

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE GANDÍA

Máster en Ingeniería Acústica



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



ESCUELA POLITÉCNICA
SUPERIOR DE GANDÍA

**“Mejora de la difusión acústica de la
cámara reverberante
del Campus de Gandía de la UPV”**

TESIS DE MASTER

Autor:

Fernando Hernández García

Directores:

D. Jesús Alba Fernández

D^a. Laura Bertó Carbó

GANDIA, 5 de septiembre de 2012

Mejora de la difusión acústica de la cámara reverberante del Campus de Gandía de la UPV

Autor: Fernando Hernández García

Director 1: Jesús Alba Fernández

Director 2: Laura Bertó Carbó

Resumen

El objeto del presente trabajo final de máster es describir el proceso seguido para mejorar la difusividad de la cámara reverberante del Campus de Gandía de la Universidad Politécnica de Valencia. Dado que los principales usos de la cámara reverberante son realizar ensayos de absorción acústica de materiales (según UNE-EN ISO 354:2004 y su homóloga americana, la ASTM C423-09a:2009), y mediciones de niveles de potencia acústica (según UNE-EN ISO 3741:2011), se han utilizado estas normas como principal referencia y guía. En sus anexos, se describen breves procedimientos para mejorar la difusión de las cámaras reverberantes mediante paneles difusores. Las acciones que se han llevado a cabo se han inspirado en dichas recomendaciones, consiguiendo mejorar notablemente la difusión acústica de la cámara, tal y como se demuestra en este documento.

En cuanto al proceso experimental, se apoya en la realización de medidas de absorción y de nivel de presión sonora. Mediante las medidas de absorción de una muestra patrón se observa una mejora de la difusión que se puede atribuir a la optimización de las direcciones de la reflexiones en los difusores que se incorporan progresivamente, tendiendo a conseguir una distribución de probabilidad de ángulos de incidencia cada vez más uniforme. La mejora de la homogeneidad del campo acústico se comprueba a partir de la medición de los niveles de presión acústica (SPL) en diferentes posiciones de la cámara una vez instalados todos los difusores.

Palabras clave: Acústica, difusividad, cámara reverberante, paneles difusores, absorción.

Abstract

The subject of this Master Thesis is to describe the process used to improve the diffusivity of the Campus de Gandia reverberation chamber (Universidad Politécnica de Valencia). Since the major applications of the reverberation chamber are sound absorption testing of materials (according to UNE-EN ISO 354:2004 and its American counterpart, the ASTM C423-09a:2009), as well as sound power level measurements (according to UNE-EN ISO 3741:2011), these standards have been used as the main reference and guide. In the standards annexes, brief procedures to improve the chambers diffusivity by using diffusion panels are described. The actions carried out have been inspired by these recommendations, getting a significant improvement of the chamber's acoustic diffusion, as we'll show in this document.

Regarding the experimental proceedings, they rely on sound absorption and sound pressure level measurements. Sound absorption measurements on a standard sample show an improved diffusion as panels are gradually installed. This improvement can be attributed to a reflection directions optimization, tending to achieve an incident angle probability distribution increasingly uniform. An enhanced homogeneity of the acoustic field can be found from the sound pressure level measurements at different chamber positions once installed all the diffusion panels.

Keywords: Acoustics, diffusivity, reverberation chamber, diffusion panels, absorption.

ÍNDICE

I. Objeto y antecedentes	3
I.1. Introducción	3
I.2. Objetivos	3
I.3. Estructura del trabajo final de máster	5
II. Conceptos y términos	6
III. Aspectos normativos	10
III.1. Adaptación de la cámara reverberante a las normas UNE-EN ISO 354: 2004 y UNE-EN ISO 3741: 2011	10
III.2. Norma americana ASTM C423-09a: 2009	15
IV. Difusividad normativa del campo sonoro en cámara reverberante	16
V. Desarrollo del trabajo final de máster	18
V.1. Descripción detallada del estado inicial de la cámara reverberante	18
V.2. Metodología	21
V.3. Instrumentación y su configuración	28
V.4. Elección de la muestra patrón	29
V.5. Los paneles difusores y su instalación	31
VI. Mediciones y resultados	35
VI.1. Ensayos estado inicial. SPL y TR en cámara reverberante sin difusores	35
VI.2. Ensayos con los difusores de techo, 24 m ² , 10 %	37
VI.3. Ensayos con los difusores de techo y de madera en paredes, 36 m ² , 15 %	39
VI.4. Ensayos con los difusores de techo y paredes definitivos, 48 m ² , 20 %	40
VI.5. Estudio estado final. SPL y Grado de difusión (Gd)	42
VI.6. Ensayos de control de otras muestras	44
VII. Conclusiones y futuras líneas de investigación	46
VII.1. Conclusiones	46
VII.2. Futuras líneas de investigación	48
Agradecimientos	51
Referencias	52
Anexos	CD-ROM

I. Objeto y antecedentes

1.1 Introducción

La cámara reverberante de la Escuela Politécnica Superior de Gandía (EPSG) del Campus de Gandía de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) se diseña y construye en 1997 para su uso, tanto docente como investigador, en el ámbito de la absorción acústica de materiales, objetos y dispositivos según la norma UNE-EN 20534:1993, sustituida posteriormente por la UNE-EN ISO 354:2004. También se utiliza para la evaluación de la potencia acústica de fuentes sonoras según la norma UNE-EN ISO 3741:2000, recientemente actualizada por la UNE-EN ISO 3741:2011.

Si bien se trata de un laboratorio ampliamente usado para la realización de prácticas docentes, investigación aplicada, convenios de investigación y prestaciones de servicio para empresas, no se dispone de un trabajo de investigación que caracterice su estado actual, con el objetivo de analizar y evaluar sus posibilidades de mejora en cuanto a su comportamiento acústico y su carta de servicios.

La meta que nos hemos propuesto es mejorar su difusión y actualizar su caracterización usando las técnicas y normas en vigor.

1.2 Objetivos

El principal objetivo de este trabajo de fin de máster es determinar y analizar los parámetros acústicos de la cámara reverberante antes de colocar los paneles difusores acústicos; y tras realizar esta intervención, volver a determinar y analizar los mismos parámetros para concretar si el resultado de esta serie de acciones mejoran y de qué modo, su difusividad acústica y, accesoriamente, actualizar su carta de servicios como laboratorio de mediciones acústicas.

Como objetivos secundarios se plantean:

- Valorar el coste de las acciones de mejora.
- Evaluar otras acciones que den valor añadido a la cámara reverberante: mejoras de su iluminación, acabados, marcar las zonas y numerar los puntos de medida, su imagen de marca, etc.
- Ampliar su uso a nuevas normas de ensayo vigentes o en desarrollo.
- Perfilar posibles prácticas docentes sobre el control de la difusión de cámaras reverberantes.

Finalmente, se pretende dar a conocer los resultados obtenidos a la comunidad científica a través de la publicación de los mismos y la metodología empleada en un artículo de divulgación científica que se presentará a los congresos que se estimen oportunos.

En este trabajo se abarcarán aspectos tales como:

- El tiempo de reverberación en cámaras reverberantes.
- La difusión acústica en cámara reverberante según normas.
- Las frecuencias de corte o límite de la cámara reverberante.
- Referencias a los trabajos previos de escalado, usos de la simulación y el cálculo de elementos finitos (FEM) para el estudio de la difusión de la cámara reverberante.

Así mismo, es importante para el laboratorio, para la unidad docente de física de la EPSG y para el Campus de Gandía de la UPV, proyectar y fomentar una imagen, interna y externa, de un servicio de elevada calidad, tanto en los aspectos puramente docentes como en el ámbito de la investigación aplicada, así como divulgar el potencial disponible en cuanto a las extensas capacidades de desarrollo e innovación aplicada en el terreno de la ingeniería acústica; y concretamente, de un emblemático laboratorio de investigación avanzada como es la cámara reverberante del Campus de Gandía de la UPV.

Se pretende que este trabajo se convierta en una fuente de información y en una herramienta útil y ágil, al que pueda recurrir la comunidad universitaria e investigadora, así como las empresas colaboradoras a la hora de plantear sus mediciones, los informes finales; y realizar y justificar recursos documentales para las solicitudes oficiales de financiación de los proyectos de investigación nacionales e internacionales.

Este trabajo de fin de master también pretende convertirse en un repositorio o depósito electrónico de ficheros de datos, y archivos originales que recopilen y organicen toda la documentación original a la que se hace referencia y que pueda ser necesaria en cualquiera de los usos que se definan en la carta de servicios de la cámara reverberante.

También se especifican cuales han sido los costes y las valoraciones económicas de las implementación de las diferentes acciones que se desarrollan en este trabajo.

1.3 Estructura del trabajo final de máster

En este punto se describe de forma esquematizada cuáles han sido las fases de desarrollo del presente trabajo final de máster, incluyendo la estimación de las horas de trabajo personal empleadas en cada fase.

Las fases en las que se han invertido alrededor de 360 horas han sido las siguientes:

Fase inicial de documentación [60 h]

- Recopilación, lectura y preparación de la normativa en vigor. [20 h]
- Búsqueda y recopilación de artículos de investigación relativos al diseño y optimización de cámaras reverberantes. [20h]
- Análisis del estado del arte relativo al diseño de cámaras reverberantes, tipos de difusores y optimización de la difusión. [20 h]

Fase de caracterización del estado actual de la cámara reverberante [110 h]

- Aspectos geométricos, acabados y necesidades. [10 h]
- Preparación de la cámara para los ensayos: matriz de puntos de medida, puntos de fuente de ruido, sellado de orificios, etc. [10 h]
- Matrices de mediciones de los niveles de presión sonora (SPL) a varias alturas. [10h]
- Determinación del tiempo de reverberación en cámara vacía. [10 h]
- Determinación de la absorción acústica de la muestra patrón. [50 h]
- Análisis de los resultados previos a la instalación de difusores. [10 h]
- Definición de las mejoras a conseguir. [10 h]

Fase de montaje y ajuste de los paneles difusores, y nuevas caracterizaciones de la cámara reverberante [120 h]

- Diseño y construcción de los paneles difusores. [10 h]
- Preparación y montaje de los difusores en la cámara reverberante. [30 h]
- Tandas de mediciones de ajuste: solo techo, techo y paredes, definitivo 1 y 2. [30 h]
- Nueva caracterización de la cámara con los difusores definitivos. [50 h]

Fase de redacción y análisis de resultados [70 h]

- Evaluación de los resultados obtenidos. [20 h]
- Conclusiones. [20 h]
- Aplicaciones docentes. [10 h]
- Posibles líneas de investigación. [20 h]

II. Conceptos y Términos

A continuación, después de reducirlos al mínimo indispensable, se exponen los conceptos, términos y definiciones más fundamentales, imprescindibles en este trabajo.

II.1 *Campo difuso en cámara reverberante*

Se cita textualmente la introducción de la norma UNE-EN ISO 354:2004 [1]:

“Cuando una fuente sonora emite en un recinto, el nivel que alcanza el sonido reverberante y la caída de nivel que sigue al cese de la emisión de la fuente, están condicionados por las características de absorción sonora de las superficies frontera, del aire del recinto y de los objetos en su interior. En general, la fracción de potencia sonora incidente absorbida en una superficie depende del ángulo de incidencia. Con objeto de relacionar el tiempo de reverberación de un auditorio, oficina, local, etc., con la reducción de ruido debida a un tratamiento absorbente, es preciso conocer las características de absorción sonora de las superficies, normalmente en forma de un adecuado promedio entre todos los ángulos de incidencia. Puesto que la distribución de ondas sonoras en recintos habituales incluye un amplio y altamente impredecible rango de ángulos, es conveniente, con fines de normalización, considerar una distribución uniforme como condición básica. Si, además, la intensidad sonora es independiente de la posición dentro del recinto, se dice que el campo acústico es difuso y que el sonido incide en las superficies de forma aleatoria.

El campo sonoro dentro de una cámara reverberante diseñada correctamente se aproxima en gran medida a un campo sonoro difuso. Por lo tanto, la absorción sonora medida en una cámara reverberante se aproxima igualmente a la absorción sonora que se mediría bajo las condiciones básicas de normalización.

El propósito de esta norma internacional es promover la uniformidad entre métodos y condiciones de medición de la absorción sonora en cámaras reverberantes.”

II.2 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.

II.3 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.

El tiempo de reverberación de la cámara en cada banda de frecuencia se expresa por la media aritmética del total de mediciones de tiempo de reverberación realizadas en cada banda.

La media de los tiempos de reverberación de la cámara en cada banda de frecuencias, sin y con la muestra de ensayo, T_1 y T_2 respectivamente, debe calcularse y expresarse con dos cifras decimales como mínimo.

II.4 Método de la señal de ruido interrumpida: Método de obtención de las curvas de caída de nivel por medio de la adquisición directa de la caída del nivel de presión sonora después de excitar la sala con ruido de banda ancha o con ruido de banda limitada.

II.5 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 A_1 ; para la cámara reverberante con la muestra se representa por A_2 .

El área de absorción sonora equivalente, A_1 , en metros cuadrados, de la cámara reverberante vacía, se calcula utilizando la fórmula:

$$A_1 = \frac{55,3V}{cT_1} - 4Vm_1 \quad (1)$$

Donde:

- V es el volumen, en metros cúbicos, de la cámara reverberante vacía;
- $c = (331 + 0,6t / ^\circ C)$ es la velocidad de propagación del sonido en el aire, en metros por segundo; Con la temperatura t en grados centígrados.
- T_1 es el tiempo de reverberación, en segundos, de la cámara reverberante vacía;
- m_1 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.

El área de absorción sonora equivalente, A_2 , en metros cuadrados, de la cámara reverberante conteniendo la muestra, se calcula utilizando la fórmula:

$$A_2 = \frac{55,3V}{cT_2} - 4Vm_2 \quad (2)$$

Donde:

- T_2 es el tiempo de reverberación, en segundos, de la cámara reverberante con la muestra de ensayo.

II.6 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.

El área de absorción sonora equivalente, A_T , en metros cuadrados, de la muestra, debe calcularse utilizando la fórmula:

$$A_T = A_2 - A_1 \quad (3)$$

II.7 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.

II.8 Coeficiente 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:

$$\alpha_s = \frac{A_T}{S} \quad (4)$$

II.9 Principio de una medición de absorción acústica en cámara reverberante según la norma UNE-EN ISO 354:2004: Se mide el tiempo de reverberación promedio en la cámara reverberante con y sin muestra de ensayo. A partir de estos tiempos de reverberación, se calcula el área de absorción sonora equivalente A_T por medio de la ecuación de Sabine (véase el apartado 8.1.2.1 de la norma [1]). En el caso de muestras que cubren uniformemente una superficie (absorbentes planos), el coeficiente de absorción sonora se obtiene dividiendo A_T por el área S de la superficie tratada (véase apartado 3.8 de la norma [1]).

II.10 Grado de difusión (G_d): Una manera de medir el grado de difusión de una sala es a partir de la curva de caída, comparando el resultado de los primeros tiempos de descenso con los más largos, como el T20. Si un tiempo de caída temprano como el EDT, es igual al T20, estaremos en campo tanto más difuso.

Por tanto, podemos medir lo que se aleja o acerca nuestra cámara reverberante del ansiado campo difuso estudiando la diferencia entre el EDT y el T20, a través del parámetro denominado *Grado de difusión o G_d* .

$$G_d = \left| 1 - \frac{EDT - T20}{(EDT + T20)/2} \right| \quad (5)$$

Cuanto más cerca de uno ($G_d=1$) más difuso es el campo sonoro, y cuanto más cerca de cero ($G_d=0$) más nos alejamos del objetivo deseado.

III. Aspectos Normativos

En este trabajo nos hemos puesto al amparo, fundamentalmente, de dos normas internacionales que se usan para la medición de la absorción acústica en cámara reverberante:

- La norma UNE-EN ISO 354 de febrero de 2004, “*Acústica. Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante (ISO 354:2003)*”.
- El estándar americano ASTM C423-09a de octubre de 2009 (American Society for Testing and Materials [3]), “*Standard Test Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by the Reverberation Room Method*”.

También se han tenido en cuenta los anexos sobre difusión de las cámaras reverberantes según la norma UNE-EN ISO 3741 de julio de 2011 para la “*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*”

III.1 Adaptación de la cámara reverberante a las normas UNE-EN ISO 354:2004 y UNE-EN ISO 3741:2011.

Dos de los principales y fundamentales usos de las cámaras reverberantes son la determinación de la absorción acústica de materiales y objetos, según la norma UNE-EN ISO 354:2004; y, la determinación de los niveles de potencia y energía acústica de fuentes de ruido a partir de la presión acústica, según la norma UNE-EN ISO 3741:2011.

Es por ello que sean nuestras referencias principales a la hora de mejorar las prestaciones de nuestra cámara reverberante.

Ambas normas hablan de la importancia de que el campo sonoro en el interior de las cámaras reverberantes sea lo más difuso posible, que se disponga de elevada difusividad.

