

## CÁMARA DE TRANSMISIÓN ACÚSTICA A ESCALA PARA EL ESTUDIO DE PANTALLAS ACÚSTICAS

**Jesús Alba, Romina Del Rey, Jeniffer Victoria Torres, Laura Bertó, Carlos Hervás**

Instituto Para la Gestión Integrada de las Zonas Costeras –IGIC. Escuela Politécnica Superior de Gandia.  
Universitat Politècnica de València. C/ Paraninfo nº1, 46730. Grao de Gandia (Spain).  
{ jesalba@fis.upv.es, roderey@doctor.upv.es, jetorro@epsg.upv.es, lauberca@upv.es, carhergo@epsg.upv.es}

### Resumen

La cámara de transmisión acústica permite el estudio del aislamiento acústico a ruido aéreo de diferentes materiales y composiciones. En el ámbito de la edificación, este valor experimental es esencial para un diseño acústico adecuado. También es de interés para el estudio de pantallas acústicas, dado que es necesario conocer el aislamiento acústico de ésta. Sin embargo, construir una cámara de estas características es costoso, y cada uno de los ensayos es elaborado, tanto en tiempo como en costes. Por ello se plantea la construcción de una cámara de transmisión a escala, que permita facilitar el cambio de materiales, valorando mejoras entre ellos, y reduciendo costes. Como objetivo, se propone el estudio de pantallas acústicas en esta cámara de transmisión.

Para el diseño y construcción de esta cámara de transmisión a escala, se ha considerado de modelos SEA y se ha utilizado la herramienta de los elementos finitos.

**Palabras-clave:** transmisión acústica, cámara transmisión a escala, pantallas acústicas.

### Abstract

The transmission chamber allows the study of airborne sound insulation of different materials and compositions. In the building field, this parameter is fundamental for a good acoustic design. Moreover, the airborne sound insulation has interest in the environmental acoustic field for the study of acoustic barriers. However, to build a chamber with these characteristics is difficult, and every test is laborious, both time wise and expense wise. This reason leads to build a transmission chamber done to scale. This chamber allows change different materials to study their improvements with fewer costs. The aim of this work is the study of acoustic barriers in this transmission chamber.

Both to design and to build this chamber, Statistical Energy Analysis models have been considered and the Finite Element Method has been used.

**Keywords:** acoustic transmission, transmission chamber done to scale, acoustic barriers.

**PACS no. 43.58** Acoustical measurement and instrumentation

## 1 Introducción

La cámara de transmisión permite, bajo ciertas limitaciones, el estudio del aislamiento acústico a ruido aéreo de diferentes materiales y composiciones. Para la actual normativa en edificación española es el único dato experimental válido [1]. Sin embargo, construir una cámara de estas características es costoso. Además, cada ensayo en una cámara de este tipo, por lo complicado del montaje, también suele tener un precio elevado. Por ello se ha planteado la construcción de una cámara a escala, que permita facilitar el cambio de materiales sometidos a estudio, valorando mejoras entre ellos, reduciendo costes. Esta cámara se diseña como prototipo particular del proyecto europeo LIFE (LIFE09 ENV/ES/461) NOISEFREETEX [1]. En él se pretende reducir la contaminación acústica en zonas industriales cercanas a zonas urbanas a través de tejidos fabricados a partir de materiales textiles reciclados que formen parte de pantallas acústicas.

Una cámara de transmisión consiste en dos recintos adyacentes que permiten caracterizar la propiedad acústica de materiales de construcción, el índice de reducción sonora. Para ello es necesario poner una muestra o probeta entre los dos recintos. La cámara de transmisión acústica se ha diseñado con relación 1:5 conforme las normativas correspondientes, siguiendo los requisitos que se marcan en UNE EN ISO 140-1:1997 [2] y UNE EN ISO 140-3:1995 [3]. Se ha elaborado cuidando los detalles de la teoría de escalamiento, aislamiento acústico, distribución espacial de la difusividad, y se ha predicho el funcionamiento del mismo. La relación geométrica propuesta para los recintos se evalúa a través de las frecuencias propias de resonancias usando el método de elementos finitos (FEM) y se evalúa el diseño de interacción de energía usando un Modelo SEA (Análisis estadístico de energía). Finalmente se ofrecen sugerencias sobre el uso del laboratorio, incluyendo la metodología de medida.

