

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

MASTER DE INGENIERÍA ACÚSTICA



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR DE GANDIA

“Estudio de las aplicaciones de los difusores de sonido basados en cristales de sonido”

TESIS DE MASTER

Autor:

José Miguel Fuster Fajardo

Director/es:

D. Francisco Javier Redondo Pastor

D. Juan Vicente Sánchez Pérez

GANDIA, 4 de Septiembre de 2013

Estudio de las aplicaciones de los difusores de sonido basados en cristales de sonido

Autor: José Miguel Fuster Fajardo

Director 1: Francisco Javier Redondo Pastor

Director 2: Juan Vicente Sánchez Pérez

Resumen

Uno de los objetivos en la Acústica de Salas consiste en la creación de un campo sonoro difuso. Los difusores de sonido pueden mejorar el rendimiento acústico de las salas, aumentando la difusión del campo sonoro, la impresión subjetiva de la 'espacialidad', y la eliminación de ecos, focalizaciones y la coloración. Los difusores acústicos empleados habitualmente trabajan en un rango de frecuencias limitado, generalmente, a frecuencias medias-altas. El difusor objeto del estudio se basa en una red cristalina y pretende dar solución a dicha limitación, actuando sobre un rango de frecuencias más graves, que normalmente son las que más problemas generan en cuanto a la percepción óptima del sonido. En este trabajo se evaluará la contribución del difusor bidimensional basado en cristales de sonido, al aumento de la difusión del sonido en el interior de un recinto, realizando un análisis cualitativo de la homogeneidad y de la isotropía de la sala bajo estudio al introducir en ella este dispositivo.

Por otro lado uno de los principales problemas medioambientales en todo el mundo es el ruido, que se puede definir como todo sonido no deseado producido en el exterior y generado normalmente por los medios de transporte, por las industrias o por aglomeraciones humanas. Una de las soluciones básicas para su control en su fase de transmisión es la utilización de barreras o pantallas acústicas, pero uno de los problemas que suele reducir la efectividad de las pantallas acústicas utilizadas para reducir el ruido en las vías de comunicación de tráfico rodado o ferroviario es la reflexión del ruido hacia la fuente. El segundo objetivo de este trabajo consiste en el estudio de posibles soluciones para la reducción de esta reflexión múltiple o "efecto tambor". La opción que se presenta consiste en el diseño de una pantalla mixta, formada por una barrera tradicional y por un cristal de sonido adyacente que actúa como difusor.

Abstract

One of the objectives in the acoustics of rooms is the creation of a diffuse sound field. Sound diffusers can improve the acoustic performance of the rooms, increasing the diffusion of the sound field, the subjective impression of spatiality, and the elimination of echoes, focused and acoustic colouring of a room. Acoustic diffusers usually used work on a limited range of frequencies, usually, mid-high frequencies. The diffuser object of the study is based on a crystal network and aims to respond to such limitation, acting over a range of more low frequencies, which normally generate more problems regarding the optimum perception of the sound. In this work will be assessed the contribution of the two-dimensional diffuser based on a sonic crystal, to increase the diffusion of sound inside a room, making a qualitative analysis of the homogeneity and isotropy of this room when this device is inserted into it.

On the other hand, one of the main environmental problems in the world is the noise, which can be defined as any unwanted sound produced abroad and normally generated by the media transport, industries or human agglomerations. One of the basic solutions for its control in the phase of transmission is the use of acoustic barriers, but one of the problems that tends to reduce the effectiveness of acoustic barriers, used to reduce the noise in the communication of traffic routes or railway, is the reflection of the noise at the source. The second objective of this work consists in the study of possible solutions for the reduction of this multiple reflection or "drum effect". The option presented consists of the design of a mixed barrier, formed by a traditional barrier and a sonic crystal adjacent which acts as a diffuser.

ÍNDICE

I.- Objeto y antecedentes	6
I.1.- Introducción.....	6
I.2.- Objeto.....	7
I.3.- Estructura del trabajo fin de master.....	7
II.- Introducción teórica	8
II.1.- Fenómenos acústicos.....	8
II.1.1.- Reflexión y refracción sonora.....	8
II.1.2.- Reverberación.....	9
II.1.3.- Campo libre y campo difuso.....	9
II.2.- Difusión acústica.....	10
II.2.1.- Introducción.....	10
II.2.2.- Difusores de sonido.....	10
II.2.3.- Principales tipos de difusores de fase.....	11
II.2.3.1.- Difusores MLS (Maximun Lenght Sequence).....	11
II.2.3.2.- Difusores QRD (Quadratic Residue Difusor).....	12
II.2.3.3.- Difusores PRD (Primitive Root Difussor).....	14
II.3.- Difusores con estructura cristalina.....	14
II.3.1.- Introducción a los cristales, sistemas periódicos.....	14
II.3.2.- Cristales de sonido bidimensionales.....	17
II.3.2.1.- Difracción de ondas por cristales.....	17
II.3.2.2.-Bandas prohibidas de energía.....	18
II.3.2.3.- Parámetros estructurales.....	21
II.4.- Medida del grado de difusión.....	21

II.5.- Barreras Acústicas.....	23
II.5.1.- Introducción.....	23
II.5.2.- Principios del comportamiento de pantallas acústicas.....	24
II.5.3.- Principales tipos de pantalla acústicas.....	29
II.5.4.- Atenuación por la inserción de la barrera. Insertion Loss (IL).....	31
II.6.- Método de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD).....	33
II.6.1.-Introducción al Método.....	33
II.6.2.-Aplicación del método FDTD al modelo de acústica de fluidos.....	34
II.6.3.-Estabilidad y dispersión.....	36
II.- Descripción de los estudios realizados.....	37
III.1.-Introducción.....	37
III. 2.-Diseño estudio nº1: difusor basado en cristales fonónicos.....	37
III.2.1.-Introducción.....	37
III.2.2.-Estructura del difusor.....	37
III.2.3.-Modelo de simulación en 2D para el estudio nº1.....	39
III. 3.-Diseño estudio nº2: pantalla acústica basada en cristales fonónicos.....	42
III.3.1.-Introducción.....	42
III.3.2.-Estructura de la pantalla acústica.....	42
III.3.3.-Modelo de simulación en 2D para el estudio nº2.....	44
IV.- Análisis de los resultados obtenidos.....	45
IV. 1.-Estudio nº1; Estudio de la difusión.....	45
IV. 2.-Estudio nº2; Estudio del efecto tambor en pantallas acústicas.....	50
V.- Conclusión y líneas futuras.....	52
Agradecimientos.....	53
Bibliografía.....	53
Anexos.....	55
A.1.- Coeficiente de difusión de un difusor de sonido basado en cristales de sonido.....	55
A.2.- Coeficiente de scattering de un difusor de sonido basado en cristales de sonido.....	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.- Fenómeno de reflexión sonora.....	8
Fig. 2.- Fenómeno de refracción sonora.....	8
Fig. 3.- Caída de nivel de presión sonora en dB con el tiempo.....	9
Fig. 4.- Difusor MLS, difusión horizontal.....	11
Fig. 5.- Difusor MLS, difusión vertical.....	12
Fig. 6.- Difusor QRD unidimensional.....	13
Fig. 7.- Difusor QRD bidimensional.....	13
Fig. 8.- Difusor PRD.....	14
Fig. 9.- Modelo mostrando la ordenación geométrica de la estructura del cloruro sódico.....	15
Fig. 10.- a) Retículo espacial de un sólido cristalino ideal. b) Celda unidad con constantes.....	15
reticulares	
Fig. 11.- Celda de Wigner- Seitz.....	16
Fig. 12.- Redes de Bravais más comunes en dos dimensiones.....	17
Fig. 13.- Haces difractados en un cristal. Ley de Bragg.....	18
Fig. 14.- Reflexión de Bragg λ	19
Fig. 15.- Zonas de Brillouin.....	20
Fig. 16.- Diagrama polar de la señal media por un micrófono direccional.....	22
Fig. 17.- Cálculo del parámetro SA.....	22
Fig. 18.- Reflexión, transmisión, absorción y difracción del sonido a través de una pantalla.....	24
Fig. 19.- Difracción del sonido directo a través de una pantalla.....	24
Fig. 20.- Ángulo de incidencia de la onda difractada en función de la frecuencia.....	25
Fig. 21.- Altura de la barrera acústica.....	25
Fig. 22.- Longitud de la barrera acústica.....	26
Fig. 23.- Clasificación de las pantallas acústicas por su absorción.....	27
Fig. 24.- Clasificación de las pantallas acústicas por su aislamiento.....	28
Fig. 25.- Espectro normalizado del ruido de tráfico.....	28
Fig. 26.- Pantalla acústica de tierra con cubierta vegetal.....	29
Fig. 27.- Pantalla acústica de hormigón poroso con acabado en relieve.....	30
Fig. 28.- Pantalla acústica de madera.....	30

Fig. 29.- Pantalla acústica de material transparente.....30

Fig. 30.- Pantalla acústica tipo “sándwich”, de metal perforado con absorbente en el interior...31

Fig. 31.- Pantalla acústica mixta metal perforado-metacrilato.....31

Fig. 32.- Pantalla acústica mixta hormigón poroso-ladrillo.....31

Fig. 33.- Distancias para el cálculo del índice de pérdidas por inserción.....32

Fig. 34.- Mallado del espacio 2D del modelo de fluidos; sistema de coordenadas cartesiano...35

Fig. 35.- Estructura del difusor.....38

Fig. 36.- Celda unidad del cristal de sonido diseñado.....39

Fig. 37.- Espectro en frecuencia de la señal Test.....41

Fig. 38.- Modelo en 2D de la simulación para el difusor.....41

Fig. 39.- Estructura de las pantallas acústicas; a) Pantalla simple; b) Pantalla con cristal.....43

Fig. 40.- Modelo en 2D de la simulación para la pantalla acústica.....44

Fig. 41.- Tiempo de reverberación medio.....45

Fig. 42.- a) TR en cada receptor, sala vacía; b) TR en cada receptor, sala con difusor.....45

Fig. 43.- Desviación estándar del TR con y sin difusor.....46

Fig. 44.- Diferencia en porcentaje entre los índices EDT y T30 medios, con y sin difusor.....46

Fig. 45.- SPL medio, con y sin difusor.....47

Fig. 46.- Desviación estándar del SPL con la posición, con y sin difusor.....47

Fig. 47.- SPL en la dirección X e Y respecto al patrón omnidireccional, con y sin difusor.....48

Fig. 48.- Diferencia de SPL entre la dirección normal y paralela, con y sin difusor.....48

Fig. 49.- Desviación estándar del SPL con la posición, entre la dirección normal y paralela....49

Fig. 50.- Respuesta en frecuencia de la sala con y sin difusor a bajas frecuencias.....49

Fig. 51.- Respuesta en frecuencia de la sala con y sin difusor.....50

Fig. 52.- Inserción Loss (dB) de una pantalla acústica, con y sin camión presente.....50

Fig. 53.- Inserción Loss (dB) de una pantalla acústica, con y sin cristal presente.....51

Fig. 54.- Diferencia del campo de presiones, con y sin cristal presente.....51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Casuística del experimento.....42

I.- Objeto y antecedentes

I.1.-Introducción

Uno de los objetivos en la Acústica de Salas consiste en la creación de un campo sonoro difuso ^[1, 2]. Se le denomina difusión acústica al efecto de redistribuir espacial y temporalmente la energía acústica que incide sobre una superficie. Es bien sabido que los difusores de sonido pueden mejorar el rendimiento acústico de las salas de diferentes maneras, por ejemplo, aumentando la difusión del campo sonoro, la impresión subjetiva de la 'espacialidad', y la eliminación de ecos, focalizaciones y la coloración ^[3]. Para esto es necesario evitar, en lo posible, las reflexiones especulares en algunos lugares.

Los difusores acústicos empleados habitualmente trabajan en un rango de frecuencias limitado, generalmente, a frecuencias medias-altas. El difusor objeto del estudio pretende dar solución a dicha limitación, actuando sobre un rango de frecuencias más graves, que normalmente son las que más problemas generan en cuanto a la percepción óptima del sonido.

La forma de este tipo de difusores se basa en una red cristalina. Un cristal de sonido (CS) se puede definir genéricamente como un conjunto de dispersores cilíndricos rígidos y ordenados de forma periódica inmersos en aire. Los CS, han demostrado su eficacia en el control de la propagación de las ondas acústicas. Cuando las ondas se propagan a través de un medio con elementos dispersores y éstos además están colocados de forma periódica como ocurre en las estructuras cristalinas, la dispersión múltiple nos lleva a un fenómeno conocido como estructuras en bandas. Esto significa que las ondas se pueden propagar en un cierto rango de frecuencias, siguiendo unas reglas de dispersión, mientras que en otros rangos de frecuencias la propagación es eliminada. Las primeras son llamadas bandas permitidas y las últimas bandas prohibidas (band gap).

Por otro lado uno de los principales problemas medioambientales en todo el mundo es el ruido, que se puede definir como todo sonido no deseado producido en el exterior y generado normalmente por los medios de transporte, por las industrias o por aglomeraciones humanas. Una de las soluciones básicas para su control en su fase de transmisión es la utilización de barreras o pantallas acústicas ^[16], pero uno de los problemas que suele reducir la efectividad de las pantallas acústicas utilizadas para reducir el ruido en las vías de comunicación de tráfico rodado o ferroviario es la reflexión del ruido hacia la fuente. Este fenómeno puede aumentar cuando la fuente de ruido (vehículo o tren) se encuentra muy cerca de la barrera, de forma que el ruido puede llegar incluso a sobrepasar la barrera, reduciendo de forma significativa su efectividad. Esta reflexión múltiple o “efecto tambor” se puede explicar de forma sencilla: cuando una fuente de ruido de cierta longitud pasa cerca de una barrera, el ruido que produce incide sobre la barrera. Parte de ese ruido se refleja, pero vuelve a ser reflejado por la fuente que lo envía de nuevo hacia la barrera, pudiendo sobrepasar la altura de la barrera y reduciendo su efectividad.

El segundo objetivo de este trabajo consiste en el estudio de posibles soluciones para la reducción de esta reflexión múltiple o “efecto tambor”. La opción que se presenta consiste en el diseño de una pantalla mixta, formada por una barrera tradicional y por un cristal de sonido adyacente que actúa como difusor.

1.2.- Objeto

El objeto de este estudio es el análisis del comportamiento de un difusor bidimensional basado en cristales de sonido, en 2 posibles aplicaciones dentro del campo de la acústica; como difusor acústico en el interior de una sala (campo acústico difuso) y como parte de una pantalla acústica en un entorno al aire libre (campo acústico libre).

Este análisis se realizará mediante simulación en el software de cálculo matemático MATLAB, aplicando el método de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD) al modelo de acústica de fluidos en 2D ^[28, 29].

Este estudio complementa dos trabajos previos en los que se realizó una caracterización del difusor, obteniendo su coeficiente de difusión^[7] en cámara anecoica y su coeficiente de scattering^[7] en cámara reverberante a escala (ver Anexos). Los resultados que se obtuvieron en ambos coeficientes a bajas frecuencias fueron interesantes y suscitaron un nuevo estudio del dispositivo a través de este trabajo fin de master.

Los objetivos principales del trabajo son:

- 1-. Evaluar la contribución de un difusor bidimensional basado en cristales de sonido, al aumento de la difusión del sonido en el interior de un recinto, realizando un análisis cualitativo de la homogeneidad y de la isotropía de la sala bajo estudio al introducir en ella este dispositivo.
- 2-. Evaluar la respuesta que tiene este mismo difusor al integrarlo en una pantalla acústica, con el objeto de reducir el “efecto tambor” que se produce entre esta y los vehículos de grandes dimensiones que circulan por la vía donde está instalada.

1.3.- Estructura del trabajo fin de master

Este trabajo se ha estructurado en los siguientes apartados. En el primer capítulo, titulado, objeto y antecedentes, encontramos una introducción al estudio y se plantean los objetivos del mismo. En el segundo capítulo, introducción teórica, se revisa la teoría necesaria para abordar el estudio de este tipo de dispositivos. Seguidamente el tercer capítulo, descripción de los estudios realizados, describe las actividades realizadas para analizar el comportamiento del difusor. Finalmente se presenta en el capítulo IV, análisis de resultados, un breve resumen los resultados obtenidos. El trabajo termina con la exposición de las principales conclusiones y propuesta de líneas futuras.

II.- Introducción teórica

II.1.- Fenómenos acústicos

II.1.1.- Reflexión y refracción sonora

La *reflexión* ^[1] se produce cuando una onda que se propaga incide sobre un obstáculo, el cual hace que parte de la energía acústica retorne. Si la superficie de este obstáculo es lisa y suficientemente grande, se producirá una reflexión en una sola dirección siguiendo la ley de Snell, es decir, el ángulo reflejado r es igual al ángulo incidente i (Fig. 1).

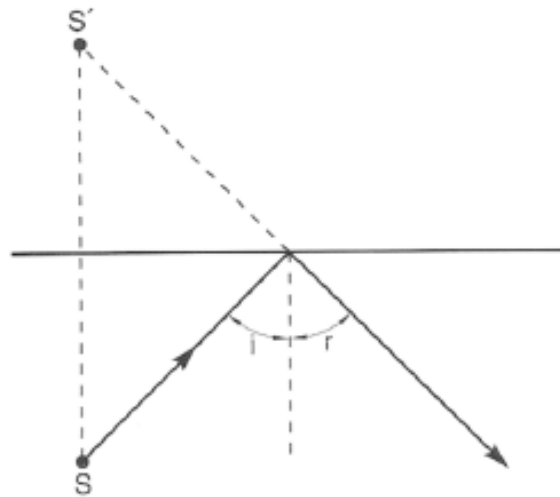


Fig. 1.- Fenómeno de reflexión sonora

(Fuente: Arau 1999 ^[6])

Si las dimensiones del obstáculo no son grandes, habrá otra onda que se propagará sobrepasándolo en la misma dirección de incidencia. A este fenómeno, en el que el sonido bordea los obstáculos suficientemente pequeños se le denomina *difracción* ^[4] (Fig. 2). Los efectos de la difracción disminuyen hasta hacerse indetectables a medida que aumenta el tamaño del obstáculo comparado con la longitud de onda.

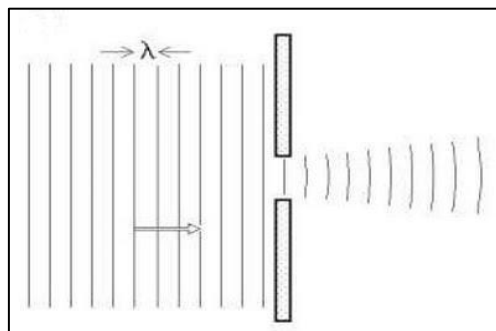


Fig. 2.- Fenómeno de refracción sonora

(Fuente: Atanasio et al, 2011 ^[1])

II.1.2.- Reverberación

Se denomina *reverberación* ^[4] a la persistencia del sonido en un recinto después de que cesa la irradiación de energía acústica de la fuente. Cuando la fuente cesa de emitir, la densidad de energía acumulada no desaparece inmediatamente ya que, cuando las ondas acústicas inciden en los distintos cerramientos, se producen reflexiones que debilitan las ondas progresivamente por la pérdida de energía por la absorción.

La reverberación es un fenómeno muy importante en acústica de salas, ya sea para mensajes hablados o musicales. Esta persistencia del sonido puede ser beneficiosa, ya que puede reforzarlo y prolongarlo. Sin embargo, en ocasiones puede ser perjudicial cuando se enmascaran unos sonidos con otros, lo cual conlleva a una pérdida en la claridad del mensaje.

- Tiempo de reverberación:

El tiempo de reverberación (TR) es un parámetro para evaluar la calidad acústica de una sala. Se define como el tiempo que transcurre desde que la fuente sonora deja de emitir hasta que la energía decae a $1/10^6$ de su valor original. En términos de intensidad acústica, corresponde a la caída de 60 decibelios en escala logarítmica (Fig. 3).

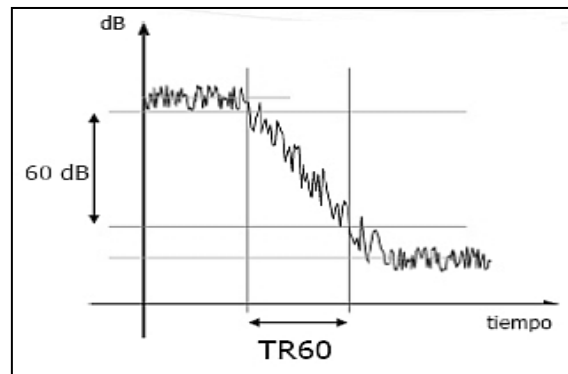


Fig. 3.- Caída de nivel de presión sonora en dB con el tiempo (Fuente: Atanasio et al 2011)

El tiempo de reverberación de un recinto depende de las características de sus elementos. Cuando se tienen elementos muy absorbentes, el tiempo de reverberación es pequeño, resultando así en una sala “seca”. Cuando los elementos son muy reflectantes, el tiempo de reverberación aumenta. Si éste es demasiado alto, tendrá como resultado una sala muy “reverberante” donde los mensajes sonoros serán confusos. Por esta razón, el tiempo de reverberación es un parámetro muy importante para caracterizar la calidad acústica de un recinto.