Para conseguirlo, ambas normas imponen una serie de restricciones relativas a sus dimensiones, su volumen, absorción de los cerramientos de la cámara vacía, etc., con objeto de disponer del campo sonoro lo más difuso posible en los rangos de frecuencia de interés, es decir, en los tercios de octava de 100 Hz a 5000 Hz. En ocasiones, es necesario medir a frecuencias inferiores, donde la baja densidad modal complica mucho la obtención de resultados precisos. Este trabajo pretende determinar si es posible bajar las frecuencias de corte a 80 Hz, incluso menores, al añadir los paneles difusores a nuestra cámara.

Sabemos que ninguna cámara reverberante tiene la capacidad de producir un campo sonoro difuso perfecto, son numerosísimos los factores que influyen y malogran este objetivo; desde la propia cámara y sus dimensiones, hasta la fuente de ruido, los micrófonos, la naturaleza de cada muestra bajo estudio, la ubicación de todos ellos, la forma de colocarlos, la altura y disposición de cada difusor, y un larguísimo etcétera de circunstancias que impiden la consecución de la difusividad perfecta en cada ensayo. Este es un asunto ampliamente discutido dentro de la comunidad científica [4] [5].

III.1.1 Aspectos geométricos de la cámara reverberante de la EPSG

La cámara reverberante del Campus de Gandía de la UPV es un recinto en forma de poliedro irregular de seis caras [6], con cada una de las superficies de diferentes dimensiones e inclinaciones, como se puede observar en la figura 1.

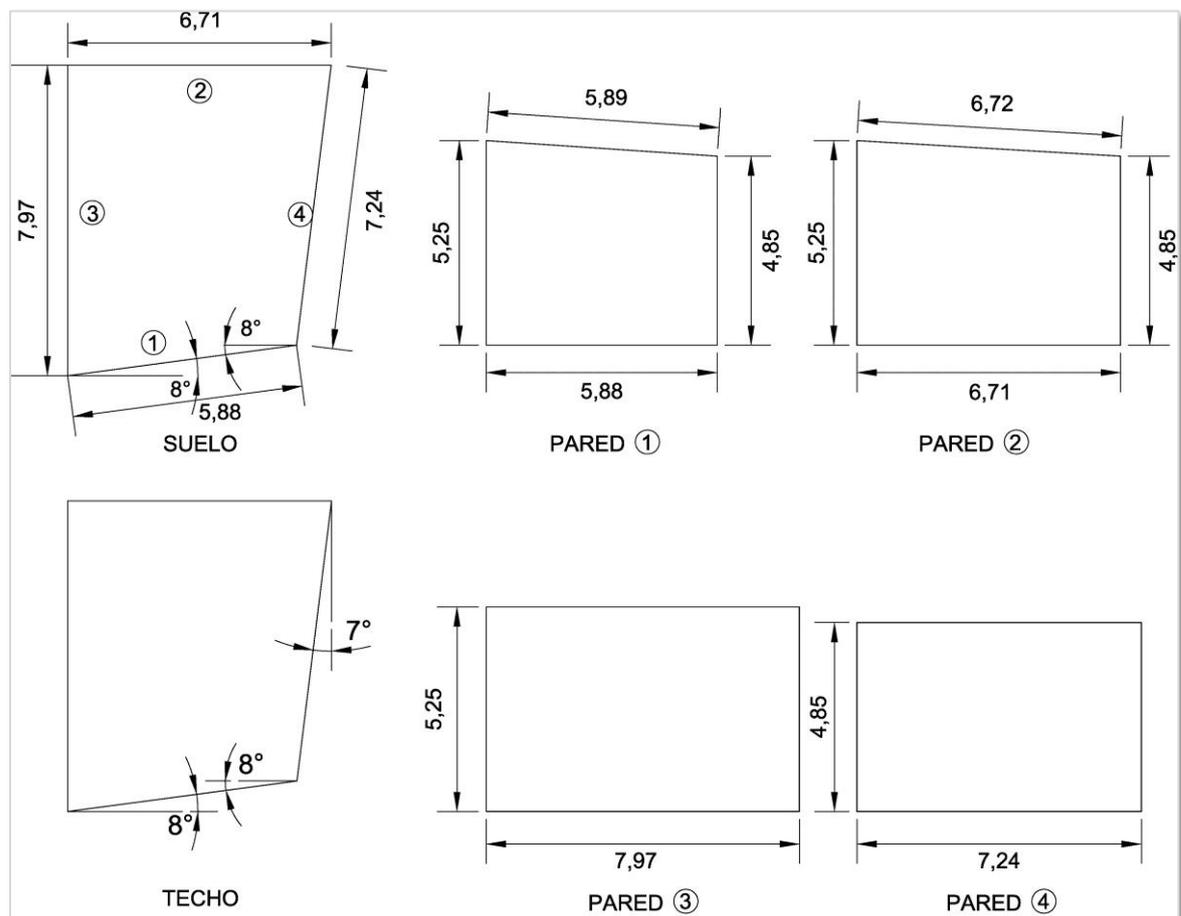


Figura 1: Dimensiones de las seis superficies interiores de la cámara reverberante

Con el objetivo de evitar la presencia de modos propios en la cámara, en particular los de más baja frecuencia, se evitó, ya en su diseño y construcción, el paralelismo entre todas las superficies enfrentadas, incluidas las paredes, el techo y el suelo. Entre ellas se mantiene una angulación de entre 7° y 8°.

Todos los cerramientos están acabados con hormigón o cemento y están pintados con pintura EPOXI con objeto de minimizar la absorción acústica de todas las superficies.

El volumen de la cámara es un parámetro crítico y fundamental. Por un lado, si no es suficientemente grande, limita el tiempo máximo de reverberación; y por otro, si es grande, desplaza la baja densidad de modos propios a frecuencias muy bajas, por debajo del rango de interés, lo que nos interesa, pero a costa de una elevada absorción de las altas frecuencias debido a la alta absorción del aire. Por todo ello, las normas actuales recomiendan como volumen de compromiso para cámaras reverberantes, los 200 m³.

Nuestra cámara cuenta un volumen ligeramente superior, concretamente, $V = (238 \pm 2)$ m³, resultado que se obtiene tras dividir la cámara en seis tetraedros y realizar algunos cálculos algebraicos [4].

La superficie interior resultante sin difusores (SD) es de $S_{SD} = (236 \pm 2)$ m².

La superficie teniendo en cuenta las dos caras de todos los difusores instalados es de $S_{CD} = (284 \pm 2)$ m². Un 20,34 % mayor del estado inicial.

La longitud de la mayor diagonal interior es $D = (11,67 \pm 0,01)$ m.

III.1.2 Verificación de las normas

En primer lugar hay que comprobar que la cámara cumple las exigencias demandadas por la norma UNE-EN ISO 354:2004.

Según esta norma las cámaras reverberantes deben tener un volumen de, al menos, 200 m³. La cámara reverberante de la EPSG lo cumple, puesto que como hemos dicho anteriormente tiene un $V = 238$ m³ [4].

También hay que verificar la recomendación relativa a la relación entre la mayor diagonal interior, D, y el volumen de la cámara, V. La relación es la siguiente:

$$D < 1,9V^{1/3} \quad (6)$$

Si aplicamos la relación $1,9V^{1/3} = 11,77$ m, observamos que es ligeramente mayor que $D = 11,67$ m, por lo que también se cumple la condición impuesta.

El tiempo de reverberación (TR) de la cámara vacía es otro parámetro crucial para determinar el coeficiente de absorción de los materiales acústicos y la potencia radiada por fuentes de ruido. Por esta razón, pondremos especial atención a la ejecución de estas

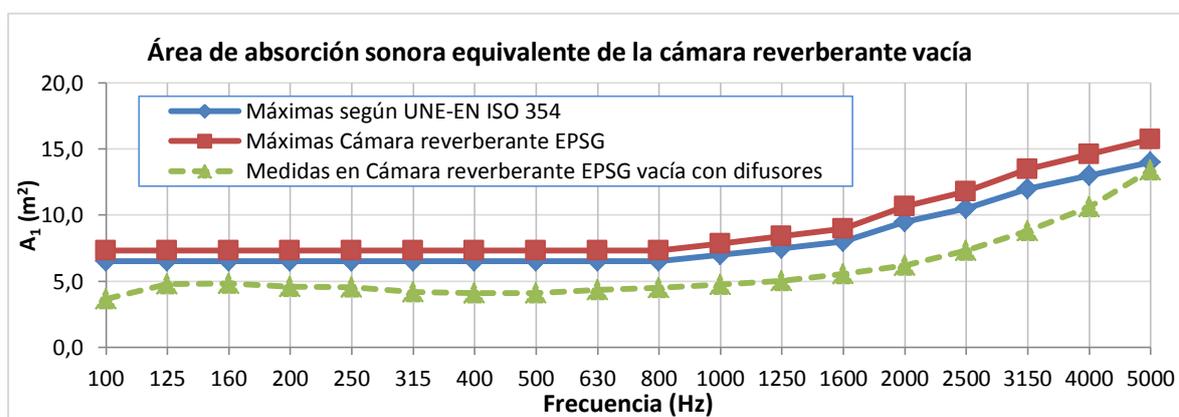
medidas de TR. La incertidumbre en estas medidas afecta mucho tanto a los cálculos de los coeficientes de absorción, como a los de potencia de fuentes de ruido.

El TR de la cámara vacía lo hemos medido usando el método de ruido interrumpido recomendado en la norma UNE-EN ISO 354:2004. En el apartado III.2 se detallan los puntos de medida y las posiciones de fuente empleados en los ensayos.

El TR de la cámara vacía cumple, en todas las bandas de tercio de octava, las exigencias de áreas de absorción máximas de la Tabla 1 de la norma [1]. Debido a que nuestra cámara es mayor de 200 m³ hay que multiplicar estos valores por la relación $(V/200)^{2/3} = (238/200)^{2/3} = 1,123$, lo que no permite medir muestras ligeramente superiores a los 12 m². Podemos comprobar en la tabla 1 del presente trabajo que se verifica este requisito.

Frecuencia (Hz)	Área de absorción sonora equivalente según Tabla 1 UNE-EN ISO 354 [m ²]	Área de absorción sonora equivalente Sin Difusores. Factor corrección x1,123 [m ²]	Área de absorción sonora equivalente. Obtenida Con difusores. [m ²]	Cumple
100	6,5	7,3	3,66	Sí
125	6,5	7,3	4,78	Sí
160	6,5	7,3	4,84	Sí
200	6,5	7,3	4,57	Sí
250	6,5	7,3	4,56	Sí
315	6,5	7,3	4,17	Sí
400	6,5	7,3	4,08	Sí
500	6,5	7,3	4,12	Sí
630	6,5	7,3	4,36	Sí
800	6,5	7,3	4,50	Sí
1000	7,0	7,9	4,75	Sí
1250	7,5	8,4	5,02	Sí
1600	8,0	9,0	5,56	Sí
2000	9,5	10,7	6,21	Sí
2500	10,5	11,2	7,31	Sí
3150	12	13,5	8,82	Sí
4000	13	14,6	10,61	Sí
5000	14	15,7	13,40	Sí

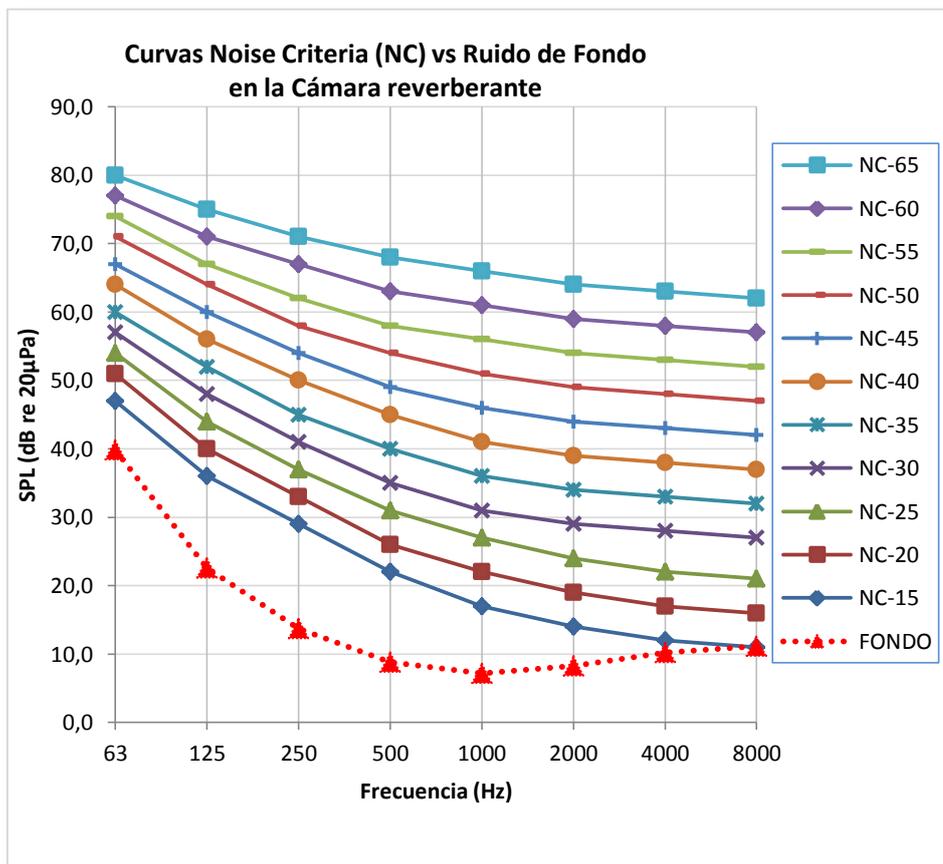
Tabla 1: Verificación del cumplimiento de las áreas máximas de absorción de cámara vacía CD.



Gráfica 1: Verificación del cumplimiento de las áreas máximas de absorción de cámara vacía CD

Como se observa en la curva a trazos de la gráfica 1, correspondiente a los valores obtenidos de las áreas de absorción equivalente de la cámara vacía (A_1) con los difusores instalados (la situación más restrictiva) es bastante lisa, está por debajo de la roja, incluso de la azul, que es aún más condicional, y no presenta baches ni picos que excedan el 15% de la media de los valores de los dos tercios de octava contiguos. Por lo que la cámara cumple con este límite impuesto por la norma y fundamental para poder continuar.

En lo relativo al ruido de fondo, la cámara reverberante está suficientemente aislada de ruidos exteriores, tanto aéreos como de vibración. En cada una de las mediciones realizadas en este trabajo se han realizado las correspondientes mediciones de ruido de fondo, cumpliéndose de forma habitual un ruido de fondo equivalente a una NC-15 [4]. En la gráfica 2 se representa una media de todas las mediciones de ruido de fondo realizadas en los ensayos de SPL, y como se puede ver, la media no supera la curva NC-15.



Gráfica 2: Media de las medidas de ruido de fondo de la cámara reverberante versus curvas Noise Criteria [4]

III.2 Norma Americana ASTM c423-09a “Standard Test Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by the Reverberation Room Method”

Esta norma americana describe unas exigencias muy similares a la europea. Añade un anexo específico, el A3, para validar la cámara a partir de una serie de mediciones con y sin una muestra determinada. El procedimiento difiere del de la norma europea, por lo que no son directamente comparables. En cualquier caso, el procedimiento evalúa la relación entre la desviación típica (s_M) de las medidas realizadas y la media de las caídas (d_M) de la reverberación, decay rate [dB/s]; sin muestra ($s_M/\langle d_M \rangle$), y con muestra ($s_S/\langle d_S \rangle$). Esta relación no debe exceder los siguientes valores máximos para que la cámara sea validada:

Bandas de tercio de octava, Hz	$s_M/\langle d_M \rangle$	$s_S/\langle d_S \rangle$
100	0,11	0,07
125	0,07	0,04
160	0,04	0,04
200	0,03	0,04
250	0,03	0,03
315	0,03	0,03
400	0,03	0,03
500	0,02	0,02
630	0,02	0,02
800	0,02	0,02
1000	0,02	0,02
1250	0,02	0,02
1600	0,02	0,02
2000	0,02	0,02
2500	0,02	0,02
3150	0,02	0,02
4000	0,02	0,02
5000	0,02	0,02

Tabla 2: Valores relativos máximos del decay rate [dB/s] en cámara reverberante vacía y con muestra.

Este trabajo no incorpora esta validación según la norma americana, excede los límites impuestos para el mismo, pero será conveniente realizarlo; y si fuera necesario, habría que hacer los ajustes a la cámara para que cumpla este requisito; por este motivo se propone como una de las futuras líneas de trabajo.

IV. Difusividad normativa del campo sonoro en cámara reverberante.

La norma UNE-EN ISO 354:2004 ya desvela desde su misma introducción (*ver Apdo. II.1*) la declaración de intenciones relativa a cómo debe ser una cámara reverberante correcta y bajo norma. Es decir, el campo sonoro generado en el interior de la cámara ha de aproximarse lo máximo posible a un campo difuso, tanto durante la generación del campo sonoro como durante las caídas una vez cesa la emisión de la fuente de ruido [2], con fines de normalización de las mediciones entre diferentes laboratorios.

