

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Master en Ingeniería Acústica



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR DE GANDIA

CONSTRUCCIÓN DE UNA CÁMARA REVERBERANTE A ESCALA PARA EL ESTUDIO DE PANTALLAS ACÚSTICAS

TESIS DE MASTER

Autor:

Francisco Arrebola Ballesteros

Director/es:

D. Jesús Alba Fernández

D Romina del Rey Tormos

GANDIA, 2 de septiembre de 2011

Construcción de una cámara reverberante a escala para el estudio de pantallas acústicas

Autor: Francisco Arrebola Ballesteros

Director1: Jesús Alba Fernández

Director2: Romina del Rey Tormos

RESUMEN

La cámara reverberante es uno de los laboratorios acústicos más utilizados para determinar el coeficiente de absorción de materiales y dispositivos, o para ensayar la potencia acústica radiada por diferentes emisores. Las características y dimensiones vienen determinadas por diferentes normativas. En el caso en concreto de ensayos del coeficiente de absorción, las dimensiones de las cámaras reverberantes construidas conforme a la norma necesitan superficies de materiales de entre 10 y 12 m², en función del volumen de éstas. Sin embargo, a nivel de investigación de nuevos materiales acústicos, en la mayoría de los casos sólo se dispone de pequeñas probetas que no llegan en muchos casos ni al metro cuadrado.

Este problema que se acaba de narrar aparece en el caso particular del proyecto europeo NOISEFREETEX, donde este trabajo se ubica. 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.

En este proyecto debe trabajarse en la valoración de la idoneidad acústica y para ello deben realizarse pruebas sobre la capacidad de absorción acústica de los materiales primarios, así como de los tejidos desarrollados a partir de estos materiales. Dado que no es sencillo fabricar grandes cantidades cuando se habla de nuevos productos a nivel de laboratorio, se ha planteado el “encoger” el recinto de ensayo para que se adapte a los tamaños medios de las probetas que se dispondrán en este proyecto.

En este trabajo se realiza el planteamiento y el diseño desde diferentes puntos de vista y distintas condiciones de una cámara reverberante a escala, para su paso posterior a fabricación y prevalidación final con ensayos comparativos con la cámara reverberante a escala real.

ABSTRACT

The reverberant chamber is one of the most used labs to know the absorption coefficient of material and devices, or to test the acoustic power radiation by different transmitters. The characteristics and dimensions are determined by different rules. In the particular case of testing the absorption coefficient, the dimensions of the reverberation chambers built to the standard, required material surfaces between 10 and 12 m², depending on the volume of these. However, new research level of

Autor: Francisco Arrebola Ballesteros, email: fraarba1@epsg.upv.es

Fecha de entrega: 02-09-2011

acoustical materials, in most cases only small samples are available that do not come often square meter.

This problem appears in the particular case of the European project NOISEFREETEX, where this work is.

In this project must have worked in the acoustic assessment of the suitability and thus must be tested on the ability of sound absorption of the primary materials, as well as the tissues developed from these materials. As not easy to manufacture large quantities, when it comes to new products at the laboratory, has raised the “shrink” the test chamber to fit the average sizes of the specimens shall be placed in this project.

This paper takes the approach and design from different viewpoints and different conditions at a scale reverberant chamber, for subsequent transfer to manufacturing and final pre validation comparative trials with the scale reverberation chamber.

ÍNDICE

1. OBJETO Y ANTECEDENTES.....	4
1.1. Introducción.....	4
1.2. Objetivo.....	4
1.3. Estructura de la tesina.....	5
2. INTRODUCCION TEÓRICA.....	6
2.1. Normativa para cámara reverberante.....	6
2.1.1. UNE-EN ISO 354:2004. Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante.....	6
2.1.2. UNE-EN ISO 3741:2010. Determinación de los niveles de potencia acústica de las fuentes de ruido a partir de la presión acústica. Métodos de precisión en cámaras reverberantes.....	9
2.1.3. UNE-EN 1793-1:1998. Dispositivos reductores de ruido de tráfico en carreteras. Método de ensayo para determinar el comportamiento acústico. Parte 2: Características intrínsecas relativas la absorción sonora.....	10
2.2. Cámara reverberante de la EPSG.....	11
2.2.1. Características y dimensiones.....	12
3. DESARROLLO DE LA TESINA.....	14
3.1. Propuesta de escalado de cámara reverberante.....	14
3.1.1. Dimensiones.....	15
3.1.2. Modelado numérico del interior.....	16
3.1.3. Decisiones respecto al aislamiento acústico.....	22
3.1.4. Comprobación de condiciones absorbentes acústicas.....	24
3.1.5. Otros detalles constructivos de interés.....	26
3.2. Control de la fabricación de la cámara reverberante a escala.....	28
3.3. Pantallas acústicas a escala.....	32
3.3.1. Diseño de elementos absorbentes acústicos a escala.....	33
3.3.2. Ensayos de materiales absorbentes acústicos a escala.....	35
3.3.3. Comparativa de resultados en la cámara a escala.....	43
3.3.4. Comparativa con resultados con la cámara reverberante a tamaño real.....	44
4. conclusiones y futuras líneas de investigación.....	46
4.1. Conclusiones.....	46
4.2. Futuras líneas de investigación.....	47
agradecimientos.....	49
referencias.....	50

1. OBJETO Y ANTECEDENTES

1.1. Introducción

Dentro de la acústica medioambiental y más concretamente en lo que atañe a las instalaciones industriales, se está trabajando para perfeccionar las características de los elementos acústicos que mejoren las condiciones ambientales y/o de trabajo. Es por ello que se plantea la necesidad de investigar en nuevos materiales que optimicen las prestaciones de las pantallas acústicas existentes hoy en día, y principalmente, en los materiales absorbentes acústicos que encontramos en su interior. Debido a esto, son los materiales reciclados, los que toman protagonismo en el estudio, con tal de disminuir la contaminación acústica ajustándose a los nuevos planes de acción vigentes centrándose en un puntos de vista cada vez más ecológico y medioambiental.

Por otro lado y dado el coste y el tiempo de ensayo que supone realizar el estudio y sobre todo de la fabricación de los materiales con elementos a tamaño real en las correspondientes instalaciones, se plantea la fabricación de una cámara reverberante a escala, de modo que dichos ensayos se realicen con materiales absorbentes y pantallas acústicas a escala con tal de economizar en tiempo y coste de fabricación estos elementos, buscando conseguir unos resultados similares a los que se puedan obtener en la cámara reverberante real.

Se plantea pues, en este trabajo, el estudio, diseño y ejecución de una cámara reverberante a escala de modo que posteriormente se realice un estudio de materiales acústicos reciclados susceptibles de usarse en pantallas acústicas, así como su validación tras su comparativa con los realizados en la cámara reverberante real. Esto permitirá más adelante, tener una herramienta para la búsqueda posterior de las mejores combinaciones y soluciones.

1.2. Objetivo

El objetivo principal de este proyecto es el diseño, construcción y validación de una cámara reverberante a escala, así como una serie de pantallas acústicas a escala con distintas configuraciones, mediante las que se pueda estudiar y validar en su caso nuevos tejidos fabricados a partir de materiales textiles reciclados (como pueden ser resinas del polvo de la hilatura, recortes, orillas o artículos defectuosos, etc.) que sean capaces de reducir la contaminación acústica en las zonas industriales próximas a las zonas urbanas. De esta forma se busca un valor añadido en referencia a la sostenibilidad, la capacidad de reutilización y el reciclaje de los materiales basados en fibras naturales o desechos de residuos industriales entre otros. Además, se pretende poner en marcha la cámara reverberante a escala y realizar las primeras valoraciones de distintos materiales, observando el comportamiento de absorción del sonido en un determinado rango de frecuencias.

Para profundizar en lo que mediante la presente memoria se pretende conseguir, a continuación se detallan una serie de tareas más concretas:

- 1) Diseño de la cámara reverberante a escala, intentando cumplir en la medida de lo posible la norma UNE EN ISO 354:2004 [1], utilizando para ello el método FEM, en la medida de lo posible.
- 2) Ejecución de pantallas acústicas a escala con distintas configuraciones (perforaciones y disposición de estas) y materiales absorbentes acústicos en su interior para el estudio de la absorción del sonido que presentan en el rango de frecuencia de 100 Hz a 5kHz, según la normativa UNE EN 1793-1:1998 [2].
- 3) Realizar mediciones de materiales absorbentes acústicos y pantallas acústicas similares a las realizadas a escala para caracterizar mediante la cámara reverberante a tamaño real.
- 4) Comparar los resultados obtenidos en ambos casos, cámara reverberante a escala y tamaño real.
- 5) Establecer nuevas líneas de investigación en este ámbito.

1.3. Estructura de la tesina

La estructura de la tesina consta de cuatro apartados:

1.- OBJETO Y ANTECEDENTES; donde se detallan los objetivos del trabajo final de máster estableciendo la estructura del mismo.

2.- INTRODUCCION TEORICA; en este punto se describe la naturaleza del problema. Asimismo se realiza un breve resumen de las distintas normativas aplicadas en dicho trabajo. Por último, se detallan las características de la cámara reverberante a tamaño real que encontramos en la Escuela Politécnica Superior de Gandía.

3.- DESARROLLO DEL TRABAJO FINAL DE MASTER; en el punto tres, se especifican los motivos del escalado, las dimensiones de la cámara reverberante a escala, modela numérico del interior, y otros aspectos como son la toma de decisión respecto al aislamiento acústico de la misma, sus condiciones de absorción acústica y otros detalles. Además, se detalla una breve introducción sobre las pantallas acústicas, su diseño y los distintos materiales absorbentes a estudiar. Asimismo, para finalizar dicho punto, se realiza una comparativa tanto en cámara reverberante a escala como a tamaño real para los distintos elementos estudiados.

4.- CONCLUSIONES Y FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACION; por último, en el punto cuatro se exponen las conclusiones principales tras el desarrollo del trabajo realizado y se plantean una serie de líneas de investigación en las que poder seguir trabajando en un futuro.

2. INTRODUCCION TEÓRICA.

2.1. Normativa para cámara reverberante

En relación a las normas referentes a las características y peculiaridades en el diseño de una cámara reverberante y de los dispositivos reductores de ruido, se establecen las siguientes normas que se desarrollan a continuación. En este punto se tienen en cuenta todas las normas para las que se pretende utilizar posteriormente la cámara reverberante a escala, por lo que es necesario tenerlas en cuenta para el diseño.

2.1.1. UNE-EN ISO 354:2004. Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante.

La normativa UNE-EN ISO 354:2004 [1] expone dos métodos para definir el coeficiente de absorción. Métodos que calculan el tiempo de reverberación con y sin material en la cámara reverberante, para a partir de éste, calcular mediante la ecuación de Sabine el área de absorción equivalente (A_T) y acto seguido el coeficiente de absorción sonora del material (α_S).

A continuación se detallaran las condiciones y peculiaridades descritas en la normativa:

El volumen de la cámara de aproximadamente 200m^3 . Si el volumen es a partir de 500m^3 , los resultados a altas frecuencias no serán precisos debido a la absorción del aire.

Para una distribución uniforme de frecuencias propias, especialmente en las bandas de baja frecuencia, la cámara reverberante debe cumplir con la siguiente condición:

$$I_{m\acute{a}x} < 1.9 V^{1/3} \quad (1)$$

, donde $I_{m\acute{a}x}$ es la longitud del mayor segmento de recta inscrito en la cámara, y V es el volumen de esta.

Durante la caída de nivel sonoro, el campo en la cámara debe ser suficientemente difuso para obtener una difusión satisfactoria.

La muestra a ensayar tendrá un área entre 10 a 12m^2 si el volumen de la cámara es de 200m^3 . Si el volumen difiere, el margen en el que está comprendida el área será diferente ya que los números limitantes se multiplicarán por el siguiente factor:

$$(V/200_{\text{m}^3})^{2/3} \quad (2)$$

La muestra debe tener una forma rectangular con una relación anchura/largo entre 0,7 y 1. Colocándose a 1m de todas las aristas de la cámara y no paralelas.

Según el tratamiento que se vaya a dar al material a ensayar, el montaje que se utilice a la hora de medir el tiempo de reverberación será uno u otro. Se especifica en el anexo B de la norma.

Las mediciones realizadas se presentan en tercios de octavas, con las siguientes frecuencias centrales en hercios: 100 – 125 – 160 – 200 – 250 – 315 – 400 – 500 – 630 – 800 – 1000 – 1250 – 1600 – 2000 – 2500 – 3150 – 4000 – 5000 Hz.

Hay que vigilar las condiciones de humedad y temperatura en las que estamos midiendo, pues estas pueden afectar notablemente en los resultados. Todas las muestras deben ser medidas bajo las mismas condiciones de humedad y temperatura. Éstas se encuentran el 30 y 90% de humedad, y una temperatura mayor de 15°C.

El micrófono y la fuente deben poseer un patrón omnidireccional.

Se prevén diferentes posiciones de micrófono. Distaran como mínimo 1,5m entre ellas, 2m de la fuente sonora y 1m de cualquier superficie de la cámara y de la muestra de ensayo.

Las posiciones de la fuente distarán al menos 3m entre ellas.

El número de posiciones de micro y fuente a utilizar debe ser como mínimo 12. Entre las que se describen como mínimo 3 posiciones de micrófono y 2 de fuente.

Los dos métodos que recoge la normativa UNE-EN ISO 354:2004 [1] respecto a la edición de las curvas de caída de niveles son: el **método de la señal de ruido interrumpida**, que ha sido el seleccionado para el desarrollo de este trabajo, y el **método de la respuesta impulsiva integrada**.

Método de la señal de ruido interrumpida

Proceso estadístico en el que es obligatorio promediar varias curvas de caída o tiempos de reverberación para poder obtener una repetitividad adecuada.

La cámara debe ser excitada mediante una señal de entrada de ruido de banda ancha o de banda limitada con un espectro continuo en frecuencia. Los niveles de la señal deben estar al menos 10dB por encima del nivel de ruido de fondo.

La señal, antes de ser interrumpida, debe ser suficientemente larga para producir un nivel de presión sonora estacionario, para todas las bandas de frecuencia de interés. Para asegurar que esto, el tiempo de excitación debe ser al menos la mitad del tiempo de reverberación esperado.

Obtenidos los resultados de las mediciones, es obligatorio realizar el promediado de varias de ellas ejecutadas en la misma posición micrófono/altavoz con el fin de reducir las incertidumbres causadas por desviaciones estadísticas. La normativa indica que el promediado debe realizarse por lo menos tres veces y se puede realizar mediante dos métodos:

Promediado de las curvas de caída de nivel registradas en una de las posiciones micrófono/altavoz. A este método se le llama promediado de conjunto.

Evaluando primero cada curva de caída de nivel. En caso de no poder realizar el primero. Es un promediado aritmético de los tiempos de reverberación.

Método de la respuesta impulsiva integrada (directo o indirecto)

El método directo se basa en medir directamente empleando una fuente impulsiva que produzca un impulso con suficiente ancho de banda y energía que cumpla los mismos requisitos que se piden en el método anterior.

El método indirecto emplea señales sonoras especiales que producen una respuesta impulsiva únicamente después de un procesado especial de la señal del micrófono, ya sea mediante instrumentos basados en hardware y software externo, o instrumentos que sean parte integrada de la instrumentación de medida.

El espectro debe ser básicamente plano dentro de la banda de tercio de octava real que se quiera medir.

Ambos utilizarán un sistema de adquisición con las mismas características que en el método de la señal interrumpida, además de añadir un instrumento capaz de digitalizar la señal grabada y de realizar el procesado de datos necesario, incluyendo la integración de la respuesta impulsiva y la evaluación de la curva de caída.

Para realizar la integración de la respuesta impulsiva se ha de generar una curva de caída para cada banda de frecuencia mediante una integración invertida en el tiempo de la respuesta impulsiva cuadrática.

Una vez realizado todo lo descrito anteriormente, habremos obtenido los valores de T_1 y T_2 , que son los tiempos de reverberación sin y con muestra respectivamente, mediante los que se obtendrá el área de absorción equivalente correspondiente a cada uno, es decir, A_1 sin muestra y A_2 con muestra, y seguidamente A_T (área de absorción equivalente en m^2 , $A_T = A_2 - A_1$).

