

## CONTRIBUCIÓN DE LA VIBRACIÓN DE LAS PAREDES DE UN RECINTO A LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE $L_2$ EN MEDIDAS DE AISLAMIENTO A RUIDO AÉREO

PACS: 43.55.Br

**M. A. Navacerrada; C. Díaz y A. Pedrero**

Grupo de Acústica Arquitectónica, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid

Universidad Politécnica, Avda. Juan de Herrera 4, 28040 Madrid

Teléfono 91 336 42 49, Fax 91 336 65 54

E-mail: [mdelosangeles.navacerrada@upm.es](mailto:mdelosangeles.navacerrada@upm.es)

### RESUMEN

Previamente se ha establecido que un parámetro que permite cuantificar la variación espacial de  $L_2$  es su desviación estándar. Dados los múltiples factores de los que depende la transmisión del sonido es difícil establecer un modelo teórico que permita explicar la dependencia espectral de este parámetro. En este trabajo se analiza el efecto de la desviación estándar de la vibración no solo de la pared separadora sino de todas las paredes que delimitan el volumen del recinto receptor.

### ABSTRACT

Previously we have established that the standard deviation associated to  $L_2$  is a parameter that allows quantifying its spatial variation. Taking into account the factors on which the sound transmission is dependent it is difficult to establish a theoretical model to explain the spectral dependence of this parameter. In this work we analyze the effect of the standard deviation associated not only the wall separating both rooms but all the walls that are delimiting the receiving.

### 1. INTRODUCCION

Los diferentes descriptores del aislamiento acústico tienen como base la diferencia de niveles sonoros entre los recintos emisor y receptor que se obtienen mediante el promedio espacio-temporal de los niveles sonoros medidos en diferentes posiciones en cada uno de los recintos. Hay muchos factores que determinan cómo se establece el campo sonoro en un recinto y cómo son los valores que se miden en las distintas posiciones de micrófono. La

transmisión del sonido entre dos salas contiguas depende de las características de los elementos de separación, de las uniones entre los distintos elementos que los delimitan... [1] Principalmente en el recinto receptor, la transmisión estructural o por flancos producida por las vibraciones de los elementos conectados al elemento de separación entre recintos no son despreciables. Estas transmisiones dependen del tipo de elementos constructivos de flanco y de sus formas de unión entre si.

En la literatura se han publicado diferentes estudios sobre la distribución espacial de los niveles de presión sonora en un recinto. En esta línea, se han desarrollado modelos teóricos para describir el campo sonoro en las proximidades de las paredes del recinto. Se ha analizado la distribución espacial del campo sonoro debido a la presencia de los modos normales del recinto o considerando un campo sonoro difuso ideal [2, 3]. En trabajos previos hemos calculado la desviación estándar de los niveles sonoros medidos en cada una de las posiciones de micrófono [4, 5, 6, 7]. Esta desviación estándar se puede interpretar como una medida de la dispersión espacial de los niveles de presión sonora en el recinto y por tanto, de la uniformidad del campo sonoro. Se ha analizado la dependencia de este parámetro con el volumen del recinto receptor y el tiempo de reverberación. En esta línea se han comparado los resultados con los modelos teóricos propuestos en la literatura. Por debajo de 400 Hz ninguno de los modelos propuestos en la literatura explica adecuadamente todos los resultados. Se ha propuesto un modelo en el que se tiene en cuenta la desviación estándar asociada a la velocidad vibratoria del paramento separador. Teniendo en cuenta la importancia de las transmisiones indirectas en las medidas in situ en este trabajo este modelo se amplía considerándose la desviación estándar asociada a la velocidad vibratoria de todas las paredes que delimitan el recinto receptor.

## 2. MÉTODO Y MEDICIONES

### 2.1. Método de medida

Los ensayos "in situ" de aislamiento a ruido aéreo entre locales se han realizado según la UNE EN ISO 140-4 la parte 4 de esta Norma [8]. Los valores de  $L_2$  han sido calculados como el promedio energético de los niveles medidos en diez posiciones de micrófono, cinco posiciones de micrófono para cada posición de la fuente sonora. La fuente sonora se ha colocado cerca de las esquinas de la sala emisora. Según la Norma para medidas realizadas en un margen de frecuencias comprendido entre 100 y 5000 Hz los valores de distancias de separación deben ser mayores que 0,7 m entre posiciones de micrófonos, que 0,5 m entre cualquier posición de micrófono y las superficies límites de la habitación o de objetos y que 1,0 m entre cualquier posición de micrófono y la fuente sonora. Esto nos ha llevado a combinar posiciones de micrófono en las esquinas con posiciones en la región central del recinto receptor. A partir de la medida de los niveles de presión sonora  $L_{21}, L_{22}, \dots, L_{2n}$  en las diferentes posiciones dentro del recinto se calcula el nivel de presión sonora en el recinto,  $\overline{L_2}$ , como el promedio energético de los mismos:

