

## CUALIFICACIÓN ACÚSTICA DE UNA CÁMARA DE TRANSMISIÓN VERTICAL DE DIMENSIONES REDUCIDAS

**Navacerrada, M<sup>a</sup> Ángeles; Pedrero, Antonio; Fernández, Marta; Díaz, César.**

Grupo de Acústica Arquitectónica, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, UPM, Avda. Juan de Herrera 4, 28040 Madrid

PACS: 43.55.Br

### Resumen

En el laboratorio de Acústica y Vibraciones de la ETS de Arquitectura UPM se ha construido una cámara de transmisión vertical de dimensiones reducidas con fines de investigación y docencia. Dispone de una abertura de ensayo de área  $7,5 \text{ m}^2$ , sobre la que se ha instalado una losa de hormigón de 140 mm de espesor. Los volúmenes de las salas superior e inferior son  $13,2 \text{ m}^3$  y  $11,8 \text{ m}^3$  respectivamente. En este trabajo se muestran los ensayos realizados en la caracterización de la cámara siguiendo las directrices generales indicadas en las Normas UNE-EN ISO 10140-3 y 5: 2011.

### Abstract

In the Acoustics and Vibrations Laboratory of the School of Architecture of the Polytechnic University of Madrid it has been built a vertical transmission chamber of reduced dimensions for research and teaching activities. The chamber is provided of an opening test area of  $7,5 \text{ m}^2$ , on which a concrete slab 140 mm thick has been installed. The volume of the upper and lower rooms are  $13,2 \text{ m}^3$  and  $11,8 \text{ m}^3$  respectively. In this work we show the test conducted on the characterization of the chamber following the general guidelines specified in the standards UNE-EN ISO 140-3 and 5: 2011.

### INTRODUCCIÓN

La norma UNE-EN ISO 10140-5[1] especifica los requisitos que deben cumplir las instalaciones de laboratorio para la medición del aislamiento a ruido de impactos de forjados y revestimientos de suelos según los procedimientos descritos en las normas UNE-EN ISO 10140-3 [2] y UNE – EN ISO 10140-1 [3] respectivamente. Entre ellos que el volumen de la sala receptora no debe ser inferior a  $50 \text{ m}^3$  y se recomienda que el tamaño de la abertura de ensayo para suelos esté entre  $10$  y  $20 \text{ m}^2$ , con la arista más pequeña no inferior a  $2,3 \text{ m}$ . Además, se debe garantizar que el aislamiento acústico a ruido aéreo entre los recintos receptor y emisor sea suficientemente alto como para que el campo sonoro medido en el recinto receptor sea sólo el generado por la excitación de los impactos sobre el suelo bajo ensayo. Sin embargo, construir una cámara de estas características es costoso y se debe disponer de dicho espacio. Por ello en el Laboratorio de Acústica y Vibraciones de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Madrid se planteó la construcción de una cámara de transmisión vertical de dimensiones reducidas. Los recintos que la componen se han construido cuidando los detalles de aislamiento acústico. A partir de aquí es primordial conocer las cualidades acústicas de los recintos, medición del tiempo de reverberación y la difusión sonora. En este trabajo se presenta una caracterización preliminar de los mismos.

### DESCRIPCIÓN DE LA CÁMARA

La cámara de transmisión vertical se compone de dos recintos verticalmente adyacentes, el superior es el recinto emisor y el inferior el recinto receptor. El tamaño de la abertura de ensayo es de  $7,5 \text{ m}^2$  con una longitud de la arista más corta de  $2,1 \text{ m}$ . El volumen del recinto receptor es de  $11,8 \text{ m}^3$  y el volumen del recinto emisor es  $13,2 \text{ m}^3$ . El forjado separador consiste en una