Lo más relevante de esta introducción es lo relativo a la obtención de una distribución de probabilidad uniforme en cuanto a los ángulos de incidencia sobre todas las superficies del recinto, incluida la muestra; de conseguirse, la cámara será tanto más difusa. Y este es el objetivo de este trabajo de investigación, aumentar la difusividad de la cámara reverberante colocando paneles difusores como indica la misma norma, para aumentar los ángulos de incidencia sobre todas las superficies de modo que se minimice la importancia de la naturaleza de estas.

Se va a ejecutar el Anexo A de la norma UNE-EN ISO 354:2004, que no es informativo, sino normativo. Se llevará a cabo, y se evaluará el efecto de colocación de los difusores planos en la cámara reverberante del Campus de Gandía de la UPV.

No se puede pasar por alto que se trata de un anexo normativo, lo que obliga a cumplirlo si se desea realizar mediciones bajo las prescripciones de dicha norma, de modo que los resultados que se obtengan sean comparables con los de otros laboratorios.

Por el contrario, la norma americana trata este aspecto de forma no obligada, aunque será difícil conseguir la validación de la cámara (*ver Apdo. III.2*), que sí es obligada según su anexo A3, si no se colocan los difusores en la cámara. Es otra manera de pedir lo mismo.

El anexo de la UNE-EN ISO 354:2004 consta de dos apartados, el primero habla de los difusores; y el segundo, de cómo comprobar la difusividad y conseguir el ansiado campo difuso.

Por la relevancia que tienen en este trabajo se transcriben, a continuación, sendos apartados:

A.1 Difusores

Se puede conseguir una difusividad adecuada empleando difusores fijos y/o giratorios. Idealmente, estos elementos difusores deben estar formados por láminas de baja absorción

acústica y con una masa por unidad de superficie de aproximadamente 5 kg/m^2 . Se recomiendan difusores de distintos tamaños, entre $0,8 \text{ m}^2$ y 3 m^2 (una cara). Las láminas, distribuidas por todo el volumen, deben estar ligeramente curvadas y orientadas al azar.

Si se emplean difusores giratorios, la frecuencia de repetición de las caídas de nivel y la de rotación del difusor no deben estar en las proporciones de los primeros números enteros.

A.2 Comprobación de la difusividad

Se selecciona una muestra de ensayo adecuada, por ejemplo, una muestra de 5 cm a 10 cm de espesor, de un material absorbente poroso homogéneo que, en condiciones óptimas, tiene un coeficiente de absorción sonora mayor de 0,9 en el rango de frecuencias de 500 a 4000 Hz. (Algunas lanas de vidrio, lanas de roca o espumas de poliuretano cumplen este criterio).

Se monta la muestra de ensayo conforme al apartado 6.2.

Se realizan las mediciones de absorción sonora de la muestra de la forma siguiente:

- a) sin difusores;
- b) con un pequeño número de difusores fijos (aproximadamente 5 m^2 de área); y
- c) con cantidades crecientes de difusores fijos en incrementos de aproximadamente 5 m^2 de área.

Para cada serie de mediciones, se calcula el valor medio de los coeficientes de absorción sonora, en el rango de 500 a 4000 Hz, y se dibujan estos valores en función del número (área total) de difusores empleados en cada caso.

Debe obtenerse que el coeficiente de absorción sonora medio se aproxime a un máximo manteniéndose después constante al aumentar el número (área total) de difusores.

El número óptimo (área) de difusores es aquél con el que se alcanza este valor constante.

Si se emplean difusores giratorios, debe probarse que la difusión resultante es equivalente a la conseguida por el procedimiento descrito anteriormente.

NOTA: Se sabe por experiencia que, en cámaras paralelepípedicas, 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.

V. Desarrollo del trabajo final de máster

Una vez establecidos los objetivos, los fundamentos teóricos, y analizadas las normas que dan soporte a este trabajo, se procede a explicar el desarrollo del trabajo realizado. Comenzando por explicar cuál era el estado inicial de la cámara reverberante previo a la colocación de los paneles difusores.

V.1 Descripción detallada del estado inicial de la cámara reverberante

A Junio de 2012, la cámara reverberante del Campus de Gandía de la UPV se encuentra, estructuralmente hablando, en una condiciones ligeramente diferentes a las de su diseño y construcción de 1997, y su primera caracterización en 1998 [7].

En 2003, se procede a su adaptación estructural con el objetivo de poder medir la potencia de ruido de difusores, rejillas y compuertas de aire según la norma UNE-EN ISO 5135:1999 [9]. Esta intervención implicó hacer en el centro del techo, un orificio rectangular de aproximadamente 1 m^2 por donde poder pasar los tubos de aire; y un segundo agujero, también rectangular, de aproximadamente $0,5 \text{ m}^2$, en la pared 4 (*ver Figura 1*), por donde dar salida al retorno del aire.

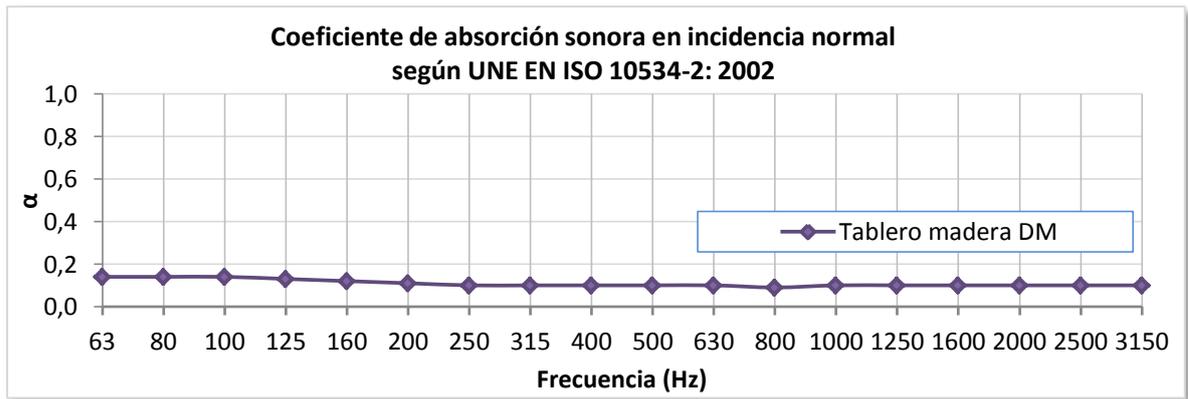
Una vez realizada esta intervención no se ha revisado en profundidad la caracterización completa de la cámara reverberante.

Siempre ha existido un tercer orificio, el “pasa-cables”, de 12 cm de diámetro. Nunca ha tenido un sellado específico que garantizase que no resonara. Simplemente, en cada ensayo, el usuario ha tenido que ingeniar una manera de sellarlo para sus medidas.

Para el presente trabajo se procedió, antes que nada, a sellar los tres orificios con material lo menos absorbente posible, con el objetivo de no aumentar la superficie equivalente de absorción A_1 de la cámara.

El sellado del orificio del techo y de la pared se hizo, en primer término, con tableros de madera de una densidad de 7 kg/m^2 y un coeficiente de absorción acústica en tubo de Kundt (incidencia normal) de alrededor de 0,1 entre 63 y 3150 Hz (*ver Gráfica 3*), medidos según la norma UNE-EN ISO 10354-2:2002.

En la gráfica 3 podemos ver los resultados de absorción de la madera utilizada. Vemos que en ningún caso se supera la barrera de 0,2 que es a partir de cual se considera que un material es absorbente.



Gráfica 3: Coeficiente de absorción en incidencia normal del tablero de madera usado para sellar los orificios de la cámara.

La madera del retorno fue finalmente sustituida, por razones estrictamente estéticas, por una plancha de metacrilato de 15 mm de espesor con una densidad de $17,5 \text{ kg/m}^2$. Y aun menos absorbente que la madera.

También se ha tenido la precaución de rellenar todo el ancho del muro con material absorbente de fibras de poliéster (PET) con el objetivo de minimizar posibles resonancias. Está previsto colocar una segunda placa de metacrilato por la cara exterior para mejorar el aislamiento acústico con la zona de control de cámaras.



Fotografía 1: Sellado del retorno con tablero de madera DM



Fotografía 2: Sellado del retorno con metacrilato de 15 mm.

La madera del orificio superior se ha mantenido por razones de operatividad en los ensayos de potencia de ruido de difusores de aire (*Ver Fotografía 3*).

Para el orificio pasa-cables se ha preparado una tapa adecuada de fácil apertura y cierre, de baja absorción acústica (plástico rígido preformado transparente); y al igual que en el retorno de aire, una vez pasados los cables, se rellena completamente de material absorbente de fibras de poliéster (PET) para asegurarnos de que no resuene.



Fotografía 3: Sellado del orificio del techo con tablero de madera



Fotografía 4: Sellado del agujero "pasa-cables" con tapa de plástico

La cámara se pintó en 2006. En gris, las paredes y el suelo; y el techo en blanco por razones de luminosidad. La pintura es Tipo EPOXI, una resina que mezclada con un catalizador cristaliza y se endurece enormemente lo que minimiza la absorción acústica de las superficies de la cámara.

Todas las mediciones realizadas en el presente trabajo han sido realizadas con los rieles de cortinas instalados por no observarse que produzcan ruido alguno, que resuenen o que pudieran entorpecer el desarrollo del presente trabajo o cualquier otro. Además, se consideran elementos prestacionales de la cámara reverberante que no influyen, en modo alguno, en las mediciones que se realizan en ella.



Fotografía 5: Rieles para la medición de cortinas

V.2 Metodología

La metodología de ensayo es la que dictamina la norma UNE-EN ISO 354:2004.

En los siguientes sub-apartados, se especifican todos los detalles tenidos en cuenta en las mediciones de este trabajo.

V.2.1 Muestra de ensayo

Para ensayar la muestra patrón utilizaremos el procedimiento para absorbentes planos del apdo. 6.2.1 de la norma [1].

La norma marca que la muestra debe tener un área entre 10 m^2 y 12 m^2 . Pero como se ha comentado anteriormente (*Apdo. III.1.2.*), nuestra cámara reverberante tiene un volumen, V , mayor de 200 m^3 , por lo que el límite superior para el área de la muestra de ensayo puede incrementarse por el factor $(V/200 \text{ m}^3)^{2/3} = 1,123$, es decir, podemos ensayar muestras algo más grandes, de hasta $13,5 \text{ m}^2$.

El área elegida depende del volumen de la cámara y de la capacidad de absorción de la muestra de ensayo. Cuanto mayor sea la cámara, mayor debe ser la superficie de la muestra. Para muestras con bajos coeficientes de absorción, se debe elegir el área de superficie límite superior. Pero, en nuestro caso, la muestra patrón va a ser de muy elevada absorción, con un coeficiente de absorción mayor de 0,9 de 500 Hz a 4.000 Hz, por lo que se decide usar una superficie intermedia, concretamente $12,15 \text{ m}^2$.

La muestra patrón a ensayar se coloca directamente sobre el suelo de la cámara reverberante en una superficie rectangular de $4,05 \text{ m} \times 3 \text{ m}$. Lo que da una relación anchura/largo de $3 \text{ m} / 4,05 \text{ m} = 0,74$, que esta entre 0,7 y 1 como marca la norma [1]. Se coloca de forma que ninguna parte dista menos de 1 m de las aristas de la cámara. De hecho, se aprovecha para marcar en el suelo una línea perimetral a 1 m de las paredes que delimita la zona de exclusión donde no se puede medir ni colocar la muestra. También se evita que los bordes de la muestra se coloquen paralelos a la arista más próxima de la cámara.

Con el fin de evitar que los bordes de la muestra absorban sonido, se sellan como indica el montaje tipo A de los especificados en el anexo B de la misma norma [1]. Para ello, se utiliza un marco perimetral de madera, sólido, sin huecos, que se coloca muy pegado a la muestra para no dejar ningún espacio de aire entre la muestra y el marco, ni entre la superficie de la cámara y el marco. El marco de madera empleado es de 25 mm de espesor

(12,5 mm es el espesor mínimo). El marco queda bien ajustado a la muestra y a la superficie de la cámara. Y la cara expuesta del marco está nivelada con la superficie de la muestra a 80 mm exactos.

La medición del tiempo de reverberación de la cámara vacía se hace sin muestra y sin el marco de madera que evita la absorción acústica de los laterales, se deja totalmente vacía como indica la norma [1] en su apartado 6.2.1.3.

V.2.2 Temperatura y humedad relativa

Las variaciones de temperatura y humedad relativa que tengan lugar durante el transcurso de una medición pueden afectar al tiempo de reverberación medido, especialmente en altas frecuencias y con humedades relativas bajas. Estas variaciones se describen cuantitativamente en la Norma ISO 9613-1:1993.

Las mediciones deben realizarse con la cámara vacía y con la cámara conteniendo la muestra de ensayo bajo condiciones de temperatura y humedad relativa tales que los ajustes debidos a la absorción del aire no difieran significativamente.

En nuestro caso, la humedad relativa de la cámara siempre ha estado dentro de los márgenes marcados por la norma: una humedad de como mínimo 30% y como máximo 90%, y la temperatura siempre ha estado por encima de los 15° C (mínimo) durante todo el ensayo. En todas las mediciones se aplican las correcciones por el cambio en la absorción en el aire tal y como queda descrito en el apartado 8.1.2.3 de la norma [1].

También se ha procurado, dentro del tiempo de reserva de la cámara del que disponíamos, que la muestra de ensayo alcanzase el equilibrio con la temperatura y la humedad relativa de la cámara antes de realizar cada ensayo.

Cada informe de medida incluye sus valores registrados de temperatura y humedad.

V.2.3 Micrófonos, posiciones de medida y fuentes de ruido

Se han empleado micrófonos omnidireccionales de Brüel and Kjaer Type 4190 de 50 mV/Pa de sensibilidad.

Para este trabajo, donde pretendemos caracterizar toda la cámara reverberante, hemos realizado las mediciones de nivel de presión sonora (NPS o SPL) sobre una matriz ortogonal de 30 puntos de medida que distan 1 m entre ellos y están a más de 1 m de cualquier superficie de la cámara y de la muestra de ensayo. Podemos ver la matriz de puntos de medida en la figura 2.

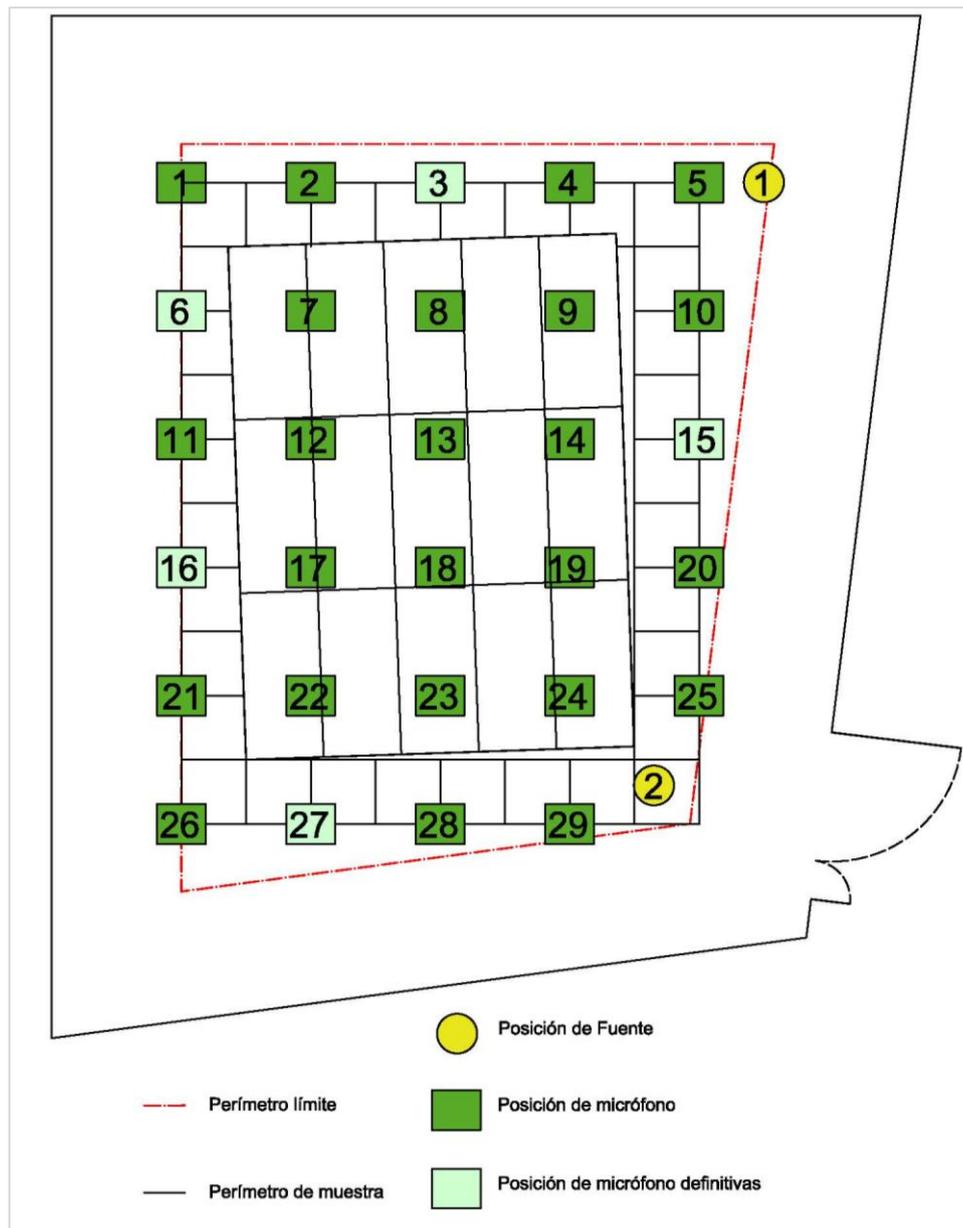


Figura 2: Puntos de medida de micrófonos y posiciones de fuente.

