utilizado en el caso anterior siguiendo el argumento expuesto en la sección (7.3.2.3).

En la Figura (7.23) se muestra el espectro de atenuación acústica (dB) para dispersores rígidos con cavidad resonante y material absorbente y para dispersores rígidos con cavidad resonante y material absorbente tuneado. Se comprueba que en la zona cerca de la frecuencia Bragg $f_{Bragg} = 515$ Hz, se consigue mayor atenuación en el caso de utilizar satélites.

7.5 Modelo integrado de diseño de pantalla acústica basada en conjuntos de dispersores aislados

En las secciones anteriores se han presentado tres modelos numéricos basados en el modelo de superposición introducido en la sección (7.2) y que modelizan tres casos de pantallas acústicas 2D basadas en dispersores aislados: primera generación, segunda generación y con elementos interferentes. Surge la pregunta de si con un

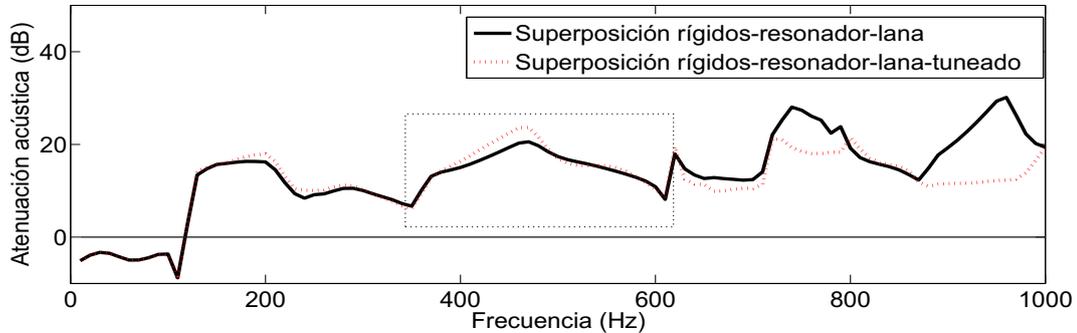


Figura 7.23: Espectros globales de atenuación acústica en dB, para dispersores rígidos-cavidad resonante-absorbente (línea negra continua) y dispersores rígidos-cavidad resonante-absorbente-tuneado (línea roja de puntos). La zona recuadrada de espectro, muestra que se consigue la mejora en la atenuación justo para las frecuencias de diseño de los dispersores añadidos (satélites).

sólo modelo numérico se podrían englobar el resto. La respuesta es afirmativa. En este apartado se presenta un modelo numérico integrado de pantalla acústica basada en dispersores aislados que a partir de dos modelos 2D por superposición reproduce los resultados de un 2DSC que incluye múltiples fenómenos acústicos. Este modelo integrador permite de una manera sencilla y computacionalmente rápida realizar diseños de pantallas con múltiples soluciones. Lógicamente este modelo integral reproduce todos los resultados obtenidos en las secciones anteriores de este capítulo.

7.5.1 Modelo de superposición integral

Como en los modelos previos, se ha dividido el problema 3D en dos casos 2D. Las geometrías completas de ambos casos 2D, incluyendo todos los mecanismos considerados, se muestran en la Figura (7.24(a)) y Figura (7.24(b)), con los diferentes mecanismos implicados que se asignan a cada uno de ellos. Por un lado, los mecanismos relacionados con la composición de los dispersores (BG, la absorción y resonancias) han sido asignados a la geometría mostrada en la Figura (7.24(a)). Esta asignación puede ser fácilmente entendida teniendo en cuenta que no hay cambios en la geometría que definen estos mecanismos a lo largo de la dirección de los ejes de los cilindros (OZ dirección en este modelo), y el sistema puede ser considerado como un 2D. Se ha llamado a esta geometría "modelo 2D plano OXY ".

Como se puede ver, la geometría está formada por una sección de la estructura 2DSC considerada, perpendicular a los ejes de los dispersores cilíndricos (OXY), representados por círculos que incluyen todos los mecanismos considerados. En el

recuadro de la Figura (7.24(b)) se puede observar la composición de la cilindros multifenómeno, que coincide con los vistos en secciones anteriores y además son utilizados en la sección experimental. Están formados por cilindros rígidos vacíos hechos de PVC con espesor de pared e_1 y radio r_{int} . A continuación, una capa de un material absorbente (lana de roca) con radio externo R y espesor e está enrollada alrededor del cilindro rígido. Para simular la ranura a lo largo de su longitud, se inserta un rectángulo de anchura de cuello A a través del dispersor. Las diferentes partes de esta geometría puede ser activado o desactivado en el modelo para simular diferentes materiales o diferente composición de los dispersores cilíndricos.

Por otro lado, la difracción en el borde superior de los dispersores cilíndricos se ha incluido en la geometría mostrada en la Figura (7.24(b)). Se ha llamado a esta geometría "modelo 2D plano OXZ ". En este caso, el modelo 2D está formado por una sección en un plano paralelo a los ejes de la dispersores cilíndricos (OXZ), y que están representados por rectángulos con su base igual al doble del radio de los dispersores multifenómeno, tal y como se comentó en la sección (7.2). Se puede observar en la Figura (7.24(b)) de color amarillo la capa del material absorbente de cada dispersor. Para la reducción de la difracción utilizando interferencias destructivas, se incluye en el modelo 2D OXZ un conjunto de cilindros vacíos rígidos (color rojo en la Figura (7.24(b))) con el radio r_1 y espesor de pared e_1 , que se sitúan perpendicularmente y en la parte superior de los dispersores multifenómeno cilíndricos. Estos nuevos dispersores se ven en la vista en sección como un conjunto de círculos, que están dispuestos cerca del límite posterior de cada cilindro multifenómeno a fin de reducir la difracción en el borde superior de cada uno que forma la estructura 2DSC. La distancia h_1 entre estos nuevos dispersores y los dispersores cilíndricos que forma la estructura SC se ha calculado en la sección (7.4).

El dominio geométrico que se muestra en la Figura (7.24) se corresponde con el ya detallado en la sección (7.2) y que ha sido utilizado en secciones anteriores. En cuanto a la modelización de los diferentes elementos que forman el 2DSC, se utilizan las mismas condiciones que se detallan en las secciones anteriores: dispersor rígido, sección (7.3.1.1), dispersor rígido-resonador, sección (7.3.1.2) y dispersor rígido-resonador-absorbente, sección (7.3.1.3).

La aplicación del modelo integral de superposición generalizado a los diferentes casos estudiados consiste en activar³ (color rojo) o desactivar (color blanco) los dominios que forman el modelo. Para el caso de dispersores rígidos, Figura (7.25(a)), se habilita la capa cilíndrica de radio R de forma que no penetra la perturbación en su interior. El efecto es como si el dispersor fuera totalmente rígido. De la mis-

³Activar una capa en este modelo es habilitar dicha capa con la condición de contorno y tipo de material correspondiente. Así si la superficie es rígida se activa o habilita como tal (condición Neumann). En cambio si es rígida pero está desactivada, es transparente a la perturbación ya que está formada por aire.

7.5. Modelo integrado de diseño de pantalla acústica basada en conjuntos de dispersores aislados

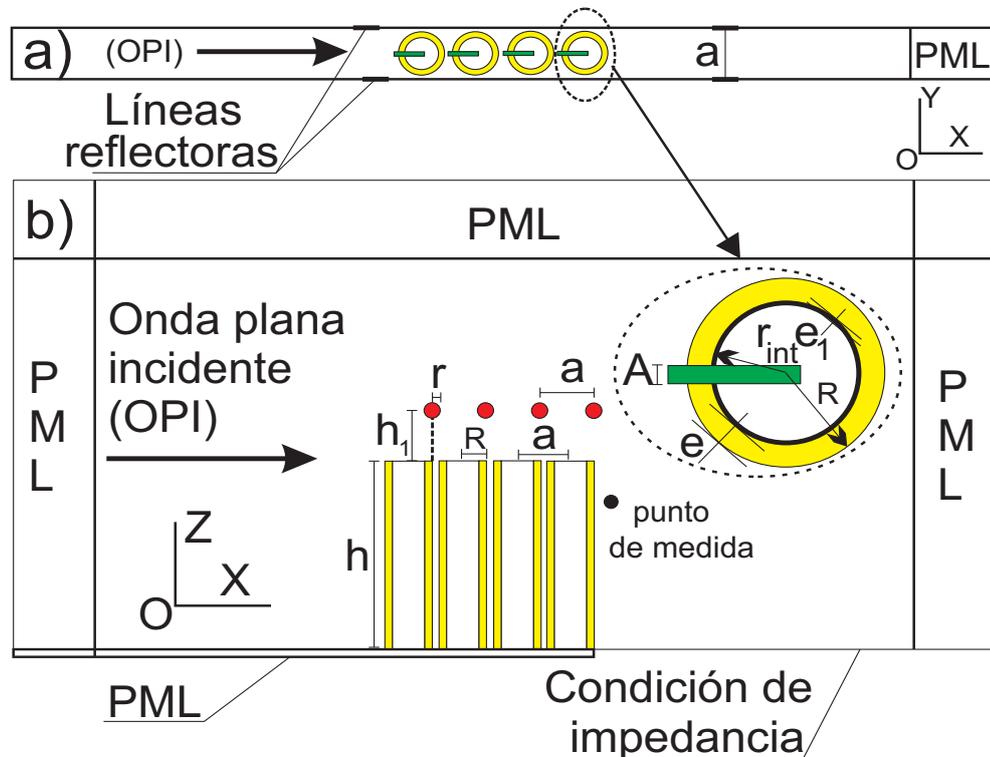


Figura 7.24: Modelo de superposición integral generalizado donde el problema real 3D se sustituye por dos casos 2D; (a) Modelo 2D plano OXY , que incluye BG, resonancias y los fenómenos de absorción. Se muestra la sección OXY de los dispersores cilíndricos multifenómeno, así como las líneas laterales reflectoras y las PML que definen los límites del dominio; (b) Modelo 2D plano OXZ con los principales parámetros geométricos del problema considerado. En este modelo 2D, se considera la difracción por el borde superior de los dispersores multifenómeno y la difracción en los dispersores circulares (satélites) donde se puede ver la sección OXZ del problema real 3D. También se muestran las PML y la condición de impedancia que definen los límites de la figura. En la inserción, se muestran los principales parámetros geométricos de los dispersores multifenómeno cilíndricos.

ma manera, para el caso de dispersores rígidos con cavidad resonante (ranurados), Figura (7.25(b)), se activa (color rojo) la capa cilíndrica de radio R y el rectángulo (cuello) que penetra en el interior del círculo. Evidentemente para el cálculo numérico, activar la ranura es que sea aire y activar el cilindro de radio R es que sea rígido. Por último, para el caso de dispersores rígidos con cavidad resonante y material absorbente, se muestra en la Figura (7.25(c)) las capas activadas y las desactivadas. En la Figura (7.25(d)) se muestra un ejemplo de cálculo con el modelo integral del mapa de presión real para la frecuencia $f = 515$ Hz con incidencia en la

dirección ΓX (0°) onda plana.