## 2 Diseño del prototipo de cámara de transmisión a escala

### 2.1 Diseño inicial

En las normas UNE EN ISO 140-1:1997 [2] y UNE EN ISO 140-3:1995 [3] se especifican las condiciones básicas con las que debe contar una cámara de transmisión. Es importante tener presente la condición de campo difuso y las especificaciones referentes al tiempo de reverberación. Partiendo de estos supuestos se empieza el proceso de diseño [4]. En la tabla 1 se muestra la comparativa entre las exigencias de la norma, estas observaciones escaladas (1:5) y la propuesta del modelo.

	Original	Escala	Modelo
Volumen Emisión (m <sup>3</sup> )	60,00	0,48	0,44
Volumen Recepción (m <sup>3</sup> )	50,00	0,40	0,38
Tiempo de reverberación (s)	$2 \leq 1$	$0,7 \leq 0,3$	$0,5 \leq 0,3$
Superficie pared (m <sup>2</sup> )	10,00	0,40	0,40
Longitud mínima arista (m)	2,30	0,46	0,55

Tabla 1. Datos de partida del diseño de la cámara

Como segundo paso, a partir de los volúmenes se calcula la superficie total y el área de absorción acústica que debe tener el modelo a escala (tabla 2).

Proporciones	Modelo	Original
Volumen de la Cámara emisora (m <sup>3</sup> )	0,44	60
Volumen de la Cámara receptora (m <sup>3</sup> )	0,38	50
Área de la muestra (m <sup>2</sup> )	0,40	10
Superficie acústica total cámara emisora (m <sup>2</sup> )	3,76	103,17
Superficie acústica total cámara receptora (m <sup>2</sup> )	3,29	88,8
Área de absorción acústica cámara emisora (m <sup>2</sup> )	0,17	6,44
Área de absorción Acústica cámara receptora (m <sup>2</sup> )	0,15	5,36

Tabla 2 Comparación entre el modelo real y el modelo a escala

Con estos datos se calcula el área de absorción y el tiempo de reverberación en el rango de uso del laboratorio a escala, en bandas de tercio de octava sintonizadas entre las frecuencias centrales de 500Hz y 25kHz.

Respecto al recubrimiento interior se decide utilizar una lámina desarrollada para la arquitectura para uso en fachada, compuesta por dos láminas de aluminio de distintos espesores comerciales unidas con un núcleo de polietileno tipo LPDE (Polietileno de baja densidad). La inclusión del núcleo la hace muy atractiva para contribuir al desacople de la estructura del sistema de aislamiento. Con este material se realiza una estimación del tiempo de reverberación interior que tendrá la cámara mediante cálculo. En la figura 1 se resume esta información.

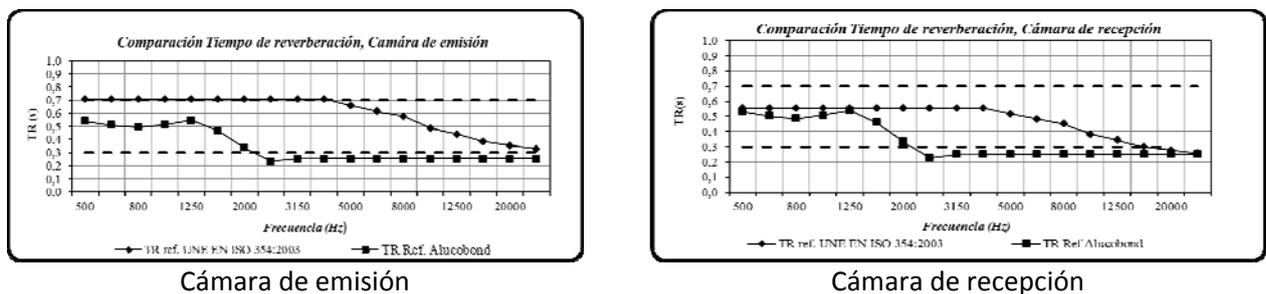


Figura 1. Datos estimados de tiempo de reverberación

## 2.2 Modos Propios

La teoría de modos [5] analiza la presencia del fenómeno de resonancia, de ocurrencia frecuente en recintos pequeños. De forma muy básica, el fenómeno de la resonancia se puede explicar brevemente imaginando dos paredes paralelas donde el sonido va y viene por múltiples reflexiones, por lo que es factible que se produzcan ondas estacionarias. Si la separación entre paredes coincide con  $\lambda/2$  de una determinada frecuencia, resultará un recorrido total de un  $\lambda$  completo, produciéndose un pico de resonancia que reforzará esa frecuencia en particular. Considerando que un recinto posee, como mínimo, seis superficies, este efecto se repetirá para todas las combinaciones posibles de ellas y para aquellas distancias que coincidan con valores de  $\lambda$ ,  $2\lambda$ ,  $3\lambda$ , etc.