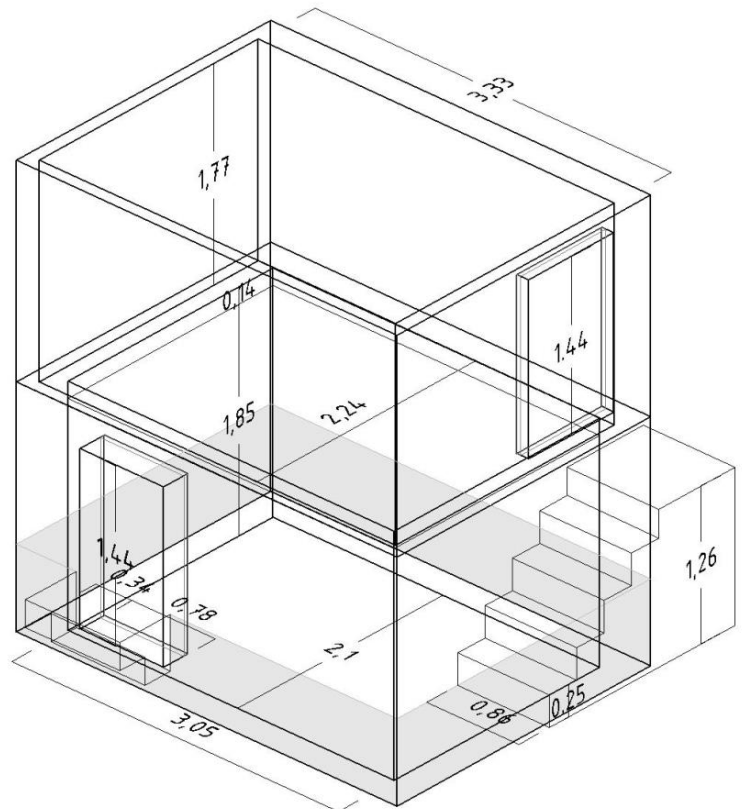
losa maciza de hormigón de 140 mm de espesor. Un croquis de la cámara de transmisión vertical así como fotos de los dos recintos que la componen se muestra en la figura 1.



**Recinto emisor (o superior)**



**Recinto receptor (o inferior)**



**Figura 1.** Fotos y croquis de la cámara de transmisión vertical del Laboratorio de Acústica y Vibraciones de la ETSAM

## MEDICIONES Y RESULTADOS

La norma UNE-EN ISO 140-5 [1] especifica las características geométricas y acústicas de las instalaciones del laboratorio para las mediciones de aislamiento al ruido de impactos. A pesar del tamaño reducido de los recintos que componen nuestra cámara vertical es recomendable cumplir los requisitos que sobre el campo acústico recoge dicha norma y que son los siguientes:

- El tiempo de reverberación en los recintos no debería ser excesivamente largo o corto. Así a frecuencias de y por encima de los 100 Hz el tiempo de reverberación no debería sobrepasar los 2 s y no ser inferior a 1 s.
- Campo sonoro difuso: grandes variaciones en el nivel de presión sonora en los recintos indican la presencia de ondas estacionarias fuertes dominantes.
- Sin transmisiones indirectas: el sonido transmitido por cualquier vía indirecta debería ser insignificante comparado con el sonido transmitido a través del elemento de ensayo. Un modo de conseguir esto es proporcionar un aislamiento estructural suficiente entre el recinto emisor y el recinto receptor.
- Que los procedimientos de medida den una repetibilidad satisfactoria.

