

## ACONDICIONAMIENTO DE LA CÁMARA REVERBERANTE DE LA UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA

**Prieto Gajardo, C.; Barrigón Morillas, J.M.; Vílchez-Gómez, R.; Gómez Escobar, V.; Rey  
Gozalo, G.; Méndez Sierra, J.A.; Carmona del Río, F.J.**

Laboratorio de Acústica, Departamento de Física Aplicada, Universidad de Extremadura  
Avda. de la Universidad, s/n, Cáceres, 10003 (SPAIN). Tel.: +34 927 25 71 95. Fax: +34 927 25 72 03.  
{E-mail: [barrigon@unex.es](mailto:barrigon@unex.es)}

### Resumen

En los procesos de emisión, propagación y recepción de la presión sonora, el tipo de campo acústico en el que ocurren dichos procesos tiene una gran influencia y repercusión. Por ello, desde hace varias décadas, las normativas y teorías referentes a los campos acústicos difusos han sufrido importantes avances, desarrollando y aportando nuevas y más fundamentadas técnicas para la medida del grado de difusión de un recinto concreto, permitiendo así a las empresas obtener un valor adecuado de absorción acústica en sus productos.

En el presente estudio, se muestra el proceso de caracterización del campo sonoro (mediante múltiples configuraciones de ensayo) de la cámara reverberante de la universidad de Extremadura, con el fin de validar y cumplir con las exigencias de las actuales normas para la medición de los coeficientes de absorción en laboratorio (UNE-EN ISO 354:2004) y alcanzar, por consiguiente, grados suficientes de aproximación a la situación ideal de difusión.

**Palabras-clave:** Cámara reverberante, difusividad, campo sonoro, UNE-EN ISO 354:2004, absorción.

### Abstract

In the processes of emission, propagation and reception of sound pressure, the type of sound field in which these processes occur has a strong influence and impact. Therefore, for decades, regulations and theories concerning diffuse sound fields have made important advances, developing and providing new and more informed techniques for measuring the degree of diffusion of a specific enclosure, allowing companies to obtain an appropriate value of sound absorption in their products.

The present study shows the characterization process of the sound field (through multiple test configurations) of the reverberation room of the University of Extremadura, in order to validate and meet the requirements of current standards for measuring sound absorption coefficients (UNE-EN ISO 354:2003) and achieve, therefore, sufficient degrees of approximation to the ideal of diffusion.

**Keywords:** Reverberation room, diffusivity, sound field, UNE-EN ISO 354, absorption.

**PACS no. 43.55.Nd<sup>1</sup>**

---

<sup>1</sup> Reverberation room design: theory, applications to measurements of sound absorption, transmission loss, sound power.

## **1 Introducción**

La creciente preocupación por la calidad de vida en la sociedad europea y la constante demanda de soluciones al incesante problema derivado de la contaminación acústica en las ciudades, han ido generando con los años una serie de documentos, normativas y directrices de carácter nacional y europeo [1-3] con el fin de proteger la salud de las personas frente a las molestias y enfermedades que el ruido puede causar. Por todo ello, los fabricantes de materiales y soluciones constructivas se interesan cada vez más en desarrollar y caracterizar nuevos productos con el fin de satisfacer estas exigencias legislativas.

De este modo y para poder ser considerados los datos como válidos y referentes en un mercado global, los resultados deberán obtenerse a partir de estudios realizados en cámaras de ensayos acústicos normalizadas; por ello, en el presente trabajo se describirá el protocolo de validación, utilizando las normas UNE-EN ISO 354:2004 [4], UNE-EN ISO 3741:2000 [5] y UNE-EN ISO 3740:2001 [6] para que la cámara reverberante de la Universidad de Extremadura cumpla con los requisitos establecidos.

### **1.1 Proceso de verificación y cumplimiento**

Tras un período de más de dos años de construcción, la cámara reverberante del edificio del Laboratorio de Acústica fue entregada a finales del 2009. En un primer estudio de caracterización de la cámara [7], realizado durante el año 2010 y presentado en el 41º Congreso Nacional de Acústica y 6º Congreso Ibérico de Acústica celebrado en León, se analizaron diferentes parámetros acústicos: como el tiempo de reverberación, la distribución del campo sonoro y difusividad, los modos de resonancia, la absorción, etc., concluyendo que la cámara reverberante del Laboratorio de Acústica de la universidad de Extremadura cumplía con gran parte de las especificaciones de carácter constructivo mencionadas en la normativa (volumen, forma, superficie, longitud del segmento mayor, ruido de fondo, etc.), pero en lo relativo al campo sonoro existente en la cámara se comprobó que, a bajas frecuencias, la distribución del nivel de presión sonora no presentaba uniformidad y tanto el tiempo de reverberación como la absorción no se comportaban de acuerdo a las pautas que especifica la norma para este tipo de cámaras y ensayos.

Por ello, el presente estudio trata de caracterizar el campo sonoro (mediante múltiples configuraciones de ensayo y materiales) de la cámara reverberante de la Universidad de Extremadura, con el fin de corregir los problemas de difusividad y absorción (mencionados anteriormente) dentro del recinto y así cumplir con las exigencias de las actuales normas para la medición de los coeficientes de absorción y la potencia acústica en laboratorio alcanzando por consiguiente, grados suficientes de aproximación a la situación ideal de difusión.

## **2 Características de emplazamiento y diseño de la cámara reverberante**

A continuación, en la Tabla 1 y en las Figuras 1 y 2, se muestran algunas de las características más significativas de emplazamiento y diseño de la cámara reverberante estudiada, ubicada en el campus de la Universidad de Extremadura de la ciudad de Cáceres. Su forma, volumen, ubicación, proporción lineal, etc., responden satisfactoriamente a todas las pautas establecidas en las normas mencionadas anteriormente para este tipo de salas.

Ciudad	Localización geográfica	Campus UEx	Coordenadas GPS Latitud - Longitud	Temperatura anual mínima media máxima [°C]	Media de precipitación anual Total -máx./día [mm]	Datos promediados desde
<b>CÁCERES</b> 93.131 hab. 13,27 km <sup>2</sup> 7018,16 hab./km <sup>2</sup>	Avda. Universidad s/n	Escuela Politécnica	39,478499 -6,341650	10,66 16,23 21,80	48,00 - 16,96	1982-2011

Tabla 1 – Ubicación y datos meteorológicos [8] de la cámara reverberante de la UEx



Figura 1 – Vista aérea de la Escuela Politécnica de la Universidad de Extremadura en el campus de Cáceres. Se ha marcado la situación de las cámaras reverberante y de transmisión.

