

**UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA**

**ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA**

**Master en Ingeniería Acústica**

---



**UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA**



**ESCUELA POLITECNICA  
SUPERIOR DE GANDIA**

**NUEVAS PANTALLAS ACÚSTICAS A  
PARTIR DE MATERIALES  
RECICLADOS**

**TESIS DE MASTER**

**Autor:  
Eva Merino Porta**

**Director/es:  
D. Jesús Alba Fernández  
Dña. Romina del Rey Tormos**

**GANDIA, 2010**

# NUEVAS PANTALLAS ACÚSTICAS A PARTIR DE MATERIALES RECICLADOS

*Autor:* Eva Merino Porta

*Director1:* Jesús Alba Fernández

*Director2:* Romina del Rey Tormos

## **RESUMEN**

En acústica medioambiental, se trabaja en la mejora de las características de las pantallas acústicas. Ya existen líneas de actuación que buscan bajar costes manteniendo las prestaciones y sobre todo intentar eliminar materiales que puedan ser de difícil reciclaje. En este sentido, son bastante usuales, las fibras minerales o similares como relleno de las pantallas acústicas, que además suelen obtenerse en buena parte del petróleo.

En la actualidad ya se está estudiando la posibilidad de optimizar las prestaciones de las pantallas acústicas con materiales reciclados o basados en fibras naturales: diferentes tipos de lanas textiles, de espumas, de fibras naturales, etc., son objeto de estudio nacional o europeo en diferentes campos, buscando la sustitución de las materias clásicas por las nuevas.

El intento de disminuir la contaminación acústica ajustándose a los nuevos planes de acción acústicos ha hecho necesario revisar y/o optimizar las funciones de las pantallas acústicas. Estos elementos incorporan en muchos de los casos, materiales absorbentes, que todavía tienen base mineral. Es aquí donde se abre también un nuevo campo de aplicación para materiales elaborados a partir de reciclados o de fibras naturales, ya que se están planificando miles de kilómetros de pantallas acústicas en todas las infraestructuras europeas, como aplicación del Reglamento de la Ley del Ruido y la Directiva europea. En este caso, sigue siendo necesaria la implementación de modelos de los materiales a utilizar.

Se plantea en esta tesina un estudio de materiales acústicos reciclados susceptibles de usarse en pantallas acústicas, así como ensayos de validación de algunas pantallas que se diseñan con estos materiales.

## **ABSTRACT**

In environmental noise, people are working to improve the characteristic of sound barriers. There are already lines of action (or action plans) that seeks to lower costs while maintaining benefits and above all try to eliminate materials that can be difficult to recycle. In this sense, are quite common, or similar minerals fibers as a filter of noise barriers, are also available in much of the oil (fusel oil).

At present, studies on the possibility of optimizing the performance of noise barriers using recycled materials or natural fiber-based: different types of wood textiles, foams, natural fibers, etc...are the subject of national or European studies in different fields, seeking replacement of traditional material with new ones.

The attempt to reduce noise pollution being adjusted with the new action plans has been necessary to review and/or optimize the functions of sound barriers. These elements incorporate in many cases, absorbent materials, which still have mineral base. It is here where opens up a new field of application for materials made from recycled or natural fibers, since they are planning thousands of miles of noise barriers in all European facilities, pursuant to the Rules of Noise Act and the European Directive. In this case, it remains necessary to implement models of materials used.

It is proposed in this thesis a study of acoustics materials recycled likely to be used in noise barriers, and validation test on some screens that are designed with these materials.

Autor: Eva Merino Porta, email: [vmepor@epsg.upv.es](mailto:vmepor@epsg.upv.es)

Fecha de entrega: 03-09-2010

## ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN .....	3
1.1. INTRODUCCIÓN .....	3
1.2. OBJETIVOS .....	3
1.3. ESTRUCTURA DE LA TESINA.....	4
2. INTRODUCCIÓN TEÓRICA .....	5
2.1. TEORÍA BÁSICA SOBRE PANTALLAS ACÚSTICAS. CLASIFICACIÓN.....	5
2.2. NORMATIVA SOBRE PANTALLAS ACÚSTICAS. ....	9
2.3. TEORÍA DE PANELES PERFORADOS .....	11
2.3.1. Resonador múltiple de cavidad (Helmholtz) a base de paneles perforados.....	12
2.3.2. Absorción sonora de materiales. Cálculos. Según UNE-EN 12354-6.2004.....	15
3. DESARROLLO DE LA TESINA.....	17
3.1. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES RECICLADOS PARA PANTALLAS. ....	17
3.2. APROXIMACIÓN MATEMÁTICA DEL COMPORAMIENTO DE PANELES PERFORADOS.....	19
3.3. ENSAYOS EN CÁMARA REVERBERANTE. ....	26
3.4. ENSAYOS MEDIANTE SOFTWARE PERF. ....	36
4. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN .....	42
4.1. CONCLUSIONES DE LA TESINA.....	42
4.2. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN .....	44
4.2.1. Simulación mediante elementos finitos.....	44
4.2.2. Propuesta de estudio de las reflexiones .....	44
AGRADECIMIENTOS.....	47
REFERENCIAS .....	48
ANEXOS .....	50

## **1. INTRODUCCIÓN**

### *1.1. INTRODUCCIÓN*

Actualmente, es fácil darse cuenta que la contaminación acústica produce efectos negativos sobre la salud auditiva, física y mental de las personas. Por esta razón, cada vez hay más exigencias mediante normativas que se imponen para mejorar los niveles de ruido admisibles. Todo ello para mejorar la calidad de vida de las personas.

Las principales causas de contaminación acústica son aquellas relacionadas con las actividades humanas como el transporte, la construcción de edificios y obras públicas, las industriales, entre otras. Pero cabe destacar que la principal fuente de ruido que existe hoy es la de ruido de tráfico rodado.

Desde el punto de vista acústico, la correcta ordenación urbanística y de edificación de viviendas requiere el conocimiento previo no sólo de las características físico- acústicas del terreno donde va a tener lugar, sino también de las del ruido ambiental. Cuando las planificaciones urbanísticas no son las adecuadas, por falta de previsión, o por condicionantes históricos, la consecuencia o aproximación a condiciones de ruido satisfactorias necesita de soluciones adicionales, que actualmente están constituidas por las denominadas pantallas o barreras acústicas [1].

En carreteras cercanas a las poblaciones existe un gran nivel de ruido continuo bastante molesto y que supera los niveles permitidos, el cual perjudica, a largo plazo, a la salud de las personas que viven en las cercanías a estas carreteras. Por ello, desde hace cierto tiempo, se propuso colocar paneles acústicos para aislar los tramos de carreteras pegados a viviendas, escuelas, hospitales, etc., y así poder reducir el nivel de ruido.

Con el paso de los años, se ha ido mejorando las características de los materiales empleados para estas pantallas o barreras acústicas, y cada vez más desde un punto de vista ecológico y medioambiental. Al mismo tiempo mejorando la absorción e intentando que el coste de estas pantallas sea lo más reducido posible.

### *1.2. OBJETIVOS*

El objeto global de este proyecto se inscribe en el contexto del desarrollo y/o caracterización y validación de nuevos materiales absorbentes acústicos y en la búsqueda de sus aplicaciones acústicas, con el valor añadido, de la sostenibilidad, la capacidad de reutilización y reciclaje de materiales basados en fibras naturales o basadas en desechos de residuos industriales. Además contribuir al conocimiento del comportamiento acústico de materiales absorbentes reciclados y

estudiar el comportamiento de absorber el sonido en un determinado rango de frecuencias, para el uso de pantallas acústicas.

Una vez mencionado el objetivo principal, seguidamente se indica lo que en esta memoria se pretende conseguir:

1) Estudiar el comportamiento que puede tener una placa de panel perforado por una de sus caras al introducirle un material absorbente reciclado, y estudiar mediante ecuaciones matemáticas cual es el coeficiente de absorción aproximado.

2) Introducir en una pantalla de placa de panel perforado varios tipos de materiales absorbente reciclados (lana de poliéster) seleccionados de dos en dos y de distintas densidades (al tener combinación de distintas impedancias el comportamiento de este conjunto de materiales será mejor), y estudiar el comportamiento de la absorción del sonido que presenta en el rango de frecuencia de 100Hz a 5KHz, según la Normativa es UNE EN 1793-1:1998 [2].

3) Realizar las mediciones de las distintas configuraciones en cámara reverberante según se indica en la normativa citada en el punto anterior.

4) Mediante un programa de simulación (PERF), introducir las características de las pantallas utilizadas en las mediciones y obtener el coeficiente de absorción de este en tercios de octava.

5) Posteriormente comparar estos resultados, los obtenidos matemáticamente, tanto los medidos en cámara reverberante como los obtenidos mediante el software PERF.

6) Establecer nuevas líneas de investigación en este ámbito.

### *1.3. ESTRUCTURA DE LA TESINA*

Esta memoria de tesina se estructura en cuatro apartados:

1.- OBJETO Y ANTECEDENTES

2.- INTRODUCCIÓN TEÓRICA

3.- DESARROLLO DE LA TESINA

4.- CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

En el presente punto 1 se señalan los objetivos de la tesina y se establece la estructura de la misma.

En el punto 2, se explica una introducción teórica del problema, centrandolo la importancia en el método del cálculo de coeficiente de absorción de materiales absorbentes para pantallas acústicas. Asimismo se realiza un breve resumen de las distintas normativas aplicadas y posteriormente otra introducción teórica sobre paneles perforados.

En el punto 3 se exponen los resultados de trabajos experimentales tanto prácticos como realizados in situ. Primero el cálculo de la resistencia al flujo mediante el tubo de impedancias acústica, luego un trabajo sobre la estimación matemática del coeficiente de absorción de combinaciones de materiales absorbente, posteriormente resultados del coeficiente de absorción de la composición de estas combinaciones de material introducidas en unas pantallas de panel perforada por una de sus caras, medido en cámara reverberante y por último una estimación del punto anterior pero calculado mediante ecuaciones matemáticas.

Finalmente, el punto 4 el cual presenta las principales conclusiones tras el desarrollo del trabajo realizado y se exponen una serie de líneas de investigación en las que seguir trabajando en el ámbito.

Las futuras líneas de investigación se basan en el conocimiento del índice de reflexión sonora sobre las muestra medidas en este trabajo, y así no solo mejorar el coeficiente de absorción sonora sino también reducir el índice de reflexión sonora con lo que conlleva a reducir el ruido de fondo a los alrededores de las pantallas producidos mayormente por estas reflexiones.

## **2. INTRODUCCIÓN TEÓRICA**

### *2.1. TEORÍA BÁSICA SOBRE PANTALLAS ACÚSTICAS. CLASIFICACIÓN.*

La instalación de barreras acústicas o pantallas con capacidad para obstaculizar la propagación de las ondas sonoras desde la fuente a la zona habitada, es una eficaz intervención para disminuir la contaminación acústica.

El principio de funcionamiento de una pantalla antiruido se basa en que al transmitirse una onda sonora a través de una pantalla acústica, esta onda es en parte absorbida, reflejada y también difractada.

Principalmente se busca en estas barreras reducir los niveles producidos a bajas y medias frecuencias, por ser los más molestos, ya que como bien se sabe a estas frecuencias la longitud de

onda es mayor ( $\lambda = c/f$ ) y por tanto el recorrido de la onda es mayor y puede llegar a traspasar la barrera.

En el planteamiento de la fabricación de pantallas antiruido se contempla la influencia de distintos factores, que no son solo de tipo acústico, sin embargo, son estos mismos que imponen determinadas selecciones, como son lo ancho de la barrera, su altura y el tipo de materiales a usar. En este último es el que nos centramos en este documento.

Es importante subrayar que el objetivo a alcanzar mediante la instalación de una barrera contra el ruido es que se reduzcan los niveles sonoros producidos hasta por debajo de los límites fijados por la ley.

Una pantalla acústica trata de una barrera natural o artificial, situada por ejemplo a lo largo de las carreteras, entre la fuente de ruido y el punto de observación, de modo que detrás de la barrera se crea un área de niveles de ruido reducido llamada sombra acústica. El área de la sombra se establece mediante métodos idénticos a los aplicados para áreas de sombra en la óptica; sin embargo, aquí, esta zona se reduce a ondas de ruido de mayor longitud, debido a su difracción.

Las pantallas deben su eficacia a dos parámetros básicos de la física: el aislamiento acústico y el coeficiente de absorción acústica. El primero es responsable de la cantidad de energía acústica que atraviesa la pantalla hacia la zona protegida por la misma, y el segundo parámetro consiste en la cantidad de energía producida por la onda sonora que se refleja hacia la fuente del ruido. Para que la eficacia de las barreras acústicas sea elevada, ambos parámetros deben ser máximos, es decir, la cantidad de energía reflejada de onda acústica, así como la energía que atraviesa la capa de material de aislamiento de la pantalla debe ser lo menor posible.

Si bien en el diseño de la pantalla se toma en consideración sobre todo su altura, longitud y ubicación en relación con la fuente de ruido (por ejemplo, en relación a la calzada a fin de crear una sombra acústica adecuada), una cuestión especialmente importante es el material del que se compone la pantalla así como la estructura de su superficie, la cual limita la reflexión del sonido.

Las pantallas para alrededor de carreteras se fabrican a base de paneles de vidrio transparentes o translúcidos, en su mayoría de policarbonato o vidrio acrílico (su funcionamiento consiste normalmente en la reflexión de las ondas de sonido) o también con materiales absorbentes que reflejan las ondas, tales como hormigón, madera, así como diferentes variedades de hormigón como hormigón de serrín y hormigón ligero, también de cerámica, y, finalmente, se usan también placas acústicas con relleno a base de lana mineral colocada entre dos capas de red metálica de acero (el llamado Muro Verde), y que tienen dentro una lámina metálica perforada o un panel de PVC. Estos tipos de pantalla acústica permiten, gracias a su diversidad de diseños, el crecimiento y

el mantenimiento de plantas enredaderas. Se construyen también las llamadas pantallas verdes, es decir terraplenes con vegetación plantada en ellos.

Las pantallas acústicas de carretera pueden tener forma de pared, pasillo, o incluso de túnel, como por ejemplo, el túnel acústico de Hösbach-West-Ost en la A3, así como el túnel acústico en Dissen, en la A33 (Alemania) [3].

Seguidamente se realiza un breve resumen de en qué consisten los distintos tipos de pantallas acústicas:

#### 1) Paneles de vidrio transparentes o translucidos:

Suelen ser de planchas fabricadas mediante extrusión, de esta forma se pueden conseguir longitudes de hasta 5 metros. Suelen presentarse en forma de planchas planas, incoloras, de entre 15 o 20 mm de espesor (dependiendo del fabricante). Un ejemplo ilustrativo es el de la fig. 2.1.1.



Fig.2.1. 1. Pantallas de vidrio



Fig.2.1. 2. Pantallas de madera

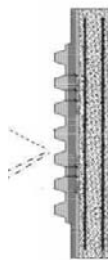


Fig.2.1. 3. P.h. vista desde arriba

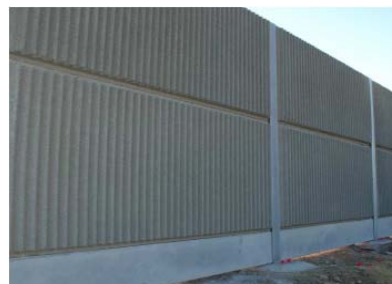


Fig.2.1. 4. Pantalla de hormigón

#### 2) Pantallas acústicas fabricadas de hormigón:

Es un material no poroso que consigue un nivel de absorción debido a un modelado especial del material. La cara absorbente funciona bien acústicamente porque está formada por una serie de áridos de machaqueo, de distintos tamaños (entre 3-6mm). Pero en una pantalla acústica de hormigón, no sólo es el material el que le confiere propiedades absorbentes, sino también la forma



específica que tiene la cara expuesta al ruido. Por ejemplo en la fig. 2.1.3 podemos observar el diente que forma (vista desde arriba), está especialmente diseñado para evitar que la pantalla sea reflectante. El tamaño, la forma y la distancia de los mismos están calculados para que se cumpla la “Ley de Reflexión acústica” en el rango de frecuencias en el que se encuentra el ruido estudiado (según UNE EN 1793-3:1998 [3]). La cara de la pared (fig. 2.1.4) que tiene forma de difusor y actúa como tal hace que las reflexiones que se producen por el sonido directo repartan su potencia en distintas direcciones, por lo que supone una mayor atenuación.

### 3) Pantallas acústicas fabricadas con madera (fig. 2.1.2):

Están fabricadas por madera nórdica. Consiguen un aislamiento acústico perfecto gracias al cerramiento hermético de las juntas, tiene una extensa gama de acabados según la posición final de los paneles delanteros. Existen también otra clase de pantallas acústicas fabricadas en madera (truncos). Se trata de una doble pared de troncos que alberga tierra en su interior, entre otras [4],...

### 4) Placas acústicas con relleno de lana mineral:

Sistema sándwich compuesto por dos láminas lisas o perforadas pintadas al horno, con una lámina interna de lana de roca con elevado coeficiente de absorción. Dentro de esta clasificación se encuentran las pantallas acústicas metálicas con panel perforado, cabe decir que estas, por lo general, son altamente absorbentes y están construidas por paneles modulares metálicos con un material absorbente acústico en su interior.

En lo general, la estructura soporte suele construirse con perfiles verticales normalizados de acero, anclados al suelo mediante cimentación o hincados en el terreno, calculados y dimensionados según esfuerzo a soportar. Los paneles modulares tienen la doble función de aislamiento y absorción acústica y están contruidos por los siguientes elementos:

- Carcasa: Realizada con chapa plegada, de acero o de aleación de aluminio de alta resistencia, con acabado pintado. Confiere al modulo su capacidad de aislamiento acústico.

- Placa o material absorbente: Constituida por la lana mineral o fibra de vidrio, confiere al modulo su capacidad de absorción acústica y junto con la carcasa, la capacidad de aislamiento a ruido aéreo.

- Rejilla de protección: Realizada con chapa perforada, de acero o de aleación de aluminio de alta resistencia, con acabado pintado. Su misión es proteger el material absorbente y aportar el acabado superficial a la pantalla.

Este tipo de pantallas, permite ofrecer elevados índices de absorción acústica (hasta 13 o 14 dBA), para el conjunto de la pantalla aislada [5][6].

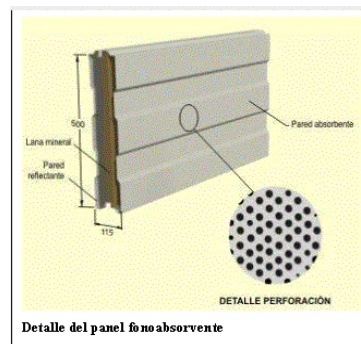


Fig.2.1.5. Pantalla acústica con relleno

## 2.2. *NORMATIVA SOBRE PANTALLAS ACÚSTICAS.*

En relación a las normas referentes a las características acústicas de los dispositivos reductores de ruido, la norma UNE EN 1793:1998, Dispositivos reductores de ruido de tráfico en carreteras. Métodos de ensayo para determinar el comportamiento acústico, en sus partes 1 a 3, propone los métodos para determinar la absorción sonora y el aislamiento acústico a ruido aéreo de estos dispositivos teniendo en cuenta un espectro normalizado de ruido de tráfico. Según la parte 1 de la norma el coeficiente de absorción acústica,  $\alpha_s$ , de pantallas acústicas o dispositivos reductores de ruido de tráfico en carreteras se evalúa en cámara reverberante según el método descrito en la norma UNE EN-ISO 354:2004, Medición de la absorción acústica en cámara reverberante. Según la parte 3, conocidos los coeficientes de absorción acústica individuales y ponderados según el espectro normalizado de ruido de tráfico rodado, se determina el índice de evaluación de la absorción acústica para indicar el comportamiento acústico de la barrera,  $DL_a$ , para clasificar el comportamiento de la absorción acústica. El índice de evaluación del aislamiento al ruido aéreo,  $DLR$ , se determina según la norma EN 1793-2:1998 y se basa en determinar el índice de aislamiento acústico,  $R_i$ , utilizando el método de medida en el laboratorio descrito en la norma UNE EN-ISO 140-3:1995, Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 3: Medición en laboratorio del aislamiento acústico al ruido aéreo de los elementos de construcción.

En la norma EN 14388:2006, Dispositivos reductores de ruido de tráfico. Especificaciones, se especifican las características relevantes de los distintos dispositivos reductores de ruido, entre ellas la absorción sonora, el peso propio, el impacto de piedras, protección del medio ambiente, reflexión de la luz, y la mejora del índice de difracción sólo si hay un dispositivo añadido. Las únicas magnitudes acústicas que contemplan son la absorción sonora y el aislamiento al ruido aéreo.

La norma EN 14389:2009, Dispositivos reductores de ruidos de tráfico en carreteras. Métodos de evaluación del comportamiento a largo plazo, parte 1 propone como evaluar la durabilidad de las características acústicas de los dispositivos reductores de ruido.

Algunas normas a tener en cuenta, pero que no tiene un comportamiento acústico en los dispositivos reductores de ruido es la norma UNE EN-ISO 1794:2003, Dispositivos reductores de ruido de tráfico en carreteras. Comportamiento no acústico, parte 1 y 2, que se basan en el comportamiento mecánico y requisitos de estabilidad y requisitos en relación con la seguridad general y el medio ambiente respectivamente.

La norma internacional UNE-EN ISO 209053:1993, se basa en el cálculo de la resistencia al flujo en materiales porosos, los cuales pueden usarse para el conocimiento de algunas propiedades acústicas (por ejemplo, absorción, atenuación, etc.). Esta norma tiene como fin: la relación de algunas de las propiedades acústicas de materiales porosos en su estructura y su método de manufactura y asegurar la calidad del producto.