La norma nos ofrece una tabla en la cual especifica unos valores los cuales nuestros resultados no pueden sobrepasar.

Frecuencia Hz	100	125	160	200	250	315	400	500	630
A_T, m^2	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5
Frecuencia Hz	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
A_T, m^2	6.5	7.0	7.5	8.0	9.5	10.5	12.0	13.0	14.0

Tabla 1: Área de absorción equivalente según UNE EN-ISO 354:2004

Nota: Si el volumen de la cámara reverberante fuese mayor de $200m^3$, estos valores deben multiplicarse por el factor $(V/200m^3)^{2/3}$.

Con todos estos valores ya podemos disponer de la variable que nos interesa, el coeficiente de absorción sonora, el cual se calculara mediante la fórmula:

$$\alpha = \frac{A_T}{S} \tag{3}$$

, donde S es el área, en metros cuadrados, de la muestra de ensayo.

2.1.2. UNE-EN ISO 3741:2010. Determinación de los niveles de potencia acústica de las fuentes de ruido a partir de la presión acústica. Métodos de precisión en cámaras reverberantes.

La norma UNE-EN ISO 3741:2010 [2] describe las instalaciones de ensayo acústico, la instrumentación y los procedimientos que se deben usar para la determinación de los niveles de potencia acústica en bandas de octava o tercio de octava, con precisión de laboratorio, emitidos por fuentes de ruido. Además describe dos métodos a través de los cuales se determinará la potencia de la fuente bajo estudio, calificados como métodos de precisión de grado 1, de los cuales se ha elegido el procedimiento directo. Éste último ha sido el que se ha elegido para los ensayos y permite calcular el nivel de potencia sonora de la fuente a partir del nivel de presión medido en la cámara reverberante así como del tiempo de reverberación y volumen de la misma. La potencia acústica vendrá dada por la siguiente expresión:

$$L_w = \bar{L}_p + \left\{ 10 \log \frac{A}{A_0} + 4.34 \frac{A}{S} + 10 \log \left(1 + \frac{Sc}{8Vf} \right) - 25 \log \left[\frac{427}{400} \frac{B}{B_0} \sqrt{\frac{273}{273+\theta}} \right] - 6 \right\} \tag{4}$$

donde, para cada banda de frecuencia considerada:

L_w es el nivel de potencia sonora de la fuente bajo estudio (dB);

L_p es el nivel de presión acústica medio en la cámara reverberante (dB);

A es el área de absorción equivalente de la cámara reverberante (m^2);

A_o es igual a 1 (m^2);

S es la superficie total de la cámara reverberante (m^2);

V es el volumen de la cámara reverberante (m^3);

f es la frecuencia central de la banda correspondiente (Hz);

θ es la temperatura ($^{\circ}C$);

B es la presión atmosférica (Pa);

B_o es igual a 1.013×10^5 (Pa);

c es la velocidad del sonido de la temperatura θ , $c = 20.05\sqrt{273 + \theta}$ (m/s)

Finalmente el término $4.34 A/S$ es añadido para tener en cuenta la absorción del aire en cámara de ensayo.

Por otro lado, se detalla en el anexo D, que el coeficiente de la cámara reverberante debería ser lo suficientemente pequeño como para asegurar un campo reverberante adecuado y lo suficientemente grande como para minimizar el efecto de los modos de la cámara sobre la potencia acústica producida por la fuente por debajo de una frecuencia, f , dada por la siguiente expresión:

$$f = \frac{2000}{V^{1/3}} \text{ (Hz)} \quad (5)$$

, donde V corresponde al volumen de la cámara, expresado en m^3 .

2.1.3. UNE-EN 1793-1:1998. Dispositivos reductores de ruido de tráfico en carreteras. Método de ensayo para determinar el comportamiento acústico.

Parte 2: Características intrínsecas relativas la absorción sonora.

Se basa en la obtención del coeficiente de absorción acústica, a_s , de pantallas acústicas o dispositivos reductores de ruido de tráfico en carreteras, en cámara reverberante, según el método descrito en la norma UNE EN-ISO 354:2004 [1], Medición de la absorción acústica en cámara reverberante.

Además se debe especificar el índice de evaluación de la absorción acústica, DL_α , para clasificar el comportamiento de absorción. Se realiza mediante la siguiente expresión:

$$DL_\alpha = -10 \log \left| 1 - \frac{\sum_{i=1}^{i=18} \alpha_{S_i} 10^{0,1L_i}}{\sum_{i=1}^{i=18} 10^{0,1L_i}} \right| \quad (6)$$

, donde α_{Si} , es el valor del coeficiente de absorción sonora de la i -ésima banda de tercio de octava y L_i el nivel de presión sonora normalizado ponderado A, en decibelios, del ruido de tráfico rodado dentro de la banda de tercio de octava i -ésima del espectro definido en la norma UNE-EN 1793-3:1998 [3].

Los dispositivos reductores de ruido de tráfico se caracterizan por favorecer la pérdida de nivel sonoro por transmisión y absorción. No obstante, es conveniente definir un espectro de ruido de tráfico para el cálculo de los índices de evaluación dado que depende de la frecuencia.

En esta norma se definen las propiedades fundamentales del ruido de tráfico rodado mediante un espectro sonoro normalizado. Este es necesario para poder determinar los índices de evaluación de los dispositivos reductores de ruido. No se puede aplicar en condiciones reverberantes como túneles.

f (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630
dBA	-20	-20	-18	-16	-15	-14	-13	-12	-11
f (Hz)	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
dBA	-9	-8	-9	-10	-11	-13	-15	-16	-18

Tabla 2: Espectro normalizado de ruido de tráfico.

Se estipulan los siguientes valores para determinar la categoría de los dispositivos.

Categoría	A0	A1	A2	A3	A4
DL_□ (dB)	No determinado	<4	4 a 7	8 a 11	>11

Tabla 3: Categorías según UNE-EN 1793-1:1998

2.2. Cámara reverberante de la EPSG

La cámara reverberante de la EPSG se caracteriza por tener un volumen interior de 238 m³ y una superficie total de 236 m².

Según recomienda la norma UNE EN-ISO 354:2004 [1], el diseño de cualquier cámara reverberante debe cumplir con una serie de especificaciones para el correcto funcionamiento y uso de la misma.

A destacar, un volumen de 200 m³, que la longitud mayor interior cumpla con $1.9V^{1/3} > D$, que la superficie total (S_{Total}) tenga un compromiso con el valor obtenido a partir de la expresión; $6V^{2/3}$. Del mismo modo, que el tiempo de reverberación (T_{60}), que considera la caída total de la señal, sea igual o superior a la siguiente igualdad; $V/S=1.01$.

En el siguiente subapartado realizaremos la verificación de las recomendaciones anteriormente descritas.

2.2.1. Características y dimensiones

La cámara reverberante es una sala con una superficie total compuesta por 6 caras irregulares. (Ver Fig.1). Para evitar la presencia de modos propios, especialmente en bajas frecuencias, no existe ningún frente paralelo entre sí. De hecho, el ángulo entre frentes opuestos corresponde aproximadamente a 5° en todos los casos. El material que reviste interiormente la cámara reverberante es hormigón.

Como se ha citado anteriormente, el volumen de la cámara reverberante es de 238 m^3 es fundamental pues el máximo tiempo de reverberación se ve limitado por este. Por otro lado, el incremento del volumen también cambia los modos de bajas frecuencias por debajo de las frecuencias de interés. Esto provoca un aumento del grado de difusión en el rango audible. Sin embargo, el incremento del volumen de la cámara, también provoca un aumento de la absorción del aire en altas frecuencias.

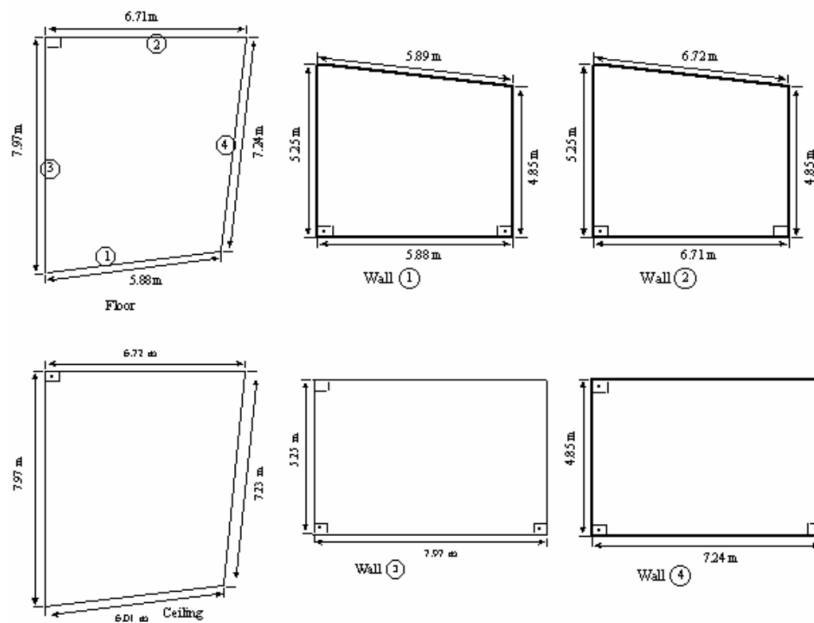


Fig.1. Diseño y dimensiones de la cámara reverberante de EPSG.

Para conocer las características de cámara reverberante de la EPSG se ha procedido a su caracterización, de manera que en primera instancia se ha obtenido el ruido de fondo. Acto seguido, el tiempo de reverberación para finalizar con el área de absorción acústica, estando la cámara vacía.

Los valores obtenidos al respecto, son los que se detallan a continuación en la tabla...

f(Hz)	TR cámara (s)	R. de fondo	A(m ²) cámara	f(Hz)	TR cámara (s)	R. de fondo	A(m ²) cámara
100	16.8	33	3.25	800	11.0	6	4.55
125	12.2	24	4.66	1000	10.5	4	4.93
160	13.3	22	4.66	1250	9.7	4	4.93
200	12.2	15	4.66	1600	8.5	5	4.93
250	12.2	15	4.66	2000	7.3	4	6.52
315	12.5	14	4.66	2500	6.2	5	6.52
400	12.2	13	4.66	3150	4.8	7	6.52
500	11.9	7	4.55	4000	3.7	6	9.65
630	11.1	6	4.55	5000	2.9	7	9.65

Tabla 4.: Características de la cámara reverberante

Tras realizar el estudio de la cámara, se llega a la conclusión que con el fin de obtener unas condiciones óptimas de campo difuso, es primordial reducir considerablemente la formación de modos normales, en especial en bajas frecuencias sin reducir en exceso los niveles de presión sonora en su interior. Por ello no se debe obviar el hecho que la influencia de diferentes aspectos como pueden ser los dispositivos usados para evaluar el tiempo de reverberación, la sala de ensayo, la muestra, la fuente y los receptores, toma un punto muy importante en los resultados obtenidos.

El volumen de la cámara es un parámetro fundamental puesto que el número de reflexiones que se generan depende de este. Así, su incremento disminuye el número de reflexiones para tiempos iguales, lo que produce una mayor concentración en los modos normales a bajas frecuencias y por tanto disminuye la difusión. Por ello, las medidas encaminadas a reforzar la difusión interior de la cámara, se han de incrementar a medida que aumenta el volumen. Por consiguiente, el volumen de la cámara, tiene el valor de: $V = (238 \pm 2) \text{ m}^3$ y una superficie de: $S = (236 \pm 2) \text{ m}^2$.

Para que la distribución de frecuencias en la cámara sea lo más uniforme posible, sus dimensiones de la cámara deben cumplir con la siguiente relación:

$$\frac{L_x}{1} = \frac{L_y}{\sqrt{2}} = \frac{L_z}{\sqrt{4}} \tag{7}$$

Destacar, que en todos los casos se ajusta a las dimensiones exigidas para medidas de coeficiente de absorción. Cumpliéndose además la recomendación detallada anteriormente donde se especifica: $1.9V^{1/3} > D$, donde D es la diagonal mayor y V es el volumen de la cámara. La otra recomendación, $S_{\text{Total}} = 6V^{1/3}$ ($236 \text{ m}^2 = 230 \text{ m}^2$) también se verifica.

En la tabla que se muestra a continuación se observa el tiempo de reverberación y el área de absorción acústica en cámara vacía por bandas de octava, comparándolos con los valores exigidos por la norma UNE-EN ISO354:2004 [1].

f (Hz)	Tr (s) Norma	Tr (s)	A (m²) Norma	A (m²)
63		11.86		3.25
125	5	8.27	6.88	4.66
250	5	8.27	6.88	4.66
500	5	8.48	6.88	4.55
1000	4.5	7.83	7.41	4.93
2000	3.5	5.91	10.05	6.52
4000	2	4.00	13.75	9.65
8000		2.12		18.19

Tabla 5: Comparación del tiempo de reverberación y del área de absorción en cámara vacía con el Tr mínimo y A máximo exigidos por la norma.

Por último, la exigencia de $T_r \geq V/S=1.01$, se cumple en todas las bandas, así como las exigencias de Absorción mínima.

Por ello, se verifica que los parámetros elegidos de la cámara son correctos y están dentro de las normas vigentes para poder medir coeficientes de absorción de materiales absorbentes y potencia de fuentes de ruido.

3. DESARROLLO DE LA TESIS

En el punto 3.1. se realiza un resumen de las decisiones tomadas para la construcción de la cámara reverberante a escala.

3.1. Propuesta de escalado de cámara reverberante.

Tras realizar un estudio sobre las distintas posibilidades de escalado de la cámara reverberante, se ha decidido trabajar en la escala de 1:6, por cuestiones de tamaños y espacio. Es importante tener en cuenta, que cuanto mayor sea la escala, mayor será la frecuencia del campo sonoro a simular.

Para la propuesta de escalado, se ha tomado como referencia la cámara reverberante de la EPSG, y su volumen interior equivalente a 238 m³ aunque no se haya mantenido su diseño original.

En los estudios llevados a cabo con modelos a escala, se puede comprobar que la elección de los materiales que forman la superficie del modelo es el principal problema.

Makrinenko [15], informa que el campo sonoro debe ser simulado con n veces la frecuencia de la sala original, ya que la intención es simular las mismas condiciones en las que el sonido se propaga en el sistema real.

3.1.1. Dimensiones

Como se ha citado anteriormente, el diseño y dimensionado de la cámara reverberante a escala se ha realizado a partir del modelo a escala real donde se cumple con lo especificado en la normativa correspondiente. No obstante, se ha considerado la necesidad de variar el diseño para intentar subsanar la falta de difusión concreta que aparece en la cámara reverberante a tamaño real.

Para llevar a cabo el diseño se han seguido las pautas marcadas en la normativa UNE-EN ISO 354:2004 [1] y en el anexo D (informativo) de la normativa UNE EN ISO 3741:2010 [2], donde se especifican una serie de directrices para el diseño de cámaras reverberantes.

Para una correcta distribución de las frecuencias dentro de la cámara reverberante a escala se debe cumplir con la siguiente relación:

$$\frac{L_x}{1} = \frac{L_y}{\sqrt[3]{2}} = \frac{L_z}{\sqrt[3]{4}} \quad (7)$$

$$\frac{1.032}{1} = \frac{1.1354}{\sqrt[3]{2}} = \frac{1.3357}{\sqrt[3]{4}}$$

$$\frac{1.032}{1} \approx 0,901 \approx 0,841$$

Asimismo, la siguiente condición es primordial para diseñar la forma de la cámara:

$$I_{\text{máx}} < 1.9 V^{1/3} \quad (1)$$

$$2.0325 < 1.9 * 1.3181^{1/3}$$

$$2.0325 < 2.0832$$

, donde $I_{\text{máx}}$ es la longitud del mayor segmento de recta inscrito en la cámara, y V es el volumen de ésta.