El campo sonoro en la cámara reverberante se genera con una fuente sonora con patrón de radiación omnidireccional, marca Brüel and Kjaer Type 4292, colocada a 2 m de altura y se emplean 2 posiciones diferentes de fuente sonora que distan más de 3 m entre ellas (ver *Figura 2*).

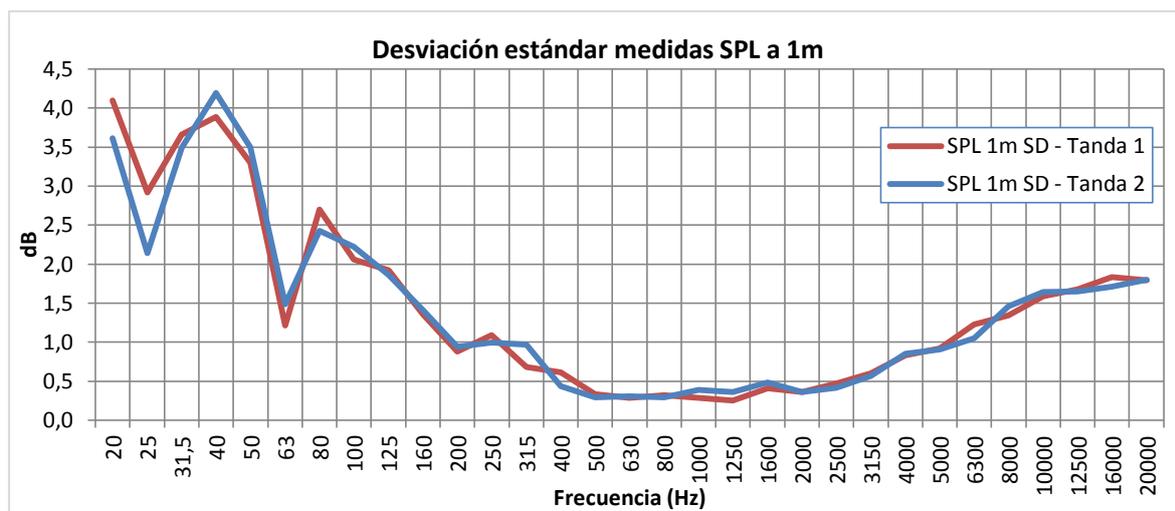
Con esta distribución de puntos de medida y posiciones de fuente hay posiciones de micrófono que distan menos de 1,5 m entre ellas, y que no distan más de 2 m de la fuente sonora, incumpliendo la norma; pero para el caso que nos ocupa es más relevante tener datos de todas las posiciones y mantener la regularidad espacial, que respetar los límites impuestos en la norma. Esta condición sí que se tendrá en cuenta más adelante, cuando con

los datos de las mediciones decidamos los 6 puntos de medida definitivos con los que se aconsejará realizar los futuros informes según la normativa.

V.2.4 Medición de los niveles de presión sonora (NPS o SPL)

Las medidas de niveles de presión sonora se realizan, para cada una de las dos posiciones de fuente de ruido, en las 30 posiciones de medida descritas, y a cuatro alturas: a 1 m, 1,5 m, 2 m y 2,5 m. Por lo que, en total, realizamos 240 medidas de NPS de 30 segundos de duración, tanto para la situación inicial sin los difusores instalados, como para la situación final, con todos los difusores instalados.

Para descartar la necesidad de tener que hacer más de una medida por punto y aligerar el número de ensayos, se repite una segunda tanda de los 30 puntos a 1 metro de altura con fuente en posición 1 en cámara vacía sin difusores. Tras analizar datos, comprobamos que efectivamente, la desviación estándar es aceptable y descartamos tomar más de una medida de 30 segundos por posición de micro, altura y posición de fuente (ver Gráfica 4).



Gráfica 4: Desviación estándar entre medidas de SPL a 1 metro en CV-SD realizadas en dos tandas.

V.2.5 Medición de los tiempos de reverberación

La norma [1] describe dos métodos de medida de las curvas de caída de nivel: el método de la señal de ruido interrumpida y el método de la respuesta impulsiva integrada. Se optó por hacer uso del primer método.

La curva de caída medida con el método de la señal de ruido interrumpida es el resultado de un proceso estadístico y es obligatorio promediar varias curvas de caída o tiempos de reverberación, medidos en una posición de altavoz y micrófono, para obtener una repetibilidad adecuada. En estas medidas se han promediado 3 curvas de caída, el mínimo

estipulado, para cada posición de micrófono y fuente. El método de la respuesta impulsiva integrada de un recinto es una función determinista y no está sujeta a desviaciones estadísticas, por lo tanto no es necesario promediar. Sin embargo, para el presente trabajo, se ha dejado aparte puesto que requiere una instrumentación y un procesado de datos algo más sofisticados que el método de la señal de ruido interrumpida y excede el volumen de trabajo. Se deja como línea de futuro comparar resultados midiendo con los dos métodos.

El número de curvas de caída de nivel medidas en posiciones diferentes debe ser como mínimo 12 (6 por posición de fuente), nosotros hemos hecho 20 (10 por posición de fuente) en cada ensayo y, como hemos dicho anteriormente, cada uno de ellos promediará 3 caídas consecutivas.

Hemos usado dos posiciones de fuente sonora, el mínimo exigido, y se ha colocado, en todos los ensayos, a 2 m de altura sobre el suelo en sus dos posiciones establecidas (*ver Figura 2*).

Se permite emplear más de una fuente sonora simultáneamente si la diferencia en la potencia radiada entra dentro de una tolerancia de 3 dB para cada banda de tercio de octava. Nosotros no lo hemos considerado necesario para el presente trabajo. Aunque esta opción puede ser muy interesante para determinados ensayos puesto que si se emplea más de una fuente sonora para excitar simultáneamente la cámara, el número de curvas de caída de nivel medidas en posiciones diferentes puede reducirse a tan solo 6, lo que agilizaría mucho el trabajo en ensayos a gran escala.

Para la excitación de la cámara se ha empleado un altavoz cuya señal de entrada es ruido de banda ancha, concretamente, ruido rosa. Como el analizador trabaja en tiempo real, nos hemos asegurado de que el espectro de ruido empleado es tal que las diferencias en los niveles de presión sonora resultantes en la cámara sean menores de 6 dB en todas las bandas de tercio de octava adyacentes.

La señal de excitación ha sido lo suficientemente larga como para producir un nivel de presión sonora estacionario en todas las bandas de frecuencia de interés antes de ser interrumpido. Con el fin de obtener condiciones de campo estacionario, el tiempo de excitación debe ser al menos la mitad del tiempo de reverberación esperado. Se ha considerado el 60%. En cámara vacía, el tiempo de medida ha sido de 15 s, por lo que el tiempo de excitación de la cámara ha sido de 9 s, con 7,5 s hubiese bastado.

Se ha garantizado en todas las mediciones que el nivel de la señal de excitación antes de la caída haya sido lo suficientemente alto como para que el nivel, en decibelios, más bajo del rango de evaluación esté como mínimo 10 dB por encima del nivel de ruido de fondo (véase el apartado 7.4.1 de la norma [1]).

Al emplear una señal con un ancho de banda mayor que un tercio de octava, diferentes tiempos de reverberación en bandas de frecuencia adyacentes pueden influir en la parte inferior de la curva de caída. Por lo que se ha comprobado que los tiempos de reverberación en bandas de frecuencia adyacentes no difieren en un factor mayor del 1,5, y que por lo tanto, no es necesario medir individualmente las curvas de caída de nivel para aquellas bandas con los tiempos de reverberación más cortos empleando filtros de bandas de tercio de octava de la fuente sonora.

Como hemos comentado anteriormente, es obligatorio promediar varias mediciones tomadas en una posición de micrófono/altavoz con objeto de reducir la incertidumbre de la medición causada por desviaciones estadísticas. El método de promediado empleado es el de “promediado de conjunto” que es el que ofrece el equipo de medida. Si se desea que la repetibilidad esté dentro del mismo rango que la repetibilidad producida por el método de la respuesta impulsiva integrada, el número de promedios debe ser al menos diez (*véase el apartado 8.2 de la norma [1]*).

El sistema de adquisición utilizado es de promediado exponencial cuya salida es una secuencia discreta de muestras de la curva continua. La constante de tiempo debe de ser de al menos $T/20$, nosotros hemos seleccionado la mínima del equipo, 20 ms, que aunque es muy inferior a la sugerida, y por lo tanto, no muy necesaria, si que nos ofrece una representación muy exacta de lo que ocurre en cada caída, lo que es útil para validar o no cada medida en el mismo momento de realizarla.

La evaluación de las curvas de caída de cada banda de frecuencia comienza 5 dB por debajo del nivel inicial de presión sonora. El rango de evaluación ha sido de 20 dB, es decir, hemos medido el T20. El fin de este rango ha estado siempre por lo menos 10 dB por encima del nivel de ruido de fondo del sistema de medida como se puede comprobar en las medidas realizadas en cada ensayo de los niveles de ruido de fondo.

V.2.6 Precisión e incertidumbre

La incertidumbre global de la medición de TR está influenciada por dos efectos. El primero es la incertidumbre de los tiempos de reverberación medidos. Este efecto es particularmente importante cuando se emplea el método de la señal de ruido interrumpida.

El segundo factor causa de incertidumbre se debe a los límites de reproducibilidad. Se produce por el equipo completo de medición incluyendo la cámara reverberante y el método de montaje. Las variaciones debidas a las características del laboratorio están siendo investigadas mediante pruebas entre laboratorios cuyos datos aún no se han hecho públicos.

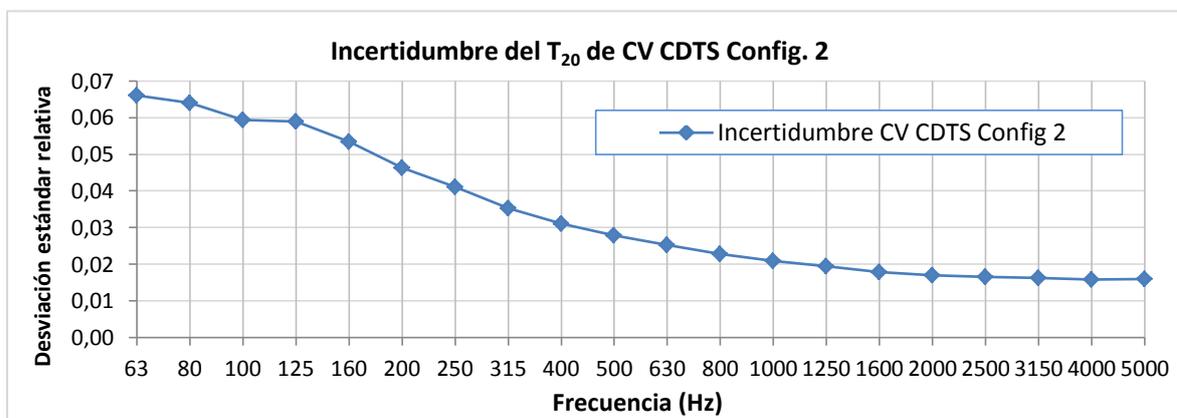
En cuanto a la repetibilidad de los tiempos de reverberación medidos se sabe que la desviación estándar relativa del tiempo de reverberación T₂₀, evaluada en un rango de caída de 20 dB, puede estimarse mediante la siguiente fórmula (véase el Informe Técnico ISO/TR 140-13 para más detalles):

$$\varepsilon_{20}(T)/T = \sqrt{\frac{2,42 + 3,59/N}{fT}} \quad (1)$$

Donde:

- $\varepsilon_{20}(T)$ es la desviación estándar del tiempo de reverberación T₂₀;
- T es el tiempo de reverberación medido;
- f es la frecuencia central de la banda de tercio de octava;
- N es el número de curvas de caída evaluadas.

Un ejemplo de la desviación estándar obtenida de la medición del T₂₀ de cámara vacía con difusores en 20 posiciones con 3 repeticiones de caída en cada posición se ilustra en la gráfica 5. Que corresponde perfectamente con la curva ejemplo de la Fig. 1 de la norma.



Gráfica 5: Ejemplo de desviación estándar relativa del T₂₀ de CV CDTS Config. 2

V.3 Instrumentación y su configuración

El equipo empleado en todas las medidas, tanto las de SPL, como para las de TR, como para las de ruido de fondo es el siguiente:

- De las opciones disponibles en el laboratorio, se decidió usar el analizador Symphonie, de la marca 01dB, con número de serie 282. Es Tipo 1, está homologado para este tipo de mediciones y dispone de dos canales y salida de generador.
- Los micrófonos omnidireccionales son dos Type 4190 de la marca Brüel and Kjaer.
- La fuente de ruido dodecaédrica es una Type 4292 de la marca Brüel and Kjaer.
- La etapa de potencia es el modelo 2716 de Brüel and Kjaer.
- La temperatura y humedad se ha medido con una sonda calibrada TESTO 635-2.

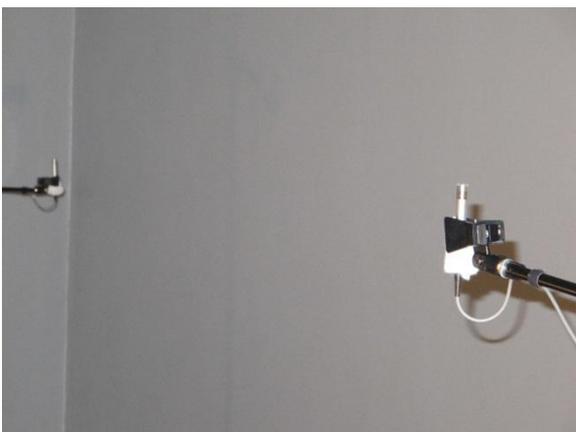
A continuación, se pueden ver algunas imágenes del equipo de medida:



Fotografía 6: Rack de equipos de medida.



Fotografía 7: Fuente de ruido omnidireccional.



Fotografía 8: Micrófonos de medida.



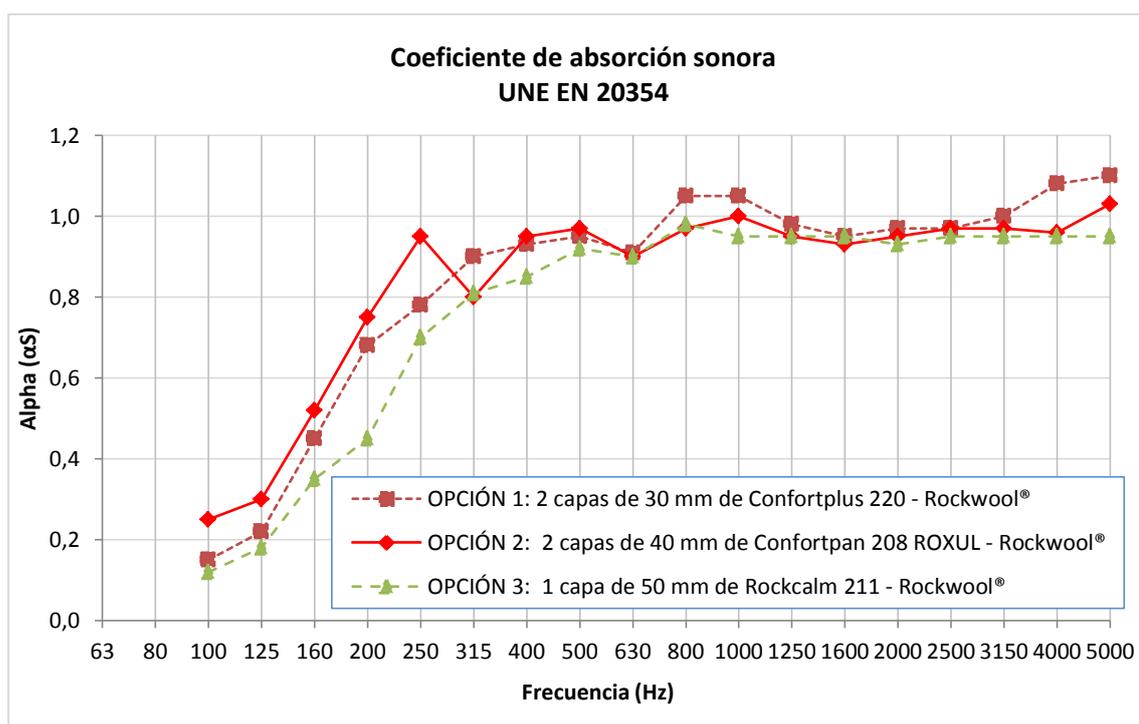
Fotografía 9: Sonda de temperatura y humedad.

