

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE GANDÍA

Master en Ingeniería Acústica



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



ESCUELA POLITÉCNICA
SUPERIOR DE GANDIA

Adecuación y validación de una cámara reverberante a escala para ensayos de pantallas acústicas

TESIS DE MASTER

Autor:

Andrés Teira Arnosó

Director/es:

D. Jesús Alba Fernández

D^a. Romina M^a del Rey Tormos

GANDIA, 8 de Enero de 2013

Adecuación y validación de una cámara reverberante a escala para ensayos de pantallas acústicas

Autor: Andrés Teira Arnosó

Director1: Jesús Alba Fernández

Director2: Romina María del Rey Tormos

Resumen

El principal objetivo de este trabajo de fin de máster es caracterizar y acondicionar una cámara reverberante a escala, de manera que sea un recinto en el que ensayar con fiabilidad, a medias y altas frecuencias, el coeficiente de absorción de materiales y pantallas acústicas. La cámara reverberante es uno de los laboratorios acústicos más utilizados para determinar el coeficiente de absorción de materiales o la potencia acústica radiada por diferentes emisores. Contamos con una serie de normas que definen las condiciones tanto del recinto de ensayo, como de los materiales o dispositivos expuestos a estudio. En el cálculo del coeficiente de absorción acústica, las superficies de los materiales a ensayar deben estar comprendidas entre 10 y 12 m² (UNE-EN ISO 354:2004). 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 a las dimensiones requeridas. Por ello se ha diseñado y construido un recinto de ensayo de menores dimensiones que la cámara reverberante de la EPSG, concretamente a escala 1:6, para poder trabajar con muestras de reducido tamaño. Debido a sus características físicas, como la longitud de las aristas o el volumen del recinto, entre otras, los resultados del coeficiente de absorción obtenido para diferentes materiales distan significativamente de los obtenidos en la cámara reverberante de la escuela. Es por ello que creemos necesaria una caracterización de la cámara y una mejora en las condiciones de ensayo para alcanzar resultados más fidedignos.

Abstract

The main objective of this work is to describe and condition a scale reverberation chamber, so that is a room in which to test reliability, mid and high frequencies, the absorption coefficient of acoustic materials and screens. The reverberation chamber is one of the most used acoustic laboratories to determine the absorption coefficient of materials or sound power radiated by different sources. We have a set of rules that define the conditions both in the test chamber, as the materials or devices subject to study. In the calculation of the acoustic absorption coefficient of the surfaces of the materials to be tested should be between 10 and 12 m² (UNE-EN ISO 354:2004). However, at the level of acoustic materials research, in most cases only small samples are available that do not reach the required dimensions.

Therefore it has been designed and built a test chamber, smaller than the EPSG reverberation chamber, specifically 1:6 scale, to work with small sample size. Because of their physical characteristics, such as edge length or volume of the enclosure, among others, the results of the absorption coefficient obtained for different materials significantly far from those obtained in the reverberation room of the school. That is why we need a characterization of the camera and improved the test conditions to reach more reliable results.

Autor: Teira Arnosó, Andrés; e-mail: anteiar@upv.es

Fecha: 08-01-2013

ÍNDICE

I. Introducción:	3
I.1. Introducción teórica	3
I.2. Objeto y antecedentes	4
II. Aspectos normativos y conceptos.	5
II.1. Conceptos y definiciones	5
II.2. Características del recinto y procedimiento de ensayo	7
II.3. Anexo A: Difusividad del campo sonoro en la cámara reverberante	8
III. Caracterización de la cámara reverberante a escala en su estado inicial	9
III.1. Geometría y propiedades de la cámara.....	9
III.2. Desarrollo de los ensayos iniciales.....	11
III.2.1. Equipo de medida.....	11
III.2.2. Escalado de dimensiones y distancias indicadas en la norma UNE-EN ISO 354:200411	
III.2.3. Elección de la distribución de los puntos de medida y frecuencias de corte.....	12
III.2.4. Tiempo de reverberación y coeficiente de absorción de la cámara vacía.....	15
III.2.5. Ruido de fondo de la cámara vacía.....	15
III.2.6. Ensayos con materiales y comparativa con los coeficientes de absorción medidos en cámara grande.....	16
III.2.7. Análisis de los resultados y definición de mejoras.....	20
IV. Fase de montaje del sistema automatizado y ajuste de los difusores	22
IV.1. Automatización de la cámara	22
IV.2. Diseño, construcción y montaje de los difusores en la cámara reverberante a escala.....	25
IV.3. Mediciones de ajuste	26
IV.4. Ensayos de validación	27
IV.5. Coeficiente de absorción medio	31
IV.6. Propuesta de corrección del coeficiente de absorción.....	32
V. Conclusiones.	34
VI. Futuras líneas de investigación	36
Agradecimientos	39
Referencias	40

I. Introducción

I.1. Introducción teórica

En el campo de la acústica medioambiental y en edificación, uno de los objetivos más importantes es reducir los niveles de ruido existentes en un recinto o en una zona determinada. Para ello se recurre a la instalación de materiales absorbentes acústicos. Estos materiales absorbentes pueden ser instalados como elementos simples o formar parte de soluciones multicapa, como es el caso de paredes dobles, techos perforados, suelos flotantes o pantallas acústicas elaboradas con material absorbente. Una de las características más importantes de los materiales en este campo de aplicación, es el coeficiente de absorción. De forma estandarizada, la absorción sonora se puede obtener en una cámara reverberante y bajo unas condiciones bien definidas. La cámara reverberante es uno de los laboratorios acústicos más utilizados para determinar el coeficiente de absorción de materiales y dispositivos de control de ruido. Las características y dimensiones vienen determinadas por la norma UNE-EN ISO 354:2004 [12]. Las dimensiones de la cámara reverberante determinan la superficie de ensayo necesaria de la muestra del material sometido a estudio. Por regla general, se necesitan entre 10 y 12 m², en función del volumen de ésta.

En la actualidad, existen diversas líneas de investigación abiertas acerca de nuevos materiales fabricados a partir del reciclaje de distintas industrias, o fabricados a partir de fibras vegetales. Además, a nivel de investigación, se necesitan realizar prototipos de distintos diseños de dispositivos o pantallas acústicas con el fin de abaratar los costes antes de llegar al diseño final. Es a este nivel, donde en la mayoría de los casos nos encontramos con cantidades muy reducidas de material, probetas que en muchas ocasiones no superan el metro cuadrado.

Es por ello que en 2011, en la Escuela Politécnica Superior de Gandía, se lleva a cabo un Trabajo Final de Máster [6] cuyo objetivo es el diseño y construcción de una cámara reverberante de pequeñas dimensiones, tomando como referencia la cámara reverberante de dicha escuela y aplicando una escala 1:6. De esta forma, se podrían evaluar nuevos materiales y pantallas en vías de desarrollo, cuando se dispone de una pequeña probeta para los ensayos.

De los resultados obtenidos en [6], sabemos que el funcionamiento de la cámara reverberante a escala, la realización de los ensayos y los resultados que se obtienen distan mucho de lo deseado en un principio. Este es el motivo por el cual se plantea este proyecto, caracterizar y adecuar, en varios aspectos, esta cámara reverberante a escala, para poder realizar ensayos con fiabilidad, principalmente, del coeficiente de absorción sonora de materiales y pantallas acústicas.

1.2. Objeto y antecedentes

El objetivo principal de este estudio, como ya se ha mencionado, es mejorar las condiciones de la cámara reverberante a escala, para la obtención de resultados del coeficiente de absorción de materiales, a frecuencias medias y altas, más próximos a los obtenidos en una cámara que cumple la norma [12]. Para ello, se llevarán a cabo ensayos con una serie de materiales en la cámara reverberante “real” de la EPSG, que utilizaremos para realizar la comparativa con los resultados que obtengamos de esos mismos materiales en la cámara a escala.

Basándonos en el anexo A de la norma [12] y en un reciente TFM [8] basado en la mejora de la difusión acústica de la cámara reverberante de la EPSG, creemos que las deficiencias de la cámara a escala pueden estar relacionadas con la difusividad del campo sonoro creado en su interior, lo cual tiene como posible solución, la introducción de paneles difusores en la cámara, aumentando así la superficie y las reflexiones en el interior de ésta. Esto supone un aumento de los rayos que inciden sobre el material a estudio, aumentando así el número de ángulos de incidencia sobre el mismo.

Se detallan a continuación los pasos seguidos para alcanzar nuestro objetivo:

1. Caracterización del estado actual de la cámara: aspectos geométricos, distribución de niveles de presión acústica, tiempo de reverberación y coeficiente de absorción de cámara vacía, grado de difusión, frecuencias de corte.
2. Realización de ensayos con materiales, definición del patrón acústico y comparativas con resultados obtenidos en cámara reverberante real.
3. Definición del bloque de mejoras a conseguir.
 - a. Diseño y montaje de un sistema automatizado para la realización de las medidas.
 - b. Construcción e introducción de difusores acústicos.
4. Implementación de mejoras propuestas y mediciones de ajuste.
5. Ensayos de validación y evaluación de los resultados.

Finalmente y tras la evaluación de los resultados obtenidos, se presentará una serie de conclusiones, así como unas posibles futuras líneas de investigación.

II. Aspectos normativos y conceptos

Para la obtención del coeficiente de absorción de materiales en cámara reverberante, se utiliza la norma UNE-EN ISO 354:2004 [12]. Ésta, expone dos métodos para calcular el coeficiente de absorción, basados en medir el tiempo de reverberación de la cámara con y sin material, y a partir de estos valores, calcular, mediante la ecuación de Sabine, el área de absorción equivalente y, posteriormente, el coeficiente de absorción sonora del material (α_s).

Los dos métodos que recoge la norma son:

- a) Método de la señal de ruido interrumpida. Se utiliza una fuente emitiendo una señal de ruido de banda ancha, por ejemplo ruido rosa, durante el tiempo necesario para producir un nivel de presión sonora estacionario en todas las bandas, con el fin de producir un campo estacionario en el recinto antes de interrumpir la señal. En ese momento se mide directamente el tiempo de caída de la señal en un punto. Se repite el proceso para los diferentes puntos de medida y se promedian todos los valores obtenidos.
- b) Método de la respuesta impulsiva integrada. Emplea una fuente de ruido impulsiva como puede ser un disparo o la explosión de un globo y se mide la respuesta al impulso en los distintos puntos de adquisición. A continuación se integran todos los resultados obtenidos.

Nosotros trabajaremos con el método de la señal interrumpida (a).

II.1. Conceptos y definiciones

Los conceptos, y sus correspondientes definiciones, más importantes de la norma se describen a continuación:

- Curva de caída de nivel: Representación gráfica de la caída del nivel de presión sonora en un recinto en función del tiempo después de que cese la emisión de la fuente sonora.
- Tiempo de reverberación, T : Tiempo, en segundos, necesario para que el nivel de presión sonora disminuya 60 dB después del cese de la emisión de la fuente sonora. La definición de T con una caída de 60 dB puede obtenerse por extrapolación lineal de rangos de evaluación más cortos. Esta definición se basa en la suposición de que, en el caso ideal, hay una relación lineal entre el nivel de presión sonora y el tiempo, y que el nivel de ruido de fondo es suficientemente bajo.
- Área de absorción sonora equivalente de un recinto: Área hipotética de una superficie totalmente absorbente sin efectos de difracción que, si fuera el único elemento absorbente

en el recinto, tendría el mismo tiempo de reverberación que el recinto considerado. El área se expresa en metros cuadrados. Para la cámara reverberante vacía, esta magnitud se representa por A1; para la cámara reverberante con la muestra se representa por A2.

La fórmula utilizada para el cálculo del área de absorción sonora equivalente es la que sigue:

$$A_i = \frac{55.3V}{cT_i} - 4Vm_i \quad (1)$$

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_i : es el tiempo de reverberación, en segundos, de la cámara reverberante.

m_i : es el coeficiente de atenuación sonora, en metros recíprocos, calculado de acuerdo con la Norma Internacional ISO 9613-1:1993 empleando las condiciones climáticas de la cámara reverberante durante la medición.

→ Área de absorción sonora equivalente de la muestra de ensayo, A_T : Diferencia entre las áreas de absorción sonora equivalente de la cámara reverberante con y sin la muestra de ensayo. El área se expresa en metros cuadrados.

→ Área de la muestra de ensayo, S: Área de suelo o pared cubierta por la muestra de ensayo. El área se expresa en metros cuadrados.

→ Coefficiente de absorción sonora, α_s : Cociente entre el área de absorción sonora equivalente de una muestra de ensayo y el área de la muestra de ensayo.

Para absorbentes en los que ambos lados se encuentran expuestos, el coeficiente de absorción sonora es el área de absorción sonora equivalente de la muestra dividida por el área de los dos lados de la muestra. El coeficiente de absorción sonora evaluado a partir de mediciones de tiempo de reverberación puede tomar valores superiores a 1,0 (por ejemplo, a causa de efectos de difracción) y, por lo tanto, α_s no se expresa como porcentaje. Se emplea el subíndice “s” para evitar confusión con el coeficiente de absorción sonora definido como el cociente entre la energía sonora no reflejada y energía sonora incidente en el caso en que una onda plana alcanza una superficie plana con un cierto ángulo de incidencia. Ese coeficiente de absorción sonora “geométrico” es siempre menor que 1,0 y puede, por lo tanto, expresarse como porcentaje.