$$\overline{L_2} = 10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n 10^{\frac{L_{2j}}{10}} \right)$$

La siguiente expresión nos permite calcular la desviación estándar de los niveles de presión sonora  $L_{21}, L_{22}, \dots, L_{2n}$  medidos en el recinto:

$$\sigma(L_2) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (L_{2j} - \overline{L_2})^2}$$

## 2.2. Mediciones

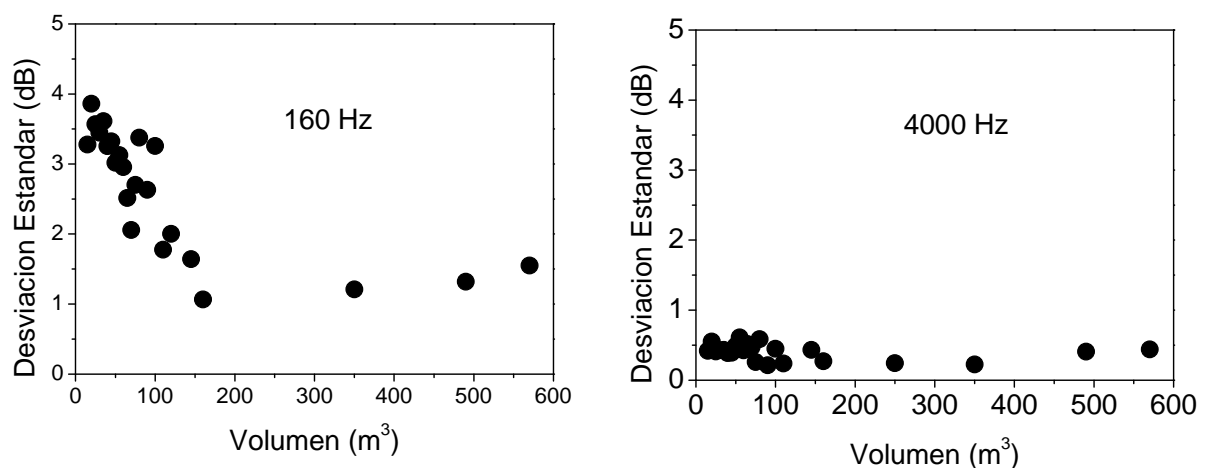
Se realizaron ensayos consecutivos entre los mismos recintos según lo descrito en el apartado anterior. El volumen de la sala emisora es de  $50 \text{ m}^3$  y el de la sala receptora de  $60 \text{ m}^3$ . Ambos recintos están separados por una pared de  $10 \text{ m}^2$ . En la repetición sucesiva de ensayos, se ha procurado que estén representados lo mejor posible los parámetros dejados libres en el procedimiento de ensayo establecido. En particular, el conjunto de posiciones de micrófono y de la fuente para los que se realiza el promedio de la medición se han elegido de nuevo, más o menos aleatoriamente para cada nueva repetición de una medición [9].

Se ha medido la velocidad de vibración de las paredes que limitan la sala receptora. Para cada pared la velocidad se midió en 10 posiciones diferentes por medio de acelerómetros. Los acelerómetros utilizados cumplen lo especificado en la norma UNE EN ISO 10140-4: 2011 en cuanto a su impedancia de masa y se fijaron siguiendo las indicaciones de esta norma [10]. Se calculó el promedio espacial de la media del cuadrado de la velocidad de cada una de las paredes, y la desviación estándar asociada usando la misma expresión que la descrita en el apartado 2.1 para la desviación estándar asociada a  $L_2$ .