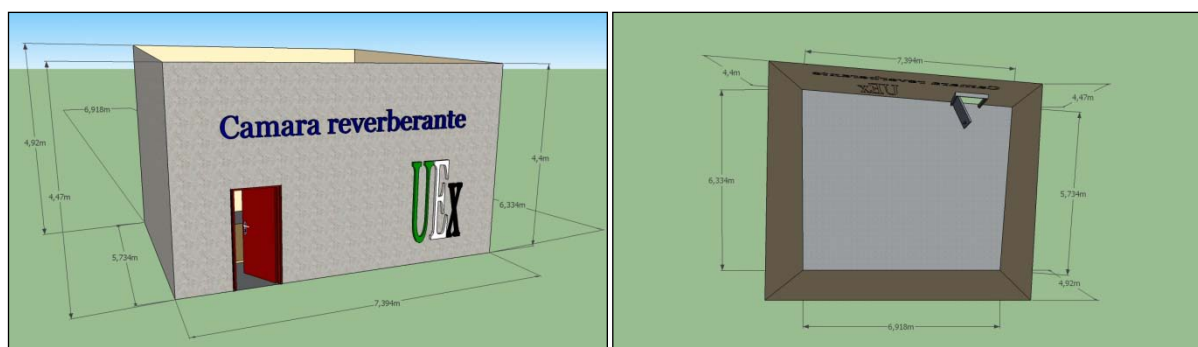


Figura 2 – Diseño y características constructivas de la cámara

### 3 Metodología empleada

#### 3.1 Instrumentación y condiciones

Para la adecuada obtención de los parámetros acústicos bajo estudio y de acuerdo a lo establecido en las normas de referencia, la instrumentación empleada (verificada y calibrada) en el laboratorio fue:

**Analizador:** PULSE Type 3160-A-042 de Brüel & Kjær

**Micrófono:** Trans. prepolarizado Type 4942-A-021 de B&K

**Fuente de sonido:** Omnipower Source Type 4292-L de B&K

**Etapla de potencia:** Power Amplifier Type 2734 de B&K

**Calibrador:** Acoustic Calibrator Type 4226 de B&K

**Estación meteorológica:** Davis Instruments Vantage Pro2

Así mismo, las condiciones de medida presentes en los ensayos (temperatura y humedad relativa, rango de frecuencias, métodos de cálculo y precisión, nº de micrófonos y posiciones, etc.) fueron comprobadas para que cumpliesen con todos los requisitos mencionados en la norma UNE-EN ISO 354.

Para garantizar la reproducibilidad (apartado 8.2.3 [4]) y repetibilidad de los ensayos (apartado 8.2.2 [4]) según indica también la norma UNE-EN ISO 20140-2 [9], se realizaron varias y repetidas pruebas con diferentes métodos de adquisición, operarios, condiciones de medida, patrones de referencia, configuraciones micrófono-altavoz, etc. En la Tabla 2 y Figura 3 se muestran, para tres configuraciones (0, 2 y 7 difusores), los resultados del tiempo de reverberación obtenidos con distinta instrumentación (Symphonie de 01-dB, Sonómetro 2260 y Analizador PULSE de Brüel & Kjær).

Nº difusores	0					2					7				
	Método Fuente	Symp. Nº 2	2260 Nº 2	PULSE Nº 3	Prom	Desv	Symp. Nº 1	PULSE Nº 3	Prom.	Desv.	Symp. Nº 2	2260 Nº 2	PULSE Nº 3	Prom.	Desv.
100		23,9	24,5	22,9	23,8	0,8	23,1	22,2	22,7	0,6	17,9	18,6	16,3	17,6	1,2
<b>125</b>		<b>19,2</b>	<b>18,5</b>	<b>18,9</b>	<b>18,8</b>	<b>0,4</b>	<b>18,7</b>	<b>16,6</b>	<b>17,7</b>	<b>1,5</b>	<b>14,5</b>	<b>12,8</b>	<b>14,0</b>	<b>13,8</b>	<b>0,9</b>
160		16,7	15,8	16,2	16,2	0,5	14,3	14,3	14,3	0,0	13,1	12,4	12,8	12,7	0,3
200		16,3	15,0	15,9	15,7	0,6	13,4	12,8	13,1	0,5	11,2	9,7	11,6	10,8	1,0
<b>250</b>		<b>15,6</b>	<b>14,5</b>	<b>15,4</b>	<b>15,2</b>	<b>0,6</b>	<b>12,6</b>	<b>14,1</b>	<b>13,4</b>	<b>1,0</b>	<b>10,1</b>	<b>9,3</b>	<b>13,0</b>	<b>10,8</b>	<b>2,0</b>
315		14,3	13,3	14,8	14,1	0,8	13,3	13,9	13,6	0,4	11,2	10,6	13,1	11,7	1,3
400		13,2	12,0	13,4	12,9	0,7	12,5	12,7	12,6	0,2	11,2	10,3	12,2	11,2	1,0
<b>500</b>		<b>12,0</b>	<b>10,5</b>	<b>12,3</b>	<b>11,6</b>	<b>0,9</b>	<b>11,5</b>	<b>11,5</b>	<b>11,5</b>	<b>0,0</b>	<b>10,1</b>	<b>9,6</b>	<b>10,6</b>	<b>10,1</b>	<b>0,5</b>
630		10,2	9,3	11,0	10,2	0,8	10,4	10,3	10,4	0,1	9,3	8,6	10,0	9,3	0,7
800		8,8	8,1	9,4	8,8	0,7	9,0	9,1	9,0	0,0	8,1	7,6	8,9	8,2	0,7
<b>1000</b>		<b>7,9</b>	<b>7,6</b>	<b>8,9</b>	<b>8,1</b>	<b>0,7</b>	<b>8,5</b>	<b>8,5</b>	<b>8,5</b>	<b>0,0</b>	<b>7,5</b>	<b>7,1</b>	<b>8,2</b>	<b>7,6</b>	<b>0,6</b>
1250		7,3	7,0	8,0	7,4	0,5	7,9	7,7	7,8	0,1	7,0	6,6	7,5	7,0	0,5
1600		6,4	6,1	7,0	6,5	0,4	6,8	6,8	6,8	0,1	6,1	5,8	6,5	6,1	0,3
<b>2000</b>		<b>5,7</b>	<b>5,4</b>	<b>5,9</b>	<b>5,6</b>	<b>0,2</b>	<b>5,9</b>	<b>5,7</b>	<b>5,8</b>	<b>0,1</b>	<b>5,3</b>	<b>5,1</b>	<b>5,5</b>	<b>5,3</b>	<b>0,2</b>
2500		4,9	4,6	4,9	4,8	0,2	5,0	4,8	4,9	0,1	4,5	4,4	4,6	4,5	0,1
3150		4,0	3,8	3,9	3,9	0,1	4,0	3,9	3,9	0,1	3,6	3,6	3,7	3,7	0,1
<b>4000</b>		<b>3,3</b>		<b>3,1</b>	<b>3,2</b>	<b>0,2</b>	<b>3,2</b>	<b>3,1</b>	<b>3,2</b>	<b>0,1</b>	<b>3,0</b>		<b>3,0</b>	<b>3,0</b>	<b>0,0</b>
5000		2,7		2,4	2,6	0,2	2,5	2,4	2,5	0,1	2,3		2,3	2,3	0,0

Tabla 2 – Valores del  $T_r$

Como se puede observar en los valores presentados en la Tabla 2 y Figura 3, los resultados obtenidos son estables (incluso en bajas frecuencias) y no se detecta una dependencia de la instrumentación empleada. Así mismo, tres operarios repitieron los ensayos para garantizar la fiabilidad de los resultados conseguidos.