Respecto a la norma UNE EN-ISO 12354, Acústica de la edificación. Estimación de las características acústicas de las edificaciones a partir de las características de sus elementos., parte 1 a 6, propone obtener las propiedades acústicas de los edificios y sus elementos de construcción. Según la parte 1 y 2 de la norma, el aislamiento del ruido aéreo entre edificios y la estimación del aislamiento acústico a ruido de impactos entre recintos se evalúa utilizando primero medidas de la transmisión directa e indirecta a través de los elementos constructivos del edificio y después métodos teóricos derivados de la propagación acústica en los elementos estructurales. Para la estimación del aislamiento acústico a ruido aéreo frente al ruido del exterior, se sigue la parte 3 de la norma que se basa en el cálculo del índice de reducción acústica de los distintos elementos que componen la fachada e incluye las transmisiones tanto directas como indirectas. De los cálculos se obtiene resultados que corresponden aproximadamente con los resultados de las mediciones in situ según la Norma UNE EN ISO 140-5:1999, Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 5: Medición in situ del aislamiento acústico al ruido aéreo de elementos. La parte 4 describe un modelo de cálculo para el nivel de potencia acústica radiado por la parte externa del edificio debido al ruido aéreo procedente del interior del edificio. Los niveles sonoros producidos por el equipamiento de las edificaciones se evalúan según

la parte 5 de la normativa y por último la parte 6 de la norma que se basa en la estimación del área de absorción sonora equivalente total o el tiempo de reverberación de espacios cerrados dentro de los edificios. El cálculo se basa esencialmente en datos de medidas que caracterizan la absorción sonora de materiales y objetos. En el anexo B de esta norma se describe como calcular el coeficiente de absorción sonora de una capa de material poroso colocada directamente sobre una superficie reflectante, la cual puede estimarse a partir del conocimiento de la resistencia del material y del espesor de la capa. Esta parte de la norma esta explicada brevemente en el punto 2.3.2 del este documento y calculada en el apartado 3.2 sobre la aproximación del cálculo de la absorción de materiales mediante ecuaciones matemáticas.

En ninguna de las normas citadas, se trata el índice de reflexión sonora de barreras, que puede ser de interés para ver el efecto de las reflexiones y por tanto de posible incremento del ruido ambiente. Este se trata en la norma voluntaria europea CEN/TS 1793-5:2003 [7], donde se describe un método de caracterización acústica de dispositivos reductores de ruido de tráfico usando técnicas de media de la respuesta al impulso y MLS (Maximum Length Sequences), en cual es un método para poder evaluar altos aislamientos a ruido aéreo con elevados niveles de ruido de fondo.

### *2.3. TEORÍA DE PANELES PERFORADOS*

Según el documento que trata del coeficiente de absorción y su espectro de paneles perforados y no perforados [8], explica brevemente que la frecuencia de resonancia de paneles perforados y no perforados es similar en algunos casos, pero sin embargo, la frecuencia de resonancia de paneles perforados es mucho mayor que la de los paneles no perforados. De hecho, en esta situación, el movimiento ondulatorio en áreas sólidas presiona el aire. Cuando el aire pasa por el agujero del panel, se comportará como un resonador. Este proceso también es considerado como el resonador de Helmholtz. Esto significa que la diferencia del radio y el diámetro del orificio de las perforaciones determinan la frecuencia.

Las placas y pantallas o paneles perforados son ampliamente utilizadas en diversas aplicaciones de control de ruido. Se utilizan principalmente como capas protectoras de los materiales porosos. Cuando el radio de las perforaciones varía entre 1mm y 1cm, se habla de los sistemas de macro-perforado. En radios milimétricos, el panel se llama micro-perforado y no son muy utilizados. Las pantallas se caracterizan por su porosidad y resistividad de flujo, que por supuesto, están relacionadas con el tamaño y tipo de perforaciones, resistividades típicas de la pantalla y porosidad del material.

El efecto acústico de los paneles y/o pantallas perforadas depende principalmente de su porcentaje de perforaciones o porosidad, el tamaño de estas perforaciones y la resistencia al flujo, el espesor de las perforaciones y las condiciones de montaje.

El movimiento de las placas perforadas también puede desempeñar un papel. Éste, sin embargo, depende del grosor y de las condiciones del montaje, generalmente se descuida la rigidez y la inercia.

Dependiendo de su diseño, las pantallas y placas o paneles perforados pueden afectar al comportamiento acústico del material absorbente que esta junto a estos (artículo de Franck Sgard [9]).

A continuación realizaremos una breve descripción del cálculo de la frecuencia de resonancia en paneles perforados y seguidamente en cálculo de la Absorción sonora de materiales.

### *2.3.1. Resonador múltiple de cavidad (Helmholtz) a base de paneles perforados.*

Si nos basamos en la teoría del resonador de Helmholtz y en el caso en base a paneles perforados, Los resonadores de Helmholtz transforman la energía sonora en energía mecánica que finalmente se convertirá por fricción en energía calorífica. Están constituidos de un cierto volumen  $V$ , comunicados por su interior.

Está formado por un panel de material no poroso y rígido de espesor  $D$ , en el que han practicado una serie de perforaciones circulares o ranuras, montado a una cierta distancia “ $d$ ” de una pared rígida, a fin de dejar una cavidad cerrada de aire entre ambas superficies.

En la siguiente figura se representa un esquema básico de este tipo de resonador:

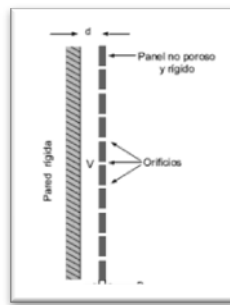


Fig. 2. 3. Esquema de resonador

Partiendo de la base de que, a las frecuencias de diseño normalmente bajas, se cumple que  $d \ll \lambda$ , el resonador múltiple puede ser considerado de cualquiera de las siguientes maneras:

- Como un resonador de membrana en el que la masa del panel ha sido sustituida por la masa del aire contenido en cada perforación o ranura. En este caso, es precisamente dicho aire, y no el panel, el que entra en vibración cuando una onda sonora incide sobre el elemento.

- Como un conjunto de resonadores simple de Helmholtz que comparten una misma cavidad. Dicha cavidad actúa a modo de elemento acoplador de resonancia  $f_0$  (Hz) es análoga a la correspondiente al resonador simple, es decir:

$$f_0 = 5480 \sqrt{\frac{S}{DV}} \quad (\text{ec.1})$$

donde:

$S$ = suma de las secciones transversales de los orificios (en  $\text{cm}^2$ ).

$D$ = espesor del panel (coincide con la longitud de los orificios (en cm).

$V$ = volumen del panel a la pared rígida (en  $\text{cm}^3$ ).

Ahora bien:

$$V = S_p d \quad (\text{ec.2})$$

siendo:

$S_p$ =superficie del panel (en  $\text{cm}^2$ ).

$d$  = distancia del panel a la pared rígida (en cm).

Sustituyendo dicho valor en la expresión de  $f_0$ , se obtiene la siguiente nueva expresión:

$$f_0 = 5480 \sqrt{\frac{S}{DS_p d}} \quad (\text{ec.3})$$

o también:

$$f_0 = 5480 \sqrt{\frac{p}{Dd}} \quad (\text{ec.4})$$

donde:

$p = S/Sp =$  porcentaje de perforaciones del panel (en tanto por uno).

Por otra parte, al igual que en el caso del resonador simple, la longitud efectiva de los orificios es mayor que la real  $D$  (espesor del panel), debido a que la masa efectiva del aire contenido en los mismos es también mayor que la masa que les correspondería por el volumen que ocupan.

La expresión final para el cálculo de  $f_0$  es, pues:

$$f_0 = 5480 \sqrt{\frac{p}{D'd}} \quad (\text{ec.5})$$

En la práctica se utilizan dos tipos de resonadores múltiples de cavidad: los que disponen de un panel con perforaciones circulares y los que presentan un panel con ranuras. En nuestro caso solo estudiaremos el panel con perforaciones circulares, en los cuales estas perforaciones están distribuidas uniformemente sobre el panel, el porcentaje de perforaciones  $p$  se obtiene a través de la expresión:

$$p = \frac{\pi a^2}{D_1 D_2} \quad (\text{ec.6})$$

donde tanto  $a$  (radio de las perforaciones) como  $D_1$  y  $D_2$  se expresan en cm (fig.2.3).

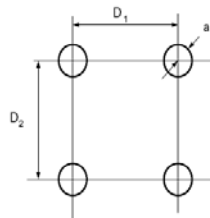


Fig.2. 3. Detalle de un tramo de un panel perforado con indicación de sus dimensiones características

En cuanto a la longitud efectiva de las perforaciones  $D'$  (cm), su expresión es la siguiente:

$$D' = D + 1,6a \quad (\text{ec.7})$$

### 2.3.2. Absorción sonora de materiales. Cálculos. Según UNE-EN 12354-6.2004

El coeficiente de absorción sonora de una capa de material poroso colocada directamente sobre una superficie reflectante puede estimarse a partir del conocimiento de la resistencia al flujo del material y del espesor de la capa. La resistencia al flujo, que necesitamos para el cálculo de la absorción, se obtiene siguiendo la Norma Europea EN 29053:1993 [10].

Para un campo sonoro difuso, el coeficiente de absorción  $\alpha_s$  puede determinarse a partir de la siguiente expresión:

$$\alpha_s = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \alpha_\varphi \text{sen } 2\varphi \, d\varphi \quad (\text{ec.8})$$

$$\alpha_s = 1 - |r_\varphi|^2 \quad (\text{ec.9})$$

$$r_\varphi = \frac{Z' \cos\varphi - 1}{Z' \cos\varphi + 1} \quad (\text{ec.10})$$

donde

$\varphi$  es el ángulo de incidencia, en radianes.

$\alpha_\varphi$  es el coeficiente de absorción de una onda plana, con ángulo de incidencia  $\varphi$ .

$r_\varphi$  es el coeficiente de reflexión de una onda sonora plana, con ángulo de incidencia  $\varphi$ .

$Z'$  es la impedancia superficial de la capa, normalizada a la impedancia de aire  $\rho_0 c_0$ .

La impedancia normalizada de la capa para materiales de reacción local colocados directamente sobre una superficie acústica reflectante puede determinarse a partir de la expresión:

$$Z' = Z'_c \coth \gamma d \quad (\text{ec.11})$$

donde

$\gamma$  es la constante de propagación del material absorbente, en radianes por metro.

$d$  es el espesor de la muestra, en metros.



$Z'_c$  es la impedancia característica del material absorbente, normalizada a la impedancia del aire  $\rho_0 c_0$ .

Para diversos materiales absorbentes, la impedancia característica normalizada  $W'$  y la constante de propagación  $\gamma$  puede reducirse a partir de la resistencia al flujo  $r$  del material por medio de relaciones empíricas que emplean  $C$  y el número de onda  $k_0$  como parámetros:

$$C = \frac{r}{f \rho_0} \quad (\text{ec.12})$$

$$k_0 = \frac{2\pi f}{c_0} \quad (\text{ec.13})$$

donde

$r$  es la resistividad al flujo de aire, en Pascales segundo por metro cuadrado;

$f$  es la frecuencia, en Hercios;

$\rho_0$  es la densidad del air ( $\approx 1,2 \text{ kg/m}^3$ ), en kilogramos por metro cúbico;

$c_0$  es la velocidad del sonido en el aire ( $\approx 343 \text{ m/s}$ ), en metros por segundo.

En estas relaciones, se supone que la dependencia con el tiempo de las diferentes magnitudes es  $e^{-i2\pi ft}$ .

Para materiales fibrosos, estas relaciones son las siguientes (ec.14.a):

$$Z'_c = (1 + 0,0571 C^{0,754}) - i (0,087 C^{0,732})$$

$$\gamma = k_0 (0,189 C^{0,595}) + ik_0 (1 + 0,0978 C^{0,700})$$

Para espumas de poro abierto, estas relaciones son (ec.14.b):

$$Z'_c = (1 + 0,114 C^{0,369}) - i (0,0985 C^{0,758})$$

$$\gamma = k_0 (0,168 C^{0,715}) + ik_0 (1 + 0,136 C^{0,494})$$

Cada una de estas relaciones tiene su propio rango de valides según el parámetro  $C$ . Para valores altos de  $C$  estas relaciones conducen a resultados incorrectos desde el punto de vista físico. Para dichos valores se puede obtener una mejor estimación a partir de los procedimientos teóricos de la referencia (ec.14.c):

$$Z'_c = \sqrt{11,1 - i - 0,12 C}$$

$$\gamma = ik_o 1,33 Z'_c$$

Para espumas de poro abierto y materiales fibrosos. Los resultados para distintos valores de C se obtienen empleando las ecuaciones anteriores de la siguiente forma:

$C < 0,25$  : ecuaciones 14.b

$0,25 \leq C \leq 80$  : ecuaciones 14.a

$C > 80$  : ecuaciones 14.c

Este tipo de predicciones puede aplicarse también a elementos multicapa o a materiales absorbentes con un espacio de aire entre el material y el fondo reflectante.

### 3. DESARROLLO DE LA TESINA

#### 3.1. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES RECICLADOS PARA PANTALLAS.

La incorporación progresiva de nuevos materiales absorbentes en el campo de la acústica y en nuestro caso, para su utilización en pantallas acústicas, cada vez es más diverso, y hace que sean necesarias técnicas de medida para calcular sus propiedades.

En el año 1985, los autores Ingard y Dear [11] realizaron una serie de medidas de la resistencia al flujo en materiales porosos. Este consiste en la media de niveles de presión dentro del tubo de Kundt en situaciones determinadas para el cálculo de la resistencia al flujo de materiales absorbentes para ciertas frecuencias determinadas. Uno de los puntos de la presente tesis se basa en el conocimiento de la resistencia al flujo de distintos material elegidos a priori. La resistencia al flujo ( $\sigma$ ) se define como la relación entre la diferencia de presión sonora en dos puntos y la velocidad.

Para la obtención de estos valores se elige una muestra de material fibroso de espesor l y se coloca en el interior del tubo tal y como se muestra en la figura 3.

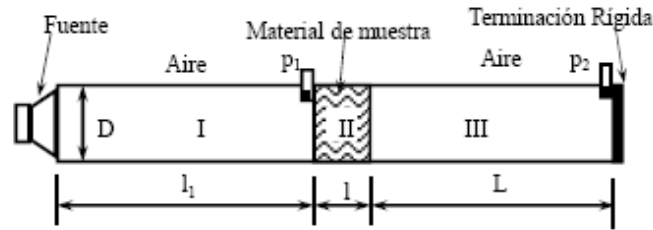


Fig.3. Esquema de medida para la resistencia al flujo

El procedimiento a seguir es según la norma UNE-EN ISO 10534: 2002 [12] para medida de la resistencia al flujo de un material. En un extremo del tubo se sitúa un altavoz capaz de generar bajas frecuencias y en el centro de tubo la muestra de material absorbente a caracterizar. A cierta distancia muy cerca de la muestra del material habrá un agujero en el que se colocará uno de los micrófonos y otro agujero justo igual pero situado en el extremo opuesto al altavoz del tubo donde se sitúa el otro micrófono.

Para que se cumpla, este montaje, la condición de una onda incidente plana sobre el material fibroso, la sección del tubo debe ser pequeña comparada con la longitud de onda  $\lambda$ , por lo que se toma como condición que  $\lambda \gg 1.7D$ , siendo  $D$  el diámetro del tubo. Además la distancia entre la muestra de material y la terminación rígida se elige como  $L = (2n-1) \lambda/4$ , para  $n = 1, 2, \dots$ . Aunque en el método de Ingard & Dear se elige  $L = \lambda/4$  para frecuencias de 100 Hz.

Siguiendo la configuración, se miden los niveles de presión sonora a determinadas frecuencias en los puntos  $P_1$  y  $P_2$  tal y como se muestra en la figura 3, el valor de la resistencia al flujo,  $\sigma$ , es:

$$\sigma = \rho_0 c_0 10^{\frac{Lp_1 - Lp_2}{20}} \quad (\text{ec.15})$$

donde:

$\rho_0$  es la densidad del aire.

$c_0$  es la velocidad de propagación en el aire.

$l$  es el espesor de la muestra.

$Lp_1$  y  $Lp_2$  son los niveles de presión medidos en los puntos 1 y 2 respectivamente.

Este método resulta de gran aplicación en investigación básica y desarrollo de productos y, además, cuenta con la ventaja de requerir un espacio pequeño, siendo las muestras de los materiales también de pequeñas dimensiones, pues deben ser del mismo tamaño que la sección transversal del tubo de impedancia.

Finalmente, se obtiene los valores de la resistencia al flujo de los materiales a estudiar:

<b>Nombre</b>	<b>Espesor (mm)</b>	<b>Densidad (g/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Resistencia al flujo (kpas/m<sup>2</sup>)</b>
1400-4	40	1400	3,8
1200-2	20	1200	3,8
1000-4	40	1000	3,5
800-4	40	800	2,1
400-4	40	400	1,5
500-2	20	500	2,8
DURA	25	80kg/m <sup>3</sup>	16

Tabla 1. Materiales, espesores, densidades y resistencia al flujo.

### 3.2. APROXIMACIÓN MATEMÁTICA DEL COMPORAMIENTO DE PANELES PERFORADOS.

Se pretende obtener  $\alpha$  de un campo difuso de un material absorbente, realizando un barrido en ángulos de 0° a 90° en intervalos de 1°. Posteriormente realizar los cálculos según la norma UNE EN 12354-6 [13] detallada en el punto 2.3.2 que trata sobre la absorción sonora de materiales. En este caso nos centraremos en el estudio de los materiales fibrosos.

Una vez tenemos el valor de la resistencia al flujo de los distintos materiales a estudiar, se recalcula este mismo valor cuando tenemos un componente multicapa, es decir, la composición de dos materiales absorbentes de distintas impedancias:

<b>NOMBRE</b>	<b>MATERIALES</b>	<b><math>\sigma</math> (kpas/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Espesor (mm)</b>
1	400/600	2150	80
2	400/800	1800	80
3	400/1200	2650	80
4	600/800	2450	80
5	600/1200	3300	80
6	800/1200	2950	80
7	80	16000	25
8	80/400	8750	65

Tabla 2. Configuraciones multicapa de materiales.

Para realizar los cálculos se sigue el procedimiento según la teoría nombrada anteriormente en el punto 2.3.2. [14]

Los pasos que se han seguido han sido los siguientes:

1.- Partiendo de los valores de  $\rho_0$  (densidad del aire  $\approx 1,2 \text{ kg/m}^3$ ),  $f$  (frecuencia en hercios),  $c_0$  (velocidad del aire  $\approx 343 \text{ m/s}$ ) y  $r$  (resistencia al flujo del material en Pascales segundo por metro cuadrado), pasamos a calcular  $C$  y  $k_0$  de cada material (8 distintas configuraciones, de 1 a 8) y para cada tercio de octava respectivamente.

Para conocer el coeficiente de absorción, se ha elegido realizar este cálculo mediante MATLAB.