II.1.3.- Campo libre y campo difuso

En acústica, se definen dos tipos de campo acústico. Estos son: *Campo acústico libre* y *Campo acústico difuso* ^[2, 4].

Campo libre es aquel en el que el sonido radiado por una fuente omnidireccional se propaga libre de reflexiones y refracciones, al no ser obstaculizado por ningún objeto. En este caso, como refleja la siguiente expresión, la intensidad acústica varía de acuerdo con el inverso del cuadrado de la distancia. En la siguiente expresión I representa la intensidad acústica, W es la potencia de la fuente sonora y r es el radio del círculo de la distancia a la fuente sonora.

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} \quad \text{unidades S.I. } \left[\frac{W}{m^2}\right] \quad (1)$$

Campo difuso es un campo acústico en el que todas las direcciones de propagación del sonido aportan la misma intensidad sonora, no sólo en estado estacionario sino en cualquier momento del proceso de descenso del sonido. En él, la distribución de la energía acústica es homogénea e isotrópica en cualquier instante y punto del mismo.

II.2.- Difusión acústica

II.2.1.- Introducción

La *difusión acústica* ^[7] es el efecto de redistribuir espacialmente la energía acústica que incide sobre una superficie denominada “difusor”.

Los principales beneficios de la difusión acústica son un menor estrés o cansancio auditivo del oyente principalmente por no tener que utilizar altos niveles sonoros debido a que el sonido está correctamente distribuido dentro del recinto, además de ser percibido con una mayor espacialidad.

II.2.2.- Difusores de sonido

Los *difusores acústicos* ^[4,7] son elementos diseñados para reflejar y dispersar el sonido de manera uniforme en sus múltiples direcciones. Pueden ser superficies con diferentes coeficientes de absorción colocadas una al lado de otra o elementos expresamente diseñados para dispersar de forma uniforme y en múltiples direcciones la energía sonora que incide sobre los mismos.

Estos elementos están creados específicamente para márgenes de frecuencias determinados, los cuales condicionan las dimensiones de los mismos.

Los difusores más utilizados son los *difusores de Schroeder* ^[7,8], también conocidos como *difusores de fase*. Son dispositivos que consisten en un grupo periódico de hendiduras de igual amplitud pero de diferentes profundidades, separadas por paredes rígidas pero muy estrechas.

Las profundidades de las rendijas se determinan a partir de secuencias matemáticas que tienen la propiedad de que la transformada de Fourier del factor de reflexión es constante.

El principio de funcionamiento de éste tipo de difusores está basado en el fenómeno de interferencia entre ondas sonoras. Cuando dos ondas se superponen, las presiones sonoras instantáneas respectivas se suman, si las ondas son iguales (misma amplitud) y están en el mismo estado de vibración en cada instante de tiempo, la presión sonora se dobla, pero si ambas ondas tienen misma amplitud y signo diferente se cancelan, produciéndose una interferencia destructiva.

Cuando una onda incide sobre una de las ranuras, ésta se propaga por su interior siguiendo un camino paralelo a las paredes de la ranura hasta alcanzar el fondo de la misma, en dicho instante, la onda se refleja y viaja en sentido contrario hasta alcanzar nuevamente el extremo superior. La fase de dicha onda depende del camino total recorrido por la misma en el interior de la ranura. Debido a que las ranuras tienen distintas profundidades, la fase de la señal asociada a cada una en el instante de la reradiación será diferente, lo cual dará lugar a un fenómeno de interferencia entre todas las ondas que intervienen.

La distribución de la energía reflejada por el difusor en las diferentes direcciones del espacio dependerá del tipo de interferencia que tenga lugar, es decir, de la secuencia de valores de las profundidades de las ranuras.

II.2.3.- Principales tipos de difusores de fase

II.2.3.1.- Difusores MLS (Maximun Lenght Sequence)

Basados en unas secuencias pseudoaleatorias periódicas, denominadas de longitud máxima, que sólo pueden adquirir dos valores diferentes: -1 y +1.

Se crea partiendo de una superficie lisa y reflectante, la cual se subdivide en tramos de igual anchura. A cada tramo se le asigna un valor de la secuencia pseudoaleatoria, de acuerdo con el siguiente procedimiento:

- Si el valor es -1, el tramo queda inalterado.
- Si el valor es +1, se crea una ranura en el espacio ocupado por el tramo.

W y D representan la anchura y la profundidad de cada tramo respectivamente y se calculan de la siguiente forma:

$$W = \lambda/2 \quad (2)$$

$$D = \lambda/4 \quad (3)$$

donde " λ " es la longitud de onda correspondiente a la frecuencia de diseño del difusor.

El margen de frecuencias para la cual la difusión es óptima es únicamente del orden de una octava.

Este tipo de difusores presenta una menor absorción a bajas frecuencias que los difusores QRD y PRD.

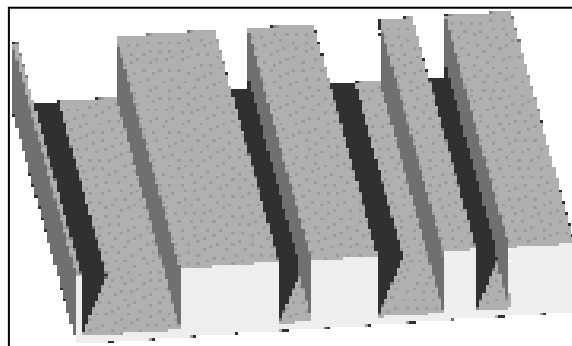


Fig. 4.- Difusor MLS, difusión horizontal



Fig. 5.- Difusor MLS, difusion vertical

II.2.3.2.- Difusores QRD (*Quadratic Residue Difusor*)

Existen dos tipos de difusores de residuos cuadrados, los unidimensionales (Fig. 6) y los bidimensionales (Fig. 7).

- Unidimensionales:

Son los más utilizados a nivel práctico. Consisten en una serie de ranuras paralelas de forma rectangular, de igual anchura y de diferente profundidad. Por lo general, dichas ranuras están separadas por unos divisores delgados y rígidos.

La profundidad de cada ranura se obtiene a partir de una secuencia matemática prefijada dando lugar a estructuras repetitivas (periódicas), que producen en un determinado margen de frecuencias una dispersión del sonido o difusión en planos perpendiculares a dicha ranura.

$$s = n^2 \text{mod } p \quad (4)$$

donde:

p es un número primo

n es un número entero que va desde 0 hasta $p-1$

mod es la operación matemática módulo.

Se logra una óptima difusión del sonido dentro de un determinado margen de frecuencias. La frecuencia más elevada para la cual se produce difusión del sonido aumenta a medida que la anchura de las ranuras disminuye, en tanto que la mínima frecuencia disminuye a medida que aumenta la máxima profundidad.

De todas formas existe un límite al valor máximo de dicha relación, puesto que las ranuras estrechas y muy profundas producen un exceso de absorción acústica. Dicho límite lleva a que, en la práctica, el margen útil de frecuencias quede restringido a prácticamente 3 octavas, es decir:

$$\frac{f_{max}}{f_0} \leq 8 \quad (5)$$

donde:

f_{\max} corresponde a la frecuencia máxima para la cual se desea una óptima difusión

f_0 corresponde a la frecuencia de diseño (la mínima).

Fuera de dicho margen, el difusor tiende a comportarse como una superficie plana, dando lugar a reflexiones prácticamente planas.

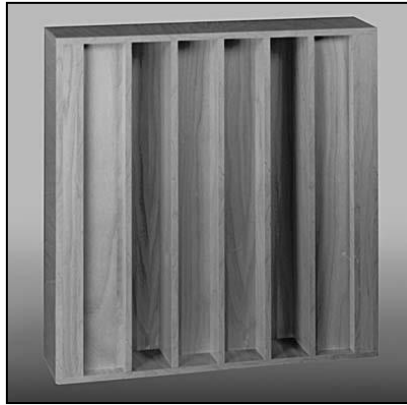


Fig. 6.- Difusor QRD unidimensional

- Bidimensionales

Aparecen con el objetivo de obtener una óptima difusión del sonido incidente en todas las direcciones del espacio. En este tipo de difusores las ranuras son sustituidas por pozos dispuestos en paralelo, de profundidad variable, y de forma generalmente cuadrada.

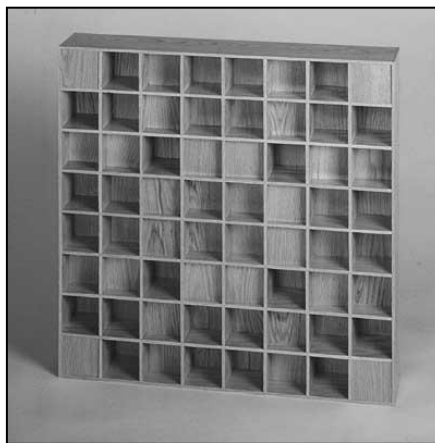


Fig. 7.- Difusor QRD bidimensional

II.2.3.3.- Difusores PRD (*Primitive Root Difussor*)

Son análogos a los difusores unidimensionales QRD, con la única diferencia de que la profundidad para cada ranura se obtiene a partir de otra secuencia generadora.

$$s_n = g^n \text{ mod } p \quad (6)$$

donde:

p es un número primo

g es la raíz primitiva de p

n es un número entero que va desde 1 hasta $p-1$

mod es la operación matemática módulo.

A diferencia de lo que sucede con los difusores QRD, no existe simetría dentro de cada periodo. Esto se puede observar en la figura siguiente (Fig. 8).

La reflexión especular que producen es prácticamente nula, por lo que los hace aconsejables como canceladores de ruido.



Fig. 8.- Difusor PRD

II.3.- Difusores de estructura cristalina

II.3.1.- Introducción a los cristales, sistemas periódicos

Se sabe que una gran cantidad de sólidos en la naturaleza están basados en estructuras repetitivas y regulares (a nivel microscópico), tales como los diamantes o estructuras sencillas de NaCl, CLCs, SZn. A los materiales de estas características se les denominan cristales. No han sido pocos los trabajos que se han realizado para llegar a la conclusión de denominar cristales a los materiales con esas características, pero el trabajo que confirmó que los cristales estaban formados por una repetición regular de estructuras idénticas (átomos o grupos de átomos) a lo largo de todo el sólido fue presentado en 1912 por Laue, Friedrich y Knipping. Consiguieron demostrar su teoría ^[9] por medio de los estudios que realizaron en el campo de la difracción de rayos-X. Este trabajo demostraba dos hechos; el primero, que los rayos-X eran ondas, ya que se podían difractar; el segundo, que los sólidos cristalinos estaban formados por una malla periódica de átomos en las tres direcciones del espacio.

Una estructura compuesta de átomos o moléculas que se repite una y otra vez a intervalos regularmente espaciados y con la misma orientación, se ajusta perfectamente a la definición de cristal, siendo un rasgo importante en este la periodicidad o regularidad de la disposición en los modelos.

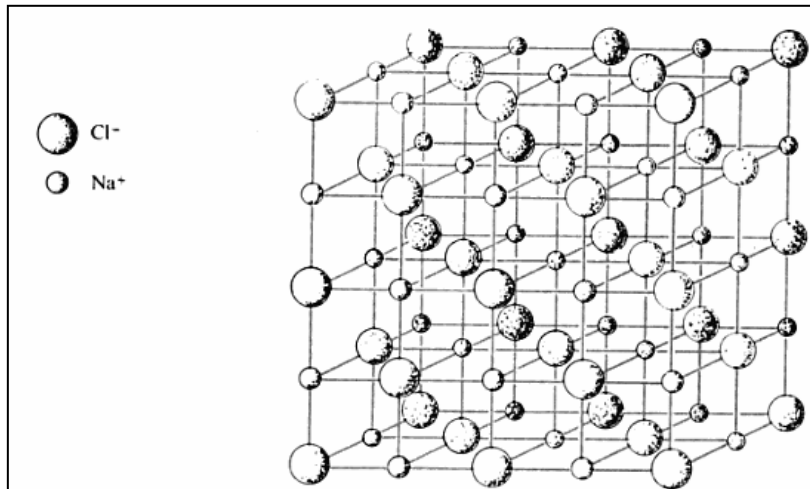


Fig. 9.- Modelo mostrando la ordenación geométrica de la estructura del cloruro sódico

Las fuerzas netas de atracción intermolecular son máximas por la distribución de los átomos en el sólido cristalino. Estas fuerzas que mantienen la estabilidad del cristal pueden ser iónicas, covalentes, de van der Waals, de enlaces de hidrógeno o una combinación de todas las anteriores.

Un concepto de interés dentro de los cristales es la *celdilla unidad* ^[10] (Fig. 10). Una pequeña unidad del cristal al repetirla reproduce el cristal completo. Si la celda unidad se compone del mínimo volumen posible, se denomina *celda primitiva*. Se puede decir que una celdilla unidad es como una plantilla maestra para todo el cristal y es la “base” para la construcción del mismo.

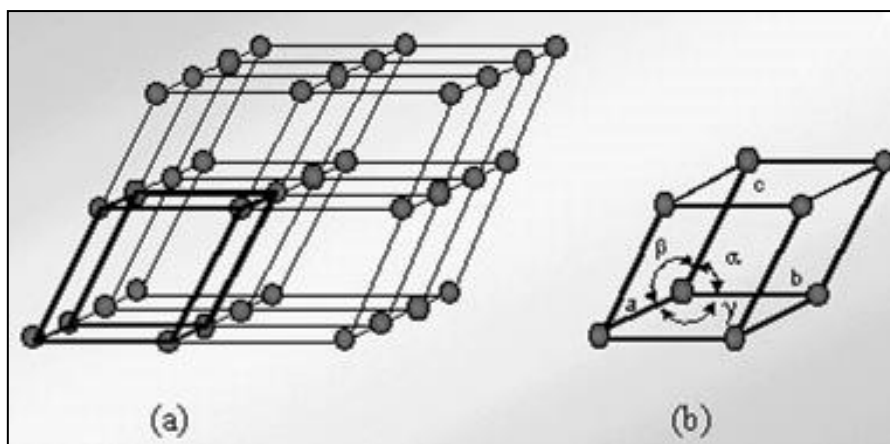


Fig. 10.- a) Retículo espacial de un sólido cristalino ideal. b) Celda unidad con constantes reticulares

Otro tipo de celda es la *celda de Wigner-Seitz* (Fig. 11), definida como la celda unidad primitiva elegida de forma que el punto de la red que contiene es el centro de la celda. Todo el espacio puede rellenarse con estas celdas.

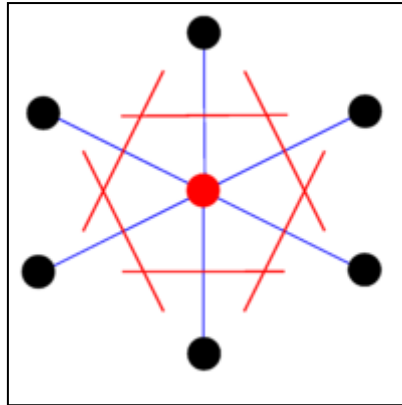


Fig. 11.- Celda de Wigner- Seitz. El volumen encerrado más pequeño que se obtiene para conseguir una celda primitiva es la celda primitiva de Wigner- Seitz

Un sistema periódico, se caracteriza por poseer una estructura cristalina, es decir, una distribución periódica de un material en un medio con propiedades físicas diferentes a las de este material. Este sistema está formado por la repetición de una unidad elemental en una red periódica de puntos. Estas unidades elementales que forman el conjunto de la estructura se denominan “bases” y a la red periódica de puntos se denomina *red de Bravais* ^[9]. La red de Bravais puede definirse como una disposición infinita de puntos discretos que presentan una estructura y orientación invariable independientemente del punto de orientación. De esta forma, la totalidad de una estructura cristalina se puede definir mediante una red de Bravais y una base.

La red de Bravais, viene definida matemáticamente por los vectores fundamentales de traslación \vec{a} de forma que sus puntos \vec{R} quedan definidos por la siguiente expresión:

$$\vec{R} = \{ \sum_{i=1}^n v_i \vec{a}_i \mid v_i \in \mathbb{Z} \} \quad (7)$$

Siendo v_i números enteros y $n \in [1,3]$ dependiendo de las dimensiones espaciales de la red de puntos.

Dentro de una misma red pueden existir diferentes celdas unidad definidas por distintos vectores fundamentales, pero solo existirá una celda de dimensiones mínimas. Los vectores que desarrollen este tipo de celdas reciben el nombre de vectores primitivos.

A continuación se muestran los cinco tipos de red de Bravais más comunes en dos dimensiones, según los ángulos y la distancia entre nodos (Fig. 12).

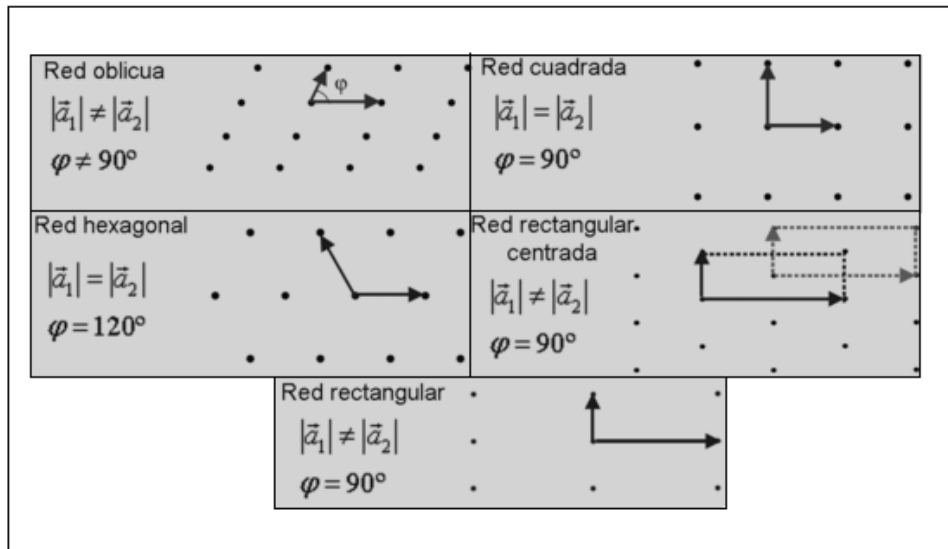


Fig. 12.- Redes de Bravais más comunes en dos dimensiones

La fracción de espacio ocupada por los átomos, moléculas o iones de una celda unitaria, suponiendo que se trata de esferas sólidas, es lo que se llama *factor de llenado*. Viene dado por la siguiente fórmula:

$$f = \frac{nv}{V_c} \quad (8)$$

donde f es el factor de llenado o fracción de volumen ocupado, n es el número de átomos por celda, v es el volumen del átomo y V_c es el volumen de la celda.

II.3.2.- Cristales de sonido bidimensionales

II.3.2.1.- Difracción de ondas por cristales

En física, la difracción es un fenómeno característico de las ondas que consiste en la dispersión y curvado aparente de las ondas cuando encuentran un obstáculo. La difracción ocurre en todo tipo de ondas, desde ondas sonoras, ondas en la superficie de un fluido y ondas electromagnéticas como la luz y las ondas de radio.

El fenómeno de la difracción es un fenómeno de tipo interferencial, y como tal, requiere la superposición de ondas coherentes entre sí. Los efectos de la difracción disminuyen hasta hacerse indetectables a medida que el tamaño del objeto aumenta comparado con la longitud de onda.

Cuando un conjunto de ondas se propaga a través de un medio que contiene muchos elementos dispersores, cada onda va a ser dispersada por cada uno de estos elementos, y las ondas dispersadas volverán a ser dispersadas por los otros elementos. Este proceso se repite estableciéndose un patrón recursivo infinito de redispersión entre dispersores.

La dispersión múltiple de ondas es responsable de un buen número de fenómenos, como pueden ser la modulación del sonido ambiente en el océano.

Si además los elementos dispersores están colocados de forma periódica como ocurre en las estructuras cristalinas, la dispersión múltiple nos lleva a un fenómeno conocido como estructuras de bandas. Esto significa que las ondas se pueden propagar en un cierto rango de frecuencias, siguiendo unas reglas de dispersión, mientras que en otros rangos de frecuencias la propagación es eliminada. Las primeras son llamadas bandas permitidas, y las últimas, bandas prohibidas (*band gap*).

Cuando un conjunto de frecuencias no se propaga en ninguna dirección de incidencia sobre el cristal de sonido decimos que se ha producido una banda prohibida completa.