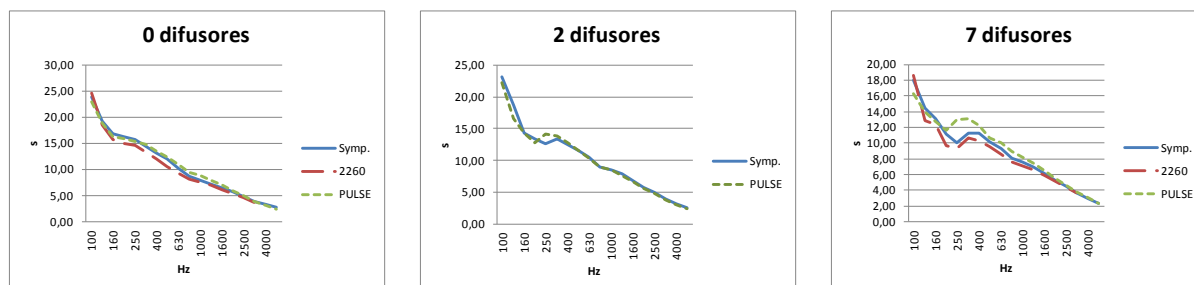


Figura 3 – Evolución del  $T_r$  para 0, 2 y 7 difusores con diferente instrumentación de medida

### 3.2 Difusividad del campo sonoro. Metodología de ensayo

Para poder alcanzar un buen grado de difusividad dentro de un recinto de estas características, la norma UNE-EN ISO 354:2004 recomienda el empleo de difusores fijos o giratorios de diferente tamaño (entre 0,8 y 3 m<sup>2</sup>), constituidos por láminas de baja absorción acústica y con masas por unidad de superficie del orden de 5 kg/m<sup>2</sup>, distribuidos por todo el volumen de la cámara y ligeramente orientados y curvados al azar.

De acuerdo al Anexo A de la correspondiente normativa, el Laboratorio de Acústica de la Universidad de Extremadura ha llevado a cabo un proceso de comprobación de la difusividad del campo sonoro con diferentes materiales absorbentes para poder evaluar y hacer un seguimiento de los valores de absorción obtenidos en la sala para cada configuración.

Recomendaciones de la norma para las características de los materiales absorbentes bajo estudio:

- ✓ Muestras de 5 cm a 10 cm de espesor
- ✓ Material absorbente poroso homogéneo
- ✓ Con coeficientes de absorción altos en el rango de frecuencias 500-4000 Hz
- ✓ Preferentemente lanas de vidrio, lanas de roca, espumas de poliuretano, etc.

Procedimiento de comprobación de la norma:

- ✓ Se monta la muestra de ensayo conforme al apartado 6.2 [4]
- ✓ Se realizan mediciones de la absorción sonora de la forma siguiente:
  - Sin difusores
  - Con un pequeño número de ellos (2)
  - Con cantidades crecientes de difusores fijos (4 y 7)
- ✓ Para cada configuración, se calcularán los coeficientes de absorción sonora y se dibujarán los valores en función del número (área total) de difusores empelados.
- ✓ El procedimiento se realizará hasta que el coeficiente de absorción sonora máximo se estabilice y mantenga constante a pesar de aumentar en número y área los difusores.

NOTA de la normativa – “Se sabe por experiencia que, en cámaras paralelepípedas, el área (ambas caras) de difusores requerida para obtener una difusión adecuada es aproximadamente del 15% al 25% del área total de las superficies de la cámara”.

Por tanto, si sabemos que el área total constituida a partir de todas las superficies de la cámara es de  $206,69 \text{ m}^2$ , el área que deben ocupar los difusores ha de estar comprendida aproximadamente entre  $31 \text{ m}^2$  (15%) y  $51 \text{ m}^2$  (25%). Si cada difusor empleado en nuestro procedimiento tiene un área comprendida entre 1 y  $3 \text{ m}^2$  en cada lado, es decir,  $2-6 \text{ m}^2$  en total (ambas caras), para obtener una difusión adecuada tendremos que utilizar un número de difusores comprendido entre 5 y 10 aprox.

### 3.3 Difusores empleados

En el proceso de caracterización del campo sonoro de la cámara reverberante y complementando así la forma irregular del recinto, se han utilizado en total siete difusores planos de baja absorción acústica y masa constituidos de polimetacrilato de metilo (comúnmente denominado “metacrilato”) de 5 mm de espesor, con formas rectangulares y longitudes entre 0,66 y 2 m (Figura 4).

El área total cubierta por los difusores se ha ido incrementando hasta conseguir estabilidad en los valores del coeficiente de absorción sonora para las frecuencias estudiadas, alcanzando un total de  $33 \text{ m}^2$  (7 difusores, ambas caras), con orientación y distribución aleatoria cubriendo todas las zonas del recinto.

En otros estudios, diferentes autores también evalúan el comportamiento de los difusores en cámaras reverberantes [10-13] (generalmente los de tipo Schroeder y fibra de vidrio).

Tamaño difusores		
	Ancho [m]	Alto [m]
<b>Tipo A</b>	2,00	1,50
<b>Tipo B</b>	1,00	1,50
<b>Tipo C</b>	0,67	1,50
<b>Tipo D</b>	1,33	1,50

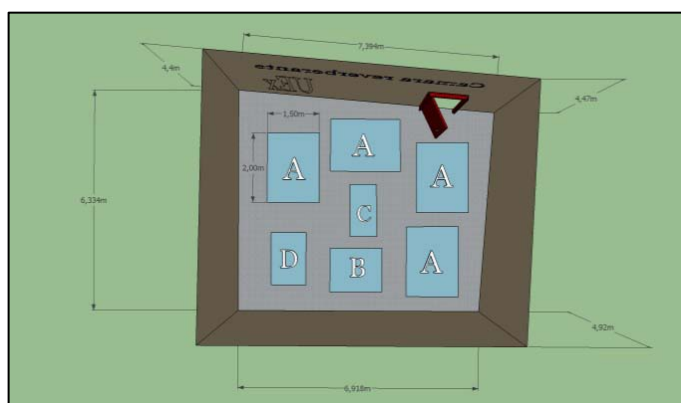


Figura 4 – Formato y posición de los difusores en la cámara (última configuración)

## 4 Efectos del TR sobre materiales absorbentes

### 4.1 Materiales empleados y comparados

El cálculo del tiempo de reverberación se emplea para determinar el coeficiente de absorción de los materiales o elementos de construcción. En una cámara reverberante se mide el  $T_r$  en presencia y ausencia de una muestra del material o elemento de construcción. A partir de esos datos se calcula el coeficiente de absorción.