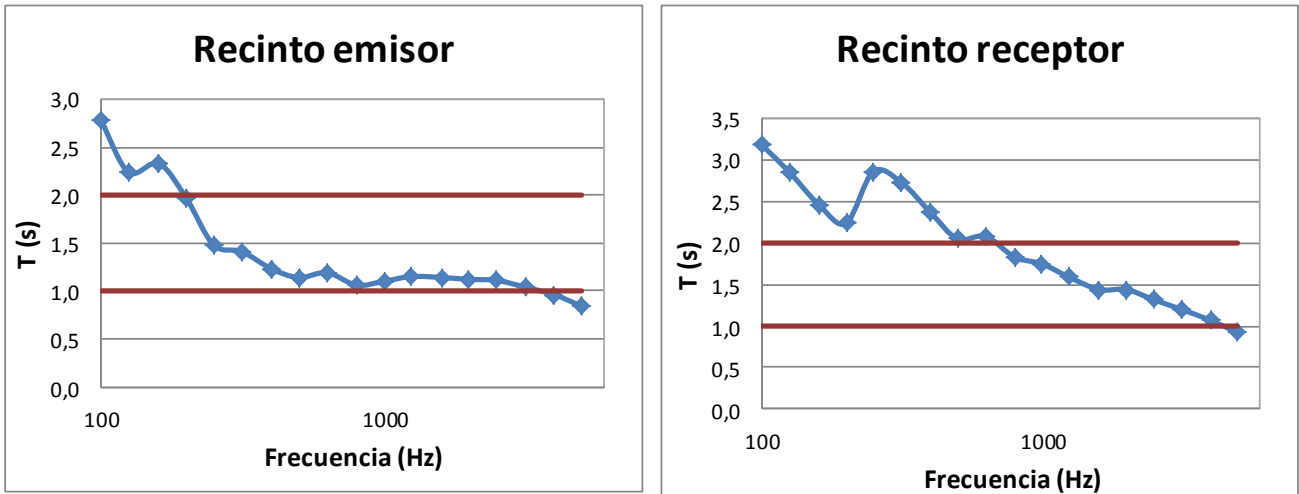
Partiendo de estos supuestos se empieza la caracterización y el proceso de rediseño si fuese necesario.

### Tiempo de reverberación (T)

Las mediciones en el interior de cada uno de los dos recintos, emisor y receptor, se han llevado a cabo mediante el método de ruido interrumpido. Se han tomado un total de ocho caídas en cada uno de los recintos para una sola posición de fuente, dos mediciones en cada una de las cuatro posiciones microfónicas establecidas distribuidas de manera aleatoria por todo el espacio útil de los mismos. A partir de las mediciones es posible promediar el valor del tiempo de reverberación T para cada banda de frecuencia, determinar la desviación estándar de estos valores, y adicionalmente registrar los gráficos de las caídas de nivel. Una mala difusión acústica se refleja en las curvas de decaimiento, esto conlleva que las caídas de tiempo de reverberación no sean lineales y los resultados sean diferentes. A muy bajas frecuencias, las cámaras de ensayo con superficies duras tienden a tener tiempos de reverberación altos, en este sentido habría que modificar la absorción del recinto. En la Tabla I se muestran los resultados de las mediciones: promedio del tiempo de reverberación y desviación estándar. Para ambas cámaras la desviación estándar es mayor a bajas frecuencias, en las bandas de alta frecuencia la desviación es menor. En la figura 2 se comparan los valores promedios medidos para T en ambos recintos con el intervalo recomendado por la UNE-EN ISO 10140-5. Los valores de T son mayores que 2 s a bajas frecuencias extendiéndose este rango hasta los 630 Hz en el caso del recinto receptor.

Frecuencia (Hz)	Recinto receptor (o inferior)		Recinto emisor (o superior)	
	Promedio T	Desviación estándar	Promedio T	Desviación estándar
100	3,18	0,06	2,78	0,04
125	2,86	0,17	2,24	0,10
160	2,46	0,06	2,33	0,08
200	2,24	0,13	1,97	0,15
250	2,86	0,16	1,48	0,11
315	2,73	0,16	1,41	0,17
400	2,37	0,15	1,23	0,05
500	2,05	0,13	1,14	0,05
630	2,08	0,17	1,19	0,10
800	1,83	0,08	1,06	0,06
1000	1,75	0,11	1,10	0,03
1250	1,59	0,10	1,15	0,02
1600	1,44	0,04	1,14	0,03
2000	1,44	0,02	1,12	0,04
2500	1,32	0,03	1,11	0,02
3150	1,20	0,02	1,04	0,04
4000	1,07	0,03	0,96	0,02
5000	0,92	0,02	0,84	0,01