En el caso de bandas permitidas y prohibidas a la propagación del campo acústico, las ondas deben encontrarse con una distribución periódica de la densidad y de la velocidad de propagación, y que estos valores sean comparable a la longitud de onda del frente incidente.

Este patrón de interferencia se repite para cualquier tipo de onda, siempre que se encuentre con una periodicidad de propiedades físicas a las que dicho campo ondulatorio sea sensible. Así, en el caso de ondas acústicas y elásticas, el patrón de repetición se produce entre velocidades y densidades de distintos materiales. En el caso de ondas acústicas, si los elementos dispersores tienen una velocidad de propagación y una densidad muy superiores a la del aire, y se encuentran inmersos en aire, el sistema se denomina *cristal de sonido*.

II.3.2.2.-Bandas prohibidas de energía

La difracción depende pues de la estructura del cristal y de la longitud de onda. Si la longitud de onda de la radiación es comparable o incluso menor que la constante de la red, pueden aparecer haces difractados en direcciones muy diferentes de la correspondiente al haz incidente. La difracción producida por una estructura cristalina verifica la *ley de Bragg* ^[9].

La ley de Bragg es una explicación de los haces difractados de un cristal. Está basada en la reflexión especular. Si se considera que los cristales pueden comportarse como redes de difracción y se hace una simplificación de que las ondas incidentes se reflejan de manera especular sobre planos paralelos del cristal, el haz difractado solamente será visible cuando exista una interferencia constructiva entre los rayos que van reflejándose sucesivamente en los distintos planos cristalinos paralelos (Fig. 13). La condición de interferencia constructiva indica que la diferencia entre caminos recorridos por rayos reflejados en planos adyacentes debe ser un múltiplo entero de n longitudes de onda λ del haz (9). En este proceso se considera que la difusión es elástica, por tanto, la energía del rayo no cambia en la reflexión.

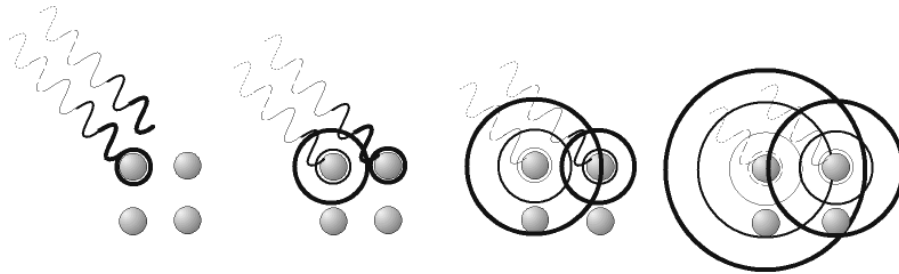
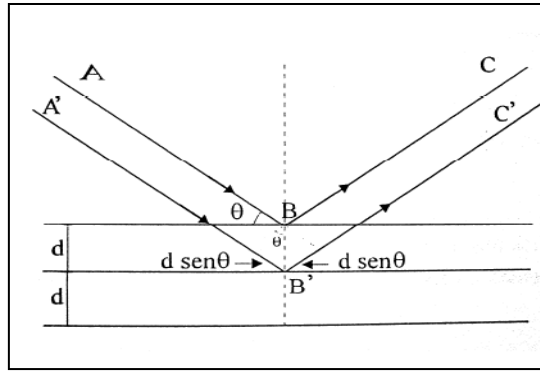


Fig. 13.- Haces difractados en un cristal. Ley de Bragg

La *reflexión de Bragg* (Fig. 14) es un fenómeno característico de la propagación de una onda en un cristal. Dicha reflexión es la causante de la aparición de las llamadas “band gap” (bandas prohibidas de energía).


 Fig. 14.- Reflexión de Bragg λ

La primera banda de energía se asocia con la primera reflexión de Bragg, que corresponde a la siguiente expresión:

$$n\lambda = 2d \sin(\theta) \quad (9)$$

Que para incidencia normal y $n=1$ queda:

$$\lambda = 2d = \frac{c}{f} \quad (10)$$

Donde:

$$f = \frac{c}{2d} = \frac{c}{2a} \rightarrow k = \frac{\pi}{a} \quad (11)$$

La cual corresponde con el límite de la *zona de Brillouin* ^[11]

La construcción de una red recíproca señala qué vectores de onda pueden experimentar difracción de Bragg. Si la red se construye a partir de vectores de traslación (G), la red recíproca es periódica al igual que la directa. En esta situación existe una cierta repetición de los vectores que sufren difracción. La celda de Wigner- Seitz, construida en el espacio recíproco, se conoce como la primera zona de Brillouin.

Las zonas de Brillouin son regiones limitadas de energía. En la primera zona, la onda tendrá una energía comprendida entre unos valores máximos y mínimo, y sus límites indicarán los valores de los vectores de onda que sufren difracción de Bragg.

La expresión (11) es equivalente a la condición de difracción:

$$(k')^2 = (k + G)^2 \quad (12)$$

Donde G corresponde a vectores de traslación:

$$G = \left(\frac{2\pi}{a}\right) \cdot (xn_x + yn_y) \quad \text{Producto vectorial} \quad (13)$$

La expresión (12) la podemos simplificar:

$$k = \pm \frac{1}{2}G \quad (14)$$

Por lo tanto, aplicando la expresión (13)

$$k = \pm n \frac{\pi}{a} \quad (15)$$

Así, la primera reflexión de Bragg ocurre para $k = \pm \frac{\pi}{a}$, es decir, para aquel vector que coincide con el vector que queda dentro del límite de la primera zona de Brillouin y por tanto cumple las condiciones de reflexión.

Como ya se ha estudiado anteriormente, la reflexión aparece para ese valor debido a que la onda reflejada por un átomo en la red lineal interfiere constructivamente con la onda reflejada por el átomo vecino más próximo. La diferencia de fase entre las 2 ondas reflejadas es $\pm 2\pi$.

Se puede demostrar que para estos valores de k , las soluciones están formadas por ondas que viajan hacia la derecha y hacia la izquierda: son ondas estacionarias, las cuales se producen por reflexiones sucesivas. Por tanto, ha aparecido una “band gap”.

Podemos decir entonces, que existe una banda prohibida en $k = \pm \frac{\pi}{a}$, que corresponde con la primera reflexión de Bragg y con los límites de la zona de Brillouin (Fig. 15)

Las siguientes “band gap” se encuentran en $\pm n \frac{\pi}{a}$, siendo n un número entero.

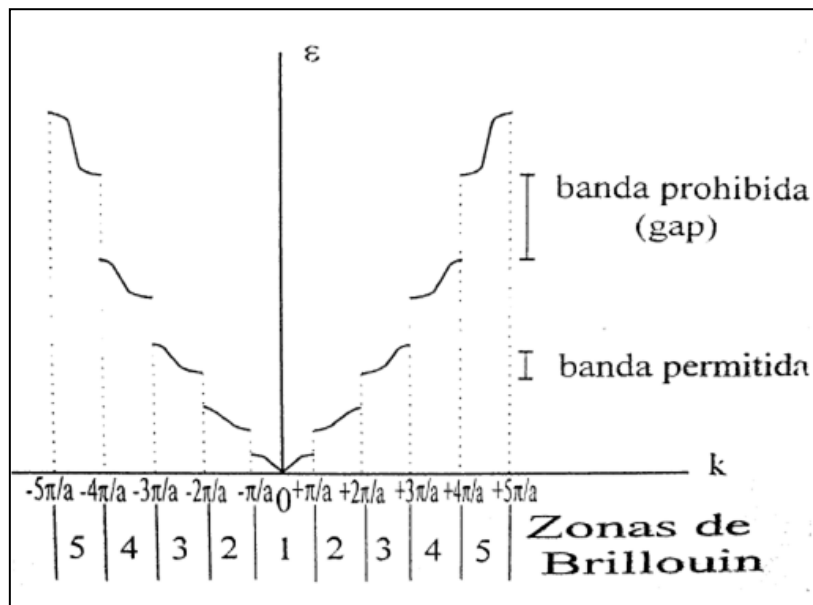


Fig. 15.- Zonas de Brillouin

Las zonas de Brillouin se construyen uniendo la celda origen de la red recíproca (dado que la estructura es periódica, cualquier volumen básico a partir del cual se forma la estructura puede actuar de celda origen) con sus celdas vecinas más próximas.

II.3.2.3.- Parámetros estructurales

Los parámetros que controlan la aparición de *gaps* son:

- El tipo de simetría de la estructura. En nuestro experimento hemos utilizado una red rectangular, aunque algunos autores como Economou et al. ^[12] han estudiado teóricamente que, en los cristales de sonido formados a partir de redes triangulares aparece *gap* antes que en la red cuadrada. Es debido a que cuanto más redonda es la celda de Wigner- Seitz de la red recíproca, más posibilidades hay de que aparezca el *gap*.

- El contraste de velocidad entre la onda propagándose por el material “huésped” y por el elemento dispersor.

- El cociente entre las densidades de los elementos que forman el cristal. Según algunos autores ^[13] este es el factor determinante para la aparición del *gap* en cristales de sonido. El aumento del cociente de densidades produce un aumento del *gap* existente. Sin embargo, en cristales de sonido este cociente puede hacerse tan grande que el material de más alta densidad se comporte como rígido y el sonido no se transmita por él, si no únicamente por el de baja densidad.

- El factor de llenado, definido como el ratio entre el volumen ocupado por cada dispersor respecto al total del volumen de la composición.

- La topología. El fenómeno de la dispersión se consigue mediante el uso de 2 materiales, cada uno con diferentes velocidades de propagación. Con los cristales de sonido, el material dispersor se define como aquel que presenta mayor densidad, y esto implica que posee una mayor velocidad de las ondas acústicas a través de él.

Topología Cermet: El material dispersor consiste en inclusiones aisladas, cada una de las cuales está completamente rodeada por el material huésped.

Topología Network: El material dispersor está conectado y forma una continua “red de trabajo” a lo largo de toda la estructura.

Estudios teóricos han demostrado que la topología Cermet es más favorable para el desarrollo de bandas prohibidas para ondas acústicas.

II.4.- Medida del grado de difusión

La difusión constituye un parámetro de calidad en la acústica de una sala. El fin de crear un campo lo más difuso posible, es lograr que la energía reverberante producida llegue de forma uniforme de todas las direcciones, produciéndose un aumento del grado de impresión espacial.

El campo difuso ideal no existe en la realidad, por lo tanto es necesario saber cuánto se aleja una sala real de lo ideal.

Existen diversos métodos para evaluar el grado de difusión, como el propuesto por Furduev y Ch’eng T’ung ^[2], en el que hacían girar un micrófono direccional en un campo de ruido aleatorio, emitido por un altavoz, en el recinto bajo estudio. La salida eléctrica del micrófono se representaba en función del ángulo de azimuth en un trazador de respuesta polar. La dirección de la fuente se toma como azimuth cero. La medida se repite en campo libre o cámara anecoica, ajustando la trazadora tal que la respuesta en cero sea igual a la obtenida en el estudio. Con este método obtenemos en campo libre un diagrama polar que es idéntico a la característica

direccional del micrófono, y en el estudio se obtiene una curva que está entre una circunferencia perfecta (difusión perfecta), y la curva de respuesta del micrófono (Fig 16).

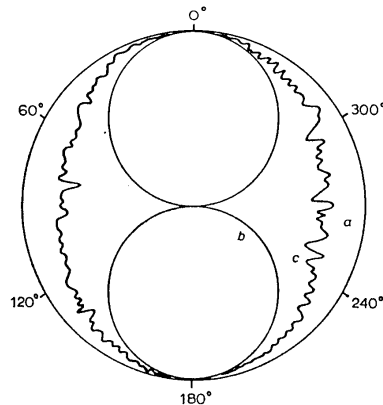


Fig. 16.- Diagrama polar de la señal media por un micrófono direccional (patrón en forma de 8) de gradiente de presión, con la fuente sonora en azimuth 0°.

(Fuente: J.Redondo 2002 [2])

En la figura 16 podemos apreciar los tres tipos de curvas: la curva a es la que describe el estado de difusión perfecta, y la curva b es la tomada en campo libre. La curva c muestra un campo parcialmente difuso y sería el resultado del método de Furduerv y Ch'eng T'ung en un recinto real. El índice de difusión utilizado en ese método se define como:

$$d = \frac{A_c - A_b}{A_a - A_b} \tag{16}$$

donde A_x es el área de la superficie definida por la curva x . Evidentemente, dicho parámetro tomará el valor 1 en el caso de campo perfectamente difuso mientras que será 0 en cámara anecoica. Según Furduev y Ch'eng T'ung este método resulta adecuado para evaluar recintos grandes.

Otro método es el empleado por Spring y Randall [2], en el cual se comparan las curvas de caída desde el estado estacionario, i.e. descenso paulatino de la energía acústica en el recinto una vez cesa el aporte debido a la fuente sonora. En dicho método se realiza el cálculo del parámetro SA mediante una relación de áreas, dividiéndose el área de la zona rayada entre el área total del triángulo (Fig 17). Dicho triángulo va desde el comienzo de la caída (o 5 ms posterior para no incluir el sonido directo) hasta 6 dB por encima del ruido de fondo.

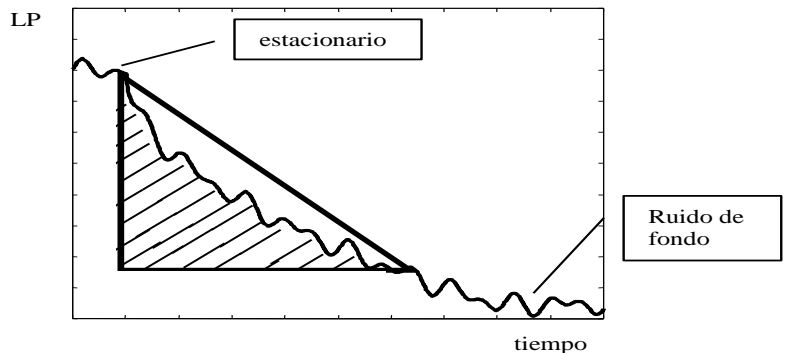


Fig. 17.- Cálculo del parámetro SA. (Fuente: J.Redondo 2002 [2])

En el presente trabajo se hará un análisis cualitativo de la contribución de un difusor, basado en cristales de sonido, a la homogeneidad y la isotropía del campo acústico confinado en un recinto, empleando métodos sencillos y rápidos para evaluar así la difusión que produce este dispositivo en dicho campo. Se realizará una comparación entre el estado inicial del recinto vacío, con el estado final en el cual se ha introducido el elemento difusor bajo estudio. Para ello partimos de los datos de presión y velocidad de partícula captados en diferentes puntos del recinto, emitiendo una señal test impulsiva de banda ancha desde una fuente puntual. Estos datos se han obtenido a partir de una simulación en el software de cálculo matemático MATLAB, aplicando el método de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD) al modelo de acústica de fluidos en 2D ^[28, 29], (ver apartado II.6).

Los métodos de evaluación empleados serán los siguientes:

- La desviación estándar del TR con la posición, para 24 posiciones de captación de la respuesta al impulso de la sala diferentes.
- El estudio de la caída de la intensidad acústica, mediante la comparación de la diferencia en porcentaje de los índices EDT y T30 ^[4] medios.
- La desviación estándar del nivel de presión sonora (SPL) ^[4] en dB con la posición, con captación omnidireccional, para 24 posiciones de captación de la presión diferentes.
- La desviación estándar entre la captación del nivel de presión sonora en la dirección normal y la dirección perpendicular al difusor bajo estudio, para 24 posiciones de captación diferentes.
- La evaluación de la coloración de la sala con y sin difusor, en un punto de captación al azar. Se realizará mediante un estudio cualitativo del efecto del difusor sobre la respuesta frecuencial de la sala en dicho punto.

II.5.- Barreras Acústicas

II.5.1.- Introducción

Numerosos estudios indican que las principales fuentes de ruido medioambiental están relacionadas con el transporte. Este tipo de contaminación acústica puede ser causante de trastornos del sueño, estrés, sordera y problemas de presión sanguínea, por tanto reducirla supone un beneficio considerable en la salud de los individuos afectados. Este hecho hizo que ya en 1970 las leyes federales de Estados Unidos introdujeran el uso de barreras acústicas, como una de las principales medidas para mitigar el ruido causado por el tráfico rodado en las carreteras y por los ferrocarriles en vías férreas, cercanas a zonas habitadas.

Las *barreras acústicas*, también llamadas *pantallas acústicas* o *barreras sónicas*, son dispositivos sólidos construidos a lo largo de la vía de transporte causante del ruido, interponiéndose entre dicha vía y las zonas residenciales colindantes. Estos elementos no bloquean totalmente el ruido, pero en los mejores casos pueden llegar a reducirlo 10 dB.

La utilización de barreras acústicas puede presentar algunas desventajas; ocasionando un impacto estético en algunas zonas en las que son implantadas, y en algunos casos con unos costes de diseño, implantación y mantenimiento muy elevados.

II.5.2.- Principios del comportamiento acústico de pantallas. Principales normas de diseño

El sonido que emite la fuente de ruido se propaga por el aire hasta que encuentra la pantalla: Parte de la energía acústica se refleja, parte se transmite hasta alcanzar el receptor, parte se absorbe y parte se difracta en los bordes de la pantalla.

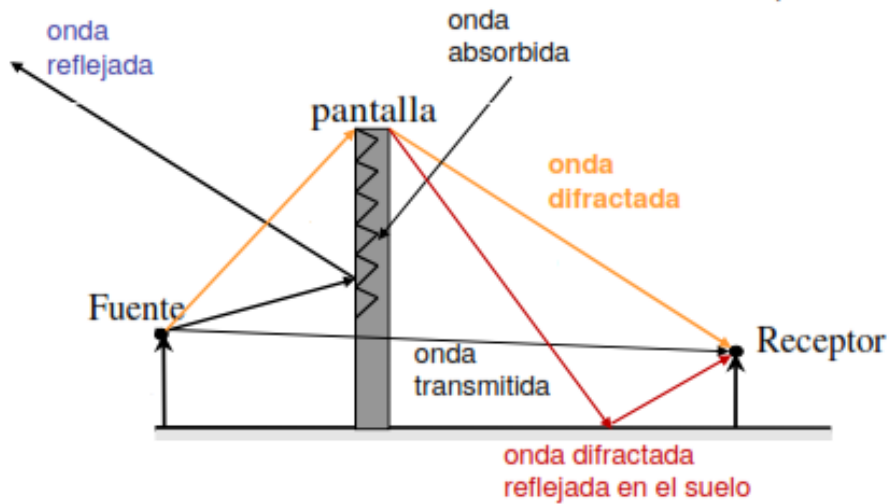


Fig. 18.- Reflexión, transmisión, absorción y difracción del sonido a través de una pantalla

En la siguiente figura se muestra como el sonido directo que incide en el borde superior de la barrera se difracta. Este fenómeno se basa en la *Ley de Huygens*, que postula que cada punto de la parte superior de la barrera se transforma en una fuente sonora puntual, y por tanto genera una onda esférica. La onda difractada disminuye la atenuación conseguida por la pantalla, al eliminar la zona de sombra acústica que se produce en la zona entre la pantalla y el receptor.

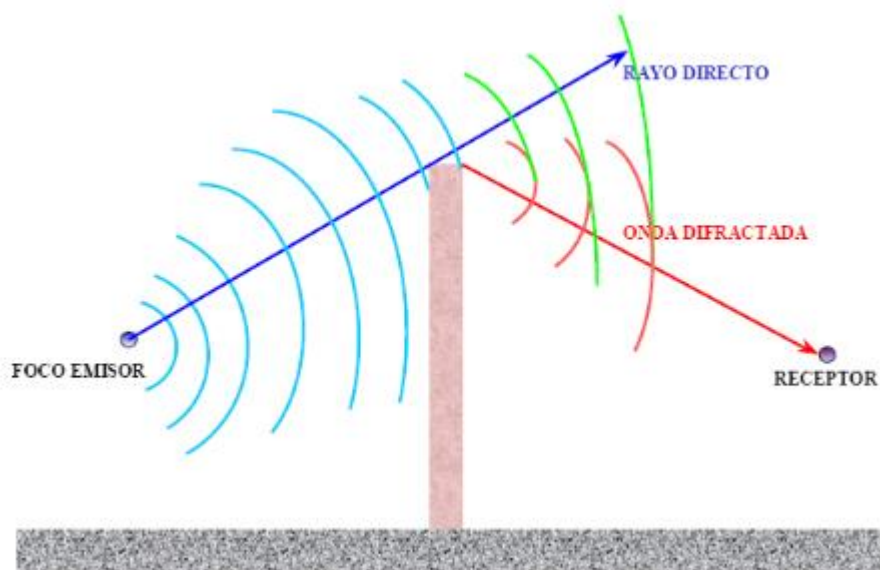


Fig. 19.- Difracción del sonido directo a través de una pantalla

La sombra acústica que se crea por este fenómeno varía en función de la frecuencia de la onda sonora incidente, siendo menor a frecuencias más bajas. Para longitudes de onda suficientemente largas en comparación con el tamaño de la barrera la onda se llega a propagar como si no existiera la barrera. (Ver figura 20).