Los espectros que se muestran en las Figuras (7.21), (7.22) y (7.23) se han calculado con este modelo global produciendo los mismos resultados.

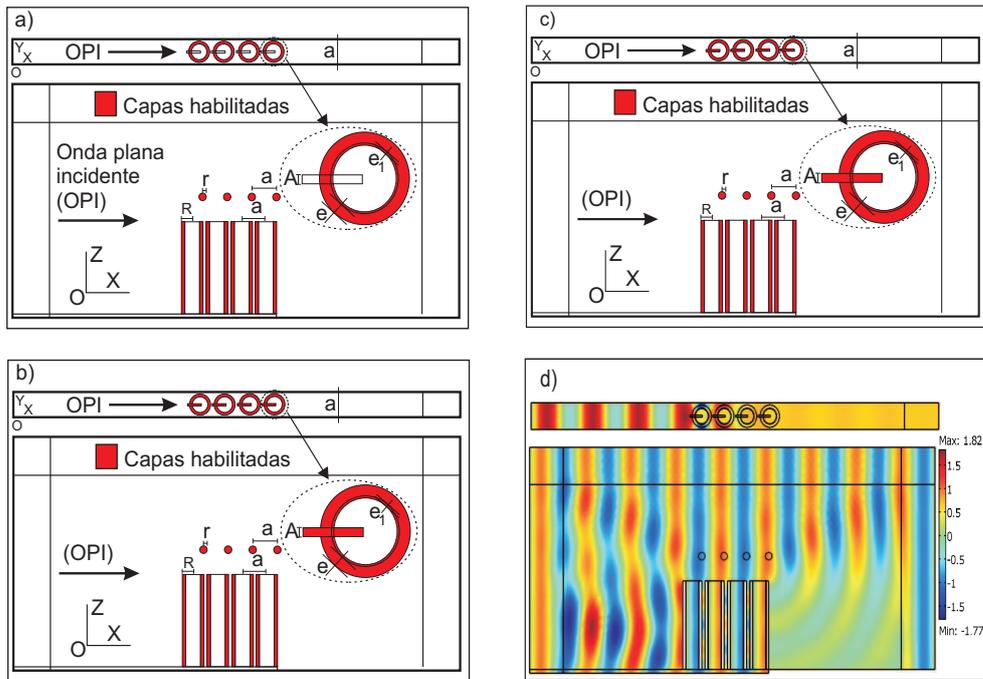


Figura 7.25: Aplicación del modelo integral de superposición generalizado al análisis de los diferentes casos: (a) 2DSC formado por dispersores cilíndricos rígidos. Los mecanismos considerados son: BG y difracción tanto en el borde superior del dispositivo como en los satélites; (b) 2DSC formado por dispersores cilíndricos rígidos y ranurados. En este caso, los mecanismos implicados son: BG, difracción en el borde superior y satélites y resonancias acústicas. En ambos casos, se puede ver los diferentes dominios activados (color rojo) o desactivados (sin color), dependiendo de la naturaleza de los mecanismos acústicos involucrados en el problema; (c) 2DSC formado por dispersores cilíndricos rígidos, ranurados y absorbente. En este caso, los mecanismos implicados son: BG, difracción en el borde superior, difracción en satélites, resonancias acústicas y absorción acústica; (d) Se muestra un ejemplo de la simulación numérica del dominio completo en $f = 515$ Hz, para los dos modelos 2D: plano OXY y plano OXZ . En ambos casos se representa el valor real de la presión total, $\text{Re}(P)$.

7.5.1.1 Parámetros del cálculo numérico

Se ha utilizado el programa comercial Comsol 3.5a. Se ha seleccionado como parámetro de malla libre, fina, con método de refinamiento regular. La malla obtenida

contiene para el modelo 2D plano OXY $1.5 \cdot 10^5$ elementos con $6.51 \cdot 10^5$ grados de libertad, módulo acústico (PA) y para el modelo 2D plano OXZ $5.1 \cdot 10^5$ elementos con $3.02 \cdot 10^5$ grados de libertad. módulo acústico (SW).

7.5.2 Resultados experimentales

Para validar los resultados numéricos, se ha dispuesto en la cámara anecoica la estructura formada por los dispersores más completos (rígidos-cavidad resonante-lana de roca). Se han utilizado 4×4 dispersores, dispuestos en red cuadrada. Para el caso tuneado, se insertan los satélites, que son 4 cilindros de PVC (material rígido) de radio $r = 0.05$ m y de longitud $h = 1.20$ m. Estos se han dispuesto a una altura $h_1 = 0.33$ m del segundo borde de cada dispersor, tal y como se realiza en el cálculo numérico. Para que se mantengan en la posición deseada, se han cogido al bastidor con sendos hilos muy finos, para evitar perturbaciones. El montaje experimental se puede ver en la Figura (7.26).



Figura 7.26: Montaje experimental del análisis de la difracción en el borde con satélites: ambas imágenes muestran la estructura analizada, formada por 16 dispersores multifenómeno y los satélites situados en el segundo borde de cada fila de dispersores situados a una altura de un paso de red.

Los espectros obtenidos con la estructura sin y con satélites se comparan en la Figura (7.27). El punto de medida considerado es el mismo que en el cálculo numérico. Los resultados son análogos a los numéricos, teniendo en cuenta que en el montaje experimental el número de dispersores que se utiliza está limitado a 16.

Se ha recuadrado en la Figura (7.27) con línea discontinua, la zona donde se ve la actuación de los satélites. Como se puede observar, se localiza en el entorno de $f_{Bragg} = 515$ Hz, tal y como predice el modelo numérico. Hay que recordar que los satélites se han diseñado para que produzcan este efecto.

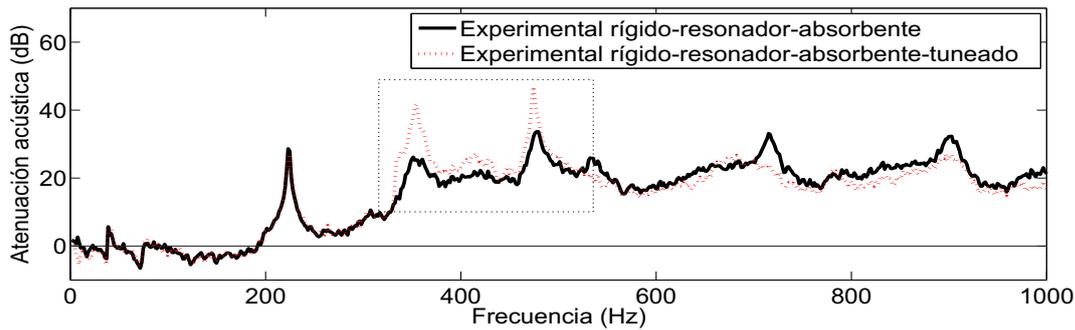


Figura 7.27: Espectros de atenuación acústica experimentales: la línea continua negra representa el espectro para el caso de dispersores rígidos-cavidad resonante-absorbente y la línea de puntos roja representa el espectro para el caso de dispersores rígidos-cavidad resonante-absorbente-tuneado.

7.6 Conclusiones

En este capítulo se ha desarrollado un modelo integral para el análisis de pantallas acústicas basadas en dispersores aislados de primera y de segunda generación. Se han analizado los efectos que provoca una pantalla acústica formada por dispersores acústicos ordenados de forma periódica cuando a su través pasa una onda plana. Se ha visto que estos efectos: difracción Bragg y difracción por el borde superior, pueden ser mejorados. El modelo de superposición permite el estudio individual de estos dos fenómenos y por lo tanto se ha conseguido así una forma de diseñar pantallas para obtener un mayor rendimiento, de una forma más sencilla. Las estrategias utilizadas para que la atenuación acústica sea mayor viene ligada a los dos análisis 2D efectuados. Así, con dispersores multifenómeno se consigue incrementar en el espectro la atenuación, ya que a la dispersión múltiple se han añadido los fenómenos de resonancia y absorción. Pero además, añadiendo dispersores exteriores a la pantalla (satélites), se consigue reducir la difracción por el borde superior, contribuyendo a una mejora global de la atenuación, ya que los fenómenos se superponen positivamente. Numéricamente, el efecto de estos satélites se ha calculado con el modelo 2D (plano OXZ), pero el efecto es global, y ha sido demostrado experimentalmente. A partir de aquí, se abre un abanico amplio de diseño a la carta para

pantallas acústica basadas en dispersores aislados, ya que estos fenómenos que se han incorporado y siguiendo el concepto de tunabilidad, pueden actuar en otros rangos de frecuencias. Gracias a este modelo, se pueden diseñar pantallas acústicas basadas en 2DSC buscando múltiples soluciones, de manera sencilla y con un bajo coste computacional, añadiendo una importante carga tecnológica al campo de las pantallas acústicas.