Los materiales utilizados en este estudio pertenecen al grupo de absorbentes que la norma recomienda para el análisis de la difusividad del campo sonoro, tratándose de cuatro absorbentes planos (Tabla 3) ensayados de acuerdo al Montaje tipo A (Anexo B de la norma UNE-EN ISO 354 [4]); es decir, colocados directamente sobre una de las superficies de la cámara (suelo) con un marco reflectante alrededor de su perímetro. Las características principales se muestran en la Tabla 3.

Propiedades Técnicas		A - Lana de vidrio	B - Fibra de poliéster 1	C - Lana mineral natural	D - Fibra de poliéster 2	
Conductividad térmica	W/(m·K)	0,038	0,036	0,037	0,053	EN 12664
Calor específico aproximado	J/kg·K	800	1200	800	1200	EN 12524
Resistencia al vapor de agua	MN·s/g	1	1	1	1	EN 12086
Reacción al fuego	Euroclase	A1	B-s1,d0	A1	B-s1,d0	EN 13501-1
Absorción de agua		No hidrófilo	No hidrófilo	No hidrófilo	No hidrófilo	EN 15148
Resistencia al flujo de aire	kPa·s/m <sup>2</sup>	> 5	9	10	> 5	EN 29053
Resistencia térmica	m <sup>2</sup> ·K/W	1,25	1,11	1,2	0,38	EN 12664
Espesor	mm	50	40	45	20	EN 12467
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	14	30	17	10	

Tabla 3 – Propiedades técnicas de los materiales ensayados

## 4.2 Evaluación de los tiempos de reverberación

Conforme al apartado 6.1.4 de la norma UNE-EN ISO 354, “la gráfica del área de absorción sonora  $A_1$  debe mostrar una curva lisa y no presentar baches ni picos que difieran más del 15% de la media de los valores de los dos tercios de octava contiguos”. En la Tabla 4 se muestra la evolución del tiempo de reverberación cuando aumentamos en número y área los difusores colocados en la cámara.

Frec. [Hz]	Sin difusores			2 difusores			4 difusores			7 difusores		
	Prom.	A <sub>1</sub> 15%	Desv.	Prom.	A <sub>1</sub> 15%	Desv.	Prom.	A <sub>1</sub> 15%	Desv.	Prom.	A <sub>1</sub> 15%	Desv.
100	22,9	No cumple	2,3	22,2	No cumple	2,0	21,0	No cumple	3,1	16,3	Cumple	1,5
<b>125</b>	<b>18,9</b>	<b>Cumple</b>	<b>3,0</b>	<b>16,6</b>	<b>Cumple</b>	<b>1,4</b>	<b>15,0</b>	<b>Cumple</b>	<b>1,4</b>	<b>14,0</b>	<b>Cumple</b>	<b>1,2</b>
160	16,2	Cumple	1,5	14,3	Cumple	1,4	13,1	Cumple	0,7	12,8	Cumple	1,4
200	15,9	Cumple	0,7	12,8	Cumple	0,9	11,3	No cumple	0,9	11,6	Cumple	0,5
<b>250</b>	<b>15,4</b>	<b>Cumple</b>	<b>1,0</b>	<b>14,1</b>	<b>Cumple</b>	<b>0,4</b>	<b>13,4</b>	<b>Cumple</b>	<b>0,6</b>	<b>13,0</b>	<b>Cumple</b>	<b>0,7</b>
315	14,8	Cumple	0,5	13,9	Cumple	0,4	13,1	Cumple	0,3	13,1	Cumple	0,4
400	13,4	Cumple	0,3	12,7	Cumple	0,4	12,3	Cumple	0,3	12,2	Cumple	0,4
<b>500</b>	<b>12,3</b>	<b>Cumple</b>	<b>0,3</b>	<b>11,5</b>	<b>Cumple</b>	<b>0,3</b>	<b>11,2</b>	<b>Cumple</b>	<b>0,2</b>	<b>10,6</b>	<b>Cumple</b>	<b>0,3</b>
630	11,0	Cumple	0,2	10,3	Cumple	0,3	10,1	Cumple	0,3	10,0	Cumple	0,3
800	9,4	Cumple	0,2	9,1	Cumple	0,1	8,9	Cumple	0,2	8,9	Cumple	0,2
<b>1000</b>	<b>8,9</b>	<b>Cumple</b>	<b>0,2</b>	<b>8,5</b>	<b>Cumple</b>	<b>0,2</b>	<b>8,3</b>	<b>Cumple</b>	<b>0,1</b>	<b>8,2</b>	<b>Cumple</b>	<b>0,2</b>
1250	8,0	Cumple	0,2	7,7	Cumple	0,2	7,6	Cumple	0,2	7,5	Cumple	0,2
1600	7,0	Cumple	0,1	6,8	Cumple	0,1	6,7	Cumple	0,1	6,5	Cumple	0,1
<b>2000</b>	<b>5,9</b>	<b>Cumple</b>	<b>0,1</b>	<b>5,7</b>	<b>Cumple</b>	<b>0,1</b>	<b>5,7</b>	<b>Cumple</b>	<b>0,1</b>	<b>5,5</b>	<b>Cumple</b>	<b>0,1</b>
2500	4,9	Cumple	0,1	4,8	Cumple	0,1	4,8	Cumple	0,1	4,6	Cumple	0,1
3150	3,9	Cumple	0,1	3,9	Cumple	0,1	4,0	Cumple	0,1	3,7	Cumple	0,1
<b>4000</b>	<b>3,1</b>	<b>Cumple</b>	<b>0,0</b>	<b>3,1</b>	<b>Cumple</b>	<b>0,0</b>	<b>3,2</b>	<b>Cumple</b>	<b>0,0</b>	<b>3,0</b>	<b>Cumple</b>	<b>0,0</b>
5000	2,4	Cumple	0,1	2,4	Cumple	0,0	2,5	Cumple	0,0	2,3	Cumple	0,0

Tabla 4 – Evolución de los tiempos de reverberación [s] con la cámara en vacío

Como se puede observar en la Tabla 4 y la Figura 5, el aumento de difusores en la cámara produce un efecto de absorción en bajas frecuencias, de tal forma que los tiempos de reverberación por debajo de la frecuencia de Schroeder<sup>2</sup> (425 Hz aprox.) disminuyen. Así, únicamente para la última configuración (7 difusores) los tiempos de reverberación se ajustan a las pautas que establece la normativa (suavidad en la curva de la absorción  $A_1$ ).