2.- Una vez conocidos  $C$  y  $k_0$  pasamos a definir los espesores de cada uno de los materiales o composición de materiales a estudiar:

```
clear;close all;clc;
load tabla.mat;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Definimos espesores de cada uno de los materiales %%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

d1=0.08;
d2=0.08;
d3=0.08;
d4=0.08;
d5=0.08;
d6=0.08;
d7=0.025;
d8=0.065;
```

3.- Posteriormente introducimos al programa los valores  $C$  y  $k_0$  de cada uno de los ocho materiales en tercios de octava:

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Leemos de la tabla los valores de freq, C y k0 %%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

freq=tabla(:,1);          % Frecuencia en tercios de octava
C1=tabla(:,2);           % material 400+800
k01=tabla(:,3);
ZC1=zeros(length(freq),1);
landa1=zeros(length(freq),1);

C2=tabla(:,4);           % material 400+600
k02=tabla(:,5);
ZC2=zeros(length(freq),1);
landa2=zeros(length(freq),1);
```

```
C3=tabla(:,6);           % material 400+1200
k03=tabla(:,7);
ZC3=zeros(length(freq),1);
landa3=zeros(length(freq),1);
```

Y así sucesivamente del material 1 al 8.

4.- En la normativa nos indica una condición de  $C$ , dependiendo de si  $C < 0.25$ ,  $0.25 < C < 80$  o  $C > 80$ , deberá calcularse los valores de  $Z'_c$  y  $\lambda$  según las ecuaciones 14.a, 14.b y 14.c definidas en la teoría, y así para cada uno de los materiales:

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%                               Condición de C                               %%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

for t=1:length(freq)
    if C1(t)<0.25
        ZC1(t) = (1+(0.114*(C1(t)^0.369))-i*(0.0985*(C1(t)^0.758)));
        landa1(t) =
k01(t)*(0.168*(C1(t)^0.715))+i*k01(t)*(1+(0.136*(C1(t)^0.494)));
    elseif C1(t)>80
        ZC1(t) = sqrt(11.1-i*(0.12*C1(t)));
        landa1(t)= i*k01(t)*1.35*ZC1(t);
    else
        ZC1(t) = (1+(0.0571*(C1(t)^0.754))-i*(0.087*(C1(t)^0.732)));
        landa1(t) =
k01(t)*(0.189*(C1(t)^0.595))+i*k01(t)*(1+(0.0978*(C1(t)^0.700)));
    end
end
```

5.- Una vez, obtenidos los valores de  $Z'_c$  y  $\lambda$ , se calcula la impedancia normalizada de la capa para cada material de reacción local directamente sobre una superficie acústica reflectante según la expresión:

```
Z1 = ZC1.*coth(landa1*d1); % Hay que poner.* ya que ZC landa son
vector                      % de esta manera, Z obtenido también un
vector
```

6.- Y seguidamente se realiza un barrido de ángulos de  $0^\circ$  a  $90^\circ$  en intervalos de  $1^\circ$ :

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Pretendemos obtener un campo difuso del material absorbente %%%
%%% por tanto, realizamos un barrido de ángulos de 0° a 90° en %%%
%%% intervalos de 1° %%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

phi_grados1 = [0:90];
phi_radian1 = phi_grados1*2*pi/360; % Para transformar los
grados en radian
r_phi1 = zeros(length(Z1),length(phi_radian1)); % Para inicializar la
matriz r_phi antes de usarla
```

7.- Se calcula el valor de  $r_\phi$  y  $\alpha_\phi$ :

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%
% Calculo de r_phi que es una matriz, porque a cada valor del vector
%
% Z corresponde 91 valores de r_phi (para todos los phi). Asi que al
final %
% tenemos una matriz de 18 líneas (que es el número de valor de Z) y de
91 %
% columnas (que es el número de valores de phi)
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%

for i=1:length(Z1)
    r_phil(i,:) = (Z1(i)*cos(phi_radian1)-1)./(Z1(i)*cos(phi_radian1)+1);
end

alpha_phil = 1-(abs(r_phil)).^2;

```

8.- Y realizamos el cálculo de la integral para obtener el valor total de  $\alpha_s$ :

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%
% Calculo del alpha_s, hay que tener en cuenta que una integral en el
%
% dominio continuo corresponde a una suma en el dominio discreto, dado
que %
% phi tiene valores discretos, hay que hacer una suma
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%

for i=1:length(Z1)
    alpha_s1(i) = pi/(2*91)*sum(alpha_phil(i,:).*sin(2*phi_radian1));
end

alpha_s1 = alpha_s1';          %Solo para transponer el vector

```

9.- Finalmente se representa mediante un gráfico el coeficiente de absorción de cada uno de los ocho materiales en un campo sonora difuso:

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%          Representamos grafico de absorcion          %%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

semilogx(freq,alpha_s1,'-y', freq,alpha_s2,'-m', freq,alpha_s3, ' -r',
freq,alpha_s4,' -b',freq, alpha_s5,' -g', freq, alpha_s6,' -c',freq,
alpha_s7, ' -o', freq, alpha_s8, ' -k');grid on
legend('400+800','400+600','400+1200','600+1200','800+1200','600+800','DURA','DURA+400',4)
xlabel('Frecuencia');ylabel('Coeficiente de absorcion');

```

```
title('Coeficiente de absorcion de materiales');
```

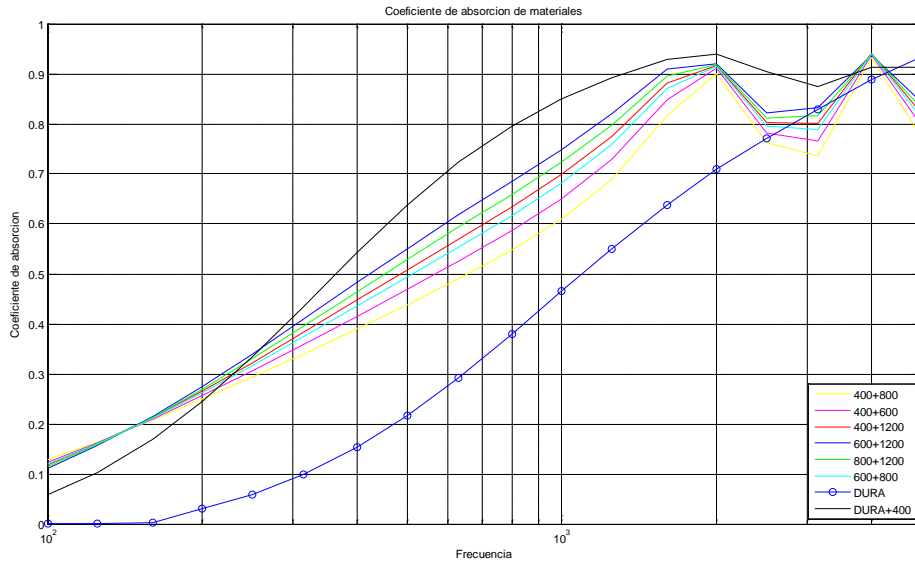


Fig.3.2. 1. Coeficiente de absorción de distintas combinaciones de materiales.

Como podemos observar en el gráfico los materiales multicapa, es decir, la combinación de dos materiales de distintas densidades, mejora el coeficiente de absorción sonora a bajas y medias frecuencias. Se puede ver claramente que el valor de la absorción de las combinación de materiales de menores densidades presenta mejor absorción que los materiales más densos (400+600, 1200+400,...), como en el caso del material DURA de 80 kg/m<sup>3</sup>.

De 250 Hz a 1250 Hz la combinación de los materiales DURA+400 es la que presenta mayor coeficiente de absorción sonora. En cambio a frecuencias menores de 250 Hz las combinaciones 400+600, 400+800, 400+1200, 600+800, 600+1200 y 800+1200 presentan una mayor absorción sonora que la combinación DURA+400, exactamente entre los valores de 0,1 y 0,3.

El coeficiente de absorción es menor a bajas frecuencias, pero se pretende que dentro de estas limitaciones, el material pueda presentar mejores coeficientes aunque continúen siendo bajos en comparación con los valores a medias frecuencias.

Cabe indicar y se puede comprobar en los gráficos que a mayor espesor, mayor absorción acústica independientemente de la densidad del materia.

A continuación vemos una comparación de la combinación del material de densidad 400g/m<sup>2</sup> con otros materiales de distintas densidades:



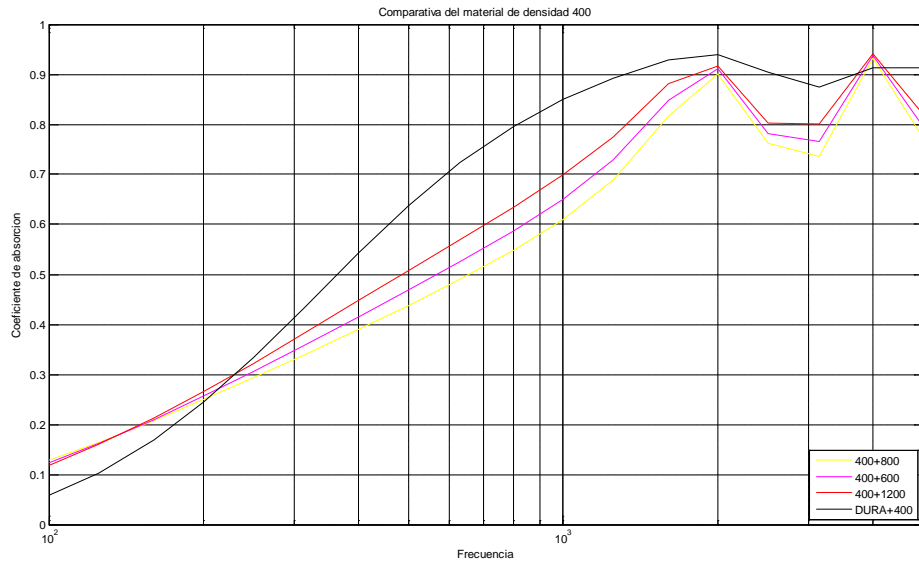


Fig.3.2. 2. Comparación de combinaciones con 400g/m<sup>2</sup>.

De las presentes configuraciones, comprobamos que la que presenta mejor absorción sonora en bajas y medias frecuencias es la combinación de materiales de densidades 400 y 1200 g/m<sup>2</sup>.

Lo mismo para la lana de poliéster de densidad 600 g/m<sup>2</sup>:

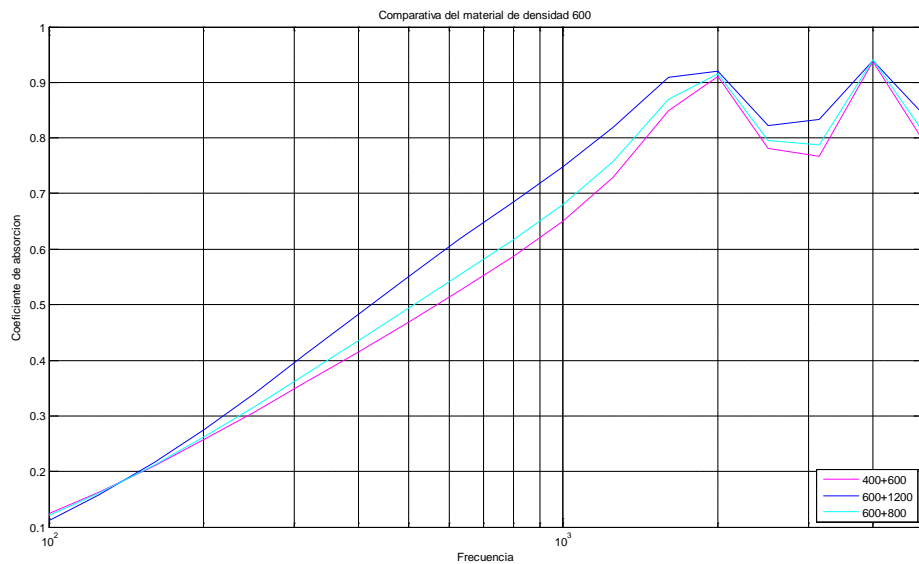


Fig.3.2. 3. Comparación de combinaciones con 600 g/m<sup>2</sup>.

Respecto configuraciones, comprobamos que la que presenta mejor absorción sonora es la compuesta por materiales de densidades 600 y 1200 g/m<sup>2</sup>.

El material de densidad 800 g/m<sup>2</sup>:

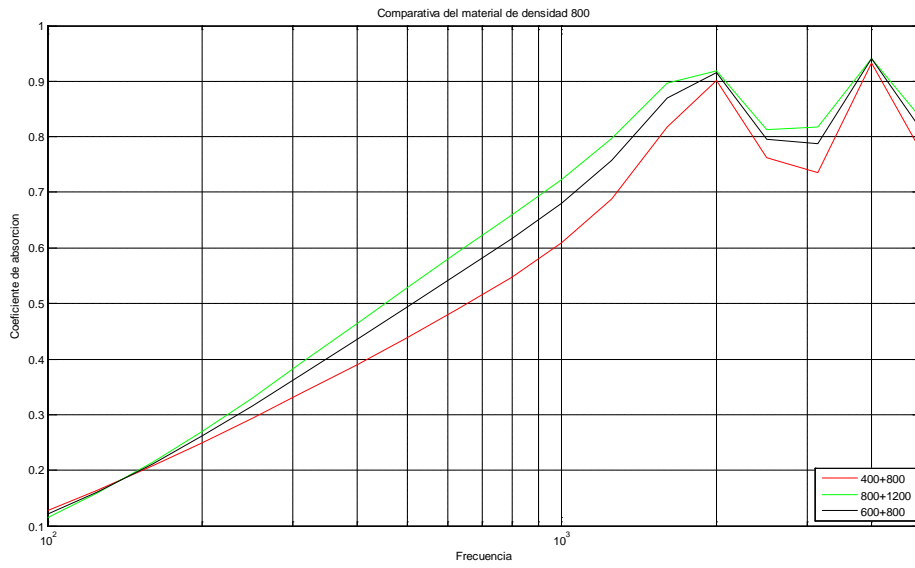


Fig.3.2. 4. Comparación de combinaciones con 800 g/m<sup>2</sup>.

Comprobamos que la que presenta mejor absorción sonora es la compuesta por materiales de densidades 800 y 1200 g/m<sup>2</sup>.

El material de densidad 1200 g/m<sup>2</sup>:

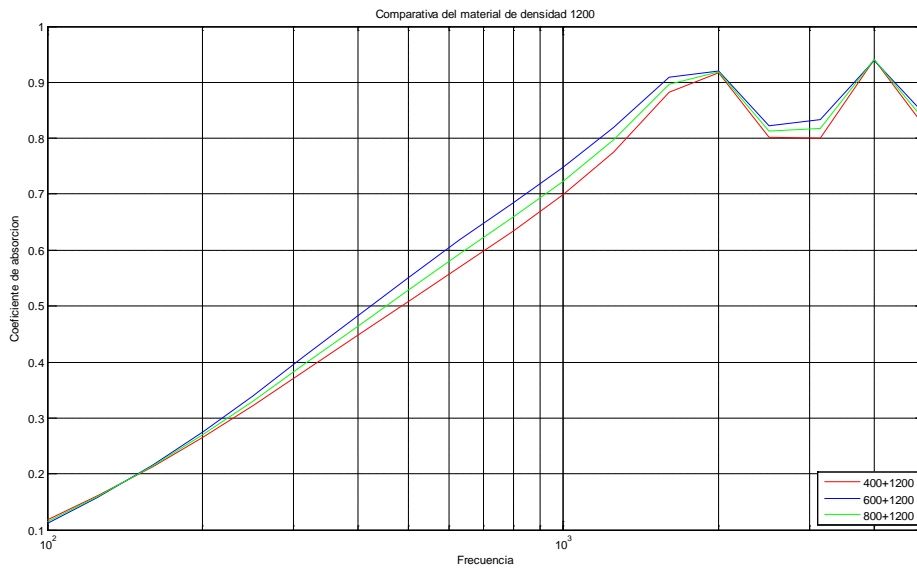


Fig.3.2. 5. Comparación de combinaciones con 1200 g/m<sup>2</sup>.

La que presenta mejor absorción sonora es la compuesta por materiales de densidades 600 y 1200 g/m<sup>2</sup>.

Material llamada DURA de densidad  $80 \text{ kg/m}^3$ :

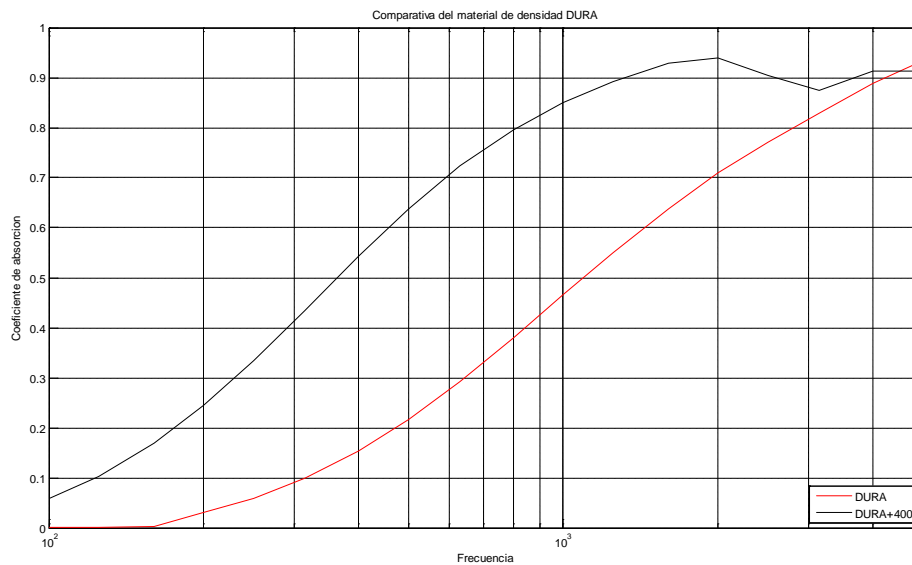


Fig.3.2. 6. Comparación de combinaciones con material DURA ( $80 \text{ kg/m}^3$ ).

Respecto a las configuraciones con material DURA, comprobamos que la que presenta mejor absorción sonora es la composición de DURA+400 además también porque su espesor es mucho mayor que el de la configuración con una capa de material DURA.

### 3.3. ENSAYOS EN CÁMARA REVERBERANTE.

Los ensayos en cámara reverberante se utilizan para medir la absorción en situaciones de incidencia aleatoria. El principio de funcionamiento se basa en medir el tiempo de reverberación antes y después de colocar una muestra de material en la cámara reverberante. El hecho de que se trabaje con campo sonoro difuso le proporciona a este método un mayor ajuste a la realidad.

Para la medición del coeficiente de absorción de un material en cámara reverberante según UNE-EN 1793-1:1998 [3] que hace referencia a “Dispositivos Reductores de ruido. Método de ensayo para determinar el comportamiento acústico. Parte 1: Características intrínsecas relativas a la absorción” se indica para el cálculo del coeficiente de absorción sonora ( $\alpha$ ) de pantallas acústicas se calcula o evalúa en cámara según el método descrito en la norma UNE-EN ISO 354:2004 [15] de Medición de la absorción acústica en cámara reverberante y se sigue el procedimiento siguiente:

Realizamos cálculos comparativos del coeficiente de absorción de distintas configuraciones de materiales para pantallas, ya que poseemos solamente de aproximadamente  $3\text{m}^2$  de muestra y la norma UNE EN ISO 12354-6 [13] indica que se debe de medir con unos  $10$  o  $12\text{m}^2$ .

Partiendo de 4 pantallas como las de la figura 3.3.1, cada una de las pantallas tiene una superficie de  $0,745\text{m}^2$  con lo cual la superficie total de la muestra es de  $2,98\text{m}^2$ . Cada una de las pantallas metálicas está formada por una chapa de  $0,05\text{mm}$  de espesor. Una de las caras es ciega y la otra dispone de perforaciones de  $3, 4, 5$  y  $6\text{mm}$  de diámetro dispuestas al tresbolillo, separadas  $3\text{mm}$  entre sí. La pantalla tiene un espesor total de  $80\text{mm}$  en el cual introducimos la lana de poliéster.

Utilizamos cinco lanas de poliéster reciclado de distintas densidades y espesores las cuales se expresan en la siguiente tabla:

Materiales	Espesor
$400\text{g/m}^2$	$40\text{mm}$
$600\text{g/m}^2$	$40\text{mm}$
$800\text{g/m}^2$	$40\text{mm}$
$1200\text{g/m}^2$	$40\text{mm}$
$80\text{kg/m}^3$ (DURA)	$25\text{mm}$

Tabla 3. Esquema de materiales.

De estos materiales, elegimos realizar varias combinaciones a introducir dentro de la pantalla, ya que es mejor una combinación de impedancias, además se tiene en cuenta en cada una de estas combinaciones situar el material de mayor densidad pegado a la cara perforada de la pantalla:

Materiales	Espesor TOTAL
$400+600$	$80\text{mm}$
$400+800$	$80\text{mm}$
$400+1200$	$80\text{mm}$
$600+800$	$80\text{mm}$
$600+1200$	$80\text{mm}$
$800+1200$	$80\text{mm}$

DURA+cámara aire	25 + 55 mm
DURA+400+cámara aire	65 + 15 mm

Tabla 4. Espesores totales de configuración multicapa.

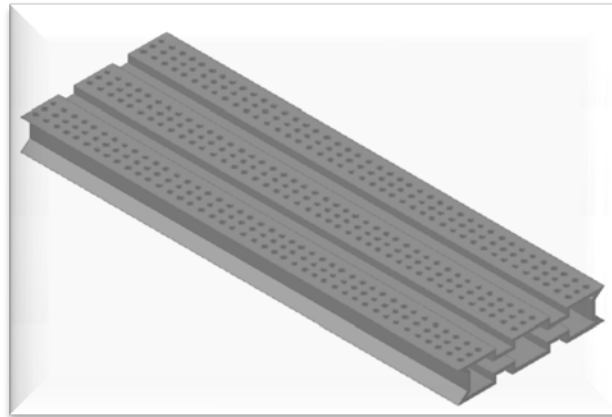


Fig.3.3. 1. Forma de las pantallas.

La medida se llevó a cabo con el siguiente equipo:

- Micrófonos de ½" type 4189 de Brüel & Kjaer.
- Fuente sonora 4296 óptima de Brüel & Kjaer tipo.
- Sonómetro 2250 Bruel & Kjaer.
- Cámara reverberante de la EPSG con un volumen de 238 m<sup>3</sup>.

El montaje fue el de la siguiente figura:

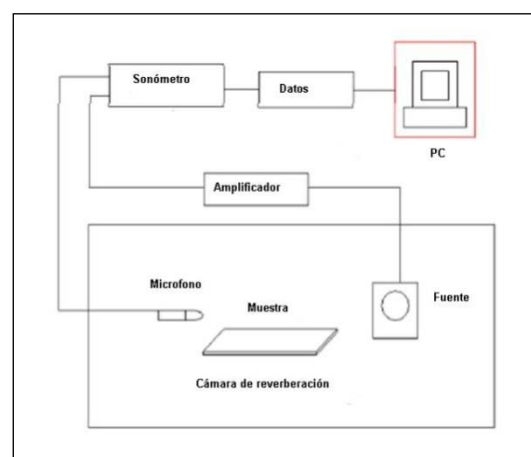


Fig. 3.2.2. Montaje

Primero según la norma UNE-EN ISO 354 [16] para cada medición se debe tener en cuenta que mediante la fuente de sonora con patrón de radiación omnidireccional se emite una señal de ruido

interrumpida y deben emplearse como mínimos dos posiciones de fuente que disten por lo menos 3 metros entre sí. Posteriormente medir el tiempo de reverberación en cámara vacía teniendo en cuenta que la característica directiva de los micrófonos empleados por las mediciones deben ser omnidireccionales y que las mediciones deben realizarse en 6 posiciones distintas de micrófono para cada posiciones de fuente y equiespaciadas entre sí 1,5 metros, 2 m de cualquier fuente sonora y 1m de la superficie de la cámara.