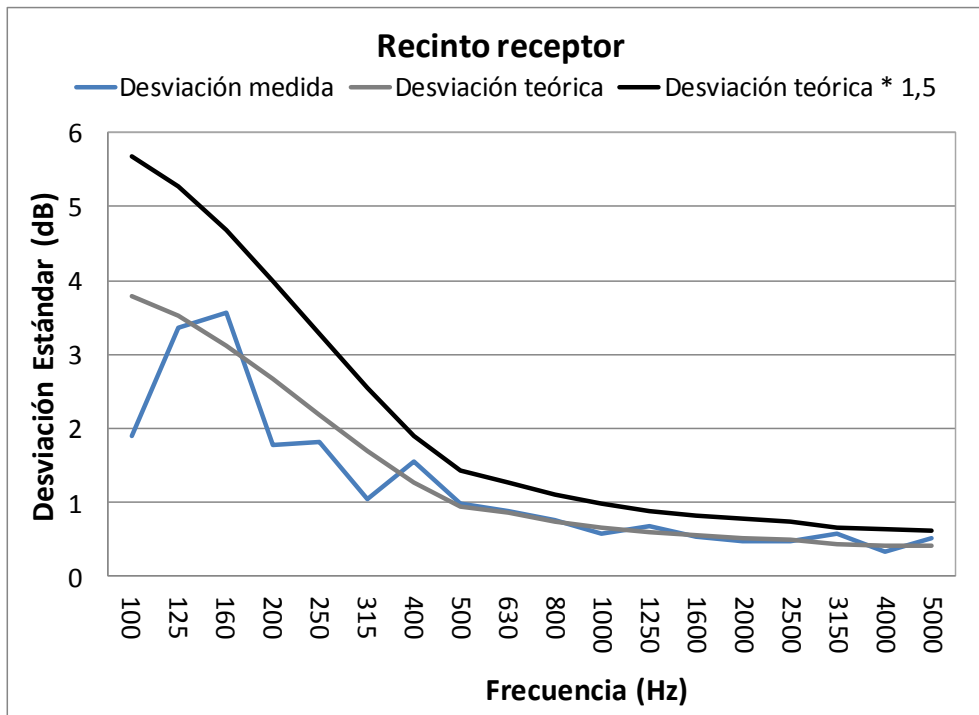
Tabla I. Valor promedio del tiempo de reverberación en los recintos receptor y emisor y desviación Estándar de las mediciones llevadas en cabo en cada una de las posiciones de micrófono.



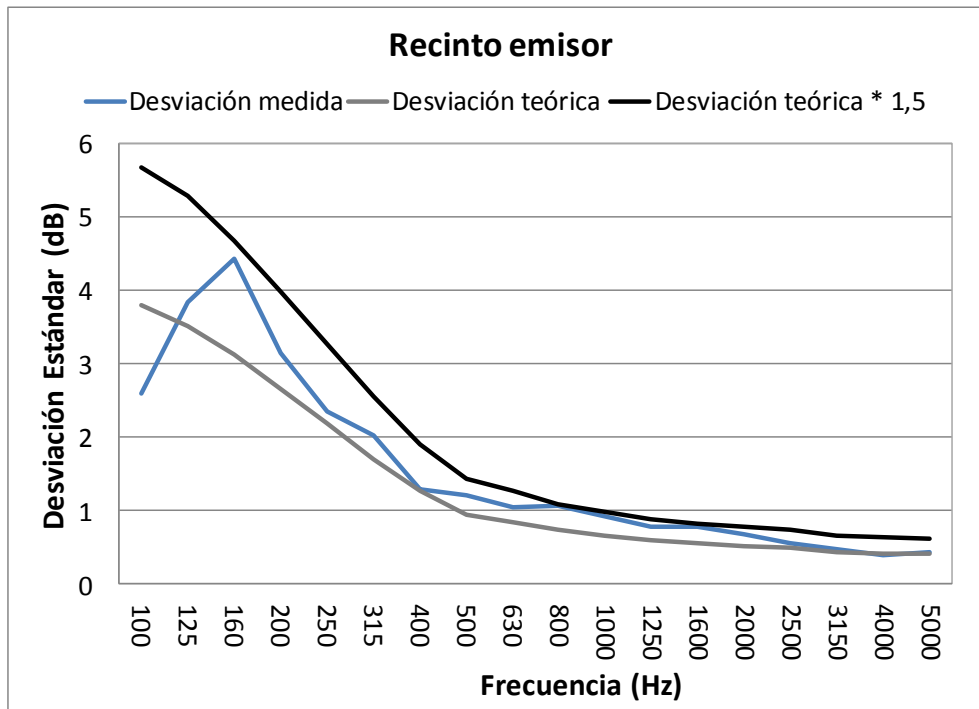
**Figura 2.** Tiempos de reverberación promedio medidos en los recintos emisor y receptor. La líneas rojas establecen el intervalo recomendado por la norma UNE-EN ISO 10140-5.