Capítulo 8

Conclusiones y trabajos futuros

En este Capítulo se resumen las conclusiones más importantes de esta memoria de tesis y también se presenta una explicación concisa del trabajo futuro.

8.1 Conclusiones

Esta memoria de tesis ha desarrollado dos grandes líneas de investigación en torno a las pantallas acústicas basadas en conjuntos de dispersores aislados con la finalidad última de aumentar la eficiencia de las mismas. Estas son: i) el desarrollo de una técnica de diseño, que en dos fases, consigue maximizar el fenómeno de la difracción Bragg. Una vez conseguido este aumento se han utilizado dispersores que incorporan múltiples fenómenos y se han diseñado pantallas tanto con ordenamientos cristalinos como fractales que han sido homologadas, ii) el análisis de la difracción por el borde superior de pantallas basadas en dispersores aislados con la finalidad de caracterizar el campo acústico en la zona de sombra. Se ha desarrollado un modelo integral que, por superposición, analiza todos y cada uno de los fenómenos involucrados en la respuesta acústica real de una pantalla semi-infinita basada en conjuntos de dispersores aislados. A continuación se muestran las conclusiones más importantes obtenidas de ambas líneas de investigación.

8.1.1 Maximización de la atenuación acústica. Homologación

- (i) Se ha conseguido un gran aumento de la banda de atenuación acústica maximizando el fenómeno de la difracción Bragg.

Esto se ha conseguido en dos fases: La primera de ellas consiste en la utilización de patrones fractales para disponer espacialmente los dispersores. Estas estructuras son los QFS. En una segunda fase se realiza la maximización de los QFS variando el ff de cada iteración fractal de forma independiente modificando los radios de los cilindros correspondientes.

- (ii) Los QFS son dispositivos eficientes y compactos.

Estas estructuras están formadas por un número de dispersores bastante menor que el que posee el correspondiente SC del mismo tamaño. Esto demuestra que con menor ff se puede aumentar la banda de atenuación acústica. Esta mejora es debido a la suma de los picos Bragg pertenecientes a las diferentes redes de dispersores (iteraciones). El proceso de aumento de las bandas de atenuación, pues, es debido a la existencia de diferentes constantes de red y la redistribución de los cilindros en las diferentes etapas.

La aplicación real de estas estructuras como pantallas acústicas, dada la disminución obtenida en volumen presenta una reducción de coste económico respecto a los SC, lo cual puede resultar una característica atractiva desde los puntos de vista tecnológico y económico. Además el disponer de menos dispersores hace que el QFS resultante posea una mayor visibilidad a su través y una menor resistencia al paso del aire, siendo el montaje de estas estructuras sencillo: la cimentación a utilizar para instalar la pantalla sería prácticamente inexistente.

- (iii) Se ha realizado un análisis cuantitativo del aumento de las bandas de atenuación acústica: ordenamientos siguiendo geometrías fractales frente a ordenamientos cristalinos. Los resultados confirman que:

- En el caso de un conjunto de dispersores dispuestos siguiendo un patrón fractal, se produce un rápido aumento en las propiedades de atenuación en comparación con el caso cristalino.
- Si un dispositivo formado por un conjunto de dispersores tiene que ocupar un área predeterminada, una disposición cuasi-fractal proporciona mucha más atenuación utilizando menos dispersores que si los dispersores están dispuestos siguiendo un patrón cristalino.

- (iv) Se han realizado y caracterizado acústicamente dos prototipos de barrera acústica basados en sistemas de dispersores aislados: la primera pantalla se ha realizado siguiendo ordenamientos periódicos, mientras que para la segunda pantalla se ha seguido un ordenamiento fractal.

- Estas estructuras muestran una superposición constructiva de los mecanismos físicos que intervienen en la atenuación del sonido (dispersión múltiple, resonancia y absorción) en el rango audible.
- Ambas pantallas se han ensayado, por separado, en una sala reverberante (UNE-EN ISO 1793-1:1998) para verificar el nivel de absorción de la pantalla y en una sala de transmisión (UNE-EN ISO 1793-2:1998) para clasificarla ante el aislamiento a ruido aéreo. Los resultados obtenidos

para ambos prototipos experimentales han sido clasificados en *A3* y *B2* respectivamente.

- Ambos prototipos han sido homologados y constituyen una alternativa a las pantallas acústicas tradicionales en determinadas situaciones y supuestos. Introducen un avance tecnológico en el campo de las pantallas acústicas donde el diseño geométrico es fundamental para la obtención del control de ruido.
- La pantalla con ordenamiento cuasi-fractal ha sido patentada correspondiendo los derechos a la Universitat Politècnica de València.

8.1.2 Difracción por el borde superior. Modelo integral

- (i) Caracterización del campo acústico en la zona de sombra de una pantalla acústica basada en conjunto de dispersores aislados.

Para ello se ha desarrollado tanto numérica como experimentalmente, un modelo de pantalla acústica basado en dispersores aislados cilíndricos rígidos de longitud finita. Los resultados se han comparado con los obtenidos para una pantalla clásica de las mismas dimensiones externas que el 2DSC. Se ha mostrado como el efecto de la difracción por el borde en la pantalla puede ser notorio para ciertas frecuencias y en cambio en otras, la transmisión a través del cristal, oculta este fenómeno. Este modelo teórico se justifica con los resultados experimentales presentados.

- (ii) Modelo integral de diseño de la respuesta acústica real de pantallas acústicas basadas en conjuntos de dispersores aislados.

Una vez caracterizado el campo acústico en la zona de sombra de las pantallas acústicas basadas en dispersores aislados, se ha desarrollado un modelo integral para el análisis de la respuesta acústica real de estas estructuras, que incluye los diferentes fenómenos acústicos implicados y la relación entre ellos. Este modelo integral se ha desarrollado para el análisis tanto de pantallas acústicas basadas en dispersores aislados de primera como de segunda generación. Las conclusiones más importantes son:

- Es un modelo de superposición que permite el estudio individual de los fenómenos acústicos implicados en las pantallas acústicas basadas en dispersores aislados.
- Reduce el estudio 3D a dos problemas 2D.
- El coste computacional se ve reducido ya que se analizan modelos en 2D.

- Con el uso de dispersores multifenómeno se consigue incrementar la banda de atenuación en el espectro de frecuencias al añadir los fenómenos de la resonancia y absorción.
- Se consigue una mejora global de la atenuación acústica incorporando dispersores exteriores a la pantalla (satélites). El diseño de estos dispersores puede cambiarse para que su efecto se produzca en otros rangos de frecuencias.
- Se pueden diseñar pantallas acústicas basadas en dispersores aislados buscando múltiples soluciones: los efectos incorporados contribuyen positivamente y pueden actuar, como se ha comentado en la conclusión anterior, en otros rangos de frecuencias.

8.2 Trabajos futuros

Las perspectivas de futuro en el campo de los cristales de sonido son muy prometedoras y pueden ser aplicables en distintas áreas industriales y de la ingeniería. Las pantallas basadas en dispersores aislados han sido caracterizadas acústicamente, pero las posibilidades que se abren para seguir buscando modificaciones en la respuesta acústica son amplias. Por ejemplo, la modificación del borde superior utilizando vegetación u otros materiales sintéticos, está por analizar. También, el estudio de otras geometrías fractales y la relación con el proceso de desorden medido mediante la entropía métrica, es una línea en la que seguir investigando. Las pantallas homologadas podrían ser utilizadas también para la reducción del ruido producido en ferrocarriles de alta velocidad, lo que implica tener que conocer comportamientos no sólo acústicos si no en general de otras ramas de la ingeniería. Se abre pues, nuevos campos en el estudio y diseño de pantallas acústicas reales basadas en conjuntos de dispersores acústicos aislados.

Apéndices

Apéndices A

Abreviaturas

- **AA**, área de atenuación acústica.
- **ANC**, control activo de ruido (Active Noise Control, en inglés).
- **BA**, Barrera Acústica.
- **BACSF**, Barrera Acústica basada en Cristales de Sonido ordenado de forma Fractal.
- **BEM**, método de los elementos frontera (the Boundary Elements Method, en inglés).
- **BG**, banda prohibida, de transmisión (Band Gap, en inglés).
- **2D**, que tiene dos dimensiones espaciales.
- **2DSCs**, cristales de sonido 2D.
- **QC**, cuasi-cristal (Quasi-Crystal, en inglés).
- **QFS**, estructura cuasi-fractal (Quasi-Fractal Structure, en inglés).
- QFS_{Max} , estructura cuasi-fractal maximizada.
- QFS_{Exp} , estructura cuasi-fractal experimental.
- **QOS**, estructura Cuasi-Ordenada (Quasi-Ordered Structure, en inglés).
- **FEM**, método de los elementos finitos (Finit Elements Method, en inglés).
- **ff**, factor de llenado Filling Factor, en inglés.
- **FFT**, transformada rápida de Fourier Fast Fourier Transform, en inglés.

- **IL**, pérdida por inserción o atenuación acústica en decibelios (Insertion Loss, en inglés).
- **IPS**, fuente puntual imaginaria (Imaginary Point Source, en inglés).
- **MLS**, método de Secuencias de Máxima Longitud (method of Maximum Length Sequences, en inglés).
- **MST**, teoría de la dispersión múltiple (Multiple Scattering Theory, en inglés).
- **LabVIEW**, plataforma y entorno de desarrollo para diseñar sistemas, con un lenguaje de programación visual gráfico (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench, en inglés).
- **OX**, dirección eje cartesiano x.
- **OY**, dirección eje cartesiano y.
- **OXZ**, plano formado por la intersección del eje x y el eje z.
- **PA**, módulo presión acústica del programa comercial Comsol 3.5a.
- **PC**, ordenador personal.
- **PDE**, ecuación en derivadas parciales (Partial Differential Equation, en inglés).
- **PML**, capa perfectamente adaptada (Perfectly Matched Layers, en inglés).
- **PMLs**, capas perfectamente adaptadas.
- **PWE**, método de expansión de ondas planas (Plane Wave Expansion, en inglés).
- **SC**, cristal de sonido.
- **SCs**, cristales de sonido.
- **SW**, módulo onda dispersada del programa comercial Comsol 3.5a.
- **3D**, que tiene tres dimensiones espaciales.
- **3DReAMS**, sistema de adquisición de datos (3 Dimensional e-Acoustic Measurement System, en inglés).