V.4 Elección de la muestra patrón.

Para realizar el ajuste de la difusión en la cámara reverberante, el anexo A de la norma [1] nos marca que debemos usar alrededor de 12 m² de algún material homogéneo con coeficientes de absorción de 0,9 o superior, de 500 Hz a 4000 Hz, y con un espesor entre 50 mm y 100 mm.

Tras buscar y analizar las diferentes opciones de muestras patrón que pudieran ser válidas para el ajuste de cámara, finalmente, se seleccionaron tres compuestos de lana de roca de la casa Rockwool® que cumplieran las especificaciones necesarias. Por gentileza de la empresa Rockwool®, disponemos de los tres informes de sus ensayos acústicos, realizados en 2003, según la norma UNE-EN 20354:1993 en el Instituto de acústica “CETEF - Leonardo Torres Quevedo” del CSIC [8]. Estos serán una buena referencia de los resultados que debemos obtener, cómo mínimo.

Las curvas de los tres materiales preseleccionados son las siguientes:



Gráfica 6: Coeficiente de absorción de los materiales seleccionados como posibles muestra patrón.

Como podemos observar, las tres opciones superan el 0,9 de coeficiente de absorción de 500 Hz a 4000 Hz, como estipula la norma para este ajuste de la difusión.

La muestra patrón seleccionada finalmente fue la OPCIÓN 2: 80 mm en dos capas superpuestas de lana mineral *Confortpan 208 ROXUL* de 40 mm de espesor y 30 kg/m^3 de densidad, de la marca ROCKWOOL®.

La principal razón no fue técnica, era la única muestra en stock en los distribuidores locales. Las otras dos referencias eran un poco especiales y no eran fáciles de conseguir. También hubo razones económicas, es la referencia más barata de las 3 (59,07 € las dos balas necesarias). Las dimensiones de placa y cantidad de placas por bala son perfectas debido a que en cada bala vienen 15 placas de 60 cm de ancho por 135 cm de largo, en total $12,15 \text{ m}^2$; por lo que colocando dos capas en 5 filas de 60 cm por 3 columnas de 135 cm se obtiene una superficie $12,15 \text{ m}^2$ y 80 mm de espesor sin tener que cortar ni preparar nada.



Fotografía 10: Bala de lana de roca Confortpan 208 Roxul de Rockwool®.



Fotografía 11: Colocación de la muestra patrón en la cámara reverberante.

V.5 Los paneles difusores y su instalación

Una vez realizadas todas las medidas de la cámara en su estado inicial sin difusores se continuó con el diseño de los paneles difusores.

Se valoró fabricar los paneles difusores en madera o metacrilato, ambos superan los 5 kg/m² para espesores razonables (menos de 10 mm).

Finalmente se opta por usar metacrilato de las siguientes características:

- Incoloro.
- 6 mm de espesor,
- Tiene una densidad de 1,19 g/cm³, es decir, 7,140 kg/m²;
- El coste en metacrilato es asumible, unos 60 €/m².
- Se parte de placas de grandes dimensiones: 3050 mm x 2030 mm.
- La entrega es de un día para el otro si los cortes son rectos.

V.5.1 Primera tanda: Difusores de techo de metacrilato

Se comenzó por diseñar e instalar los difusores que se iban a suspender del techo. Se habla con la empresa suministradora, Monje Hnos. de Burjassot, y se hace el pedido de los siguientes 6 difusores, según los siguientes cortes de las placas grandes:

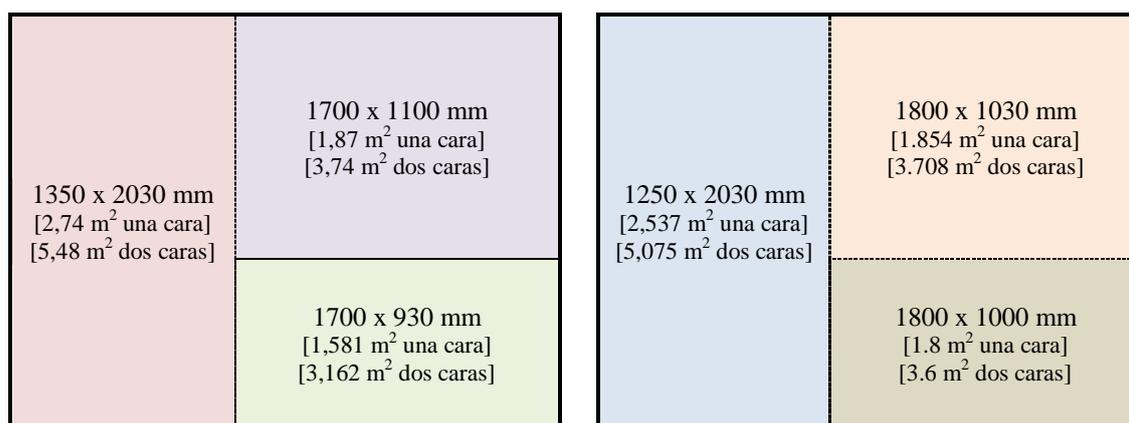


Figura 3: Diseño de los cortes de los 6 paneles difusores de techo de metacrilato [mm]

El jueves 28 de junio, por la tarde, los entregan.

Ese mismo día por la tarde se alquila un andamio con ruedas para llegar a los 5 metros de altura del techo de la cámara. El viernes 29 se monta el andamio y se deja todo preparado para comenzar el montaje de los difusores de techo el siguiente lunes 2 de julio.

Para montarlos se colocan 30 cáncamos en el techo dispuestos en dos líneas perimetrales (ver Figura 4), una primera a 50 cm de las paredes, y otra que contornea el orificio central del techo de la cámara. De este modo, la versatilidad a la hora de tener que colocar los difusores de diferentes maneras es muy elevada.

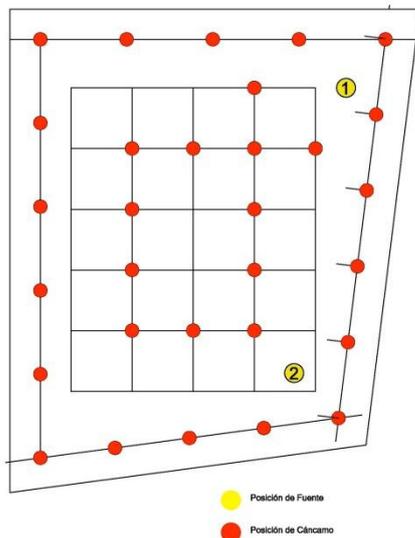


Figura 4: Plano de disposición de los cáncamos del techo.



Fotografía 12: Colocando los cáncamos del techo con pernos.

En los difusores también se colocan cáncamos en las esquinas, y se suspenden de los cáncamos del techo con cuerda de polyester y mosquetones. Una vez ajustadas las posiciones definitivas de cada panel se sustituirá la cuerda por tirantes de acero.



Fotografía 13: Ejemplo de un panel difusor suspendido del techo.



Fotografía 14: Colocando difusores.

Con los 6 difusores del techo montados, se procedió a medir de nuevo nuestra muestra patrón como se describe en el siguiente apartado VI.2.

V.5.2 Segunda tanda: Difusores de suelo y paredes de madera

Para comprobar qué ocurre aumentando el número de difusores antes de encargar más de metacrilato, se hizo una segunda tanda de medidas añadiendo paneles de madera de

diferentes dimensiones (entre $0,8 \text{ m}^2$ y $2,5 \text{ m}^2$ por cara), esta vez apoyándolos en el suelo y paredes de la cámara. Estos difusores se disponen aleatoriamente en el suelo en distintas posiciones. Se añade una superficie de aproximadamente 12 m^2 , a los 24 m^2 que ya había en el techo. Y se procede a medir de nuevo nuestra muestra patrón como se describe en el apartado VI.3.

V.5.3 Tercera tanda: Difusores definitivos de paredes y suelo, de metacrilato

Tras analizar resultados de las dos mediciones anteriores, se diseñan los difusores de paredes y suelo definitivos y los encargamos el 4 de julio. En total, 9 difusores de una superficie total de 24 m^2 . Es decir, si sumamos la superficie de los 15 difusores instalados en el techo, paredes y suelo, se ha añadido una superficie de difusión de algo más del 20% ($20,33\%$) de la superficie de la cámara (236 m^2).

Los 9 difusores de paredes y suelo son los siguientes:

550 x 1000 mm [0,55 m ² una cara] [1,1 m ² dos caras]	2500 x 1000 mm [2,5 m ² una cara] [5 m ² dos caras]	1050 x 1100 mm [1,15 m ² una cara] [2,3 m ² dos caras]	2000 x 1100 mm [2.2 m ² una cara] [4.4 m ² dos caras]
550 x 1030 mm [0,567 m ² una cara] [1,133 m ² dos caras]	2500 x 1030 mm [2,575 m ² una cara] [5,150 m ² dos caras]	1050 x 930 mm [0,977 m ² una cara] [1,953 m ² dos caras]	1000 x 930 mm [0.93 m ² una cara] [1.86 m ² dos caras]
			1050 x 930 mm [0,977 m ² una cara] [1,953 m ² dos caras]

Figura 5: Diseño de los cortes de los 9 paneles difusores de paredes y suelo de metacrilato [mm]

En este pedido también incluimos las dos tapas rectangulares de $1200 \times 600 \text{ mm}$ de metacrilato de 15 mm de espesor para sellar el orificio de retorno de aire, de modo que quedasen unas tapas definitivas y de fácil manipulación.

Para la colocación de los difusores de paredes y suelo se han usado cáncamos y soportes de aluminio preformado sin cavidades resonantes como tubos, etc. Estos soportes, son en realidad soportes de pared para televisores planos de hasta 21 kg (Marca AGRI, modelos P7 y P8), por lo que han sido perfectos para nuestros fines, y muy económicos.



Fotografía 15: Colocación de los difusores definitivos de paredes y suelo.



Fotografía 16: Difusor de pared con soportes tipo cáncamo y aluminio.

Los dos difusores que se apoyan en el suelo se han fijado al suelo con tacos de goma que impiden su desplazamiento, y cualquier tipo de vibración.

A continuación, se exponen algunas fotografías con el montaje definitivo finalizado:



Fotografía 17: Difusores de techo 2, 4, 5 y 6.



Fotografía 18: Difusores de techo 3 y 4.



Fotografía 19: Difusor de pared 14.



Fotografía 20: Difusores de suelo 12 y 13.

VI. Mediciones y resultados

VI.1. Ensayos del estado inicial. SPL y TR en cámara reverberante sin difusores

Tras preparar la cámara, del 1 al 6 de junio de 2012 (sellando orificios), y tras marcar en el suelo los 30 puntos de medida y los dos de fuente (F1 y F2), como se ha descrito en los apartados V.1. y V.2.3. Se comenzó con la primera tanda de medidas el jueves 7 de junio.

VI.1.1. Ensayos de SPL en cámara reverberante sin difusores

Se abordaron, en primer lugar, las medidas de nivel de presión sonora (SPL) en cámara vacía (CV) sin difusores (SD).



Fotografía 21: Fuente en posición F1.



Fotografía 22: Medida de SPL en cámara vacía sin difusores a 1 metro de altura. Puntos 3 y 18.

Una vez realizas las 240 medidas de SPL: 30 medidas para cada altura (1 m, 1,5 m, 2 m y 2,5 m) y cada posición de fuente (F1 y F2), se procedió a analizar los datos obtenidos.

Para hacer el análisis con mayor agilidad se programó una aplicación en Matlab[®] que nos permite visualizar los niveles de presión sonora para cada frecuencia y posición de fuente, en cada plano horizontal y en cada plano vertical de medida (*ver Imagen 1*).

El principal objetivo de este primer análisis de SPL es seleccionar las 10 posiciones de medida de TR para los siguientes ensayos.

Las posiciones de medida de TR se seleccionan tras analizar los resultados con esta potente herramienta. Se eligen 10 puntos de entre los 120 posibles de nuestra matriz tridimensional de posiciones (30 posiciones por 4 alturas). Son los 10 puntos que tienen unos niveles de presión más homogéneos y que cumplen los siguientes criterios de selección:

1. Están a más de dos metros de las posiciones de fuente.

2. No son los más problemáticos según la experiencia acumulada en mediciones realizadas hasta el momento.
3. No caen demasiado dentro de la posición de colocación de las muestras.
4. Los niveles SPL son bastante homogéneos.

Los 10 puntos seleccionados están a 2 m de altura por dos razones: el análisis de los SPL a 2 metros es el que menos desviación estándar presenta de las cuatro alturas estudiadas, y además, facilita la medición al no tener que ajustar la altura de los trípodes que sujetan los micrófonos en cada cambio de posición.

Las cinco parejas de puntos para medir el TR, uno en cada canal del equipo de medida, son las siguientes:

Canal 1 del Symphonie	Canal 2 del Symphonie
Pto. 2 (2m)	Pto. 14 (2m)
Pto. 3 (2m)	Pto. 15 (2m)
Pto. 6 (2m)	Pto. 16 (2m)
Pto. 7 (2m)	Pto. 27 (2m)
Pto. 8 (2m)	Pto. 26 (2m)

Tabla 3: Puntos seleccionados para medir TR con el Symphonie

Por lo tanto, en cada medición del coeficiente de absorción se hacen 20 medidas de TR, promediando 3 caídas para cada una de las medidas. 10 en cada posición de fuente (F1 y F2). La norma nos exige 12 (mínimo), por lo que de este modo se tiene la posibilidad de descartar hasta 4 puntos de medida si en algún ensayo hubiera resultados no coherentes, cosa que no ha ocurrido. En cualquier caso, el esfuerzo está en el montaje, no en la medición, medir en 10 puntos en lugar de 6 no tiene un coste elevado de tiempo.

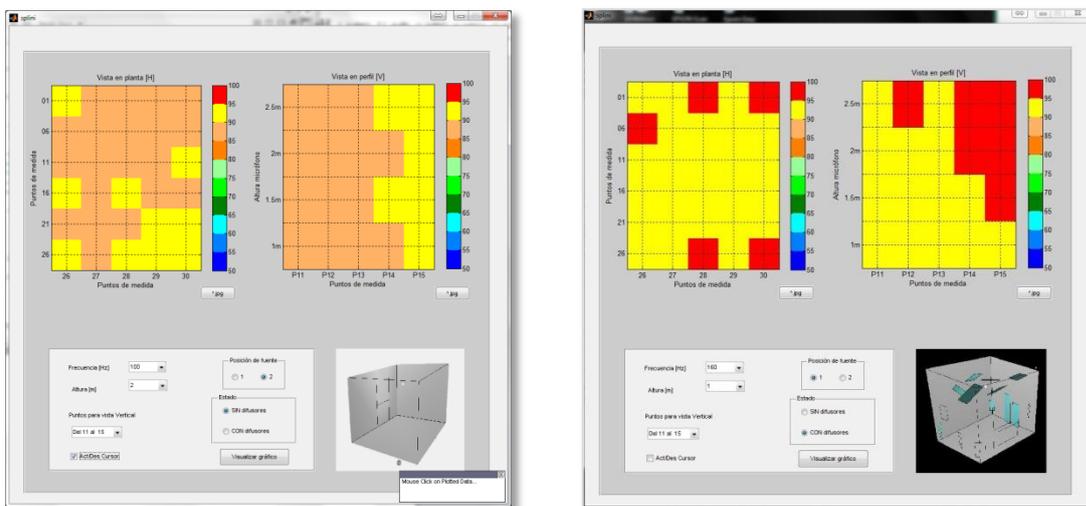


Imagen 1: Programa de Matlab® para los análisis de SPL: SD y CD.

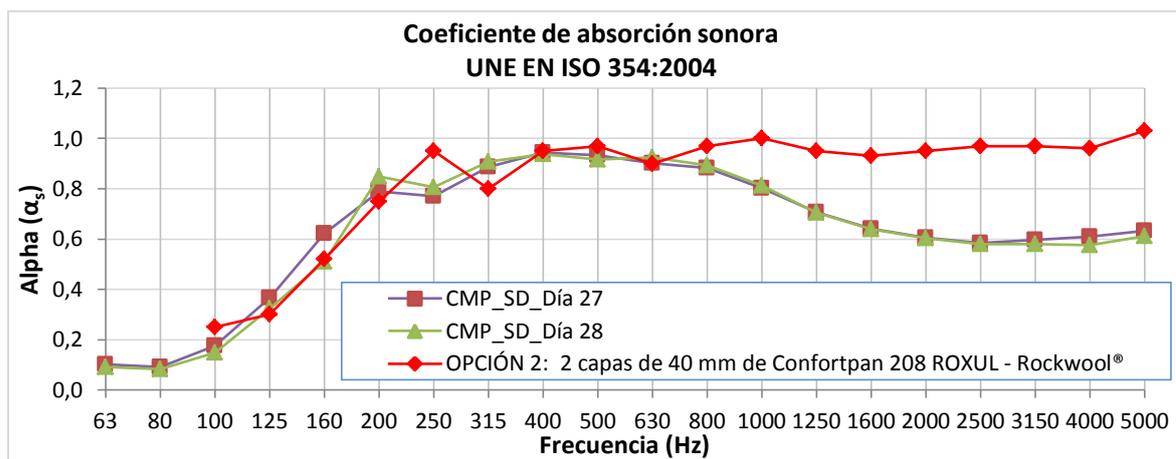
VI.1.2. Ensayos de TR en cámara reverberante sin difusores

El 25 de junio medimos el tiempo de reverberación (TR) de cámara vacía sin difusores (SD) en los 10 puntos previamente seleccionados.