Por consiguiente, el diseño realizado para la cámara reverberante a escala es el que se representa en las siguientes figuras:

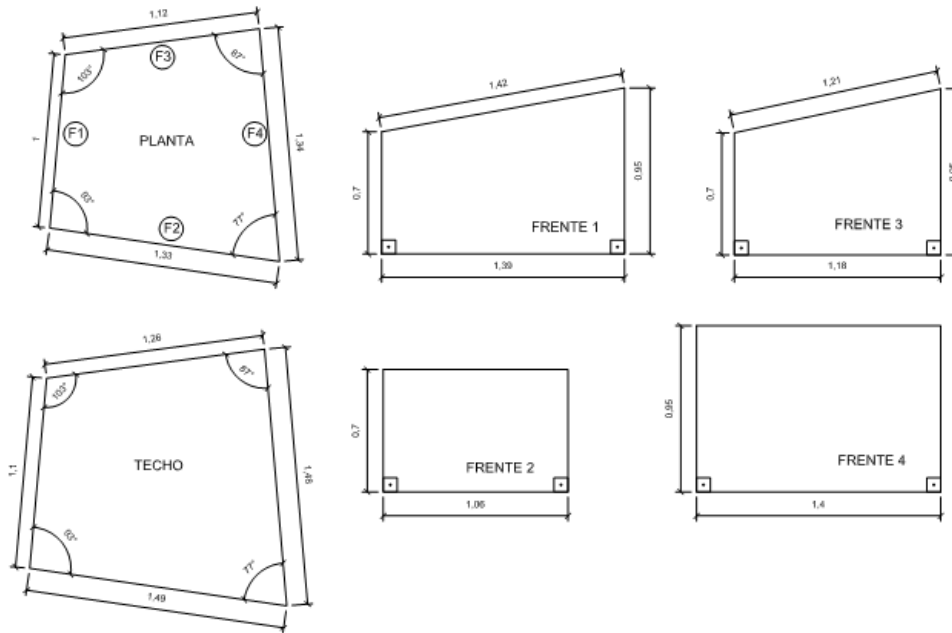


Fig.2.: Dimensiones interiores cámara reverberante a escala

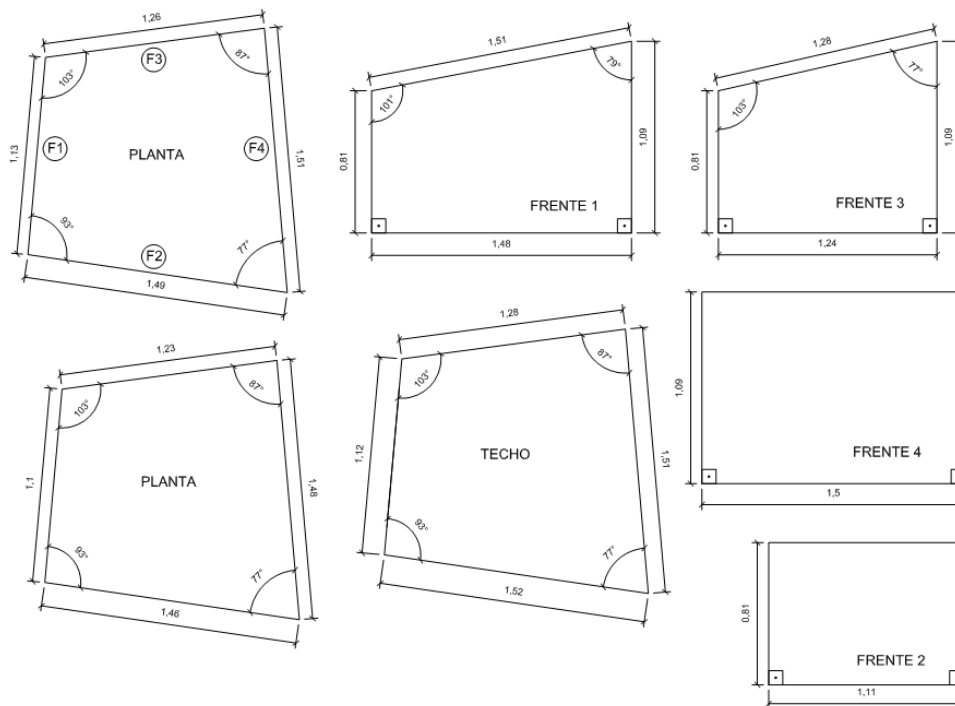


Fig.3.: Dimensiones exteriores cámara reverberante a escala

3.1.2. Modelado numérico del interior

En este subpartado se introduce el método de los elementos finitos, que se ha utilizado para poder desarrollar la memoria que se presenta.

Mediante el método de los elementos finitos, un sistema continuo se divide en una serie de porciones finitas delimitadas por nodos, cuyos grados de libertad constituyen las incógnitas del

problema. La exactitud de los resultados depende del número de elementos utilizados en el mallado.

Cuando se tiene un problema definido por un sistema continuo complejo, su resolución resulta a veces inaccesible. El método de los elementos finitos propone fragmentar el sistema en elementos menores, enlazando los resultados obtenidos para cada elemento y así poder lograr la solución del sistema original.

El primer paso en el método de los elementos finitos es el de discretizar la estructura. Es decir, se ha de dividir el sistema continuo en partes reemplazando por tanto un sistema con infinitos grados de libertad por otro con un número finito de grados de libertad. La forma, el tamaño y los grados de libertad permitidos al elemento fijarán la validez de la solución obtenida. En la figura 4 se observan diferentes ejemplos de discretización.

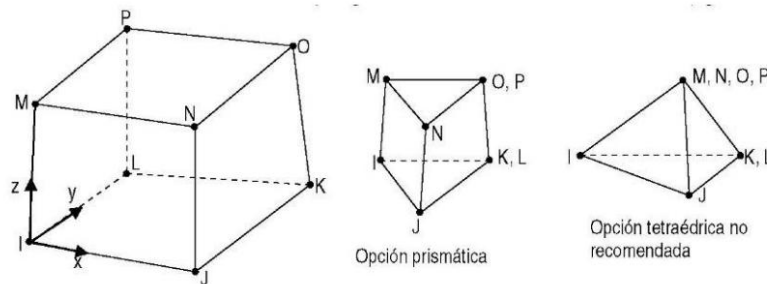


Fig.4. Ejemplos de discretización

Los elementos están conectados entre sí mediante un número discreto de puntos, llamados nodos situados en sus contornos. Las incógnitas de los problemas son los desplazamientos de los nodos.

En la figura 5 se muestra un elemento para un análisis en 2D. En ese caso, el mallado es con elementos planos de ocho nodos, con dos grados de libertad por nodo, lo que permite desplazamientos en X e Y.

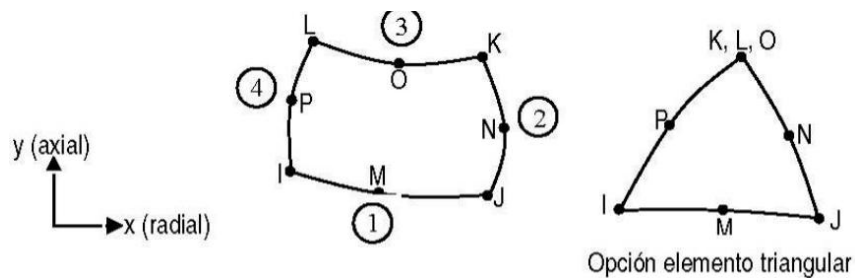


Fig. 5. Ejemplo análisis elemento en 2D

El número medio de elementos por modelo suele ser elevado (10000 elementos o más).

Para el caso particular que se plantea en esta memoria se ha realizado la caracterización de la cámara reverberante a escala en tres dimensiones por medio del método descrito en las líneas anteriores.

Desde un primer momento, se pretende realizar dicha simulación a través del ordenador central DFA Comsol, de modo que la exactitud de la simulación con la cámara real fuera más cercana. No obstante, debido a la imposibilidad de importar desde Comsol un modelo CAD (por falta del módulo CAD para importar) y la dificultad que atañe realizar dicho modelo desde el mismo software, se realiza la simulación desde un ordenador con unas prestaciones inferiores al citado anteriormente, provocando de este modo una posible reducción en el compromiso entre la cámara reverberante a escala y la simulación, utilizando un tamaño mayor de malla al deseado.

Para la simulación se ha realizado el mismo proceso que con el estudio de la cámara reverberante a escala (desarrollada detalladamente en el subapartado 3.3.2). Se han escogido dos posiciones de fuentes y seis posiciones de micrófono para cada fuente. Se obtiene el nivel de presión sonora para cada micrófono.

Las fuentes tienen una aceleración interior normal de 1 m/s^{-2} . La malla creada para la simulación tiene un tamaño de 0.075 metros y 0.001 metros como tamaño máximo y mínimo de elemento.

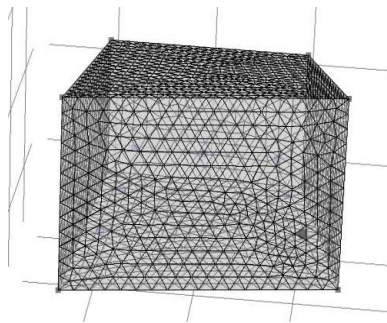
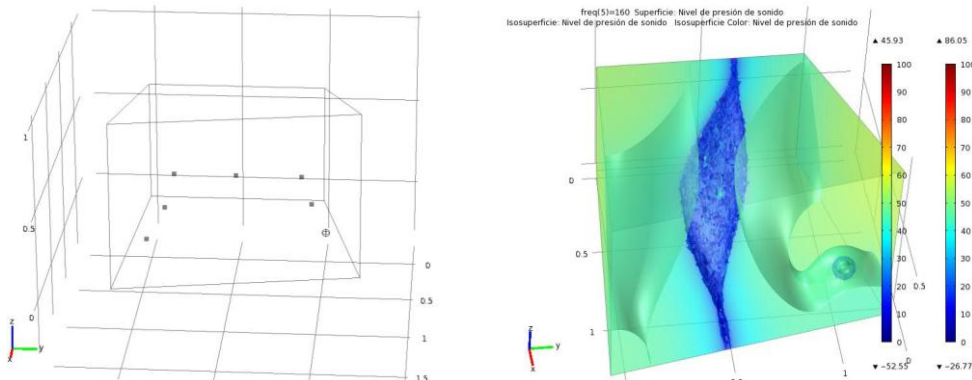


Fig. 6. Mallado cámara reverberante a escala

En las siguientes figuras se observa diferentes capturas de la simulación.



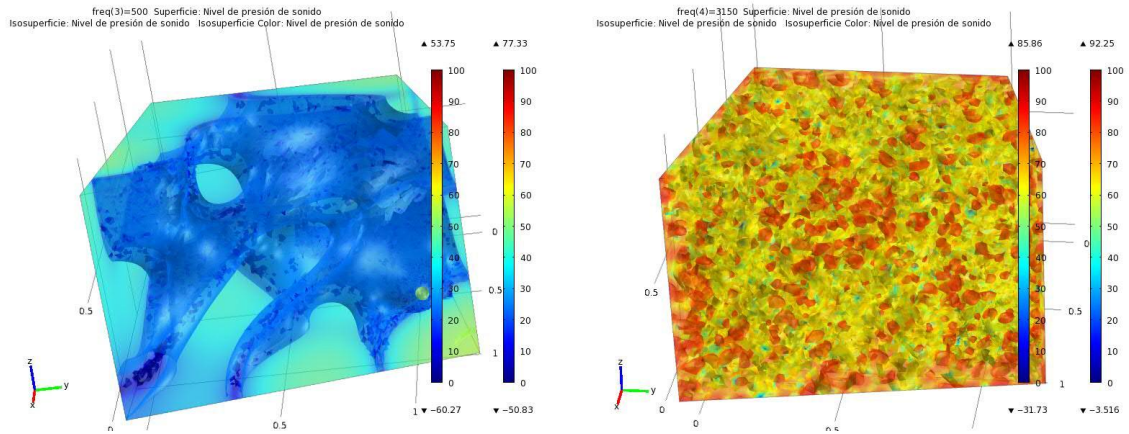


Fig. 7. Capturas nivel de presión sonora en posición fuente 1

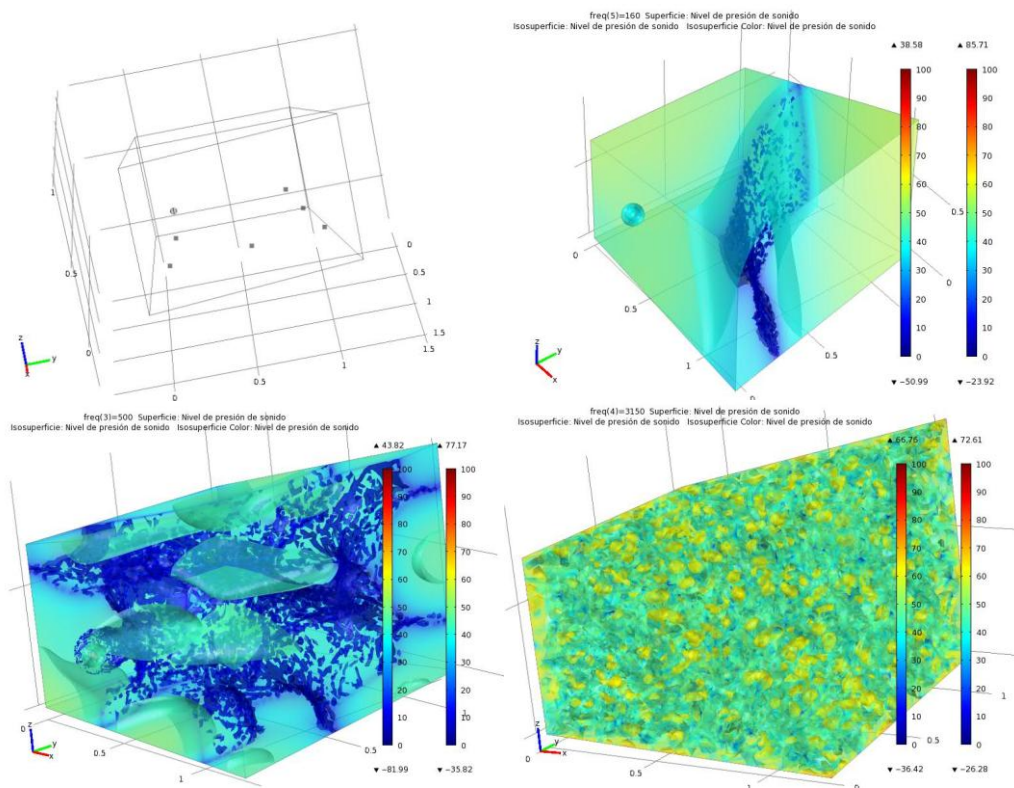


Fig. 8. Capturas de nivel de presión sonora en posición fuente 2

A continuación se muestran en las siguientes tablas los niveles de presión que se reflejan en las figuras anteriores.