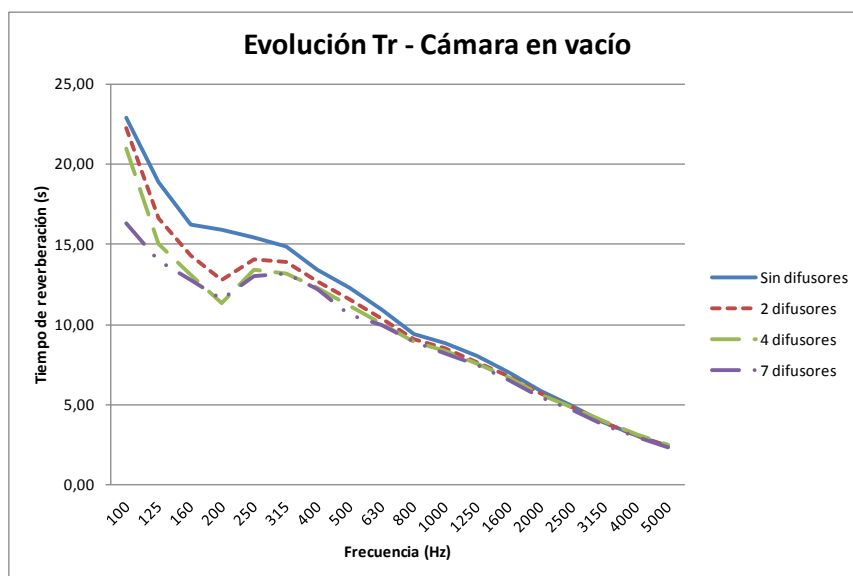


Figura 5 – Gráfica con los tiempos de reverberación para las distintas configuraciones

Durante todo el proceso de medida, se tuvieron en cuenta los datos de temperatura, humedad y presión (Tabla 5) al inicio y al final de cada ensayo. Como se puede comprobar, Tabla 5, los valores obtenidos están dentro del rango de valores permitidos por la UNE-EN ISO 354.

Condic.	Sin difusores			2 difusores			4 difusores			7 difusores		
	Inicial	Final	Prom.	Inicial	Final	Prom.	Inicial	Final	Prom.	Inicial	Final	Prom.
<b>Temp. [°C]</b>	16	17	17	20	18	19	17	17	17	17	17	17
<b>Hum. [%]</b>	57	54	56	41	46	44	60	61	61	53	54	54
<b>Presión [hPa]</b>	1022,9	1022,8	1022,9	1022,5	1022,7	1022,6	1021,2	1021,1	1021,2	1021,7	1021,7	1021,7

Tabla 5 – Condiciones de medida con la cámara en vacío

En la Tabla 6 y en la Figura 6 se muestran, para los cuatro materiales bajo estudio y para tres de las cuatro configuraciones ensayadas (0, 4 y 7 difusores), los promedios y las desviaciones del tiempo de reverberación, para todas las distribuciones micrófono-altavoz realizadas en cada ensayo.

De nuevo se puede observar cómo el aumento de área causado por el incremento de difusores produce una ligera disminución en los tiempos de reverberación en bajas frecuencias. Este procedimiento se realizó con 0, 2, 4 y 7 difusores, hasta que, como se refleja en las gráficas de la Figura 6, los valores se estabilizaron y permanecieron constantes a pesar de aumentar en número y área los paneles difusores de metacrilato.

<sup>2</sup> Por debajo de esta frecuencia, es común que el recinto tenga un comportamiento modal. Esta frecuencia depende de parámetros como el tiempo de reverberación y el volumen de la sala.