El coeficiente de absorción sonora α_s de un absorbente plano se calcula mediante la fórmula:

$$\alpha_s = \frac{A_T}{S} \quad (2)$$

II.2. Características del recinto y procedimiento de ensayo

Las características de la cámara reverberante y las pautas más destacadas para la realización de los ensayos se describen a continuación:

- El volumen de la cámara debe ser al menos de 200 m³ y debe cumplir la siguiente relación:

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

Donde:

$I_{M\acute{a}x}$: es la longitud del mayor segmento de recta inscrito en la cámara.

V : es el volumen de la cámara.

- Ninguna de las superficies de la cámara debe presentar cualquier paralelismo con las demás, para evitar de esta forma la aparición de modos propios de gran intensidad dentro del recinto de ensayo.
- El rango de frecuencias en el que se trabaja es en bandas de tercios de octava desde los 100 a los 5000 Hz.
- La superficie de ensayo, de materiales que se consideran absorbentes planos, debe estar comprendida entre los 10 y los 12 m² para una cámara de 200 m³. En recintos de mayor volumen el límite superior será $(V/200 \text{ m}^3)^{2/3}$. Las dimensiones de la muestra deben cumplir con una relación ancho/largo igual o por encima de 0.7. Los diferentes montajes para muestras de ensayo vienen definidos en el Anexo B de la norma [12], pero siempre debe situarse a no menos de 1 m de cualquier superficie de la cámara.
- Posiciones de fuente. Las fuentes de emisión usadas deben tener un patrón de radiación omnidireccional. Cada posición debe mantener una distancia mínima de 3 metros respecto a las demás.
- Posiciones de micrófono. Deben ser omnidireccionales. Entre las diferentes posiciones de los receptores debe haber al menos 1,5 m de separación. En cuanto a las superficies de la cámara y a la muestra, todo micrófono debe estar a más de 1 m de distancia. Respecto a la fuente, se deben mantener siempre a 2 m de la misma.

- El número de curvas de caída de nivel medidas en posiciones diferentes deben ser al menos 12, combinando un mínimo de 2 posiciones de fuente y 3 de micrófono.
- Al realizar las mediciones, las condiciones de temperatura y humedad deben ser las mismas durante todo el proceso de ensayo. Los valores de la humedad relativa deben estar comprendidos entre el 30 y 90 %, y la temperatura debe estar por encima de los 15 °C. Una variación sustancial de estas condiciones ambientales puede alterar los resultados obtenidos, especialmente en frecuencias altas donde la absorción del medio se hace más notable.

II.3. Anexo A: Difusividad del campo sonoro en la cámara reverberante

La norma aconseja el uso de difusores, ya sean fijos o rotatorios, para conseguir un campo sonoro difuso satisfactorio. Estos deben estar contruidos con un material de baja absorción acústica y densidad, deben ser de diferentes tamaños y estar situados de forma aleatoria en el interior del recinto. Se conoce que el área total de los difusores, por ambas caras, debe estar comprendido entre un 15% y un 25% del área total de las superficies de la cámara.

Para comprobar la mejora de la difusividad, se selecciona una muestra de un material poroso y homogéneo, cuyo coeficiente de absorción en las bandas de 500 a 4000 Hz sea mayor que 0.9 y se realizan los siguientes ensayos:

1. Cámara sin difusores.
2. Cámara con un pequeño número de difusores fijos.
3. Cámara con cantidades crecientes de difusores.

Cuando el coeficiente de absorción sonora medio se aproxima a un máximo, manteniéndose constante con el incremento de superficie de difusión, se ha alcanzado el número óptimo de difusores.

III. Caracterización de la cámara reverberante a escala en su estado inicial

III.1. Geometría y propiedades de la cámara

Disponemos de una cámara reverberante de dimensiones reducidas, las cuales resultan de aplicar una escala 1:6 tomando como referencia el volumen de la cámara reverberante de la Escuela Politécnica Superior de Gandía. Cabe señalar que no se ha mantenido el diseño original de dicho recinto, optando por un modelo en el cual no exista ningún ángulo recto ni paralelismo entre ninguna superficie, reduciendo de esta forma la intensidad de los modos propios creados en el interior de la sala.

En su diseño, se han tenido en cuenta las especificaciones impuestas por la norma UNE-EN ISO 354:2004 [12] ya citadas en el apartado II.2. En la Fig. 1 podemos ver una imagen exterior de la cámara reverberante a escala, así como algunos de sus detalles constructivos de interés.

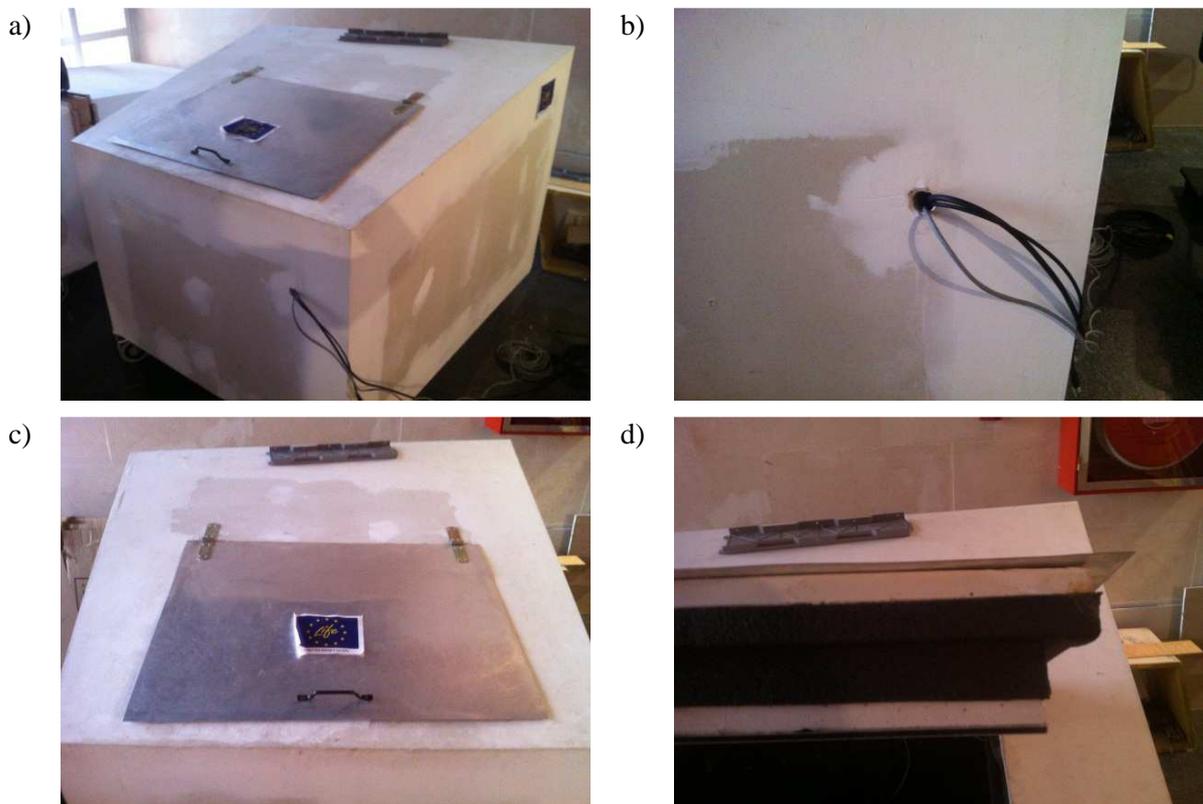


Fig. 1: Imagen exterior de la cámara reverberante a escala (a), orificio para introducir el cableado necesario para la conexión de los elementos del equipo de medida (b) y puerta de acceso situada en la parte superior de la cámara (c) con tira elástica para evitar fugas (d).

Todas las paredes de la cámara están fabricadas a base de tabiques ligeros autoportantes revestidos interiormente con paneles de aluminio, cuya composición detallada es la siguiente (de exterior a interior): placa de yeso laminado, núcleo absorbente de 4 cm de espesor de fibras

termofusionadas, placa de yeso laminado y un revestimiento interior de placa de composite Alucobon de 4mm.

Esta composición aporta el aislamiento acústico necesario del exterior y un coeficiente de absorción acústica en el interior de la cámara por debajo del 0.2 (valor por debajo del cual un material se considera reflectante) en todas las bandas de frecuencia, y un valor medio ($\bar{\alpha}$) inferior al 0.16.

Como podemos ver en las imágenes de la Fig. 1, la cámara dispone de una puerta en su parte superior para el acceso a la misma, de igual composición que el resto de las paredes del recinto. Para intentar evitar las fugas en la medida de lo posible, la puerta cuenta con una cinta adhesiva de un material elástico poco poroso.

El recinto cuenta con un tubo por el cual introducir los cables necesarios para la conexión de la instrumentación de medida entre interior y exterior (Fig. 1.b). Al igual que la puerta, esta canalización puede ser conflictiva en cuanto al aislamiento acústico del recinto de ensayo respecto al exterior, es por ello que se debe recubrir con material absorbente antes de comenzar las mediciones.

A continuación se ilustra un esquema con las dimensiones de las aristas y los ángulos que conforman el recinto de ensayo.

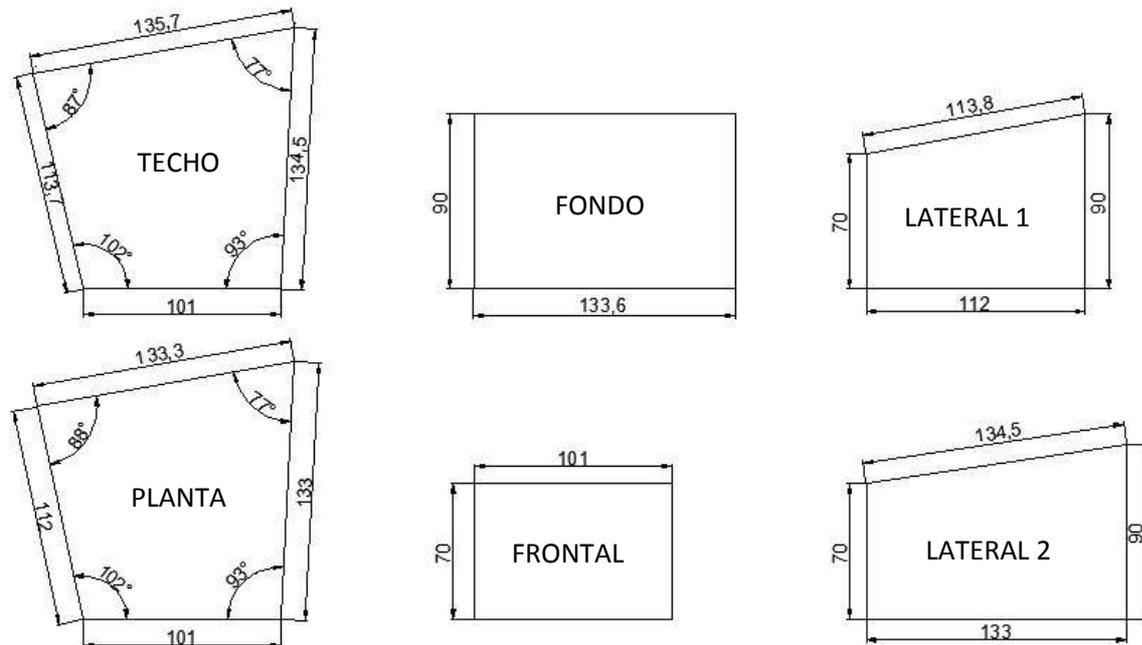


Fig. 2: Planos de la cámara reverberante a escala.

La cámara de la EPSG cuenta con un volumen de unos 238 m³ y su superficie total es de 236 m², lo cual está dentro de las condiciones impuestas por la norma [12]. Por su parte, el recinto a escala tiene un volumen de 1.12 m³, y una superficie total de 6.74 m².

III.2. Desarrollo de los ensayos iniciales

III.2.1. Equipo de medida

Para la realización de las mediciones, emplearemos el siguiente equipo:

1. Sonómetro B&K modelo 2250.
2. Micrófono B&K preamplificado de ½" tipo 4189.
3. Fuente Genelec modelo 8030A.
4. Anemómetro con medidor de humedad relativa y temperatura.
5. Cableado necesario para la interconexión de las distintas etapas del equipo.

En la Fig. 3 se ilustra un sencillo esquema del equipo de medida utilizado y el correspondiente conexionado.

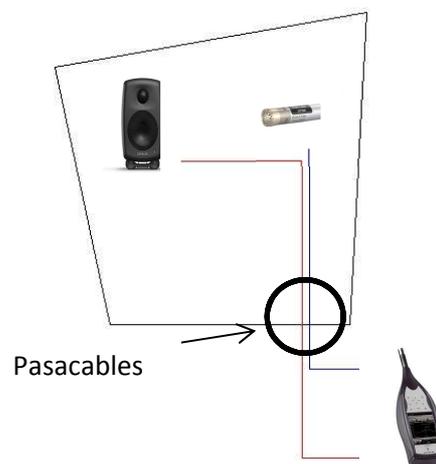


Fig. 3: Esquema sencillo de conexionado del equipo de medida en la cámara reverberante a escala.