Apéndices B

Superposición con Matlab

Siendo: p_s presión onda dispersada, p_t presión onda total y p_i presión onda incidente la línea de comandos si se suma resultados obtenidos con el módulo PA y SW es:

```
>> rp = real_mst_PA(:,2) + real_pt_multi_SW(:,2);  
>> ip = imag_mst_PA(:,2) + imag_pt_multi_SW(:,2);  
>> P = rp + 1i * ip;  
>> ILP = 20 * log10(1./abs(P));  
>> plot(real_mst_PA(:,1), ILP, 'b');
```

o igualmente:

```
>> rp = real_mst_PA(:,2)+real_pi_multi_SW(:,2)+real_ps_multi_SW(:,2);  
>> ip = imag_mst_PA(:,2)+imag_pi_multi_SW(:,2)+imag_ps_multi_SW(:,2);  
>> P = rp + 1i * ip;  
>> ILP = 20 * log10(1./abs(P));  
>> plot(real_mst_PA(:,1), ILP, 'r');
```


Apéndices C

Publicaciones

C.1 Revistas internacionales

1. Castiñeira-Ibáñez S., Romero-García V., Sánchez-Pérez J. V., and Garcia-Raffi L. M.
Overlapping of acoustic bandgaps using fractal geometries.
E.Phys.Lett. **92**, 240071-240073 (2010)
2. Romero-García V., Sánchez-Pérez J. V., Castiñeira-Ibáñez S. and Garcia-Raffi L. M.
Evidences of evanescent Bloch waves in phononic crystals.
Applied Physics Letters, **96**, 124102-1 124102-3 (2010)
3. Castiñeira-Ibáñez S., Rubio C., Romero-García V., Sánchez-Pérez J.V. and Garcia-Raffi L. M.
Design, Manufacture and Characterization of an Acoustic Barrier Made of Multi-Phenomena Cylindrical Scatterers Arranged in a Fractal-Based Geometry.
Archives of Acoustics **37**(4), 455-462 (2012)
4. Castiñeira-Ibáñez S., Rubio C. and Sánchez-Pérez J.V.
Acoustic wave diffraction at the upper edge of a two-dimensional periodic array of finite rigid cylinders. A comprehensive design model of periodicity-based devices.
EPL **101**, 64002 (2013)
5. Castiñeira-Ibáñez S., Rubio C., Redondo J. and Sánchez-Pérez J.V.

Quantitative characterization of Bandgap properties in sets of isolated acoustic scatterers arranged using fractal geometries.

Appl. Phys. Express **7**, 042201 (2014)

6. Castiñeira-Ibáñez S., Romero-García V., Sánchez-Pérez J.V. and Garcia-Raffi L. M.

Periodic systems as road traffic noise reducing devices: prototype and standardization.

Environmental Engineering and Management Journal, Romania, "aceptado para publicación" (2012)

7. Castiñeira-Ibáñez S., Rubio C. and Sánchez-Pérez J.V.

Generalization of an overlapping comprehensive model to design devices based on arrays of isolated scatterers. Decreasing of the diffraction at their upper edge.

En revisión (2014)

C.2 Congresos internacionales

1. Romero-García V., Krynkin A., Sánchez-Pérez J. V., Castiñeira-Ibáñez S. and García-Raffi L. M.

On the numerical modeling of elastic resonant acoustic scatterers.

Editorial Comsol, European COMSOL Conference 2009 (ISSN 978-0-9825697-0-2), pág. 1-6 (2009)

2. Sánchez-Pérez J. V., Romero-García V., García-Raffi L. M. and Castiñeira-Ibáñez S.

Improved attenuation bands using quasi-fractal structures.

Editorial European Acoustics Association, 8th European Conference on Noise Control (Euronoise) (ISSN 1610-1928), pág. 21-31 (2009)

3. García-Raffi L. M., Romero-García V., Sánchez-Pérez J. V., Castiñeira-Ibáñez S., Herrero H., García-Nieto S. and Blasco X.

Generation of defects for improving properties of periodic systems.

Editorial European Acoustics Association, 8th European Conference on Noise Control (Euronoise) (ISSN 1610-1928), pág. 11-21 (2009)

4. Sánchez-Pérez J. V., Castiñeira-Ibáñez S., Romero-García V. and García-Raffi L. M.
New arrangements of acoustic scatterers with high attenuation properties.
Editorial Portuguese acoustical society, INTER-NOISE 2010, the 39th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (ISSN 0736-2935), pág. 76-86 (2010)
5. Romero-García V., Castiñeira-Ibáñez S., Sánchez-Pérez J. V. and García-Raffi L. M.
Design of wideband attenuation devices based on Sonic Crystals made of multiphenomena scatterers.
Editorial European Acoustics Association, Annual Institute of Acoustics Meeting (Acoustics 2012) (ISSN 978-2-919340-01-9), pág. 543-548 (2012)
6. Rubio C., Castiñeira-Ibáñez S., Romero-García V. and Sánchez-Pérez J. V.
Characterization of the diffraction on the upper edge of acoustic barriers based on sonic crystals. Comparison with the case of classic barriers.
Editorial Czech Acoustical Society; European Acoustics Association, 9th European Conference on Noise Control (Euronoise) (ISSN 978-80-01-05013-2), pág 1329-1333 (2012)
7. Castiñeira-Ibáñez S., Rubio C., Romero-García V., Sánchez-Pérez J. V. and García Raffi L. M.
Characterization of an acoustic barrier made up of arrangements of multiphysical phenomena cylindrical scatterers based on fractal geometries.
Editorial Czech Acoustical Society; European Acoustics Association, 9th European Conference on Noise Control (Euronoise) (ISSN 978-80-01-05013-2), pág 1289-1293 (2012)
8. Castiñeira-Ibáñez S., Rubio C. and Sánchez-Pérez J. V.
Analysis of the diffraction on the upper edge of an acoustic barrier formed by arrays of rigid scatterers.
Editorial Institute of Noise Control Engineering, 42nd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (Inter-noise 2013) (ISSN 0736-2935), pág 1-5 (2013)

9. Castiñeira-Ibáñez S., Rubio C. and Sánchez-Pérez J. V.

Design of the upper edge of noise barriers based on arrays of scatterers to reduce the diffraction phenomenon.

Editorial Institute of Noise Control Engineering, 42nd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering

(Inter-noise 2013) (ISSN 0736-2935), pág 1-5 (2013)

10. Rubio C., Castiñeira-Ibáñez S. and Sánchez-Pérez J. V.

A simple and phased comprehensive model to design acoustic barriers based on sonic crystals by means of finite elements method.

FORUM ACUSTICUM 2014: 61st Open Seminar on Acoustics and Polish Acoustical Society - Acoustical Society of Japan special session, Krakow

(ISSN 2221-3767) (ISBN 987-83-61402-28-2) (2014)

C.3 Revistas Nacionales

1. Romero-García V., Castiñeira-Ibáñez S., García-Raffi L. M. and Sánchez-Pérez J. V.

Comportamiento de barreras de cristales de sonido con dispersores resonantes.

Editorial Sociedad Española de Acústica, Revista de Acústica (ISSN 0210-3680), pág 5-11 (2010)

C.4 Congresos Nacionales

1. Sánchez-Pérez J. V., Castiñeira-Ibáñez S., Rubio C., Romero-García V. and García-Raffi L. M.

Sistema de adquisición de datos de alta precisión para el rango audible en condiciones controladas: 3DReAMS.

Editorial SEA, TECNIACÚSTICA 2011. 42º Congreso Español de Acústica. Encuentro Ibérico de Acústica. EAA European Symposium on Environmental Acoustics and on Buildings Acoustically Sustainable (ISSN 978-84-87985-20-1) pág 1-8 (2011)

2. Castiñeira-Ibáñez S., Rubio C., Sánchez-Pérez J. V., Romero-García V. and García-Raffi L. M.

Pantallas acústicas basadas en cristales de sonido de segunda generación

Editorial SEA, TECNIACÚSTICA 2011. 42º Congreso Español de Acústica. Encuentro Ibérico de Acústica. EAA European Symposium on Environmental Acoustics and on Buildings Acoustically Sustainable (ISSN 978-84-87985-20-1) pág 1-8 (2011)

3. Castiñeira-Ibáñez S., Rubio C. and Sánchez-Pérez J. V.

Análisis de la difracción por el borde superior de pantallas acústicas basadas en sistemas periódicos de cilindros.

Editorial Sociedad Española de Física, XXXIV Reunión Bienal de la Real Sociedad Española de Física (ISSN 978-84-616-5607-3) pág 866 - 866 (2013)

4. Castiñeira-Ibáñez S., Rubio C. and Sánchez-Pérez J. V.

Modelo integral para el diseño de pantallas acústicas basadas en cristales de sonido mediante el método de elementos finitos.

Editorial SEA, TECNIACÚSTICA 2014. 45º Congreso Español de Acústica. 8º Encuentro Ibérico de Acústica. European Symposium on Smart Cities and Environmental Acoustics (2014)

C.5 Publicaciones Docentes

1. Castiñeira-Ibáñez S., Rubio C. and Sánchez-Pérez J. V.

Use of FEM to improve teaching in the classroom: Edge diffraction modeling of a classical acoustic barrier.