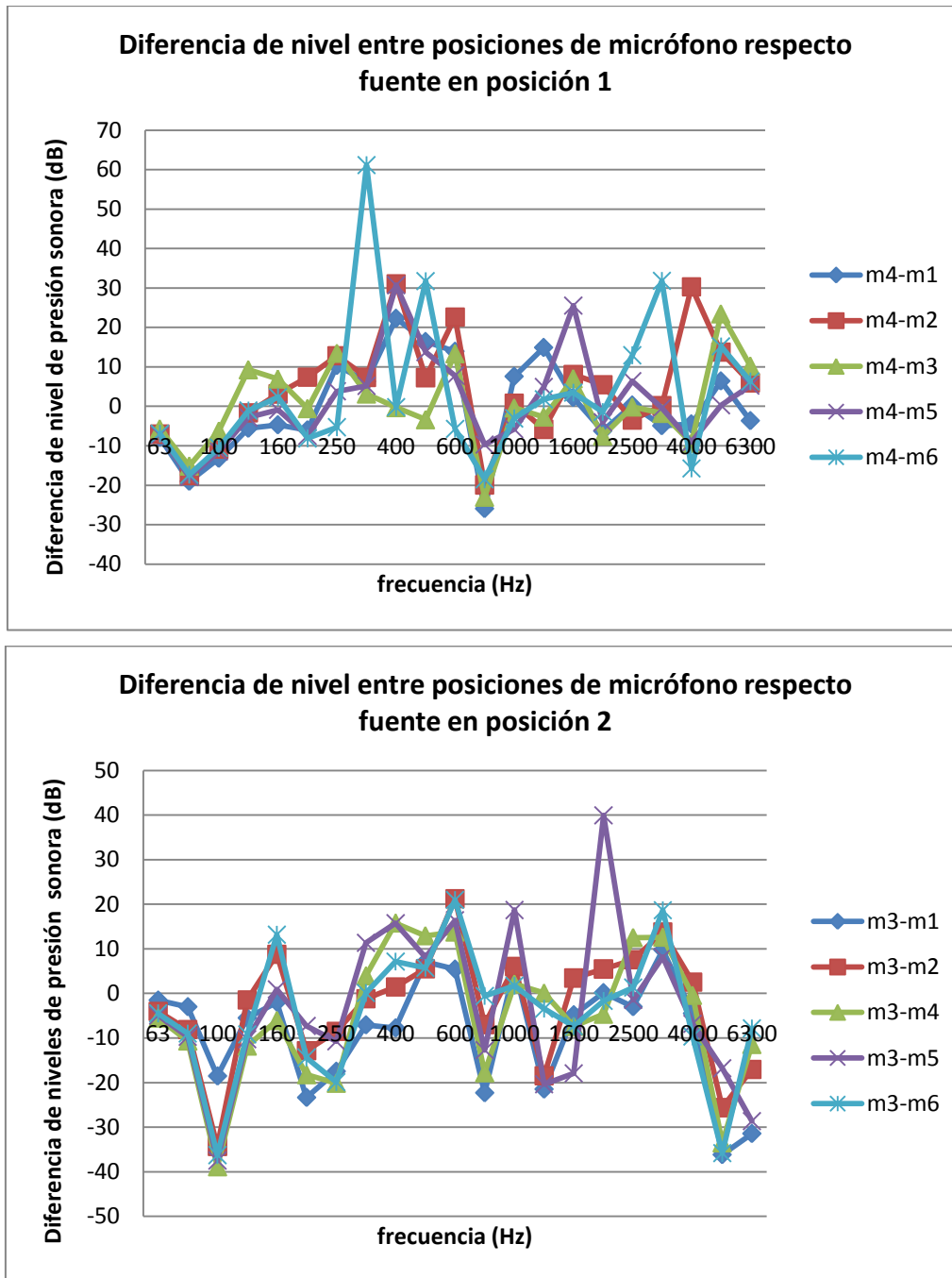


Fig. 9: Gráficas diferencia de nivel de presión sonora entre micrófono más alejado y resto respecto a la fuente

Como se observa en la figura 9, la oscilación del nivel de presión sonora para cada posición de fuente se produce alrededor de los 0 dB. Esto indica que podemos suponer que en promedio no hay cambio. No obstante en la tabla siguiente se incluye la media y la desviación estándar para cada uno de estos datos, donde se ve que la dispersión está por encima de lo marcado en la norma, por lo que debe plantearse la disminución de ésta, aumentando el número de puntos y pensando en la colocación de elementos de difusión.

f (Hz)	Pos. De fuente 1		Pos. De fuente 2		f(Hz)	Pos. de fuente 1		Pos. de fuente 2	
	Media	Desvest	Media	Desvest		Media	Desvest	Media	Desvest
63	-7	0.81	-4.10	1.54	800	-19.40	6.15	-12.08	8.60
80	-17.38	1.42	-8.09	3	1000	0.16	5.02	6.86	6.92
100	-10.45	2.55	-33.09	8.30	1250	2.61	8.01	-12.73	10.23
125	0.37	5.68	-7.64	4.17	1600	9.27	9.42	-6.80	7.64
160	1.36	4.39	2.96	7.88	2000	-2.75	5.15	7.85	18.33
200	-2.95	6.52	-15.22	6.01	2500	3.21	6.49	3.38	6.51
250	7.04	7.88	-15.35	5.39	3150	4.97	15.14	12.60	4.07
315	16.64	24.94	1.42	6.82	4000	-1.67	18.31	3.76	4.88
400	16.72	15.87	6.48	10.02	5000	11.82	8.87	29.57	8.33
500	13.16	1.88	7.86	3.02	6300	4.83	5.12	19.27	10.40
600	10.41	10.64	15.56	6.49					

Tabla 6: Media y desviación estándar para la diferencia de nivel de presión sonora respecto a la fuente

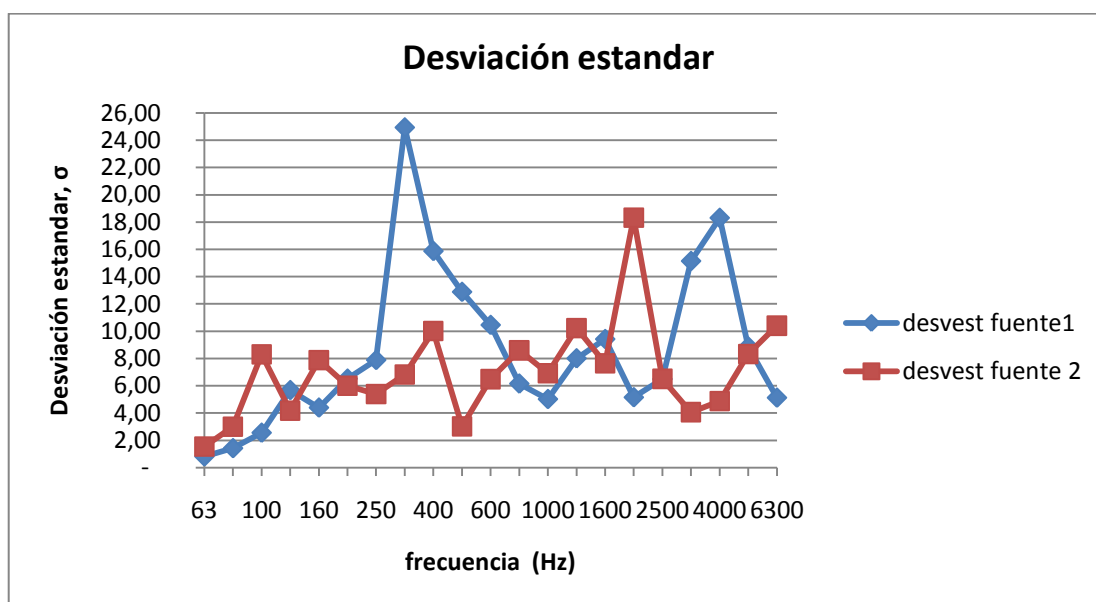


Fig. 10. Gráfica desviación estándar de la diferencia de nivel de presión sonora

También es importante conocer si durante el proceso de medición, estamos dentro de un campo difuso, aunque se haya diseñado la cámara reverberante al detalle para conseguir tal fin. Por ello, es conveniente el cálculo de la distancia crítica y saber pues, a partir de que distancia nos encontramos en campo reverberante con respecto a la fuente.

Basándonos en las siguientes expresiones, llegamos a la conclusión, que la distancia mínima y correcta que hay que salvaguardar con respecto a la fuente para asegurarnos de que nos encontramos en un campo reverberante es la de 0.30m (la más desfavorable a bajas frecuencias), tal y como se demuestra utilizando las expresiones siguientes:

$$D_c = 0.14\sqrt{QR} \quad (8)$$

,donde:

Q es el factor de directividad de la fuente sonora en la dirección considerada y R es la constante de la sala. Siendo:

$$R = \frac{S_t \bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}} \quad (9)$$

donde:

S_t corresponde a la superficie total del recinto en metros cuadrados y $\bar{\alpha}$ es el coeficiente medio de absorción de la sala.

3.1.3. Decisiones respecto al aislamiento acústico

La cámara reverberante es un recinto diseñado especialmente para la obtención de un campo sonoro difuso en su interior. Por ello es importante conseguir una uniformidad de la presión sonora.

Debe tenerse en cuenta que su interior debe estar compuesto por superficies lo suficientemente duras y reflectantes, como para conseguir los objetivos de difusión y largos tiempos de reverberación que se describen en las distintas normas a las que se hace referencia a lo largo del estudio.

Como se ha citado anteriormente, es importante que el coeficiente de absorción de las paredes interiores sea lo más bajo posible. Se tomará el criterio de considerar una superficie reflectante cuando $\alpha < 0.2$, siendo α el coeficiente de absorción sonora del material en campo difuso. Este valor será punto de partida, aunque lo interesante serán valores aún más bajos.

Es por ello, que a priori, parece no ser necesario el uso de materiales absorbentes acústicos en la configuración de la cámara, para conseguir la mayor reflexión. No obstante, debe considerarse el ruido producido por los distintos trabajos, movimientos, impactos, etc., que se puedan ocasionar en el exterior de la cámara y que puedan interferir en el resultado de las distintas mediciones que se realicen en el interior de la cámara reverberante a escala, y la propia vibración de los elementos internos.

Teniendo este último aspecto en cuenta, se debe hacer uso de un material lo suficientemente absorbente como para que los ruidos generados en el exterior se atenúen lo bastante como para que en el interior se puedan despreciar.

A partir de aquí, se estudian varias combinaciones para la realización de los frentes, suelo y techo de la cámara reverberante a escala.

En primera instancia se plantea la posibilidad de realizar la cámara con elementos denominados “panel sándwich”. Éste se caracteriza por su composición de lámina de aluminio de poco espesor en el exterior y un núcleo absorbente. Fue desestimada por la dificultad que provoca el ejecutar ángulos no rectos en un material prefabricado y no asegurar el hermetismo de la cámara.

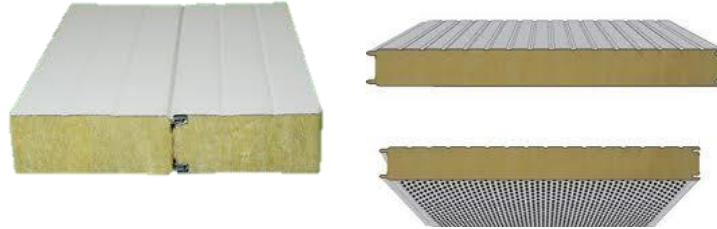


Fig. 11. Panel sándwich.

El segundo caso planteado, es la realización de la cámara a base de paneles tipo “composite”. Éstos se caracterizan por su poco espesor. La opción elegida estaba compuesta por láminas de aluminio de espesor reducido en sus extremos y un núcleo de lámina de LPDE, polietileno de baja densidad de la familia de los polímeros olefínicos y conformado termoplástico por unidades sucesivas de etileno.

Se conseguía una cámara con una reflexión aceptable, debido a su bajo coeficiente de absorción, pero no aseguraba rigidez al conjunto ni aislamiento acústico con respecto el exterior.



Fig. 12. Sección “Composite”

Por último, en tercer lugar, se plantea realizar la cámara a base de tabiques ligeros autoportantes revestidos interiormente con paneles de aluminio. Dentro de esta opción, se estudiaron dos composiciones. Una con placa de yeso laminado de 1.5cm de espesor, núcleo absorbente de 4cm de espesor a base de fibras termofusionadas (guata/lana de poliéster) y placa de composite de 4mm (de exterior a interior). En segundo lugar, una composición similar a la descrita anteriormente, pero colocando una placa de yeso laminado antes de colocar la placa de composite (en el interior). Estando este último, unido a la placa de yeso laminado por medio de silicona estructural, asegurando la unión entre ambos materiales.



Fig. 13. Primer y Segundo supuesto para la tercera posibilidad

De entre estas dos últimas posibilidades, se plantea el diseño final para la ejecución de la cámara, por lo que es necesario comprobar las condiciones absorbentes de cada composición. Se decide finalmente escoger la composición que recoge de exterior a interior; placa de yeso laminado, núcleo absorbente de 4 cm de espesor de fibras termofusionadas, placa de yeso laminado y revestido interiormente con placa de composite de 4mm, por su menor absorción acústica como veremos a continuación.

3.1.4. Comprobación de condiciones absorbentes acústicas.

Antes de realizar la cámara reverberante a escala, y una vez decidida la configuración de lo que será el cerramiento de esta, se realiza una primera comprobación del revestimiento interior de manera que nos cerciemos de que las condiciones absorbentes de las superficies son las recogidas en la normativa.

Como se observa a continuación, dicho estudio, se realiza por medio del tubo de Kundt. Este se debería de realizar, colocando en el interior del tubo la composición correspondiente, no obstante, ante tal dificultad, se plantea la posibilidad de atestar el tubo directamente a las composiciones motivo de estudio. Consiguiendo de este modo, un resultado similar.

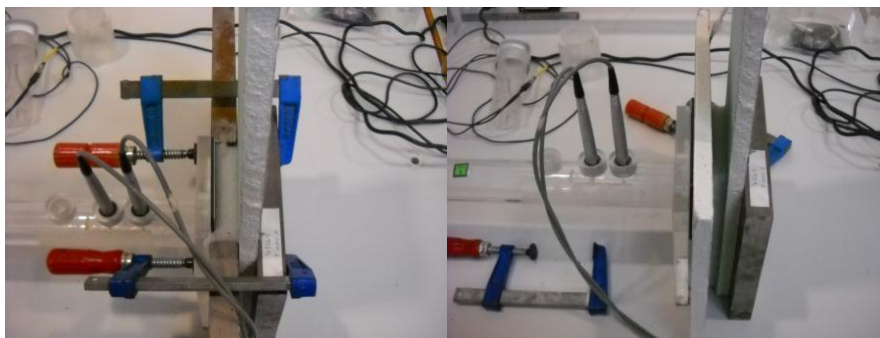


Fig. 14. Primer y Segunda supuesto para la tercera posibilidad

A continuación se observan los datos obtenidos correspondientes al coeficiente de absorción en incidencia normal de ambos supuestos.

f(Hz)	Composición 1	Composición 2	f(Hz)	Composición 1	Composición 2
125	0,50	0,19	800	0,19	0,14
160	0,47	0,19	1000	0,16	0,12
200	0,44	0,19	1250	0,15	0,10
250	0,38	0,18	1600	0,10	0,09
315	0,34	0,17	2000	0,09	0,09
400	0,29	0,16	2500	0,11	0,11
500	0,27	0,16	3150	0,12	0,12
630	0,25	0,14			

Tabla 7: Coeficiente de absorción acústica en incidencia normal

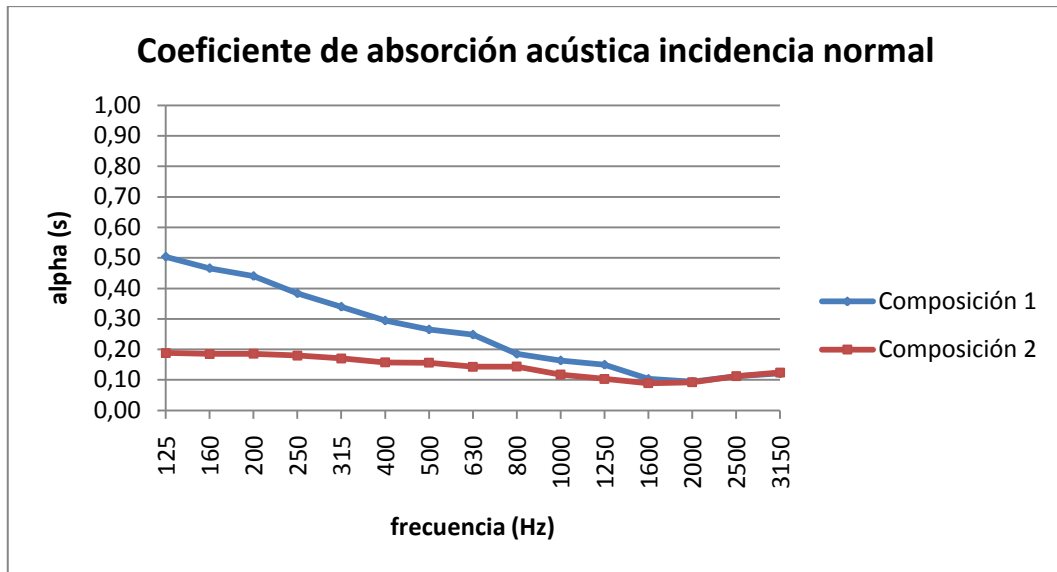


Fig. 15: Gráfica coeficiente de absorción acústica incidencia normal.