El 26 por la mañana se ensayo el TR de cámara vacía pero con el montaje de compuertas de aire para la empresa *MADEL*[®] *Air Diffusion*, es decir, con el retorno abierto para disponer en el futuro de esa base de datos.

El mismo miércoles 26 por la tarde conseguimos la muestra patrón en uno de los almacenistas de Gandia. Al día siguiente, jueves 27 de junio, por la mañana preparamos la madera para sellar el borde; y por la tarde medimos TR con la muestra patrón.

Tras ver los resultados, esa misma tarde, y comparándolos con los que teníamos de referencia de la propia casa *Rockwool*[®], se observó mucha diferencia y se decidió repetir el ensayo el viernes 28 por la mañana, obteniendo exactamente el mismo resultado que en el día anterior (*ver Gráfica 7*).



Gráfica 7: Coeficiente de absorción de la muestra patrón en cámara sin difusores, medidas del jueves 27 y del viernes 28, comparadas con la curva del fabricante.

La curva de coeficiente de absorción entregada por el fabricante es la de la de color rojo. Al superponer los tres resultados observamos que las medidas en nuestra cámara sin difusores son muy conservadoras a partir 630 Hz.

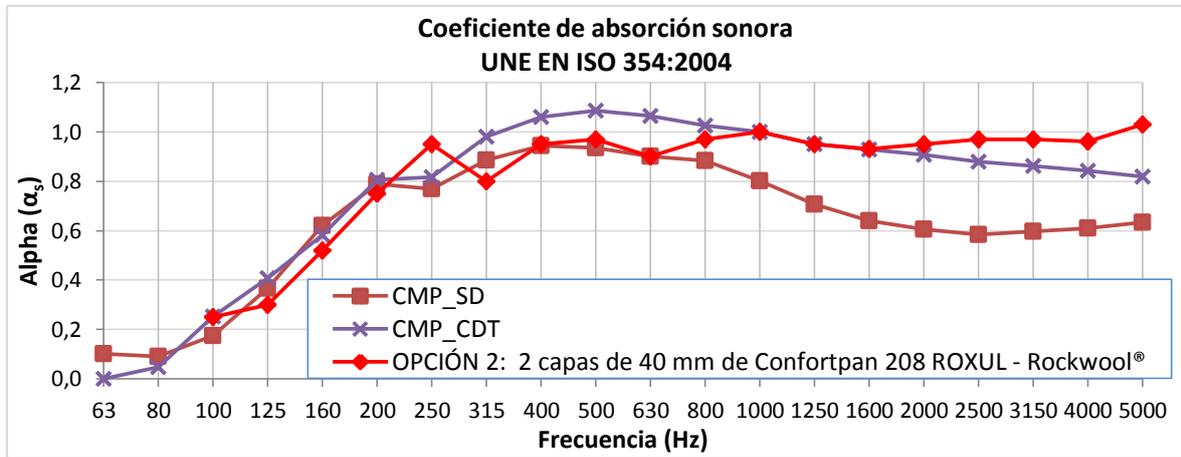
Los resultados obtenidos están lejos de parecerse a los de la certificación del fabricante en medias y altas frecuencias.

VI.2. Ensayos de TR con los difusores de techo, 24 m² (10 %)

Los 24 m² de difusores de techo descritos en el apdo. V.5.1 se empiezan a montar el lunes 2 de julio, de modo que, el martes 3 a las 13:30 ya se tenía hecho el ensayo de la muestra

patrón con difusores en el techo (CMP CDT). Por la tarde se ensayó el TR de la cámara vacía con difusores en el techo (CV CDT).

El resultado obtenido del coeficiente de absorción sonora de la muestra patrón, una vez instalados los difusores en el techo, es el siguiente (ver Gráfica 8):



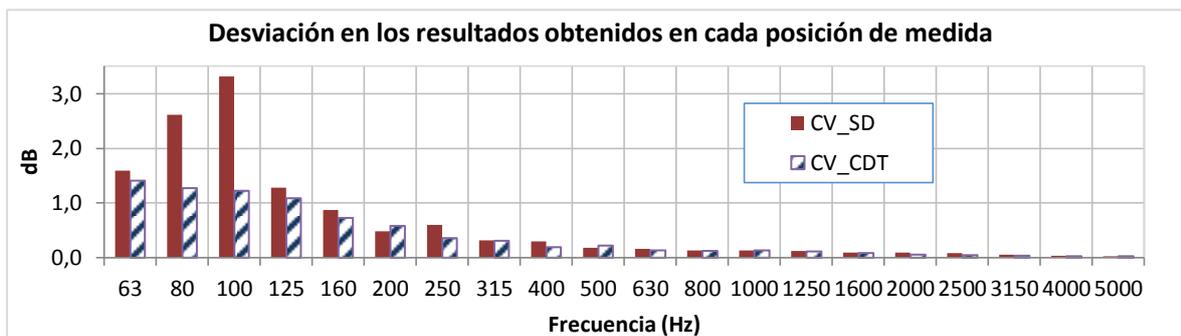
Gráfica 8: Coeficiente de absorción de la muestra patrón en cámara con difusores en el techo (CDT).

Si comparamos el resultado con el obtenido antes de colocar difusores (SD) podemos ver (curva CMP_CDT) una evidente mejora en la absorción sonora en altas y medias frecuencias, así como una curva más limpia, sin altibajos o baches.

Los valores de absorción superiores a 1 se deben, entre otros factores, a los procesos de difracción que en este proceso de medida y Sabine obvian como se explico en el apdo. II.8.

La gráfica 8 evidencia que aún se puede mejorar más la difusión de la cámara, puesto que a partir de 1600 Hz aún se obtiene una medición bastante conservadora. Al contrario de lo que ocurre en la banda de 315 a 1000 Hz, donde aumentamos el coeficiente de absorción bastante más que lo obtenido para Rockwool® en la cámara del CSIF.

Del estudio de la desviación estándar entre las medidas de TR sin difusores y con difusores en el techo también podemos concluir que se ha mejorado este aspecto bastante, sobre todo, en las frecuencias más bajas (ver Gráfica 9).



Gráfica 9: Comparación de la desviación estándar entre cámara SD y CDT.

VI.3. Ensayos de TR con los difusores de techo y de madera en paredes, 36 m², 15 %

Con la idea de ver cómo va a influir la introducción en la cámara de más paneles difusores, y antes de encargar más paneles de metacrilato, decidimos hacer una prueba intermedia; y, a partir de los resultados, tomar decisiones.

La prueba (explicada en el apdo. V.5.2.) consistió en colocar en paredes y suelo, aproximadamente 12 m² más de difusores, pero de madera. Tableros de entre 0,8 m² y 2,5 m² en cada cara. Dispuestos aleatoriamente en diferentes posiciones y colocaciones como podemos observar en las fotografías 23 y 24.

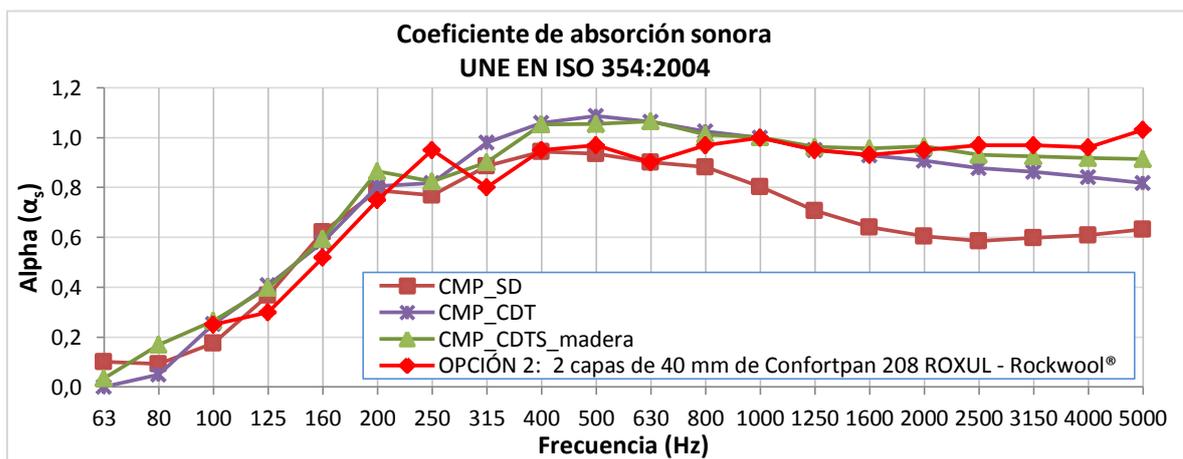


Fotografía 23: Colocación de los difusores de madera provisionales en paredes y suelo.



Fotografía 24: Difusor de madera provisional.

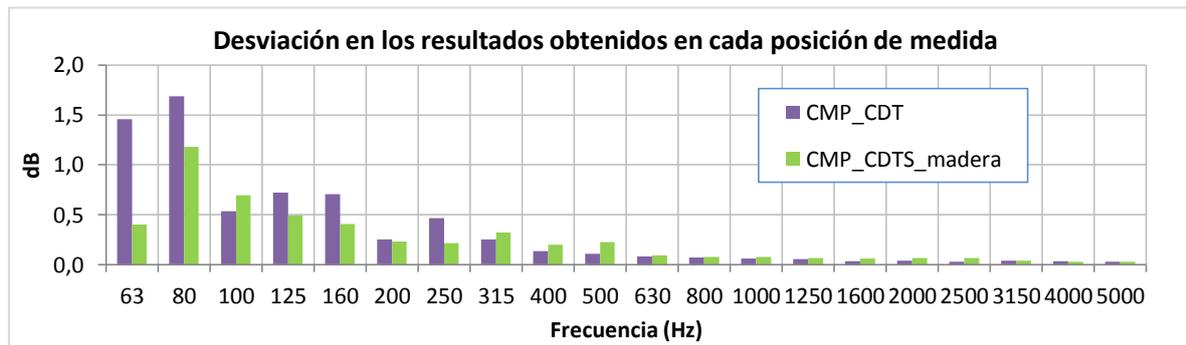
Los resultados de absorción obtenidos con los difusores de madera son:



Gráfica 10: Coeficiente de absorción de la muestra patrón en cámara con difusores en el techo, y de madera en paredes y suelo (CDTS_madera).

Podemos ver (*curva verde - Gráfica 10*) que hemos mejorado aún más el resultado del coeficiente de absorción de la muestra patrón, de nuevo, en altas frecuencias.

La desviación estándar también vuelve a mejorar en las medidas de TR con muestra patrón al añadir los difusores de madera, por lo que vamos acumulando mejoras:



Gráfica 11: Comparación de la desviación estándar entre cámara CDT y CDTS_madera.

Con estos resultados decidimos encargar en metacrilato el doble de la superficie empleada en la prueba con difusores de madera, en total 24 m², para ver qué ocurre con un 20 % de superficie de difusores (*ver Apdo. V.5.3*).

VI.4. Ensayos con los difusores de techo y paredes definitivos, 48 m², 20 %

Los nuevos 9 difusores de metacrilato (*ver Apdo. V.5.3*.) llegan el viernes 6 de julio y después de montarlos a destajo del lunes 9 al martes 10 de julio de 2012, se pudo hacer la primera medida con muestra patrón (CMP CDTS) y cámara vacía (CV CDTS), el mismo martes día 10, por la tarde.

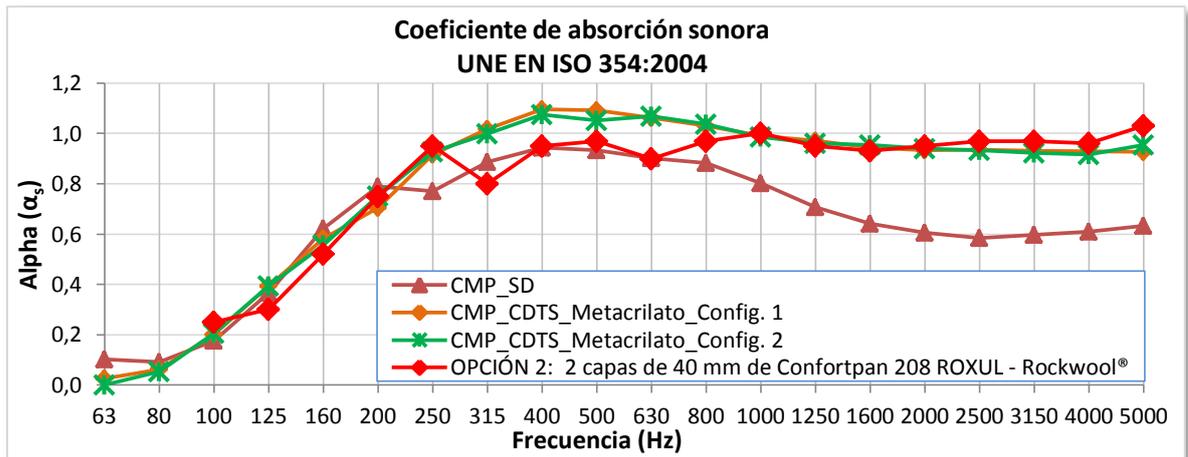
Los difusores de pared fijados con soportes de aluminio permiten ser colocados en diferentes posiciones. A la primera disposición de difusores de pared se la denominó *Configuración 1*.

Se cambió la disposición de dos de los difusores de pared, los dos que están situados a 2 metros de altura, y se la denominó *Configuración 2*. Se volvió a medir para comprobar si la posición de los difusores afecta mucho o poco, y si mejoran o no la difusión.

Los resultados obtenidos en ambas medidas son los representados en la gráfica 12.

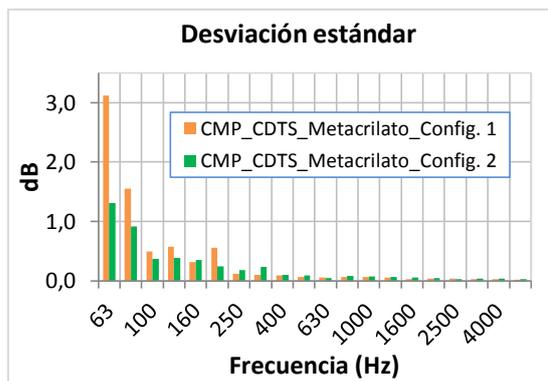
Si comparamos las curvas, podemos ver que las dos mediciones realizadas con la configuración 1 y 2, mejoran todas las realizadas anteriormente. Sobre todo, en altas frecuencias. Obteniéndose curvas muy limpias y sin altibajos entre bandas de tercio de octava.

Se puede observar cierta mejora de la medición con la configuración 2 respecto de la configuración 1. En 5000 Hz se produce un repunte parecido al que incluye la curva de Rockwool[®].

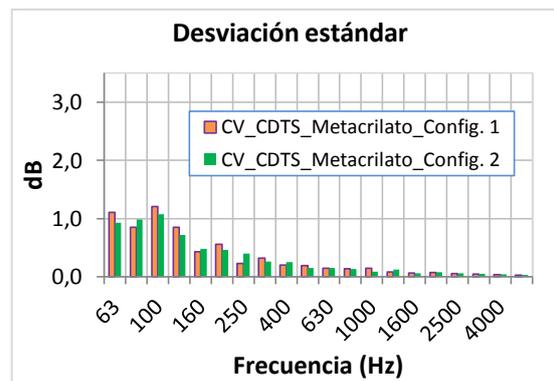


Gráfica 12: Coeficiente de absorción de la muestra patrón en cámara con difusores definitivos.

El análisis de desviación estándar de las medidas de TR entre ambas configuraciones también confirma que la Configuración 2 es mejor cuando se mide con muestra (ver Gráfica 13):



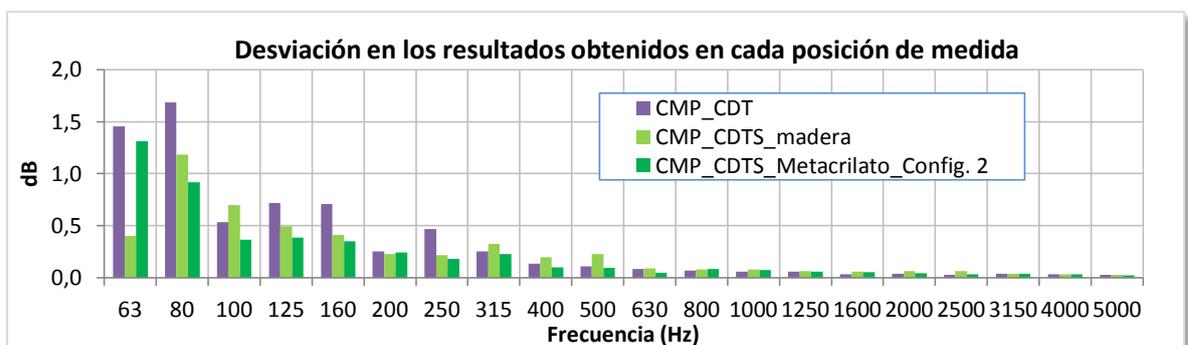
Gráfica 13: Comparación de las desviaciones estándar de TR con muestra.