III.2.2. Escalado de dimensiones y distancias indicadas en la norma UNE-EN ISO 354:2004

Como ya se ha mencionado anteriormente, la norma empleada en el cálculo del coeficiente de absorción acústica de materiales en cámara reverberante es la UNE-EN ISO 354:2004 [12]. Al tener nuestro recinto de ensayo un tamaño y volumen muy inferiores a los indicados en la norma, debemos aplicar la escala 1:6 a las distancias mínimas exigidas por la norma entre los diferentes elementos presentes en la cámara, así como las dimensiones de la muestra expuesta a estudio.

Como resultado, las distancias entre fuentes de emisión, micrófonos de medida y superficies de la cámara y muestra se ilustran en la siguiente tabla:

	Distancia (m)	
	Norma	Escala
Micro-paredes	1	0.17
Micro-muestra	1	0.17
Micro-fuente	2	0.33
Micro-micro	1.5	0.25
Fuente-fuente	3	0.5
Fuente-muestra	1	0.17
Muestra-paredes	0.75 (1)	0.13 (0.17)

Tabla 1: Distancias mínimas exigidas por norma y sus correspondientes a escala.

Por su parte, la superficie de la probeta a ensayar, debe estar comprendida entre 0.28 y 0.33 m². La idea es trabajar con muestras de tamaño reducido, aplicando el factor de escala 1:6 en las dimensiones de la misma, lo que no significa “escalar” la muestra, ya que sus propiedades físicas, entre ellas el volumen, no son escalables. Decidimos tomar un valor intermedio dentro de este rango, quedándonos con una superficie de muestra de 0.3 m², cuya relación largo x ancho sea 0.75 x 0.4 m, o bien, 0.6 x 0.5 m. Se definen estas dos posibilidades en función del material sometido a estudio, debido a la cantidad de la que se disponga, su distribución o relación de aspecto u otros factores por los que nos veamos obligados a utilizar unas dimensiones diferentes. Se comprueba el efecto de utilizar una u otra relación, caracterizando dos materiales con muestras de ambas medidas, llegando a resultados muy similares en ambas situaciones.

III.2.3. Elección de la distribución de los puntos de medida y frecuencias de corte

Sabemos, de la norma UNE-EN ISO 354:2004 [12], que la menor frecuencia medible en una cámara reverberante, es aquella cuya longitud de onda es igual o superior a la longitud de la arista más pequeña de la cámara, en nuestro recinto, es de 0.70 m, por lo tanto, la frecuencia de corte inferior debería ser:

$$\lambda_{m\acute{a}x} = 0.7 \text{ m} \Rightarrow f_{m\acute{i}n} = 485 \text{ Hz}$$

Para determinar esta característica de forma experimental, realizamos un ensayo de niveles de presión sonora a dos alturas diferentes, a 0.25 y 0.45 m respecto al suelo, definiendo cuatro puntos de fuente de ruido y tres puntos de medida por cada uno de altavoz, situados hacia las esquinas de la cámara, dejando el espacio suficiente en el centro para la colocación de muestras de ensayo futuras. Seleccionamos las posiciones de fuente en las esquinas de la cámara porque, como se ha visto en [2], es la mejor situación para excitar todos los modos de vibración en una sala, lo que se

dificulta para recintos de poco volumen como es nuestro caso. La distribución de los puntos de emisión de ruido y medida es la siguiente:

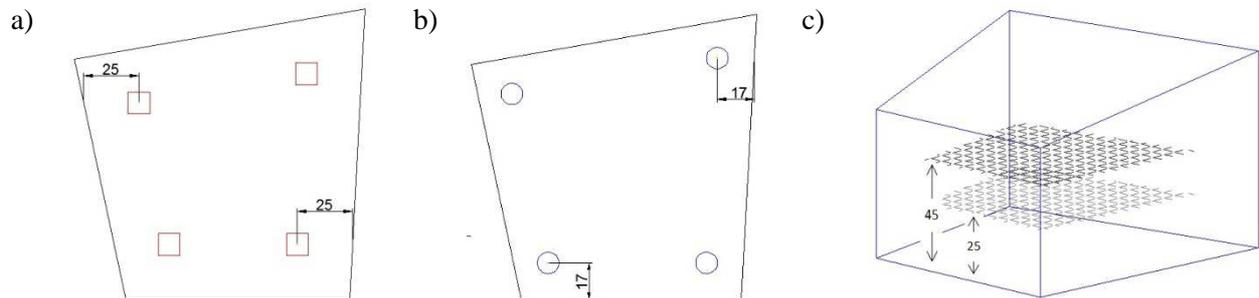


Fig. 4: Posicionamiento de las fuentes (a), los micrófonos (b) y diferentes alturas a las que se sitúan los puntos de medida (c).

Es importante tener en cuenta que el altavoz con el que trabajamos no es omnidireccional, pues no se dispone de una fuente de esas características de unas dimensiones razonables para introducir en la cámara reverberante. Esto implica la necesidad de caracterizar el altavoz y determinar su radio crítico. Esta característica define la distancia desde la fuente a partir de la cual nos encontramos en campo reverberante, es decir, la distancia mínima que debe existir entre la fuente y cada punto de medida. En el caso del Genelec 8030A, el radio crítico es de aproximadamente 0.40 m.

Como podemos observar en los gráficos de la Fig. 5 y en los datos de la Tabla 2, a ambas alturas, en frecuencias bajas, por debajo de 500 Hz, los niveles de presión sonora muestran una gran desviación típica entre puntos, alcanzando los 12 y 14 dBs de diferencia. En el rango de media frecuencia, entre 500 y 1000 Hz, las diferencias se reducen, pero es a partir de esta banda cuando nos encontramos con unos niveles medianamente uniformes. Decidimos, en vistas de la similitud de los resultados obtenidos a ambas alturas, colocar los puntos de recepción a 25 cm.

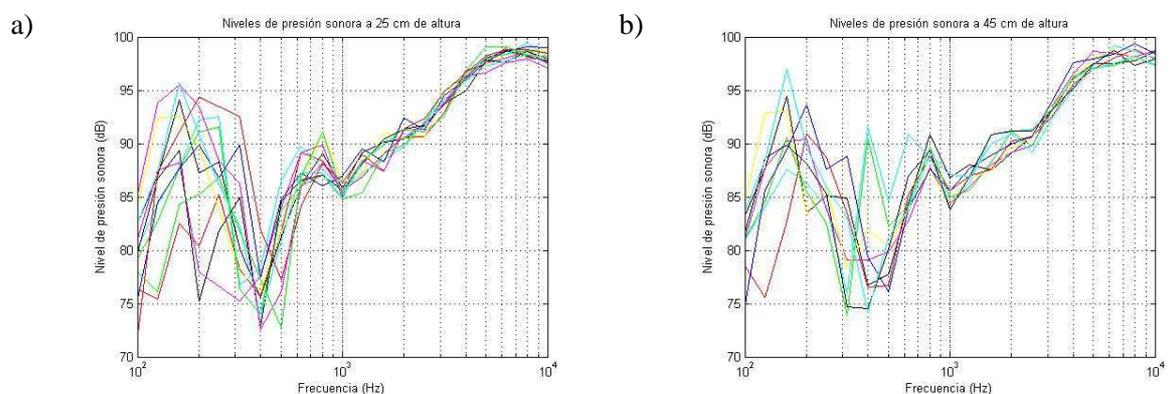


Fig. 5: Niveles de presión sonora tomados con la cámara vacía, con los micrófonos situados a 25 cm de altura (a) y a 45 cm (b).

La frecuencia de corte superior podría definirse, según el ensayo de presión sonora, como los 10 kHz, aunque cuando trabajamos en aislamiento, edificación o acústica medioambiental, los resultados de interés llegan a los 5 kHz y en algunas ocasiones a los 8 kHz.

Frecuencia	Desviación 25 cm	Desviación 45 cm
100	3.82	2.59
125	5.49	4.38
160	4.2	3.95
200	6.31	3.05
250	4.72	3.83
315	5.56	4.65
400	5.67	6.54
500	4.05	4.67
630	1.98	2.51
800	1.61	1.34
1000	0.67	1.08
1250	1.12	1.13
1600	1.19	1.29
2000	0.85	0.88
2500	0.53	0.63
3150	0.74	0.45
4000	0.54	0.65
5000	0.62	0.49
6300	0.51	0.64
8000	0.42	0.52
10000	0.56	0.47
12500	0.57	0.41
16000	0.72	0.59
20000	1.24	0.85

Tabla 2: Valores de la desviación típica entre puntos a ambas alturas.

Por lo tanto, podemos considerar “válidos” los resultados obtenidos en el rango de frecuencias 500-5.000 Hz en la cámara reverberante a escala, aunque como ilustran las gráficas y la desviación entre puntos, en medias frecuencias los resultados pueden depender fuertemente de los puntos de medida utilizados.

III.2.4. Tiempo de reverberación y coeficiente de absorción de la cámara vacía

Con los puntos de fuente y receptores ya definidos, el siguiente paso es obtener el tiempo de reverberación de la cámara vacía, calculando posteriormente su coeficiente de absorción, ya que todas las superficies interiores están fabricadas con el mismo material. A continuación se ilustran las gráficas en la Fig. 6 de ambos parámetros citados:

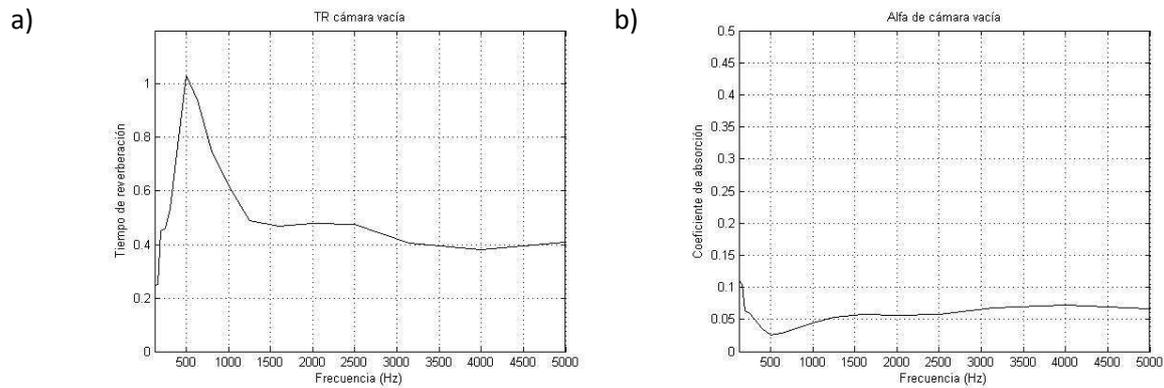


Fig. 6: TR (a) y coeficiente de absorción (b) de la cámara vacía en su estado inicial.

Las condiciones ambientales en el interior de un recinto de ensayo deben ser siempre iguales o, en su defecto, lo más similares posibles, durante la realización de las medidas. Si existen cambios significativos, el tiempo de reverberación medido puede sufrir variaciones importantes, especialmente en frecuencias altas, como ya se ha citado en el apartado II.2. En todos los ensayos realizados se ha utilizado un anemómetro para determinar la temperatura y la humedad relativa en el interior de la cámara. Sus valores suelen ser constantes y están en torno a los 26 °C y 65%, respectivamente, dentro de los indicados en la norma [12].

III.2.5. Ruido de fondo de la cámara vacía

Antes de realizar los ensayos con los materiales, debemos asegurarnos de que el nivel del ruido de fondo existente en la cámara a escala, con el equipo de medida instalado y conectado, es lo suficientemente bajo en comparación con el nivel de la señal de ruido emitida. Se llevan a cabo unas mediciones para corroborar esta condición, véase la Fig. 7, en la que se enfrentan un promedio de los niveles de presión sonora con la fuente emitiendo y los del ruido de fondo.

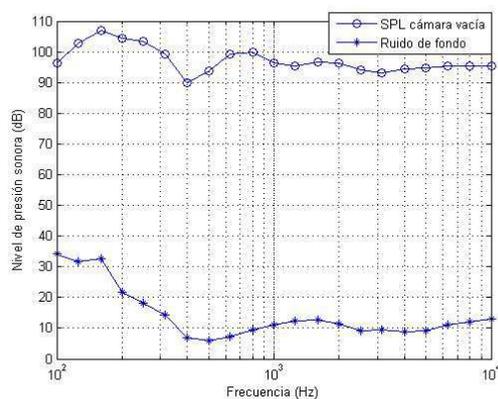


Fig. 7: Niveles de presión sonora en cámara vacía y niveles de ruido de fondo.

La norma [12] indica que el tiempo de reverberación se mide desde los 5 dBs por debajo del nivel inicial hasta que cae 20 dBs y, en ese momento, debe estar 10 dBs por encima del ruido de fondo.

Como vemos, en el peor de los casos, los niveles de presión medidos cuando la fuente está emitiendo son aproximadamente 70 dBs superiores al ruido de fondo, margen más que suficiente para que las medidas sean válidas.

III.2.6. Ensayos con materiales y comparativa con los coeficientes de absorción medidos en cámara grande

Uno de los objetivos de este trabajo, es conseguir que el coeficiente de absorción de materiales medido en nuestra cámara a escala sea lo más similar posible al medido en la cámara de volumen reglamentario de la escuela. En busca de dicho objetivo, en primer lugar mediremos una serie de materiales con las características iniciales de nuestro recinto, obteniendo así el patrón acústico que define la cámara reverberante a escala. Se ensayan tres muestras de cada material, para cada una de ellas se realizan 5 medidas, que se promediarán para obtener un valor de TR en cada uno de los 12 puntos seleccionados. Utilizaremos básicamente materiales de dos tipos, unas lanas de roca de la marca Rockwool y unos poliésteres fabricados a partir del reciclaje de botellas de plástico estudiados en [15]. En la Tabla 3 podemos ver una lista de los materiales ensayados y algunas de sus características físicas.