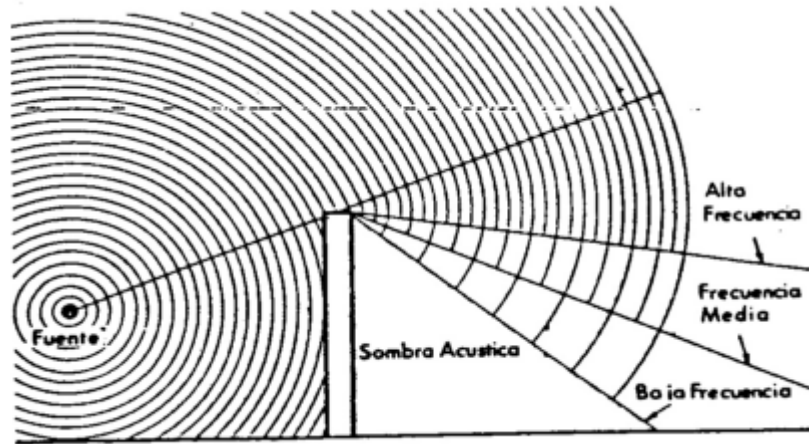


Fig. 20.- Ángulo de incidencia de la onda difractada en función de la frecuencia

Algunas de las reglas seguidas habitualmente para el diseño de pantallas son:

1) Altura:

Simplificando mucho el cálculo de la atenuación de ruido que produce una barrera y haciendo una primera aproximación, la FHWA (Federal Highway Administration) del departamento de transportes de los Estados Unidos, en su artículo, “*Keeping the Noise Down; Highway Traffic Noise Barrier*”^[17], concluye en que una barrera acústica de igual altura que el receptor, produce una reducción de ruido de 5 dB, que se incrementa en 1.5 dB por cada metro de altura que elevamos dicha barrera.

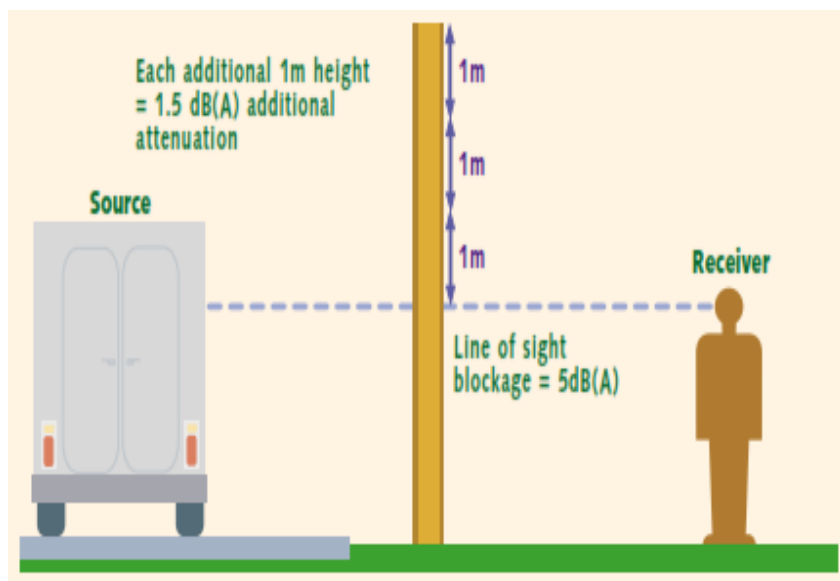


Fig. 21.- Altura de la barrera acústica, (Fuente: FHWA U.S.A, 2011^[17])

Como se verá más adelante en el apartado *II.2.4 Atenuación por inserción de la barrera*, el cálculo de la reducción de ruido que proporciona una barrera es más complejo, y en el intervienen no solo las alturas de la fuente-barrera-receptor, sino también las distancias entre los tres elementos.

La eficacia de la barrera viene por tanto condicionada por su posición respecto al foco así como de la altura que tenga. Cuanto más próximo al foco emisor se sitúe la barrera y mayor sea su altura, mayor será su efectividad.

2) Longitud:

Para que la barrera sea efectiva, la longitud de la misma debe ser al menos 8 veces superior a la distancia entre la barrera y la zona donde está ubicado el receptor. (Ver figura 22)

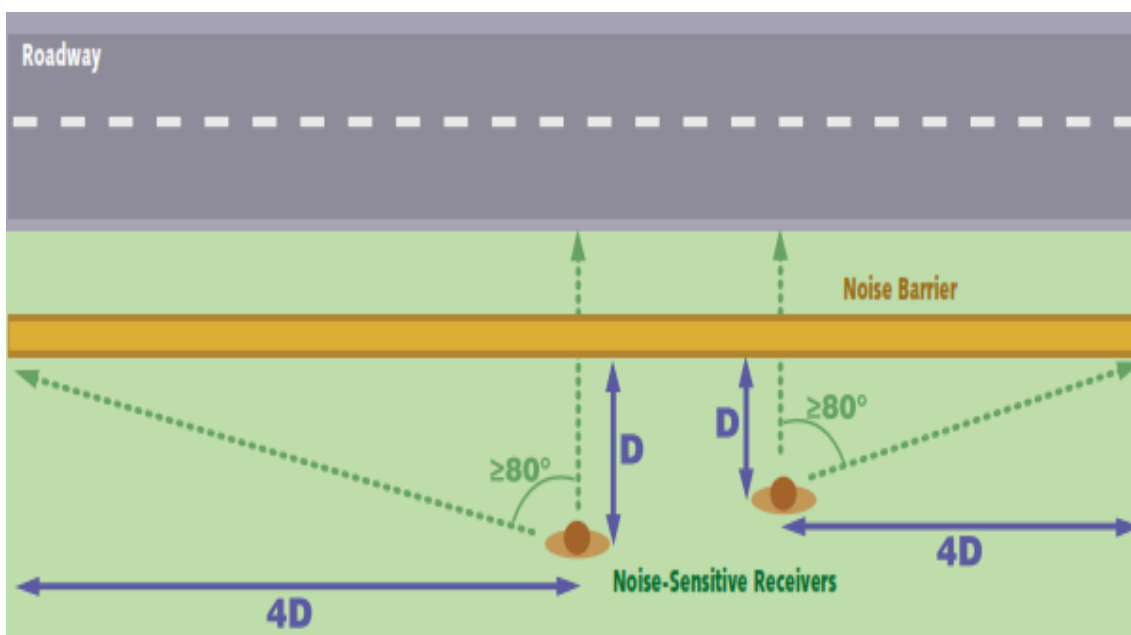


Fig. 22.- Longitud de la barrera acústica

(Fuente: FHWA U.S.A, 2011 ^[17])

3) Materiales:

Las características de aislamiento de la barrera dependerán también de su masa superficial y coeficiente de absorción acústica. Por ello, la elección de los materiales es crítica ya que aparte de las características acústicas de los materiales hay que tener en cuenta las condiciones medioambientales del entorno y los agentes atmosféricos. Por otro lado se han de evitar productos combustibles en la construcción de las barreras acústicas. Así como pensar en su mantenimiento tanto en limpieza como en protección frente a actos vandálicos, roturas y pintadas.

Existe una amplia variedad de materiales en lo que a la construcción de pantallas acústicas se refiere. Estos materiales deben ser lo suficientemente rígidos y densos (al menos 15-20 kg/m²) para que la transmisión del ruido se elimine.

Generalmente los materiales deben ser los más reflectantes posible para minimizar la transmisión de ruido a través de la barrera, sin embargo en determinadas ocasiones, es conveniente emplear materiales absorbentes, es decir, materiales que transforman una parte importante de la energía acústica que reciben en otro tipo de energía (normalmente calor). La capacidad absorbente de un material está en función de la frecuencia de la onda incidente.

La utilización de este tipo de materiales en las barreras acústicas mejora sensiblemente la eficiencia de las mismas, en los casos en los que conviene evitar la aparición de resonancias indeseadas entre la fuente de ruido (u otros elementos) y la barrera. Este ‘efecto tambor’ es perjudicial ya que dichas resonancias pueden incrementar el nivel de ruido. Precisamente, uno de los objetivos de esta tesina consiste en analizar posibles estrategias para disminuir este “efecto tambor”.

En algunos casos es importante minimizar el impacto ambiental que causan estas pantallas, intentando integrarlas en el entorno, empleando materiales que nos lo permitan, como pueden ser elementos transparentes y cubiertas vegetales.

4) Normativa europea de homologación de pantallas:

La normativa europea que regula las pantallas acústicas en función de las características acústicas de sus materiales es la siguiente:

- UNE-EN 1793-1 “Características relativas a la absorción acústica” [24].

Los ensayos sobre los materiales se realizan en cámara reverberante. Los coeficientes de absorción deben medirse en 1/3 de octava de 100 a 5000 Hz según norma EN 20354 (ISO 354-1985).

El índice de evaluación de la absorción acústica ΔL_α , viene dada por la siguiente expresión (se recomienda $\alpha < 0.99$):

$$\Delta L_\alpha = -10 \log \left| 1 - \frac{\sum_{i=1}^{18} \alpha_{si} \cdot 10^{0.1L_i}}{\sum_{i=1}^{18} 10^{0.1L_i}} \right| \tag{17}$$

La clasificación de las pantallas acústicas en función de su índice de absorción es la siguiente:

Categoría	ΔL_α dB
A0	no determinado
A1	< 4
A2	4 á 7
A3	8 á 11
A4	> 11

Fig. 23.- Clasificación de las pantallas acústicas por su absorción (Fuente: UNE-EN-1793-1 [24])

- UNE-EN 1793-2 “Características intrínsecas relativas al aislamiento al ruido aéreo” [25].

Los ensayos sobre los materiales se realizan en cámara de transmisión. Se mide el índice de reducción acústica R_i de 100Hz a 5kHz en 1/3 de octava.

$$\Delta L_R = -10 \log \left| \frac{\sum_{i=1}^{18} 10^{0.1L_i} \cdot 10^{-0.1R_i}}{\sum_{i=1}^{18} 10^{0.1L_i}} \right| \quad (18)$$

La clasificación de las pantallas acústicas en función de su índice de aislamiento es la siguiente:

Categoría	ΔL_R dB
B0	no determinado
B1	< 15
B2	15 á 24
B3	> 25

Fig. 24.- Clasificación de las pantallas acústicas por su aislamiento (Fuente: UNE-EN-1793-2 [25])

- UNE-EN 1793-3 “Espectro normalizado de ruido de tráfico” [26].

Esta norma define el espectro de referencia para calcular el comportamiento acústico de las barreras mediante ΔL_α y ΔL_R para ruido aéreo. Da niveles sonoros L_i en dB, ponderados según la red A y referidos a un nivel mayor de 0 dB en 1/3 octava.

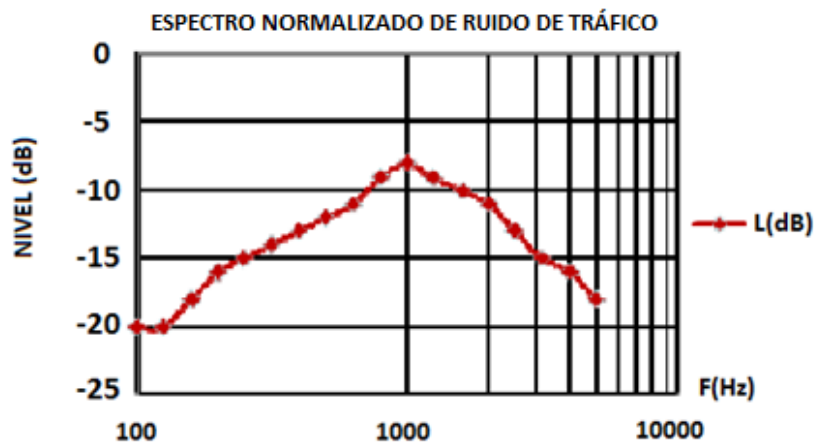


Fig. 25.- Espectro normalizado del ruido de tráfico (Fuente: UNE-EN-1793-3 [26])

- UNE-EN 1794-1 “Comportamiento mecánico y requisitos de estabilidad”^[27].

Es la norma que regula las características estructurales y la resistencia mecánica de la pantalla acústica.

Esta norma europea especifica los criterios para calificar los dispositivos reductores de ruido de tráfico según sus prestaciones mecánicas básicas bajo condiciones normalizadas de exposición, independientemente de los materiales utilizados.

Se evalúan parámetros como la carga de viento y carga estática, vibración y efectos de fatiga, peso propio, impacto de piedras, seguridad en caso de colisión y cargas dinámicas ocasionadas por la retirada de la nieve.

II.5.3.- Principales tipos de pantallas acústicas

A continuación se muestran ejemplos de barreras acústicas construidas con diferentes materiales como diques de tierra, madera, cemento, metal, materiales plásticos transparentes, etc.

En función de la capacidad de absorber o reflejar la energía de la onda incidente, existen tres tipos de pantallas acústicas; absorbentes, reflectantes y mixtas.

- 1) Absorbentes:



Fig. 26.- Pantalla acústica de tierra con cubierta vegetal

(Fuente: FHWA U.S.A., 2011^[17])

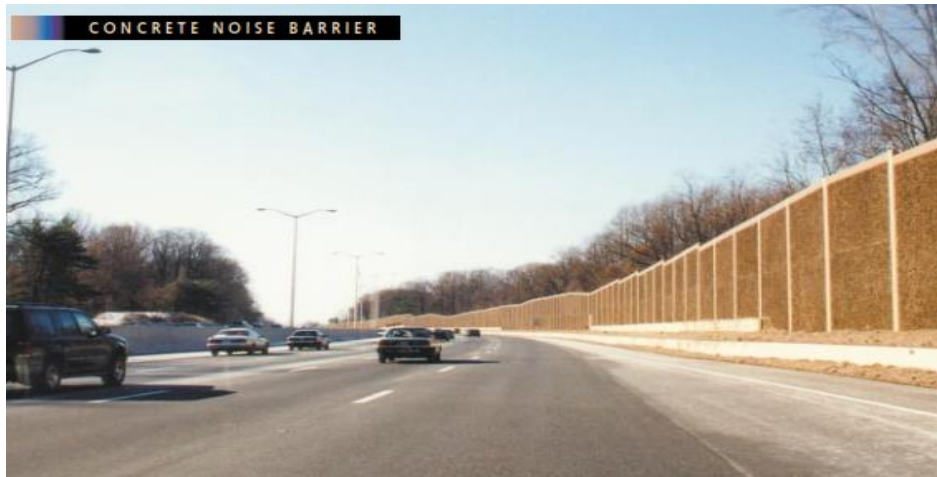


Fig. 27.- Pantalla acústica de hormigón poroso con acabado en relieve (Fuente: FHWA U.S.A, 2011 ^[17])

2) Reflectantes:



Fig. 28.- Pantalla acústica de madera (Fuente: FHWA U.S.A, 2011 ^[17])

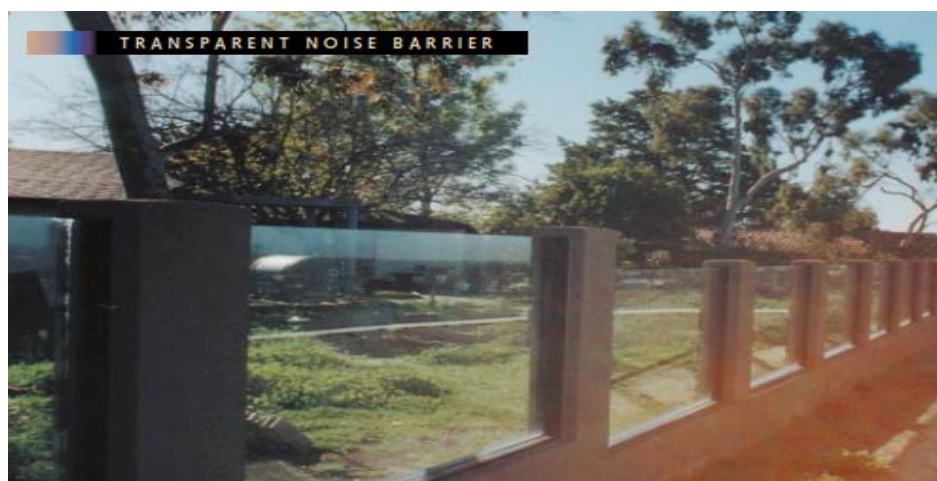


Fig. 29.- Pantalla acústica de material transparente (Fuente: FHWA U.S.A, 2011 ^[17])

3) Mixtas:



Fig. 30.- Pantalla acústica tipo “sándwich”, de metal perforado con absorbente en el interior



Fig. 31.- Pantalla acústica mixta metal perforado-metacrilato



Fig. 32.- Pantalla acústica mixta hormigón poroso-ladrillo

II.5.4.- Atenuación por inserción de la barrera. Insertion Loss (IL)

Este índice es el resultado del cálculo de la diferencia de nivel de presión sonora en el receptor antes y después de colocar la barrera. Se reduce en general a un problema geométrico: emisor – pantalla – receptor, y al cálculo del número de Fresnel, a partir del cual se calcula la atenuación acústica mediante la siguiente expresión, denominada comúnmente como “relación de Maekawa” [19]. Esta fórmula es válida para barreras delgadas e infinitas, situadas en campo libre.

$$IL(dB) = 20 \cdot \log_{10} \left[\frac{2\pi N}{tgh(\sqrt{2\pi N})} \right] + 5 \quad (19)$$

donde:

IL: Corresponde a la atenuación en [dB], correspondiendo a la diferencia entre el NPS (nivel de presión sonora) sin y con barrera.

N: Corresponde al número de Fresnel. Para calcular el número de Fresnel se aplica la siguiente relación:

$$N = \frac{a+b-c}{\frac{\lambda}{2}} \quad (20)$$

Siendo:

a: Distancia desde la fuente al borde superior de la barrera [m].

b: Distancia desde el receptor hasta el borde superior de la barrera [m].

c: Distancia entre la fuente y el receptor [m].

λ : longitud de onda [m].

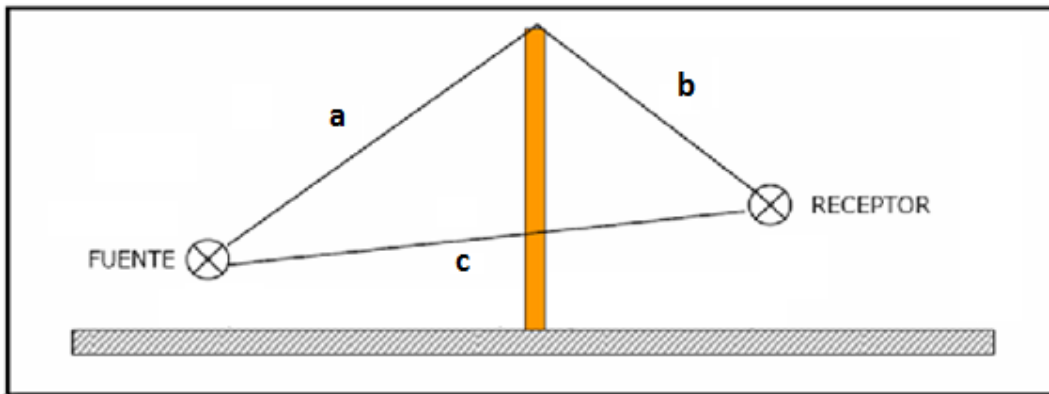


Fig. 33.- Distancias para el cálculo del índice de pérdidas por inserción

En este estudio las pérdidas por inserción se han calculado mediante la siguiente fórmula:

$$IL (dB) = 20 \cdot \log_{10} \frac{P_i}{P_d} \quad (21)$$

donde P_i es el valor de la presión eficaz medida cuando la barrera está presente entre la fuente y el receptor, y P_d el valor de la presión eficaz cuando este elemento no está presente.

II.6.-Método de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD)

II.6.1.-Introducción al Método

El método de diferencias finitas ^[28] es un método numérico que se utiliza para resolver ecuaciones diferenciales parciales en su forma discreta. Esta técnica consiste en reemplazar las derivadas parciales por una ecuación definida como “diferencias finitas” aproximada.