Fig.3.3.3.a. Posiciones de micro y fuente en cámara vacía

Fig.3.3.3.b. Posiciones de micro y fuente en cámara vacía

Seguidamente se introduce el material absorbente dentro de las placas metálicas y se introducen en la cámara reverberante según especifica la norma y se repiten las mediciones del tiempo de reverberación con el material dentro de la cámara de reverberación como se han hecho con la cámara vacía:

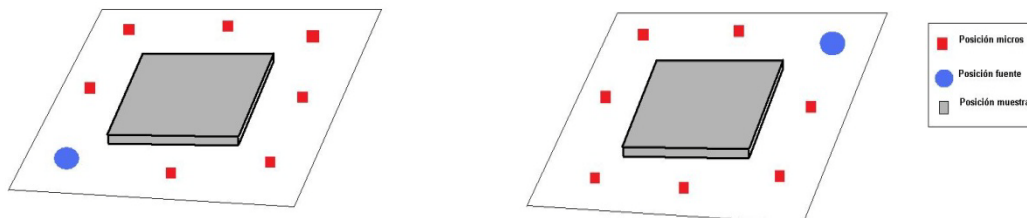


Fig.3.3.4.a. Posiciones de micro y fuente en cámara llena

Fig.3.3.4.b. Posiciones de micro y fuente en cámara llena

Seguidamente se presentan imágenes ilustrativas del montaje de medición en el interior de la cámara reverberante:

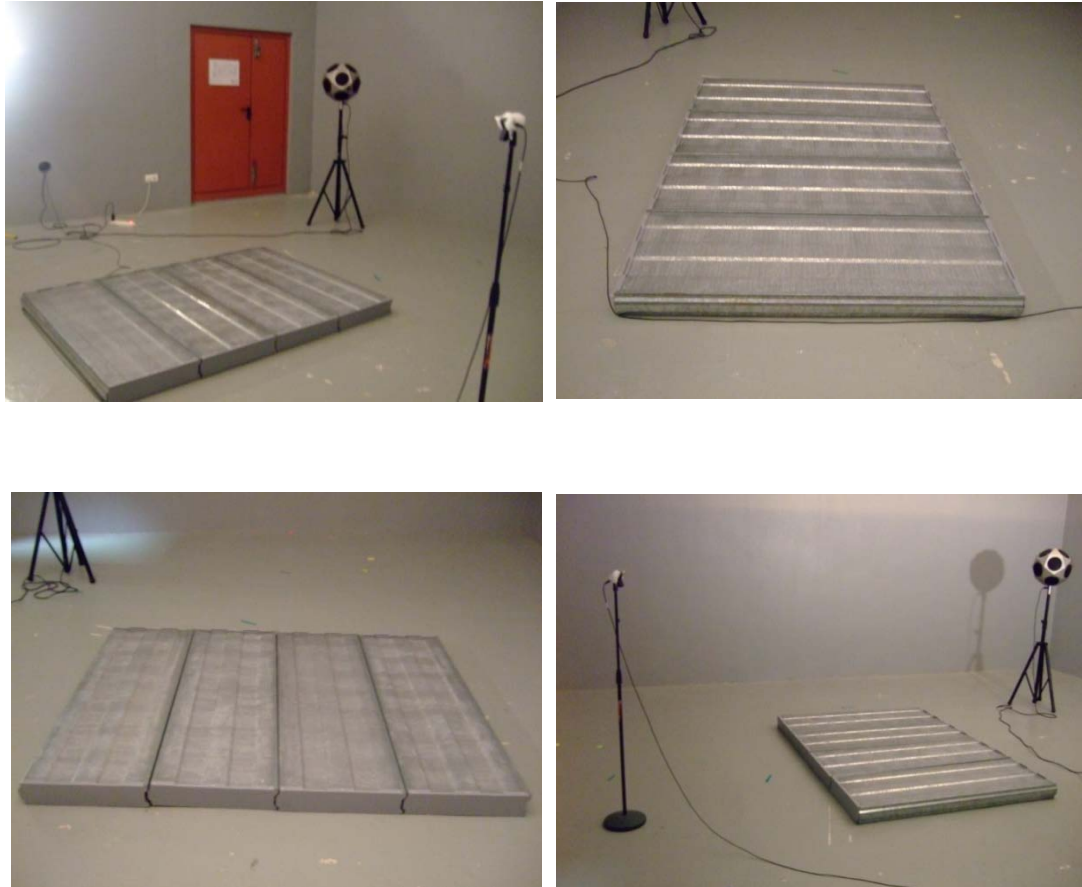


Fig.3.3. 5. Montaje en cámara.

La siguiente imagen podemos ver como se introducía la lana de poliéster en la pantalla, además esta es la medida de DURA+400. Se puede ver claramente que queda una capa pequeña de cámara de aire:



Fig.3.3. 6. Lana de poliéster dentro de pantalla

En cada una de las medidas que se hicieron se midió tanto la temperatura como la humedad que hay dentro de la cámara vacía y con la muestra, T1 y H1 (vacía) y T2 y H2 (con muestra). T1 rondaba entre 25'4 y 26'3°C, T2 entre 25 y 25'5 °C. H1 entre 70'1 y 70'4 % y H2 entre 72'5 y 75'2 %.

Una vez obtenidos los datos de las ocho composiciones de materiales elegidas, conocidos sus valores equivalentes de resistencia al flujo, y obtenidos los valores del tiempo de reverberación en cámara vacía y llena para cada una de ellas, se procede a calcular el coeficiente de absorción de cada una de las muestras según el procedimiento que indica la normativa:

1.- Cálculo de los tiempos de reverberación, T<sub>1</sub> y T<sub>2</sub> de la cámara en cada banda de frecuencia en tercios de octava y se expresa con la media aritmética del total de mediciones de tiempo de reverberación realizadas en cada banda.

2.- Cálculo del área de absorción sonora equivalente, A<sub>1</sub>, en metros cuadrados, de la cámara reverberante vacía, y A<sub>2</sub> en cámara llena, según la fórmula [16]:

$$A_1 = A_2 = \frac{55,3V}{cT_{12}} \quad (\text{ec.16})$$

donde

V es el volumen, e metros cúbicos, de la cámara reverberante vacía;

c es la velocidad de propagación del sonido en el aire, en metros por segundo;

T<sub>1</sub> y T<sub>2</sub> es el tiempo de reverberación, en segundos, de la cámara reverberante vacía y llena respectivamente.

3.- A<sub>1</sub> tener A<sub>1</sub> y A<sub>2</sub> pasamos a calcular A<sub>T</sub>:

$$A_T = A_2 - A_1 \quad (\text{ec.17})$$

A<sub>T</sub> es el área de absorción sonora equivalente, en m<sup>2</sup>;

4.- Y se calcula el coeficiente de absorción sonora  $\alpha_s$  de un absorbente plano debe calcularse mediante la fórmula:

$$\alpha_s = \frac{A_T}{S} \quad (\text{ec.18})$$

donde

S es el área, en m<sup>2</sup> de la muestra de ensayo.



Pues el resultado que obtenemos de la absorción sonora de las ocho distintas combinaciones de pantallas es:

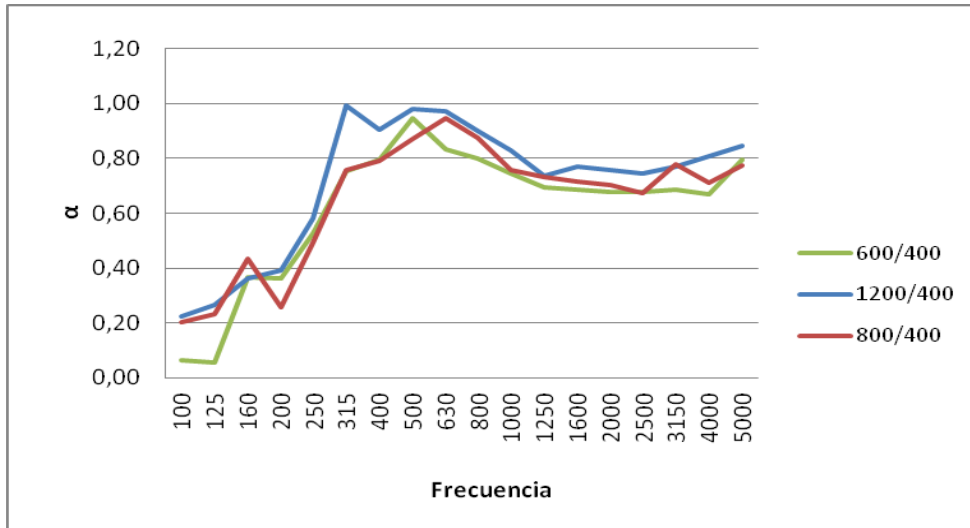


Fig.3.3.7. Comparación de combinaciones de 400 g/m<sup>2</sup>

Como se puede comprobar en el gráfico, la configuración de 1200/400 es la que produce mayor absorción.

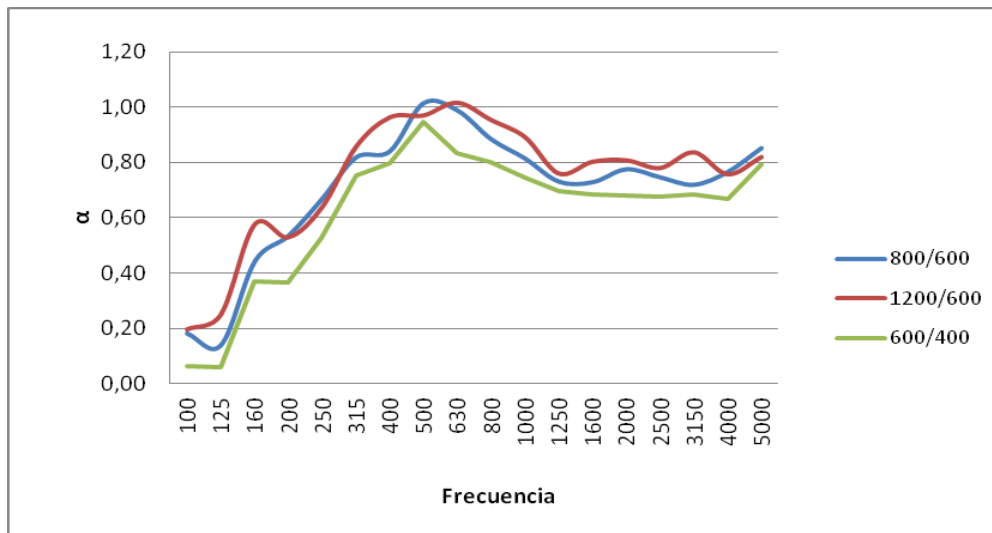


Fig.3.3.8. Comparación de combinaciones de 600 g/m<sup>2</sup>

Como se puede comprobar en las configuraciones que contiene un material de 600g/m<sup>2</sup> de densidad, la que presenta mejor absorción es: 1200/600 g/m<sup>2</sup>, además que presenta buena absorción a bajas frecuencias, con lo cual esto nos interesa.

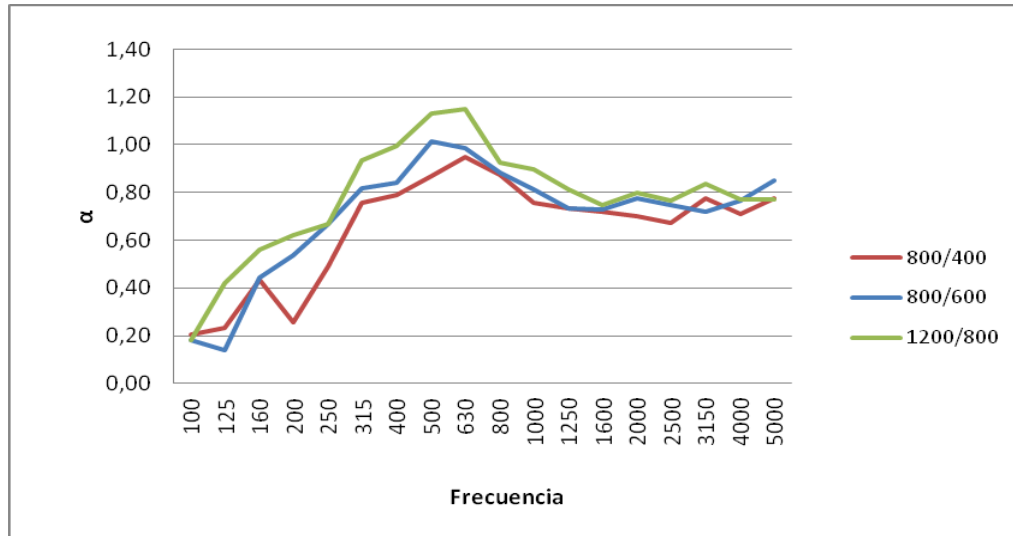


Fig.3.3.9. Comparación de combinaciones de 800 g/m².

Como se puede comprobar en las configuraciones que contiene un material de 800g/m² de densidad, la que presenta mejor absorción es: 1200/800 g/m², lo mismo que en el anterior, buena absorción entre 100 y 250 Hz.

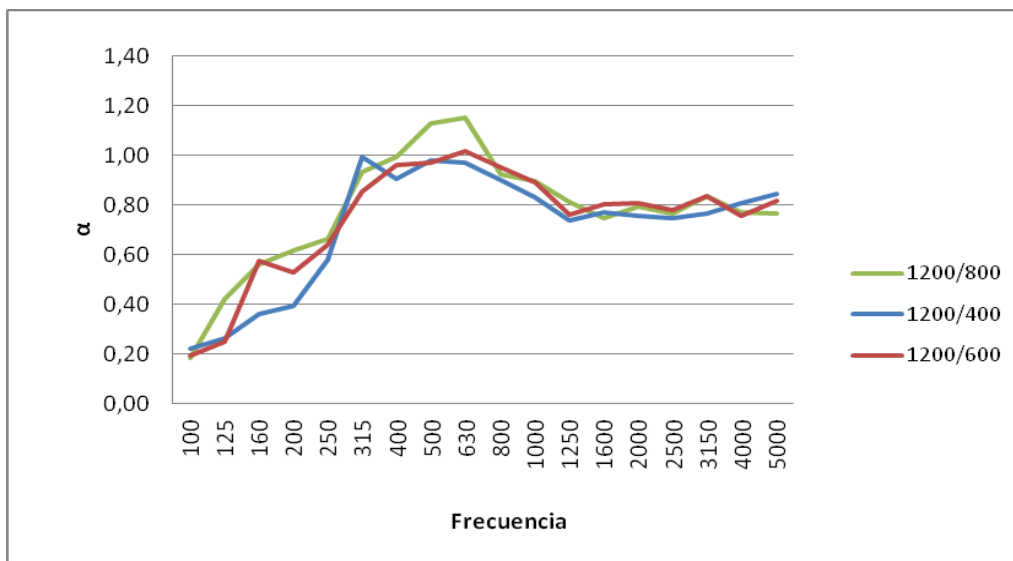


Fig.3.3.10. Comparación de combinaciones de 1200 g/m².

Como se puede comprobar en las configuraciones que contiene un material de 1200g/m² de densidad, la que presenta mejor absorción es: 1200/800 g/m².

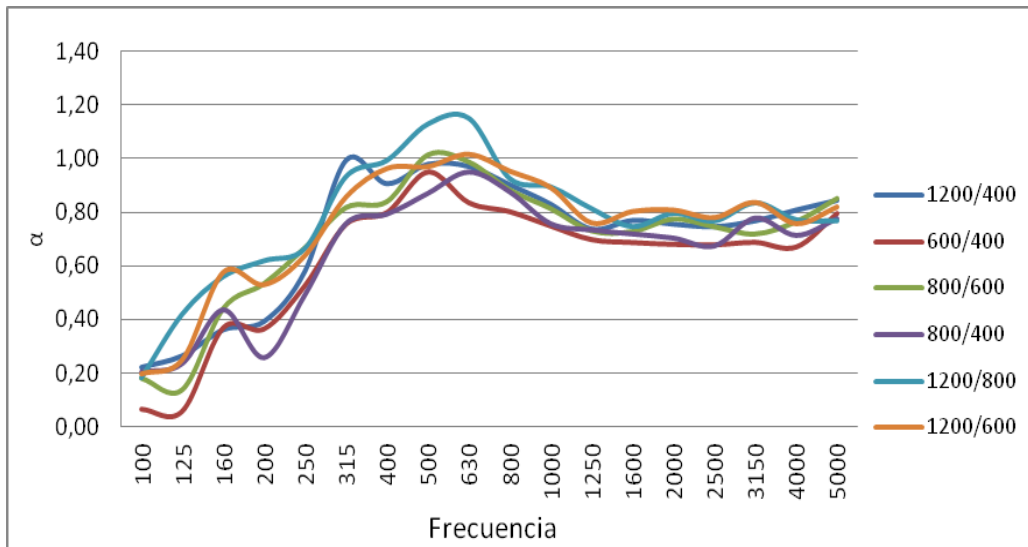


Fig.3.3.11. Comparación de combinaciones sin cámara de aire, espesor del material 8 cm.

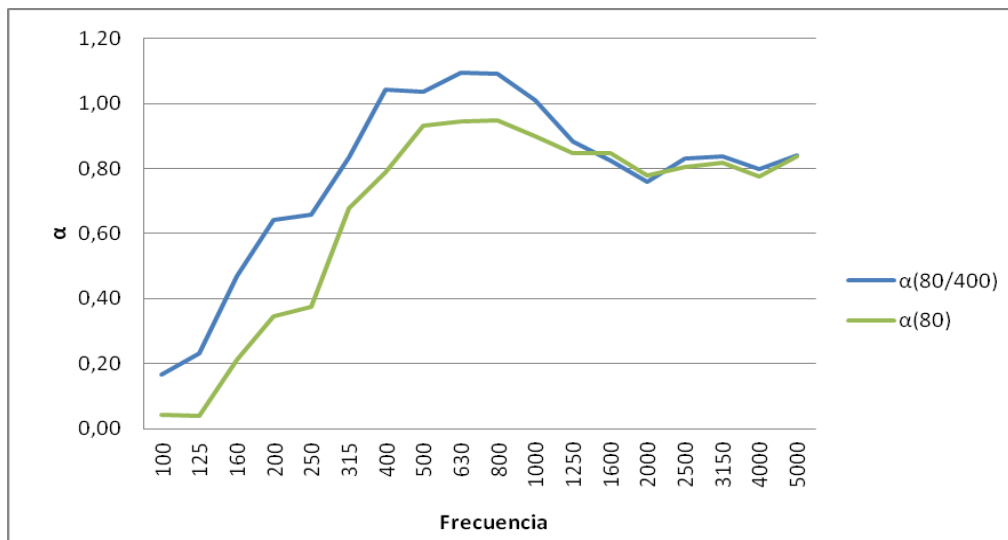


Fig.3.3.12. Comparación de combinaciones de DURA (80 Kg/m<sup>3</sup>) + cámara de aire.

Se puede comprobar que la combinación de DURA+400+cámara de aire (25+40+15) presenta una mayor absorción que si en cambio solo utilizamos el material DURA+cámara de aire (25+15).

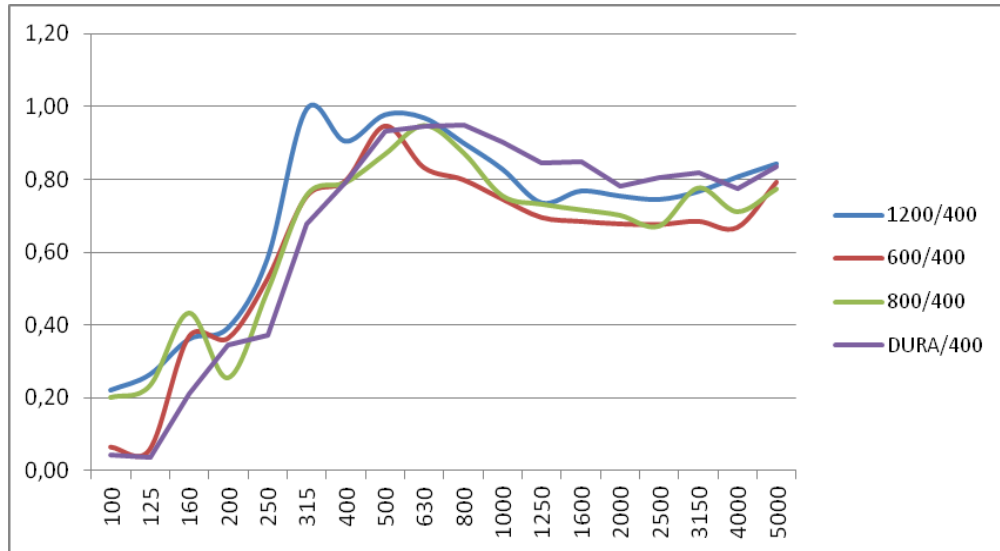


Fig.3.3.13. Comparación de todas las combinaciones de 400g/m<sup>2</sup>.

Como se ve claramente en el gráfico, la combinación 1200+400 es la que presenta mejor absorción a bajas y medias frecuencias.