Nombre	Tipo	Gramaje (g/m ²)	Densidad (kg/m ³)	Espesor (mm)
I 400/40	PET	400	10	40
I 400/30	PET	400	13	30
I 300/20	PET	300	15	20
I 600/30	PET	600	20	30
I 1400/70	PET	1400	20	70
I 700/25	PET	700	28	25
Lana Rockwool	Lana de roca	1200	30	40
Lana Rockwool	Lana de roca	2400	30	80

Tabla 3: Lista de materiales a ensayar.

En la norma [12] se especifica que los bordes de la muestra a ensayar deben ser cubiertos o sellados con un perímetro acústicamente reflectante, sin dejar ningún espacio de aire entre ambos, con el fin de que los bordes no absorban sonido. En caso de que el material sometido a estudio deje sus bordes expuestos cuando se instala en una aplicación real, estos no deben ser cubiertos durante los ensayos, y su superficie se incluirá en los cálculos del coeficiente de absorción. El perímetro puede ser fabricado de acero, yeso o madera, y un espesor mínimo de 1mm para el primero y de 12.5 mm para los dos últimos.

Se preparan 3 muestras de cada uno de los materiales ya mencionados de 0.75 x 0.4 m², cubriendo las superficies de los bordes con un perímetro reflectante, como indica la norma [12], que decidimos fabricar de madera, debido a su bajo coste y fácil manipulación. El aspecto de las probetas a ensayar se ilustra en la Fig. 8.

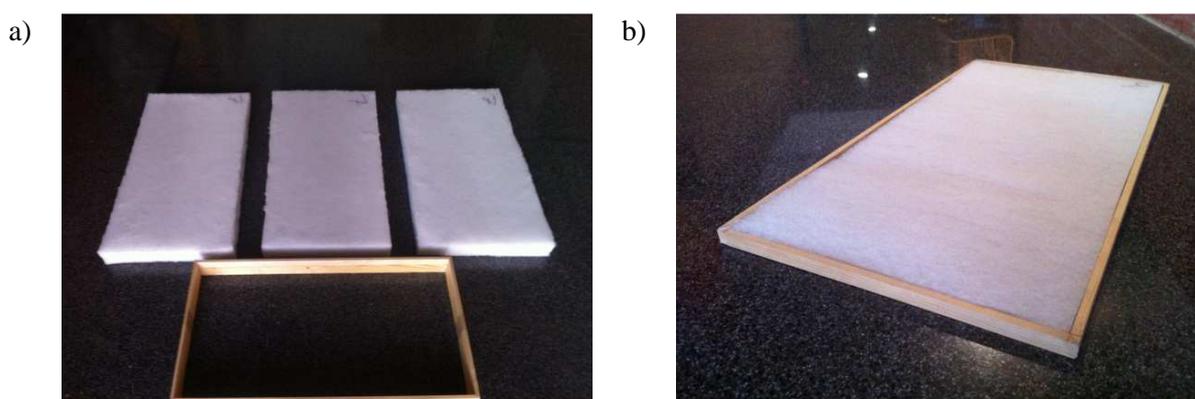


Fig. 8: Ejemplo de 3 muestras de un material y su correspondiente perímetro (a), y la muestra con su perímetro preparada para ensayar (b)

Realizamos un par de ensayos sin dicho perímetro reflectante, para observar la influencia de este en los resultados. Como podemos ver en la figura 9, los resultados obtenidos con el perímetro reflectante trazan una curva más plana, sin fluctuaciones tan abruptas, que las medidas sin dicho

perímetro, aunque no se observa ninguna mejora. Por lo tanto, seguimos las indicaciones de la norma [12] y realizamos todas las mediciones con los perímetros de madera.

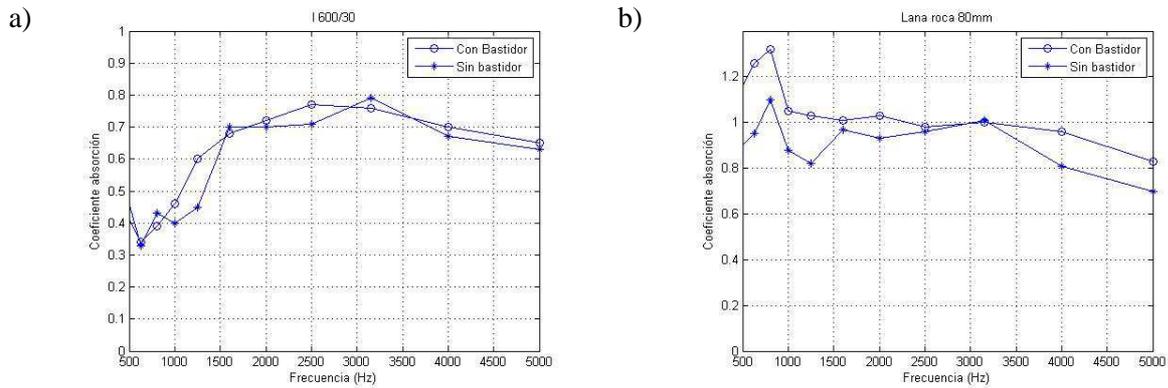


Fig. 9: Comparativa entre el coeficiente de absorción medido, en cámara reverberante a escala, con y sin perímetro reflectante del material I 600/30 (a) y de una lana de roca de 80 mm de espesor (b).

Tras la campaña de medidas ejecutada, obtenemos unos resultados que, al realizar las comparativas, distan en gran medida de los obtenidos en los ensayos bajo norma. Se ilustran las gráficas con dichas comparativas, que analizaremos a continuación, así como dos imágenes del interior de la cámara tomadas durante los ensayos con un material de cada tipo:

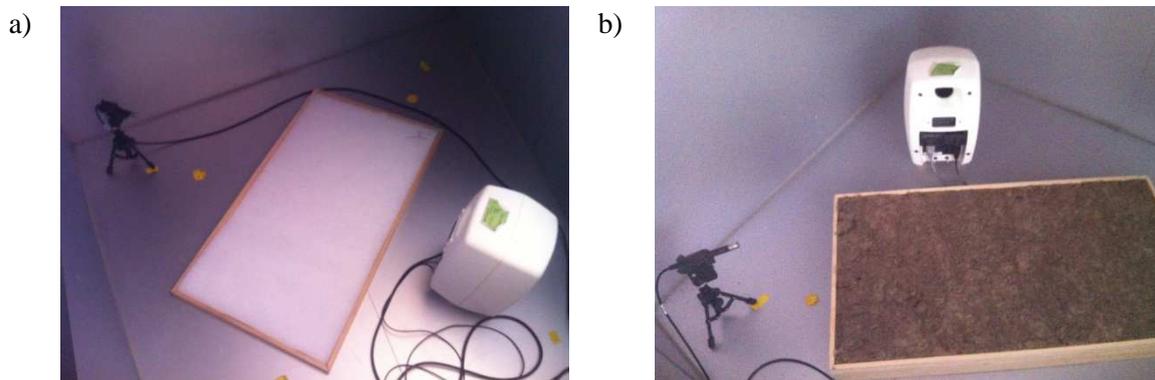


Fig. 10: Imágenes del interior de la cámara reverberante a escala durante los ensayos de un materiales PET (a) y una lana de roca (b).

Como podemos ver en las imágenes, las posiciones de micrófono y fuentes de ruido se distribuyen hacia las esquinas de la cámara, dejando la zona central para la colocación de la muestra de ensayo, respetando en todo momento las distancias mínimas exigidas por la norma [12].

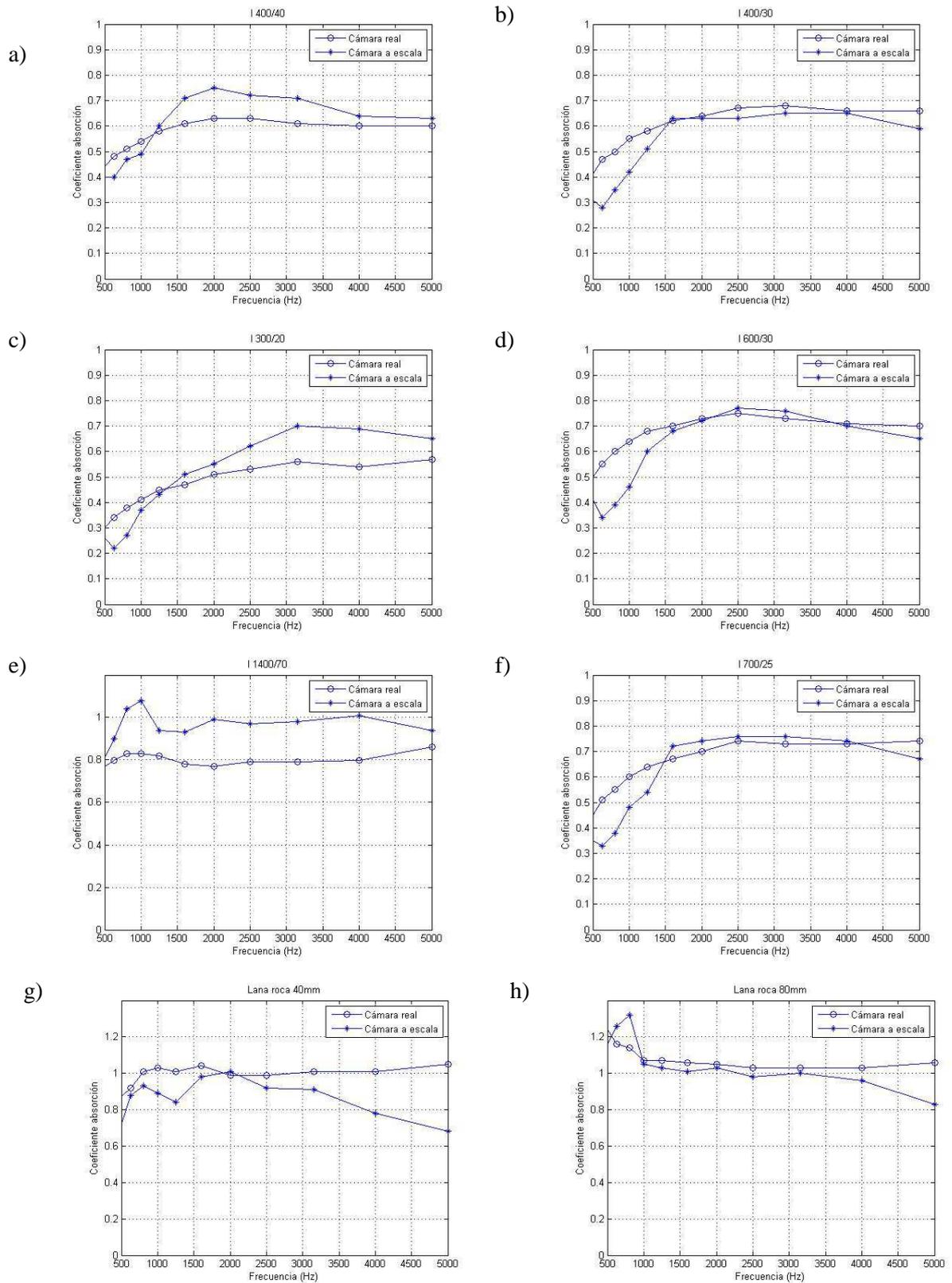


Fig. 11: Comparativa entre los coeficientes de absorción medidos en la cámara reverberante de la EPSG y los medidos en la cámara a escala.

III.2.7. Análisis de los resultados y definición de mejoras

Como hemos comentado antes, observando las gráficas de la Fig. 11, se pueden apreciar las diferencias que existe entre las curvas de absorción medidas en la cámara a escala y en la real. En los PET, a frecuencias medias, entre 500 y 1000 Hz, el coeficiente de absorción obtenido en la cámara a escala suele estar por debajo del real, aproximadamente un 0.2 inferior, comenzando en torno a esta banda una abrupta subida, superando en gran medida el alfa medido bajo norma de alguno de los materiales. Esto no sucede con el I 1400/70, cuya absorción siempre está muy por encima de los valores reales, lo que indica cierta relación entre la validez de los resultados y el espesor o densidad del material sometido a estudio. En cambio, con las dos lanas de roca, se observa un comportamiento diferente, mostrando una curva por debajo de la real en casi todo momento y una caída a alta frecuencia muy pronunciada. A pesar de esto, parece que el patrón definido por las lanas es más cercano al real, por lo que tras las mejoras se espera recoger unos resultados notablemente mejores para estos compuestos.

Además del método de Sabine, que es el utilizado en la normativa, existen dos expresiones para calcular el tiempo de reverberación de una sala. La primera de ellas, la formulada por Eyring, está pensada para utilizar en salas muy pequeñas o con una absorción muy elevada. Su expresión es la que sigue:

$$TR = \frac{0.161V}{-S \ln(1-\bar{\alpha})} \quad (4)$$

Por otra parte, tenemos la fórmula de Millington, que se utiliza para medir el TR en una sala con gran variedad de materiales y coeficientes de absorción, cuya ecuación se muestra a continuación:

$$TR = \frac{0.161V}{\sum -S_i \ln(\frac{1}{1-\alpha_i})} \quad (5)$$

Recalculamos la absorción mediante la expresión de Eyring, que se utiliza en casos de recintos pequeños o de elevada absorción, como es nuestro caso. Al no disponer de más materiales diferentes que las superficies del interior de la cámara y la muestra a ensayar, desechamos la opción de utilizar la expresión de Millington.