Como se observa tanto en la tabla como en la gráfica, los valores obtenidos vaticinan que utilizando la composición número 2, tendremos una menor absorción. No obstante, según la normativa UNE EN ISO 3741:2010 [2] recomienda que el coeficiente de absorción acústica medio, $\bar{\alpha}$, de todas las superficies de la cámara reverberante a escala, no deba superar 0.16. Y para frecuencias por encima de f , el coeficiente de absorción acústica medio no debería sobrepasar 0.06.

Siendo:

$$f = \frac{2000}{V^{1/3}} \text{ Hz} \tag{5}$$

donde V es el volumen interior de la cámara reverberante.

Asimismo, el coeficiente de absorción acústica, debe ser lo suficientemente grande como para minimizar el efecto de los modos producidos en la cámara por la potencia acústica de la fuente. Por lo que por debajo de dicha frecuencia, se presentaran los modos propios de la cámara reverberante a escala.

Por otro lado, especificar que la normativa UNE EN ISO 3741:2010 [2], dicta que se debe cumplir la siguiente relación conforme al tiempo de reverberación en cada banda de tercio de octava;

$$T_{rev} > \frac{V}{S} \tag{10}$$

Según esta, el tiempo de reverberación obtenido debe ser mayor a 0.20 segundos.

Siendo V el volumen interior de la cámara reverberante a escala y S la superficie interior total. A continuación se muestran los resultados del tiempo de reverberación estimado inicialmente en el tubo de Kundt (incidencia normal) y en cámara reverberante (incidencia aleatoria). Aunque la estimación sólo contemplaba el caso de incidencia normal, puede verse cómo ha servido para realizar el diseño de la cámara.

Relación que se cumple para cada una de las frecuencias. A continuación se observa el tiempo de reverberación obtenido para el caso teórico y el real.

f (Hz)	TR (tubo de Kundt)	TR (C. reverb. a escala)	f (Hz)	TR (tubo de Kundt)	TR (C. reverb. a escala)
125	0.17	0.35	800	0.22	0.79
160	0.17	0.34	1000	0.27	0.62
200	0.17	0.47	1250	0.31	0.50
250	0.18	0.46	1600	0.36	0.47
315	0.19	0.59	2000	0.35	0.46
400	0.20	0.72	2500	0.28	0.48
500	0.20	0.84	3150	0.26	0.40
630	0.22	0.87			

Tabla 8: Tiempo de reverberación según coeficientes de absorción acústica en incidencia normal y en cámara reverberante a escala

Como se observa, el tiempo de reverberación estimado inicialmente no coincide con el tiempo de reverberación obtenido en la medición en cámara reverberante. Esto es debido a que en el caso del tubo de Kundt estamos ante incidencia normal y el sonido solo incide de cara. Hecho que no ocurre en la cámara reverberante a escala pues viene de todas las direcciones. No obstante, en ambos casos se cumple la relación especificada anteriormente donde el tiempo de reverberación debe ser mayor al coeficiente entre el volumen y la superficie. Únicamente se presenta un tiempo de reverberación inferior en el TR Teórico para frecuencias por debajo de 315Hz.

3.1.5. Otros detalles constructivos de interés.

A parte de los detalles de diseño que se especifican en las normativas, para el proceso constructivo de la cámara reverberante es importante tener en cuenta una serie de detalles de ejecución, de manera que se asegure y consiga un producto final en el que los resultados de los estudios que se realicen sean lo más fehacientes posible.

Con el fin de reforzar la zona inferior de la cámara reverberante a escala, tanto para su estabilidad ante su propio peso como ante el de una carga adicional como puede ser la de una persona, se debe realizar con doble capa de yeso laminado en el exterior. También es importante reforzar la estructura portante con más montantes de los recomendados en la construcción con yeso laminado para asegurar tal fin.

Por otro lado, ante la necesidad de que la cámara reverberante sea móvil, se deben colocar unas ruedas anti vibración en el rango de ensayo con el fin de evitar la transmisión de cualquier tipo de ruido al interior por medio de la estructura.

Para la colocación de estas ruedas, se debe utilizar unos tableros de madera de 200x200mm con un espesor de 20mm, atornilladas en el alma de la estructura portante. Cada una en una esquina.



Fig. 16. Detalle ubicación rueda

Otro punto a tener en cuenta es como conectar el equipo de medición, altavoz y micrófonos.

Para tal fin, se opta desde un principio por la colocación de un tubo corrugado flexible que conecte interior con exterior, por donde se introducirán los cables necesarios para llevar a cabo los ensayos correspondientes. Este tubo es de plástico corrugado, fijado en sus extremos con espuma de poliuretano de modo que dicha fijación sea fiable y duradera.



Fig.17. Detalle ubicación tubo corrugado para cables.

Resaltar que durante el proceso de medición, se debe colocar algún tipo de material tipo lana de poliéster en los orificios por donde se pasan los cables para evitar la pérdida del nivel sonoro en el interior.

Para asegurar un entorno de medida seguro ante posibles fugas, se debe prever el sellado de las juntas entre el revestimiento interior. Este sellado, se ha llevado a cabo mediante una silicona estructural nada porosa. Característica que nos asegura una mayor hermeticidad.



Fig. 18. Detalle sellado interior.

Asimismo, continuando con la práctica por conseguir una mayor hermeticidad tanto en la zona de la compuerta como en el bastidor que la recoge, se debe colocar una lámina elástica autoadhesiva de porosidad baja, de manera que permita el cierre pero que a su vez no permita la existencia de fugas. Creando de este modo un entorno cerrado y lo más difuso posible.

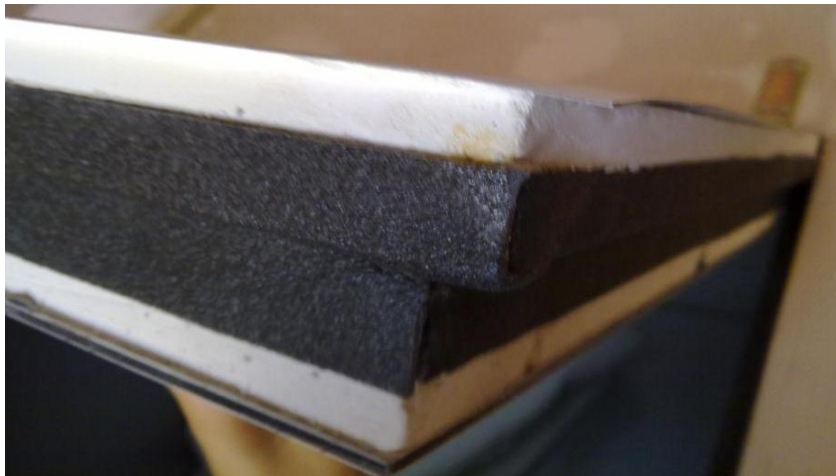


Fig. 19. Detalla junta bastidor puerta con cámara reverberante a escala.

Del mismo modo, se ha colocado como revestimiento exterior de la compuerta una lámina de aluminio con una superficie mayor que el hueco practicable. Así se consigue un solapamiento que dificulta las posibles fugas que puedan existir.

3.2. Control de la fabricación de la cámara reverberante a escala.

Desde el momento que se aceptó el presupuesto para la ejecución de la cámara reverberante a escala, se ha considerado hacer un seguimiento a la ejecución de la misma, de manera que se han

evitado posibles problemas de ejecución y por consiguiente demoras en los plazos de entrega. Se presenta un reportaje fotográfico del mismo.

Previo al corte de la primera placa de yeso laminado para comenzar la construcción, se realizó un replanteo de cada una de los frentes internos que conformarían la cámara. Este replanteo se hizo sobre las placas de yeso laminado, para acto seguido cortar y obtener cada frente.

Una vez realizado este paso, se procede con el montaje de la base. Tras su ejecución, se fijan las ruedas a la parte inferior y se presenta en el suelo para tener una mayor facilidad de trabajo.

En la siguiente figura podemos observar un estado avanzado de la cámara donde están colocados varios frentes. También se observa la estructura de la cámara aun sin colocar el material absorbente.



Fig. 20. Construcción de la cámara reverberante a escala

A continuación se observan varios detalles de unión donde se aprecia el sistema de fijación.



Fig. 21. Detalle encuentro en esquina



Fig. 22. Detalle sección de un frente.

En las siguientes figuras se observa la colocación del material absorbente en el núcleo o alma de la estructura portante. Proceso que se siguió para cada uno de los frentes.



Fig. 23. Detalle colocación de la lana de poliéster.

A continuación se puede ver el proceso de cortado de algunas piezas especiales, como en este caso la que corresponde al techo.



Fig. 24. Detalle de corte de placa de yeso laminado.

Las siguientes figuras corresponden a un encuentro en esquina del frente superior, antes de realizar el bastidor para la compuerta.

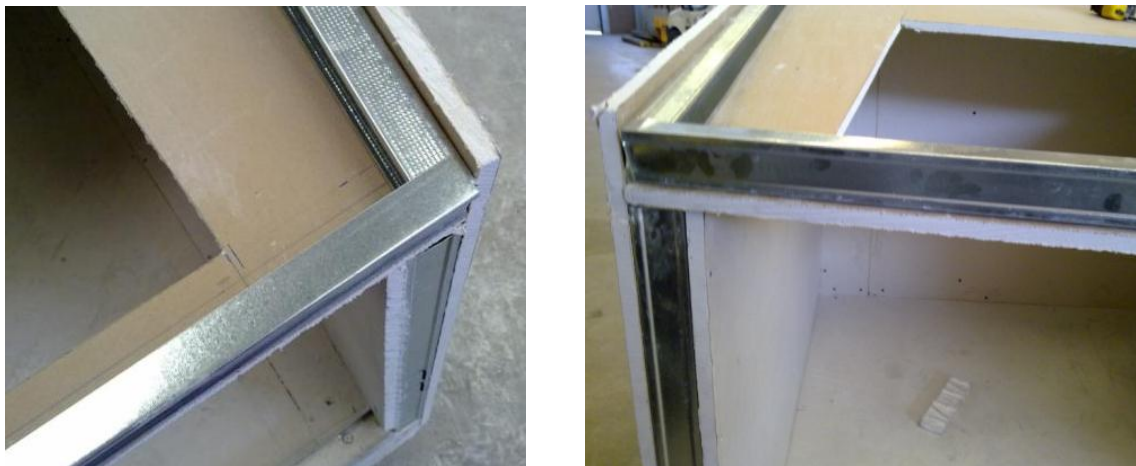


Fig. 25. Detalle encuentro en esquina.

Como se aprecia en las figuras anteriores, no hay bastidor para la compuerta. En el siguiente grupo de figuras podemos ver su proceso de colocación de la del cierre superior.



Fig. 26. Detalle montaje del bastidor para la puerta.

Una vez cerrado todo el volumen a excepción de un frente. Falta el revestimiento interior.



Fig. 27. Detalle cámara reverberante a escala a falta del cierre lateral.

Fig. 28. Cámara reverberante a escala

El proceso de colocado del revestimiento interior es una tarea delicada pues se deben cortar las piezas con la dimensión exacta de modo que la junta entre estas sea precisa aun siendo está sellada al finalizar. A continuación se observa una figura de la cámara terminada a falta de detalles como la lámina elástica en compuerta y bastidor y lamina de aluminio en la compuerta.

En las siguientes figuras, se aprecia un detalle de la compuerta, del bastidor y de la cámara finalmente terminada.



Fig. 29. Detalle compuerta y cámara terminada.

3.3. Pantallas acústicas a escala.

Las barreras acústicas o pantallas acústicas tienen la peculiaridad de obstaculizar la propagación de las ondas sonoras desde la fuente a la zona de interés. De modo que estamos ante una actuación eficaz para disminuir la contaminación acústica.

El principio de funcionamiento de éstas se basa en que ante una onda sonora incidente, esta sea en parte absorbida, reflejada y difractada.

Lo que se busca principalmente es reducir los niveles producidos a bajas y medias frecuencias, ya que debido a la longitud de onda en estas frecuencias ($\lambda = c/f$), el recorrido de la onda es mayor y puede llegar a traspasar la barrera.

La eficacia de las pantallas acústicas se repercute a dos parámetros básicos de la física: el aislamiento acústico y el coeficiente de absorción acústica. En el caso del aislamiento acústico, este es el responsable de la cantidad de energía acústica que atraviesa la pantalla hacia la zona protegida por la misma. Por otro lado, el coeficiente de absorción acústica consiste en la cantidad de energía producida por la onda sonora que se refleja hacia la fuente del ruido. Para que las pantallas tengan un máximo rendimiento, la cantidad de energía reflejada de onda acústica, así como la energía que atraviesa la capa de material de aislamiento de la pantalla deben ser lo menor posible.

En el planteamiento de la fabricación de pantallas anti ruido se contempla la influencia de distintos factores, como son lo ancho de la barrera, su altura y el tipo de materiales a usar.

No obstante, ante el caso particular de la cámara reverberante a escala, se plantea la realización de distintas pantallas acústicas a escalas para caracterizar.

3.3.1. Diseño de elementos absorbentes acústicos a escala.

Para 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.

Como indica la normativa UNE EN ISO 354:2004 [1], la dimensión del elemento a caracterizar, la pantalla acústica, debe ser de una dimensión entre 10 y 12 m² en función del volumen de la cámara real 238m², en el caso de la cámara de la EPSG. De modo, que en la cámara reverberante a escala, se dispondrá una pantalla acústica a escala en relación al volumen de la cámara reverberante a escala.

Es por ello, que si el volumen de la cámara reverberante corresponde a un 1.3181m³ (1.32m³), la superficie que se debe cubrir con el elemento a caracterizar corresponderá aproximadamente a 0.30m².



Fig. 30. Pantalla acústica tamaño real.



Fig. 31. Pantalla acústica a escala.

La pantalla acústica a escala, está conformada de modo que, su núcleo absorbente sea variable, es decir, que se pueda modificar en función al material que se desee caracterizar sin la necesidad de generar una nueva pantalla acústica.

Se ha generado un bastidor a base de perfiles metálicos, sobre los que se han combinado ángulos de aluminio perimetrales y un recubrimiento exterior del mismo material de 1 milímetro de espesor, de modo que se consiga un raíl o guía para que la zona superior donde se colocara la chapa de cierre perforada, tenga un desplazamiento o movimiento fácil.

En las figuras que se adjuntan a continuación se observa al detalla la pantalla acústica a escala.

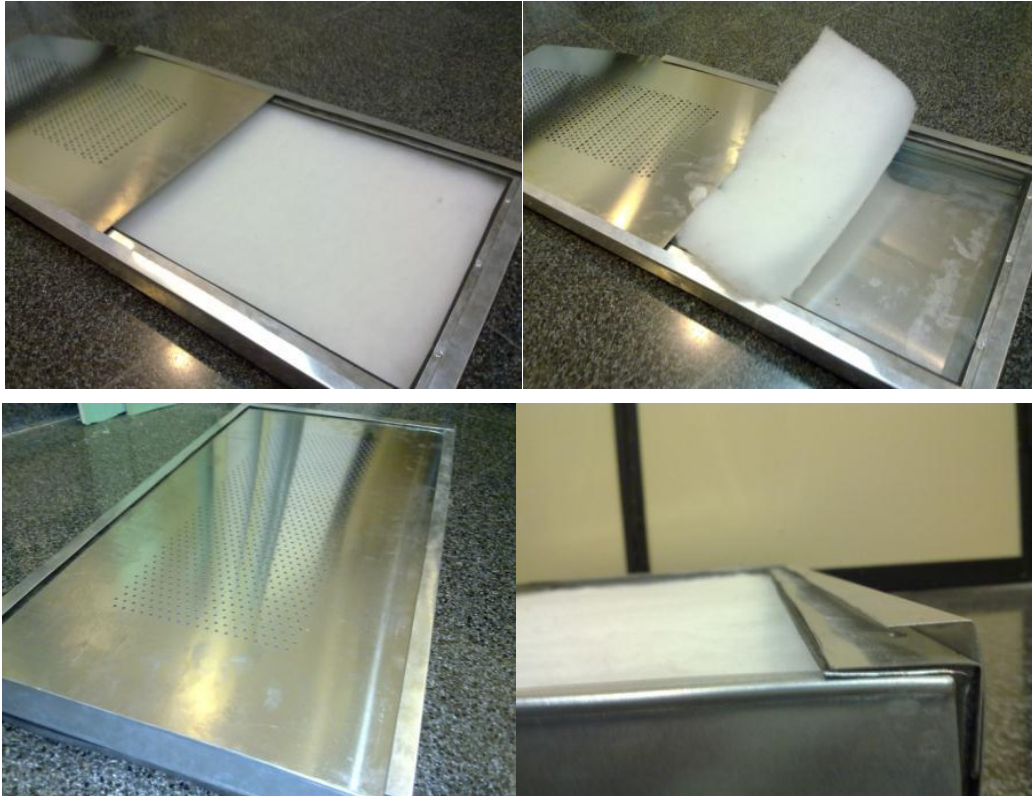


Fig. 32. Detalle pantalla acústica a escala.