Gráfica 14: Comparación de las desviaciones estándar de TR con cámara vacía.

Con cámara vacía, la diferencia entre la configuración 1 y 2 es insignificante (ver Gráfica 14).

De las tres configuraciones de difusores, la que menos desviación estándar presenta es la última ensayada (Configuración 2), como podemos apreciar en la gráfica 15:



Gráfica 15: Comparación de las desviaciones estándar de TR con cámara con muestra patrón.

VI.5. Estudio estado final. SPL y Grado de Difusión (Gd)

Una vez instalados todos los difusores y ajustados según la Configuración 2, que es la que mejores resultados nos ha dado. Se procedió a analizar y comparar los resultados de los SPL antes y después de instalar los difusores; también se analiza si ha existido una mejora en la difusividad de la cámara a partir del estudio del parámetro denominado *Grado de difusión (Gd)*.

VI.5.1. Ensayos de SPL en cámara reverberante con difusores definitivos

Se procedió a volver a medir los niveles de presión sonora (SPL) en los 120 puntos de medida, 30 por cada una de las cuatro alturas. En total, se repitieron las 240 medidas de 30 segundos para las dos posiciones de fuente.

Para analizar y comparar resultados se volvió a utilizar la misma herramienta de Matlab[®] usada para la selección de los 10 puntos de medida de TR (ver Imagen 1).

Ahora, lo que se pretende averiguar es si existe mayor uniformidad en el campo sonoro del interior de la cámara que antes de colocar los difusores. Comprobar que hay menos diferencias de nivel entre puntos de medida, y que se ha mejorado en todas las frecuencias, sobre todo, en las bajas que es donde se encontraban las mayores diferencias de niveles.

A continuación, exponemos un ejemplo representativo de los muchos posibles. Corresponde con los SPL a 100 Hz, 1 metro de altura, F1 y fila 11-15, con y sin difusores:

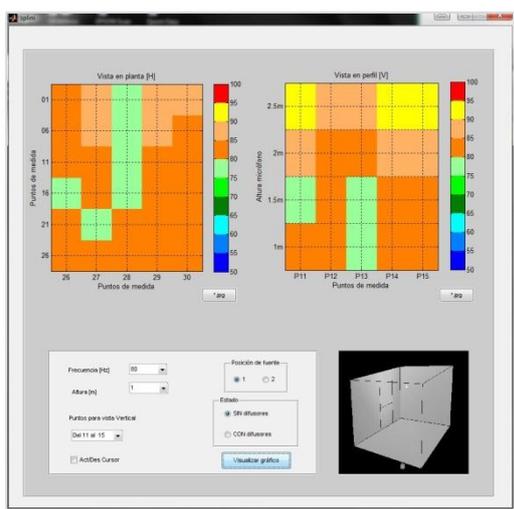


Imagen 2: SPL a 100 Hz SD a 1m fila 11-15.

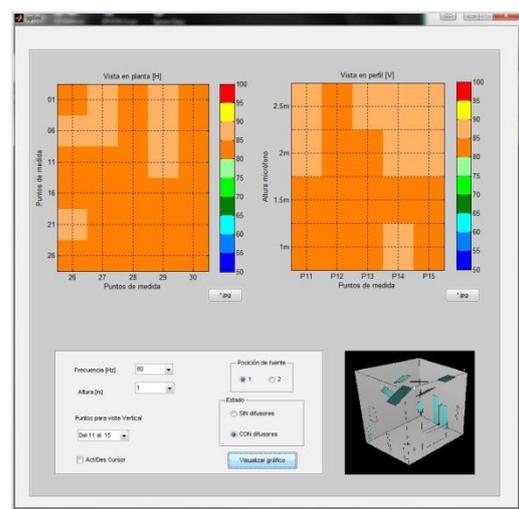
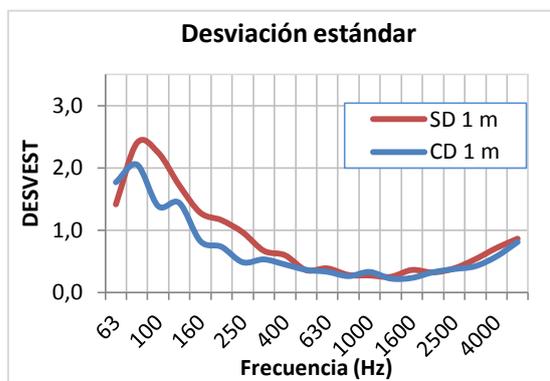


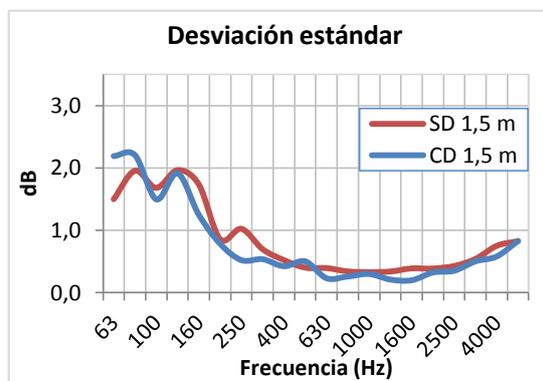
Imagen 3: SPL a 100 Hz CD a 1m fila 11-15.

Al comparar las imágenes, la uniformidad de color ya nos adelanta, a simple vista, que se ha mejorado mucho en cuanto a la distribución de la intensidad sonora en el interior de la cámara tras instalar los difusores. (Consultar el CD-ROM para ver todos los datos).

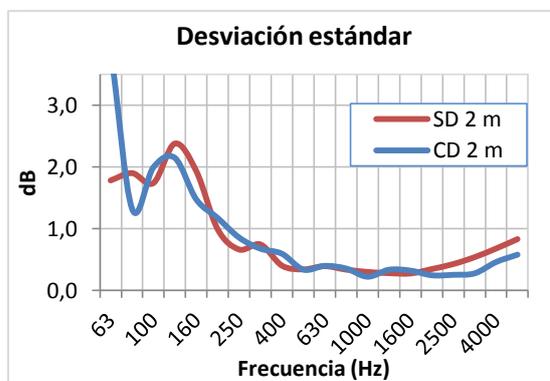
Si comparamos las desviaciones típicas de las medidas SPL obtenidas con difusores (CDTS_Config2) y sin difusores (SD), en los puntos seleccionados para medir TR los resultados son los siguientes:



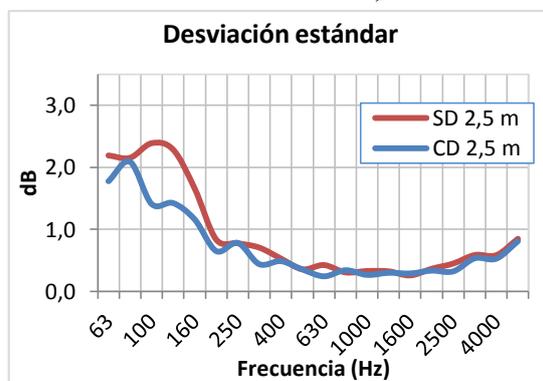
Gráfica 16: Comparación de las desviaciones estándar de SPL a 1 m.



Gráfica 17: Comparación de las desviaciones estándar de SPL a 1,5 m.



Gráfica 18: Comparación de las desviaciones estándar de SPL a 2 m.



Gráfica 19: Comparación de las desviaciones estándar de SPL a 2,5 m.

Excepto a 63 Hz, en el resto de frecuencias, y en todas las alturas de medida, se puede decir que se iguala o mejora la desviación estándar de las medidas de SPL realizadas para seleccionar los 10 puntos de medida de TR en el apdo. VI.1.

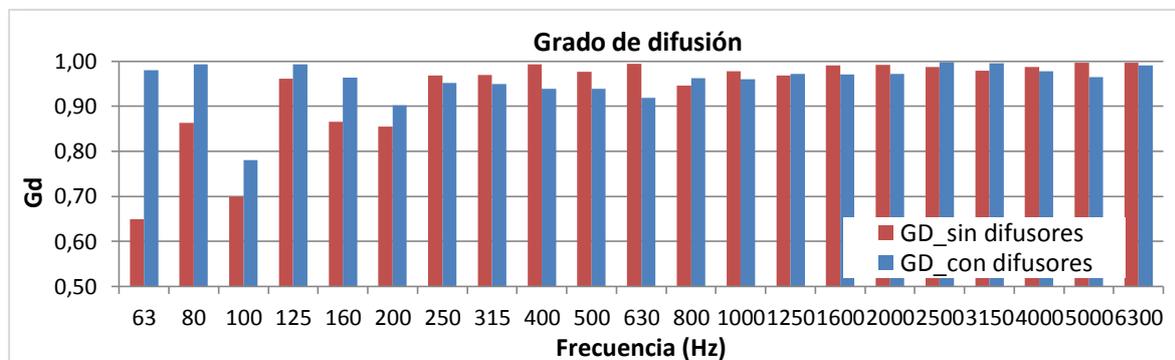
Donde menos diferencia de niveles se produce es en las medidas a 2 metros de altura, lo que coincide con el hecho de haber seleccionado previamente, como la mejor, esta misma altura; ya antes de instalar los difusores.

VI.5.2. Estudio del Grado de difusión (*Gd*)

Para hacernos una idea de lo difuso que es el campo acústico, antes y después de intervenir en la cámara reverberante, se comparan los EDT y T20 de cámara vacía. El parámetro estudiado es el *Grado de difusión* o *Gd* (ver Apdo. II.10).

Se han promediado todos los EDT y T20 medidos tanto en cámara vacía sin difusores (CV SD), como con difusores (CV CDTS_Config2); y a partir de ellos se ha calculado el Gd para cada frecuencia.

Los resultados obtenidos son los siguientes:



Gráfica 20: Comparativa del grado de difusión de la cámara antes y después de instalar los difusores.

Como se observa en la gráfica 20, el grado de difusión ha mejorado considerablemente ($Gd \approx 1$) en todas las bajas frecuencias, de 63 Hz a 200 Hz. A partir de 250 Hz se puede decir que nos quedamos igual que estábamos. Solo a 100 Hz estamos por debajo de un $Gd = 0,9$.

Esto se puede interpretar como que la cámara tenía una difusión aceptable a partir de 250 Hz y ahora es buena desde 63 Hz.

Lo que ocurre a la frecuencia de 100 Hz habrá que analizarlo en futuros trabajos para intentar conseguir que supere el Gd de 0,9 (actualmente 0,78).

También será útil estudiar otros parámetros más elaborados de valorar la difusión en cámara reverberante.

VI.6. Ensayos de control de otras muestras

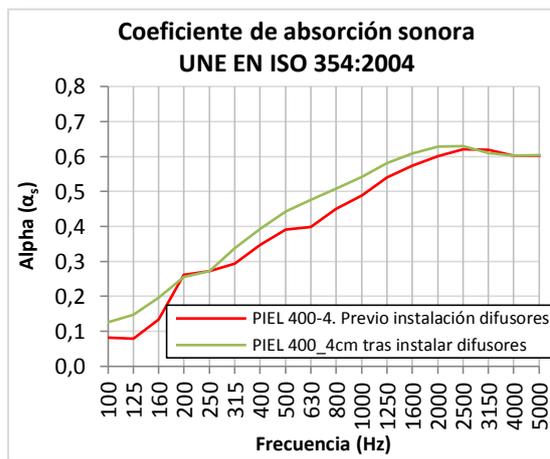
Durante el mes de julio se realizaron varios ensayos de absorción de materiales de fibra de poliéster con la nueva configuración de difusión de la cámara reverberante. Se han denominado *Ensayos de Control* porque el objetivo era comparar los resultados con sus mismas mediciones realizadas antes de dotar a la cámara de paneles difusores, es decir, con la cámara en el estado previo al de la intervención que se ha llevado a cabo.

Hay que tener en cuenta que estos ensayos previos no tapaban el agujero del retorno del aire, ni en las medidas de cámara vacía, ni en las de cámara con muestra, de la misma manera que ahora. Por lo que no son estrictamente comparables a las que se han hecho con

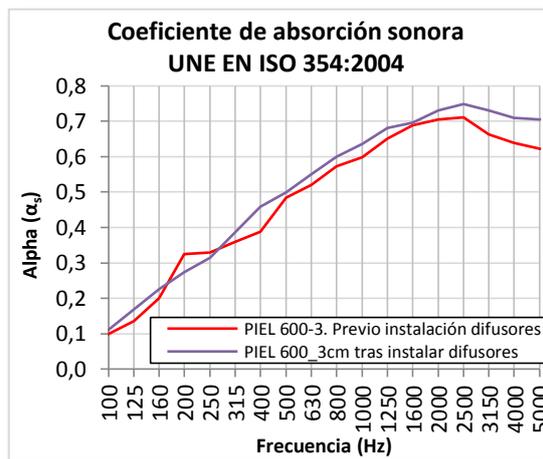
difusores. Pero, sí nos sirven para ver en qué grado se ha mejorado la medición para este tipo de materiales absorbentes.

Las configuraciones ensayadas son con montaje sobre bastidor en lugar de con borde sellado; y compararemos los resultados de ambos casos teniendo en cuenta que cámara vacía no incluye el bastidor de montaje. Aunque los bastidores no son de material absorbente, puesto que son de madera, y en ningún caso, supera el 0,2 de coeficiente de absorción, puede llegar a ser relevante su absorción puesto que un bastidor de 7 cm de altura, sin material absorbente, tiene una superficie vista de $7,875 \text{ m}^2$. Esto tiene una absorción no despreciable. Mucha de esta superficie queda oculta tras el material cuando se mide con la muestra montada en los vanos; en ese caso, la superficie vista de material de bastidor es 1 m^2 escaso, que sí es despreciable.

Los resultados de estas mediciones de control se muestran a continuación:



Gráfica 21: Coeficiente de absorción de Fibra de poliéster de 400 g/m^3 y 40 mm de espesor.



Gráfica 22: Coeficiente de absorción de Fibra de poliéster de 600 g/m^3 y 30 mm de espesor.

Los resultados en ambos casos son mejores tras instalar los difusores, las curvas de absorción son más limpias y sin altibajos. La mejora en la difusión mejora la medición de los coeficientes de absorción. Y cuanto más densa es la muestra más mejora en altas frecuencias.

Como se indicará en el apartado VII.2 de futuras líneas de investigación, será ilustrativo reensayar mediciones anteriores con la cámara con difusores. El objetivo es investigar a qué tipos de materiales, de qué naturaleza, composición y de que orden de absorción, les afecta más esta mejora de la difusión de la cámara reverberante.

También es importante ensayar otras configuraciones de materiales como los paneles perforados con plenums de aire y material absorbente; también cortinas, butacas, etc.

VII. Conclusiones y futuras líneas de investigación

VII.1 Conclusiones

1. Se ha conseguido el principal objetivo de este trabajo de investigación, se ha mejorado significativamente la difusión de la cámara reverberante de la EPSG, tras la instalación de los paneles difusores.
2. Todas las medidas realizadas antes y después de la intervención corroboran la mejora producida. La desviación estándar es ahora mejor, que sin difusores, tanto en las medidas de SPL como en las de TR.
3. Estas mejoras se pueden atribuir al aumento muy significativo, tras colocar los difusores, del promedio de ángulos de incidencia sobre las superficies de la cámara, incluida la superficie ocupada por la muestra; por lo que la distribución de ángulos de incidencia es más uniforme, y por lo tanto, la cámara más difusa. Los paneles difusores provocan reflexiones en mayor variedad de ángulos y direcciones que las que conseguían las paredes por sí solas. De modo que la probabilidad de que la muestra sea alcanzada por mayor número de reflexiones y en mayor variedad de ángulos es mucho mayor que antes.
4. Los modos propios de la sala, sobre todo, los de más baja frecuencia, siguen estando, pero más distribuidos en el volumen de la cámara, como demuestran las medidas de G_d en las frecuencias bajas (*ver Gráfica 20*).
5. Se ha bajado la frecuencia de corte de la cámara por debajo de los 125 Hz, estableciéndose en 63-80 Hz, teniendo aún que realizar algún ajuste para mejorar los datos de G_d a 100 Hz, puesto que no llega a $G_d=0,9$.
6. La uniformidad de los niveles de presión sonora (SPL) se ha mejorado significativamente, en casi todos los puntos de medida de la cámara y a las cuatro alturas estudiadas (consultar el programa de Matlab[®] incluido en el CD-ROM).
7. Es necesario y muy importante, sellar bien el efecto de borde en las medidas de absorción de materiales, puesto que usar bastidores de madera de elevada superficie sí influye en la medida del material, si se mide cámara vacía con los bastidores.
8. Se recomienda promediar 10 caídas de TR por punto de medida, en lugar de las 3 establecidas como mínimo, para igualar la repetitividad de las medidas con ruido impulsivo.