De todos modos, no obtenemos unos mejores resultados, ya que la caída continúa siendo igual de irregular en comparación con la real, y tan sólo logramos que los coeficientes de absorción obtenidos tengan valores sensiblemente menores a medida que aumentamos la frecuencia, pero en las bandas medias, permanecen los valores excesivamente bajos. Por lo tanto, nos ceñiremos a la norma [12] y calcularemos el coeficiente de absorción mediante Sabine. Veamos en la Fig. 12 un par de ejemplos de lo comentado.

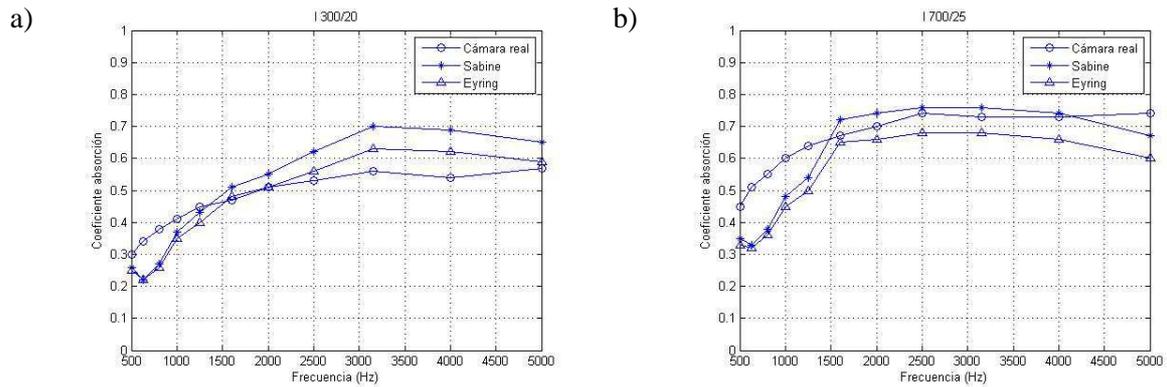


Fig. 12: Diferencia entre el cálculo de alfa de dos materiales diferentes mediante Sabine y Eyring.

Como consecuencia de la realización de las medidas y la obtención de estos resultados, se plantean dos aspectos importantes que mejorar.

En primer lugar, al llevar a cabo los ensayos, nos encontramos con la necesidad de acceder al interior de la cámara en cada ocasión en la que debamos cambiar la posición de fuente o receptor. Al disponer de la puerta de acceso en la parte superior del recinto, la realización de cada ensayo se hace muy laboriosa y costosa en esfuerzo físico y tiempo. Además, se añade el inconveniente de tener que mover la muestra cada vez que cambiamos la posición de la fuente, modificando de esta forma las condiciones del ensayo. Es por esto que se cree conveniente instalar algún tipo de sistema automatizado que nos permita realizar las medidas sin la obligación de entrar a la cámara con tanta frecuencia.

Por otro lado, se debe mejorar el acondicionamiento del recinto para la obtención de mejores resultados del coeficiente de absorción de los materiales. Una vez instalado el sistema automatizado, se caracterizarán los nuevos puntos de medida y se dotará a la cámara de una serie de paneles de baja absorción que actúen a modo de difusores, colocados de forma aleatoria, aumentando de esta forma la superficie reflectante del habitáculo y el número de primeras reflexiones acústicas sobre la muestra de ensayo. Esta medida de mejora se recoge en el anexo A de la norma [12] y se ha llevado a cabo en esta escuela en un trabajo de fin de máster [8], con exitoso resultado, lo que nos sirve como referencia para aplicarla en nuestro trabajo.

IV. Fase de montaje del sistema automatizado y ajuste de los difusores

IV.1. Automatización de la cámara

Como ya hemos comentado, el elevado tiempo y esfuerzo que suponen la realización de los ensayos, nos lleva a diseñar un sistema con el cual se puedan realizar las medidas sin necesidad de acceder al interior de la cámara, una vez finalizado el montaje. Otro de los inconvenientes que presenta el recinto es el reducido tamaño y espacio interior para la colocación del instrumental de medida y el desplazamiento de los receptores entre los diferentes puntos a muestrear.

Barajando diversas posibilidades, decidimos introducir una webcam Aqprox modelo IP01WV4 controlada por IP, con motor rotatorio incorporado, atornillada a la parte superior de la cámara reverberante. A ella se acopla un tubo de PVC de 1 cm de diámetro y 45 cm de longitud, recubriendo su interior de material absorbente para evitar posibles resonancias, portando en su extremo el micrófono.

Conectándonos on-line a la IP de nuestra webcam, podemos observar desde cualquier explorador, a tiempo real, el interior de la cámara reverberante y la posición de micrófono en la que nos encontramos, ya que este se desplaza simultáneamente con el giro de la webcam. En la Fig. 13 podemos ver la interfaz de la webcam durante la realización de los ensayos.

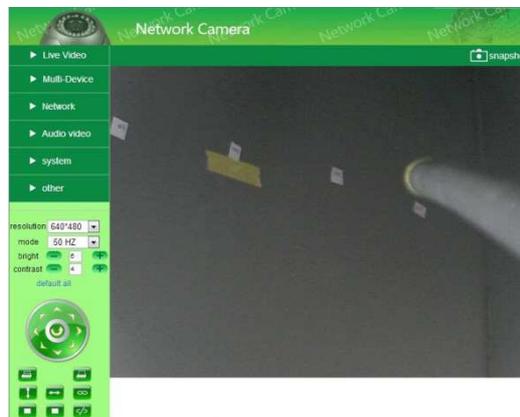


Fig. 13: Software de la webcam para controlar su funcionamiento y visionado.

Además, se definen dos posiciones de fuente fijas, donde se sitúan dos altavoces Genelec modelo 6010A de unas dimensiones inferiores a las de la fuente emisora utilizada con anterioridad, pero con características casi idénticas en cuanto a respuesta en frecuencia y directividad. Se decide cambiar las fuentes de ruido, principalmente, por su tamaño más reducido, ocupando así menos volumen de la cámara y permitiendo una mejor distribución y desplazamiento de los demás elementos. De esta forma también evitamos el desplazamiento de los emisores que debería realizarse de forma manual, accediendo para ello al interior del recinto.

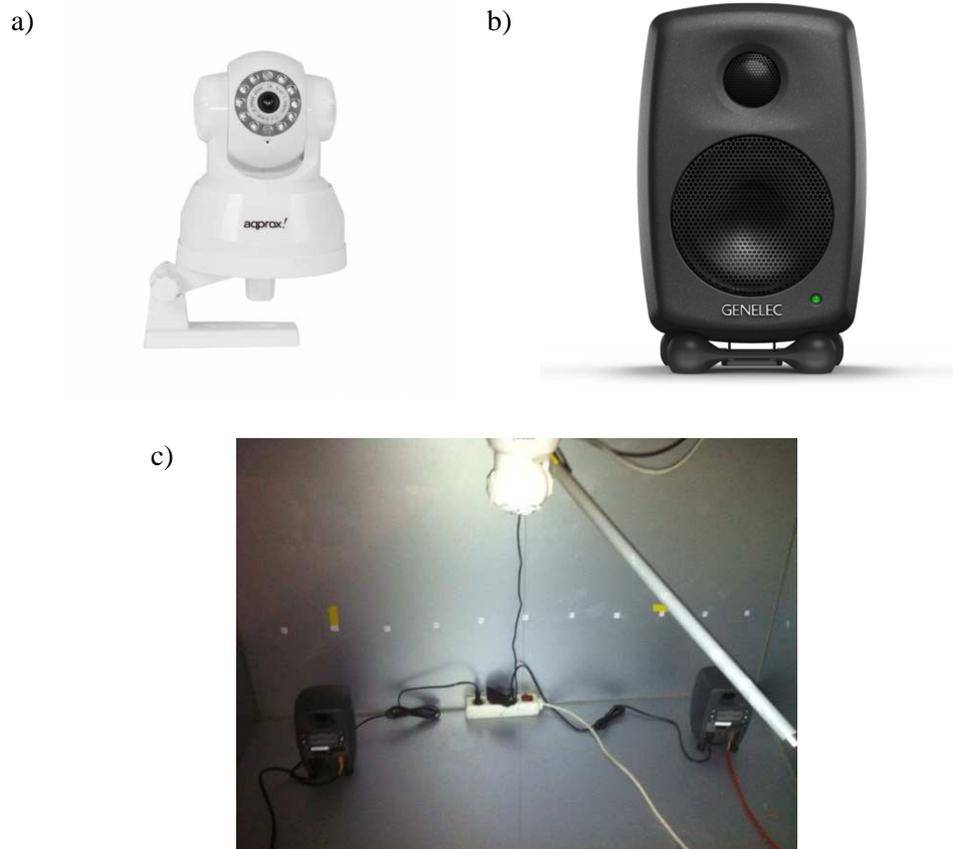


Fig. 14: Webcam con motor de rotación incorporado (a), altavoz Genelec 6010A (b) e interior del recinto de ensayo con el sistema automatizado y los emisores fijos instalados (c).

Al cambiar las cuatro posiciones de fuente que definimos inicialmente, por tan sólo dos, debemos incrementar el número de puntos de medición para llegar al mínimo exigido por norma. Es por esto, y por el recorrido que realiza el micrófono acoplado a la webcam, que debemos definir unos nuevos puntos de medida.

Instalado el sistema para monitorizar los ensayos, realizamos unas primeras mediciones de TR, en una serie de puntos aleatorios. Los resultados obtenidos, con tres materiales diferentes son peores de lo esperado, mostrando unas curvas de absorción con una serie de fluctuaciones a frecuencias medias que antes no se registraban y unos valores que difieren aún más de los resultantes en cámara real.

Esto puede ser debido a la presencia y mayor intensidad de modos propios en los nuevos puntos de recepción, que se encuentran más centrados en la cámara que en las mediciones iniciales. Para solventar este problema, en primer lugar, realizamos un estudio de distribución de presión sonora con un muestreo de 40 puntos de medida para cada emisor, de esta forma seleccionaremos los de

menor desviación típica entre ellos, obteniendo así unos niveles más homogéneos de presión sonora, y en consecuencia, de TR. Los puntos elegidos se distribuyen como ilustra la Fig. 15. Además, se recogen los valores de la desviación típica entre puntos de recepción para cada una de las fuentes en la Tabla 4.

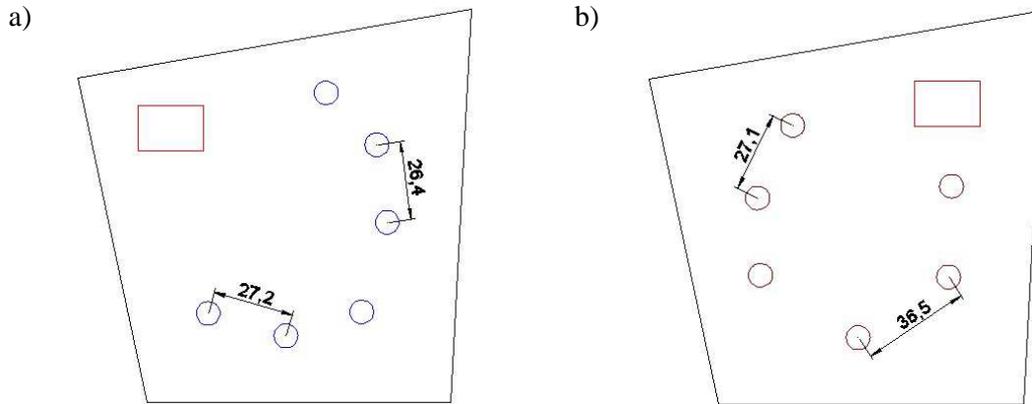


Fig. 15: posiciones de medida para la fuente 1 (a) y para la fuente 2 (b).

Frecuencia (Hz)	Posición de Fuente 1	Posición de Fuente 2
100	2	3.88
125	4.43	5.68
160	5.2	1.87
200	4.59	4.38
250	2	2.51
315	4.31	5.23
400	3.93	5.87
500	2.17	2.23
630	1.93	1.91
800	1.36	1.5
1000	1.35	1.27
1250	1.12	1.15
1600	0.46	1.05
2000	0.83	0.75
2500	0.91	0.68
3150	0.82	0.42
4000	0.77	0.35
5000	0.37	0.43
6300	0.17	0.54
8000	0.57	0.32
10000	0.5	0.25

Tabla 4: Desviación típica de SPL entre puntos de medida para cada emisor.

Como vemos en la tabla 4, en frecuencias medias, al igual que en los ensayos iniciales, existe una gran desviación entre los niveles de presión sonora registrados, en torno a los 2 dBs entre diferentes posiciones, lo que da lugar a las fluctuaciones que observamos en las curvas de absorción de los materiales. Como ya hemos dicho, la posible solución a esto, basándonos en el anexo A de la norma [12] y en el estudio [8], es introducir una serie de difusores colocados aleatoriamente, intentando minimizar el efecto de dichos modos propios al situar superficies de reflexión en el camino que siguen las ondas acústicas, aumentando de este modo las reflexiones y ángulos de incidencia sobre la muestra de ensayo y favoreciendo la difusividad del campo acústico creado.