La dimensión de la pantalla acústica a escala es de $0.75 \times 0.40\text{m}$, con una superficie de 0.30m^2 como se ha comentado anteriormente.

Dada la dificultad de conseguir el espesor a escala, a causa de los materiales utilizados, se ha considerado que este corresponda a 48mm. Espesor del perfil de aluminio.

Respecto a las láminas de cierre, se han configurado cinco posibilidades. Estas corresponden a las siguientes:

- 1- Perforación del 36% de la superficie, con diámetros de 3, 4, 5, 6mm, dispuestos al tresbolillo.
- 2- Perforación del 36% de la superficie, con diámetros de 3mm, dispuestos al tresbolillo.
- 3- Perforación del 36% de la superficie, con diámetros de 4mm, dispuestos al tresbolillo.
- 4- Perforación del 36% de la superficie, con diámetros de 5mm, dispuestos al tresbolillo.
- 5- Perforación del 36% de la superficie, con diámetros de 6mm, dispuestos al tresbolillo.

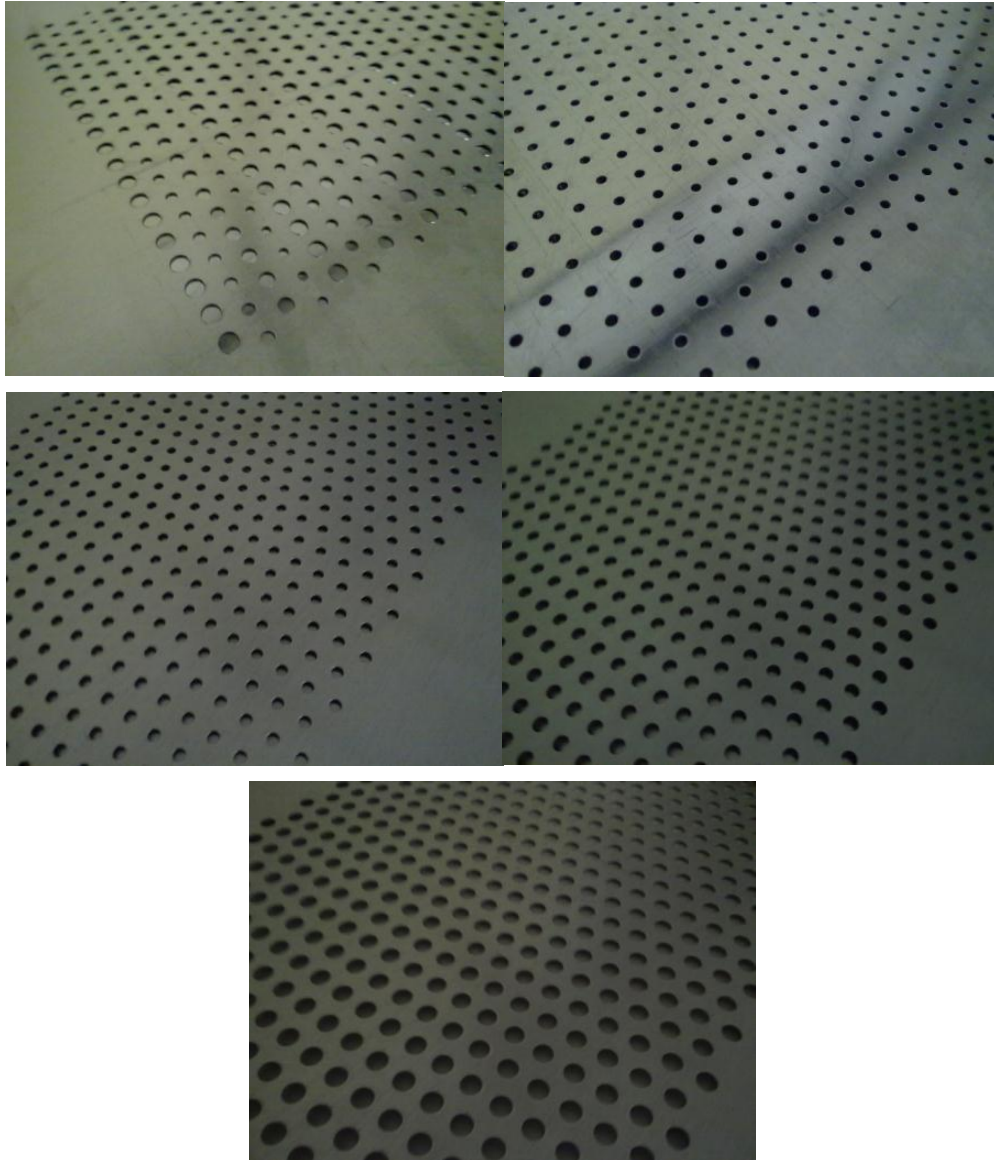


Fig. 33. Detalle perforaciones en las pantallas acústicas.

Se realizan distintas perforaciones de modo que conozcamos la curva de absorción de la pantalla para cada configuración. Poder realizar un estudio y comparativa entre estas.

3.3.2. Ensayos de materiales absorbentes acústicos a escala.

Para realizar los ensayos de los materiales absorbentes acústicos debemos acudir a la cámara reverberante, ya que esta se utiliza para medir la absorción en situaciones de incidencia aleatoria. Este procedimiento se basa en medir el tiempo de reverberación antes y después de colocar una muestra de material en la misma cámara. La característica de tratarse un campo difuso, le da un valor añadido a este ensayo ajustándose a la realidad.

En el proceso de medición del coeficiente de absorción de un material cualquiera en cámara reverberante según UNE EN 1793-1:1997 [3], indica que para el cálculo del coeficiente de

absorción sonora (α) de pantallas acústicas se calcula o evalúa en cámara según el método descrito en la norma UNE-EN ISO 354:2004 [1].

Esta se basa en realizar cálculos comparativos del coeficiente de absorción acústica de distintas configuraciones de materiales para pantallas acústicas.

Todo lo pertinente a dimensiones de la muestra a ensayar está recogido en el subapartado 3.3.1.

En lo que respecta al material absorbente que se coloca en el interior de la pantalla, se ha escogido lana de poliéster de 800 g/m^2 con un espesor de 40mm.

Del mismo modo, también se ensaya distintos tipos de material absorbente sin pantalla acústica. Se trata de lana de poliéster de distintas densidades. Estos se especifican en la siguiente tabla:

Material	Espesor
400 g/m^2	40mm
800 g/m^2	40mm
1400 g/m^2	40mm

Tabla 9: Características de los materiales absorbentes utilizados.

Las medidas se llevan a cabo con el siguiente equipo:

- Micrófono de $\frac{1}{2}$ " type 4189 de Brüel & Kjaer.
- Fuente sonora Genelec 8030^a Bi-Amplified Monitoring System.
- Software Symphonie.
- Cámara reverberante a escala.

El montaje fue tal y como se muestra en la siguiente figura:

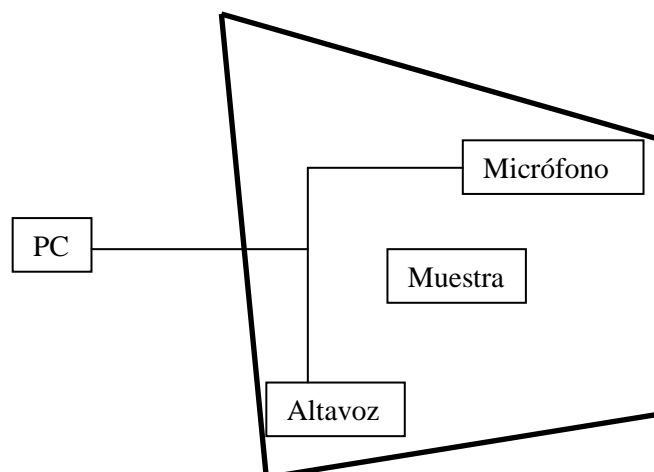
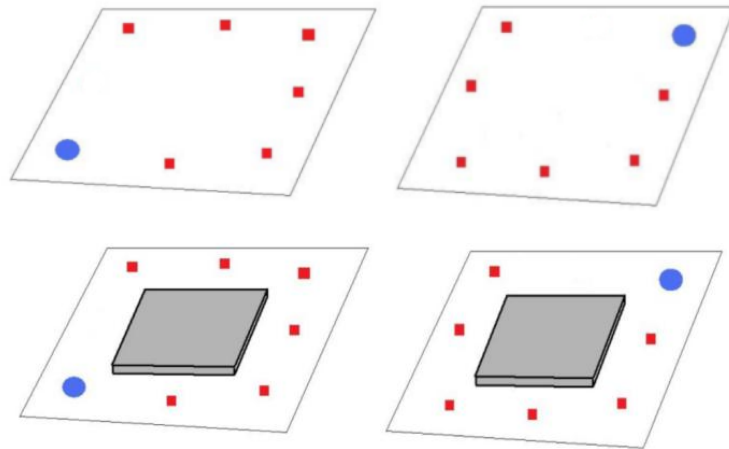


Fig. 34. Montaje experimental para la medición en cámara reverberante a escala.

El procedimiento de ensayo es el redactado en el sub apartado 2.1.1. referente a la norma UNE EN ISO 354:2004. Las posiciones de micrófono y fuente son las que se recogen en las siguientes figuras. En primer lugar sin muestra y acto seguido con muestra.



Posición micrófonos ■
 Posición fuente ●
 Posición muestra

Fig. 35. Distribución de posiciones de micrófonos y fuentes.

A continuación se muestran una serie de figuras ilustrativas con el proceso del ensayo.

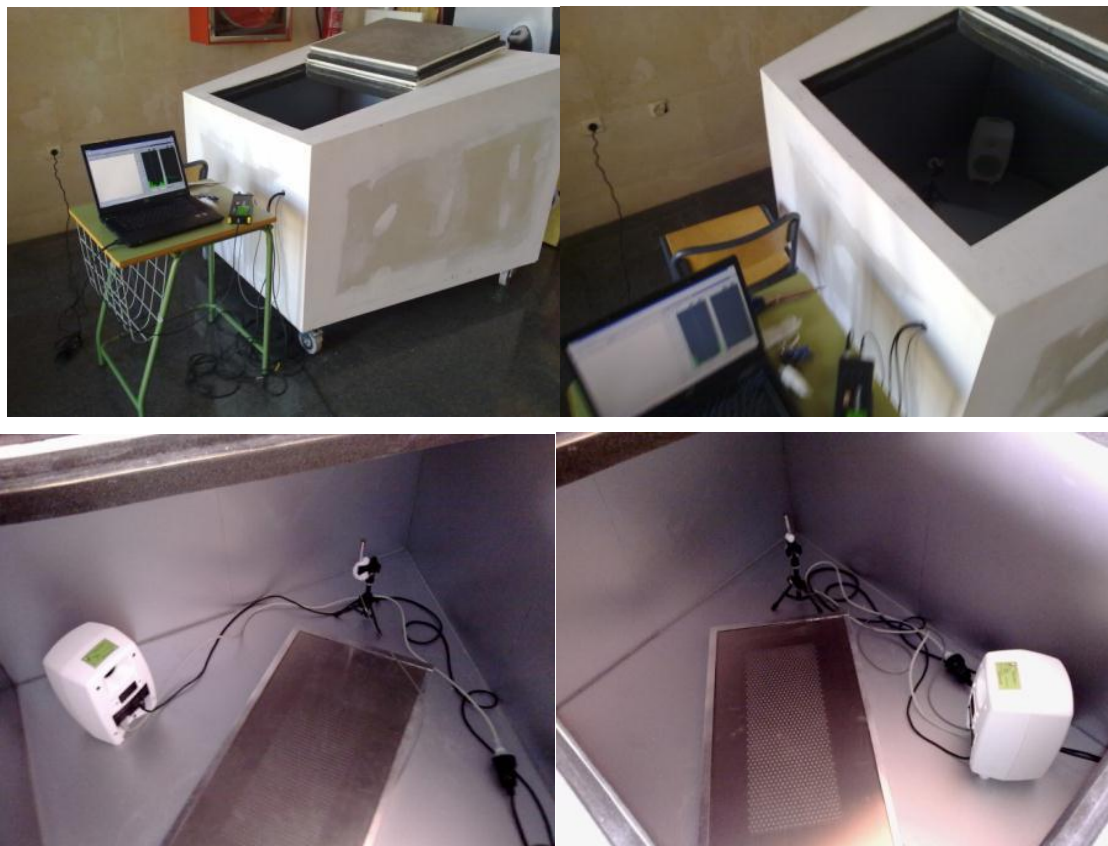


Fig. 36. Proceso de medición.

En las siguientes figuras podemos observar cómo se colocaba el material en el bastidor de la pantalla y como se cerraba la misma.



Fig. 37. Colocación material absorbente en pantalla acústica.

Destacar, que en cada medida realizada se tomó nota de la temperatura como de la humedad que existía dentro de la cámara vacía, así como con la muestra. De tal modo que se define T_1 y H_1 a los valores con la cámara vacía y T_2 y H_2 a la cámara con muestra. Se puede afirmar que los valores de T_1 se encontraban entre 25.3 °C y 26.7 °C. T_2 oscilaba entre 24.5 °C y 25.6 °C. Por otro lado, los valores de H_1 estaban entre 73,4% y 76,1%. Y H_2 entre 71.8% y 75.7%.

Obtenido el tiempo de reverberación en cámara vacía y para cada una de las pantallas con el material absorbente correspondiente se procede a calcular el coeficiente de absorción de cada una de las muestras estudiadas según marca el procedimiento descrito en la normativa:

1.- Cálculo del tiempo de reverberación, T_1 y T_2 , de la cámara reverberante a escala en cada banda de frecuencia en tercios de octava. 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_1 y A_2 , en metros cuadrados, para la cámara reverberante a escala vacía y con muestra, según la siguiente expresión:

$$A_1 = A_2 = \frac{55.3V}{cT_{12}} \quad (11)$$

, donde

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

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

T_1 y T_2 es el tiempo de reverberación, en segundos, de la cámara reverberante vacía y llena respectivamente.

3.- Cálculo de A_T que se obtiene mediante la siguiente expresión;

$$A_T = A_2 - A_1 \quad (12)$$

, donde

A_T es el área de absorción sonora equivalente en metros cuadrados.

Llegados a este punto,

4.- Cálculo del coeficiente de absorción sonora α_s de un absorbente plano mediante la siguiente expresión;

$$\alpha_s = \frac{A_T}{S} \tag{3}$$

, donde

S corresponde al área, en metros cuadrados, de la muestra de ensayo.