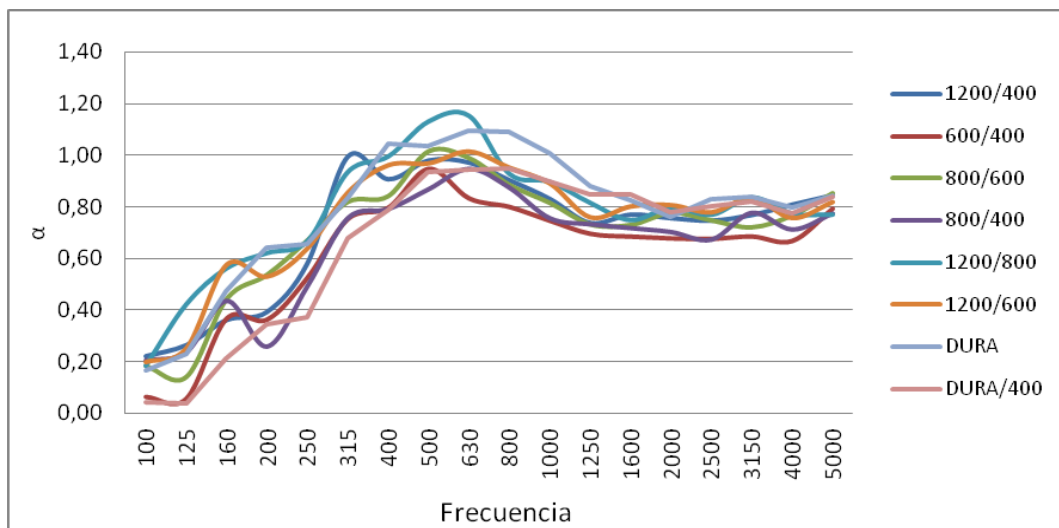


Fig.3.3.14. Comparación de las ocho distintas combinaciones medidas.

Al realizar una comparación de las ocho distintas configuraciones multicapa medidas, comprobamos que la mejor de estas es la combinación de los materiales de densidades 1200+800.

### 3.4. ENSAYOS MEDIANTE SOFTWARE PERF.

En este apartado se pretende obtener el valor del coeficiente de absorción de un material o combinación de materiales introducido/s en un panel metálico (pantalla acústica) en el cual una de sus caras es una pared perforada (el material de mayor densidad siempre irá pegado a la pared perforada y si solamente utilizamos un material lo pegaremos también a la pared perforada de la pantalla). Por tanto, para el cálculo, se tendrán en cuenta tanto la teoría sobre resonador múltiple de cavidad (Helmholtz) a base de paneles nombrada en el punto 2.3.1 de esta tesina.

Para ello se han tenido en cuenta las características tanto de la pantalla acústica como de la lana o lanas de poliéster utilizadas en las mediciones en cámara reverberante, para posteriori, poder comparar ambas mediciones.

1.- Principalmente se tiene en cuenta que la medición del apartado anterior se realizó con 4 pantallas de  $0,745 \text{ m}^2$  de superficie y por tanto de una superficie global de aproximadamente  $3 \text{ m}^2$ . Además las pantallas metálicas presentan unas perforaciones por una de sus caras las cuales tienen unas distancias entre agujeros de 3 cm (d), el radio de estas perforaciones es de 0,05 cm (a) y el espesor total del interior de la placa metálica es de 8 cm (L). El espesor total del material utilizado, dependiendo de que configuración (b) en cm, el espesor total de la cámara de aire, dependiendo de si tiene o no (C) en cm, y por último sigma que es la resistencia al flujo del material absorbente en  $\text{Pas/m}^2$ .

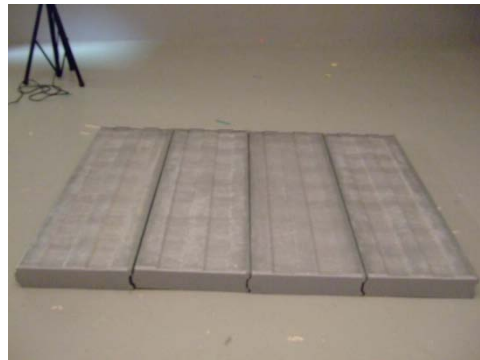


Fig. 3. 4. Muestra de pantalla

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Cálculo del coeficiente de absorción de pantallas acústicas %%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
function alfa=PERF_Eva(d,a,L,b,C,sigma, caso)
```

```
freq=[100 125 160 200 250 315 400 500 630 800 1000 1250 1600 2000 2500
3150 4000 5000];
r0=1.29; % Densidad del aire
c0=343; % Velocidad de propagación en el aire
```

```

p=pi*a^2/(d^2);           % Porcentaje de las perforaciones (en tanto
por uno)
delta=L+1.6*a;           % delta => D'
                           % L => D: espesor del panel (coincide con la
                           % longitud de los orificios en cm)
f0=5480*sqrt(p/(delta*d)); % f0 de resonados de cavidad múltiple
Z0=r0*c0;

```

2.- Se han tenido en cuenta solamente los casos de pantallas que se han medido en cámara reverberante.

```

if caso==1
    R=sigma*b/p;           % Si es panel+abs+cámara aire

elseif caso==2           % Si es panel+resistencia al flujo genérica
    R=sigma*C;           % (material de 2 impedancias distintas)

end

```

Para las configuraciones de los materiales de densidades, 400, 600, 800 y 1200 g/m<sup>2</sup>, se eligió el caso 2, ya que introducimos al cálculo una resistencia al flujo equivalente de dos materiales de distintas densidades, es decir, sigma global (resistencia al flujo global) y para las combinaciones con cámara de aire y material DURA y DURA + 400 se eligió el caso 1.

3.- Posteriormente se calcula el coeficiente de absorción según la siguiente ecuación:

$$\alpha = \frac{4r}{(1+Ran)^2 + \left( \frac{\gamma}{\tan(ck_0)} - \frac{1}{\tan(\gamma ck_0)} \right)^2} \quad (\text{ec. 19})$$

```

Ran=R/Z0;                % Normalizamos R
k0=2*pi*f0/c0;          % Obtenemos valor de k0

f=zeros(length(freq),1);
for i=1:length(f)       % Recorremos el vector de frecuencias

    gamma(i)=freq(i)./f0;
    alfa(i)=4*Ran/((1+Ran).^2+(gamma(i)/tan(k0*C)-
1/(tan(gamma(i)*k0*C))).^2);

end

                           % Calculamos alfa según
                           % alfa = (4*r)/{[(1+r)^2]+(X^2)}

```

4.-Y por último, se puede ver el resultado en cada una de las combinaciones distintas en las siguientes gráficas.