### Difusividad del campo sonoro

La difusión del campo sonoro está garantizada por la uniformidad de la presión sonora en todos los puntos del espacio de una sala. La norma UNE-EN ISO140-14 [4] describe un procedimiento de evaluación del campo sonoro. Para la medida del grado de difusión del campo sonoro en las cámaras se han llevado a cabo mediciones del nivel de presión sonora con micrófonos fijos en nueve posiciones diferentes distribuidas uniformemente. En cada posición se ha llevado a cabo la medición del nivel de presión sonora a dos alturas diferentes y para dos posiciones de la fuente sonora.



**Figura 3. Recinto receptor.** Desviación estándar para el nivel de presión sonora medido en las distintas posiciones de micrófono. Las alturas de medida han sido 0,70 y 1,20 m. En el gráfico se ha representado el valor teórico propuesto por la norma UNE EN ISO 140-14 para un volumen de 15 m<sup>3</sup> para mediciones in situ y dicho valor por un factor de 1,5.



**Figura 4. Recinto emisor.** Desviación estándar para el nivel de presión sonora medido en las distintas posiciones de micrófono. Las alturas de medida han sido 0,50 y 1 m. En el gráfico se ha representado el valor teórico propuesto por la norma UNE EN ISO 140-14 para un volumen de 15 m<sup>3</sup> para mediciones *in situ* y dicho valor por un factor de 1,5.

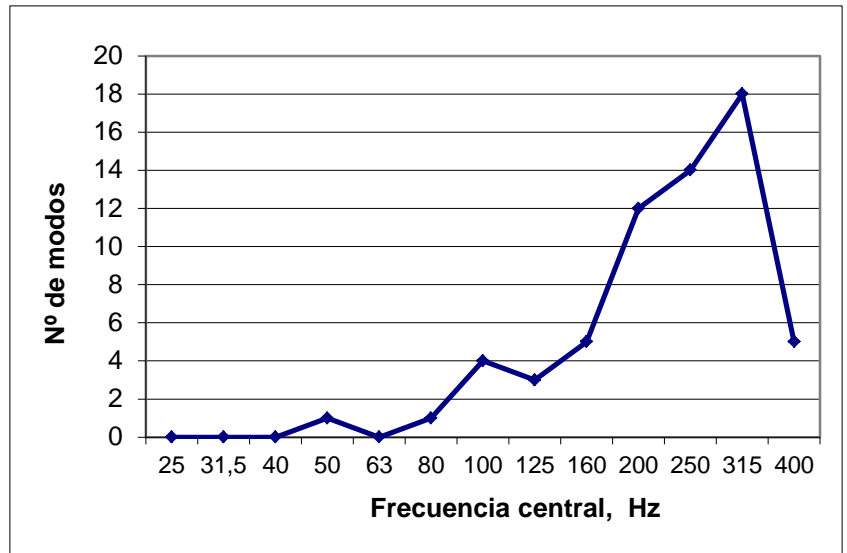
En las figuras 3 y 4 para ambos recintos, se compara la desviación estándar de los niveles de presión sonora con la desviación teórica propuesta en la norma UNE-EN ISO 140-4 [4] para un volumen de 15 m<sup>3</sup>. Estos valores, establecidos para mediciones *in situ*, son orientativos para optimizar los recintos y no se deben considerar como exigencias que se deban cumplir. Se recomienda que los valores teóricos propuestos para la desviación estándar no sean superados en un factor de 1,5. En las figuras 3 y 4 se ha incluido la curva del valor teórico de la desviación estándar por un factor de 1,5. En ningún caso los valores calculados superan esta curva. No obstante, para los dos recintos se ha medido la desviación estándar más alta para la frecuencia de 160 Hz. Debido a que son recintos muy pequeños las ondas estacionarias o modos de resonancia pueden ser un problema. En el siguiente apartado se estudian los modos de resonancia para ambas cámaras siguiendo el criterio de Bonello [5].