El resultado obtenido de la absorción acústica de las distintas combinaciones de pantallas acústicas es el siguiente:

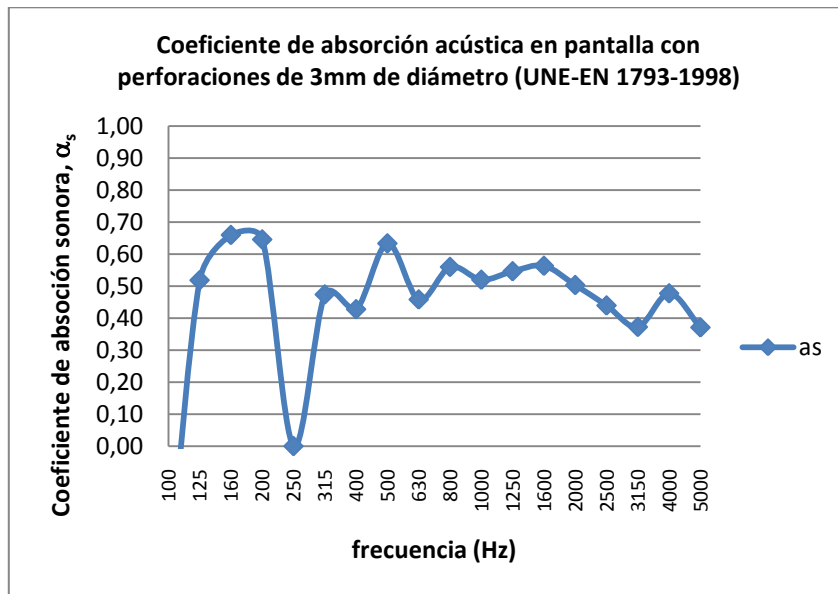


Fig. 38: Coef. Absorción acústica pantalla a escala de diámetro 3mm

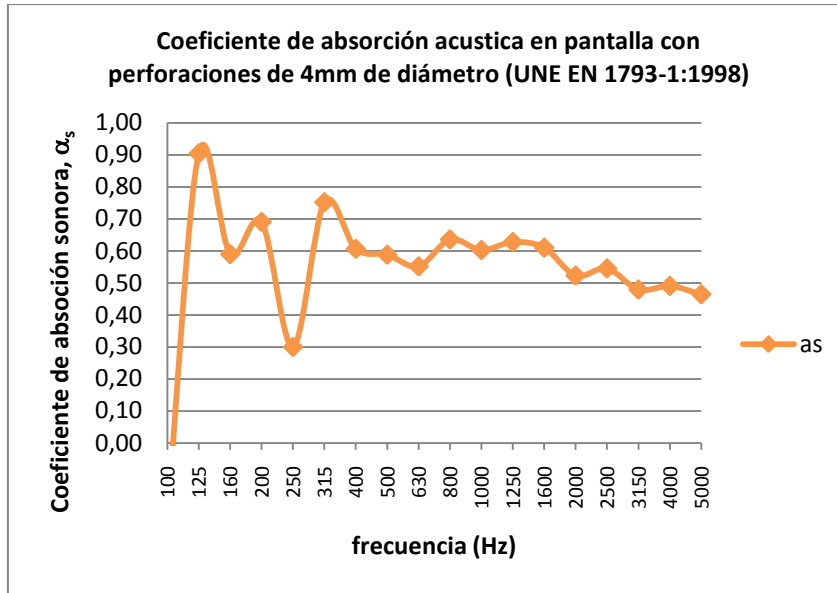


Fig. 39: Coef. Absorción acústica pantalla a escala de diámetro 4mm

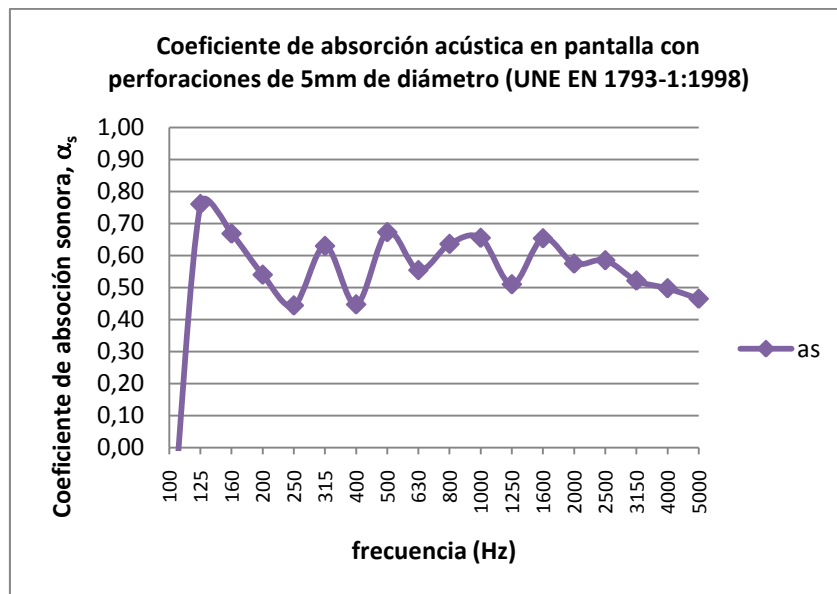


Fig. 40: Coef. Absorción acústica pantalla a escala de diámetro 5mm

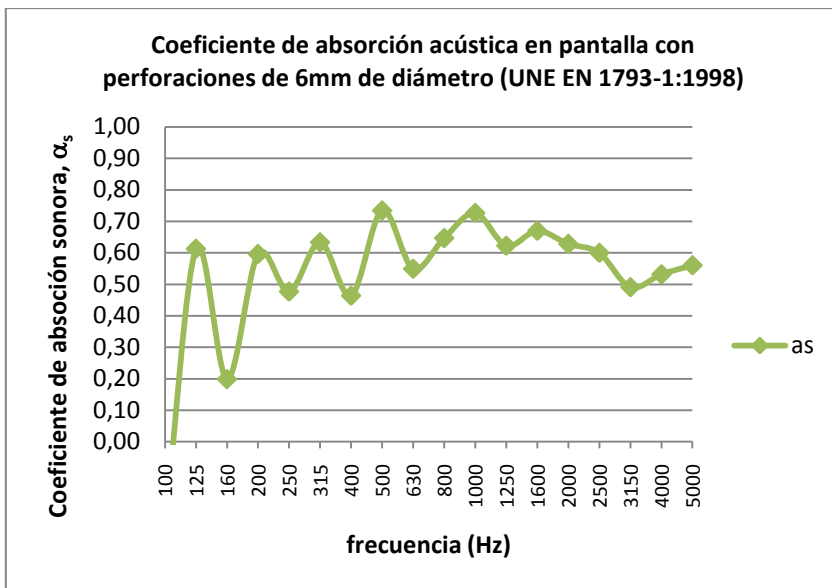


Fig. 41: Coef. Absorción acústica pantalla a escala de diámetro 6mm

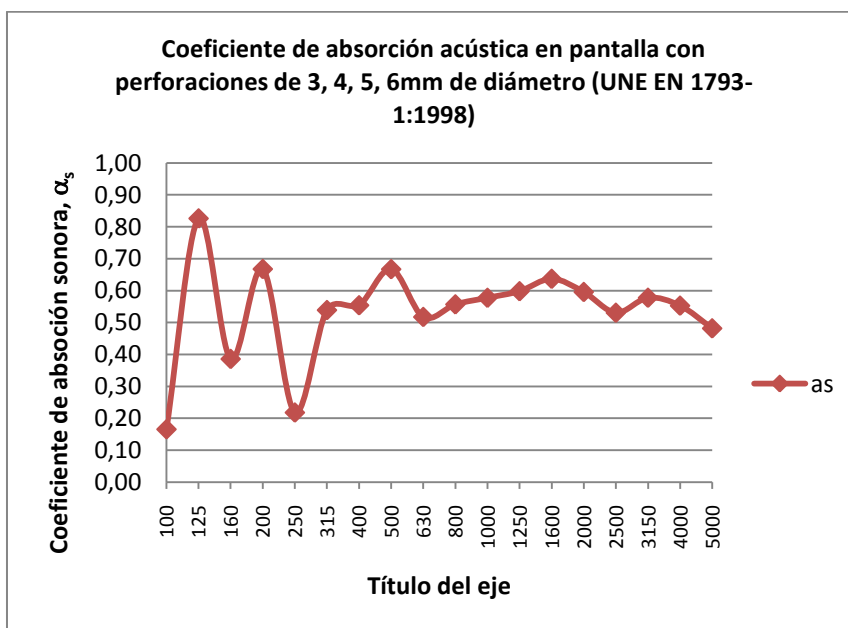


Fig. 42: Coef. Absorción acústica pantalla a escala de todos los diámetros

A continuación se presentan los resultados del coeficiente de absorción acústica obtenidos de únicamente el material absorbente.

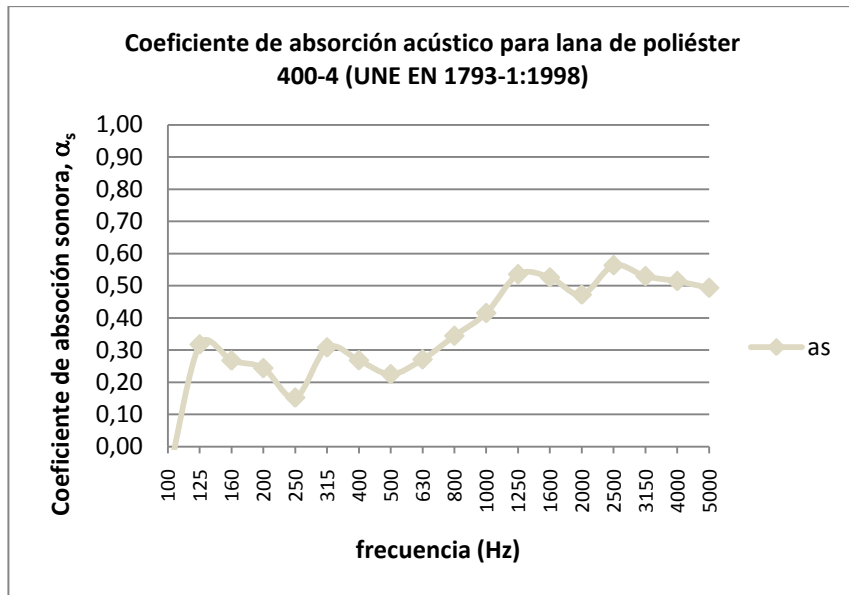


Fig. 43: Coef. Absorción acústica lana de poliéster 400-4

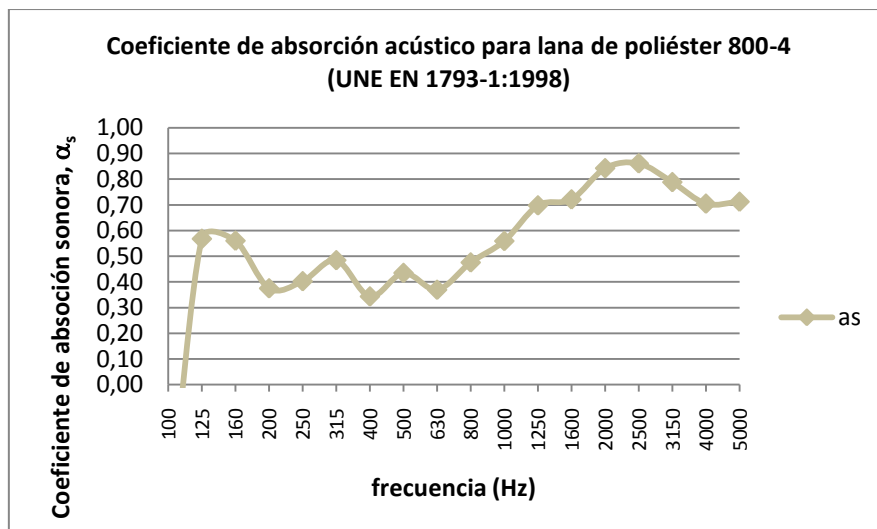


Fig. 44: Coef. Absorción acústica lana de poliéster 800-4

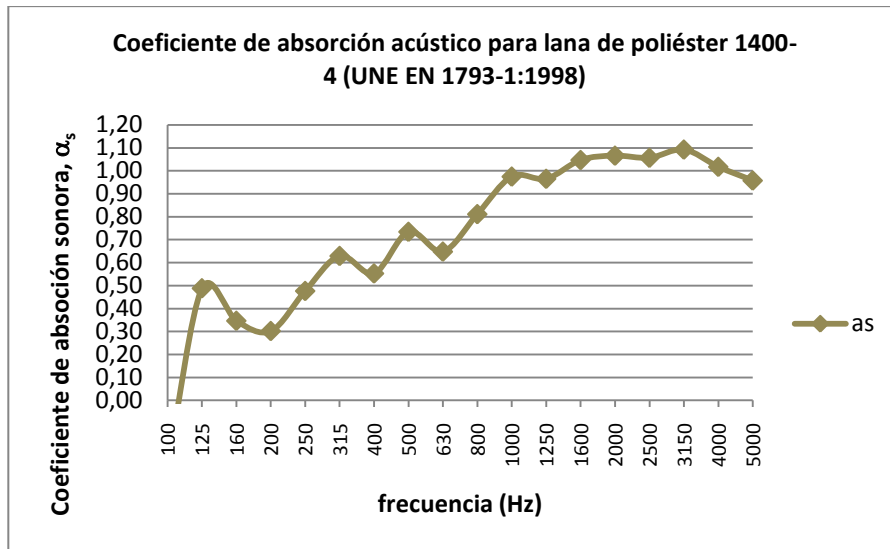


Fig. 45: Coef. Absorción acústica lana de poliéster 1400-4

3.3.3. Comparativa de resultados en la cámara a escala.

A continuación se muestran todos los resultados obtenidos para las pantallas acústicas con absorbente de características 800g/m² de densidad y 40mm de espesor.

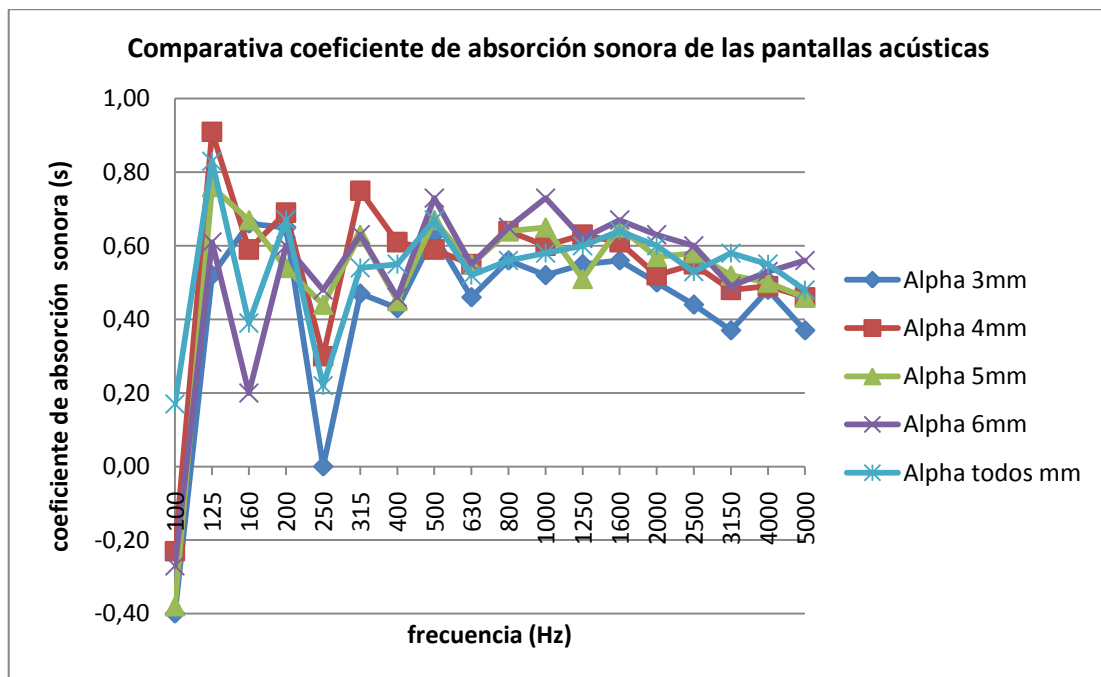


Fig. 46: Comparativa coef. Absorción acústica todas las pantallas a escala

Como se puede comprobar, a frecuencias medias-altas, la pantalla con diámetros de 6mm es la que mejor se comporta. No obstante, en todo el rango de frecuencias, la pantalla que contiene los diámetros de 6mm parece ser que es la guarda un mayor compromiso.

En la siguiente grafica se observan los resultados obtenidos para cada tipo de lana de poliéster ensayada sin pantalla acústica.