Cabe señalar que, como se indica en [16], una desviación pequeña entre los niveles de presión sonora distribuidos por toda la sala, no implica que exista una buena difusividad del campo sonoro, ya que no existe una relación directa entre ambos.

IV.2. Diseño, construcción y montaje de los difusores en la cámara reverberante a escala.

Como hemos dicho en el apartado II.3, la norma indica que para mejorar la difusividad del campo sonoro en una cámara reverberante, se debe introducir entre un 15% y un 25 % del área total de la cámara, de superficie de difusión adicional. En la cámara a escala, esto supone un número de difusores muy elevado en comparación con el volumen del interior del recinto, lo que entorpecería la colocación de los elementos de medida y dificultaría la ejecución de los ensayos. Como alternativa, decidimos aplicar el escalado a la superficie de difusión necesaria, de esta forma, debemos introducir entre un 2.5 y 4.2 % de la superficie total de la cámara. Optamos por introducir un 3.5 %, repartida en 5 paneles de diferentes tamaños, los cuales se pueden ver en la tabla 5:

Número de difusor	Dimensiones (m)	Superficie (m ²)	% superficie cámara
1	0.25 x 0.12	0.06	0.89
2	0.12 x 0.12	0.028	0.42
3	0.12 x 0.12	0.028	0.42
4	0.25 x 0.12	0.06	0.89
5	0.20 x 0.12	0.048	0.71
Total		0.226	3.33

Tabla 5: Dimensiones y superficies de los difusores diseñados.

Para su construcción empleamos un tablero de madera de 5 mm de espesor de baja densidad y una absorción inferior al 0.2 en todo el rango frecuencial de interés, como indica la norma. Se

colocan en posiciones aleatorias y a diferentes alturas, sostenidos por pequeños trípodes, de forma provisional. Vemos la apariencia de estos y su disposición en la cámara en la Fig. 16:

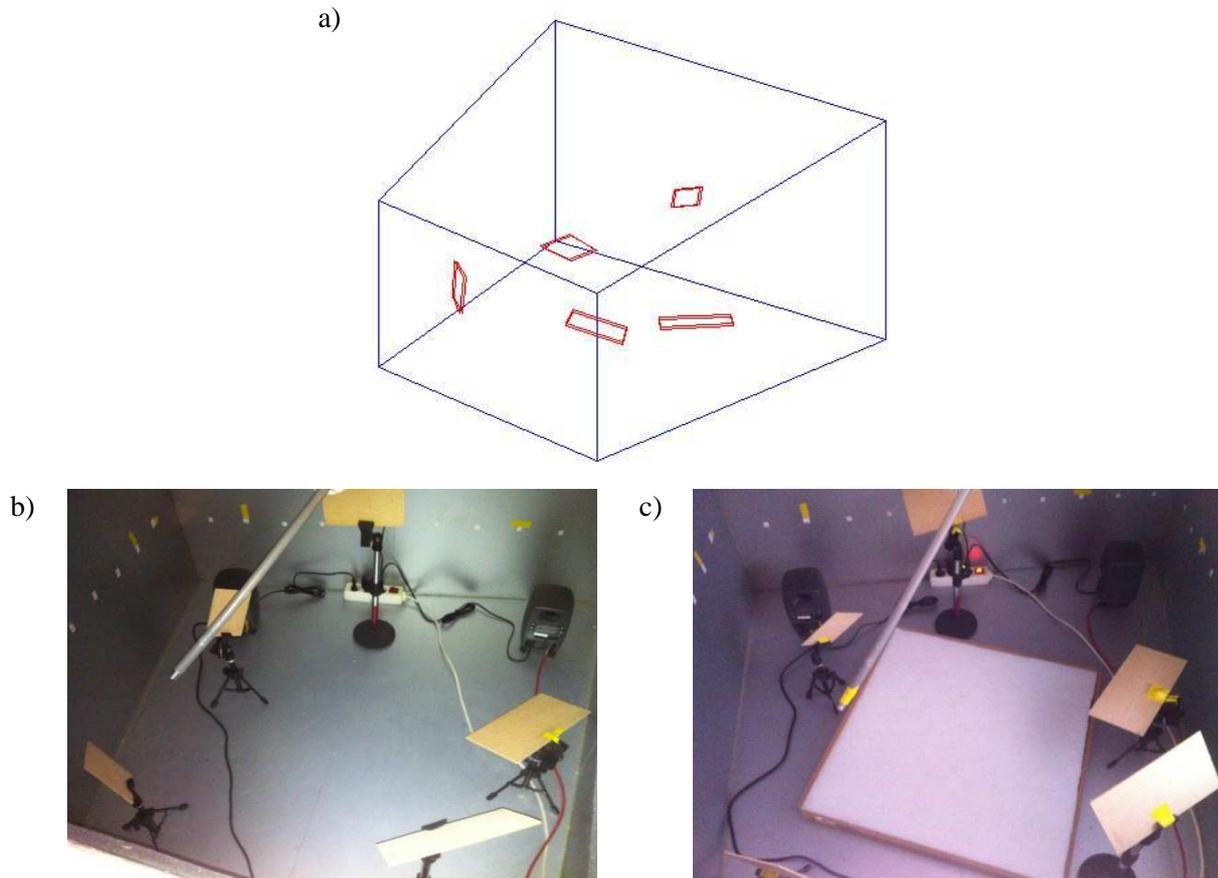


Fig. 16: Esquema (a) e imágenes (b) (c) de la colocación de los difusores en la cámara reverberante a escala.

IV.3. Mediciones de ajuste

Siguiendo las indicaciones de la norma, en unos primeros ensayos, introducimos sólo 3 de los 5 paneles difusores, concretamente el 1, 3 y 5 de la tabla 5, cuya superficie total es de 0.136 m^2 (2.1 % de la superficie total), para observar si existe alguna mejora en relación a la cámara sin superficie adicional. Ensayamos para ello dos de los materiales con los que trabajamos en este estudio, la lana de roca de 80 mm de espesor, cuyo coeficiente de absorción en el rango de frecuencias que va desde 500 hasta 4000 Hz supera el 0,9, requisito impuesto por la norma, y un poliéster, concretamente, el PET I 600/30. Observamos en la Fig. 17(a) unos valores del coeficiente de absorción en frecuencias medias más elevados y sin tantas fluctuaciones como anteriormente, aproximándonos a los resultados reales, así como un ligero realce en alta frecuencia de los mismos. Por su parte, en (b), la lana presenta un suavizado en el rango 500–1000 Hz y al igual que en el caso del PET, la caída a frecuencias altas describe una pendiente más suave, de esta manera, también nos acercamos más a los valores reales que antes. Como resultado, las curvas de absorción

son más planas y cercanas a las ensayadas en cámara grande, lo que nos hace seguir adelante con la introducción de los otros dos difusores diseñados.

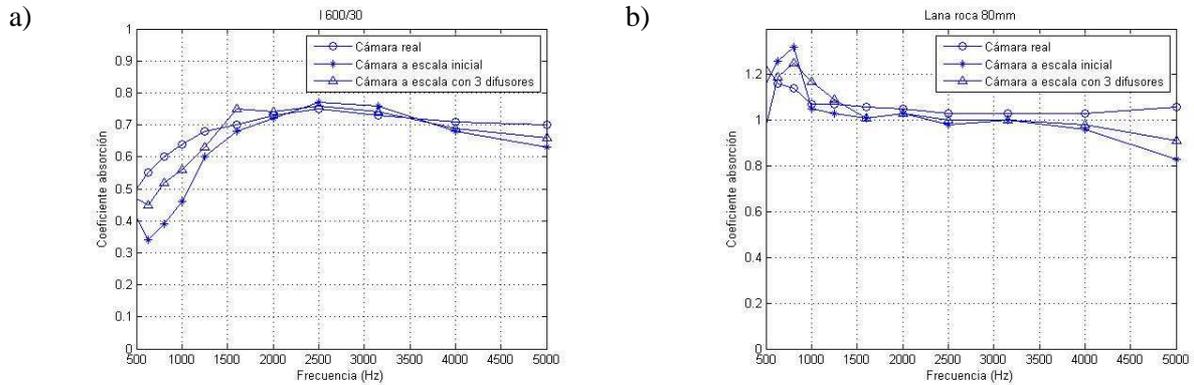
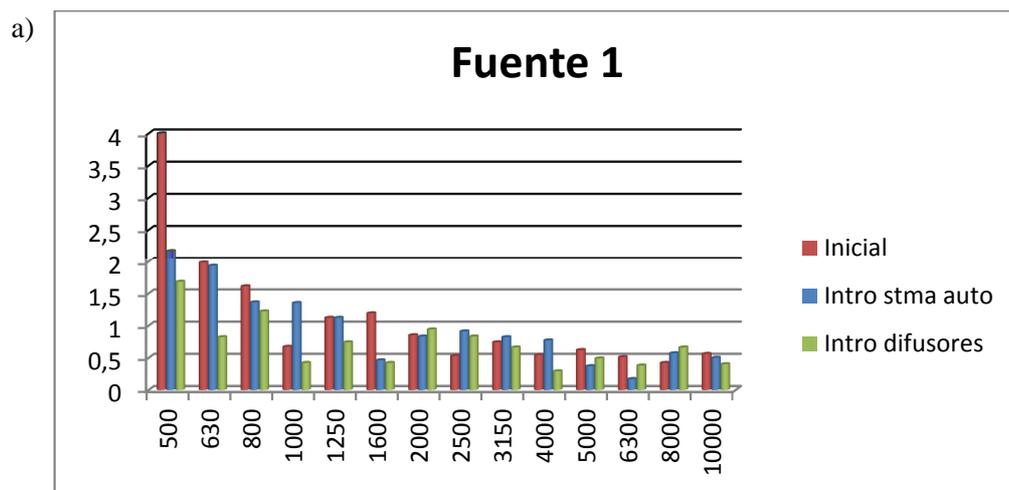


Fig. 17: Comparativa entre el coeficiente de absorción medido en cámara real, en la cámara reverberante a escala inicialmente y en la cámara a escala con 3 difusores, de los materiales I 600/30 (a) y lana de roca de 80 mm de espesor (b).

IV.4. Ensayos de validación

Introducimos finalmente los 5 difusores, con una superficie total de 0.226 m^2 . En primer lugar, realizamos unas medidas de presión sonora en las distintas posiciones de micrófono, para observar si realmente la diferencia de niveles entre los puntos es menor respecto a la ausencia de la superficie de difusión añadida.



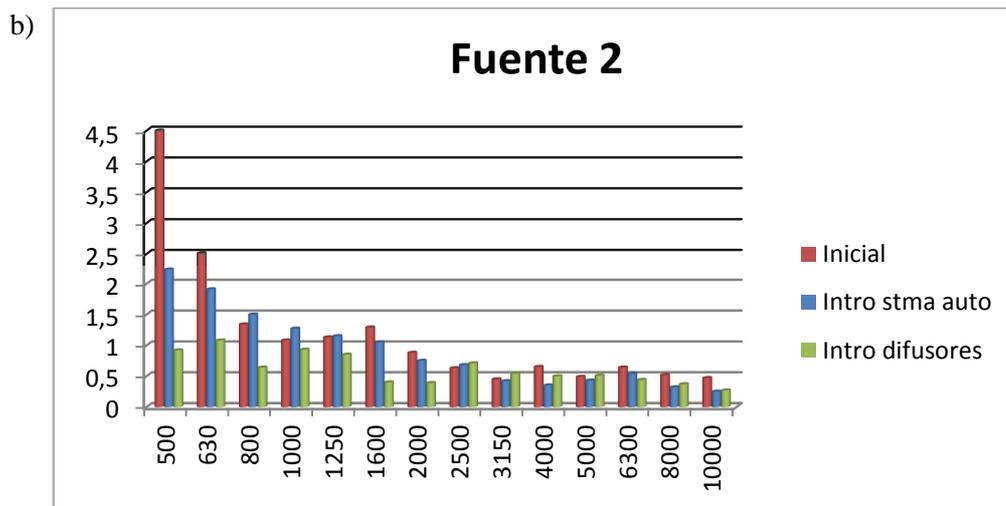


Fig. 18: Desviación típica entre los puntos de medida en los ensayos iniciales, con la introducción de la webcam y con la colocación de difusores, para la fuente 1 (a) y la fuente 2 (b).

Podemos apreciar una mejora significativa para las dos posiciones de fuente especialmente en frecuencias medias, de más de 1 dB en alguna banda, lo que demuestra que existe más homogeneidad en la distribución de la presión sonora en el recinto, pero no por ello una mejor difusividad del campo acústico, de ahí que sea necesario evaluar de algún modo esta característica.

Para cuantificar la difusividad del campo sonoro, existe un parámetro, denominado grado de difusión [8], cuya expresión es la que sigue:

$$Gd = \left| 1 - \frac{|EDT - T20|}{(EDT + T20)/2} \right| \quad (4)$$

Como vemos, este término, relaciona los tiempos de caída más tempranos (EDT) con los de mayor duración (T20). Cuando ambos son muy similares, significa que hay una buena difusividad en el campo acústico, lo que se refleja en valores de Gd muy próximos a 1. Por el contrario, si los tiempos comparados difieren mucho entre sí, el Gd tenderá a 0, lo que significa una pobre difusión.