Editorial International Association of Technology, Education and Development (IATED)

5th International Conference of Education, Research and Innovation (ICERI 2012) (ISSN 978-84-616-0763-1) pág 5839-5846 (2012)

2. Rubio C., Castiñeira-Ibáñez S. and Sánchez-Pérez J. V.

The challenge of modeling to improve teaching in classroom. Application to resonators.

Editorial International Association of Technology, Education and Development (IATED)

6th International Conference of Education, Research and Innovation (ICERI 2013) (ISSN 978-84-616-0763-1) pág 1109-1116 (2013)

3. Castiñeira-Ibáñez S., Rubio C. and Sánchez-Pérez J. V.

La modelización, como herramienta docente, para la visualización del fenómeno de difracción en una pantalla acústica.

Editorial Sociedad Española de Física, XXXIII Reunión Bienal de la Real Sociedad Española de Física. 23º Encuentro Ibérico de Enseñanza de la Física". (ISSN 978-84-616-5607-3) pp. 996 - 996 (2013)

C.6 Proyecto de investigación

1. Optimización, diseño y desarrollo tecnológico de dispositivos basados en cristales de sonido para aplicaciones médicas y medioambientales (MAT2009-09438).

Entidad financiadora: Ministerio de Educación. Período 01-04-2010 hasta 01-01-2013

Investigador principal: Sánchez-Pérez, J. V. Número total de investigadores: 5

C.7 Homologaciones

1. Pantalla vial antirruido: *Pantalla Cristal de Sonido* a base de cilindros de acero y lana de roca.

Inventores: Romero-García V., Castiñeira-Ibáñez S., Sánchez-Pérez J. V. and García-Raffi L. M.

Expediente 11/2957-2332 (2334) Applus LGAI Barcelona, Septiembre 2011

2. Pantalla vial antirruido: *Pantalla Cristal de Sonido Fractal* a base de cilindros de acero y lana de roca.

Inventores: Romero-García V., Castiñeira-Ibáñez S., Sánchez-Pérez J. V. and García-Raffi L. M.

Expediente 11/2957-1100 (2333) Applus LGAI Barcelona, Septiembre 2011

C.8 Patentes

1. Pantalla acústica.

Inventores: Romero-García V., Castiñeira-Ibáñez S., Sánchez-Pérez J. V. and
García-Raffi L. M.

Entidad titular: Universitat Politècnica de València.

Índice de Figuras

2.1	Pantalla acústica tradicional [11].	6
2.2	Zona de sombra de una pantalla acústica tradicional.	7
2.3	Algunos ejemplos de pantallas acústicas: (a) pantalla de módulos de hormigón, (b) pantalla de módulos de madera, (c) pantalla de módulos transparentes y (d) dique de tierra. Fotografías propiedad de la Federal Highway Administration (USA).	8
2.4	Difracción por el borde superior en una barrera clásica delgada semi-infinita: el campo difractado tiene forma circular. Se representa el mapa de presión total real.	10
2.5	Barrera delgada.	11
2.6	De izquierda a derecha: pantalla con arista uniforme, en T y en Y. . .	13
2.7	Arista de la barrera con formas irregulares.	14
2.8	(a) Pantalla con arista con cavidades resonantes, (b) pantalla con arista uniforme con elemento interferente situado a una cierta altura del borde superior.	14
2.9	Arista de la barrera con absorbente.	15
2.10	Esquema de un sistema CAR según [28].	16
2.11	Pantalla acústica formada por redes de dispersores aislados. Esta pantalla está situada en el Campus de la Universitat Politècnica de València [11].	17
2.12	Redes de Bravais en dos dimensiones.	19
2.13	Construcción de un SC.	20
2.14	Redes típicas en los SC 2D: cuadrada (a) y triangular (b).	20
2.15	Direcciones principales de propagación en red cuadrada y triangular.	21
2.16	SC con forma externa triangular formado por dispersores circulares en red triangular: espectro de atenuación acústica (dB) en las dos direcciones principales 0° y 30° . Se observa los BG para las dos direcciones de incidencia y se produce un solape entre estos: gap completo.	22
2.17	Construcción de un Cuasi-Cristal.	24
2.18	Construcción de un QOS a partir de un SC.	25
2.19	Fractales en la Naturaleza (Public-Domain-Photos.com).	26

2.20	Construcción del Fractal Conjunto de Cantor.	28
2.21	Construcción del Fractal Alfombra de Sierpinski.	28
2.22	Construcción del Fractal Triángulo de Sierpinski.	29
2.23	Alfombra de Sierpinski: (a) Proceso de Ordenación Fractal; (b) Proceso de Ordenación Clustering Fractal.	32
2.24	Triángulo de Sierpinski: (a) Proceso de Ordenación Fractal; (b) Proceso de Ordenación Clustering Fractal.	33
2.25	(A) Pantalla acústica basada en cristales de sonido de primera generación formada por dispersores cilíndricos dispuesto en red triangular. (B) Espectros de atenuación acústica (IL) correspondientes a dicha pantalla medidos en banda fina y en el rango de bajas frecuencias para las dos direcciones principales ΓX y ΓJ que se corresponden con 0° y 30° respectivamente [11].	34
2.26	Esquema de la sección de los cuatro diseños de dispersores multifenómeno: (a) Dispersor rígido recubierto de absorbente [46] (b) Dispersor rígido y resonador [53] [54] [47] (c) Dispersor que presenta dos frecuencias de resonancia [6] (d) Dispersor multifenómeno: rígido, resonancia y absorbente [9].	35
2.27	Disposición espacial de dos dispersores cualesquiera [60].	40
2.28	Espectros y mapas de presión (real(p)) a 1000 Hz obtenidos con: PA y SW. Condiciones de contorno (Radiation Boundary Condition) $p_0 = p_i$ excepto en el suelo de la zona de sombra donde: para PA se utiliza (Radiation Boundary Condition) $p_0 = 0$ y para SW se utiliza condición de impedancia (Impedance Boundary Condition).	46
3.1	Sistema experimental de medida. Esquema de la cámara y de la disposición de los elementos para llevar a cabo las medidas.	50
3.2	Sistema experimental de medida. (A) Bastidor (B) Rótula (C) Brazo robotizado, sistema de posicionamiento y micrófono.	52
3.3	Esquema del control del Robot.	53
3.4	Vista de la pantalla para controlar el número de puntos del experimento.	54
3.5	Vista de la pantalla para controlar el movimiento del robot y el sistema de sujeción de las muestras.	55
3.6	Muestras formadas por cilindros rígidos de aluminio. De izquierda a derecha: Cristal de sonido, estructura cuasi-fractal (alfombra de Sierpinski) y estructura cuasi-fractal (triángulo de Sierpinski).	56
3.7	Cilindros rígidos de cartón prensado de 1.20 m de altura. De izquierda a derecha: estructura completa formada por 28 dispersores y vista del ordenamiento utilizado: red cuadrada.	57

3.8	Cilindros rígidos con cavidad resonante y recubiertos de material absorbente (lana de roca). De izquierda a derecha: detalle de las partes del dispersor, de la chapa perforada cilíndrica utilizada para dar consistencia y proteger al dispersor, de los dispersores multifenómeno listos para ser utilizados y de un dispersor multifenómeno sin chapa perforada.	57
4.1	A partir de un elemento con forma cuadrada y siguiendo un procedimiento de iteración se muestra uno de los patrones fractales utilizados para este estudio [42].	60
4.2	Ordenamiento cuasi-fractal de dispersores. Se muestra las cinco iteraciones de redes de cilindros basadas en la geometría triángulo de Sierpinski, la estructura completa SC y la estructura QFS. En cada caso se presenta su correspondiente nivel del triángulo de Sierpinski [7].	61
4.3	Izquierda: Disposición maximizada de los dispersores basada en el triángulo de Sierpinski con diferentes relaciones entre los radios de los cilindros (QFS_{Max}). Derecha: Fotografía tomada de debajo de la estructura comercial (QFS_{Exp}) utilizada para validar los resultados teóricos [7].	63
4.4	Espectro teórico de atenuación acústica (IL) en la dirección principal de simetría ΓX para un SC Completo y el QFS_{Max} [7].	64
4.5	Estructura cuasi-fractal experimental (QFS_{Exp}) y SC triangular utilizada. Los radios de los cilindros para el primer caso son: $r_0 = 10$ cm, $r_1 = 8$ cm, $r_2 = 5.5$ cm, $r_3 = 3$ cm y $r_4 = 1.75$ cm, siendo $ff_{Exp} = 33,24\%$ [7].	65
4.6	Espectro teórico de atenuación acústica (IL) en la dirección principal de simetría ΓX para un SC Completo y la QFS_{Exp} [7].	66
4.7	Espectro teórico de atenuación acústica (IL) en la dirección principal de simetría ΓJ para un SC Completo y la QFS_{Exp} [7].	67
4.8	Espectro teórico y experimental de atenuación acústica (IL) del QFS_{Exp} en la dirección ΓX [7].	67