### Modos propios

En la figura 5 se muestra el número de modos, hasta orden tres, para cada banda de frecuencia. Esta gráfica es coincidente para ambos recintos, no obstante se ha incluido una tabla que recoge las frecuencias exactas a las que se producen los modos propios hasta la banda de 160 Hz. La geometría de los recintos emisor y receptor es rectangular lo que no proporciona una distribución modal homogénea a bajas frecuencias y se aprecia en la forma de la curva especialmente en el decaimiento que en el número de modos se produce en las bandas de 160 y 400 Hz. Se han incluido tablas con los valores de la frecuencia de corte,  $f_c$ , calculada a partir de la expresión  $f_c = \frac{c}{2L_{max}}$  y que se define como el primer valor de frecuencia modal que se genera en una determinada sala e indica el inicio de la unidad acústica de la sala. Se ha indicado también la frecuencia de Schroeder  $f_{Sch} = 2000 \sqrt{\frac{T}{V}}$ , que limita inferiormente el rango en que se puede considerar el campo acústico difuso.

	Emisora	Receptora
<b>fc</b>	52 Hz	56 Hz
<b>fSch</b>	582 Hz	767 Hz

Frecuencias resonancia (Hz)	
R. emisor	R. receptor
55,7	55,7
75,9	81,0
94,2	91,9
96,0	98,3
111,0	107,5
111,5	111,5
122,4	122,5
134,5	134,6
134,9	137,8
147,1	144,5
151,8	161,9
161,7	165,6
165,6	167,2
167,2	171,2



**Figura 5.** Número de modos para los recintos emisor y receptor. En las tablas se ha indicado la frecuencia de corte y la de Schroeder para ambos recintos y el valor exacto de las frecuencias de las ondas estacionarias hasta la banda de 160 Hz.

### Nivel de aislamiento y Ley de reciprocidad

El sistema debe garantizar un buen nivel de aislamiento. En la figura 6 se representa el índice de reducción sonora R medido desde 50 Hz siguiendo el método de bajas frecuencias descrito en la norma UNE-EN ISO 16283-1 [6]. Además el sonido radiado por transmisiones indirectas debe ser despreciable comparado con el sonido radiado por el suelo sometido a ensayo. Que se cumpla la ley de reciprocidad sirve para mostrar que no hay transmisiones indirectas. En laboratorio, en el caso de forjados homogéneos desnudos y sin transmisiones forzadas, se han determinado las relaciones experimentales entre el índice de reducción acústica R y el nivel de presión acústica de impactos normalizado,  $L_n$ . Esto permite estimar el nivel de presión acústica de impactos normalizado a partir del conocimiento de los valores del índice de reducción acústica R del mismo. Esta relación es la siguiente en bandas de tercio de octava:

$$R + L_n = 38 + 30 \lg \frac{f}{(1\text{Hz})}$$

donde f es la frecuencia central de la banda de frecuencia en Hercios. En la Figura 7 se comparan los valores medidos y la expresión teórica mostrando, en general, buena coincidencia.