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1. Trabajos previos y modelos teóricos

En trabajos previos se ha estudiado la dependencia de la desviación estándar con a) el volumen y el tiempo de reverberación del recinto y b) la frecuencia [4, 6, 7]. Por encima de los 500 Hz la desviación estándar es independiente del volumen del recinto receptor. Por debajo de esta frecuencia la desviación estándar es mayor cuanto menor es el volumen del recinto. En la Figura 1 se muestra un ejemplo de dependencia de  $\sigma(L_2)$  en función del volumen del recinto para dos frecuencias diferentes: 160 y 4000 Hz. Los valores de  $\sigma(L_2)$  han sido calculados como el promedio de la desviación estándar calculada para recintos del mismo volumen e igual tiempo de reverberación.



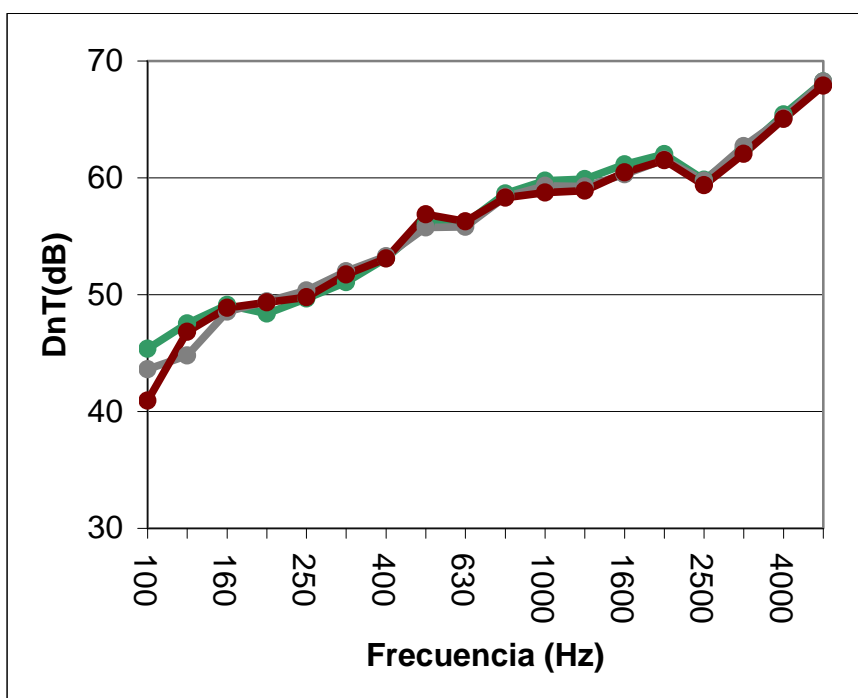
**Figura 1.** Desviación estándar en función del volumen para dos frecuencias diferentes: 160 y 4000 Hz.

Fijado el volumen, por encima de los 400 Hz la desviación estándar que se calcula es prácticamente independiente de la frecuencia y se miden valores diferentes entre 100 y 400 Hz. En este intervalo de frecuencias el comportamiento de la desviación estándar es fundamentalmente de dos tipos: a) disminuye con la frecuencia o b) presenta su valor máximo

para una frecuencia comprendida entre 125 y 200 Hz [6, 7]. En la literatura se han propuesto algunos modelos teóricos. Los modelos dependen de la fuente de excitación, tono puro [11, 12] o espectro continuo [13, 14] y de la distribución de modos normales. Se compararon los modelos teóricos para espectro continuo con los resultados experimentales encontrándose un acuerdo razonable solo en determinados intervalos de frecuencia [4, 5]. Por ello, se propuso una incertidumbre combinada resultante de la desviación propuesta en los modelos teóricos y de la desviación estándar asociada al campo vibracional de la pared separadora [6, 7]. En este modelo, como primera aproximación, se ha tomado como referencia la curva medida por Hopkins ([1], página 399) para paredes de fábrica de hormigón y la influencia de su campo vibracional se ha recogido en un coeficiente de sensibilidad cuyo valor resulta del ajuste.

### 3.2. Comprobación y ampliación del modelo

En la Figura 2 se muestran las curvas de aislamiento y  $\sigma(L_2)$  calculada para tres de los ensayos realizados. Las diferencias entre los ensayos aparecen por debajo de los 400 Hz y se observan los dos tipos de dependencias de  $\sigma(L_2)$  con la frecuencia descritas en el apartado 3.1. Este resultado indica que el tipo de superficie que delimita el recinto receptor no es el principal responsable de la dependencia de  $\sigma(L_2)$  con la frecuencia, hipótesis barajada en trabajos anteriores [6, 7].