4.9	<p>Capacidad de atenuación (AA) frente al factor de llenado (ff%) de ambos procesos de crecimiento considerados: crecimiento cristalino (cuadrados rojos conectados por un línea negra continua) y crecimiento cuasi-fractal (círculos azules conectados por una línea punteada negra). Además, se indica el proceso que se ha llamado transición cristal-fractal (pentágonos verdes conectados por una línea discontinua negra). También se presenta una vista de la sección transversal de cada muestra, incluyendo la muestra que inicia (clúster) el proceso. Las áreas ocupadas aparecen en cada muestra cristalina. El resto de muestras les corresponde un valor de área ocupada igual al de la muestra cristalina que tenga la misma numeración [70].</p>	69
4.10	<p>(a) La geometría fractal triángulo de Sierpinski hasta el quinto nivel. Al lado está la vista en sección transversal de la disposición cuasi-fractal más grande de cilindros considerado (cuarto nivel fractal). La imagen es de la muestra experimental utilizada para las mediciones. En el recuadro se puede ver el clúster de comienzo considerado; (b) Comparación de los espectros de atenuación acústica (IL) (dB) obtenido (i) teóricamente por medio de Elementos Finitos (línea continua roja) y (ii) de forma experimental (línea negra discontinua) para una orientación 0° en la geometría cristalina [70].</p>	72
4.11	<p>Capacidad de atenuación (AA) frente al factor de llenado (ff%) de ambos procesos de crecimiento considerados: crecimiento cristalino (cuadrados rojos conectados por un línea negra continua) y crecimiento cuasi-fractal (círculos azules conectadas por una línea punteada negra). Además, se indica el proceso que se ha llamado transición cristal-fractal (pentágonos verdes conectados por una línea discontinua negra). También se presenta una vista de la sección transversal de cada muestra, incluyendo la muestra que inicia (clúster) el proceso. Las áreas ocupadas aparecen en cada muestra cristalina. El resto de muestras les corresponde un valor de área ocupada igual al de la muestra cristalina que tenga la misma numeración.</p>	73
4.12	<p>(a) La geometría fractal alfombra de Sierpinski hasta el segundo nivel. Al lado está la vista en sección transversal de la disposición cuasi-fractal de cilindros considerado (segundo nivel fractal). La imagen es de la muestra experimental utilizada para las mediciones. (b) Comparación de los espectros de atenuación acústica (IL) (dB) obtenido (i) teóricamente por medio de Elementos Finitos (línea continua roja) y (ii) de forma experimental (línea negra discontinua). En el recuadro se ve la posición de la fuente (F) y del micrófono (R) respecto de la muestra experimental analizada.</p>	75

5.1	Diseño y características acústicas de la pantalla acústica propuesta; (a) Sección transversal del dispersor diseñado, (b) Vista transversal del conjunto analizado [11].	80
5.2	Las figuras (a),(b) y (d) muestran el proceso de fabricación de la pantalla acústica basada en cristales de sonido de segunda generación; (c) Espectro de atenuación acústica (IL) para los diferentes elementos que forman los dispersores multifenómeno: con línea discontinua (color rojo) chapa perforada, con línea de puntos (color negro) resonador y con línea continua (color azul) resonador mas absorbente [11].	82
5.3	(a) Dominio de resolución del modelo numérico (Comsol Multiphysics 3.5a) y (b) modelo del dispersor multifenómeno: A es la anchura del cuello de la cavidad resonante circular de radio r_1 y que está rodeada de una capa rígida, también circular de radio interior r_1 y radio exterior r_2 . La corona de radio interior r_2 y radio exterior R , está formada de material absorbente (lana de roca).	83
5.4	Espectro de atenuación acústica (IL) en el punto de medida simulado mediante FEM a 0° (ΓX) de incidencia. El recuadro muestra una vista transversal del conjunto analizado [11].	84
5.5	Izquierda: Representación en planta de la disposición de los cilindros en la pantalla acústica basada en geometrías fractales. Derecha: Detalle de la base de la estructura donde se observa el ordenamiento cuasi-fractal seguido.	85
5.6	Espectro de atenuación acústica calculado en un punto situado a 1 m detrás de la barrera, medido en banda fina y para la orientación 0° . El recuadro muestra una vista transversal del conjunto analizado [8].	85
5.7	(a) Esquema de los puntos de medida (M_1 a M_5) y posición de las fuentes (S_1 y S_2). (b) Categoría y clasificación de barreras acústicas en función de DL_α , según la norma EN 1793-1: 1997. (c) Detalle de la disposición de la barrera acústica a valorar en la cámara reverberante. (d) Detalle de posición de los micrófonos justo en el momento de la medida [11].	88
5.8	(a) Esquema de los puntos de medida (M_1 a M_3) y posición de las fuentes (S_1 y S_2). (b) Categoría y clasificación de barreras acústicas en función de DL_R , según la norma EN 1793-2:1997. (c) y (d) Detalle de la disposición de la barrera acústica a valorar en la cámara de transmisión y posición de los micrófonos justo en el momento de la medida [11].	89

5.9	Resultados del prototipo de la pantalla basada en ordenamientos periódicos. (a) Variación de α_s en función de la frecuencia en bandas de tercios de octava. (b) Variación del índice R en función de la frecuencia en bandas de tercios de octava [11].	91
5.10	Resultados del prototipo de la pantalla basada en geometrías fractales. (a) Variación de α_s en función de la frecuencia en bandas de tercios de octava. (b) Variación del índice R en función de la frecuencia en bandas de tercios de octava [8].	92
6.1	Con línea discontinua se muestra el plano donde se realiza el análisis de la difracción Bragg y con línea continua el plano donde se realiza el análisis de la difracción por el borde superior [10]	96
6.2	(a) Geometría y dominio numérico para el análisis de la difracción por el borde superior de una pantalla acústica basada en cilindros rígidos ordenados periódicamente y (b) simulación numérica del problema de dispersión para la frecuencia 772 Hz. Se representa el mapa de presión total real, $Re(P)$ [10].	98
6.3	Montaje experimental [10].	99
6.4	Resultados numéricos del campo de presión acústico. (a) Pantalla acústica rígida continua semi-infinita obtenida con modelo 2D con las dimensiones externas igual a la de la pantalla de SC. (b) 2DSC semi-infinito para $y = a/2$ m a 772 Hz. En ambas figuras, en la parte superior se muestra un recuadro que representa la comparación de la atenuación acústica (IL) entre el numérico (N) y el experimental (E) en el área señalada con línea discontinua negra en las figuras (a) y (b). En la parte inferior se muestra el detalle de la zona de sombra. La línea continua negra muestra el patrón circular del campo acústico en la zona de sombra. (c) 2DSC semi-infinito para $y = 0.1a$ m a 772 Hz. (d) 2DSC semi-infinito para $y = a/2$ m a 1100 Hz. Los resultados para el sistema periódico han sido obtenidos utilizando el modelo 3D desarrollado. En todos los casos se dibuja la presión total, $Re(p_0 + p_s)$ [10].	100
7.1	(a) Modelo numérico utilizado para analizar el efecto de la difracción Bragg, (b) modelo numérico utilizado para analizar el efecto de la difracción por el borde superior de los dispersores que forman la pantalla acústica basada en dispersores aislados de primera generación, (c) pantalla real 3D basada en dispersores aislados [10].	104

-
- 7.2 Anchura de los cilindros a considerar: para la línea de puntos (punto de medida 1), los cilindros tendrían de anchura su diámetro. Para la línea a trazos (punto de medida 2), la anchura de los cilindros para el modelo de difracción por el borde es inferior [10]. 106
- 7.3 Resultados de atenuación acústica, (coordenadas medidas desde el IPS del 2DSC): (a) Punto (0.04,0.00,-0.30) m, en color azul el resultado del modelo 3D, en línea discontinua negra el resultado de la superposición y en línea discontinua roja el resultado experimental. (b) Punto (0.04,0.11,-0.30) m, en color azul el resultado del modelo 3D, en línea discontinua negra el resultado de la superposición y en línea discontinua roja el resultado experimental [10]. 107
- 7.4 Pantalla real 3D basada en dispersores aislados de segunda generación. Detalle del dispersor multifenómeno: R es el radio exterior del dispersor, A es la anchura del cuello de la cavidad resonante, r_{int} es el radio interior de la cavidad resonante, e_1 es el espesor del núcleo rígido (corona interior) y e es el espesor del anillo de material absorbente. 108
- 7.5 Geometría dispersores totalmente rígidos. 110
- 7.6 Modelo 2D (plano OXY) de dispersores totalmente rígidos: espectro de atenuación acústica en el punto de coordenadas (0.11,0.00,0.00) m medido desde el borde del último círculo y mapa de presión acústica (presión total real) a 515 Hz. 110
- 7.7 Geometría del modelo numérico formado por dispersores rígidos con cavidad resonante. Detalle del dispersor multifenómeno: A es la anchura del cuello de la cavidad resonante circular de radio r_1 y que está rodeada de una capa rígida, también circular de radio interior r_1 y radio exterior R 111
- 7.8 Modelo 2D (plano OXY) de dispersores rígidos con cavidad resonante: espectro de atenuación acústica en el punto de coordenadas (0.11,0.00,0.00) m medido desde el borde del último círculo y mapa de presión acústica (presión total real) a 170 Hz. 112
- 7.9 (a) Geometría del modelo numérico formado por dispersores rígidos con cavidad resonante y recubiertos con material absorbente, (b) detalle del dispersor multifenómeno: A es la anchura del cuello de la cavidad resonante circular de radio r_1 (color blanco) que está rodeada de una capa rígida (color gris), también circular, de radio interior r_1 y radio exterior r_2 . La corona de radio interior r_2 y radio exterior R , está formada de material absorbente (lana de roca)(color amarillo). 114
-