Las fórmulas de diferencias finitas son obtenidas por medio de la expansión de las series de Taylor. Considerando la derivada parcial $\frac{\partial F(x,t)}{\partial t}$, fijando el valor de x y realizando la aproximación en dos puntos $t + \frac{1}{2}\Delta t$ y $t - \frac{1}{2}\Delta t$ se tiene:

$$F\left(x, t + \frac{1}{2}\Delta t\right) = F(x, t) + F'(x, t)\frac{\Delta t}{2} + F''(x, t)\frac{\Delta t^2}{4} \frac{1}{2!} + F'''(x, t)\frac{\Delta t^3}{8} \frac{1}{3!} + \dots \quad (22)$$

$$F\left(x, t - \frac{1}{2}\Delta t\right) = F(x, t) - F'(x, t)\frac{\Delta t}{2} - F''(x, t)\frac{\Delta t^2}{4} \frac{1}{2!} - F'''(x, t)\frac{\Delta t^3}{8} \frac{1}{3!} - \dots \quad (23)$$

Considerando que la elección de Δt (*incremento de tiempo*) es una cantidad muy pequeña, se consideran despreciables los términos a partir de las derivadas de segundo orden de las ecuaciones anteriores. Considerando esta aproximación se tiene:

$$F\left(x, t + \frac{1}{2}\Delta t\right) - F\left(x, t - \frac{1}{2}\Delta t\right) = F(x, t)\Delta t \quad (24)$$

despejando $F(x, t)$;

$$F(x, t) = \frac{F(x, t + \frac{1}{2}\Delta t) - F(x, t - \frac{1}{2}\Delta t)}{\Delta t} \quad (25)$$

Esta ecuación está definida como diferencia finita de segundo orden centrada en el tiempo para la función $F(x, t)$. Pudiéndose expresar como:

$$\left.\frac{\partial F}{\partial t}\right|_i^n = \frac{F|_i^{n+1} - F|_i^{n-1}}{\Delta t} \quad (26)$$

donde n e i son números enteros que representan un punto discreto en el tiempo n y espacio i y $n + \frac{1}{2} = t + \frac{1}{2}\Delta t$, así como $n - \frac{1}{2} = t - \frac{1}{2}\Delta t$.

De la misma forma, es posible obtener $\frac{\partial G(x,t)}{\partial x}$ fijando un tiempo n y variando el espacio x :

$$\left.\frac{\partial G}{\partial x}\right|_i^n = \frac{G|_{i+1/2}^n - G|_{i-1/2}^n}{\Delta x} \quad (27)$$

Esta ecuación se define como diferencia finita de segundo orden centrada en el espacio para la función $G(x, t)$.

Este método numérico marca la posibilidad de solucionar las ecuaciones diferenciales de conservación del momento y conservación de masa (ecuación de continuidad).

$$\nabla p + \rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = 0 \quad (28)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \rho c^2 (\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) = 0 \quad (29)$$

II.6.2.-Aplicación del método FDTD al modelo de acústica de fluidos

A continuación se describe la implementación del método FDTD para el modelo de acústica de fluidos en sistema de coordenadas cartesiano en 2D ^[29].

Considerando un fluido homogéneo de densidad ρ y módulo de compresibilidad k , a partir de las ecuaciones de conservación del momento y de conservación de la masa, podemos obtener las expresiones que rigen la dinámica de dicho fluido:

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = \nabla P \quad (30)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -k \nabla \cdot v \quad (31)$$

Siendo P la magnitud escalar presión acústica y v la magnitud vectorial velocidad. La onda acústica descrita por este modelo es de naturaleza longitudinal y posee una velocidad de propagación c_p que depende de las propiedades del medio, de manera que:

$$c_p = \sqrt{\frac{k}{\rho}} \quad (32)$$

Mediante el empleo del gradiente y la divergencia en dos dimensiones (x, y) definidos como:

$$\nabla = \hat{x} \frac{\partial}{\partial x} + \hat{y} \frac{\partial}{\partial y} \quad (33)$$

$$\text{div } v = \nabla v = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \quad (34)$$

Podemos reescribir en coordenadas cartesianas 2D las ecuaciones constitutivas (30) y (31) como:

$$\rho \frac{\partial v_x}{\partial t} = -\frac{\partial P}{\partial x} \quad (35)$$

$$\rho \frac{\partial v_y}{\partial t} = -\frac{\partial P}{\partial y} \quad (36)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -k \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) \quad (37)$$

Siguiendo el flujo de trabajo descrito, se discretizan los campos de presión y velocidad en intervalos temporales de Δt y espaciales de Δx , y Δy . Así, se sustituyen los términos diferenciales de las expresiones (35-37) por sus aproximaciones en diferencias finitas descritas.

Es necesario remarcar como los elementos de velocidad v_x , v_y , han de estar al tresbolillo con respecto de los elementos discretos de presión P , tanto en espacio como en tiempo, por lo que espacialmente se distribuirán como:

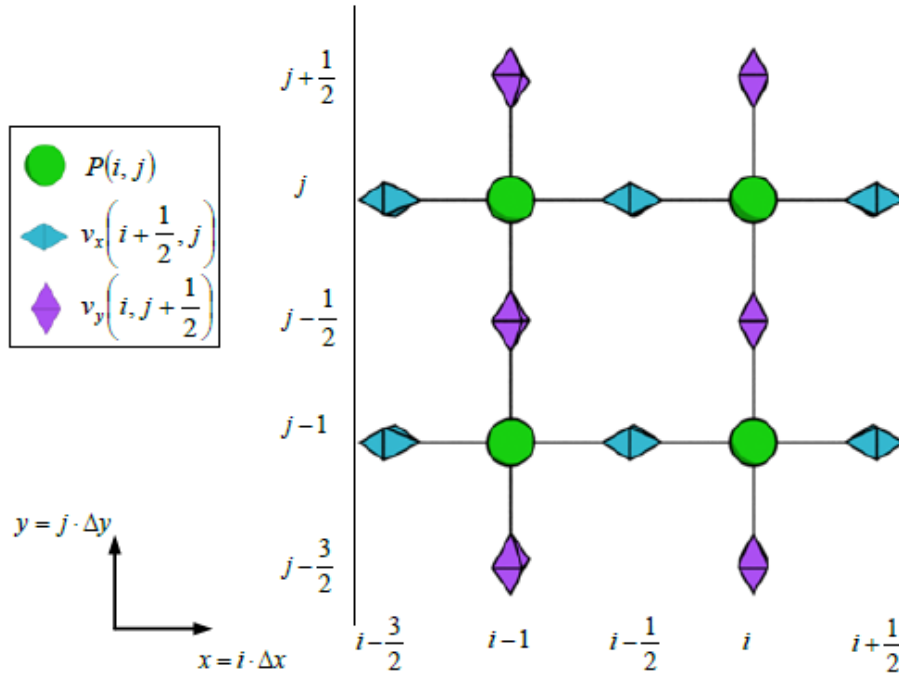


Fig. 34.- Mallado del espacio 2D del modelo de fluidos; sistema de coordenadas cartesiano

(Fuente: Noe Jimenez 2009 ^[29])

Así, las ecuaciones (35-37) quedan como:

$$\rho \frac{v_x^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2},j) - v_x^{n-\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2},j)}{\Delta t} = - \frac{P^n(i+1,j) - P^n(i,j)}{\Delta x} \quad (38)$$

$$\rho \frac{v_y^{n+\frac{1}{2}}(i,j+\frac{1}{2}) - v_y^{n-\frac{1}{2}}(i,j+\frac{1}{2})}{\Delta t} = - \frac{P^n(i,j+1) - P^n(i,j)}{\Delta y} \quad (39)$$

$$\frac{P^{n+1}(i,j) - P^n(i,j)}{\Delta t} = -k \left[\frac{v_x^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2},j) - v_x^{n-\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2},j)}{\Delta x} + \frac{v_y^{n+\frac{1}{2}}(i,j+\frac{1}{2}) - v_y^{n-\frac{1}{2}}(i,j+\frac{1}{2})}{\Delta y} \right] \quad (40)$$

Reescribiendo las expresiones anteriores despejando la variable desconocida $P^{n+1}(i,j)$ en función de las magnitudes conocidas podemos escribir las ecuaciones de actualización como:

$$v_x^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2},j) = v_x^{n-\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2},j) - \frac{\Delta t}{\rho \Delta x} (P^n(i+1,j) - P^n(i,j)) \quad (41)$$

$$v_y^{n+\frac{1}{2}}(i,j+\frac{1}{2}) = v_y^{n-\frac{1}{2}}(i,j+\frac{1}{2}) - \frac{\Delta t}{\rho \Delta y} (P^n(i,j+1) - P^n(i,j)) \quad (42)$$

$$P^{n+1}(i, j) = P^n(i, j) - k \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[v_x^{n+\frac{1}{2}} \left(i + \frac{1}{2}, j \right) - v_x^{n+\frac{1}{2}} \left(i - \frac{1}{2}, j \right) \right] - k \frac{\Delta t}{\Delta y} \left[v_y^{n+\frac{1}{2}} \left(i, j + \frac{1}{2} \right) - v_y^{n+\frac{1}{2}} \left(i, j - \frac{1}{2} \right) \right] \quad (43)$$

II.6.3.-Estabilidad y dispersión

El modelo propuesto es condicionalmente estable, por lo que se debe cumplir en todo el dominio la condición de estabilidad siguiente, denominada *condición de Courant-Friedrichs-Lewy* o *CFL*:

$$S \equiv \frac{c_{max} \Delta t}{\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}} \leq 1 \quad (44)$$

donde:

c_{max} es la velocidad de propagación máxima en cualquier punto del dominio

Δt es el equiespaciado temporal

Δx y Δy son los equiespaciados espaciales

S es el número de Courant

Por otro lado, la dispersión numérica es intrínseca del método e independiente del modelo de ecuaciones físicas escogidas. Ello se debe a que la onda se propaga a diferentes velocidades en función de la dirección: lo hace más rápido en la dirección de la diagonal de la malla que en la dirección ortogonal a esta. Este error implica un error de fase acumulativo a lo largo de la propagación de la onda que se ha de tratar de minimizar lo máximo posible. Un buen indicador de la dispersión es el número de celdas por longitud de onda, o muestreo espacial N_λ :

$$N_\lambda = \frac{\lambda_{min}}{\Delta_{max}} \quad (45)$$

Así, la longitud de onda mínima vendrá determinada por la frecuencia máxima de la onda, así como las zonas del dominio con velocidad de propagación menor:

$$\lambda_{min} = \frac{c_{min}}{f_{max}} \quad (46)$$

El incremento espacial Δ_{max} se corresponde con la mayor distancia espacial existente en el dominio, que en sistema cartesiano 2D se corresponde con la diagonal mayor en todo el dominio. El valor del muestreo temporal ha de ser alto para que la velocidad de propagación numérica sea lo más parecida posible en las direcciones, Un valor mínimo para el muestreo espacial, que implica mallas computacionalmente aceptables es un valor de 10 muestras por longitud de onda. Así, podemos sintetizar la condición de dispersión para el mallado como:

$$N_\lambda = \frac{c_{min}}{f_{max} \cdot \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}} \geq 10 \quad (47)$$

III.- Descripción de los estudios realizados

III.1.-Introducción

El presente trabajo tiene dos estudios claramente diferenciados, por un lado la evaluación de la difusión en el interior de un recinto tras introducir en el mismo un difusor de estructura cristalina, y por otro lado la evaluación de la respuesta que tiene este mismo difusor al integrarlo en una pantalla acústica, con el objeto de reducir el “efecto tambor” que se produce entre un vehículo de grandes dimensiones y dicha pantalla.

En ambos experimentos se ha planteado un modelo en 2D y se ha realizado una simulación en el software de cálculo matemático MATLAB, aplicando el método de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD) al modelo de acústica de fluidos en 2D.

III. 2.-Diseño estudio nº1: difusor basado en cristales de sonido.

III.2.1.-Introducción

En la primera parte de este trabajo se evalúa la contribución de un difusor bidimensional, basado en cristales de sonido, a aumentar la difusión del campo acústico de un recinto.

Se ha planteado un modelo en 2D de un recinto acústico rectangular y se han realizado dos simulaciones en MATLAB, aplicando el método FDTD al modelo de acústica de fluidos en 2D, una primera con el recinto vacío, a la que llamaremos estado inicial o referencia, y una segunda con el difusor en el interior del recinto. En ambas simulaciones se capta la magnitud escalar de la presión acústica y la magnitud vectorial de la velocidad del campo de presiones y velocidades del recinto bajo estudio, en 24 posiciones diferentes del mismo.

Los datos obtenidos en las simulaciones se procesan posteriormente siguiendo la metodología expuesta en el apartado II.4 *Medida del grado de difusión*, para evaluar la difusión provocada por el difusor en el campo acústico en el recinto.

El estudio realiza para la banda de frecuencias comprendida entre 100 y 5000 Hz, en las siguientes bandas de tercios de octava: [100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150, 4000, 5000]

III.2.2.-Estructura del difusor

El difusor está formado por 180 cilindros con un diámetro de 0,07 metros. La distancia es variable entre ellos. En profundidad, hay una diferencia de 0,08 metros entre los centros de los cilindros y 0,04 metros del último cilindro a la pared del recinto, que hará la función del panel plano trasero que normalmente encontramos en un difusor (Fig. 35). A lo largo nos encontramos con cuatro partes alternadas de dos en dos en el difusor (*difusor bizona*). En una de ellas, la distancia entre centros es de 0,088 metros, y en la otra, la distancia entre centros es de 0,072 metros (Fig. 35).

Este dispositivo tiene pues una anchura total de alrededor de 3,64 metros de longitud y una profundidad de 0,315 metros. La altura es indiferente, ya que nuestra simulación se va a realizar en un plano en 2D perpendicular al prototipo (plano xy).

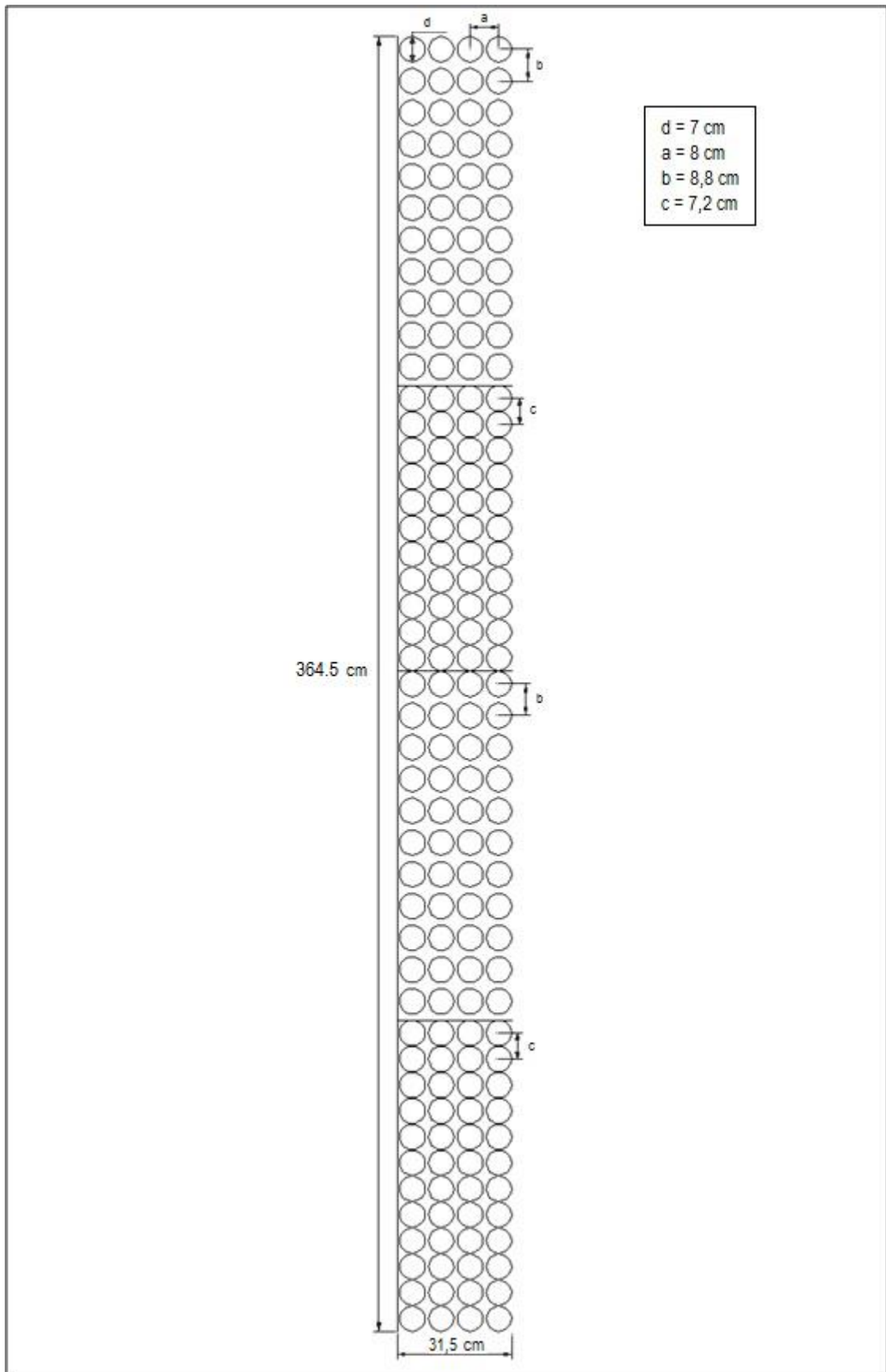


Fig. 35.- Estructura del difusor

Los factores de llenado de las celdas unidad, representado en la figura 36, son los siguientes:

-Para la zona donde los elementos están más separados lateralmente:

$$f = \frac{\pi \cdot r^2}{b \cdot a} = \frac{\pi \cdot 0,035^2}{0,088 \cdot 0,08} = 0,55$$

-Para la zona donde los elementos están más próximos lateralmente:

$$f = \frac{\pi \cdot r^2}{c \cdot a} = \frac{\pi \cdot 0,035^2}{0,072 \cdot 0,08} = 0,67$$

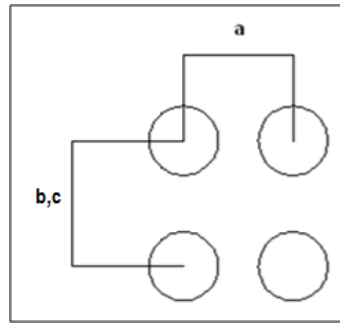


Fig. 36.- Celda unidad del cristal de sonido diseñado. La distancia horizontal entre centros de cilindros permanece constante en todo el cristal (a), mientras que verticalmente toma dos valores (b, c)

III.2.3.-Modelo de simulación en 2D para el estudio nº1

Para la simulación se ha recreado una habitación de 3,7 metros de ancho (eje y) y 4 metros de profundidad (eje x). Las paredes son muy poco absorbentes presentando un coeficiente de absorción $\alpha = 0,1$. Para llegar a ese valor de absorción se ha fijado un tiempo de reverberación estimado de 1,2 segundos, considerando que es un valor probable para las dimensiones que tiene el recinto. A partir de la fórmula para el cálculo del tiempo de reverberación en 2D, se ha obtenido el valor del coeficiente de absorción.

$$TR = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{0,162 \cdot S}{P \cdot \alpha} \quad (48)$$

Donde :

S = superficie del recinto en m^2

P = perímetro del recinto en m

Despejando el coeficiente α en la expresión (48) :

$$\alpha = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{0,162 \cdot S}{P \cdot TR} \quad (49)$$

Una vez obtenido el coeficiente de absorción podemos calcular la impedancia de las paredes del recinto a partir de la siguiente expresión, derivada de la fórmula para el cálculo de la impedancia del muro:

$$\alpha = 1 - \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 \quad (50)$$

Donde:

Z_1 = Impedancia del medio de propagación, en nuestro caso es el aire (413 rayls.)

Z_2 = Impedancia del muro, en nuestro caso las paredes del recinto.

Una vez despejada Z_2 , tras el cálculo se ha obtenido un valor de impedancia para las paredes de 15281 rayls, valor 37 veces superior a la impedancia del aire.

La impedancia del difusor será la misma que la de las paredes del recinto, ya que lo que interesa es evaluar el comportamiento de la estructura cristalina y no el material del que está hecho.

Por otro lado se ha establecido una separación $\Delta h = 1$ cm entre los elementos de la malla de presiones y velocidades lo que nos da un total de 400 elementos en la dirección del eje x (profundidad de la habitación) y 370 elementos en la dirección del eje y (anchura de la habitación). Con esta separación se obtiene el paso temporal entre elementos para la simulación mediante la siguiente expresión, donde c es la velocidad de propagación del sonido y tiene un valor de $341 \frac{m}{s}$:

$$\Delta t = \frac{\Delta h}{c \cdot 2} \quad (51)$$

Tras el cálculo se obtiene un valor de $\Delta t = 1,47 \cdot 10^{-5}$ segundos.

Con estos equiespaciados temporal y espacial, mediante la expresión (44) del apartado III.2.3.-*Estabilidad y dispersión*, obtenemos un valor para el número de courant $S = 0,50$, por tanto al cumplirse la condición $S \leq 1$, se cumple en todo el dominio de la simulación la condición de estabilidad.