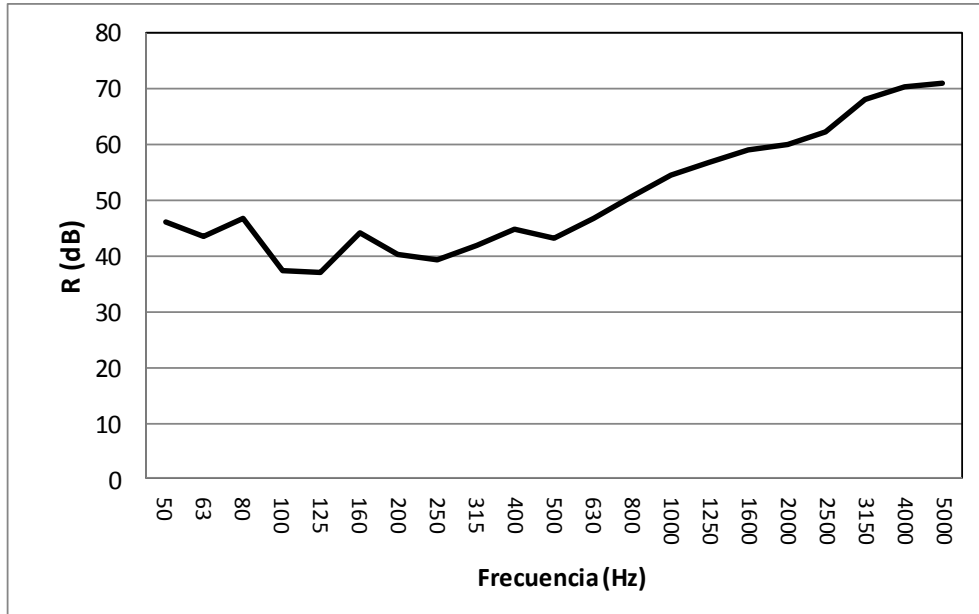


Figura 6. Índice de reducción sonora R del forjado separador de la cámara de transmisión vertical.

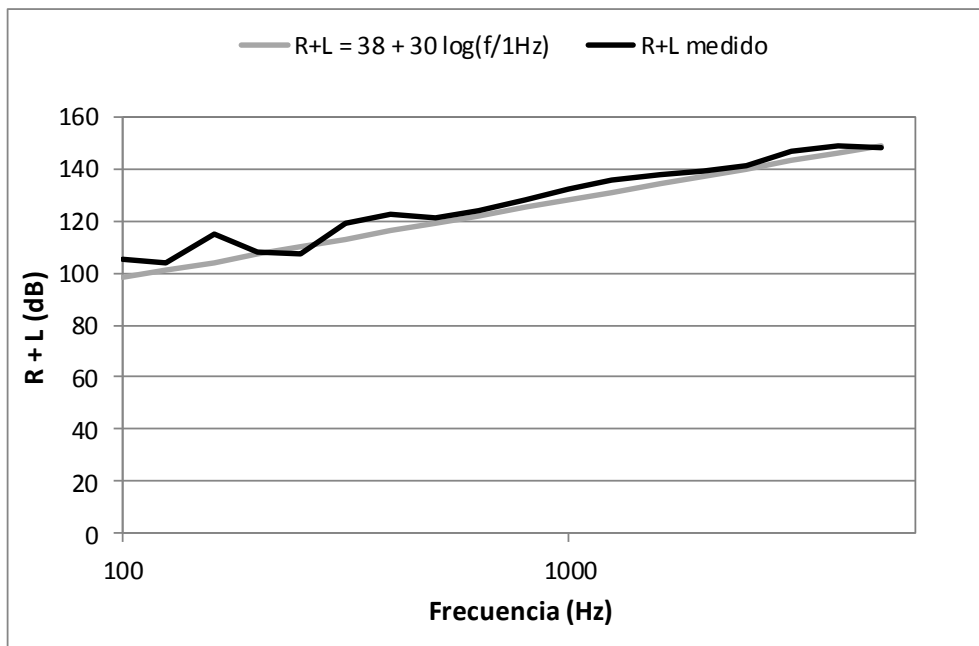
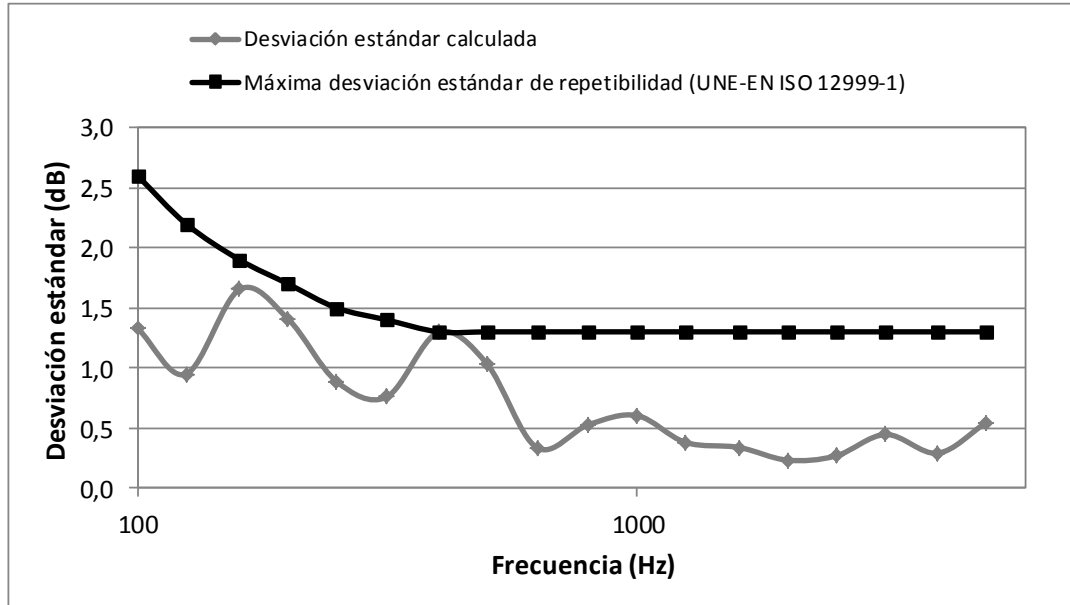