```

semilogx(freq,alfa);grid on
legend('alfa',4)

```

```
xlabel('Frecuencia');ylabel('Coeficiente de absorcion');
```

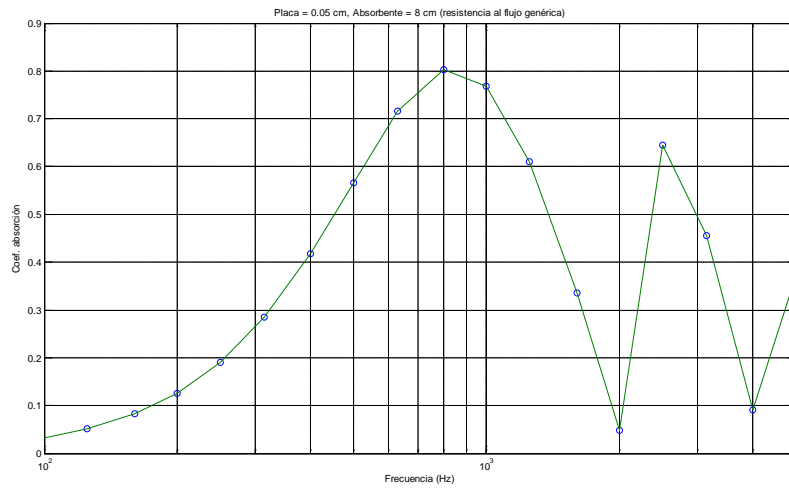


Fig. 3.4.2. Configuración material 1, combinación de lana de poliéster de 400 y 600  $\text{g/m}^2$ .

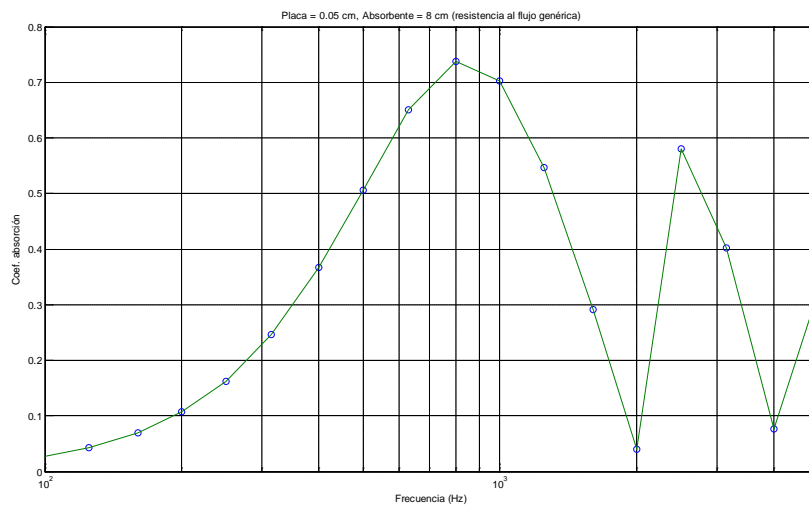


Fig. 3.4.3. Configuración material 2, combinación de lana de poliéster de 400 y 800  $\text{g/m}^2$ .

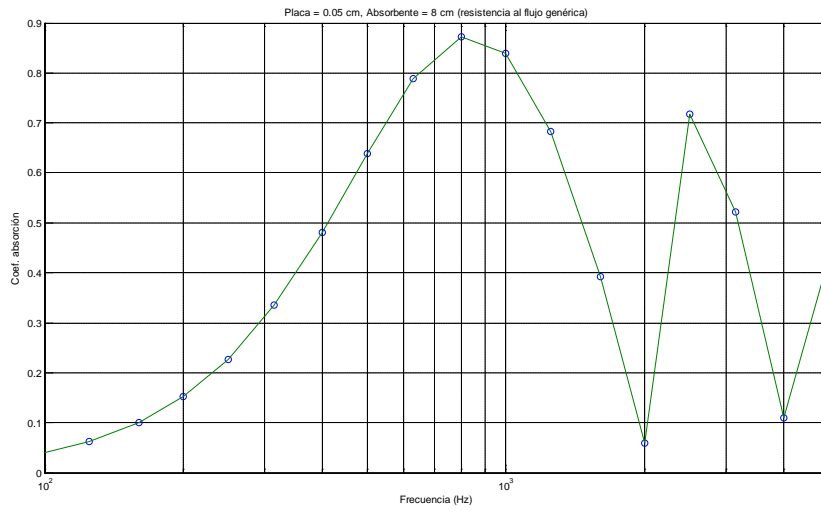


Fig. 3.4.4. Configuración material 3, combinación de lana de poliéster de 400 y 1200 g/m<sup>2</sup>.

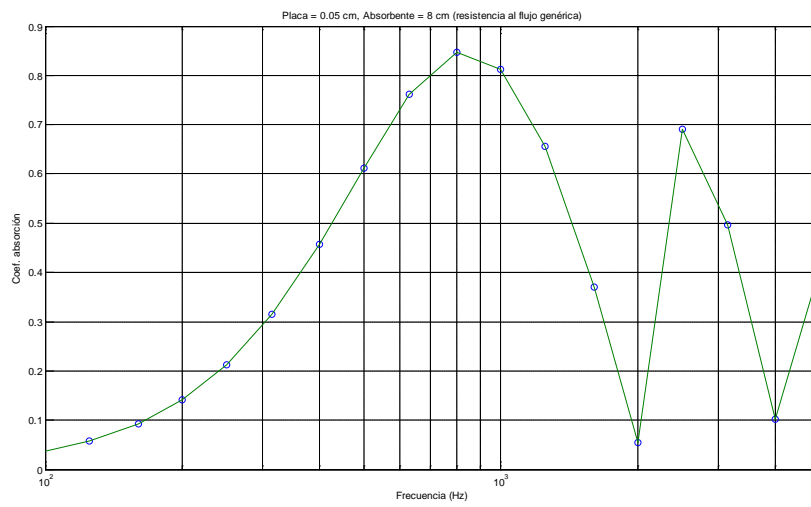


Fig. 3.4.5. Configuración material 4, combinación de lana de poliéster de 600 y 800 g/m<sup>2</sup>.



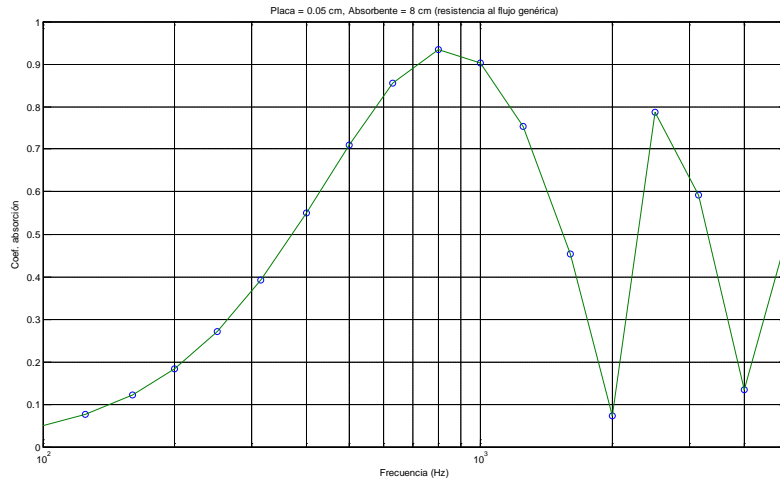


Fig. 3.4.6. Configuración material 5, combinación de lana de poliéster de 1200 y 600 g/m<sup>2</sup>.

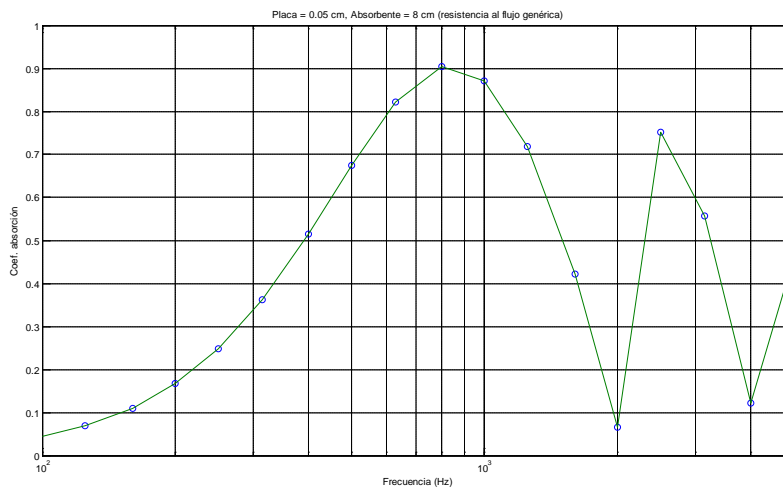


Fig. 3.4.7. Configuración material 6, combinación de lana de poliéster de 800 y 1200 g/m<sup>2</sup>.

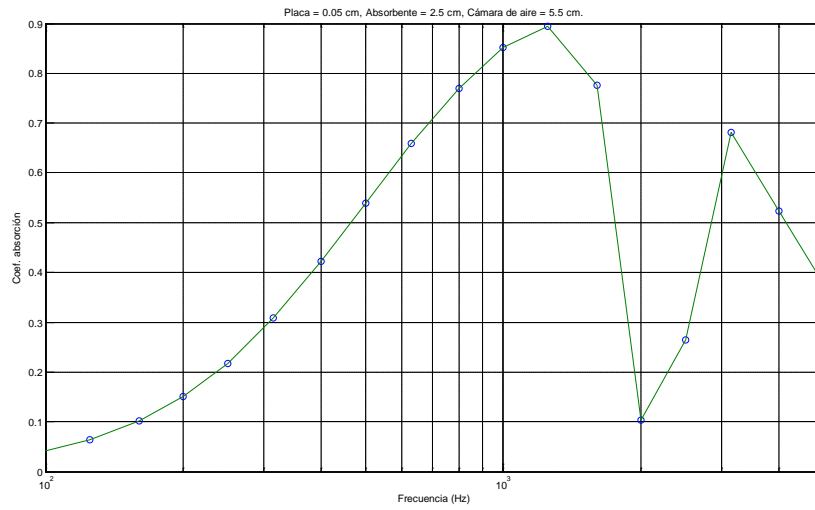


Fig. 3.4.8. Configuración material 7, combinación de lana de poliéster de 80 Kg/m<sup>3</sup>.

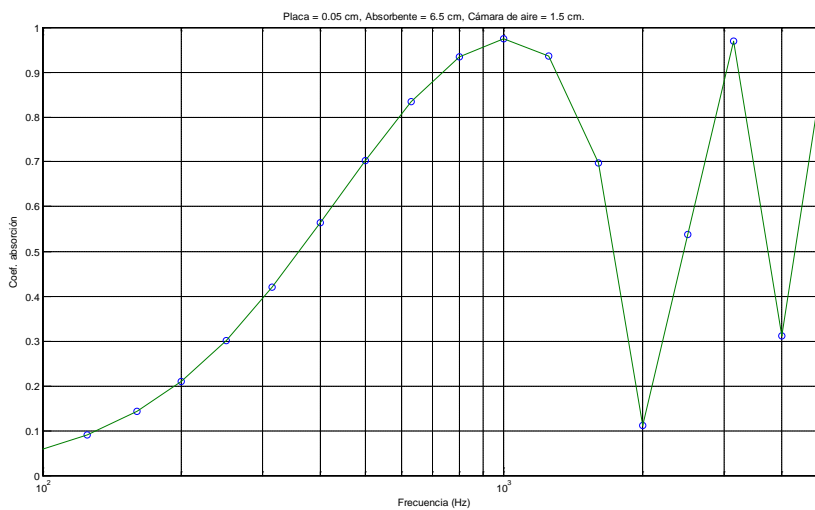


Fig. 3.4.9. Configuración material 8, combinación de lana de poliéster de DURA y 400 g/m<sup>2</sup>.

## 4. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

### 4.1. CONCLUSIONES DE LA TESINA

A lo largo del trabajo expuesto en esta memoria, se han visto algunos de los métodos de los que se pueden disponer para la caracterizar el comportamiento acústico de materiales, en concreto la resistencia específica al flujo y el coeficiente de absorción.

Asimismo, también son varios los métodos de medida experimentales estudiados para obtener esos parámetros. De los métodos presentados en este trabajo, se ha centrado la atención en la estimación del coeficiente de absorción de patallas acústicas de panel perforado con varios materiales absorbentes reciclados.

Respecto al punto 3.2 del cálculo de la absorción sonora de materiales mediante la norma UNE EN-ISO 12354-6 [14], se ha llegado a la conclusión de que es un buen método para poder conocer de forma aproximada el comportamiento de la absorción en campo difuso de un material; y así no tener la necesidad de cada vez que queramos realizar una búsqueda de cuanto absorbente es un determinado material tener que realizar tantas mediciones *in situ* como de materiales disponemos.

En cuanto a la parte experimental en cámara reverberante, son diversas las mediciones que se ha realizado mediante la combinación de materiales de distintas densidades, de donde llegamos a la conclusión que de las ocho configuraciones elegidas, la que presenta mejor absorción a bajas y medias frecuencias es la compuesta por lanas de poliéster de densidades 1200 y 600 g/m<sup>2</sup>. Además se ha verificado que absorbe más una combinación de materiales de distintas impedancias que simplemente un material de unas determinadas características.

Si se visualiza de forma general los tres métodos utilizados para el cálculo de la absorción mediante gráficos comparativos (solamente la combinación de materiales obtenido mediante la norma UNE EN-ISO 12354-6 [14], combinación de materiales introducidos en las pantallas y estimación mediante la aplicación PERF), se puede comprobar que los tres métodos son fiables, ya que los valores de los coeficientes de absorción se aproximan, sobre todo en el rango de 200 a 1000 Hz, que son las frecuencias que tienen mas importancia para el uso de pantallas acústicas.

Los siguientes gráficos, indican que al combinar dos materiales de distintas densidades (punto 2.3 de este documento) se puede hacer una estimación del coeficiente de absorción que podría tener en la realidad sin necesidad de realizar el montaje y mediciones de este valor en cámara reverberante (según indica la norma) o incluso *in situ*.

Posteriormente, al introducir la combinación de materiales en la pantalla metálica de panel perforado y teniendo en cuenta las características de este panel, se puede aproximar,

matemáticamente, el valor del coeficiente de absorción que puede tener la pantalla junto con el material, en este caso, lana de poliéster. Se comprueba que el método es válido para el cálculo de este dato, ya que como se ve en los gráficos, se aproxima bastante a los valores de absorción medido en cámara reverberante.

Cabe indicar que la  $f_0$  obtenida mediante el PERF es aproximadamente la  $f_0$  obtenida mediante las mediciones en cámara reverberante dividida por el factor 1,4. Por tanto, aunque a simple vista no parezca que sea correcto, si lo es por la teoría de paredes dobles donde indica que la  $f_{0d}$  en campo difuso es 1,4 por  $f_0$ . donde  $f_{0d}$  es la obtenida por PERF y  $f_0$  por la medidas de cámara:

$$f_{0d} = \frac{f_0}{\cos 45^\circ} \approx 1,4f_0 \quad (\text{ec.20})$$

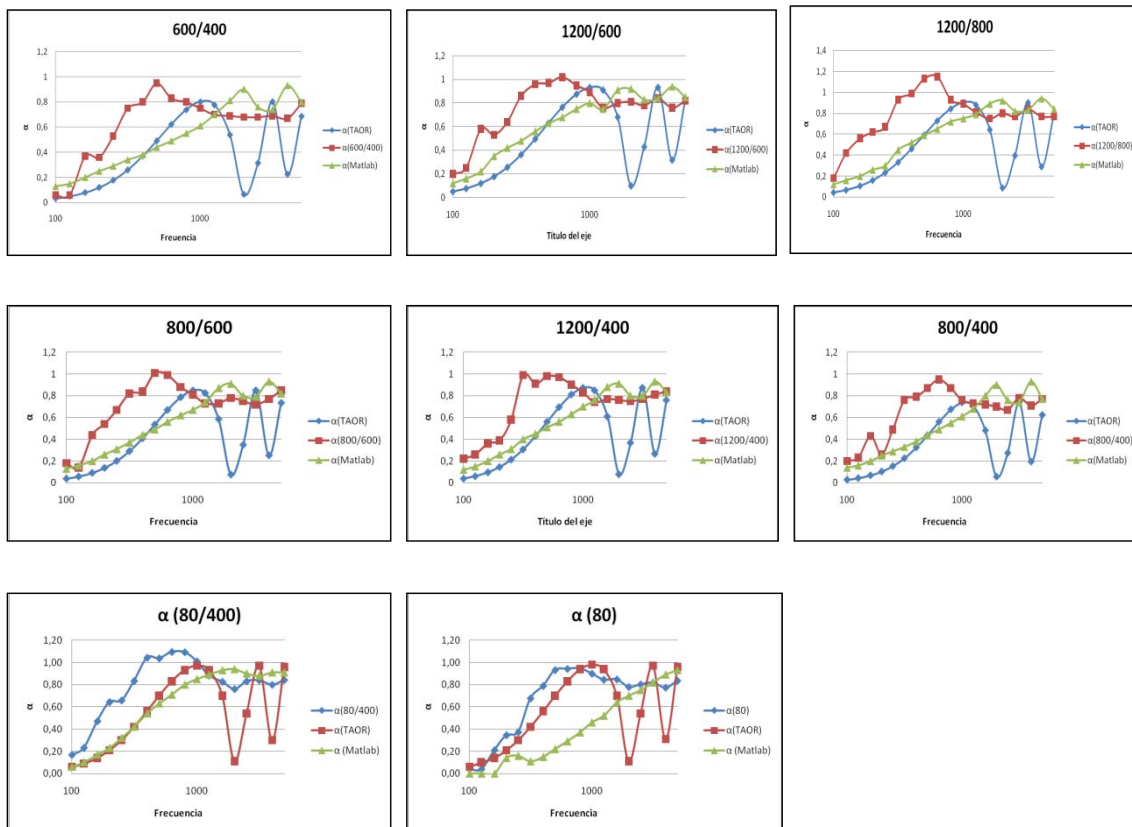


Figura 4.1- Comparativas de los tres métodos.

Como conclusión general indicar y recalcar que sin la necesidad de realizar mediciones *in situ*, se puede obtener un coeficiente de absorción sonoro aproximado y así poder testar distintos tipos de materiales absorbentes reciclados sin la necesidad de tener que medirlos todos en la cámara reverberante. Y posteriormente solo medir los que realmente nos interesan.

## 4.2. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

### 4.2.1. Simulación mediante elementos finitos.

Una de las propuestas es intentar ver el comportamiento que puede tener un panel perforado mediante elementos finitos, es decir, dibujar un panel perforado como el utilizado para realizar las mediciones en 2D o incluso en 3D y estudiar el comportamiento que puede tener este al emitir una fuente de ruido a una cierta distancia de la pantallas y a una cierta altura del suelo.

Realizar un recinto alrededor de la pantalla e indicar que será una PML para simular en campo libre y así evitar que existan reflexiones.

Además, si tenemos los valores de la resistencia al flujo de los materiales, podríamos obtener el valor de la impedancia de cada material para distintas frecuencias o para una frecuencia en concreto (la que nos interese, en este caso bajas y medias frecuencias), y así poder simular y visualizar el comportamiento de absorción que puede tener este material y compararlo con los datos medidos *in situ* en la cámara reverberante o los obtenidos mediante el software PERF.

Utilizando como pantallas acústicas la composición de un difusor, en el caso que estudiamos anteriormente, un panel perforado junto con unas características de material pegado a la cara perforada de la pantalla.

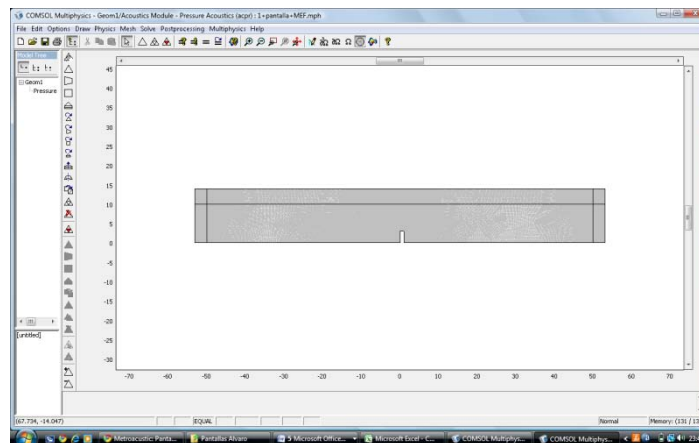


Figura 4.2.- Simulación de una pantalla en un recinto con paredes de PML para que no produzcan reflexiones mediante COMSOL.

### 4.2.2. Propuesta de estudio de las reflexiones

Según un artículo que trata sobre el estudio del índice de reflexión de pantallas acústicas basado en materiales reciclados [17], una de las principales medidas correctoras del ruido asociado a una determinada infraestructura se basa en las actuaciones sobre la propagación del sonido mediante

pantallas acústicas. Existen varias normativas internacionales donde se especifican las características acústicas relevantes de los distintos dispositivos reductores de ruido de tráfico ya nombradas en el punto 2.2 de normativas. Sin embargo, las únicas magnitudes acústicas que contemplan son la absorción sonora y el aislamiento a ruido aéreo. Tratar el índice de reflexión sonora de barreras, puede ser de interés para el efecto del aumento de la reflexiones y por tanto del posible incremento del ruido ambiente o ruido de fondo.

El índice de reflexión sonora de barreras no se suele especificar en las características de las barreras, sin embargo este índice es importante desde el punto de vista acústico ya que los niveles de ruido finales dependen directamente de él. Existe una norma europea (aún no oficial) llamada CEN/TS 1793-5:2003 [8], la cual introdujo un índice de reflexión *in situ* de las pantallas acústicas y la utilización de la respuesta al impulso en medidas *in situ*. Sin embargo el método no se ha validado para barreras con un aislamiento a ruido aéreo relativamente bajo. Los estudios de características acústicas de pantallas no disponen de índices de reflexión para pantallas sonoras. El índice de reflexión nos da un criterio de ruido final que puede existir en las cercanías de la pantalla y que puede producir molestias a los ciudadanos que están expuestos a estas. El método descrito en esta norma, describe la caracterización de dispositivos reductores de ruido de tráfico usando la técnica de medida de la respuesta al impulso MLS (Maximum Length Sequences), método validado solo para evaluar altos aislamientos a ruido aéreo con elevados niveles de ruido de fondo.

El método descrito requiere la generación de una señal apropiada, una MLS, con una alta inmunidad de ruido de fondo utilizando una fuente de ruido adecuada que tenga una respuesta de frecuencia suave y nivelada. La fuente se sitúa en una parte de la barrera y el micrófono en la otra parte de la barrera. La medición sin la barrera, o en campo libre, también requiere del cálculo de los efectos de la barrera en la eliminación o reflexión de la energía de la propagación de la onda.

La señal obtenida del micrófono se obtiene como la señal generada de la respuesta al impulso del sistema. Para obtener la máxima resolución en baja frecuencia conviene que la ventana de "Adrienne" tenga la máxima longitud, el micrófono ha de estar lo mas próximo posible a la pantalla y el altavoz lo mas alejado posible de ambos. [17]

Este método suele utilizarse para barreras de hormigón o metal, pero no para barreras de madera, por su bajo aislamiento a ruido aéreo.

Una de las líneas futuras que sería interesante poder estudiar es la de mediante el método MLS, realizar un estudio de el índice de reflexión sonora en la composición de materiales reciclados en paneles perforado, e intentar buscar unas configuraciones de materiales absorbentes en la cuales se

puede reducir lo mayor posible este índice y por tanto reducir el ruido de fondo que se produce cerca de las pantallas acústicas.

Por otra parte, una vez se tenga estas medidas realizadas in situ, realizar una medida práctica mediante el software de predicción “PREDICTOR”, realizar un estudio exhaustivo del comportamiento de las reflexiones de una pantalla acústica, utilizando una de las aplicaciones que tiene el programa e introduciendo los coeficientes de absorción del material utilizado. Todo esto por comprobar si realmente el método en “PREDICTOR” es fiable y sin necesidad de medir mediante el método MLS, podríamos obtener una aproximación del índice de reflexión producido por la barrera acústica.

## **AGRADECIMIENTOS**

Empiezo por mis directores de tesis, Jesús Alba Fernández y Romina Del Rey Tormos.

Mis compañeros y amigos del Máster, en especial a Laura Bertó que me ha ayudado y animado en muchos momentos.

A Antoine Carrabin que en algún momento me ha ayudado a resolver dudas.

A mi amigo y compañero Rafa, por su paciencia cuando le hablo de la tesis.

Y por supuesto, a mi familia.

A todas las personas que, directa o indirectamente, me han ayudado a llevar a cabo la elaboración de este trabajo.

A la Comisión Europea (proyecto LIFE09 ENV/ES/000461) concedido en Mayo de 2010.

Por último al Ministerio de Asuntos Exteriores y Cooperación en el programa de Cooperación para el desarrollo (proyecto (A/023748/09).



## REFERENCIAS

- [1] J. Pfretzschner, F. Simón, R.M<sup>a</sup>. Rodríguez, A. Moreno (GSIC). Barreras acústicas.
- [2] UNE EN-ISO 1793-1:1998 Dispositivos reductores de ruido de tráfico en carreteras. Métodos de ensayo para determinar el comportamiento acústico. Parte 1: Características intrínsecas relativas a la absorción sonora.
- [3] Dámaso Alegre y Julián Domínguez. Materiales para pantallas anti-ruido. Soluciones mas usuales. Disponible en Web: [http://www2.uah.es/tiscar/Complem\\_EIA/tipos-pantallas-acusticas.pdf](http://www2.uah.es/tiscar/Complem_EIA/tipos-pantallas-acusticas.pdf).
- [4] Pantallas acústicas. Disponible en Web: [www.amatex.es](http://www.amatex.es).
- [5] Paneles, pantallas y muros acústicos, protección contra el ruido. Disponible en Web: <http://www.ekobel.com.pl/es/>.
- [6] Pantallas acústicas metálicas. Disponible en Web: <http://panacor2000.zxq.net/>.
- [7] CEN/TS 1793-5:2003. Prediction of noise performance form intrinsic acoustical characteristics.
- [8] Zhang Xi' an. Empirical formulas of sound absorption coefficients and spectrums of perforated panel and imperforated panel.
- [9] Franc Sgard. Modeling of perforated plates and screens rigid frame porous models.
- [10] UNE EN 29053:1994. Materiales para aplicaciones acústicas. Determinación de la resistencia al flujo del aire. (ISO 9053:1991)
- [11] Caracterización de materiales. Materiales absorbentes acústicos. Medida de la resistencia al flujo por el método de Ingard & Dear (actividad 1 Aislamiento Acústico, Máster Ingeniería Acústica).
- [12] UNE EN-ISO 10534: 2002. Acústica. Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 1: Método de rango de onda estacionaria.
- [13] UNE EN-ISO 12354-6. Acústica de la edificación. Estimación de las características acústicas de las edificaciones a partir de las características de sus elementos. Absorción sonora en espacio cerrado.