Por otro lado aplicando la expresión (45) del mismo apartado obtenemos un $N_\lambda \cong 7$ para $\lambda_{min} = 0,0682$ m que corresponde a la frecuencia de 5000 Hz, que es la frecuencia más alta estudiada. Para cumplir la condición $N_\lambda \geq 10$ habría que duplicar el número de elementos de la malla, lo que supone duplicar también el coste computacional de la simulación, considerándose esto innecesario, ya que el interés principal del estudio se centra fundamentalmente en las medias-bajas frecuencias, y para la frecuencia de 3150 Hz se cumple la condición, siendo $N_\lambda = 10,8$. Por todo lo expuesto se asume el error mínimo de dispersión que se produce en la simulación a partir de los 3150 Hz, por considerarlo poco representativo para los intereses del estudio.

El tiempo de duración de la simulación es de 1,4 segundos, ligeramente superior respecto al TR de 1,2 segundos estimado teóricamente, para así obtener una respuesta al impulso correcta de la sala.

Como señal test se ha empleado una señal impulsiva de banda ancha de tipo Ricker ^[30], con un espectro frecuencial prácticamente plano desde los 100 hasta los 3000 Hz, que es la banda frecuencial de interés para el estudio como se ha comentado anteriormente, ya que este difusor tiene su rango de aplicación en las medias-bajas frecuencias. En la figura 37 se puede ver una representación del espectro frecuencial de la misma.

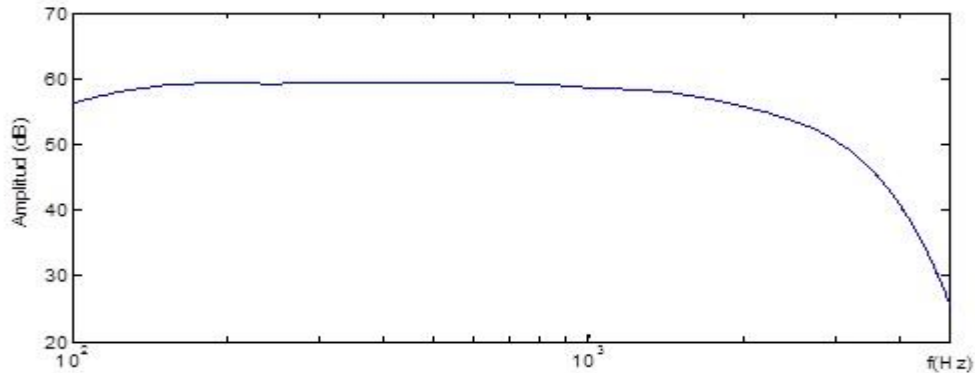


Fig. 37.- Espectro en frecuencia de la señal Test

La fuente omnidireccional con la que emitimos la señal test está situada en una de las esquinas opuestas a la pared donde se ha situado el difusor, a 25 centímetros de separación de las paredes.

Los 24 receptores con los que se recogerán los valores de presión y velocidad están repartidos por el recinto, situados formando una matriz de 4 x 6 elementos con una equidistancia entre ellos de 50 centímetros. En la figura 38 se puede ver la disposición de todos los elementos descritos hasta ahora en una vista en planta de la sala.

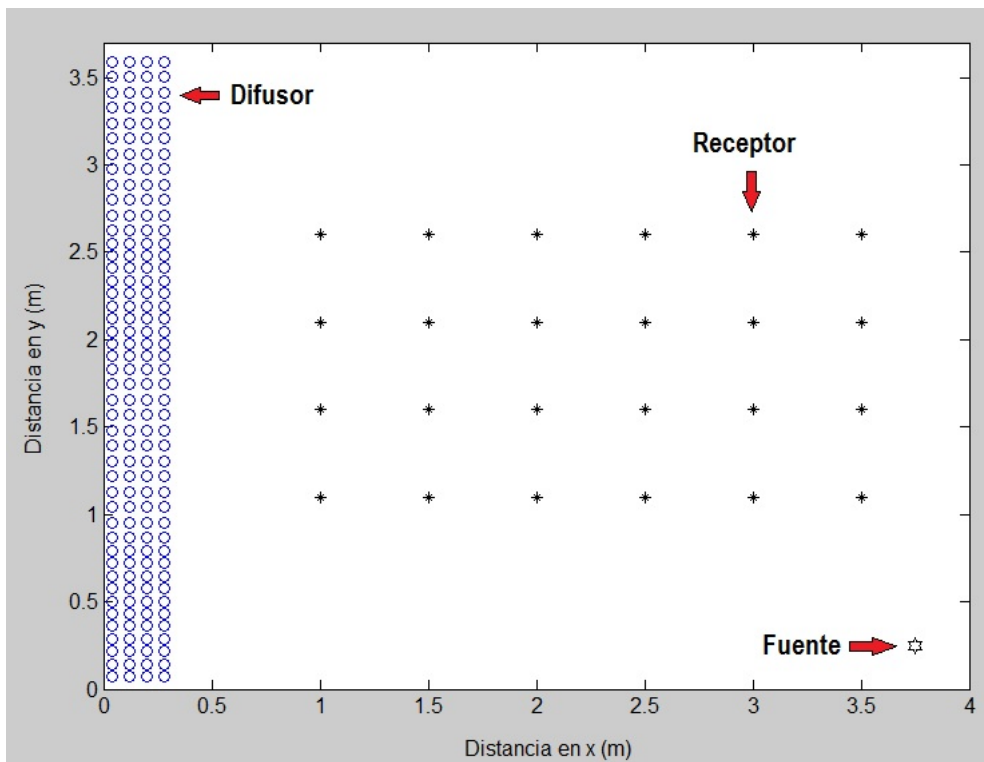


Fig. 38.- Modelo en 2D de la simulación para el difusor

III. 3.-Diseño estudio n°2: pantalla acústica basada en cristales de sonido.

III.3.1.-Introducción

En la segunda parte de este trabajo se evalúa la contribución de una pantalla acústica bidimensional, basada en cristales de sonido, a la reducción las resonancias que se producen entre estos dispositivos y los vehículos que circulan por las vías donde están instalados. Este fenómeno acústico es comúnmente denominado como “efecto tambor”.

Se ha planteado un modelo en 2D del perfil de un espacio abierto, que representa el linde de una carretera, en el que se ha instalado una pantalla acústica. Se han estudiado 4 situaciones diferentes, realizando 4 simulaciones en MATLAB, aplicando el método FDTD al modelo de acústica de fluidos en 2D. El siguiente cuadro representa la casuística del experimento:

Nº Simulación	Pantalla con cristal	Pantalla simple	Camión
Caso 1 (referencia)	-	-	-
Caso 2	-	X	-
Caso 3	-	X	X
Caso 4	X	X	X

*La **X** corresponde a la presencia en la simulación del elemento referenciado en la tabla.

Tabla 1.- Casuística del experimento.

El caso 1 representa la referencia sin ningún elemento en la simulación salvo la fuente acústica y los receptores, que nos servirá para el cálculo de las pérdidas por inserción (IL) que producen cada uno de los dispositivos. Compararemos los casos 2 y 3 para evaluar la pérdida de efectividad de la pantalla acústica cuando se produce el efecto tambor. Por último compararemos los casos 3 y 4 con el fin de evaluar la reducción del efecto tambor que provoca la pantalla cuando integramos un cristal de sonido en la misma.

En las simulaciones se capta la presión acústica del campo de presiones y velocidades del recinto bajo estudio, en 6 posiciones diferentes tras la pantalla.

El estudio realiza para la banda de frecuencias comprendida entre 100 y 5000 Hz, en las siguientes bandas de tercios de octava: [100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150, 4000, 5000]

III.3.2.-Estructura de la pantalla acústica

La pantalla acústica simple tiene forma rectangular con una altura de 3 metros y una profundidad de 15 centímetros. La pantalla con cristal incorporado, está compuesta por la pantalla simple anterior más un cristal de sonido bizona, de estructura similar al empleado en el estudio anterior. Las dimensiones del cristal son diferentes, ya que se ha adaptado a la altura de la pantalla y en este caso está formado por 148 cilindros. Las distancias entre elementos sigue siendo la misma que en el otro caso y la distancia del último cilindro a la pared de la pantalla sigue siendo de 0,04 metros. En la figura 39 se muestra la estructura y las dimensiones de ambas pantallas acústicas:

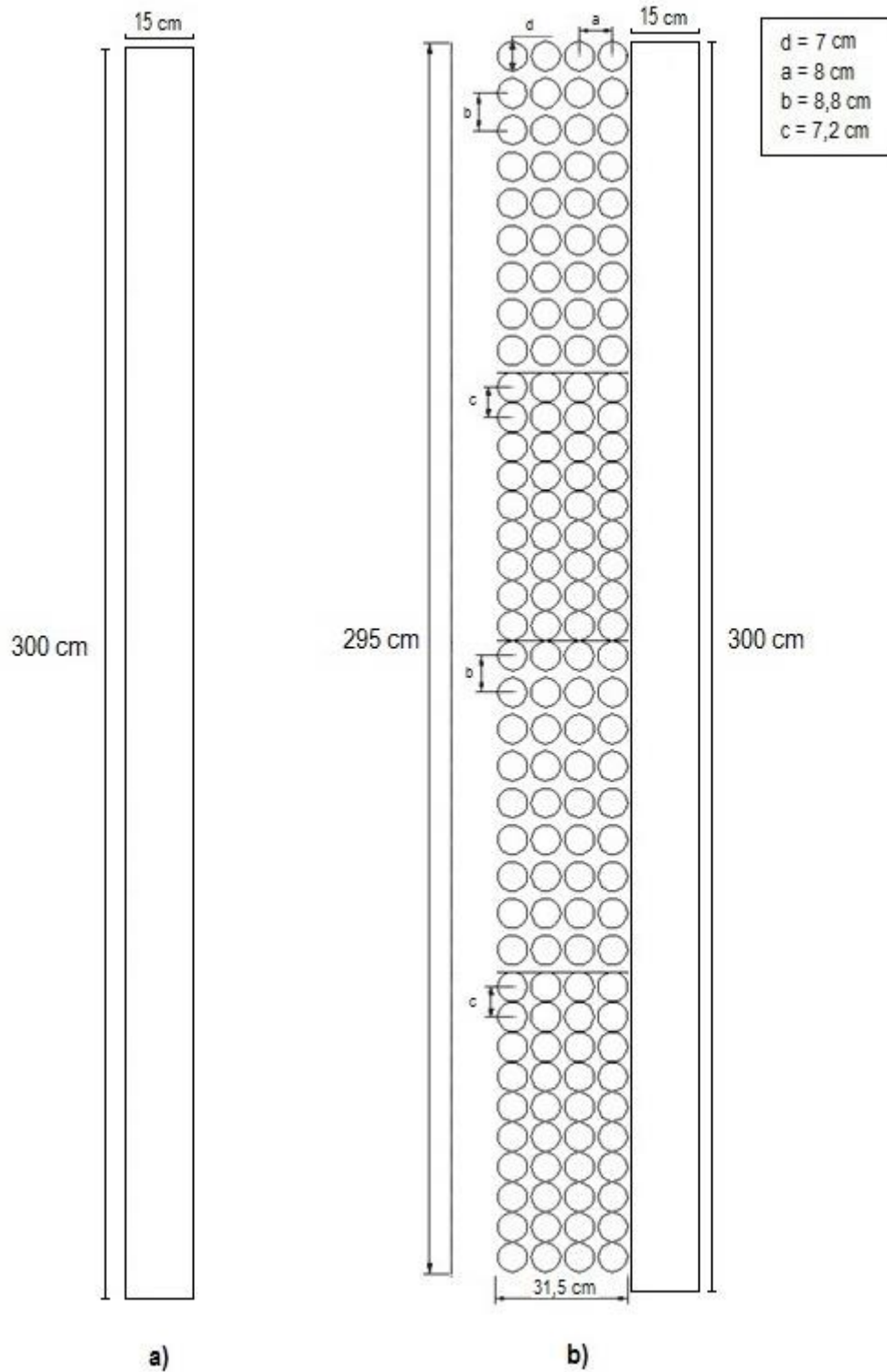


Fig. 39.- Estructura de las pantallas acústicas; a) Pantalla simple; b) Pantalla con cristal

Los factores de llenado de las celdas unidad de cada zona del cristal siguen siendo los mismos que en el caso del difusor del estudio n°1.

III.3.3.-Modelo de simulación en 2D para el estudio n°2

Para la simulación se ha recreado la vista en perfil de un espacio abierto en 2D, altura y longitud, que representa la linde de una carretera, en la que se ha instalado una pantalla acústica. Las dimensiones de este entorno son 6 metros de altura y 12 metros de longitud. La pantalla está situada a 2,5 metros del origen de coordenadas.

En cuanto a las condiciones de contorno, el suelo y la pantalla (cristal incluido) son totalmente reflectantes, mientras que el resto del entorno presenta una frontera PML totalmente absorbente, con el fin de simular un espacio abierto. En algunos de los casos se incluirá en la simulación un rectángulo de 4,1 metros de altura y 50 cm de profundidad, situado en el origen de coordenadas, que simula la parte lateral derecha de un camión y que será reflectante también.

La fuente de ruido será omnidireccional y estará situada en el suelo a 50 centímetros del origen, simulando ser el ruido de rodadura emitido por los neumáticos. La señal de test emitida será la misma señal impulsiva de del estudio n°1 (ver apartado III.2.3.-Modelo de simulación en 2D para el estudio n°1).

Se colocarán un total de 6 receptores, a una altura de 1,5 metros y a una distancia de 1,5 a 6,5 metros más allá de la pantalla, equiespaciados 1 metro de distancia entre sí.

La separación entre los elementos de la malla de presiones y velocidades seguirá siendo $\Delta h = 1$ cm, al igual que en el estudio n°1, lo que nos da esta vez un total de 1200 elementos en la dirección del eje x (longitud) y 600 elementos en la dirección del eje y (altura). Con esta separación el paso temporal sigue siendo $\Delta t = 1,47 \cdot 10^{-5}$ segundos. El tiempo de duración de cada simulación será de 880 milisegundos.

En la figura 40 se muestra el modelo de simulación del caso 4, ya que en el intervienen todos los elementos posibles:

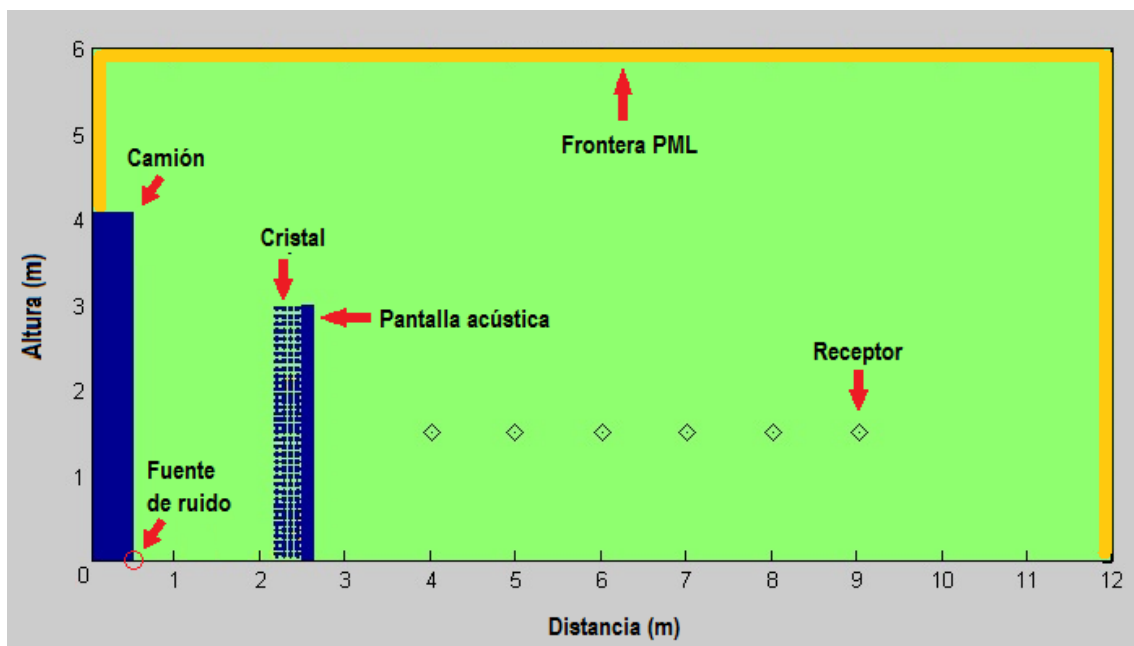


Fig. 40.- Modelo en 2D de la simulación para la pantalla acústica

IV.- Análisis de los resultados obtenidos

IV. 1.-Estudio n°1; Estudio de la difusión

I.- El primer paso del estudio es analizar el tiempo de reverberación (TR) en el recinto en 24 posiciones de captación de la sala diferentes, para evaluar de forma cualitativa si el difusor contribuye a homogeneizar dicho TR con la posición y por tanto aumentar la homogeneidad del campo acústico.

La siguiente gráfica (figura 41,) compara el TR medio en bandas de tercios de octava obtenido tras la simulación, para la sala sin difusor y con difusor:

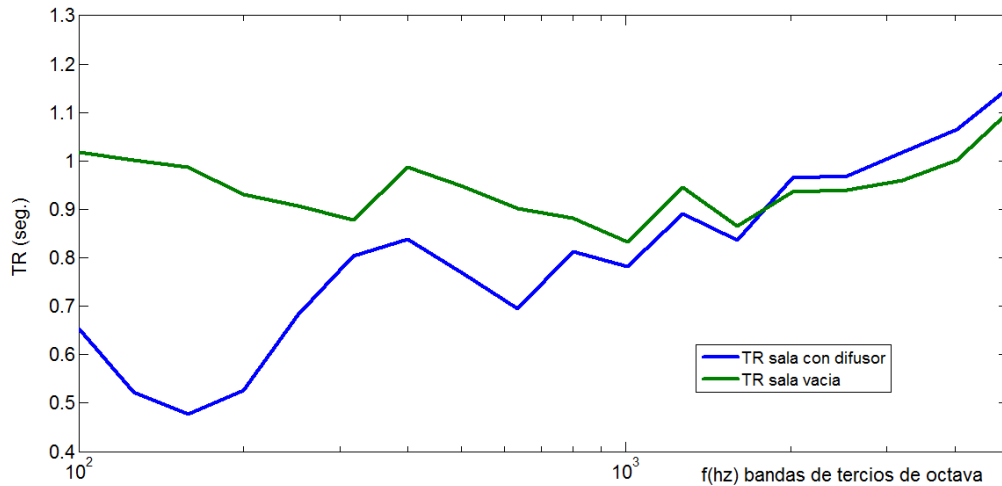


Fig. 41.- Tiempo de reverberación medio

Se puede observar que el TR es menor en la sala con cristal, ya que el difusor presenta el mismo coeficiente de absorción que las paredes del recinto y por tanto al introducirlo en la sala hemos aumentado el área de absorción de la misma.

Las siguientes gráficas (figuras 42a ; 42b) muestran el TR obtenido en bandas de tercios de octava para las 24 posiciones de captación diferentes, en la sala sin difusor y con difusor respectivamente:

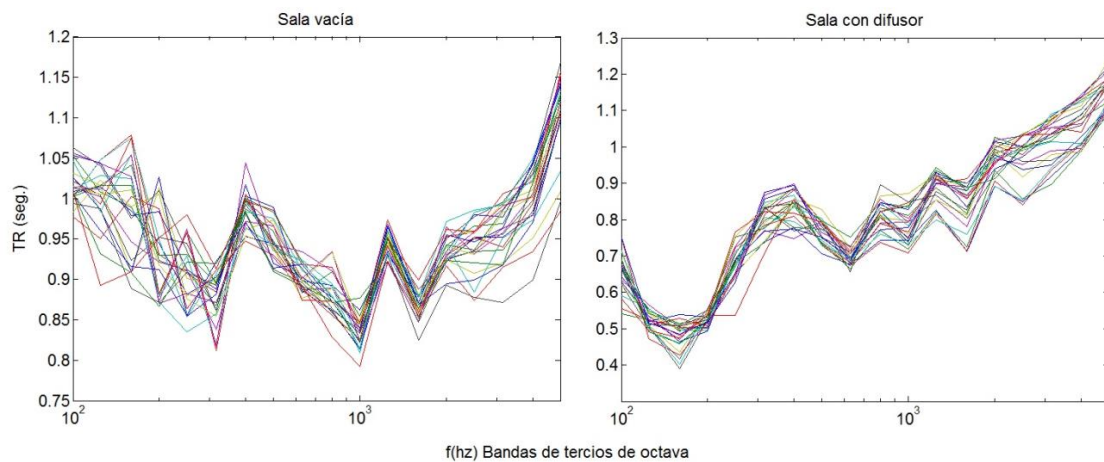


Fig. 42.- a) TR en cada receptor, sala vacía; b) TR en cada receptor, sala con difusor

Comparando ambas figuras, se intuye que existe una mayor variación en el TR entre posiciones de captación en la sala vacía a bajas frecuencias. Para corroborar esto se ha comparado la desviación estándar del TR con la posición, entre las 24 posiciones de captación, para la sala sin difusor y con difusor, obteniéndose los siguientes resultados:

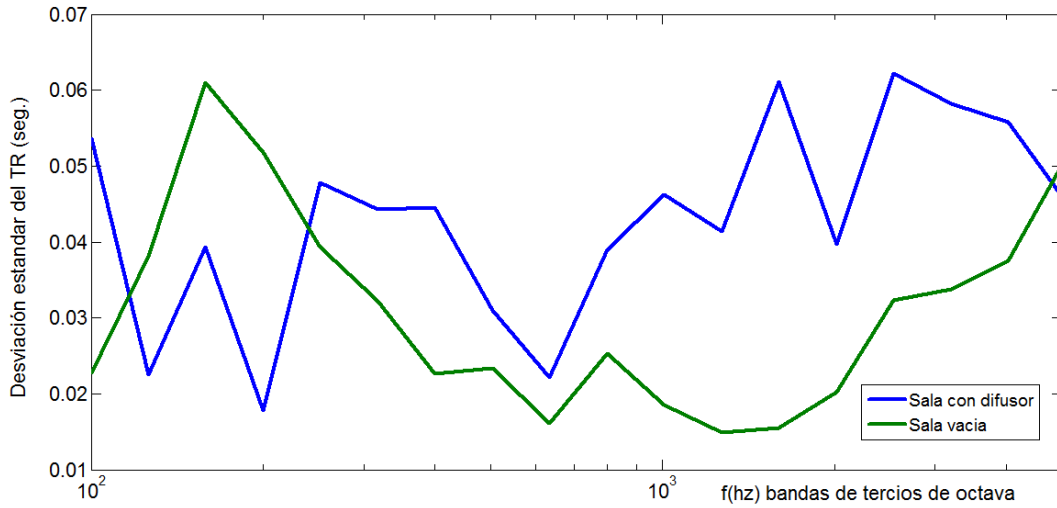


Fig. 43.- Desviación estándar del TR con y sin difusor

En la gráfica anterior se puede apreciar que el difusor contribuye a homogeneizar el TR a bajas frecuencias, y produce el efecto contrario en las medias-altas.