Figura 7. Comparación R+L medido y la ley de reciprocidad para forjados homogéneos.

### Repetibilidad del procedimiento de medida

Se han llevado a cabo cinco mediciones según el procedimiento descrito en la norma UNE-EN ISO 101040-3 [2] bajo condiciones de repetibilidad. La fuente de ruido de impactos se ha colocado en cuatro posiciones diferentes aleatorias sobre el suelo de ensayo. Se han utilizado cuatro posiciones diferentes de micrófono repartidas por todo el espacio permitido en la cámara de medida y se han realizado seis medidas del nivel de presión sonora. La desviación típica de estas cinco mediciones repetidas debe ser menor que los valores indicados en la norma UNE-EN ISO 12999-1 [7]. En figura 8 los valores obtenidos se comparan con los valores máximos

indicados en la norma, las desviaciones están por debajo de lo indicado por la norma excepto para la banda de 400 Hz banda para la que se producía un descenso en el número de modos.



**Figura 8.** Comparación de la desviación estándar de repetibilidad de ensayos de aislamiento a ruido de impacto y el valor máximo propuesto por la norma UNE-EN ISO 12999-1.

## CONCLUSIONES

En bandas de baja frecuencia no deben esperarse condiciones de campo difuso en los recintos de medida especialmente cuando se consideran volúmenes pequeños. En vista de los resultados derivados de la caracterización preliminar de los recintos que componen la cámara de ensayo algún tratamiento es necesario para conseguir mejoras en su comportamiento acústico. Estas mejoras deben ir orientadas principalmente a modificar los valores del tiempo de reverberación y mejorar la difusión sonora.

## REFERENCIAS

- [1] **UNE-EN ISO 10140-5 (2011)**. Acústica. Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción. Parte 5: Requisitos para instalaciones y equipos de ensayo.
- [2] **UNE-EN ISO 10140-3 (2011)**. Acústica. Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción. Parte 3: Medición del aislamiento acústico al ruido de impactos.
- [3] **UNE-EN ISO 10140-1 (2011)**. Acústica. Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción. Parte 1: Reglas de aplicación para productos específicos.
- [4] **UNE-EN ISO 140-14 (2005)**. Acústica. Medición del aislamiento acústico de los edificios y de los elementos de construcción. Parte 14: Directrices para situaciones especiales *in situ*.
- [5] Bonello O. J., A New Criterion for the Distribution of Normal Room Modes, J. Audio Eng. Soc. 29 (9), 1981, pp. 597-606.
- [6] **UNE-EN ISO 16283-1(2015)**. Acústica. Medición in situ del aislamiento acústico en los edificios y en los elementos de construcción. Parte 1: Aislamiento a ruido aéreo.
- [7] **UNE-EN ISO 12999-1(2015)**. Acústica. Determinación y aplicación de las incertidumbres de medición en la acústica de edificios. Parte 1: Aislamiento acústico.