- [14] EN-ISO 12354-6 Acústica de la edificación. Estimación de las características acústicas de las edificaciones a partir de las características de sus elementos. Absorción sonora en espacio cerrado. Anexo B.

[15] UNE EN-ISO 354:2004. Acústica. Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante.

[16] J.Alba, J.Ramis y R. del Rey. Sound reflection index of noise barriers based on recycled materials.

[17] Francesco Asdrubali, Giulio Pispola y Giorgio Baldinelli. Optimization of in situ noise barrier intrinsic characteristics measurements.

**ANEXOS**

ANEXO A.- Ensayo del Coeficiente de absorción acústica: UNE-EN 1793-1:1998 de las diferentes configuraciones medidas en cámara reverberante.

ANEXO B.- Programa completos de cálculos realizados mediante MATLAB de los métodos estudiados en los puntos 3.2 y 3.4 de la tesina.

**Material densidad 1200/400 g/m<sup>2</sup>****FICHAS TÉCNICAS DE LOS ENSAYOS**

**Cámara reverberante. Escuela Politécnica Superior de Gandia**  
**Ensayo del Coeficiente de absorción acústica: UNE-EN 1793-1:1998**

**Fecha de ensayo:** 12-07-2010

**Descripción**

Barrera acústica metálica, con lana de poliéster en su interior. Constituida por paneles de chapa de 0.5mm de espesor. Una de las caras es ciega y la otra dispone de perforaciones de 3, 4, 5 y 6 mm de diámetro dispuestas al tresbolillo, separadas 3mm entre sí.

La lana tiene un espesor total de 80 mm dividido en dos densidades:

40 mm de material de densidad 1200 g/ m<sup>2</sup>

40 mm de material de densidad 400 kg/ m<sup>2</sup>

**Volumen sala reverberante:** 238 m<sup>3</sup>.  
**Superficie sala reverberante:** 242 m<sup>3</sup>.  
**Área de la muestra:** 2.98 m<sup>2</sup>.  
**Masa superficial estimada:** --

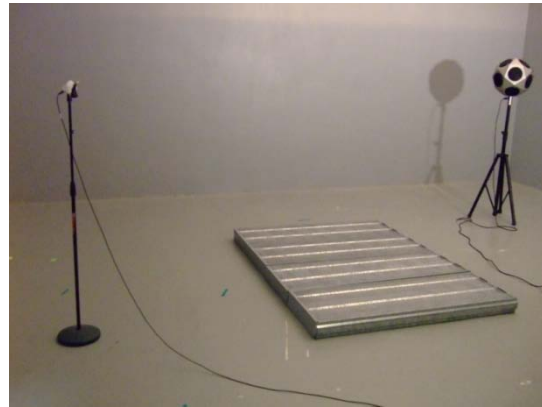
**t1<sup>(\*)</sup>** (Temperatura): 26.3°C.

**H1<sup>(\*)</sup>** (Humedad Relativa): 70.4%.

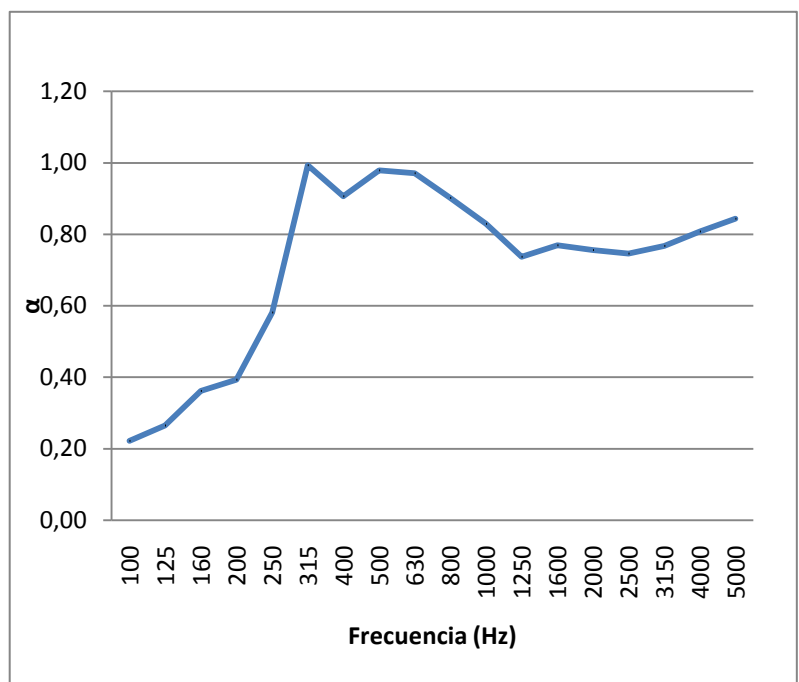
**t2<sup>(\*)</sup>** (Temperatura): 25 °C.

**H2<sup>(\*)</sup>** (Humedad Relativa): 75.2%.

(\*) 1. Sala vacía. 2. Muestra en la sala.



F (Hz)	T1	T2	$\alpha(1200/400)$
100	16,59	12,90	0,22
125	10,81	8,84	0,26
160	9,53	7,51	0,36
200	10,21	7,78	0,39
250	10,22	6,99	0,58
315	10,34	5,75	0,99
400	10,22	5,94	0,91
500	10,55	5,86	0,98
630	9,68	5,60	0,97
800	9,05	5,54	0,90
1000	8,86	5,64	0,83
1250	8,19	5,58	0,74
1600	7,53	5,19	0,77
2000	6,90	4,91	0,76
2500	5,87	4,38	0,75
3150	4,98	3,84	0,77
4000	4,28	3,38	0,81
5000	3,46	2,82	0,84



**Material densidad 600/400 g/m<sup>2</sup>****FICHAS TÉCNICAS DE LOS ENSAYOS**

**Cámara reverberante. Escuela Politécnica Superior de Gandia**  
**Ensayo del Coeficiente de absorción acústica: UNE-EN 1793-1:1998**

**Fecha de ensayo:** 13-07-2010

**Descripción**

Barrera acústica metálica, con lana de poliéster en su interior. Constituida por paneles de chapa de 0.5mm de espesor. Una de las caras es ciega y la otra dispone de perforaciones de 3, 4, 5 y 6 mm de diámetro dispuestas al tresbolillo, separadas 3mm entre sí.

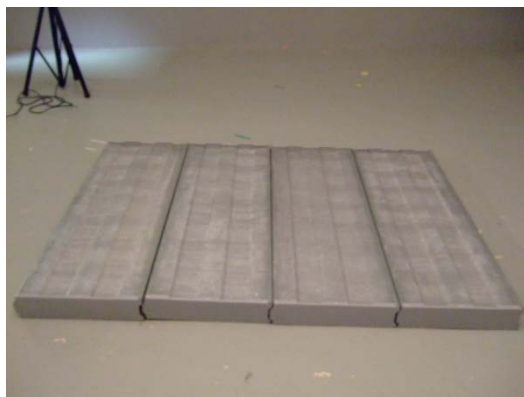
La lana tiene un espesor total de 80 mm dividido en dos densidades:

40 mm de material de densidad 600 g/ m<sup>2</sup>  
 40 mm de material de densidad 400 kg/ m<sup>2</sup>

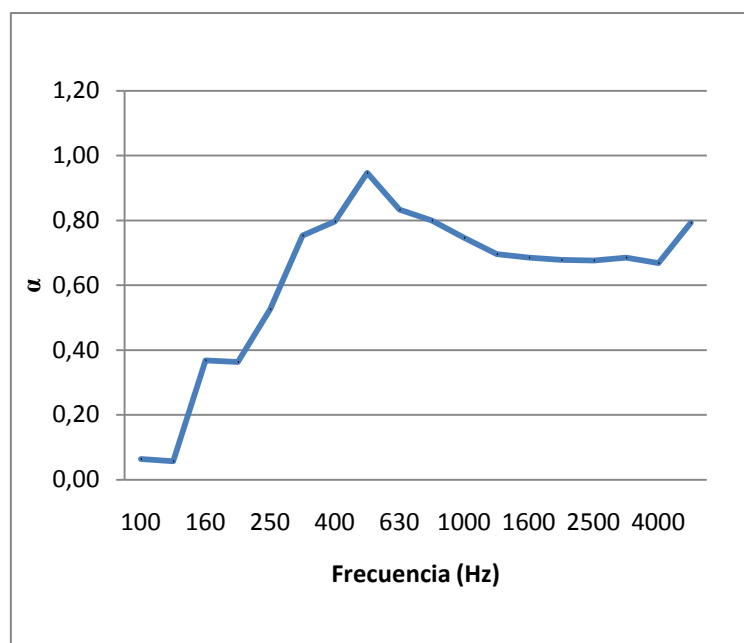
**Volumen sala reverberante:** 238 m<sup>3</sup>.  
**Superficie sala reverberante:** 242 m<sup>3</sup>.  
**Área de la muestra:** 2.98 m<sup>2</sup>.  
**Masa superficial estimada:** --

**t1<sup>(\*)</sup>** (Temperatura): 26.3°C.  
**H1<sup>(\*)</sup>** (Humedad Relativa): 70.4%.  
**t2<sup>(\*)</sup>** (Temperatura): 25 °C.  
**H2<sup>(\*)</sup>** (Humedad Relativa): 75.2%.

(\*) 1. Sala vacía. 2. Muestra en la sala.



<b>F (Hz)</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>α(600/400)</b>
100	16,59	15,32	0,06
125	10,81	10,31	0,06
160	9,53	7,49	0,37
200	10,21	7,93	0,36
250	10,22	7,21	0,53
315	10,34	6,44	0,75
400	10,22	6,26	0,80
500	10,55	5,94	0,95
630	9,68	5,95	0,83
800	9,05	5,79	0,80
1000	8,86	5,85	0,75
1250	8,19	5,68	0,70
1600	7,53	5,38	0,69
2000	6,90	5,06	0,68
2500	5,87	4,49	0,68
3150	4,98	3,93	0,69
4000	4,28	3,50	0,67
5000	3,46	2,85	0,79



**Material densidad 800/600 g/m<sup>2</sup>****FICHAS TÉCNICAS DE LOS ENSAYOS**

**Cámara reverberante. Escuela Politécnica Superior de Gandia**  
**Ensayo del Coeficiente de absorción acústica: UNE-EN 1793-1:1998**

**Fecha de ensayo:** 13-07-2010

**Descripción**

Barrera acústica metálica, con lana de poliéster en su interior. Constituida por paneles de chapa de 0.5mm de espesor. Una de las caras es ciega y la otra dispone de perforaciones de 3, 4, 5 y 6 mm de diámetro dispuestas al tresbolillo, separadas 3mm entre sí.

La lana tiene un espesor total de 80 mm dividido en dos densidades:

40 mm de material de densidad 800 g/ m<sup>2</sup>

40 mm de material de densidad 600 kg/ m<sup>2</sup>

**Volumen sala reverberante:** 238 m<sup>3</sup>.  
**Superficie sala reverberante:** 242 m<sup>3</sup>.  
**Área de la muestra:** 2.98 m<sup>2</sup>.  
**Masa superficial estimada:** --

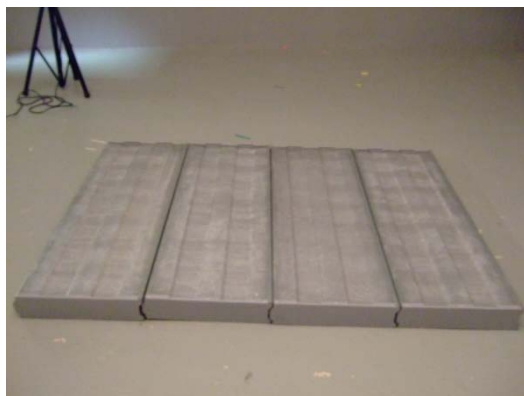
**t1<sup>(\*)</sup>** (Temperatura): 26.3°C.

**H1<sup>(\*)</sup>** (Humedad Relativa): 70.4%.

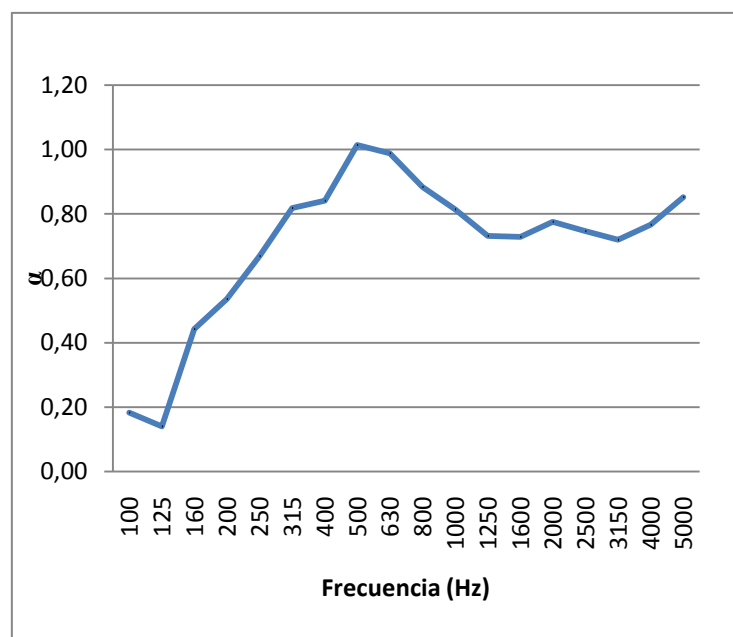
**t2<sup>(\*)</sup>** (Temperatura): 26.5 °C.

**H2<sup>(\*)</sup>** (Humedad Relativa): 73.4%.

(\*) 1. Sala vacía. 2. Muestra en la sala.



F (Hz)	T1	T2	$\alpha(800/600)$
100	16,59	13,43	0,18
125	10,81	9,67	0,14
160	9,53	7,18	0,44
200	10,21	7,17	0,54
250	10,22	6,67	0,67
315	10,34	6,24	0,82
400	10,22	6,13	0,84
500	10,55	5,76	1,01
630	9,68	5,55	0,99
800	9,05	5,58	0,88
1000	8,86	5,68	0,81
1250	8,19	5,59	0,73
1600	7,53	5,28	0,73
2000	6,90	4,87	0,78
2500	5,87	4,38	0,75
3150	4,98	3,89	0,72
4000	4,28	3,41	0,77
5000	3,46	2,81	0,85



**Material densidad 800/400 g/m<sup>2</sup>****FICHAS TÉCNICAS DE LOS ENSAYOS**

**Cámara reverberante. Escuela Politécnica Superior de Gandia**  
**Ensayo del Coeficiente de absorción acústica: UNE-EN 1793-1:1998**

**Fecha de ensayo:** 14-07-2010

**Descripción**

Barrera acústica metálica, con lana de poliéster en su interior. Constituida por paneles de chapa de 0.5mm de espesor. Una de las caras es ciega y la otra dispone de perforaciones de 3, 4, 5 y 6 mm de diámetro dispuestas al tresbolillo, separadas 3mm entre sí.

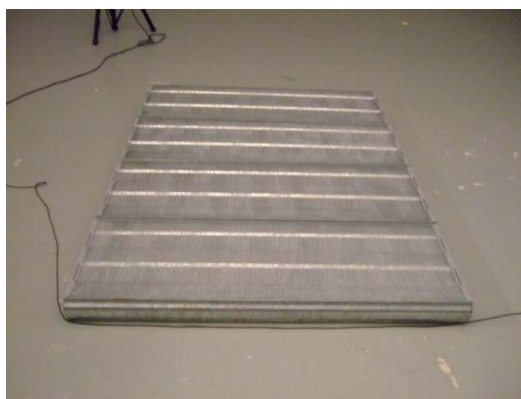
La lana tiene un espesor total de 80 mm dividido en dos densidades:

40 mm de material de densidad 800 g/ m<sup>2</sup>  
 40 mm de material de densidad 400 kg/ m<sup>2</sup>

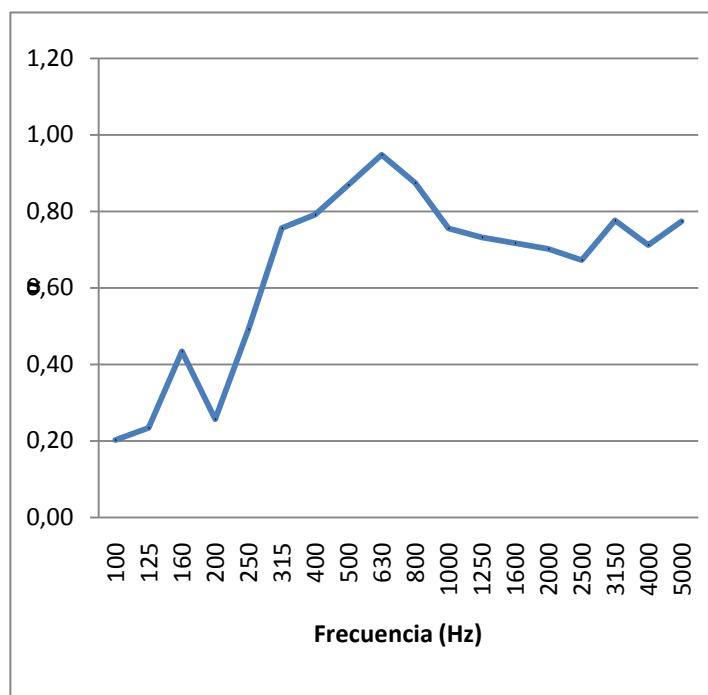
**Volumen sala reverberante:** 238 m<sup>3</sup>.  
**Superficie sala reverberante:** 242 m<sup>3</sup>.  
**Área de la muestra:** 2.98 m<sup>2</sup>.  
**Masa superficial estimada:** --

**t1<sup>(\*)</sup>** (Temperatura): 25.4°C.  
**H1<sup>(\*)</sup>** (Humedad Relativa): 70.1%.  
**t2<sup>(\*)</sup>** (Temperatura): 26.4 °C.  
**H2<sup>(\*)</sup>** (Humedad Relativa): 72.5%.

(\*) 1. Sala vacía. 2. Muestra en la sala.



F (Hz)	T1	T2	$\alpha(800/400)$
100	17,16	13,51	0,20
125	12,82	10,40	0,23
160	10,99	8,02	0,43
200	10,43	8,64	0,26
250	10,77	7,63	0,49
315	10,12	6,35	0,76
400	10,35	6,33	0,79
500	10,31	6,08	0,87
630	9,93	5,74	0,95
800	9,24	5,68	0,87
1000	8,70	5,76	0,76
1250	8,22	5,60	0,73
1600	7,50	5,29	0,72
2000	6,82	4,97	0,70
2500	5,85	4,48	0,67
3150	5,06	3,88	0,78
4000	4,24	3,44	0,71
5000	3,44	2,85	0,77



**Material densidad 1200/800 g/m<sup>2</sup>**

**FICHAS TÉCNICAS DE LOS ENSAYOS**

**Cámara reverberante. Escuela Politécnica Superior de Gandia**  
**Ensayo del Coeficiente de absorción acústica: UNE-EN 1793-1:1998**

**Fecha de ensayo:** 14-07-2010

**Descripción**

Barrera acústica metálica, con lana de poliéster en su interior. Constituida por paneles de chapa de 0.5mm de espesor. Una de las caras es ciega y la otra dispone de perforaciones de 3, 4, 5 y 6 mm de diámetro dispuestas al tresbolillo, separadas 3mm entre sí.

La lana tiene un espesor total de 80 mm dividido en dos densidades:

40 mm de material de densidad 1200 g/ m<sup>2</sup>

40 mm de material de densidad 800 kg/ m<sup>2</sup>

**Volumen sala reverberante:** 238 m<sup>3</sup>.  
**Superficie sala reverberante:** 242 m<sup>3</sup>.  
**Área de la muestra:** 2.98 m<sup>2</sup>.  
**Masa superficial estimada:** --

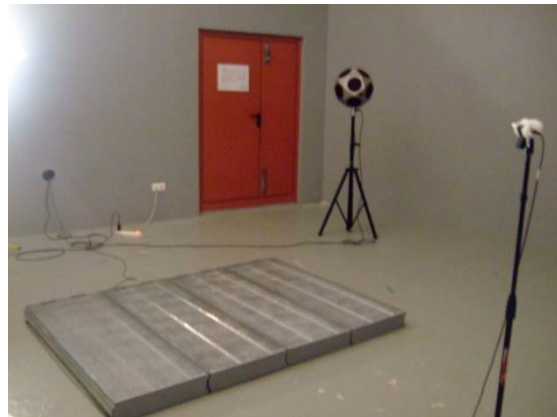
**t1<sup>(\*)</sup>** (Temperatura): 25.4°C.

**H1<sup>(\*)</sup>** (Humedad Relativa): 70.1%.

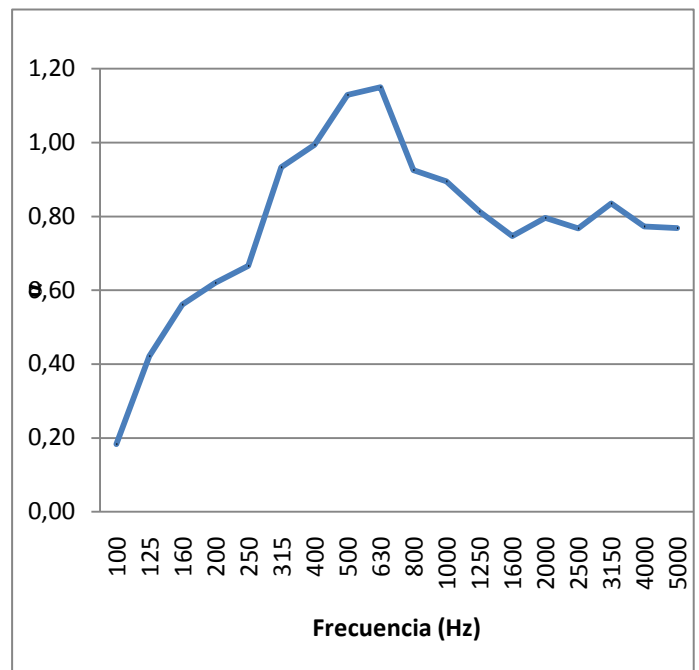
**t2<sup>(\*)</sup>** (Temperatura): 25.5 °C.

**H2<sup>(\*)</sup>** (Humedad Relativa): 73.5%.

(\*) 1. Sala vacía. 2. Muestra en la sala.



F (Hz)	T1	T2	α(1200/800)
100	17,16	13,79	0,18
125	12,82	9,03	0,42
160	10,99	7,43	0,56
200	10,43	6,94	0,62
250	10,77	6,92	0,67
315	10,12	5,84	0,93
400	10,35	5,75	0,99
500	10,31	5,41	1,13
630	9,93	5,26	1,15
800	9,24	5,55	0,93
1000	8,70	5,42	0,89
1250	8,22	5,41	0,81
1600	7,50	5,23	0,75
2000	6,82	4,80	0,80
2500	5,85	4,34	0,77
3150	5,06	3,81	0,84
4000	4,24	3,38	0,77
5000	3,44	2,85	0,77





**Material densidad 1200/600 g/m<sup>2</sup>****FICHAS TÉCNICAS DE LOS ENSAYOS**

**Cámara reverberante. Escuela Politécnica Superior de Gandia**  
**Ensayo del Coeficiente de absorción acústica: UNE-EN 1793-1:1998**

**Fecha de ensayo:** 14-07-2010

**Descripción**

Barrera acústica metálica, con lana de poliéster en su interior. Constituida por paneles de chapa de 0.5mm de espesor. Una de las caras es ciega y la otra dispone de perforaciones de 3, 4, 5 y 6 mm de diámetro dispuestas al tresbolillo, separadas 3mm entre sí.

La lana tiene un espesor total de 80 mm dividido en dos densidades:

40 mm de material de densidad 1200 g/ m<sup>2</sup>

40 mm de material de densidad 600 kg/ m<sup>2</sup>

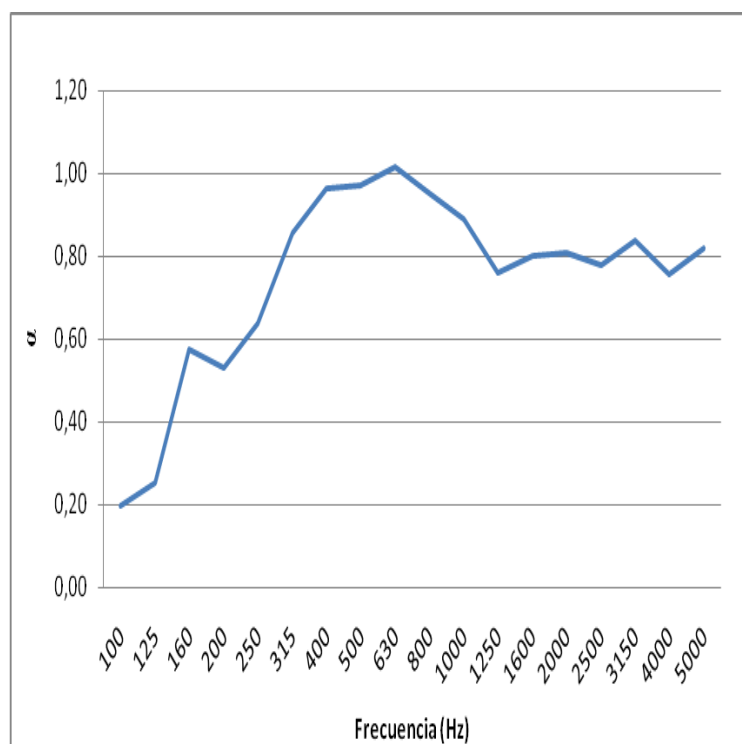
**Volumen sala reverberante:** 238 m<sup>3</sup>.  
**Superficie sala reverberante:** 242 m<sup>3</sup>.  
**Área de la muestra:** 2.98 m<sup>2</sup>.  
**Masa superficial estimada:** --

**t1<sup>(\*)</sup>** (Temperatura): 25.4°C.  
**H1<sup>(\*)</sup>** (Humedad Relativa): 70.1%.  
**t2<sup>(\*)</sup>** (Temperatura): 25.4 °C.  
**H2<sup>(\*)</sup>** (Humedad Relativa): 75%.

(\*) 1. Sala vacía. 2. Muestra en la sala.



F (Hz)	T1	T2	α(1200/600)
100	17,16	13,59	0,20
125	12,82	10,26	0,25
160	10,99	7,37	0,58
200	10,43	7,30	0,53
250	10,77	7,02	0,64
315	10,12	6,05	0,86
400	10,35	5,84	0,96
500	10,31	5,80	0,97
630	9,93	5,57	1,02
800	9,24	5,49	0,95
1000	8,70	5,43	0,89
1250	8,22	5,54	0,76
1600	7,50	5,11	0,80
2000	6,82	4,78	0,81
2500	5,85	4,32	0,78
3150	5,06	3,81	0,84
4000	4,24	3,40	0,76
5000	3,44	2,82	0,82



**Material densidad 80 Kg/m<sup>3</sup>****FICHAS TÉCNICAS DE LOS ENSAYOS**

**Cámara reverberante. Escuela Politécnica Superior de Gandia**  
**Ensayo del Coeficiente de absorción acústica: UNE-EN 1793-1:1998**

**Fecha de ensayo:** 19-07-2010

**Descripción**

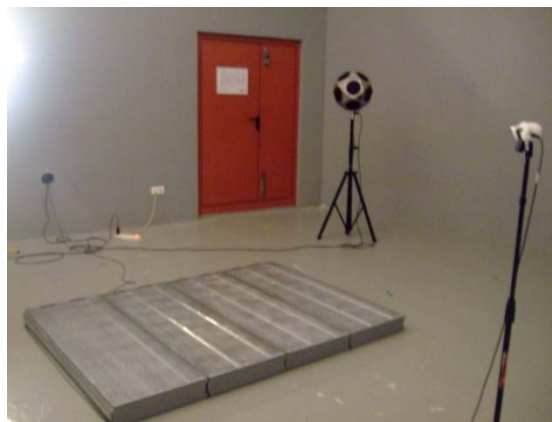
Barrera acústica metálica, con lana de poliéster en su interior. Constituida por paneles de chapa de 0.5mm de espesor. Una de las caras es ciega y la otra dispone de perforaciones de 3, 4, 5 y 6 mm de diámetro dispuestas al tresbolillo, separadas 3mm entre sí.

La lana tiene un espesor total de 25 mm de densidad 80 Kg/m<sup>3</sup>:

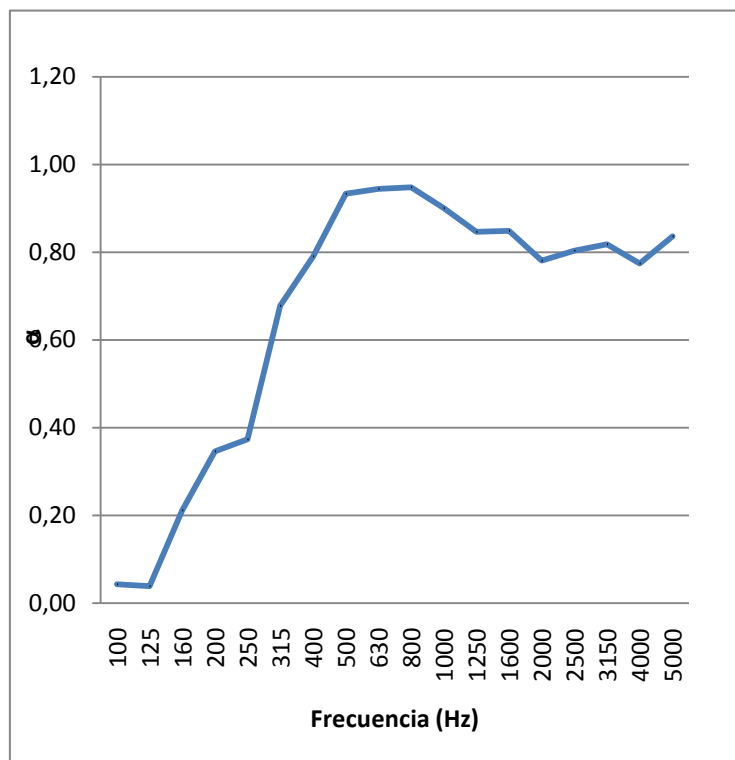
**Volumen sala reverberante:** 238 m<sup>3</sup>.  
**Superficie sala reverberante:** 242 m<sup>3</sup>.  
**Área de la muestra:** 2.98 m<sup>2</sup>.  
**Masa superficial estimada:** --

**t1<sup>(\*)</sup>** (Temperatura): 26.6°C.  
**H1<sup>(\*)</sup>** (Humedad Relativa): 69.5%.  
**t2<sup>(\*)</sup>** (Temperatura): 26.3°C.  
**H2<sup>(\*)</sup>** (Humedad Relativa): 71%.

(\*) 1. Sala vacía. 2. Muestra en la sala.



F (Hz)	T1	T2	$\alpha(80)$
100	16,00	15,19	0,04
125	11,85	11,44	0,04
160	10,44	8,91	0,21
200	10,69	8,31	0,35
250	10,32	7,94	0,37
315	10,20	6,64	0,68
400	10,51	6,39	0,79
500	10,36	5,92	0,93
630	9,45	5,58	0,94
800	9,20	5,49	0,95
1000	8,68	5,40	0,90
1250	8,13	5,30	0,85
1600	7,51	5,02	0,85
2000	6,65	4,74	0,78
2500	5,85	4,29	0,80
3150	5,00	3,80	0,82
4000	4,25	3,39	0,77
5000	3,45	2,82	0,84



**Material densidad 400 g/m<sup>2</sup> y 80 Kg/ m<sup>3</sup>****FICHAS TÉCNICAS DE LOS ENSAYOS**

**Cámara reverberante. Escuela Politécnica Superior de Gandia**  
**Ensayo del Coeficiente de absorción acústica: UNE-EN 1793-1:1998**

**Fecha de ensayo:** 19-07-2010

**Descripción**

Barrera acústica metálica, con lana de poliéster en su interior. Constituida por paneles de chapa de 0.5mm de espesor. Una de las caras es ciega y la otra dispone de perforaciones de 3, 4, 5 y 6 mm de diámetro dispuestas al tresbolillo, separadas 3mm entre sí.

La lana tiene un espesor total de 65 mm dividido en dos densidades:

25 mm de material de densidad 1200 g/ m<sup>2</sup>

40 mm de material de densidad 600 kg/ m<sup>2</sup>

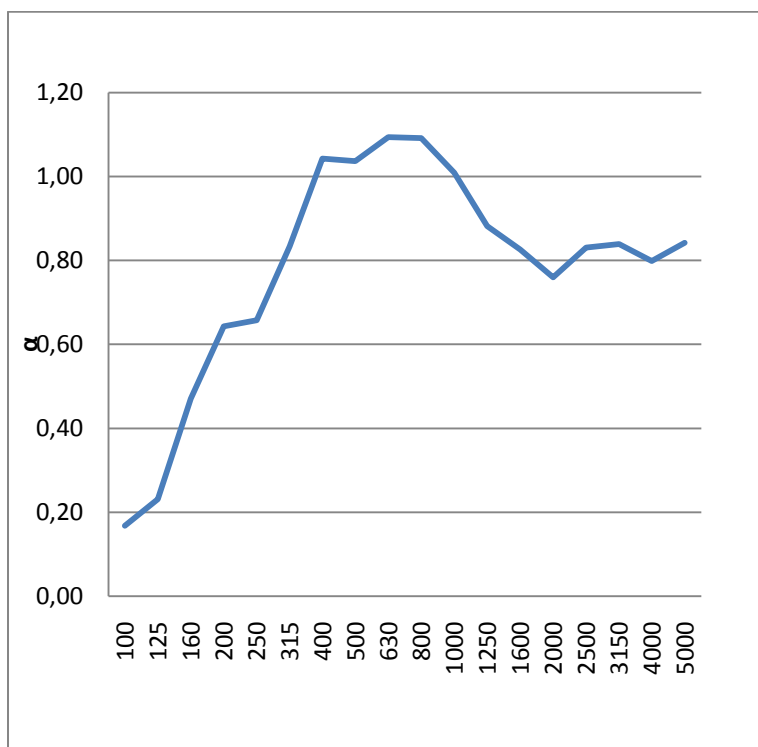
**Volumen sala reverberante:** 238 m<sup>3</sup>.  
**Superficie sala reverberante:** 242 m<sup>3</sup>.  
**Área de la muestra:** 2.98 m<sup>2</sup>.  
**Masa superficial estimada:** --

**t1<sup>(\*)</sup>** (Temperatura): 26.6°C.  
**H1<sup>(\*)</sup>** (Humedad Relativa): 69.5%.  
**t2<sup>(\*)</sup>** (Temperatura): 26.2 °C.  
**H2<sup>(\*)</sup>** (Humedad Relativa): 71.6%.

(\*) 1. Sala vacía. 2. Muestra en la sala.



F (Hz)	T1	T2	$\alpha(80/400)$
100	16,00	13,24	0,17
125	11,85	9,77	0,23
160	10,44	7,56	0,47
200	10,69	6,97	0,64
250	10,32	6,76	0,66
315	10,20	6,14	0,83
400	10,51	5,68	1,04
500	10,36	5,65	1,04
630	9,45	5,24	1,09
800	9,20	5,17	1,09
1000	8,68	5,16	1,01
1250	8,13	5,22	0,88
1600	7,51	5,07	0,83
2000	6,65	4,78	0,76
2500	5,85	4,25	0,83
3150	5,00	3,77	0,84
4000	4,25	3,36	0,80
5000	3,45	2,82	0,84



**PERF:**