Sucede ya que, entre dos puntos de una sala, el sonido no se transmite de manera homogénea, sino, como consecuencia se percibe una heterogeneidad en la respuesta en frecuencia de la sala teniendo puntos con mayor o menor energía, esto sucede con mayor notoriedad en baja frecuencia ya que al

aumentar la frecuencia aumenta la densidad modal y es menos notorio el fenómeno. En consecuencia lo que se busca es una distribución en frecuencia donde las concentraciones de resonancias estén distribuidas con diferencias que no puedan percibir, o lo que es lo mismo,  $\Delta f$  pequeños (densidad modal).

La gran mayoría de recintos tienen formas equivalentes a paralelepípedos rectangulares, donde el fenómeno predominara con mayor intensidad, estos refuerzos ocurrirán a tres frecuencias básicas correlacionadas con sus dimensiones (alto, largo y ancho), más sus múltiplos, más los infinitos caminos posibles involucrados con reflexiones que retornen a su origen. En el rango de bajas frecuencias, existen tres tipos de modos de resonancia:

**Modos axiales (dominantes):** Son aquellos que involucran reflexiones sobre dos superficies vinculadas con las tres dimensiones principales del recinto (ancho, largo y alto), estableciéndose a partir de dos ondas que se propagan en forma paralela a cada uno de los ejes. Estos modos son los más importantes y fáciles de predecir, dado que ocurrirán en todas las frecuencias y sus múltiplos cuya longitud de onda sea igual a la mitad de las tres dimensiones principales.

**Modos tangenciales:** Son aquellos vinculados con las reflexiones sobre dos pares de superficies opuestas, por lo que involucran cuatro superficies con un total de cuatro ondas. En cada reflexión, perderán parte de su energía debido a la absorción, por lo que tendrán menor peso que los axiales (aproximadamente 3 dB).

**Modos oblicuos:** Son aquellos vinculados con las reflexiones sobre las seis superficies del recinto, con un total de ocho ondas en el trayecto, por lo que tendrán menor peso aún que los axiales (aproximadamente 6dB). Estos modos son de frecuencias más altas que el menor modo axial. Esta es una de las razones por lo que no es conveniente ignorarlos.

La siguiente expresión matemática vincula todos los modos posibles, esta ecuación es aplicable solamente para recintos con superficies rígidas y sin absorción:

$$f = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{p^2}{L^2} + \frac{q^2}{W^2} + \frac{r^2}{H^2}} \quad (1)$$

Donde  $f$  es la frecuencia del modo (Hz),  $c$ , es la velocidad del sonido,  $p$ ,  $q$  y  $r$  son números enteros positivos (0,1,2,3...n) vinculados con las tres dimensiones espaciales del recinto.  $L$ ,  $W$  y  $H$  (m) son respectivamente, largo, ancho y alto.

### 2.2.1 Criterio de Bolt (Bolt, Beranek y Newman)

Unos de los criterios más utilizados para obtener la densidad modal deseada es el criterio de Bolt [5].

El criterio de Bolt es aplicable a recintos rectangulares de pequeñas dimensiones, como el caso que nos ocupa.

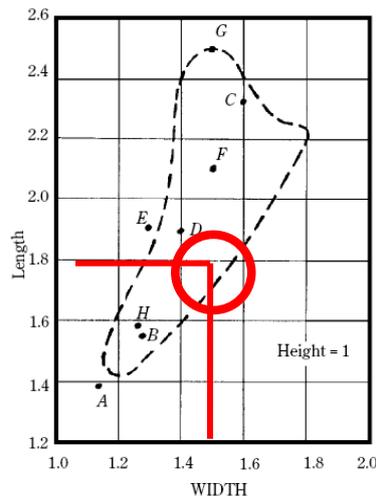


Figura 2. Diagrama de distribución modal de Bolt [5]