2.- Uno de los indicadores de homogeneidad en un campo acústico difuso es la curva de caída del TR en el mismo, ya que cuanto más uniforme y progresiva sea la caída de la intensidad acústica, más homogéneo será este. Cuando esta situación se da, el tiempo de caída de las primeras reflexiones (EDT o Early Decay Time) es muy similar al tiempo que tarda la intensidad acústica en caer 30 decibelios, conocido como T30. En este estudio se ha evaluado la diferencia en porcentaje entre el EDT y T30 medios, para la sala sin difusor y con difusor. A continuación se muestran los resultados obtenidos:

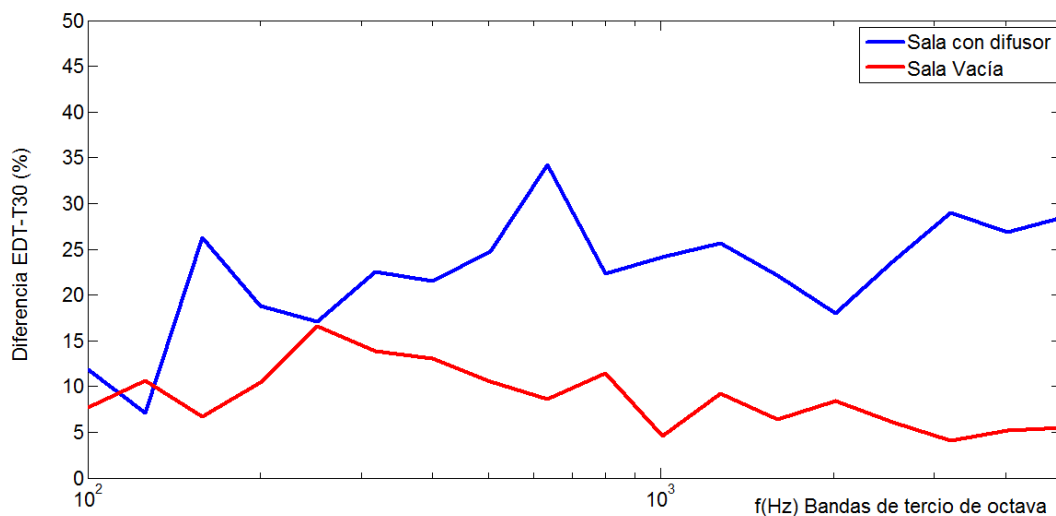


Fig. 44.- Diferencia en porcentaje entre los índices EDT y T30 medios, con y sin difusor

En la gráfica anterior se aprecia claramente que existe una mayor diferencia entre el EDT y el T30 cuando el difusor está presente, lo que indica en una primera aproximación que este dispositivo no contribuye a aumentar la difusión en el recinto.

3.- El siguiente paso es el estudio de la isotropía de la sala cuando introducimos el difusor. Para ello se ha analizado la diferencia en los niveles de presión sonora (SPL) entre las 24 posiciones de captación.

En la siguiente figura se muestra el SPL medio en decibelios, con captación omnidireccional, obtenido para la sala con y sin difusor:

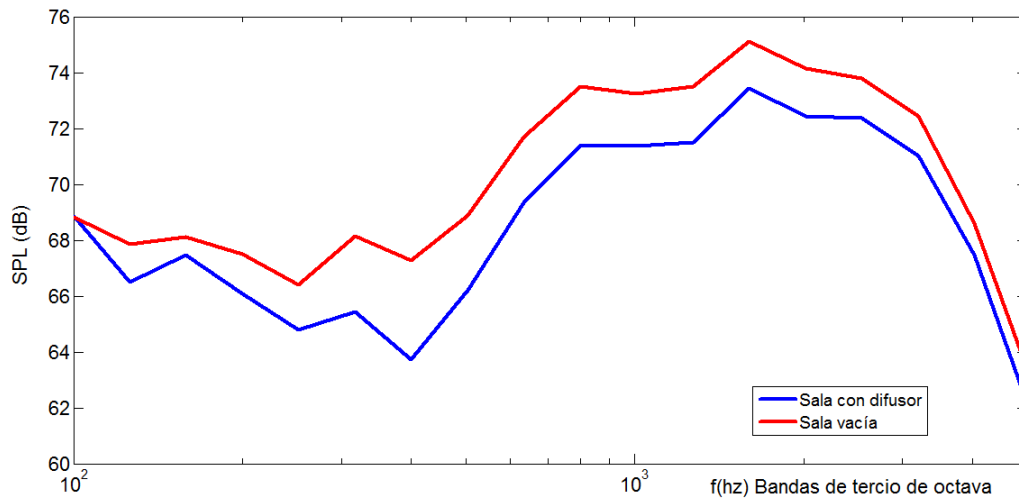


Fig. 45.- SPL medio, con y sin difusor

Se observa que el nivel SPL en la sala con difusor es ligeramente más bajo que en la sala vacía. Por otro lado se observa que la tendencia en frecuencia es muy similar en ambos casos, con ligeras variaciones a frecuencias medias-bajas.

La siguiente gráfica muestra la desviación estándar del SPL en dB con la posición, con captación omnidireccional, entre las 24 posiciones de captación de la presión diferentes:

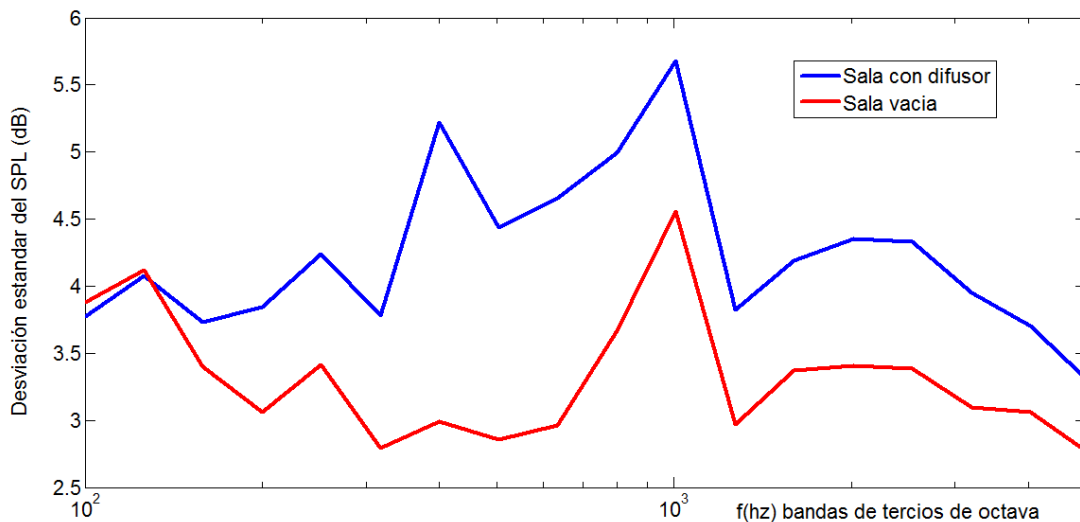


Fig. 46.- Desviación estándar del SPL con la posición, con y sin difusor

Los resultados obtenidos indican que el difusor produce mayores diferencias del SPL con la posición, disminuyendo por tanto la isotropía del campo acústico.

4.- Para realizar un análisis en profundidad del punto anterior, se ha estudiado la diferencia existente entre la captación del SPL en la dirección normal y la dirección paralela al difusor. Para obtener la presión con un patrón de captación bidireccional (en forma de 8), P_x y P_y , partimos de los datos recogidos en cada punto, de la velocidad de partícula en el eje x v_x y en el eje y v_y , y los multiplicamos por el valor de la impedancia del medio de propagación, en este caso el aire ($Z = 413 \text{ rayls}$).

$$P_x = v_x \cdot Z_{\text{aire}} \tag{52}$$

$$P_y = v_y \cdot Z_{\text{aire}} \tag{53}$$

En la figura 47 podemos ver el SPL medio obtenidos en la dirección normal y paralela respectivamente, para la sala con y sin difusor, referidos a los obtenidos con un patrón de captación omnidireccional:

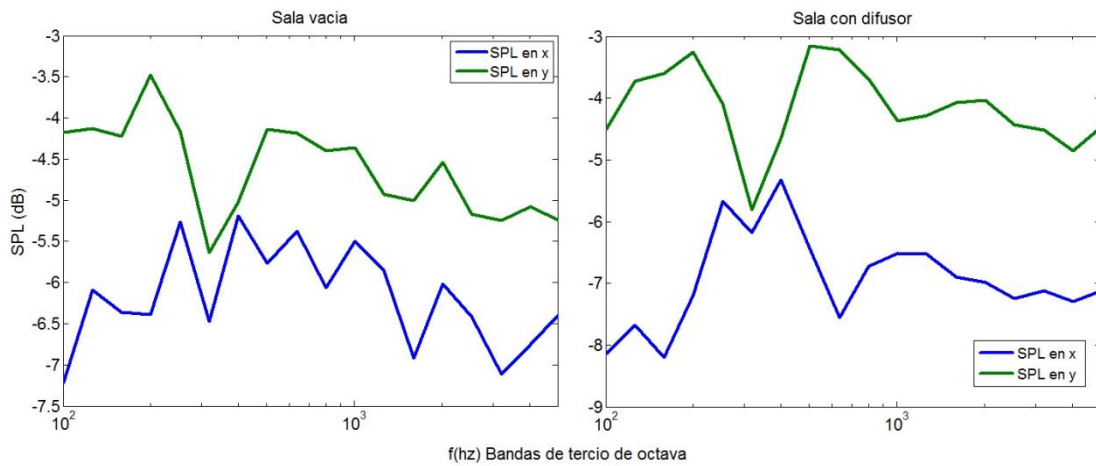


Fig. 47.- SPL en la dirección X e Y respecto al patrón omnidireccional, con y sin difusor

La siguiente gráfica muestra la diferencia del SPL medio entre el patrón de directividad normal y paralelo al difusor, para la sala con y sin difusor:

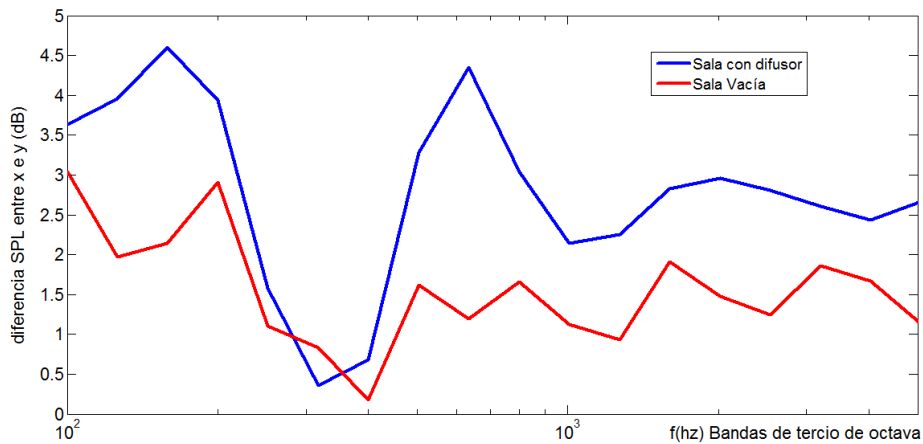


Fig. 48.- Diferencia de SPL entre la dirección normal y paralela, con y sin difusor

A continuación en la figura 49 se muestran los resultados obtenidos en el cálculo de la desviación estándar entre la captación del SPL en la dirección normal y la dirección paralela al difusor, entre las 24 posiciones de captación, para la sala con y sin difusor:

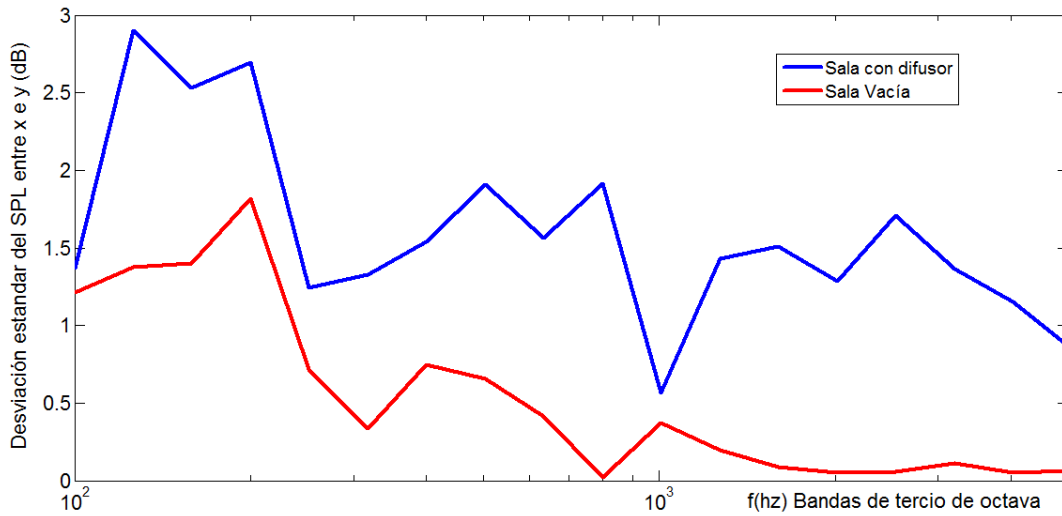


Fig. 49.- Desviación estándar del SPL con la posición, entre la dirección normal y paralela

A la vista de los resultados obtenidos en este apartado se puede afirmar que el SPL captado en la dirección paralela al difusor es mayor al captado en la dirección normal, tanto en la sala con difusor como en la sala vacía, aunque esta diferencia es mayor en el primer caso. Además existe una mayor variación de esta diferencia con la posición en la sala con difusor, por tanto se reafirma el hecho de que el difusor produce mayores diferencias del SPL con la posición, disminuyendo por tanto la isotropía del campo acústico.

5.- Por último se ha hecho un análisis cualitativo de la respuesta frecuencial de la sala a bajas frecuencias (100-315 Hz) con el difusor en su interior y vacía. La siguiente gráfica muestra la respuesta en frecuencia de la sala en los 2 casos. La amplitud se expresa en dB y está referida a la de la señal test, por lo que todos aquellos valores que superan los 0 dB en la gráfica, representan la contribución de la sala al nivel de presión por el efecto de las resonancias que se producen en la misma.

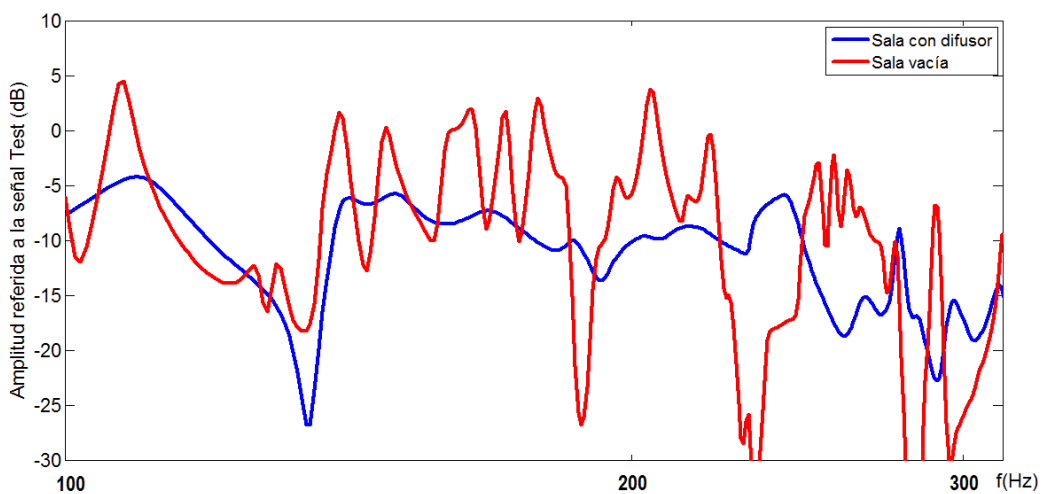


Fig. 50.- Respuesta en frecuencia de la sala con y sin difusor a bajas frecuencias

Como se puede observar el difusor hace que la respuesta en frecuencia de la sala sea más plana, y esto implica una menor “coloración” de los sonidos emitidos en la misma en este rango de frecuencias. En la siguiente gráfica se observa que a partir de los 400 Hz el efecto del difusor es mucho menos significativo por lo tanto, queda patente que su rango óptimo de trabajo son las bajas frecuencias.

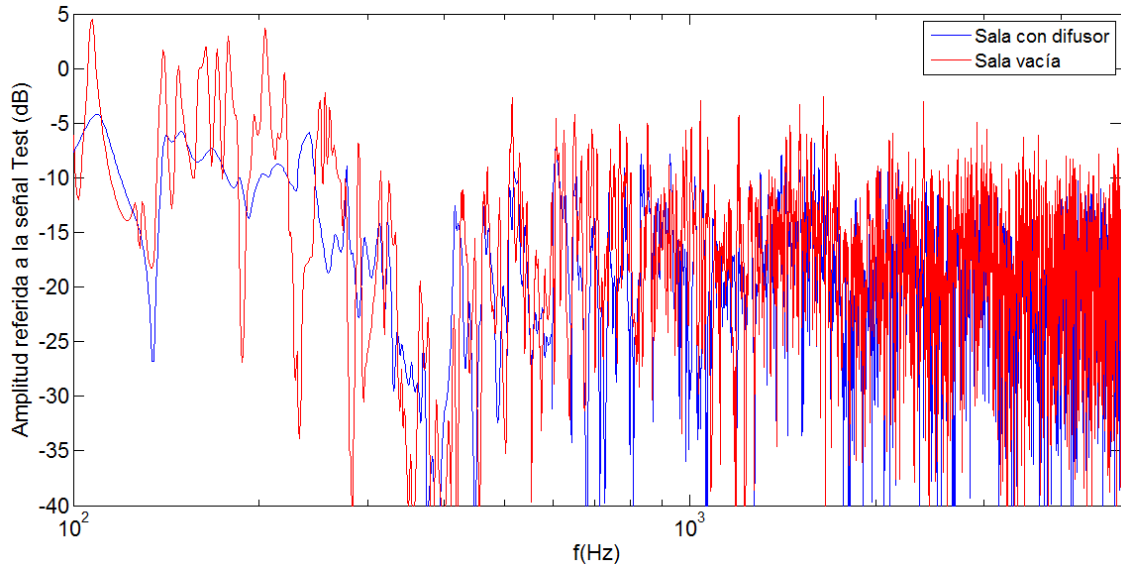


Fig. 51.- Respuesta en frecuencia de la sala con y sin difusor

IV. 2.-Estudio del efecto tambor en pantallas acústicas

El primer paso en este estudio ha sido el análisis del efecto tambor que se produce entre los vehículos de gran altura y las pantallas acústicas. Para ello se han comparado las pérdidas por inserción (IL) que produce la pantalla cuando hay un vehículo presente que supera la altura de la pantalla y cuando no hay vehículo, situando la fuente de ruido en el mismo punto en ambos casos. En la figura 52 se observan los resultados obtenidos:

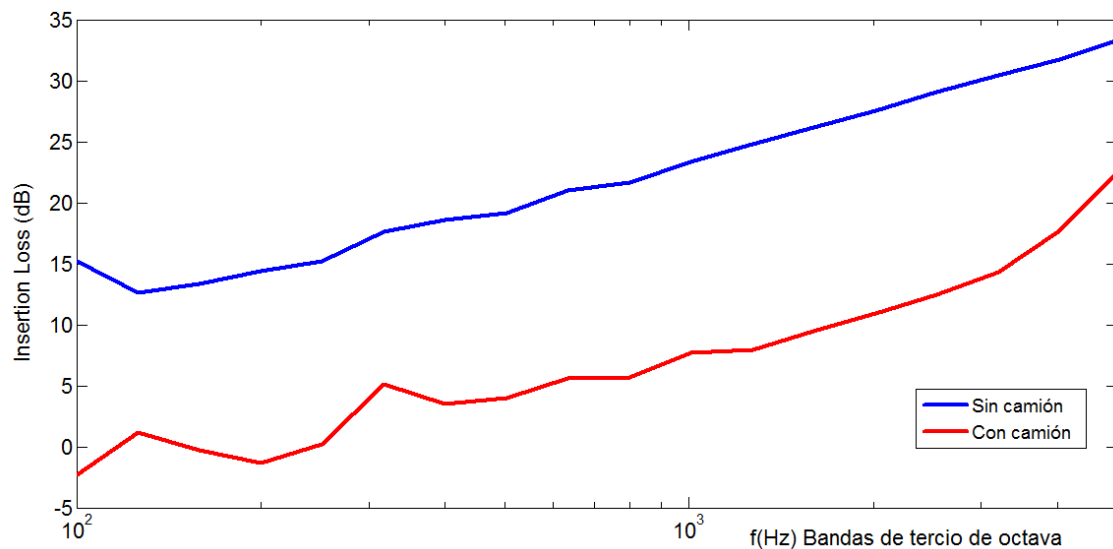


Fig. 52.- Inserción Loss (dB) de una pantalla acústica, con y sin camión presente

Como se puede observar la eficacia de la pantalla disminuye considerablemente en todo el rango de frecuencias analizado cuando se produce el efecto tambor entre la misma y un vehículo que la supera en altura.