```

%% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %%
%% %% %% %% %%      Cálculo del coeficiente de absorción de pantallas acústicas      %% %% %% %%
%% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %%
function alfa=PERF_Eva(d,a,L,b,C,sigma,caso)
% alfa=PERF_Eva(d,a,L,b,C,sigma,caso)
% Funcion basica para perforados
% Entradas:
%   d: distancia entre agujeros
%   a: radio del agujero
%   L: grosor de la placa
%   b: grosor absorbente
%   C: grosor camara de aire (total)PERF
%   sigma: resistencia al flujo del absorbente
%   caso: 1-> Perforado+absorbente (b)+camara (C-b)
%         2-> Caso generico: Perforado con algo detras con sigma
%         global
freq=[100 125 160 200 250 315 400 500 630 800 1000 1250 1600 2000 2500 3150 4000 5000];
r0=1.29;          % Densidad del aire
c0=343;          % Velocidad de propagación en el aire
p=pi*a^2/(d^2);  % Porcentaje de las perforaciones (en tanto por uno)
delta=L+1.6*a;   % delta => D'
                % L => D: espesor del panel (coincide con la
                % longitud de los orificios en cm)
f0=5480*sqrt(p/(delta*d)); % f0 de resonados de cavidad múltiple
Z0=r0*c0;
if caso==1
    R=sigma*b/p;  % Si es panel+abs+cámara aire
elseif caso==2   % Si es panel+resistencia al flujo genérica
    R=sigma*C;   % (material de 2 impedancias distintas)
end

```

```
Ran=R/Z0;          % Normalizamos R
k0=2*pi*f0/c0;     % Obtenemos valor de k0
f=zeros(length(freq),1);
for i=1:length(f)  % Recorremos el vector de frecuencias
    gamma(i)=freq(i)/f0;
    alfa(i)=4*Ran/((1+Ran).^2+(gamma(i)/tan(k0*C)-1/(tan(gamma(i)*k0*C))).^2);
end
    % Calculamos alfa según
    % alfa = (4*r)/{(1+r)^2+(X^2)}
semilogx(freq,alfa);grid on
legend('alfa',4)
xlabel('Frecuencia');ylabel('Coeficiente de absorcion');
```

**COEFICIENTE DE ABSORCIÓN, COMBINACIONES MATERIAL ABSORBENTES,  
según norma UNE EN-ISO 12354-6:**

```
clear;close all;clc;
```

```
load tabla.mat;
```

```
d1=0.08; % Espesor del material
```

```
d2=0.08;
```

```
d3=0.08;
```

```
d4=0.08;
```

```
d5=0.08;
```

```
d6=0.08;
```

```
d7=0.025;
```

```
d8=0.065;
```

```
freq=tabla(:,1); % Frecuencia en tercios de octava
```

```
C1=tabla(:,2); %  $c=r/(densidad*freq)$  400+800
```

```
k01=tabla(:,3); % k0
```

```
ZC1=zeros(length(freq),1);
```

```
landa1=zeros(length(freq),1);
```

```
C2=tabla(:,4); %  $c=r/(densidad*freq)$  400+600
```

```
k02=tabla(:,5); % k0
```

```
ZC2=zeros(length(freq),1);
```

```
landa2=zeros(length(freq),1);
```

```
C3=tabla(:,6); %  $c=r/(densidad*freq)$  400+1200
```

```
k03=tabla(:,7); % k0
```

```
ZC3=zeros(length(freq),1);
```

```
landa3=zeros(length(freq),1);
```

```
C4=tabla(:,8); %  $c=r/(densidad*freq)$  600+1200
```

```
k04=tabla(:,9); % k0
```

```
ZC4=zeros(length(freq),1);
```

```
landa4=zeros(length(freq),1);
```

```
C5=tabla(:,10); % c=r/(densidad*freq) 800+1200
```

```
k05=tabla(:,11); % k0
```

```
ZC5=zeros(length(freq),1);
```

```
landa5=zeros(length(freq),1);
```

```
C6=tabla(:,12); % c=r/(densidad*freq) 600+800
```

```
k06=tabla(:,13); % k0
```

```
ZC6=zeros(length(freq),1);
```

```
landa6=zeros(length(freq),1);
```

```
C7=tabla(:,14); % c=r/(densidad*freq) DURA
```

```
k07=tabla(:,15); % k0
```

```
ZC7=zeros(length(freq),1);
```

```
landa7=zeros(length(freq),1);
```

```
C8=tabla(:,16); % c=r/(densidad*freq) DURA+400
```

```
k08=tabla(:,17); % k0
```

```
ZC8=zeros(length(freq),1);
```

```
landa8=zeros(length(freq),1);
```

```
for t=1:length(freq)
```

```
if C1(t)<0.25
```

```
    ZC1(t) = (1+(0.114*(C1(t)^0.369))-i*(0.0985*(C1(t)^0.758)));
```

```
    landa1(t) = k01(t)*(0.168*(C1(t)^0.715))+i*k01(t)*(1+(0.136*(C1(t)^0.494)));
```

```
elseif C1(t)>80
```

```
    ZC1(t) = sqrt(11.1-i*(0.12*C1(t)));
```

```
    landa1(t)= i*k01(t)*1.35*ZC1(t);
```

```
else
```

```
    ZC1(t) = (1+(0.0571*(C1(t)^0.754))-i*(0.087*(C1(t)^0.732)));
```

```
    landa1(t) = k01(t)*(0.189*(C1(t)^0.595))+i*k01(t)*(1+(0.0978*(C1(t)^0.700)));
```

```

end
end
for t=1:length(freq)
    if C2(t)<0.25
        ZC2(t) = (1+(0.114*(C2(t)^0.369))-i*(0.0985*(C2(t)^0.758)));
        landa2(t) = k02(t)*(0.168*(C2(t)^0.715))+i*k02(t)*(1+(0.136*(C2(t)^0.494)));
    elseif C2(t)>80
        ZC2(t) = sqrt(11.1-i*(0.12*C2(t)));
        landa2(t)= i*k02(t)*1.35*ZC2(t);
    else
        ZC2(t) = (1+(0.0571*(C2(t)^0.754))-i*(0.087*(C2(t)^0.732)));
        landa2(t) = k02(t)*(0.189*(C2(t)^0.595))+i*k02(t)*(1+(0.0978*(C2(t)^0.700)));
    end
end
for t=1:length(freq)
    if C3(t)<0.25
        ZC2(t) = (1+(0.114*(C3(t)^0.369))-i*(0.0985*(C3(t)^0.758)));
        landa3(t) = k03(t)*(0.168*(C3(t)^0.715))+i*k03(t)*(1+(0.136*(C3(t)^0.494)));
    elseif C3(t)>80
        ZC3(t) = sqrt(11.1-i*(0.12*C3(t)));
        landa3(t)= i*k03(t)*1.35*ZC3(t);
    else
        ZC3(t) = (1+(0.0571*(C3(t)^0.754))-i*(0.087*(C3(t)^0.732)));
        landa3(t) = k03(t)*(0.189*(C3(t)^0.595))+i*k03(t)*(1+(0.0978*(C3(t)^0.700)));
    end
end
for t=1:length(freq)
    if C4(t)<0.25
        ZC4(t) = (1+(0.114*(C4(t)^0.369))-i*(0.0985*(C4(t)^0.758)));
        landa4(t) = k04(t)*(0.168*(C4(t)^0.715))+i*k04(t)*(1+(0.136*(C4(t)^0.494)));
    elseif C4(t)>80
        ZC4(t) = sqrt(11.1-i*(0.12*C4(t)));

```



```

    landa4(t)= i*k04(t)*1.35*ZC4(t);
else
    ZC4(t) = (1+(0.0571*(C4(t)^0.754)))-i*(0.087*(C4(t)^0.732));
    landa4(t) = k04(t)*(0.189*(C4(t)^0.595))+i*k04(t)*(1+(0.0978*(C4(t)^0.700)));
end
end
for t=1:length(freq)
    if C5(t)<0.25
        ZC5(t) = (1+(0.114*(C5(t)^0.369)))-i*(0.0985*(C5(t)^0.758));
        landa5(t) = k05(t)*(0.168*(C5(t)^0.715))+i*k05(t)*(1+(0.136*(C5(t)^0.494)));
    elseif C5(t)>80
        ZC5(t) = sqrt(11.1-i-(0.12*C5(t)));
        landa5(t)= i*k05(t)*1.35*ZC5(t);
    else
        ZC5(t) = (1+(0.0571*(C5(t)^0.754)))-i*(0.087*(C5(t)^0.732));
        landa5(t) = k05(t)*(0.189*(C5(t)^0.595))+i*k05(t)*(1+(0.0978*(C5(t)^0.700)));
    end
end
for t=1:length(freq)
    if C6(t)<0.25
        ZC6(t) = (1+(0.114*(C6(t)^0.369)))-i*(0.0985*(C6(t)^0.758));
        landa6(t) = k06(t)*(0.168*(C6(t)^0.715))+i*k06(t)*(1+(0.136*(C6(t)^0.494)));
    elseif C6(t)>80
        ZC6(t) = sqrt(11.1-i-(0.12*C6(t)));
        landa6(t)= i*k06(t)*1.35*ZC6(t);
    else
        ZC6(t) = (1+(0.0571*(C6(t)^0.754)))-i*(0.087*(C6(t)^0.732));
        landa6(t) = k06(t)*(0.189*(C6(t)^0.595))+i*k06(t)*(1+(0.0978*(C6(t)^0.700)));
    end
end
for t=1:length(freq)
    if C7(t)<0.25

```

```

    ZC7(t) = (1+(0.114*(C7(t)^0.369))-i*(0.0985*(C7(t)^0.758)));
    landa7(t) = k07(t)*(0.168*(C7(t)^0.715))+i*k07(t)*(1+(0.136*(C7(t)^0.494)));
elseif C7(t)>80
    ZC7(t) = sqrt(11.1-i*(0.12*C7(t)));
    landa7(t)= i*k07(t)*1.35*ZC7(t);
else
    ZC7(t) = (1+(0.0571*(C7(t)^0.754))-i*(0.087*(C7(t)^0.732)));
    landa7(t) = k07(t)*(0.189*(C7(t)^0.595))+i*k07(t)*(1+(0.0978*(C7(t)^0.700)));
end
end
for t=1:length(freq)
    if C8(t)<0.25
        ZC8(t) = (1+(0.114*(C8(t)^0.369))-i*(0.0985*(C8(t)^0.758)));
        landa8(t) = k08(t)*(0.168*(C8(t)^0.715))+i*k08(t)*(1+(0.136*(C8(t)^0.494)));
    elseif C8(t)>80
        ZC8(t) = sqrt(11.1-i*(0.12*C8(t)));
        landa8(t)= i*k08(t)*1.35*ZC8(t);
    else
        ZC8(t) = (1+(0.0571*(C8(t)^0.754))-i*(0.087*(C8(t)^0.732)));
        landa8(t) = k08(t)*(0.189*(C8(t)^0.595))+i*k08(t)*(1+(0.0978*(C8(t)^0.700)));
    end
end
end
%ZC = ZC_real-i*ZC_imag; % ZC=ZC_real-i*ZC_imag
%landa = landa_real+i*landa_imag; %landa=landa_real+i*landa_imag
Z1 = ZC1.*coth(landa1*d1); % Hay que poner.* ya que ZC landa son vectores.
    % de esta manera, Z obtenido también un vector
phi_grados1 = [0:90];
phi_radian1 = phi_grados1*2*pi/360; % Para transformar los grados en radian
r_phi1 = zeros(length(Z1),length(phi_radian1)); % Para inicializar la matriz r_phi antes de usarla
% Calculo de r_phi que es una matriz, porque a cada valor del vector
% Z corresponde 91 valores de r_phi (para todos los phi). Asi que al final
% tenemos una matriz de 18 lineas (que es el numero de valor de Z) y de 91

```

```

% columnas (que es el numero de valores de phi)
for i=1:length(Z1)
    r_phi1(i,:) = (Z1(i)*cos(phi_radian1)-1)./(Z1(i)*cos(phi_radian1)+1);
end
alpha_phi1 = 1-(abs(r_phi1)).^2;
% Calculo del alpha_s, hay que tener en cuenta que una integral en el dominio
% continuo corresponde a una suma en el dominio discreto, dado que phi tiene
% valores discretos, hay que hacer una suma.
for i=1:length(Z1)
    alpha_s1(i) = pi/(2*91)*sum(alpha_phi1(i,:).*sin(2*phi_radian1));
end
alpha_s1 = alpha_s1'; % Solo para transponer el vector
%%%%%%%%%%%%%%
Z2 = ZC2.*coth(landa2*d2); % Hay que poner.* ya que ZC landa son vectores.
% de esta manera, Z obtenido también un vector
phi_grados2 = [0:90];
phi_radian2 = phi_grados2*2*pi/360; % Para transformar los grados en radian
r_phi2 = zeros(length(Z2),length(phi_radian2)); % Para inicializar la matriz r_phi antes de usarla
for i=1:length(Z2)
    r_phi2(i,:) = (Z2(i)*cos(phi_radian2)-1)./(Z2(i)*cos(phi_radian2)+1);
end
alpha_phi2 = 1-(abs(r_phi2)).^2;
for i=1:length(Z2)
    alpha_s2(i) = pi/(2*91)*sum(alpha_phi2(i,:).*sin(2*phi_radian2));
end
alpha_s2 = alpha_s2'; % Solo para transponer el vector
%%%%%%%%%%%%%%
Z3 = ZC3.*coth(landa3*d3); % Hay que poner.* ya que ZC landa son vectores.
% de esta manera, Z obtenido también un vector
phi_grados3 = [0:90];
phi_radian3 = phi_grados3*2*pi/360; % Para transformar los grados en radian
r_phi3 = zeros(length(Z3),length(phi_radian3)); % Para inicializar la matriz r_phi antes de usarla

```

```

for i=1:length(Z3)
    r_phi3(i,:) = (Z3(i)*cos(phi_radian3)-1)./(Z3(i)*cos(phi_radian3)+1);
end
alpha_phi3 = 1-(abs(r_phi3)).^2;
for i=1:length(Z3)
    alpha_s3(i) = pi/(2*91)*sum(alpha_phi3(i,:).*sin(2*phi_radian3));
end
alpha_s3 = alpha_s3';    % Solo para transponer el vector
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Z4 = ZC4.*coth(landa4*d4); % Hay que poner.* ya que ZC landa son vectores.
    % de esta manera, Z obtenido también un vector
phi_grados4 = [0:90];
phi_radian4 = phi_grados4*2*pi/360;    % Para transformar los grados en radian
r_phi4 = zeros(length(Z4),length(phi_radian4)); % Para inicializar la matriz r_phi antes de usarla
for i=1:length(Z4)
    r_phi4(i,:) = (Z4(i)*cos(phi_radian4)-1)./(Z4(i)*cos(phi_radian4)+1);
end
alpha_phi4 = 1-(abs(r_phi4)).^2;
for i=1:length(Z4)
    alpha_s4(i) = pi/(2*91)*sum(alpha_phi4(i,:).*sin(2*phi_radian4));
end
alpha_s4 = alpha_s4';    % Solo para transponer el vector
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Z5 = ZC5.*coth(landa5*d5); % Hay que poner.* ya que ZC landa son vectores.
    % de esta manera, Z obtenido también un vector
phi_grados5 = [0:90];
phi_radian5 = phi_grados5*2*pi/360;    % Para transformar los grados en radian
r_phi5 = zeros(length(Z5),length(phi_radian5)); % Para inicializar la matriz r_phi antes de usarla
for i=1:length(Z5)
    r_phi5(i,:) = (Z5(i)*cos(phi_radian5)-1)./(Z5(i)*cos(phi_radian5)+1);
end
alpha_phi5 = 1-(abs(r_phi5)).^2;

```



```

Z8 = ZC8.*coth(landa8*d8);
phi_grados8 = [0:90];
phi_radian8 = phi_grados8*2*pi/360;      % Para transformar los grados en radian
r_phi8 = zeros(length(Z8),length(phi_radian8)); % Para inicializar la matriz r_phi antes de usarla
for i=1:length(Z8)
    r_phi8(i,:) = (Z8(i)*cos(phi_radian8)-1)./(Z8(i)*cos(phi_radian8)+1);
end
alpha_phi8 = 1-(abs(r_phi8)).^2;
for i=1:length(Z8)
    alpha_s8(i) = pi/(2*91)*sum(alpha_phi8(i,:).*sin(2*phi_radian8));
end
alpha_s8 = alpha_s8';    % Solo para transponer el vector
% semilogx(freq,alpha_s1,'o-');grid on;figure
% semilogx(freq,alpha_s2,'o-');grid on;figure
% semilogx(freq,alpha_s3,'o-');grid on;figure
% semilogx(freq,alpha_s4,'o-');grid on;figure
% semilogx(freq,alpha_s5,'o-');grid on;figure
% semilogx(freq,alpha_s6,'o-');grid on;figure
% semilogx(freq,alpha_s7,'o-');grid on;figure
% semilogx(freq,alpha_s8,'o-');grid on;figure
semilogx(freq,alpha_s1,'-y', freq,alpha_s2,'-m', freq,alpha_s3,'-r', freq,alpha_s4,'-b',freq, alpha_s5,'-g',
freq, alpha_s6,'-c',freq, alpha_s7,'-o', freq, alpha_s8,'-k');grid on
legend('400+800','400+600','400+1200','600+1200','800+1200','600+800','DURA','DURA+400',4)
xlabel('Frecuencia');ylabel('Coeficiente de absorcion');
title('Coeficiente de absorcion de materiales');

```