T <sub>r</sub> Frec. [Hz]	A - Lana de vidro						B - Fibra de poliéster 1						C - Lana mineral natural						D - Fibra de poliéster 2					
	Sin difusores		4 difusores		7 difusores		Sin difusores		4 difusores		7 difusores		Sin difusores		4 difusores		7 difusores		Sin difusores		4 difusores		7 difusores	
	Prom.	Desv.	Prom.	Desv.	Prom.	Desv.	Prom.	Desv.	Prom.	Desv.	Prom.	Desv.	Prom.	Desv.	Prom.	Desv.	Prom.	Desv.	Prom.	Desv.	Prom.	Desv.	Prom.	Desv.
100	12,12	1,81	10,17	1,22	9,90	1,09	12,47	1,22	10,24	1,10	9,94	1,17	13,22	1,61	10,79	1,57	9,61	1,04	15,66	2,00	12,30	1,57	11,31	0,99
125	<b>8,91</b>	<b>1,27</b>	<b>7,44</b>	<b>0,66</b>	<b>7,15</b>	<b>0,77</b>	<b>9,03</b>	<b>1,46</b>	<b>7,68</b>	<b>0,91</b>	<b>7,15</b>	<b>0,82</b>	<b>9,55</b>	<b>1,32</b>	<b>8,29</b>	<b>0,68</b>	<b>7,59</b>	<b>0,73</b>	<b>13,75</b>	<b>2,16</b>	<b>9,42</b>	<b>1,18</b>	<b>8,45</b>	<b>0,64</b>
160	7,10	1,29	5,64	0,38	5,71	0,53	7,24	1,85	5,76	0,44	5,79	0,46	7,31	1,41	6,47	0,55	6,34	0,56	10,41	2,68	7,39	0,49	7,78	0,59
200	6,31	0,83	4,33	0,48	4,26	0,54	6,55	1,00	4,47	0,33	4,65	0,51	6,65	1,38	4,91	0,44	4,67	0,42	8,36	0,80	6,65	0,55	6,48	0,37
250	<b>4,68</b>	<b>0,33</b>	<b>4,00</b>	<b>0,60</b>	<b>3,33</b>	<b>0,22</b>	<b>5,01</b>	<b>0,51</b>	<b>4,55</b>	<b>0,47</b>	<b>3,73</b>	<b>0,19</b>	<b>4,88</b>	<b>0,42</b>	<b>4,09</b>	<b>0,44</b>	<b>3,57</b>	<b>0,21</b>	<b>7,37</b>	<b>0,58</b>	<b>6,44</b>	<b>0,45</b>	<b>6,36</b>	<b>0,52</b>
315	4,45	0,48	3,30	0,16	3,10	0,13	4,99	0,66	3,92	0,36	3,54	0,20	4,29	0,49	3,47	0,26	3,26	0,12	7,72	0,74	6,00	0,33	5,86	0,25
400	3,70	0,31	2,83	0,18	2,73	0,19	4,12	0,21	3,22	0,13	3,19	0,23	3,90	0,36	2,90	0,11	2,82	0,20	6,38	0,53	5,30	0,18	5,30	0,19
500	<b>3,63</b>	<b>0,26</b>	<b>2,55</b>	<b>0,12</b>	<b>2,50</b>	<b>0,10</b>	<b>3,70</b>	<b>0,22</b>	<b>2,94</b>	<b>0,12</b>	<b>2,89</b>	<b>0,16</b>	<b>3,83</b>	<b>0,23</b>	<b>2,56</b>	<b>0,16</b>	<b>2,50</b>	<b>0,14</b>	<b>5,39</b>	<b>0,23</b>	<b>4,74</b>	<b>0,20</b>	<b>4,70</b>	<b>0,15</b>
630	3,55	0,21	2,44	0,09	2,33	0,08	3,56	0,15	2,70	0,09	2,62	0,07	3,57	0,29	2,41	0,12	2,36	0,09	4,85	0,18	4,22	0,15	4,23	0,13
800	3,20	0,18	2,27	0,08	2,17	0,09	3,14	0,16	2,56	0,08	2,43	0,07	3,20	0,14	2,27	0,09	2,20	0,09	4,27	0,16	3,90	0,11	3,86	0,12
1000	<b>3,00</b>	<b>0,08</b>	<b>2,25</b>	<b>0,09</b>	<b>2,21</b>	<b>0,07</b>	<b>3,04</b>	<b>0,10</b>	<b>2,46</b>	<b>0,05</b>	<b>2,38</b>	<b>0,06</b>	<b>3,05</b>	<b>0,14</b>	<b>2,24</b>	<b>0,07</b>	<b>2,24</b>	<b>0,08</b>	<b>3,96</b>	<b>0,09</b>	<b>3,62</b>	<b>0,07</b>	<b>3,62</b>	<b>0,13</b>
1250	2,99	0,07	2,23	0,08	2,12	0,08	2,96	0,11	2,36	0,08	2,30	0,08	3,03	0,08	2,22	0,10	2,11	0,06	3,62	0,11	3,34	0,10	3,29	0,10
1600	2,84	0,08	2,13	0,06	2,07	0,06	2,85	0,08	2,25	0,05	2,17	0,07	2,90	0,04	2,15	0,05	2,05	0,06	3,31	0,08	3,11	0,05	3,03	0,07
2000	<b>2,70</b>	<b>0,09</b>	<b>2,04</b>	<b>0,05</b>	<b>1,97</b>	<b>0,04</b>	<b>2,70</b>	<b>0,06</b>	<b>2,15</b>	<b>0,04</b>	<b>2,04</b>	<b>0,03</b>	<b>2,71</b>	<b>0,03</b>	<b>2,01</b>	<b>0,05</b>	<b>1,95</b>	<b>0,06</b>	<b>2,98</b>	<b>0,06</b>	<b>2,77</b>	<b>0,07</b>	<b>2,77</b>	<b>0,05</b>
2500	2,51	0,04	1,95	0,03	1,84	0,05	2,54	0,08	2,04	0,05	1,91	0,02	2,51	0,04	1,92	0,07	1,80	0,05	2,70	0,06	2,54	0,06	2,52	0,09
3150	2,20	0,04	1,78	0,06	1,69	0,03	2,22	0,05	1,85	0,03	1,77	0,04	2,18	0,06	1,73	0,04	1,67	0,03	2,36	0,06	2,24	0,06	2,20	0,04
4000	<b>1,83</b>	<b>0,04</b>	<b>1,57</b>	<b>0,02</b>	<b>1,50</b>	<b>0,02</b>	<b>1,85</b>	<b>0,03</b>	<b>1,65</b>	<b>0,04</b>	<b>1,57</b>	<b>0,03</b>	<b>1,82</b>	<b>0,03</b>	<b>1,57</b>	<b>0,02</b>	<b>1,51</b>	<b>0,02</b>	<b>2,04</b>	<b>0,03</b>	<b>1,98</b>	<b>0,04</b>	<b>1,89</b>	<b>0,02</b>
5000	1,51	0,02	1,40	0,02	1,33	0,02	1,54	0,03	1,44	0,02	1,39	0,02	1,51	0,02	1,39	0,02	1,34	0,02	1,75	0,03	1,69	0,02	1,63	0,03

Tabla 6 – Valores de los tiempos de reverberación para los 4 materiales bajo estudio

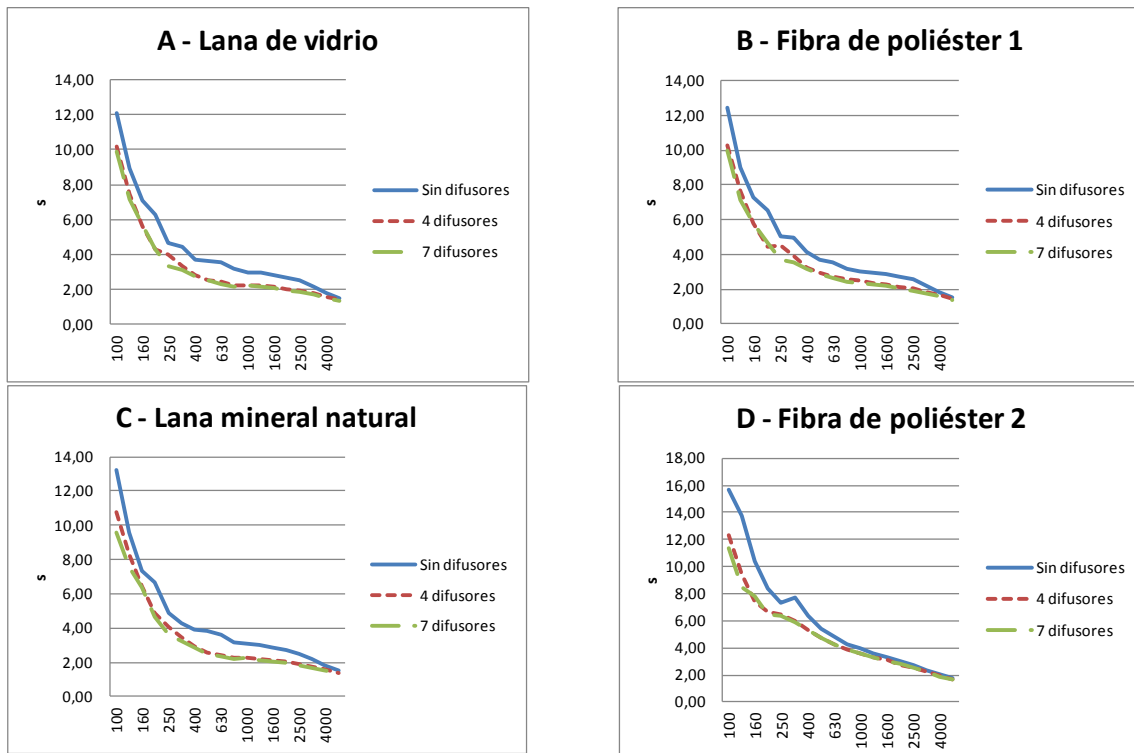


Figura 6 – Gráficas con la distribución del  $T_r$  en los distintos materiales

## 5 Análisis de los resultados

En el proceso de caracterización del campo sonoro y comprobación-corrección de la difusividad en la cámara reverberante de la universidad de Extremadura, fueron ensayados cuatro materiales absorbentes de distintas características (Tabla 3) y se fue incrementando la superficie difusora hasta que los resultados del coeficiente de absorción sonora y del  $T_r$  se estabilizaron y registraron valores acordes a los especificados en la normativa actual.