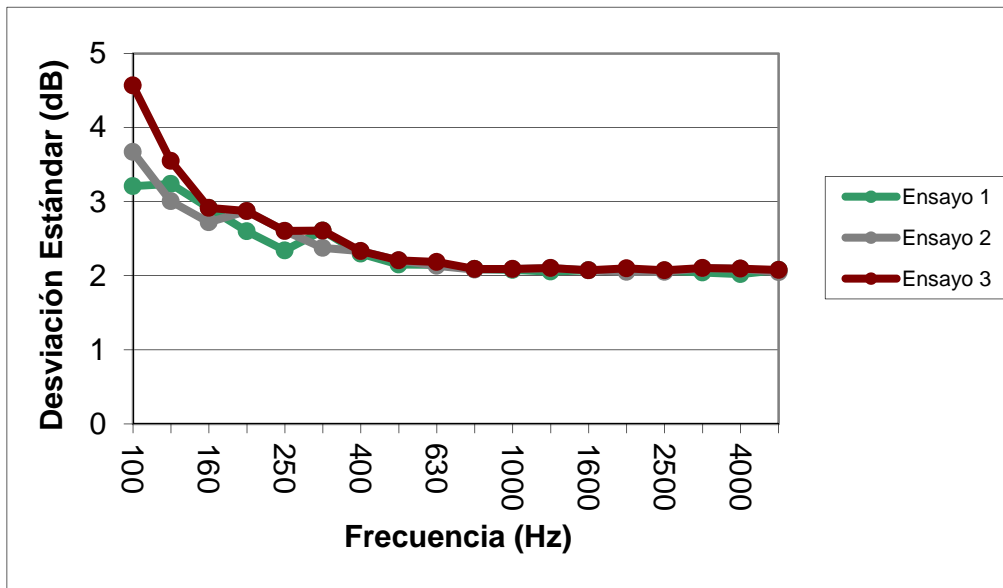


Figura 2. DnT y  $\sigma(L_2)$  para tres ensayos llevados a cabo entre los mismos recintos.

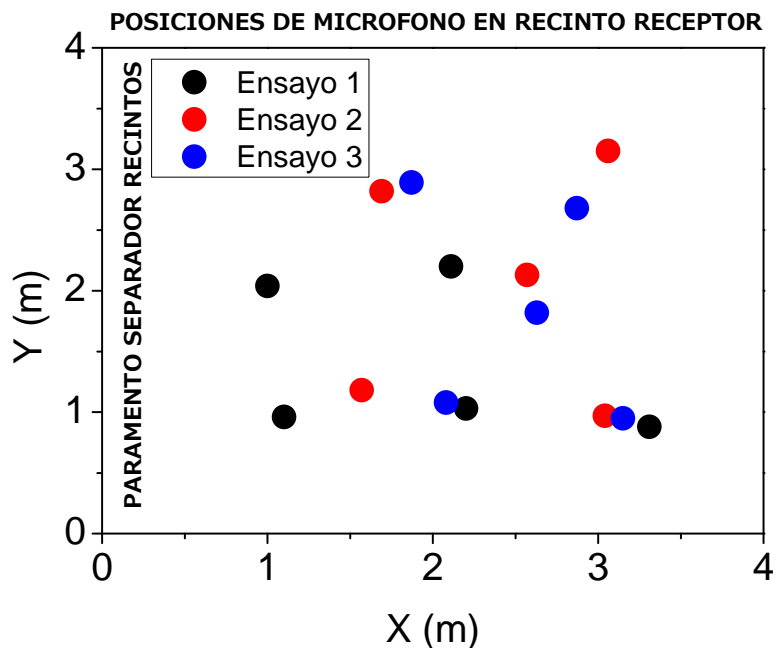
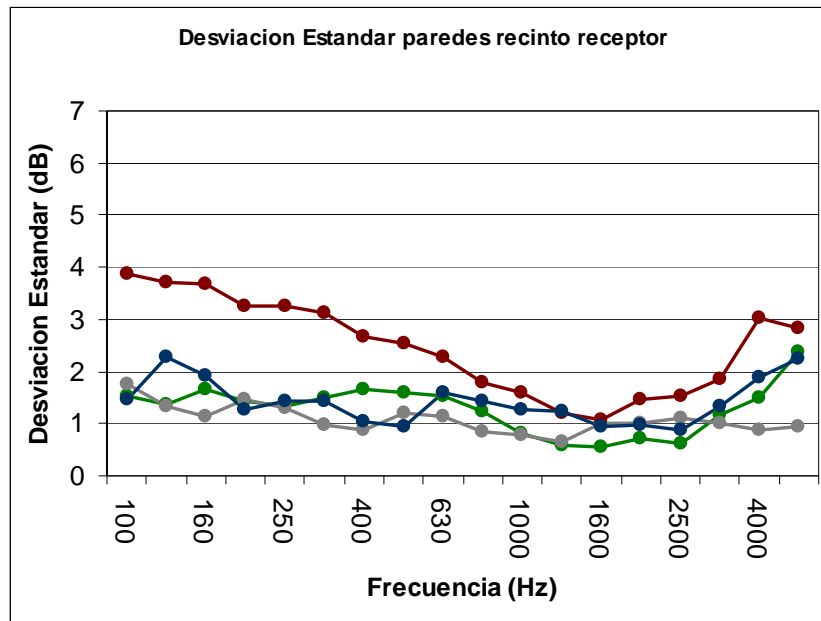