En la figura 2 se observa que, a partir de una altura unitaria, se puede obtener distintas relaciones dimensionales del largo y el ancho, dentro del área punteada, con valores razonables de diseño. Se puede dar una estimación del criterio para salas, siguiendo las siguientes proporciones remarcadas en la figura 2 y descritas en la siguiente ecuación.

$$\begin{matrix} H: & W, & L \\ 1: & 1,4, & 1,8 \end{matrix} \quad (2)$$

Se define así la geometría del recinto para obtener una distribución modal debe ser lo más homogénea posible. La teoría modal está pensada para recintos en forma paralelepípedo regular. Las cámaras son paralelepípedos pero no son regulares, ya que el techo y una pared lateral se pretenden inclinar para evitar la generación de ondas estacionarias dentro del recinto. Por tanto se debe estimar las proporciones de la cámara con un paralelepípedo grande que se forma con las dimensiones más grandes de la cámara y de igual manera con el rectángulo pequeño. Estas dimensiones se evalúan para saber si ambas están dentro del criterio de Bolt. En las tablas 3 y 4 se comparan las dimensiones para el recinto emisor y recinto receptor.

	<b>Dimensiones</b>	<b>Alto, z (m)</b>	<b>Largo ,x (m)</b>	<b>Ancho, y(m)</b>
<i>Recinto grande</i>	<i>Según diseño</i>	0,55	0,85	1,21
	<i>Según Criterio de Bolt</i>	0,55	0,85	1,22
<i>Recinto pequeño</i>	<i>Según diseño</i>	0,43	0,75	1,20
	<i>Según Criterio de Bolt</i>	0,43	0,75	1,35

Tabla 3 Dimensiones de la aproximación de la cámara de emisión

	<b>Dimensiones</b>	<b>Alto, z (m)</b>	<b>Largo ,x (m)</b>	<b>Ancho, y(m)</b>
<i>Recinto Grande</i>	<i>Según diseño</i>	0,55	0,85	1,04
	<i>Según Criterio de Bolt</i>	0,55	0,85	1,22
<i>Recinto pequeño</i>	<i>Según diseño</i>	0,43	0,75	1,00
	<i>Según Criterio de Bolt</i>	0,43	0,75	1,35

Tabla 4 Dimensiones de la aproximación de la cámara de recepción

### 2.2.2 Análisis Modal

Dado que las salas propuestas son de dimensiones irregulares y la teoría modal resuelve analíticamente recintos paralelepípedos, se usa la herramienta computacional COMSOL® en su versión 4.1 para resolver el problema usando la teoría de elementos finitos FEM (*Finite Element method*).

La geometría es 3D construida en el programa AutoCAD® de los recintos y se exporta al programa COMSOL 4.1®, en la solución de modelo se ha calculado el tamaño de la malla conociendo la frecuencia máxima que se desea simular en este caso 1500 Hz, 60 Hz por encima de la frecuencia de corte superior del sexto de octava centrado en 1355 Hz, esto sugiere un tamaño de malla de 0,03 metros. Esta resolución es elevada para la capacidad computacional disponible por lo que al final se ajusta a 8 elementos hasta los 430 Hz, dado que los modelos no son demasiados complejos (figura 3).

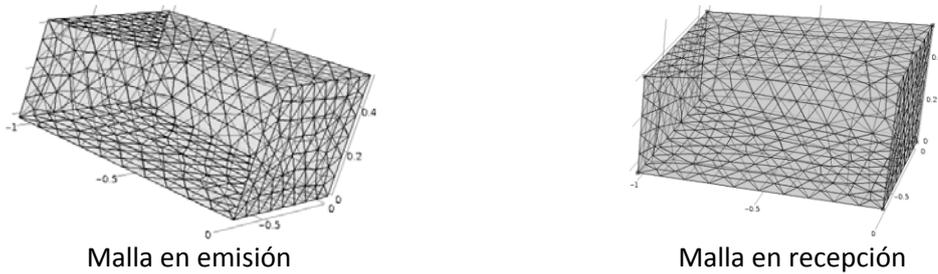


Figura 3. Modelos

En la figura 4 se pueden observar los distintos modos calculados. También se pueden obtener imágenes ilustrativas del comportamiento modal (figura 5).