7.10	Modelo 2D (plano OXY) de dispersores rígidos con cavidad resonante y recubiertos con material absorbente: espectro de atenuación acústica en el punto de coordenadas (0.11,0.00,0.00) m, medido desde el borde del último círculo y mapa de presión acústica (presión total real) a 515 Hz.	115
7.11	Espectros de atenuación acústica en el punto de coordenadas (0.11,0.00,0.00) m, medido desde el borde del último círculo para los tres casos estudiados.	116
7.12	Modelo 2D (plano OXZ). Geometría de los dispersores totalmente rígidos para el análisis de la difracción por el borde superior: h es la altura de los dispersores, d es la anchura de los dispersores, a es la distancia entre centro de los dispersores. El punto de cálculo se indica en color rojo y se corresponde con el punto de coordenadas (0.11,0.00,-0.30) m, medido desde el borde del último rectángulo. También se indica el IPS.	117
7.13	Modelo 2D (plano OXZ) de dispersores totalmente rígidos: espectro de atenuación acústica (dB) medido desde el borde del último rectángulo (IPS) en el punto de coordenadas: (0.11, 0.00, -0,30) m. Se muestra en el recuadro el mapa de presión acústica total (presión real) a la frecuencia 515 Hz.	118
7.14	Modelo 2D (plano OXZ). Geometría de los dispersores rígidos con cavidad, para el análisis de la difracción por el borde superior: h es la altura de los dispersores, d es la anchura de los dispersores, a es la distancia entre centro de los dispersores. El punto de cálculo se indica en color rojo y se corresponde con el punto de coordenadas (0.11,0.00,-0.30) m, medido desde el borde del último rectángulo (IPS).	119
7.15	Detalle del dispersor rígido con cavidad resonante: (a) corte transversal del dispersor (da como resultado el modelo 2D (plano OXY) utilizado en la sección anterior) y (b) geometría y dimensiones del dispersor utilizado para el modelo 2D (plano OXZ). En color gris se representa material rígido y en color blanco aire.	120
7.16	Dispersores rígidos con cavidad de aire: espectro de atenuación acústica (dB) medido desde el borde del último rectángulo (IPS) en el punto de coordenadas: (0.11, 0.00, -0,30) m. Se muestra en el recuadro el mapa de presión acústica total (presión real) a la frecuencia 515 Hz.	120
7.17	Espectro comparativo de los dos casos de multicapa estudiados: medido desde el borde del último rectángulo (IPS) en el punto de coordenadas: (0.11, 0.00, -0,30) m.	121

- 7.18 Resultados de atenuación acústica, para los tres casos desarrollados: la línea azul, dispersores totalmente rígidos, la línea roja, dispersores rígidos con cavidad resonante y la línea negra, dispersores rígidos con cavidad resonante y absorbente (lana de roca). 121
- 7.19 Pantalla real 3D basada en dispersores aislados de segunda generación. Detalle del dispersor multifenómeno: R es el radio exterior del dispersor, A es la anchura del cuello de la cavidad resonante, r_{int} es el radio interior de la cavidad resonante, e_1 es el espesor del núcleo rígido (corona interior) y e es el espesor del anillo de material absorbente. . 122
- 7.20 Modelo 2D (plano OXZ). (a) Geometría de los dispersores multifenómeno y de los dispersores circulares para producir interferencias destructivas detrás de la pantalla acústica. Los dispersores son de radio $r = 0.05$ m y se sitúan a una altura $h_1 = 0.33$ m del segundo borde de cada dispersor multifenómeno rectangular visto en la sección (7.3). El punto de cálculo se indica en color rojo y se corresponde con el punto de coordenadas (0.11,0.00,-0.30) m, medido desde el borde del último rectángulo (IPS). (b) Detalle del dispersor multifenómeno utilizado y posición del satélite respecto del mismo. 124
- 7.21 Espectros globales de atenuación acústica en dB, para dispersores totalmente rígidos (línea azul continua) y dispersores totalmente rígidos-tuneado (línea roja de puntos). La zona recuadrada de espectro, muestra que se consigue la mejora justo para las frecuencias de diseño de los dispersores añadidos (satélites). 125
- 7.22 Espectros globales de atenuación acústica en dB, para dispersores rígidos-cavidad resonante (línea roja continua) y dispersores rígidos-cavidad resonante-tuneado (línea roja de puntos). La zona recuadrada de espectro, muestra que se consigue la mejora en la atenuación justo para las frecuencias de diseño de los dispersores añadidos (satélites). 126
- 7.23 Espectros globales de atenuación acústica en dB, para dispersores rígidos-cavidad resonante-absorbente (línea negra continua) y dispersores rígidos-cavidad resonante-absorbente-tuneado (línea roja de puntos). La zona recuadrada de espectro, muestra que se consigue la mejora en la atenuación justo para las frecuencias de diseño de los dispersores añadidos (satélites). 127

7.24 Modelo de superposición integral generalizado donde el problema real 3D se sustituye por dos casos 2D; (a) Modelo 2D plano OXY , que incluye BG, resonancias y los fenómenos de absorción. Se muestra la sección OXY de los dispersores cilíndricos multifenómeno, así como las líneas laterales reflectoras y las PML que definen los límites del dominio; (b) Modelo 2D plano OXZ con los principales parámetros geométricos del problema considerado. En este modelo 2D, se considera la difracción por el borde superior de los dispersores multifenómeno y la difracción en los dispersores circulares (satélites) donde se puede ver la sección OXZ del problema real 3D. También se muestran las PML y la condición de impedancia que definen los límites de la figura. En la inserción, se muestran los principales parámetros geométricos de los dispersores multifenómeno cilíndricos. 129

7.25 Aplicación del modelo integral de superposición generalizado al análisis de los diferentes casos: (a) 2DSC formado por dispersores cilíndricos rígidos. Los mecanismos considerados son: BG y difracción tanto en el borde superior del dispositivo como en los satélites; (b) 2DSC formado por dispersores cilíndricos rígidos y ranurados. En este caso, los mecanismos implicados son: BG, difracción en el borde superior y satélites y resonancias acústicas. En ambos casos, se puede ver los diferentes dominios activados (color rojo) o desactivados (sin color), dependiendo de la naturaleza de los mecanismos acústicos involucrados en el problema; (c) 2DSC formado por dispersores cilíndricos rígidos, ranurados y absorbente. En este caso, los mecanismos implicados son: BG, difracción en el borde superior, difracción en satélites, resonancias acústicas y absorción acústica; (d) Se muestra un ejemplo de la simulación numérica del dominio completo en $f = 515$ Hz, para los dos modelos 2D: plano OXY y plano OXZ . En ambos casos se representa el valor real de la presión total, $\text{Re}(P)$ 130

7.26 Montaje experimental del análisis de la difracción en el borde con satélites: ambas imágenes muestran la estructura analizada, formada por 16 dispersores multifenómeno y los satélites situados en el segundo borde de cada fila de dispersores situados a una altura de un paso de red. 131

7.27 Espectros de atenuación acústica experimentales: la línea continua negra representa el espectro para el caso de dispersores rígidos-cavidad resonante-absorbente y la línea de puntos roja representa el espectro para el caso de dispersores rígidos-cavidad resonante-absorbente-tuneado. 132

Índice de Tablas

2.1	Factor de llenado de redes típicas.	23
2.2	Ordenamientos cuasi-fractales.	30
3.1	Propiedades elásticas del absorbente (lana de roca).	58
3.2	SC experimentales analizados en este trabajo.	58
4.1	Valores geométricos, $ff(\%)$ y AA para el SC completo y QFS_{Max} . . .	65
4.2	Valores geométricos, $ff(\%)$ y AA para el SC completo y QFS_{Exp} en la dirección principal de simetría ΓX (0°).	66
4.3	Nomenclatura utilizada para las diferentes muestras analizadas. . . .	70
4.4	Capacidad de atenuación de las dos muestras mayores del crecimiento cristalino (MC4) y crecimiento fractal (MF4), siendo el área ocupada por ambas muestras la misma (17468 cm^2).	71
4.5	Capacidad de atenuación de las dos muestras mayores del crecimiento cristalino (MC3) y crecimiento fractal (MF2), siendo el área ocupada por ambas muestras la misma (2862.25 cm^2).	74
5.1	Parámetros geométricos del modelo numérico para los dos dispersores multifenómeno utilizados.	83
5.2	Resultados Homologación para ordenamiento cristalino y ordenamiento cuasi-fractal.	93
7.1	Parámetros geométricos del modelo numérico para los dos dispersores multifenómeno utilizados.	113

Bibliografía

- [1] Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental Noise, Official Journal of the European Communities (18.7.2002)
- [2] Harris CM. Handbook of acoustical measurements and noise control. 3rd ed. McGraw-Hill, Inc; (1991)
- [3] Kotzen B., English C., Environmental noise barriers, E & FN SPON; London, (1999)
- [4] Sánchez-Pérez J. V., Rubio C., Martínez-Sala R., Sánchez-Grandía R. and Gómez V., Appl. Phys. Lett **81**(27), 5240-5242 (2002)
- [5] Martínez-Sala R., Sancho J., Sánchez-Pérez J. V., Llinares J., Meseguer F., Nature (London) **387**, 241 (1995)
- [6] Romero-García V., Krynkin A., García-Raffi L. M., Umnova O., Sánchez-Pérez J. V., Journal of Sound and Vibration **332**, 184-198 (2013)
- [7] Castiñeira-Ibáñez S., Romero-García V., Sánchez-Pérez J. V., and Garcia-Raffi L. M., Overlapping of acoustic bandgaps using fractal geometries, E.Phys.Lett. **92**, 24007 (2010)
- [8] Castiñeira-Ibáñez S., Rubio C., Romero-García V., Sánchez-Pérez J. V. and Garcia-Raffi L. M., Desing, manufacture and characterization of an acoustic barrier made of multi-phenomena cylindrical scatterers arrangend in a fractal-based geometry, Archives of Acoustics **37**(4), 455-462 (2012)
- [9] Romero-García V., Sánchez-Pérez J. V. and Garcia-Raffi L. M., J. Appl. Phys. **110**, 014904 (2011)
- [10] Castiñeira-Ibáñez S., Rubio C. and Sánchez-Pérez J. V., Acoustic wave diffraction at the upper edge of a two-dimensional periodic array of finite rigid cylinders. A comprehensive design model of periodicity-based devices, EPL **101**, 64002 (2013)