En el apartado anterior se reflejó el efecto producido por el indicado incremento de la superficie difusora en los tiempos de reverberación, disminuyendo éstos principalmente en medias y bajas frecuencias (Figuras 5 y 6). Este hecho también repercute directamente sobre los coeficientes de absorción sonora (parámetro a calcular de acuerdo al procedimiento de comprobación de difusividad según la norma UNE-EN ISO 354) como podemos observar en la Tabla 7 y Figura 7 para los cuatro materiales bajo estudio<sup>3</sup>.

Como se puede extraer de los resultados presentados en la Tabla 7 y Figura 7, los valores obtenidos para las dos últimas configuraciones de ensayo (4 y 7 difusores) muestran efectos muy similares, lo cual indica el grado de estabilización en la cámara a pesar de seguir incrementando el área total de material difusor. Por ello, y según lo establecido en la normativa de referencia (Anexo A de la UNE-EN ISO 354), la configuración definitiva en la cámara reverberante será la de siete difusores (Fig. 4).

<sup>3</sup> Los resultados obtenidos son comparados con los valores proporcionados por los fabricantes de los materiales ensayados (Columnas "Fab." – Tabla 7)

$\alpha_s$	A - Lana de vidrio				B - Fibra de poliéster 1				C - Lana mineral natural				D - Fibra de poliéster 2			
	Frecuencia	Sin dif.	4 dif.	7 dif.	Fab.	Sin dif.	4 dif.	7 dif.	Fab.	Sin dif.	4 dif.	7 dif.	Fab.	Sin dif.	4 dif.	7 dif.
100	0,10	0,14	0,11		0,10	0,13	0,11		0,09	0,12	0,12		0,06	0,09	0,08	0,09
<b>125</b>	<b>0,16</b>	<b>0,18</b>	<b>0,18</b>	<b>0,20</b>	<b>0,16</b>	<b>0,17</b>	<b>0,18</b>	<b>0,31</b>	<b>0,14</b>	<b>0,15</b>	<b>0,16</b>	<b>0,15</b>	<b>0,05</b>	<b>0,11</b>	<b>0,13</b>	<b>0,13</b>
160	0,21	0,27	0,26		0,21	0,26	0,25		0,20	0,21	0,21		0,09	0,16	0,14	0,15
200	0,26	0,38	0,40		0,24	0,36	0,35		0,24	0,31	0,34		0,16	0,17	0,19	0,15
<b>250</b>	<b>0,40</b>	<b>0,47</b>	<b>0,60</b>	<b>0,55</b>	<b>0,37</b>	<b>0,39</b>	<b>0,52</b>	<b>0,57</b>	<b>0,38</b>	<b>0,46</b>	<b>0,55</b>	<b>0,45</b>	<b>0,20</b>	<b>0,22</b>	<b>0,22</b>	<b>0,21</b>
315	0,43	0,61	0,66		0,36	0,48	0,56		0,45	0,57	0,62		0,17	0,25	0,26	0,25
400	0,54	0,73	0,77		0,46	0,62	0,63		0,50	0,71	0,73		0,23	0,30	0,30	0,29
<b>500</b>	<b>0,53</b>	<b>0,81</b>	<b>0,82</b>	<b>0,80</b>	<b>0,52</b>	<b>0,67</b>	<b>0,68</b>	<b>0,84</b>	<b>0,49</b>	<b>0,81</b>	<b>0,82</b>	<b>0,75</b>	<b>0,29</b>	<b>0,34</b>	<b>0,33</b>	<b>0,30</b>
630	0,52	0,83	0,88		0,52	0,73	0,76		0,52	0,85	0,87		0,32	0,38	0,38	0,32
800	0,56	0,89	0,94		0,58	0,75	0,81		0,57	0,88	0,92		0,35	0,40	0,41	0,36
<b>1000</b>	<b>0,60</b>	<b>0,87</b>	<b>0,89</b>	<b>0,85</b>	<b>0,59</b>	<b>0,77</b>	<b>0,80</b>	<b>1,00</b>	<b>0,59</b>	<b>0,88</b>	<b>0,88</b>	<b>0,85</b>	<b>0,39</b>	<b>0,43</b>	<b>0,43</b>	<b>0,42</b>
1250	0,57	0,85	0,91		0,57	0,79	0,81		0,55	0,86	0,92		0,42	0,47	0,47	0,45
1600	0,55	0,86	0,89		0,55	0,79	0,82		0,53	0,85	0,90		0,44	0,48	0,49	0,48
<b>2000</b>	<b>0,51</b>	<b>0,85</b>	<b>0,88</b>	<b>0,85</b>	<b>0,51</b>	<b>0,78</b>	<b>0,83</b>	<b>0,89</b>	<b>0,51</b>	<b>0,86</b>	<b>0,89</b>	<b>0,80</b>	<b>0,45</b>	<b>0,51</b>	<b>0,50</b>	<b>0,53</b>
2500	0,48	0,82	0,89		0,47	0,75	0,83		0,47	0,84	0,92		0,46	0,52	0,51	0,54
3150	0,45	0,83	0,88		0,43	0,77	0,80		0,44	0,87	0,90		0,45	0,54	0,53	0,56
<b>4000</b>	<b>0,45</b>	<b>0,86</b>	<b>0,90</b>	<b>0,90</b>	<b>0,44</b>	<b>0,77</b>	<b>0,82</b>	<b>0,67</b>	<b>0,44</b>	<b>0,87</b>	<b>0,89</b>	<b>0,80</b>	<b>0,45</b>	<b>0,53</b>	<b>0,56</b>	<b>0,59</b>
5000	0,45	0,84	0,89		0,40	0,76	0,80		0,41	0,85	0,86		0,41	0,53	0,53	0,57
$\alpha_w$	0,55	0,80	0,85	0,80	0,55	0,65	0,70	0,80	0,55	0,75	0,80	0,75	0,35	0,40	0,40	0,40
Clase	D	B	B	B	D	C	C	B	D	C	B	C	D	D	D	D