Para comprobar si existe alguna mejora relativa a esta característica del campo sonoro de la cámara a escala con la instalación de los difusores, se ha calculado el grado de difusión en las condiciones iniciales y tras la implementación de las mejoras. Los resultados, que podemos ver clasificados en la tabla 6, nos muestran como hemos mejorado la difusión en frecuencias medias respecto a las condiciones iniciales, especialmente en 500 Hz y 1 kHz, dos de las bandas más conflictivas. Por el contrario, hay frecuencias en las que existe una peor difusión respecto al estado inicial, pero de todos modos, el Gd se mantiene por encima de 0.89 en todas las bandas de frecuencia medibles en nuestra cámara a escala, es decir, a partir de 500 Hz, lo que indica una buena difusión.

Frecuencia (Hz)	Inicial	Difusores
100	0.18	0.09
125	0.20	0.19
160	0.07	0.42
200	0.61	0.86
250	0.59	0.80
315	0.68	0.91
400	0.80	0.82
500	0.83	0.98
630	0.95	0.98
800	0.92	0.91
1000	0.82	0.89
1250	0.97	0.89
1600	0.96	0.89
2000	0.95	0.94
2500	0.93	0.99
3150	0.95	0.97
4000	0.93	0.98
5000	0.95	1.00

Tabla 6: Grado de difusión de la cámara a escala antes y después de la instalación de los difusores.

Comprobada la mejora en la distribución de niveles de presión sonora y de la difusividad de la cámara, debemos realizar nuevamente los ensayos con todos los materiales seleccionados inicialmente y validar de esta forma el estado y las condiciones actuales de la cámara reverberante a escala. Los resultados, presentes en la Fig. 19, muestran una clara mejora respecto a las gráficas obtenidas inicialmente. Como podemos ver, en los casos de materiales PET, las curvas son más planas; en frecuencias medias, los valores son superiores al caso inicial, acercándonos a los resultados reales, mientras que en alta frecuencia, no experimenta una subida tan abrupta, sino que la curva describe un patrón más suave, y con una forma más cercana a la real. En el caso particular de las lanas, que son los materiales más propicios para estudiar la mejora de la difusión, como indica el anexo A de la norma ($\alpha \geq 0.9$ en todas las bandas frecuenciales comprendidas entre 500 - 4000), no se observa una caída abrupta a partir de 3150 Hz, como ocurría antes, sino que mantiene una forma más plana en todo el espectro, definiendo una curva muy próxima a la deseada.

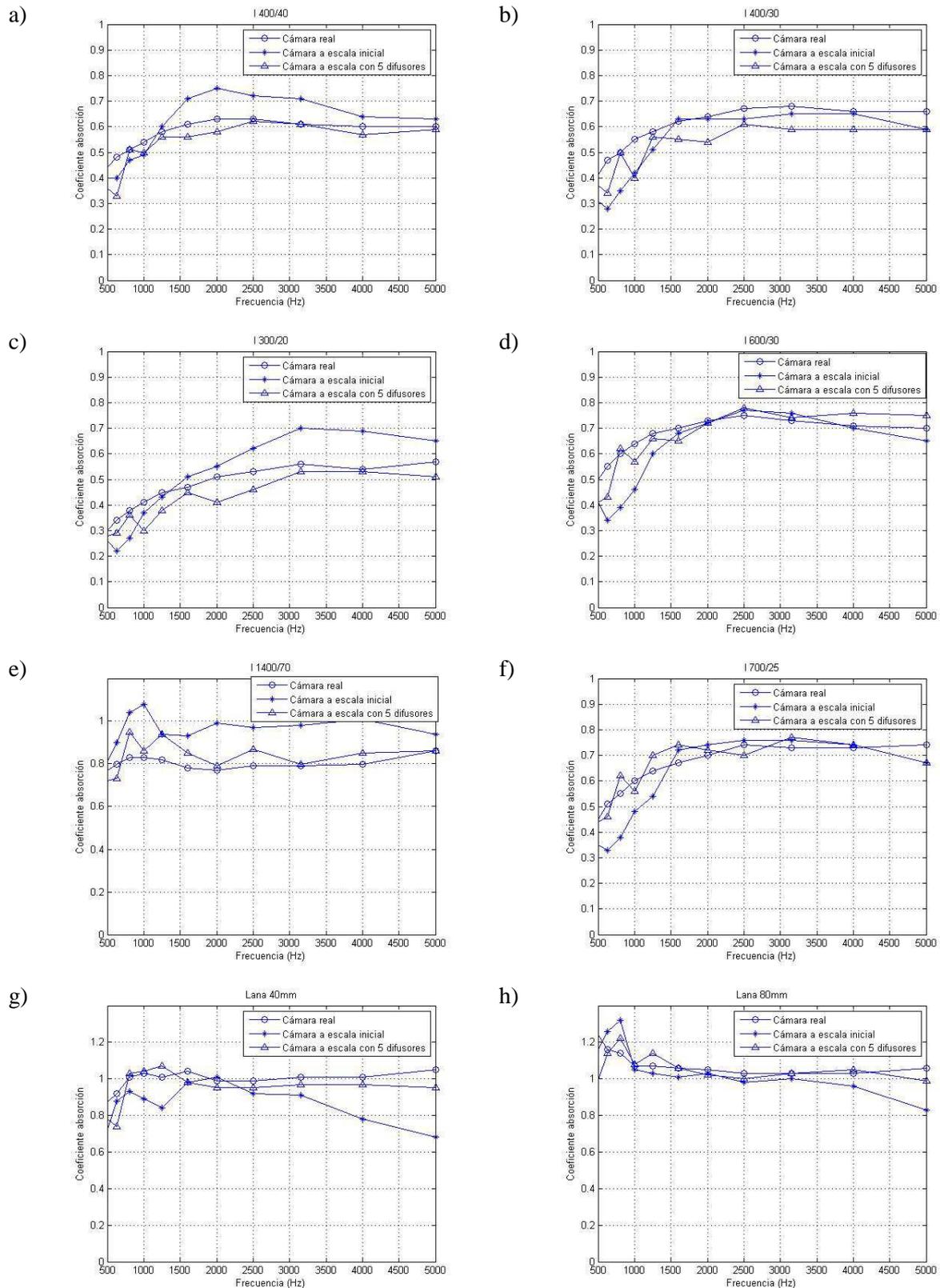


Fig. 19: Comparativa entre el coeficiente de absorción medido en cámara real y el medido en cámara a escala inicialmente y con los 5 difusores, de los materiales sometidos a estudio.

IV.5. Coeficiente de absorción sonora ponderado (α_w) según norma UNE-EN ISO 11654:1997

Existen varias formas de expresar el coeficiente de absorción acústica de un material. Hasta ahora hemos presentado todos los resultados en tercios de octava, pero la norma UNE-EN ISO 11654:1997 [11] indica las pautas a seguir para la obtención de un único valor de α independiente de la frecuencia, a partir de las mediciones por bandas de tercios de octava de acuerdo con la norma UNE-EN ISO 354:2004[12]. Este parámetro se denomina coeficiente de absorción sonora ponderado, α_w , y su cálculo se explica brevemente a continuación:

1. A partir del coeficiente de absorción obtenido según la norma [12], se calcula el coeficiente de absorción sonora práctico α_{pi} para cada banda de octava i , a partir de la media aritmética de los tres valores de tercios de octava correspondientes a esa octava.
2. Se utilizan los valores de α_{pi} para calcular el coeficiente de absorción sonora ponderado α_w a partir de la curva de referencia ilustrada en la norma [11]. Se realiza una translación de la curva de referencia en pasos de 0.05 hacia el valor medido hasta que la suma de las desviaciones desfavorables sea menor o igual a 0.10. Se produce una desviación desfavorable a una frecuencia concreta cuando el valor medido es menor que el valor de la curva de referencia. Deben tenerse en cuenta sólo las desviaciones en el sentido desfavorable. La absorción acústica ponderada α_w se define como el valor de la curva de referencia desplazada a 500 Hz.

Coeficiente de absorción sonora ponderado		
Material	Cámara "real"	Cámara a escala
I 400/40	0.49	0.48
I 400/30	0.53	0.46
I 300/20	0.38	0.35
I 600/30	0.54	0.58
I 1400/70	0.80	0.79
I 700/25	0.58	0.59
Lana 40 mm	0.95	0.88
Lana 80 mm	1.11	1.05

Tabla 7: Relación entre el $\bar{\alpha}$ medido en cámara grande y en cámara a escala.

Como vemos, el α_w es muy semejante en ambos casos, encontrándonos con diferencias inferiores al 0.10. Por lo tanto, podemos decir que el coeficiente de absorción medio, en el margen frecuencial que nos permite medir la cámara reverberante a escala, es válido.

IV.6. Propuesta de corrección del coeficiente de absorción

A pesar de la mejora de los resultados, las curvas de absorción siguen presentando ciertas fluctuaciones en las bandas de 500 – 1000 Hz en comparación con el coeficiente de absorción medido en la cámara reverberante de dimensiones reales, el cual describe un trazado más plano y “limpio”. Es por esto que, basándonos en [5], decidimos realizar una propuesta de corrección del coeficiente de absorción obtenido en cámara a escala, a partir de los resultados obtenidos en la cámara “real”, para conseguir una respuesta más plana.

Para ello, se enfrentan gráficamente los valores reales con los obtenidos en el recinto de menores dimensiones en cada tercio de octava, y aplicando una regresión polinómica de 2º grado, obtenemos una serie de expresiones que aproximan los valores de alfa medidos en cámara a escala a los reales. De esta forma, con el ábaco de corrección que se ilustra en la Fig. 20, se mejora el valor estimado del coeficiente de absorción con una simple multiplicación del valor obtenido en la cámara a escala:

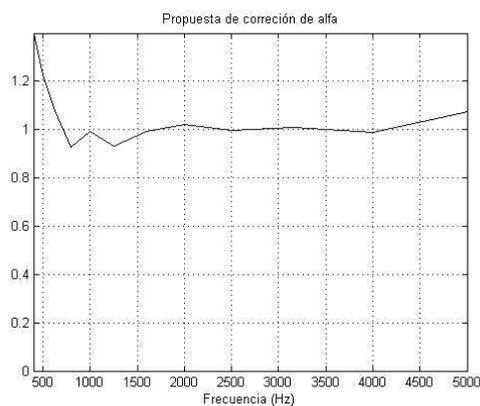


Fig. 20: Ábaco de corrección de alfa propuesto.

Como vemos, se obtiene un realce significativo en frecuencias medias, que aumentará el valor de alfa en este rango, ya que como se observa en los resultados, los valores del coeficiente de absorción en estas frecuencias es ligeramente inferior al medido en cámara real. Por otra parte, también existe un leve aumento entre 4 y 5 kHz, ya que en los resultados obtenidos existe una cierta caída en estas frecuencias. Aplicamos esta corrección a dos de los materiales que hemos usado a lo largo de este trabajo, pero que no se han incluido en los cálculos de la corrección, concretamente el I 400/30 y el I 300/20. Vemos en la Fig. 21 como el coeficiente de absorción corregido se aproxima de forma sustancial, especialmente en el rango de media frecuencia, a los valores reales en comparación con las curvas a las que no se aplica dicha corrección.

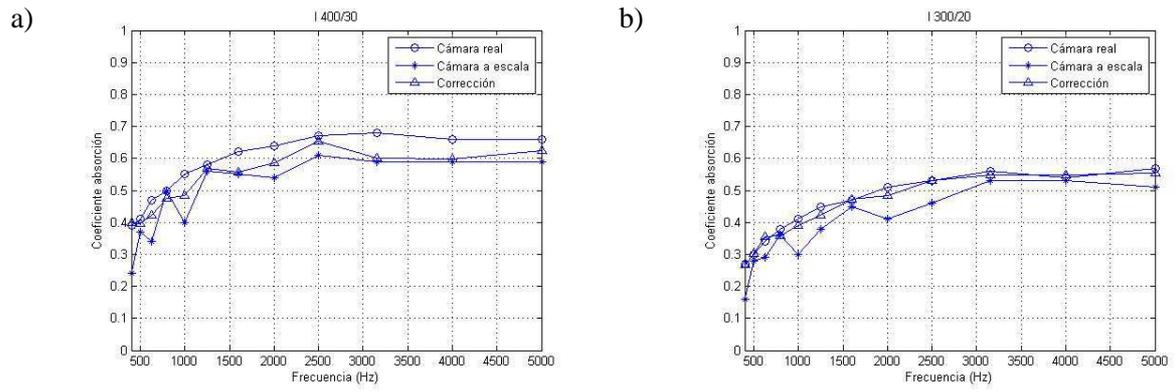


Fig. 21: Comparativa entre el coeficiente de absorción corregido y sin corregir del material I400/30 (a) y del I 300/20 (b).

V. Conclusiones

En la redacción de este trabajo se presenta detallada y ordenadamente todo el proceso realizado para la caracterización inicial de la cámara reverberante a escala diseñada y fabricada en la EPSG en el año 2011, así como las propuestas e implementación de las mejoras pertinentes.

En primer lugar, se ha llevado a cabo, entre otros, un estudio de distribución de niveles de presión sonora, tiempo de reverberación y absorción de la cámara vacía, difusividad del campo acústico, determinación del coeficiente de absorción de una serie de materiales y el patrón acústico que describe la cámara.