A continuación se ha calculado el IL para una pantalla sencilla y una pantalla a la que se le ha añadido el cristal de sonido bajo estudio, estando presente en ambos casos el camión. La figura 53 muestra los resultados obtenidos:

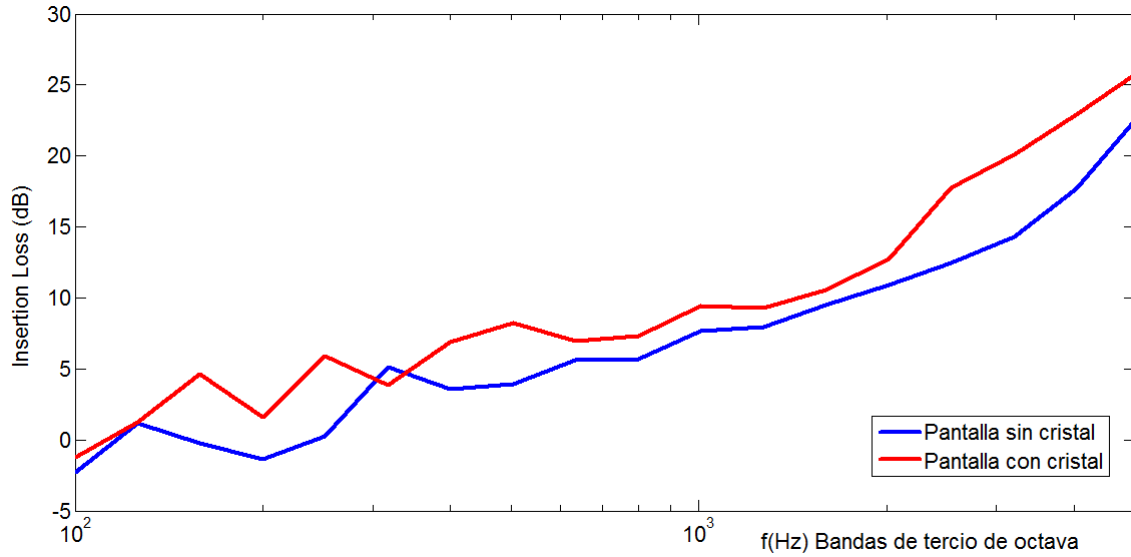


Fig. 53.- Inserción Loss (dB) de una pantalla acústica, con y sin cristal presente

A la vista de los resultados obtenidos se puede decir que el cristal es eficaz sobre todo a bajas frecuencias, llegando en algún caso a aumentar el IL en 5 dB.

La figura 54 muestra la diferencia en dB de las presiones captadas por los receptores en los 2 casos, pantalla sin cristal y con cristal. Las zonas por encima de 0 dB (de color amarillo a rojo) indican que la presión es mayor en esas zonas en el caso de la pantalla sin cristal.

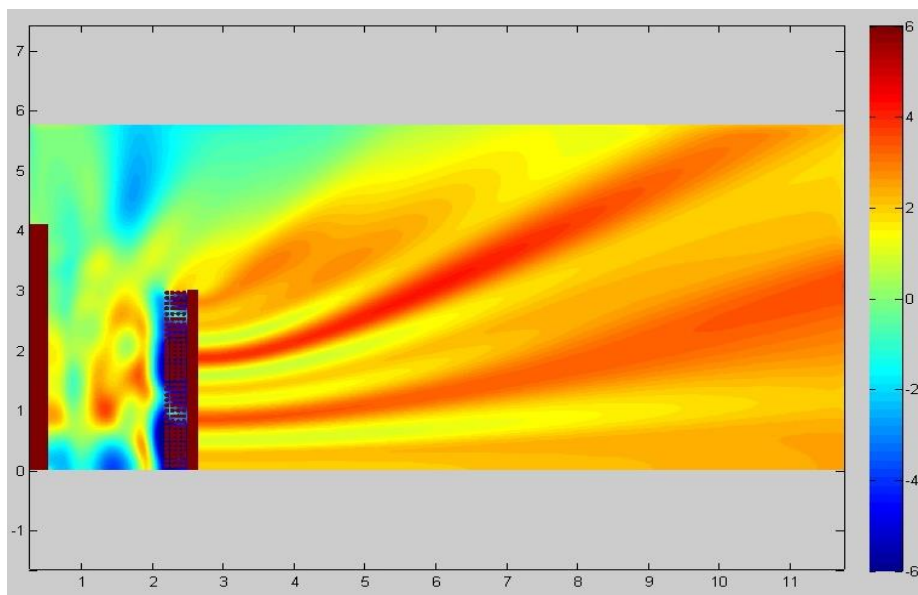


Fig. 54.- Diferencia del campo de presiones, con y sin cristal presente

V.- Conclusión y líneas futuras

Analizando los resultados del primer experimento del estudio nº1, se puede afirmar que el difusor basado en cristales de sonido contribuye ligeramente a la homogeneidad del TR en la sala a bajas frecuencias. Sin embargo teniendo en cuenta que la diferencia entre el EDT y el T30 es sustancial, no podemos aseverar que el difusor cree un campo acústico más homogéneo.

En cuanto al análisis del SPL, ninguno de los dos experimentos realizados conduce a pensar que el difusor tiende a igualar la presión acústica en la sala y por tanto no aumenta la isotropía del campo acústico difuso.

Por todo ello la conclusión final es que este dispositivo no aumenta de la forma esperada la difusión en el recinto. Como resultado positivo se extrae la capacidad que tiene de disminuir la coloración de la sala a bajas frecuencias, reduciendo considerablemente el factor de calidad de las resonancias que se producen en la misma. Esto plantea un beneficio importante, en salas para la música de pequeño-mediano tamaño, ya que los difusores de fase usados normalmente, tendrían que tener unas dimensiones mucho mayores que este dispositivo para conseguir el mismo efecto a bajas frecuencias.

Como posible línea futura se plantea la posibilidad de realizar este mismo estudio en 3D y posteriormente repetirlo con un prototipo del difusor y una sala a escala, para comparar los resultados de la simulación en 3D con los resultados de la medición in situ. Además sería interesante realizar un análisis cuantitativo del grado de difusión con los datos obtenidos, ya que en este estudio solo se ha realizado un análisis cualitativo del mismo.

Otra posible línea futura es el estudio de diferentes patrones de repetición y diferentes diámetros y separaciones de los elementos de la red cristalina del difusor para modificar su banda frecuencial de trabajo.

En cuanto al estudio nº2, los resultados obtenidos muestran que el cristal de sonido es un buen complemento para las pantallas acústicas, ya que reduce el efecto tambor y aumenta las pérdidas por inserción en estos dispositivos. La reducción del efecto tambor a bajas frecuencias es interesante ya que las pantallas acústicas convencionales suelen ser bastante ineficaces frente a longitudes de onda grandes.

Como posible línea futura se plantea la repetición del estudio con una pantalla acústica y un cristal de sonido a escala, para comparar los resultados obtenidos en la simulación con una medición in situ de las pérdidas por inserción.

Otra posible línea futura es el estudio de los cristales como cumbreras de las pantallas, con el fin de evaluar el efecto que tienen sobre el fenómeno de difracción que se produce en el borde superior de las mismas.

Agradecimientos

Mi más sincero agradecimiento:

A mis directores Javier Redondo y Juan Vicente Sánchez, por el interés mostrado y por la dedicación y paciencia que han tenido conmigo durante la realización de este trabajo.

A mi familia, por apoyarme y ayudarme en cada nuevo proyecto que emprendo.

A mis compañeros y amigos del Master de Ingeniería Acústica (2011-2012), por todos los buenos momentos que hemos vivido juntos.

Bibliografía

- [1] P. Atanasio, J.M. Fuster, “*Diseño y caracterización de un difusor de estructura cristalina*”. EPSG. UPV. (2011)
- [2] J. Redondo, “*Caracterización de la difusión provocada por dispositivos utilizados en el Acondicionamiento Acústico*”. Tesis UPV. (2002)
- [3] J. Redondo, V. Sánchez-Morcillo, R. Pico, “*The potential phononic sound difussers (PSD)*”. Journal of building acoustics. (2011)
- [4] Llinares et al., “*Acústica Arquitectónica y Urbanística*”. Valencia, España. Universidad Politécnica de Valencia. (1991).
- [5] Carrión Isbert A., “*Diseño acústico de espacios arquitectónicos*”. Edicions UPC. (1998)
- [6] Arau H., “*ABC de la Acústica Arquitectónica*”. España. Grupo Editorial Ceac, S.A. (1999).
- [7] Cox T.J., D’Antonio P., “*Acoustic Absorbers and Diffusers. Theory, design and application*”. New York, EEUU. Taylor and Francis Group. (2009).
- [8] Orduña Malea E., “*Caracterización y estudio de difusores RPG*”. www.monografias.com
- [9] Ewald P.P., A. Oosthiek’s Uitgeversmij, “*Fifty years of x- ray diffraction*”, Ed Utrecht, (1962).
- [10] Kittel C., “*Introduction to Solid State Physics*”. New York (1996)
- [11] Brillouin L., “*Wave propagation in periodic structures*”. (1946)
- [12] Economou E.M et al., “*Stop bands for elastic waves in periodic composite materials*” (1994)
- [13] Sigalas M.M: et al., “*Band structure of elastic waves in two dimensional system*”, Solid State Communications (1993)
- [14] Sánchez-Pérez J. V., “*Cristales de sonido basados en estructuras minimalistas*”. Tesis. Universidad Politécnica de Valencia. (1997).
- [15] Orduña Malea E., “*Cristales de sonido ultrasónicos*”. www.monografias.com

- [16] Harris CM., “*Manual de medidas acústicas y control de ruido. Tema 2: Propagación del sonido al aire libre*” – Ed. McGraw Hill. (1995)
- [17] Department of Transportation, Federal Highway Administration U.S.A. (2001). “*Keeping the Noise Down. Highway Traffic Noise Barriers*”. Washington, 2001. FHWA-EP-01-004 HEPN/2-01 (10M)E.
- [18] Sanchez-Perez et al., “*Acoustic barriers based on periodic arrays of scatterers*” - Appl. Phys. Lett., Vol. 81, No. 27, 30 December (2002).
- [19] Maekawa Z., “*Noise reduction by screens*”, (1968)
- [20] Kurze, U. – “*Noise Reduction by barriers*” (1973)
- [21] Sánchez Pérez, JV., Garcia Raffi, L.M., Romero Garcia, V., “*Pantalla acústica*”, Patente española nº P200908074.
- [22] Simón F., “*Caracterización acústica de pantallas anti-ruido mediante un índice global*”, tesis doctoral, U. Complutense, Madrid (1996)
- [23] Pfrezschner J., Simón F., “*Barreras Acústicas y Ruido de Tráfico*”. Instituto de Acústica, CSIC Revista de Acústica. VOL.28, N.3-4, AÑO (1997)
- [24] UNE-EN 1793-1 “*Características relativas a la absorción acústica*”.
- [25] UNE-EN 1793-2 “*Características intrínsecas relativas al aislamiento al ruido aéreo*”.
- [26] UNE-EN 1793-3 “*Espectro normalizado de ruido de tráfico*”.
- [27] UNE-EN 1794-1 “*Comportamiento mecánico y requisitos de estabilidad*”
- [28] J. Redondo, R. Picó, B. Roig and M. R. Avis, “*Time domain simulation of sound diffusers using finite-difference schemes*”, Acta Acustica united with Acustica 93, 4, 611-622, (2007)
- [29] Jiménez González N., “*Simulación de tejidos vegetales mediante Diferencias Finitas*”, Tesis de Master, EPSG. UPV.(2009)
- [30] N. Ricker, “*Wavelet contraction, wavelet expansion, and the control of seismic resolution*”. Geophysics 18 (1953) 769– 792.

ANEXOS

A.1.- Coeficiente de difusión de un difusor de sonido basado en cristales de sonido ^[1].

Este índice representa la porción de energía acústica que no es absorbida, ni reflejada en forma especular, desde la superficie bajo prueba para varios ángulos de incidencia. El coeficiente de difusión tiene un rango de 0 a 1, donde 0 corresponde a una reflexión total del sonido y 1 corresponde a máxima difusión sonora.

Se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$d = \frac{\left(\sum_{i=1}^n 10^{Li/10} \right)^2 - \sum_{i=1}^n \left(10^{Li/10} \right)^2}{(n-1) \sum_{i=1}^n \left(10^{Li/10} \right)^2} \tag{54}$$

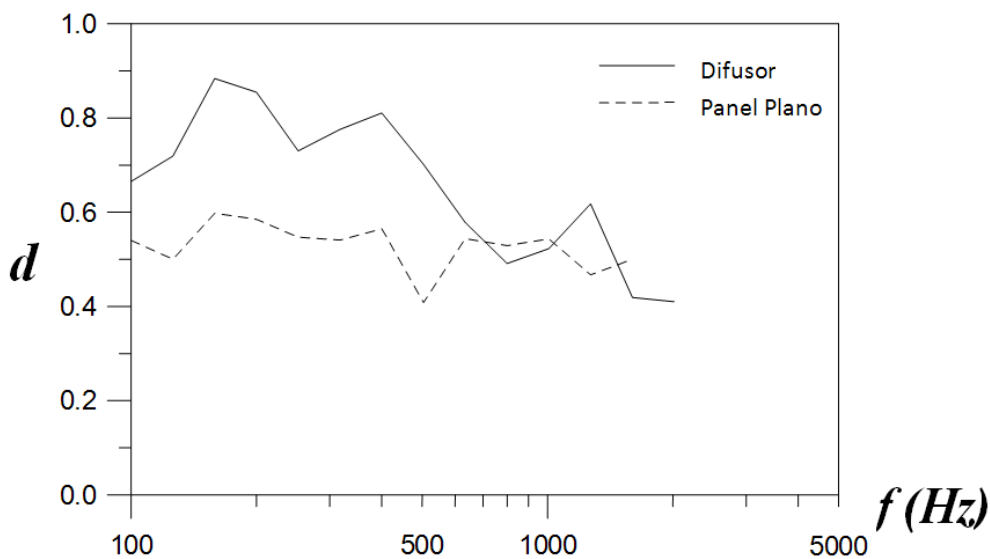
Donde:

Li es el nivel de presión sonora reflejado en bandas de 1/3 de octava, recogido por los micrófonos de medida.

d es la media de los coeficientes de difusión direccionales

El método de medida sigue las recomendaciones del documento AES-4id-2001 (r2007). “*Information document for room acoustics and sound reinforcement systems. Characterization and measurement of surface scattering uniformity*”. AES. 2007, La caracterización del difusor se ha realizado en el ángulo de incidencia que varía de -90 a 90 grados.

La siguiente gráfica está extraída del trabajo de P. Atanasio et al. “*Diseño y caracterización de un difusor de estructura cristalina*”.EPSPG. UPV. (2011) ^[1] y muestra el coeficiente de difusión obtenido para un prototipo a escala similar al difusor de estructura cristalina en el que se ha centrado este Trabajo Fin de Master.



Gráfica del coeficiente de difusión del prototipo respecto a la superficie plana

A.2.- Coeficiente de scattering de un difusor de sonido basado en cristales de sonido.

Este índice representa la relación entre la energía acústica reflejada especularmente y la energía acústica reflejada total, por una superficie. El coeficiente de scattering tiene un rango de 0 a 1, donde 0 corresponde a una reflexión totalmente especular del sonido y 1 corresponde a la máxima difusión sonora.

Se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$S = \frac{\alpha_{spec} - \alpha_s}{1 - \alpha_s} = 1 - \frac{E_{spec}}{E_{total}} \quad (55)$$

Donde:

α_s es el coeficiente de absorción

α_{spec} es el coeficiente de absorción especular

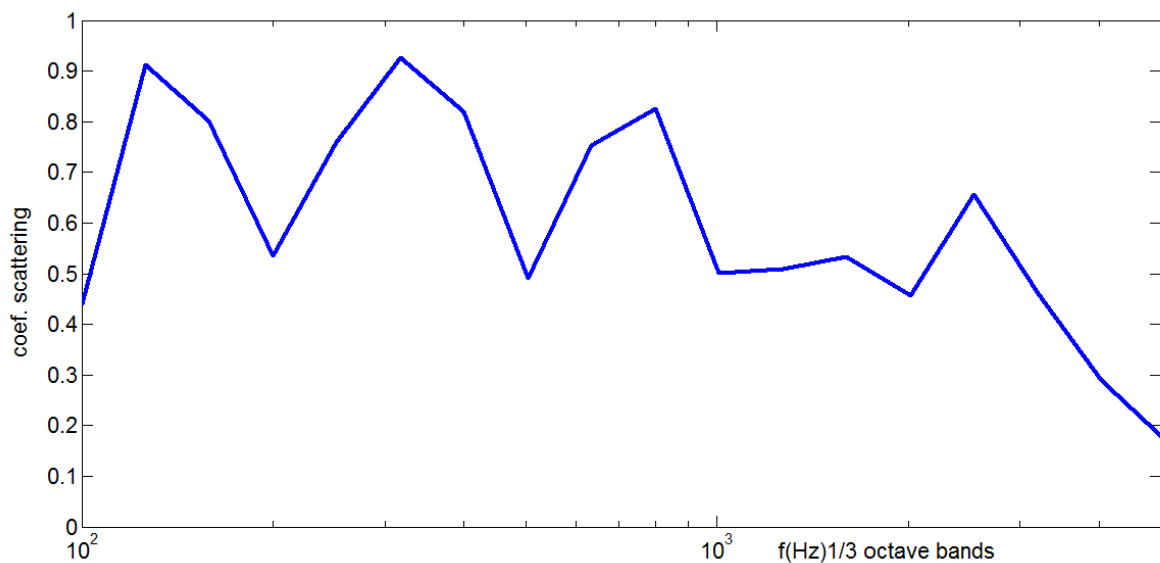
E_{spec} es la energía acústica reflejada especularmente

E_{total} es la energía acústica reflejada total

S es el coeficiente de scattering para incidencia aleatoria

El método de medida sigue las recomendaciones de la norma ISO/DIS 17497-1 *Measurement of the sound scattering properties of surfaces — Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room*, seleccionando el montaje según la norma UNE-EN ISO 354 *Medida de la absorción acústica en cámara reverberante*.

La siguiente gráfica está extraída del experimento de medida de M. Ricaud et al. (2013) y muestra el coeficiente de scattering obtenido en cámara reverberante a escala, para un prototipo a escala, similar al difusor de estructura cristalina en el que se ha centrado este Trabajo Fin de Master.



Gráfica del coeficiente de scattering del prototipo