- [11] Castiñeira-Ibáñez S., Romero-García V., Sánchez-Pérez J.V. and Garcia-Raffi L. M., Periodic systems as road traffic noise reducing devices: prototype and standardization, *Environmental Engineering and Management Journal*, Rumanía, "aceptado para publicación" (2012)
- [12] Dámaso A., Domínguez J., Materiales para pantallas anti-ruido. Soluciones tipo más usuales. http://www2.uah.es/tiscar/Complem_EIA/tipos-pantallas-acusticas.pdf
- [13] Benz Kotzen and Colin English. *Environmental Noise Barriers. A guide to their acoustic and visual design*. ISBN 0-203-93138-6. Second Edition. (2009)
- [14] Fujiwara K., Furuta N., *Noise Control Eng. J.* **37**, 5-11 (1991)
- [15] Watts G. R., *Appl.Acoust.* **47**, 47-66 (1996)
- [16] Ishizuka T., Fujiwara K., *Appl.Acoust.* **65**, 125-141 (2004)
- [17] Asdrubali F., *Acta acustica united with acustica* **93**, 659-669 (2007)
- [18] Okubo T. and Yamamoto K., *Appl.Acoust.* **68**, 797-819 (2007)
- [19] Kurze U., *J. Acoust. Soc. Am.* **5**, 504 (1974)
- [20] Keller J., *J. Opt. Soc. Am.* **16**, 116 (1962)
- [21] Acoustics-Attenuation of sound during propagation outdoors, 1ª parte, Calculation of the absorption of sound by the atmosphere, ISO/DP 9613-1, International Organization for Standardization, CH-1211 Ginebra 20, Suiza (1990)
- [22] Acoustics-Attenuation of sound during propagation outdoors, 2ª parte, A general method of calculation, ISO/DP 9613-2, International Organization for Standardization, CH-1211 Ginebra 20, Suiza (1989)
- [23] Bartí Domingo R., *Acústica Medioambiental* **2**, ECU (2010)
- [24] Hothersall D. C., Crombie D. H. and Chandler-Wilde S. N., *Appl. Acoust.* **32**, 269-87 (1991)
- [25] Shima H., Watanabe T., Mizuno K., Iida K., Matsumoto K. and Nakasaki K., in *Proceedings of Internoise 96*, Liverpool, pp.791-4 (1996)
- [26] Fujiwara K. and Yotsumoto E., in *Proceedings of Internoise 90*, pp.343-6 (1990)
- [27] Fujiwara K., Ohku T. and Omoto A., in *Proceedings Internoise 95*, Newport Beach, CA, pp.393-6 (1995)

-
- [28] Cobo, P., *Control Activo del Ruido. Principios y Aplicaciones*. CSIC, Colección Textos Universitarios, N° 26, Madrid (1997).
- [29] Sez nec R., J. Sound Vib. **73** 195 (1980)
- [30] Watts G. R., Morgan P. A. and Surgand M., J. Sound Vib. **274**, 669 (2004)
- [31] Defrance J. and Jean P., Appl. Acoust. **64**, 765 (2003)
- [32] Sánchez-Pérez J. V., Caballero D., Martínez-Sala R., Rubio C., Sánchez-Dehesa J., Meseguer F., Llinares J., Gálvez. F., Phys. Rev. Lett. **80**, 5325-5328 (1998)
- [33] Economu E. N. and Sigalas M. M., Physical review B **48**, 13434 (1993)
- [34] Kittel C. , Introduction to Solid State Physycs, Wiley; 8 edition (November 11, 2004), (2004)
- [35] Sánchez-Pérez J. V., Memoria de Tesis: Cristales de sonido basados en estructuras minimalistas, UPV (1998)
- [36] Sigalas M. M., Economou E. N. and Kafesaki M., Phys. Rev. B **50**, 3393 (1994)
- [37] Economou E. N. and Sigalas M. M., J. Acoust. Soc. Am. **95**, 1734 (1994)
- [38] Romero-García V., Fuster E., Sánchez-Pérez E. A., García-Raffi L. M., Sopena M., Llinares J. and Sánchez-Pérez J. V., Appl Phys.Lett **88**, 174104 (2006)
- [39] Romero-García V., García-Raffi L. M., Sopena M., Sánchez-Pérez J. V., Herrero J. M., García-Nieto S. and Blasco X., J. Acoust. Soc. Am. **125**, 3724 (2009)
- [40] Zhang X., Physical Review B **75**, 024209 (2007)
- [41] Hakansson A., Cervera F., and Sánchez-Dehesa J., Appl. Phys. Lett. **86**, 054102 (2005)
- [42] Norris R. C., Hamel J. S. and Nadeau P., J. of Appl. Phys. **103**, 104908 (2008)
- [43] Sigalas M. M., Kushwaha M. S., Economou E. N., Kafesaki M., Psarobas I. E. and Steurer W., Z. Kristallogr **220**, 765-809 (2005)
- [44] Lai Y., Zhang X., and Zhang Zhao-Qing, J. Appl Phys. **91**(9), 6191 (2002)
- [45] Ye Z., J. Acoust. Soc. Am. **102**, 877 (1997)
- [46] Umnova O., Attenborough K. and Linton C. M., J. Acoust. Soc. Am. **119**(1), 278 (2006)
- [47] Hu X., Chan C., and Zi J., Phys. Review E **71**, 055601(R) (2005)

- [48] Cervera F., Sanchis L., Sánchez-Pérez J. V., Martínez-Sala R., Rubio C., Meseguer F., López C., Caballero D. and Sánchez-Dehesa J., *Physical Review Letters* **88**, 0239021-0239024 (2001)
- [49] Mandelbrot B. B., "How long is the coast of Britain?", W.H. Freeman and Company, (1967)
- [50] Mandelbrot B. B., *The Fractal Geometry of Nature*, Eds. W.H. Freeman and Company, New York, (1983)
- [51] Posadas Chinchilla A. M., Vidal Sánchez F., Benjumea Moreno B., Lorenzo Capel F., *Sismología aplicada (Fractales en sismología)*, Universidad de Almería (1996)
- [52] Kushwaha M., *Appl. Phys. Lett.* **70**, 3218 (1997)
- [53] Liu Z., Zhang X., Mao Y., Zhu Y., Yang Z., Chan C. and Sheng P., *Science* **289**, 1734 (2000)
- [54] Hirsekorn M., Delsanto P., Batra N. and Matic P., *Ultrasonics* **42**, 231 (2004)
- [55] Yablonovitch E., *Phys. Rev. Lett.* **58**, 2059 (1987)
- [56] John S., *Phys. Rev. Lett.* **58**, 2486 (1987)
- [57] Kushwaha M. S., Halevi P., Martínez G., Dobrzynski L. and Djafrari-Rouhani B., *Phys. Rev. B* **49** (4), 2313-2322 (1994).
- [58] Sigalas M. M. and Economou E. M., *Europhys. Lett.* **36**, 241 (1996)
- [59] Meade R. D., Brommer K. D., Rappe A. M. and Joannopoulos J. D., *Phys. Rev. B* **44**, 13772 (1991).
- [60] Romero-García V., *On the control propagation acoustic waves in sonic crystals: analytical, numerical and optimization techniques. Tesis Doctoral Universitat Politècnica de València* (2010)
- [61] García-Pablos D., Sigalas M., de Espinosa F. M., Torres M., Kafesaki M. and García N., *Phys. Rev. Lett.* **84**, 4349 (2000)
- [62] Chen Y. Y. and Ye Z., *Phys. Rev. E* **64**, 036616 (2001)
- [63] Sanchis L., *Tesis Doctoral Universidad Autónoma de Madrid*, (2003)
- [64] *Acoustics Module Users Guide, COMSOL 3.5a* (2008)

-
- [65] Rubio C., Sánchez-Pérez J. V., Martínez-Sala R. and Cervera F., Medida de las características de campo libre de una cámara anecoica. *Tecniacústica*, 96-98 (1997)
- [66] Romero-García V., Sánchez-Pérez J. V., Castiñeira-Ibáñez S., García-Raffi L. M., *Appl. Phys. Lett.* **96**, 124102 (2010)
- [67] Iannaccone P. M. and Khokha M., *Fractal Geometry in Biological Systems: An Analytical Approach* (CRC Press, Inc.) (1996)
- [68] Williams B. and Trading B., *Chaos, Applying Expert Techniques to Maximize Your Profits* (Market place Books, Inc.) (1995)
- [69] Florescu M., Torquato S. and Steindhardt P., *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **106**, 20658 (2009)
- [70] Castiñeira-Ibáñez S., Rubio C., Redondo J. and Sánchez-Pérez J.V., Quantitative characterization of bandgap properties of sets of isolated acoustic scatterers arranged using fractal geometries, *Appl. Phys. Express* **7**, 042201 (2014)
- [71] Maekawa Z., Noise reduction by screen, *Appl. Acoust.*, **1**, 157-173 (1968)
- [72] European Committee for Standardisation, EN 1793-1 (1997), Road Traffic Noise Reducing Devices (Test Method for Determining the Acoustic Performance) Part 1: Intrinsic characteristics of sound absorption, CEN, Brussels, Belgium.
- [73] Europea Committee for Standardisation, EN 1793-2 (1997), Road Traffic Noise Reducing Devices (Test Method for Determining the Acoustic Performance) Part 2: Intrinsic characteristics of airborne sound insulation under diffuse sound field conditions, CEN, Brussels, Belgium.
- [74] European Committee for Standardisation, EN 1793-3 (1997), Road Traffic Noise Reducing Devices (Test method for Determining the Acoustic Performance) Part 3: Normalised Traffic Noise Spectrum, CEN, Brussels, Belgium.
- [75] International Organization for Standardization (ISO) 354:2003 (2003) (Acoustics) Measurement of sound absorption in a reverberation room.
- [76] Internacional Organization for Standardization (ISO) 11654:1997 (1997) (Acoustics) Sound absorbers for use in buildings, Rating of sound absorption.
- [77] International Organization for Standardization (ISO) 9613-1:1993 (1993) (Acoustics) Attenuation of sound during propagation outdoors, Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere.

- [78] Internacional Organization for Standardization (ISO) 10140:2010 (2010) (Acoustics) Laboratory measurement of sound insulation of building elements.
- [79] Romero-García V., Sánchez-Pérez J. V. and Garcia-Raffi L. M., EPL **96**, 44003 (2011)