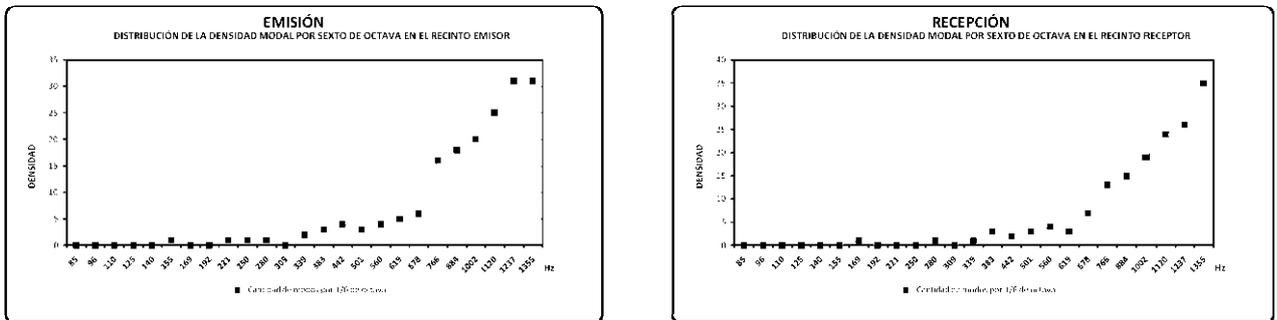


Figura 4. Densidad Modal

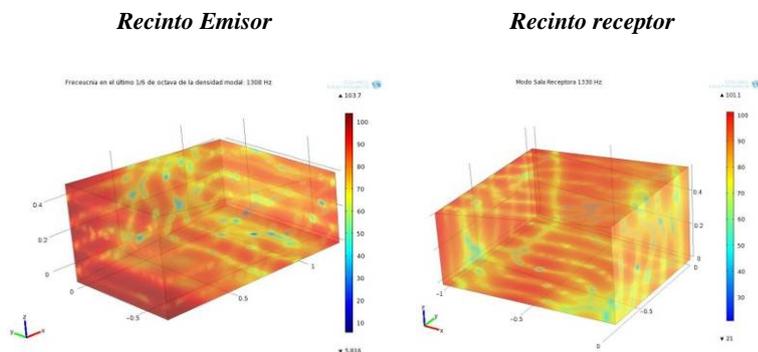


Figura 5. Modo dentro de la última banda de 1/6 de octava analizado en ambas salas.

## 2.3 Aislamiento Acústico:

El aislamiento acústico [6] de los recintos es la parte más importante del diseño y de la puesta en marcha del laboratorio, ya que deben ser recintos donde la transmisión por flancos sea lo más baja posible y además, garantizar niveles de ruido de fondo para los cuales no haya que realizar correcciones de nivel. Por tanto, el tipo de solución constructiva que se propone debe ser robusta pero a la vez liviana. El sistema parte de la premisa de garantizar por encima de los 50 dB el nivel de aislamiento de cada tabique que conforme el sistema constructivo, además un material [7] que sea versátil y permita de manera sencilla inclinar las paredes necesarias. Por tanto, lo más aconsejable es realizar un tabique doble usando láminas de placa de yeso laminado (PLY) con cámara de aire y material absorbente en su interior, y que la lámina interior y exterior estén desvinculadas. Para el caso del suelo se necesita un tipo de suelo flotante con suficiente rigidez para soportar la estructura.

### 2.3.1 Propuesta: Solución Constructiva

Se han considerado las referencias [8] y [9] para la búsqueda de la solución constructiva de la cámara de transmisión a escala. La solución propuesta para la construcción del laboratorio de medición del aislamiento acústico por vía directa o cámaras de transmisión consta de los materiales de la tabla 5.

Material	Uso
Composite (Alucobond®) de 6mm	Recubrimiento interior de las cámaras, coeficiente de absorción, congruente con el diseño.
Placas de yeso de 12,5 mm	Paredes interiores del Sistema constructivo
Placas de yeso de 15 mm	Paredes Exteriores del Sistema constructivo
Fibras termo-fusionadas	Material absorbente dentro del interior de las cámaras entre las dos láminas del sistema
Rieles de 90 mm	Aseguran la conexión y alineación de los montantes verticales.
Montantes de 48mm y 90 mm	Encajan dentro de los raíles, conforman el entramado de la estructura portante del sistema constructivo
Madera o MDF	Base estructural del sistema. Marcos de acople entre las cámaras
Material visco elástico de 10 mm de espesor	De alta densidad, permite el desacople estructural del sistema en especial en la conexión entre las cámaras y los marcos de adaptación.
Accesorios	Materiales básicos para el acabado y creación de los sistemas con placas de yeso

Tabla 5 Materiales propuestos para la construcción del laboratorio.