9. De los 10 puntos seleccionados para medir TR se han elegido 6 que disten al menos 1,5 m entre ellos y más de 2 m de las posiciones de fuente. Los puntos finalmente seleccionados son el 3 (2m), 6 (2m), 15 (1m), 15(2,5 m), 16(2m) y 26 (2m) (Ver Figura 6). Sería interesante fijar y medir 10, en lugar de 6, para tener la posibilidad de poder hacer descarte cuando surjan problemas en alguna medida. Y esto es muy posible que ocurra, puesto que a la difusión le afecta cualquier intervención en el interior de la cámara y cualquier banda de frecuencia puede dar como resultado valores incoherentes que habrá que descartar si no queremos trabajar con mediciones de elevada desviación estándar.

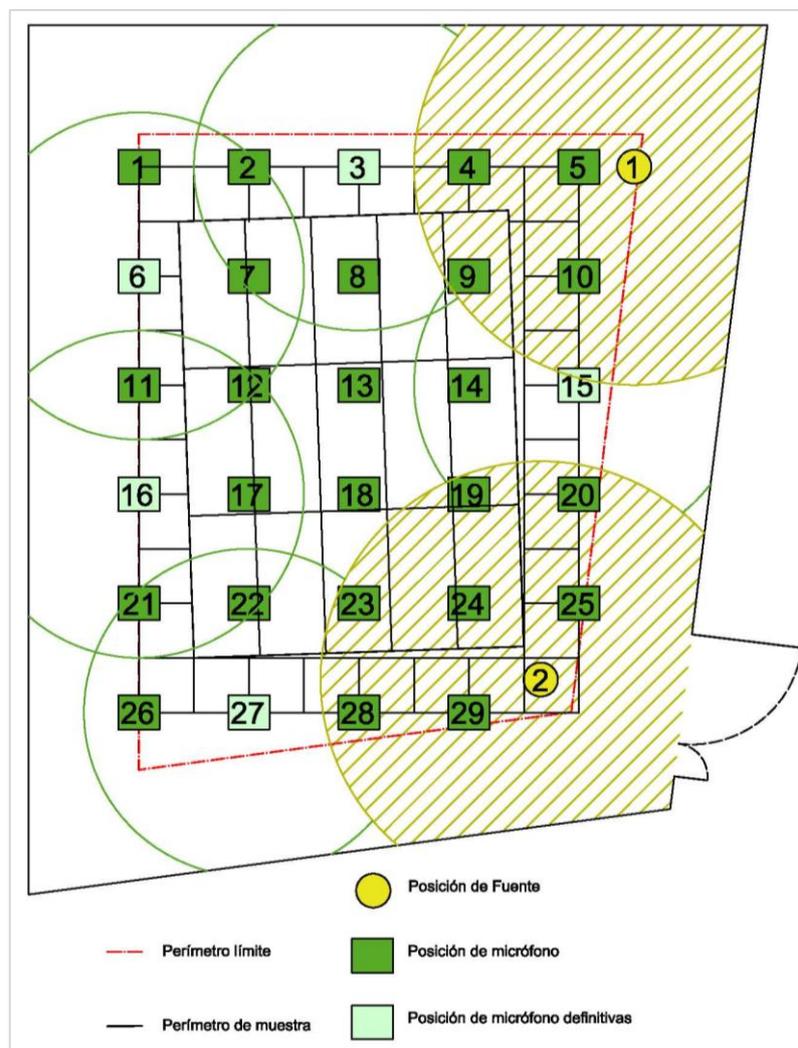


Figura 6: Puntos definitivos de medida de micrófonos y posiciones de fuente.

10. Este trabajo no ha podido verificar el cumplimiento de la norma ASTM debido a que le proceso de validación de la cámara según esta norma excede el volumen de trabajo

planteado a priori. Aunque sí podemos decir que no incumple requisito alguno que pueda impedir dicha validación.

11. Así mismo, y a falta de completarlo, se ha hecho un trabajo de adecuación del laboratorio para poder seguir realizando en él todas las medidas que ya se hacían y alguna nueva, sin que los nuevos paneles difusores interfieran en modo alguno. Dejando preparado el laboratorio para cualquiera de sus usos docentes, de investigación, desarrollo o innovación.
12. Todos los datos, cálculos, tablas, gráficas, planos y demás material adjunto de forma electrónica en el CD-ROM, quedan a disposición de cualquier uso que precise del mismo en el futuro.
13. El método de montaje de los difusores permite ser montados y desmontados con cierta facilidad y comodidad, lo que es útil si se deseara plantear una práctica docente en la que reproducir, pero a menor escala, el ajuste de difusión realizado en este trabajo.
14. El coste final del material empleado ha ascendido a 2097,61 €. Su desglose puede ser consultado en los anexos del CD-ROM.

VII.2 Futuras líneas de investigación

Se pretende que este trabajo sea el inicio de otros, aún más largos y costosos, procesos de caracterización de la cámara, puesto que quedan por responder muchas preguntas.

La presente investigación se acotó desde el inicio y se tuvo que limitar en cuanto al alcance de la misma. No se ha entrado en cuestiones relativas a los conceptos puros de qué es la difusión, la dispersión, el scattering, etc. Todo ello excedía los objetivos y alcances propuestos para este trabajo. Pero sí se ha conseguido dejar preparada la cámara reverberante para responder estas preguntas en futuros trabajos de investigación.

Algunas de las futuras líneas de investigación que quedan abiertas son:

1. Analizar las posibilidades de ajustar aún más los difusores y su orientación. Incluso evaluar si sigue siendo necesario añadir más superficie de difusión y llegar al 25%.
2. Realizar el proceso de validación de la cámara reverberante descrito en el anexo A3 de la norma americana ASTM C423-09a:2009. Los datos que tenemos con nuestra muestra patrón no son los adecuados para comprobar esta exigencia. A pesar de ello, se han hecho los cálculos con los datos que tenemos (*ver Tabla 4*), tanto para cámara vacía (CV) sin difusores (SD); como para cámara vacía (CV) y con muestra patrón

(CMP), tras instalar todos los difusores de techo y suelo (CDTS) para ver cuan cerca o lejos estamos de cumplirla.

Bandas de tercio de octava, Hz	$s_M/\langle d_M \rangle$ ASTM CV	$s_M/\langle d_M \rangle$ CV SD	$s_M/\langle d_M \rangle$ CV CDTS	$s_S/\langle d_S \rangle$ ASTM CM	$s_S/\langle d_S \rangle$ CM SD	$s_S/\langle d_S \rangle$ CM CDTS
100	0,11	0,22	0,10	0,07	0,19	0,06
125	0,07	0,12	0,07	0,04	0,10	0,09
160	0,04	0,09	0,05	0,04	0,18	0,11
200	0,03	0,05	0,05	0,04	0,09	0,09
250	0,03	0,06	0,05	0,03	0,14	0,07
315	0,03	0,03	0,03	0,03	0,15	0,10
400	0,03	0,03	0,03	0,03	0,07	0,04
500	0,02	0,02	0,02	0,02	0,05	0,04
630	0,02	0,02	0,02	0,02	0,05	0,02
800	0,02	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04
1000	0,02	0,01	0,01	0,02	0,03	0,03
1250	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03
1600	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
2000	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02
2500	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02
3150	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
4000	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
5000	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02

Tabla 4: Valores relativos máximos del TR de la cámara reverberante vacía (CV) y con muestra (CM), con difusores (CD) y sin ellos (SD).

En la tabla 4 se evidencia que la muestra no es la adecuada (quizás demasiado absorbente) y que tampoco se ha medido como se requiere en el anexo de la norma americana: promedios y desviaciones estándar: 50 caídas de TR por cada una de las 5 posiciones de micrófono, dentro de un campo difuso generado por varias fuentes que emiten ruido aleatorio de forma simultánea, y la muestra colocada en 3 posiciones diferentes no solapadas entre ellas más de un 25%. A pesar de ello, se mejoran casi todos los valores al colocar los difusores. Este es un trabajo a abordar con detalle y rigor en futuros trabajos de investigación.

3. Colocar difusores rotativos. La versión de 2011 de la ISO 3741 hace bastante hincapié.
4. Hacer un profundo estudio de los parámetros que evalúan la difusión acústica.
5. Evaluar el método de respuesta impulsiva de medida del TR para ver si mejora los resultados obtenidos, o si simplemente, es más cómodo o menos costoso. El método de la respuesta impulsiva integrada de un recinto es una función determinista y no está sujeta a desviaciones estadísticas, por lo tanto no es necesario promediar. Sin embargo, para el presente trabajo, se ha dejado aparte puesto que requiere una instrumentación y un procesado de datos algo más sofisticados que el método de la señal de ruido interrumpida. Excede el volumen de trabajo y se deja como línea de futuro comparar los dos métodos.
6. Diseñar y analizar la viabilidad de medir con las dos fuentes de ruido. La norma UNE-EN ISO 354:2004 permite emplear más de una fuente sonora simultáneamente si la

diferencia en la potencia radiada entra dentro de una tolerancia de 3 dB para cada banda de tercio de octava. Nosotros no lo hemos considerado necesario para el presente trabajo. Aunque esta opción puede ser muy interesante para determinados ensayos puesto que si se emplea más de una fuente sonora para excitar simultáneamente la cámara, el número de curvas de caída de nivel medidas en posiciones diferentes puede reducirse a tan solo 6, lo que agilizaría mucho el trabajo en ensayos a gran escala.

7. Rensayar mediciones anteriores con la nueva configuración acústica de la cámara. El objetivo es investigar a qué tipos de materiales, de qué naturaleza, composición y de qué orden de absorción, les afecta más esta mejora de la difusión de la cámara.
8. Ensayar otras configuraciones de materiales como los paneles perforados con plenums de aire y material absorbente; también cortinas, butacas, etc.
9. Será conveniente comprobar la mejora de la distribución de la intensidad acústica y su influencia en las mediciones de potencia sonora a partir de los niveles de presión en cámara reverberante. De este modo se sabría cuál ha sido el efecto de esta intervención en este tipo de ensayos de potencia.
10. El escalado y la simulación FEM se establecieron como objetivos secundarios de este trabajo. Ha sido del todo imposible incorporarlos por cuestiones de volumen de trabajo. A fecha del presente trabajo han sido numerosos los trabajos realizados por alumnos y profesores de la EPSG en esta línea. Conviene retomarlos, reanalizarlos y compararlos con los actuales datos de la cámara sin escalar. Quizás este trabajo ayude a entender qué sucede a escala y en simulación, y pueda dar pistas de cómo avanzar en estos otros dos campos del estudio de la difusión y de la reverberación, tan interesantes.
11. Otras actuaciones no acústicas son:
 - Diseñar y construir tapas de sellado específicas y de mayor calidad estética para el agujero del techo y el agujero pasa-cables.
 - Colocar señalética y vinilos con logotipos y distintivos de marca de la UPV – Campus de Gandía. Los difusores pueden ser un buen soporte.
 - Elaborar un vinilo en formato A3 para la puerta de la cámara con sus datos más significativos
 - Mejorar la iluminación, fijar los puntos de luz y colocar un interruptor.
 - Colocar de forma fija la sonda de temperatura y humedad de cámara.
 - Pintar de nuevo la cámara de color blanco para mejorar su luminosidad.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo final de carrera de la I.T.T. Imagen y sonido se lo dediqué a Celia y a mis padres. El de la Licenciatura de Comunicación Audiovisual le correspondió a Mateo, recién nacido. Este es de Pedro, reguapo, resolete, precioso.

El esfuerzo ha sido descomunal. No hablo del mío, sino del de todos los que me han ayudado a conseguir que esta tesina sea realidad en un tiempo récord. El de Celia, por hacerse cargo durante todo este tiempo y prácticamente sola, y además de su trabajo, de la casa, de los niños y de mí, para dejarme todos los ratos libres posibles, muchas gracias. Gracias a mis niños, por no olvidarse de que tienen un padre. A mi hermana Paloma, por ir a echar una mano siempre que ha podido. Y a mis padres, a Tachel, a Claudio... a todos les ha tocado algo.

Y qué decir de Laura Bertó y Carlos Hervás, se han pegado unas palizas de órdago para ayudarme. Cuántos días de verano no han acabado hasta las 8 de la tarde porque estábamos dándole vueltas a lo hecho y lo que íbamos a hacer al día siguiente; quitándose de lo suyo y los suyos por convencerme de que era posible acabar a tiempo. Alicia Martínez, todo ánimo y purita energía positiva. Al recién llegado Andrés Teira, él también lo ha sufrido un poco (pero este es gallego y ha comido mucho percebe).

Jesús Alba, re-tutor, valoro mucho que me haya vuelto a dar rienda suelta y dejado hacer, me he sentido respaldado en todo momento. Casi me olvido, ¡gracias por financiar los 2097,61 €!, espero que se amorticen. Romina Del Rey (me da que he trastocado sus planes en más de una ocasión).

También debo unos cuantos agradecimientos al resto de compañeros y excompañeros del Dpto. de Física Aplicada en Gandía. Durante muchas semanas se han hecho cargo de la situación y han sido condescendientes, por no hablar de los ánimos recibidos de todos y cada uno de ellos.

A todos, y a los que no cito expresamente, como los autores de los trabajos referenciados, y los profesores y compañeros del Máster de Ingeniería Acústica de la UPV, muchas gracias por lo que les corresponde de este trabajo, y es suyo legítimamente.

Por último, “cuidaros y dejaros cuidar”



Fernando Hernández García

En Gandía, a 5 de septiembre de 2012.

REFERENCIAS

- [1] Norma UNE - EN ISO 354:2004. Acústica. Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante. (ISO 354:2003).
- [2] Norma ASTM C423-09a: Standard Test Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by the Reverberation Room Method.
- [3] American Society for Testing and Materials (ASTM): <http://www.astm.org/ABOUT/aboutASTM.html>
- [4] L. Cremer y H.A. Müller, *Principles and applications of room acoustics*. Applied Science Publishers, Ltd. Barking, Essex, England, 1982. Vol. 2. Chapter 5. Measurement of sound absorption in the reverberant room.
- [5] J. Cops, K. Vanhaecht, Leppens, *Sound absorption in a reverberation room: Causes of discrepancies on measurement results*. Applied Acoustics 46, 1995, pp. 215-232.
- [6] J. Ramis, J. Alba, J. Martínez, J. Redondo, *The uncertainty in absorption coefficients measured in reverberant chambers: A case study*. Noise and Vibration Worldwide, Volume 36, Number 1, January 2005, pp. 7-12.
- [7] P. Pons de los Santos, Trabajo final de carrera: *Caracterización y ajuste de la cámara reverberante de la Escuela Universitaria de Gandia*. 1998.
- [8] Informes acústicos UNE-EN ISO 20354 de materiales Rockwool.
- [9] Norma UNE - EN ISO 5135:1999. Acústica. Determinación de los niveles de potencia acústica de ruido emitido por salidas de aire, unidades de salida, reguladores y válvulas mediante medición en sala reverberante. (ISO 5135:1997).
- [10] C. De la Colina, R.M. Rodríguez, F. Simón, J. Pfretzschner, A. Moreno, *Caracterización actualizada de la cámara reverberante del Instituto de acústica del CSIC*. Tecniacústica Madrid. 2000.
- [11] M. R. Schroeder, R. Gerlach, *Diffusion, room shape and absorber location influence on reverberation time*. J. Acoust. Soc. Am., Vol. 56, No. 4, October 1974.
- [12] D. Lubman, *Traversing microphone spectroscopy as a means for assessing diffusion*. J. Acoust. Soc. Am., Vol. 56, No. 4, October 1974.
- [13] J.S. Crompton, L.T. Gritter, S.Y. Yushanov, K.C Koppenhoefer, D. Magyari, *Analysis of Acoustic Response of Rooms*. Proceedings of the COMSOL Conference 2010 Boston.
- [14] L. Beranek, *Analysis of Sabine and Eyring equations and their application to concert hall audience and chair absorption*. J. Acoust. Soc. Am. 120 (3), September 2006. pp: 1399–1410.
- [15] P. D'Antonio, B. Rife, *State-of-the-art in Determining the Absorption, Scattering and Diffusion Coefficients*. RPG Diffusor Systems, Inc. And Chesapeake Acoustic Research Institute, LLC. 2010.
- [16] M.C. Iborra Torres, Trabajo final de carrera ESPG: *Medida y mejora de la difusión de la cámara reverberante (modelo a escala) de la EPSG con difusores cilíndricos*. 2004.
- [17] M. Arribas Puente, Trabajo final de carrera ESPG: *Medida de la difusividad de campos sonoros generados por la cámara reverberante de la EPSG, a escala, con difusores curvos*. 2004.
- [18] A. Hoyos Soriano, Trabajo final de carrera ESPG: *Evaluación y aumento de la difusión de la cámara reverberante a escala 1:5 de la EPSG mediante superficies planas*. 2004.
- [19] F. Arrebola Ballesteros, Tesis de Máster MIA: *Construcción de una cámara reverberante a escala para el estudio de pantallas acústicas*. 2011.