La realización de los ensayos, inicialmente, exigía una gran inversión de tiempo y esfuerzo, debido a la necesidad de acceder físicamente al interior de la cámara a través de la compuerta situada en su parte superior, para cambiar las posiciones de micrófonos y fuente. La medida correctora propuesta consistía en la instalación de algún tipo de sistema automatizado para realizar el desplazamiento de los elementos de medida desde el exterior de la cámara, sin necesidad de acceder al interior durante todo el proceso de medición. Para ello, nos valemos de una webcam con infrarrojos (debido a la poca visibilidad en la cámara cerrada) y motor rotatorio incorporado, controlada por IP y mediante un sencillo software, a la que se ha implementado un “brazo” donde acoplar el micrófono de medida. Sin acceder al recinto, podemos controlar el interior en tiempo real y simultáneamente desplazar el micrófono a las diferentes posiciones. Además, se fijan dos posiciones de fuente, evitando así el desplazamiento de las mismas.

De este modo, hemos conseguido automatizar y acelerar el proceso de realización de los ensayos notablemente, una de las mayores deficiencias de la cámara a escala y uno de los principales objetivos marcados en este trabajo.

Por otro lado, las mediciones del tiempo de reverberación de la cámara vacía y con muestra utilizadas para el cálculo del coeficiente de absorción de materiales presentan una serie de anomalías ya descritas que deben ser subsanadas. Para ello se han seguido las instrucciones definidas en el anexo A de la norma UNE ISO 354-2004 [12] y ya implementadas en otro trabajo llevado a cabo en esta escuela [8], con satisfactorio resultado. Como hemos dicho en el apartado IV.2, se decide particularizar este anexo en relación con la proporción de superficie de difusión que se debe introducir en la cámara, ya que la indicada por la norma era excesiva de acuerdo con las características del recinto. Tras aplicar el factor de escala 1:6 a la cantidad de superficie de los difusores, se ha introducido un 3.33% de la superficie total de la cámara, aportando la mejora necesaria para que las caídas del tiempo de reverberación de la sala sean más planas y por consiguiente, el coeficiente de absorción hallado a frecuencias medias y altas sea lo más próximo, dentro de lo posible, al medido en las condiciones indicadas por la norma.

Podemos decir, por lo tanto, que tras la realización de este trabajo, se ha conseguido que la cámara reverberante a escala 1:6 sea un laboratorio acústico en el que poder determinar, con cierta fiabilidad, el coeficiente de absorción a media y alta frecuencia de diferentes materiales, reduciendo en gran medida, el tiempo y esfuerzo necesarios en la realización de los ensayos respecto a su estado inicial y el costo en relación con una cámara reverberante de dimensiones y volumen acordes con la normativa vigente.

VI. Futuras líneas de investigación

A pesar de las mejoras conseguidas, aún existe un amplio margen de estudio de la cámara reverberante a escala, que no se ha realizado en este trabajo por motivos de tiempo o disposición de material.

Uno de los objetivos de la cámara es la capacidad de caracterizar, en cuanto a su coeficiente de absorción, pantallas acústicas, ya que su rango frecuencial de actuación suele ser el de medias y altas frecuencias. Disponemos de una serie de pantallas, con diferentes tamaños y tipos de perforado, de unas dimensiones reducidas, 0.75 x 0.4 m, las cuales se han caracterizado inicialmente, con diferentes materiales en su interior, pero que no se han incluido en esta memoria. El motivo es que no disponemos de este mismo tipo de pantallas a gran escala para poder caracterizarlas en la cámara grande y realizar las comparativas necesarias entre los resultados. Sería de gran interés llevar a cabo estos ensayos ya que el comportamiento de los materiales absorbentes puede ser muy distinto al de las pantallas acústicas.

De la misma forma, se sugiere utilizar materiales de diferentes composiciones y características, ya que como hemos visto, el comportamiento de los materiales PET y las lanas de roca difieren entre sí, o, concretamente en el caso del I 1400/70, el patrón que define no es el mismo que en los demás materiales, algo que puede estar influenciado por alguna propiedad física como la densidad, a las que no se puede aplicar el escalado.

Otro aspecto interesante que no se ha llegado a estudiar en este trabajo, y que es una de las finalidades más comunes de una cámara reverberante, es la realización de ensayos para la determinación de la potencia acústica de fuentes, siguiendo las condiciones impuestas por la norma UNE ISO 3741:2011 [13]. A pesar de haber mejorado la distribución de los niveles de presión sonora en el recinto y la difusividad del campo acústico, no sabemos cómo se comporta la cámara en este tipo de ensayos.

Aunque los resultados obtenidos con el equipo de medida utilizado son satisfactorios, sería muy interesante, aunque quizás demasiado complejo debido a su reducido tamaño, la construcción de una fuente de ruido omnidireccional a escala, que mejoraría la calidad de los ensayos.

Como aspecto estético, pero que posiblemente implique una mejora considerable en la difusividad del campo sonoro, también se propone la realización de los difusores en otro material como puede ser el metacrilato, de características más reflectantes y maleables, y una instalación más acorde eliminando los trípodes y suspendiendo los difusores del techo de la cámara, como indica la norma [12].

En muchas ocasiones, es interesante hacer uso de herramientas de software con las que, a partir de simulaciones de fenómenos acústicos, poder obtener resultados aproximados de una situación real, bien sea por no poder implementar o recrear dicha situación, o bien por hacernos una idea de lo que ocurrirá antes de llevar a cabo el ensayo o experimento. Aunque nosotros no hemos recurrido a ninguna herramienta de este tipo durante todo el estudio, hemos realizado un diseño en CATT Acoustic v8.0 de la cámara reverberante a escala con los difusores correctamente distribuidos. La finalidad es conseguir un modelo de la cámara calibrado a partir de los resultados finales que se han logrado en este trabajo. Utilizamos el coeficiente de absorción de las superficies de la cámara hallado con los TR medidos en cámara vacía, de esta forma definimos las condiciones reales de absorción de la cámara. Una vez tengamos el modelo calibrado, definimos un nuevo plano a modo de material a caracterizar, de las dimensiones de una muestra de ensayo y lo situamos en la misma posición. La idea es que, al introducir los valores del coeficiente de absorción de un material dado por el fabricante o medido en otras condiciones, como puede ser en un tubo de Kundt, los tiempos de reverberación calculados deben ser muy similares a los que se midan in situ en la cámara a escala. De este modo se puede tener una idea aproximada del valor del coeficiente de absorción medido en una cámara reverberante a partir de la simulación de nuestro modelo.

Para comprobar su correcta calibración, hemos introducido los valores de α de la lana de roca Rockwool de 40 mm de espesor medidos en la cámara reverberante de la EPSG y se han comparado los TR simulados con los medidos en la cámara a escala. Existe una gran similitud entre ambos resultados, pero esto no nos da la certeza de que nuestro modelo pueda reproducir con precisión casos reales, ya que las condiciones de ensayo son muy similares, pues aun trabajando en recintos de diferente volumen, se realiza el cálculo de α en incidencia aleatoria.

Para demostrarlo, a continuación se puede observar un gráfico en el que aparecen representados los valores de TR medidos in situ en la cámara a escala, y los obtenidos mediante la simulación de cámara vacía, así como de estos mismos con la muestra de ensayo, Fig. 22 (a). Además, en la gráfica (b), se ilustra el coeficiente de absorción medido y el resultante de la simulación. Las curvas describen la misma caída y los valores son prácticamente iguales, pero como ya se ha dicho, esto no nos da la certeza de que nuestro modelo de simulación sea tan preciso con otros datos de entrada calculados en condiciones diferentes.

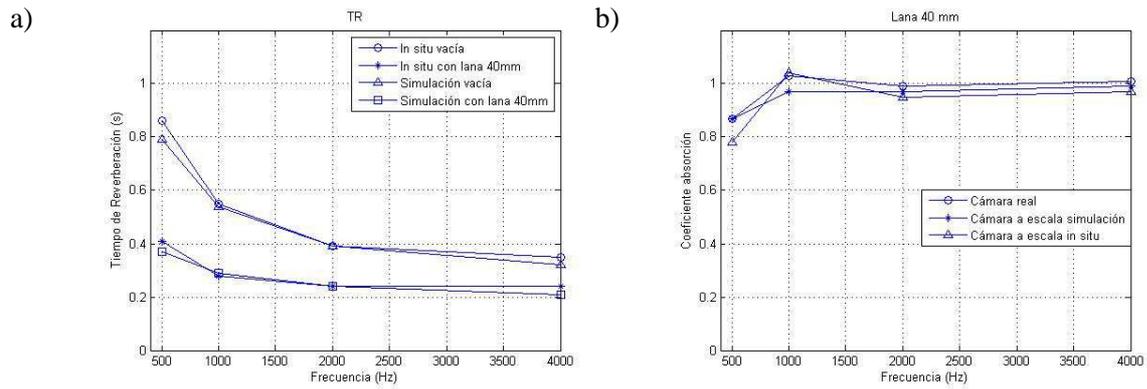


Fig.. 22: Tiempos de reverberación medidos in situ con cámara vacía y muestra de lana de 40 mm de espesor y sus correspondientes simulaciones (a) y comparativa entre el coeficiente de absorción del mismo material medido en cámara grande, en cámara a escala y calculado mediante simulaciones en CATT (b).

Se propone seguir trabajando en este modelo para reproducir con fiabilidad el comportamiento de la cámara a escala en futuras simulaciones.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mis directores de este TFM, Jesús Alba Fernández y Romina Del Rey Tormos, el haberme respaldado desde el principio y darme libertad para trabajar a mis anchas.

A mis compañeros Laura Bertó y Carlos Hervás, que me han echado una mano siempre que lo he necesitado.

A Fernando Hernández, por sus ideas y soluciones para todo.

A todos mis compañeros del máster, con los que he vivido una gran experiencia y han ayudado a que este año haya sido tan positivo.

A mis padres, porque me lo han dado todo y lo siguen haciendo.

A mi novia, Sabela, por apoyarme siempre y aguantarme durante todos estos años.

Y a mis amigos, porque con el paso de los años y la distancia aprecio más las risas que nos echamos juntos.

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] C. De la Colina, R.M. Rodríguez, F. Simón, J. Pfrezschner, A. Moreno, *Caracterización actualizada de la cámara reverberante del Instituto de acústica del CSIC*. Tecniacústica Madrid. 2000.
- [2] C.H. Villarroel González, A.J. Martins Soares. *Mediciones en una cámara reverberante, modelo escala 1:10*. Junio 1985.
- [3] C. Prieto Gajardo, J.M. Barrigón Morillas, R. Vílchez-Gómez, V. Gómez Escobar, G. Gozalo Rey, F.J. Carmona del Río. *Acondicionamiento de la cámara reverberante de la universidad de Extremadura*. VIII Congreso Ibero-americano de Acústica, Évora, 2012.
- [4] D. Lubman. *Traversing microphone spectroscopy as a means for assessing diffusion*. J. Acoust. Soc. Am. Volume 56, Issue 4, pp. 1302-1304, 1974.
- [5] D. Mateus, A. Marinho, A. Pereira. *Aplicabilidade da fórmula de Sabine a espaços com elevada absorção sonora: Proposta de prévia correção de coeficientes de absorção*. VIII Congreso Ibero-americano de Acústica, Évora, 2012.
- [6] F. Arrebola Ballesteros. Trabajo Final de Máster. *Construcción de una cámara reverberante a escala para el estudio de pantallas acústicas*. Escuela Politécnica Superior de Gandía, Septiembre 2011.
- [7] F.B. Gallegos Guzmán, D.X. Montalvo Echeverría. Proyecto final de carrera. *Diseño de una cámara anecoica y una cámara reverberante*. Escuela Politécnica Nacional de Quito, Diciembre 2008.
- [8] F. Hernández García. Trabajo Final de Máster. *Mejora de la difusión acústica de la cámara reverberante del Campus de Gandía de la UPV*. Escuela Politécnica Superior de Gandía, Septiembre 2012.
- [9] L. Torres Quevedo; A. Pérez-López. *Diffusivity characteristics of the acoustic field in the reverberant room at the C.I.F.* 5e Congress International d'Acoustique. Liège 1965.
- [10] Norma ASTM C423-09a: Standard Test Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by the Reverberation Room Method
- [11] Norma UNE-EN ISO 11654:1998. Acústica. Absorbentes acústicos para su utilización en edificios. Evaluación de la absorción acústica.
- [12] Norma UNE-EN ISO 354:2004. Acústica. Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante.
- [13] Norma UNE-EN ISO 3741:2010. Acústica. Determinación de los niveles de potencia acústica y de los niveles de energía acústica de las fuentes de ruido a partir de la presión acústica. Métodos de laboratorio en cámaras reverberantes.

[14] Norma UNE-EN ISO 3747:2010. Acústica. Determinación de los niveles de potencia acústica y de los niveles de energía acústica de las fuentes de ruido utilizando la presión acústica. Métodos de ingeniería/peritaje para la utilización in-situ en un entorno reverberante.

[15] R. del Rey, J. Alba, J. Ramis, V. J. Sanchís. *Nuevos materiales absorbentes acústicos obtenidos a partir de restos de botellas de plástico*. Materiales de Construcción, Vol 61, No 304, 2011.

[16] R.H. Lyon. *Needed: a new definition of diffusion*. J. Acoust. Soc. Am., Vol 56, No 4, p.1300-1302, Octubre 1974.