La solución propuesta para la construcción del laboratorio de medición del aislamiento acústico por vía directa o cámaras de transmisión consta de:

- Sistema de construcción en las paredes y techo tipo SAA (Tabique de estructura alternada) consiste en un muro doble formado por una estructura metálica simple con un doble línea de

montantes, de tal manera que se reduce el espesor del tabique sin que se efectúen uniones metálicas entre las estructuras evitando puentes acústicos.

- En el suelo un sistema formado por una placa de madera a modo de base estructural seguido de doble lamina de yeso de 15 mm, después un material absorbente formado por dos capas asimétricas de napa de poliéster adheridas térmicamente a una lámina visco elástica de alta densidad, y finalmente doble placa de yeso de 12 mm con acabado de Alucobond®.

Se sugiere la construcción de tres marcos de adaptación para adaptar las muestras a las cámaras, fabricados en madera con espesores de 5, 10 y 20 cm y recubiertos en los bordes por un material visco elástico al igual que el borde de la cámara con el que hacen contacto. En las figuras 6 y 7 se muestran planos del diseño final. Cada color representa un material de la tabla 5.

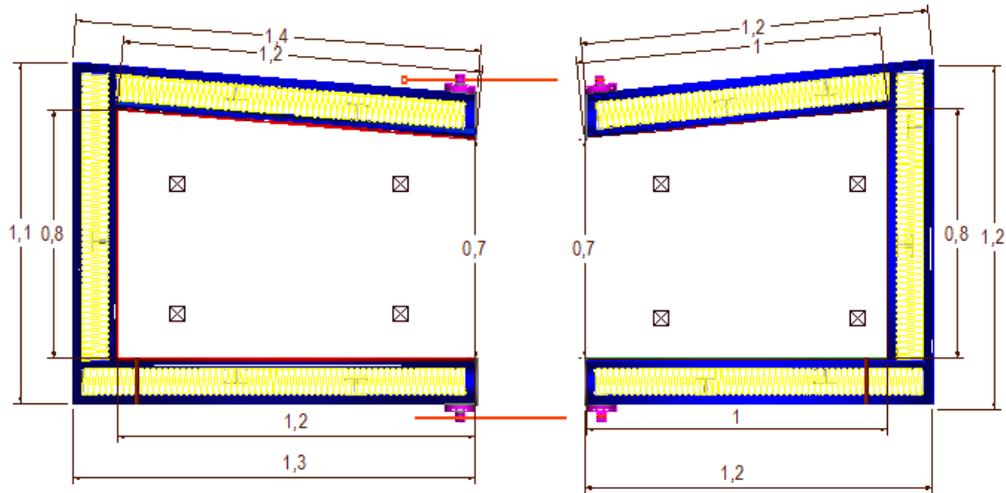


Figura 6. Planta derecha cámara emisora, izquierda cámara receptora.<sup>1</sup>

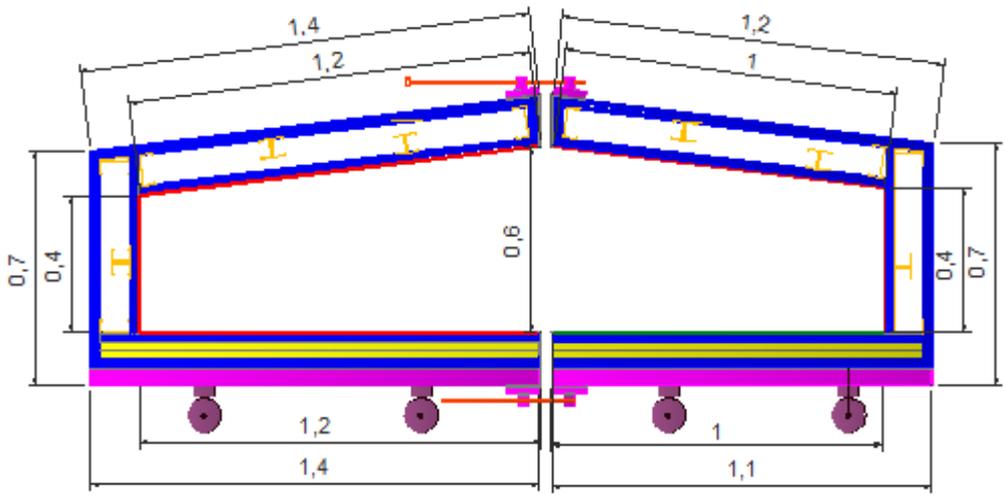


Figura 7. Corte, Derecha cámara emisora, derecha cámara receptora

### 3 Construcción del prototipo

A continuación se muestran algunas fotografías del prototipo ya construido en las figuras 8 y 9, mostrando algunos detalles.



Figura 8. Fotografías globales



Figura 9. Detalles de la cámara de transmisión a escala.

## 4 Conclusiones

En este trabajo se ha presentado una alternativa en la solución constructiva y se propone un sistema constructivo usando doble placas de yeso desvinculándolas con montantes alternados en H y relleno de fibra absorbente. Este sistema se ha puesto a prueba usando herramientas matemáticas para asegurar el funcionamiento de la propuesta del diseño antes de su construcción y puesta en marcha.

El aislamiento acústico diseñado es bastante robusto, y según las recomendaciones para hacer modelos a escala, presenta ventajas en cuanto al bloqueo de caminos de transmisión que para este tipo de laboratorio deben ser mínimos. En cuanto al acondicionamiento acústico, el material elegido para el revestimiento acústico de los recintos, ha conseguido que se cumplan los requisitos en cuanto a análisis modal y tiempo de reverberación. La geometría propuesta también proporciona un buen desempeño en la distribución modal homogénea de las frecuencias a analizar, según el análisis con FEM. Se recomienda el uso de difusores para mejorar la difusividad en baja frecuencia.