Tabla 7 – Coeficientes de absorción ( $\alpha_w$  y clase de acuerdo a la norma UNE-EN ISO 11654:1998)

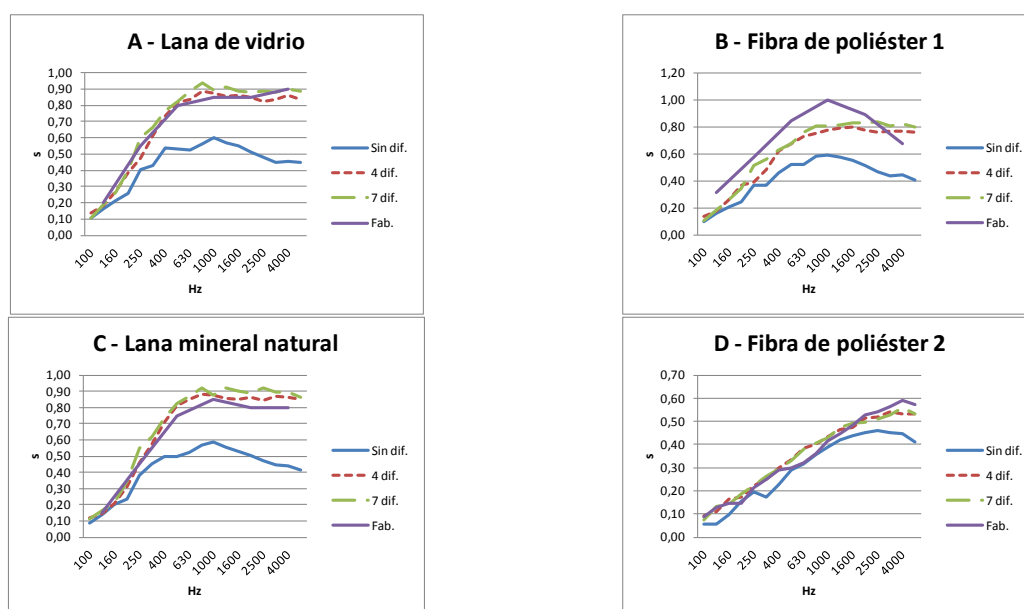


Figura 7 – Gráficas con los coeficientes de absorción en las distintas configuraciones

## 6 Conclusiones

En el estado actual de la cámara reverberante de la Universidad de Extremadura, es decir, con siete difusores fijos de distinto tamaño colocados aleatoriamente sobre la superficie del techo (de acuerdo a la Figura 4), ésta cumple con todos los requisitos mencionados en las normas UNE-EN ISO 354:2004, UNE-EN ISO 3741:2000 y UNE-EN ISO 3740:2001 (volumen, superficie, longitud del segmento mayor, ruido de fondo, tiempos de reverberación mínimos para la cámara en vacío, suavidad de la curva de absorción, valores de absorción máxima, relaciones de forma y proporciones, etc.) para este tipo de cámaras y ensayos.

Se comprueba la influencia y repercusión del campo acústico existente en la sala cuando el material difusor existente crece en número y área. Este efecto es positivo y provoca:

- Disminución de los  $T_r$  en bajas y medias frecuencias, suavizando las gráficas del área de absorción sonora equivalente ( $A_1$ ) de forma que no presenten baches ni picos (Apartado 6.1.4 de la norma UNE-EN ISO 354).
- Aumento y estabilización de los coeficientes de absorción sonora ( $\alpha_s$ ), generalmente en medias y altas frecuencia, solucionando los problemas existentes de difusividad y absorción.
- Valores máximos para el coeficiente de absorción sonora ponderado ( $\alpha_w$ ).

## Agradecimientos

Como entidades financiadoras del proyecto, a la Junta de Extremadura, Consejería de Economía, Comercio e Innovación y al Fondo Social Europeo.

A las empresas Isover Saint-Gobain, PielSA y Knauf Insulation por haber proporcionado los materiales absorbentes.

## Referencias

- [1] Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación (LOE). BOE num. 266 de 6/11/1999, pp. 38925-34.
- [2] Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación. BOE num. 74 de 28/03/2006, pp. 11816-31.
- [3] European Parliament, C. Directive 89/106/EEC of 21 December 1988 on the approximation of laws, regulations and administrative provisions of the Member States relating to construction products. 1988, Vol. L 40, pp. 12-26.
- [4] UNE EN ISO 354:2004. Acústica. Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante. Madrid, Spain.
- [5] UNE EN ISO 3741:2000. Acústica. Determinación de los niveles de potencia acústica de las fuentes de ruido a partir de la presión acústica. Métodos de precisión en cámaras reverberantes. Madrid, Spain.
- [6] UNE EN ISO 3740:2001. Acústica. Determinación de los niveles de potencia acústica de las fuentes de ruido. Guía para la utilización de las normas básicas. Madrid, Spain.
- [7] Barrigón Morillas, J.M., Ortiz Caraballo, C., Vílchez-Gómez, R., Carmona Del Río, F.J., Sanchez Domínguez, A., Cerrillo Cuenca, C., et al. Estudio preliminar de la cámara reverberante del laboratorio de acústica de la universidad de Extremadura. In: Tecniacústica León, León, Spain, 2010.
- [8] AEMET. Agencia Estatal de Meteorología. [ftp://ftpdatos.aemet.es/datos\\_observacion/](ftp://ftpdatos.aemet.es/datos_observacion/), 2012.
- [9] UNE EN ISO 20140-2:1994. Acústica. Medición del aislamiento acústico en edificios y en elementos de edificación. Parte 2: determinación, verificación y aplicación de datos de precisión (ISO 140-2:91). Madrid, Spain.
- [10] Famighetti, T.M., Cunefare, K.A., Muhlberger, E.E. Qualification and performance of a reverberation chamber equipped with lightweight diffusers. *Noise Control Engineering Journal*. 2006, 54, 201-11.
- [11] He, P., Jiang, Q.X., Zhou, X., Wu, C.F., Zhao, C.J. Influence of acoustic diffuser on reverberation chamber independent sampling points. *Gaodiyanya Jishu/High Voltage Engineering*. 2008, 34, 1921-6.
- [12] Kim, J.H., Yang, S.I., Rhee, J.G. Optimization of field uniformity in a reverberation chamber using quadratic residue diffusers. *IEICE Transactions on Communications*. 2010, E93-B, 2787-90.
- [13] Yun, J.C., Rhee, J.G., Chung, S.Y. An improvement of field uniformity of reverberation chamber by the variance of diffuser volume ratio. Taipei, 2001, Vol. 3, pp. 1123-6.