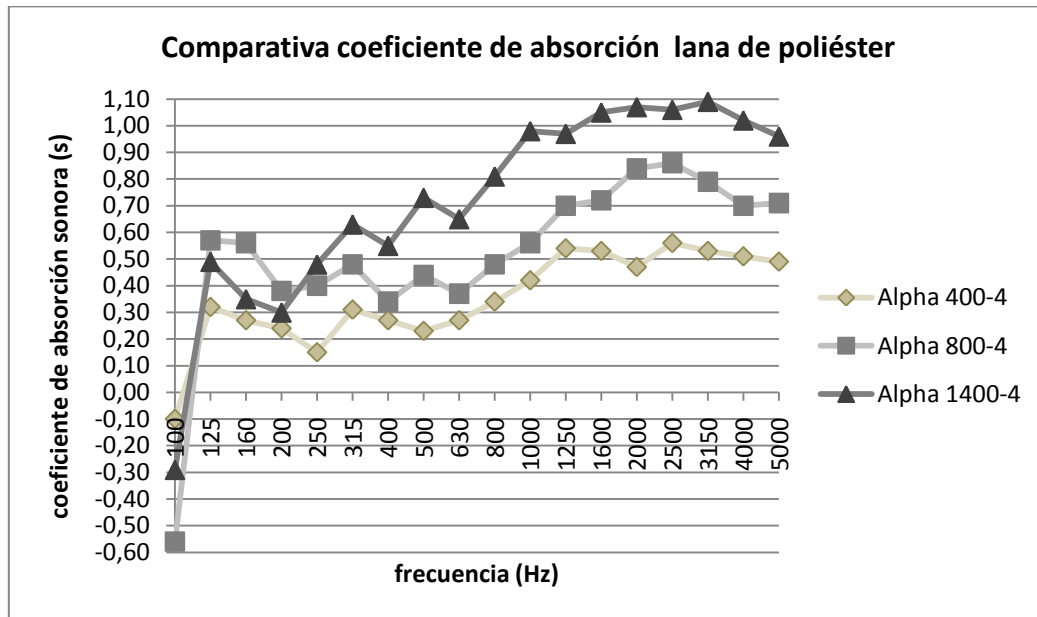


Fig. 47: Comparativa coef. Absorción acústica todas las lanas de poliéster

Se observa que el material que tiene una densidad de 1400g/m^2 y un espesor de 40mm presenta una mejor absorción acústica en casi todo el rango de frecuencias. Siendo el material con densidad de 800g/m^2 y 40mm de espesor el que se comporta mejor a frecuencias por debajo de 200Hz.

Es importante destacar el hecho de la superficie absorbente a tener en cuenta. Pues la superficie de los bordes del material es muy comparable con la superficie de la muestra. Cuestión que deriva en un aumento de la absorción acústica con respecto a la superficie paralela al suelo como podemos ver en la siguiente justificación:

Dimensiones material absorbente: $0,75 \times 0,4 \times 0,04$

Superficie muestra paralela al suelo: $0,30\text{ m}^2$

Superficie laterales: $0,75 \times 2 \times 0,04\text{ m}^2 + 0,4 \times 2 \times 0,04\text{ m}^2 = 0,092\text{ m}^2$

Superficie a contabilizar: $0,392\text{ m}^2$.

3.3.4. Comparativa con resultados con la cámara reverberante a tamaño real.

Tras obtener todos los resultados expuestos anteriormente, procedemos con la comparativa entre el coeficiente de absorción sonora del material absorbente a escala y tamaño real por separado y el de la pantalla perforada con todos los diámetros a escala y real.

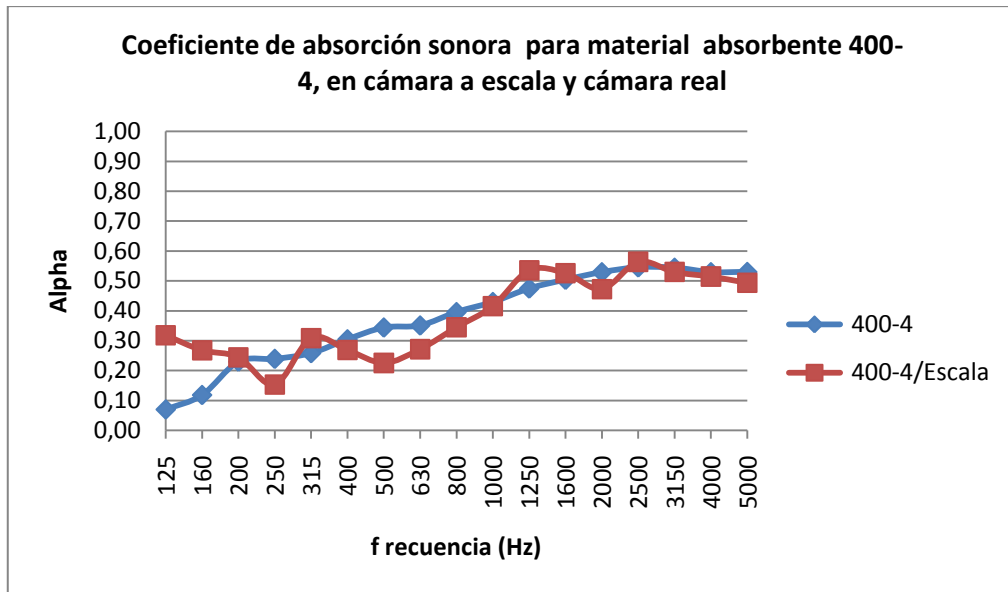


Fig. 48. Comparativa coeficiente de absorción sonora entre material absorbente real y a escala

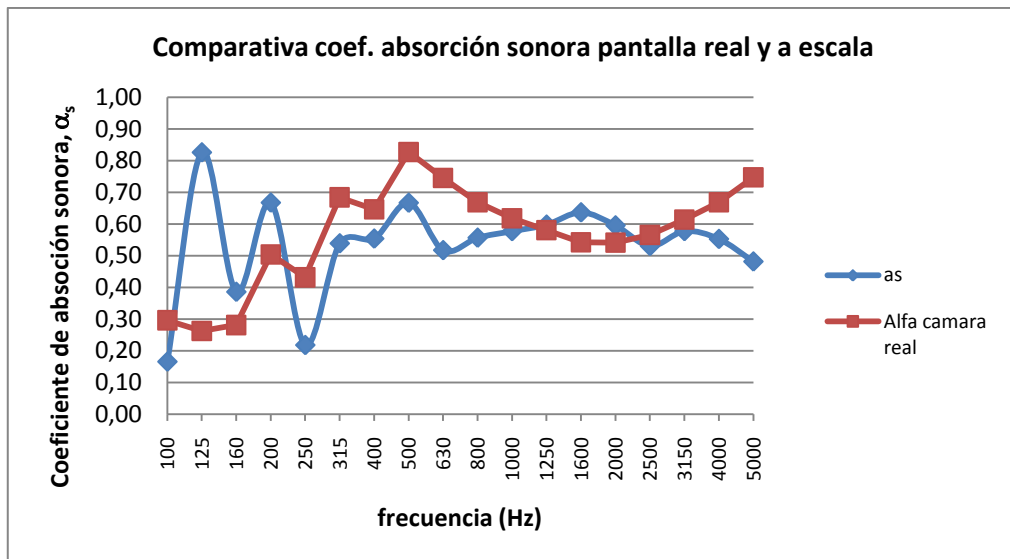


Fig. 49. Comparativa coeficiente de absorción sonora entre pantalla real y pantalla a escala

Como se ha visto en el subapartado 3.3.1, la superficie de la pantalla acústica a escala está compuesta por una parte lisa no agujereada. Sólo está perforado el 36%. En cambio, la pantalla acústica real, está completamente perforada. Este hecho, provoca, como se observa en la figura 49, que los resultados no coinciden completamente.

No obstante, en la figura 48, se observa que en el caso de la medición con solo el material absorbente, existe un mayor compromiso entre los resultados obtenidos para cámara a escala y cámara real.

4. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

4.1. Conclusiones.

En el desarrollo del trabajo expuesto en esta memoria se ha observado el proceso de diseño y caracterización de una cámara reverberante a escala así como de distintas configuraciones para pantallas acústicas perforadas a escala y material absorbente por separado. Estudiando, dependiendo el caso, los niveles de presión acústica, diferencia de niveles de presión acústica y el coeficiente de absorción acústica.

En primer lugar, respecto al diseño y construcción de una cámara reverberante a escala, la posibilidad de realizar ensayos para como por ejemplo, caracterizar distintos materiales sin la necesidad de acudir a la cámara reverberante de tamaño real ni utilizar el tubo de Kundt para validar dichos materiales para su posterior estudio en cámara, genera un procedimiento más rápido de lo normal. De manera que se observa un ahorro tanto de tiempo como económico.

Destacar del mismo modo que dicho procedimiento, (realizar una cámara reverberante y pantallas acústicas a escala) es económicamente un beneficio, pues no es necesario realizar un ensayo con una gran cantidad de material que se desea estudiar. Por lo que la reducción del coste temporal se aprecia notablemente.

En lo que respecta al apartado 3.1.2, modelado numérico, es importante realzar la gran utilidad y ventajas que aporta el uso de programas informáticos con este fin. Pues en el caso de este trabajo, el uso del software informático COMSOL Multiphysics ha supuesto una gran ayuda en el diseño de la cámara reverberante a escala en materia de conseguir la mayor uniformidad de niveles presión sonora posible y obtener finalmente unos resultados correctos.

Dentro de este punto, resaltar que debido a la alta dispersión en los valores obtenidos, sería necesario medir la cámara con más puntos tal como marca la norma UNE EN ISO 3741:2010 [2] tabla 2, de modo que esta disminuya y se obtengan unos valores más homogéneos. Del mismo modo, sería interesante analizarlo desde el punto de vista del tiempo de reverberación tal como indica la norma UNE EN ISO 354:2004 [1] en su punto 8.2.2.

Dentro de la parte experimental donde se han estudiado distintos materiales absorbentes de distintas densidades y varias configuraciones de pantallas acústicas, resaltar en primer lugar, por lo que respecta a los materiales absorbentes, el que mejor respuesta presenta es el correspondiente a 1400g/m^2 y 40mm de espesor. Mediante este material se obtiene un mayor coeficiente de absorción sonora.

Del mismo modo, en lo que respecta a las pantallas acústicas a escala, las distintas configuraciones presentan un patrón de resultados muy similar entre ellos, siendo la combinación de todos los diámetros, la configuración que guarda un compromiso en todas las frecuencias estudiadas.

El material absorbente colocado en el interior de las pantallas ha sido de 800g/m^2 y 40mm de espesor y los resultados obtenidos son correctos. No obstante, seguramente, mediante la combinación de varias densidades y espesores se obtenga un mejor resultado. Algo que se puede plantear dentro de futuras líneas de investigación.

Hay que tener en cuenta que, hasta el momento sólo podríamos validar los datos a partir de 500-600 Hz aproximadamente, tal y como se puede ver en la figura 48. Esto puede asociarse al efecto del escalado 1:6 aproximadamente que condiciona la densidad de modos propios a baja frecuencia.

Otro punto a tener en cuenta es el uso de difusores, pues puede mejorar el rendimiento de las cámaras sustancialmente tal y como se indica en las normativas asociadas. Consiguiendo de este modo un campo de difuso adecuado en todo el rango de frecuencias.

Podemos concluir en que la cámara reverberante a escala, tiene un diseño correcto basado en la norma UNE EN ISO 354:2004 [1], en la que poder realizar distintas mediciones previas a la cámara reverberante con un buen grado de validez. Destacar, que estos resultados serán orientativos al comportamiento real de los materiales a utilizar, siendo necesaria la medición final de estos en la cámara reverberante a tamaño real. No obstante, nos permitirá realizar una primera criba en la que se descarten materiales con un bajo rendimiento en lo que a la absorción sonora respecta.

4.2. Futuras líneas de investigación.

A continuación se proponen una serie de propuestas enfocadas a futuras líneas de investigación:

- Mejora de la difusión de la cámara reverberante a escala mediante el diseño y estudio de difusores acústicos a escala.
- Estudio de distintas combinaciones de materiales absorbentes con distintas densidades y espesores para la mejora del coeficiente de absorción de pantallas acústicas.

El desarrollo de estos dos puntos se puede plantear desde el punto de vista de la simulación mediante modelado numérico en 3D, donde se introduzca, tanto los difusores diseñados como las

pantallas con las distintas combinaciones de materiales, dentro del diseño de la cámara reverberante a escala y conocer de este modo, los niveles de potencia sonora con la diferencia de niveles de potencia sonora recogidos en su interior.

- Análisis de la dispersión de la medida de la cámara reverberante a escala en función del tiempo de reverberación según norma UNE ISO 354:2004 [1].
- Estudio del índice de reflexión en pantallas acústicas basado en materiales reciclados [x]. Estas pueden basarse en el conocimiento del índice de reflexión sonora sobre las pantallas medidas, de manera que no solo se mejore el coeficiente de absorción sonora, sino también el índice de reflexión sonora con lo que conlleva a reducir el ruido de fondo a los alrededores de las pantallas producidos mayoritariamente por estas reflexiones.
- Implementación de una fuente omnidireccional a escala fija a la cámara reverberante a escala.

AGRADECIMIENTOS

Comienzo por Jesús Alba Fernández y Romina Del Rey Tormos, mis directores de este humilde trabajo final de máster, quienes han estado ahí cuando lo he necesitado.

A Laura Bertó por su dedicación, consejos y ayuda en esos días de ensayos.

A Fernando Hernández por su colaboración y rescate en momentos “críticos”.

A mis compañeros y amigos del Máster, en especial a Sara Martínez por aguantar mis “chorradas” en este largo verano y explicarme en “varias ocasiones” algún que otro atajo en Excel.

A todos los profesores del Máster que me han transmitido sus conocimientos y pasión por la acústica.

A la asignatura de Técnicas de Simulación Acústica por haberme descubierto una gran herramienta de trabajo.

A todas las personas que directa o indirectamente me han ayudado a llevar a cabo la ejecución del presente trabajo.

A Laura Sahuquillo por aguantar sin queja algunas largas encerronas en casa junto a mí.

Y por supuesto, a mi familia que me da y me ha dado tanto.

Finally, the European Commission because this project counts on the contribution of financial instrument LIFE of the European Union. Project LIFE09 ENV/ES/461.

REFERENCIAS

- [1] UNE EN-ISO 354:2004. Acústica. Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante.
- [2] UNE EN-ISO 3741:2010. Acústica. Determinación de los niveles de potencia acústica de las fuentes de ruido a partir de la presión acústica.
- [3] UNE EN 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.
- [4] Carlos H. Villarroel y Antonio J. Martins. Mediciones en una cámara reverberante, modelo escala 1:10.
- [5] J. Pfretzschner, F. Simón, R.M^a. Rodríguez, A. Moreno (GSIC). Barreras acústicas.
- [6] Zhang Xi' an. Empirical formulas of sound absorption coefficients and spectrums of perforated panel and imperforated panel.
- [7] F. Asdrubali, G. Pispolo y G. Baldinelli. Optimization of in situ noise barrier intrinsic characteristics measurements.
- [8] J.Alba, J.Ramis y R. del Rey. Sound reflection index of noise barriers based on recycled materials.
- [9] J Ramis, J. Alba, J. Matinez, J Redondo. The uncertainty in absorption coefficients measured in reverberation chambers: A case study.
- [10] J. Alba, J. Matinez, F. Hernandez, M. Ardid, J. Cruañes. Incertidumbre en la medida de los niveles de potencia acústica según la norma ISO 5135:1997.
- [11] Del Rey Tormos, R. Modelización del ruido transmitido por flancos en la edificación en nuevas soluciones constructivas.
- [12] Cesar Eduardo Boschi. Método para medir el tiempo de reverberación en recintos.
- [13] Makrinenko, L. I.: "Acoustics of Auditoriums in Public Buildings". American Institute of Physics. Woodbury, NY, USA, 1994.
- [14] Recuero Lopez, M (1999). Acústica Arquitectónica, Ed. Paraninfo, Madrid.
- [15] Recuero Lopez, M. (2000). Ingeniería Acústica, Ed. Paraninfo, Madrid.
- [16] Carrion Isbert, Antoni. (1998). Diseño acústico de espacio arquitectónicos, Ed. UPC, Barcelona.