Como línea futura después de la construcción de la cámara es el proceso de validación. Dicho proceso debe cumplir con el procedimiento indicado en la norma UNE EN ISO 140:1:1995 Anexo A “Estimación del máximo índice de reducción acústica alcanzable”. Es importante aclarar que este laboratorio está proyectado para la medición de Paredes *del tipo A* “*Paneles Ligeros*”. Se debe medir un material con información reconocida por la normativa española para la edificación y el panel usado en la construcción del laboratorio (panel tipo SAA).

La limitación de la cámara es la baja frecuencia por lo que se sugiere el estudio de las transmisiones laterales, ya que adicionalmente dará información sobre el comportamiento del material no solo en la transmisión del flanco directo-directo (Dd) si no de su comportamiento respecto a los otros flancos que son los que bajan el rendimiento del material en la edificación.

## Agradecimientos

This project counts on the contribution of financial instrument LIFE of the European Union. Project LIFE09 ENV/ES/461: NOISEFREETEX-“DEMONSTRATIVE SOLUTIONS TO REDUCE NOISE POLLUTION IN INDUSTRIAL AREAS, USING FINISHING TECHNOLOGIES IN TEXTILE MATERIALS”



## Referencias

[1] <http://noisefreetex.aitex.net/>

- [2] UNE EN ISO 140-1:1997. Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 1: Requisitos de las instalaciones del laboratorio sin transmisiones indirectas.
- [3] UNE EN ISO 140-3:1995. Acústica. 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.
- [4] PAPADOPOULOS, C. I., Development of an Optimised, Standard-Compliant Procedure to Calculate Sound Transmission Loss: Design of Transmission Rooms, Applied Acoustic 63 (9), 1003–1029 (2002).
- [5] EVEREST. Alton. Master handbook of Acoustics. Fourth edition. Mc. Graw Hill.2001. fig 14-6 pag 276.
- [6] BARRON. Randall. Industrial Noise Control and Acoustics. Marcel Dekker Inc. 2003.
- [7] BRUNEAU.M.Putel.C. Material Acoustics Handbook. Wiley. 2006
- [8] GUTHRE Pat. The Architect's Portable Handbook, first step rules of thumb for building design, Third edition. Mc. Graw. Hill 2003
- [9] KUTTRUFF, Heinrich: Room acoustics. Applied science publishers LTD London. 1973.