Figura 3. Posiciones microfónicas escogidas para los ensayos de aislamiento.

Para cada ensayo las posiciones de micrófono fueron escogidas aleatoriamente respetando las distancias que se indican en la norma. En la Figura 3 se muestran estas posiciones. Para todos los ensayos dos de las posiciones escogidas se sitúan enfrente del paramento separador. Los valores calculados para  $\sigma(L_2)$  aumentan a medida que estas dos posiciones se alejan del paramento separador. Los ensayos que presentan los menores valores de  $\sigma(L_2)$  son aquellos dos en los que dos de las posiciones de micrófono están más cerca del paramento separador. El ensayo con menor incertidumbre en la magnitud final es aquel que presenta los menores valores de  $\sigma(L_2)$ .



**Figura 4.** Desviación estándar de la velocidad media de vibración de las paredes que limitan el recinto receptor.

Mientras en la sala emisora estamos excitando en un único punto con la fuente sonora, todas las superficies están radiando energía sonora en la sala receptora y todas ellas están actuando como fuentes sonoras. Esto justifica los trabajos previos en los que la desviación estándar asociada a la vibración de la pared separadora ha sido tenida en cuenta. En este modelo el inconveniente es obtener una estimación real y razonable de la incertidumbre asociada a la variación espacial de la velocidad de vibración de una pared o un suelo. Los valores exactos dependen de la terminación de la superficie, propiedades del material, dimensiones de la pared y tipo de excitación. Llevar a cabo las medidas in situ para calcular la incertidumbre asociada a las paredes que limitan un recinto no es una medida rutinaria. En este trabajo mostramos la validez del modelo propuesto considerando la incertidumbre real medida in situ de todas las paredes que delimitan el recinto receptor. En la Figura 4 se muestra la desviación estándar del promedio de la velocidad media medida para las paredes que delimitan el recinto receptor calculadas a partir de medidas in situ según lo descrito en el apartado 2.2. La de mayor desviación estándar corresponde al paramento que separa ambos recintos. Dependiendo de la posición de las posiciones microfónicas la influencia del campo vibracional de cada una de las superficies límites sobre el valor del valor promedio de  $L_2$  y su desviación estándar es diferente. La contribución del campo vibracional asociado a cada pared se pone de manifiesto mediante un coeficiente de sensibilidad. De manera que la expresión de la incertidumbre combinada resultante usada para el ajuste ha sido la siguiente:

$$u_C = \sqrt{\sum_{i=1}^4 c_i^2 (pared) u_i^2 (pared)} \quad (1)$$

siendo  $i=1$  la pared separadora,  $i=2$  la pared lateral izquierda,  $i=3$  la pared lateral derecha e  $i=4$  para la pared posterior. En el ajuste, los coeficientes de sensibilidad se han dejado como parámetros libres. Distintos ajustes son posibles para distintos valores de los coeficientes de sensibilidad, el que se ha escogido como válido es aquel para el que resulta un error cuadrático medio menor. En la Figura 5 se muestran los resultados del ajuste para los tres ensayos y se indican los valores de los coeficientes de sensibilidad resultantes del ajuste.

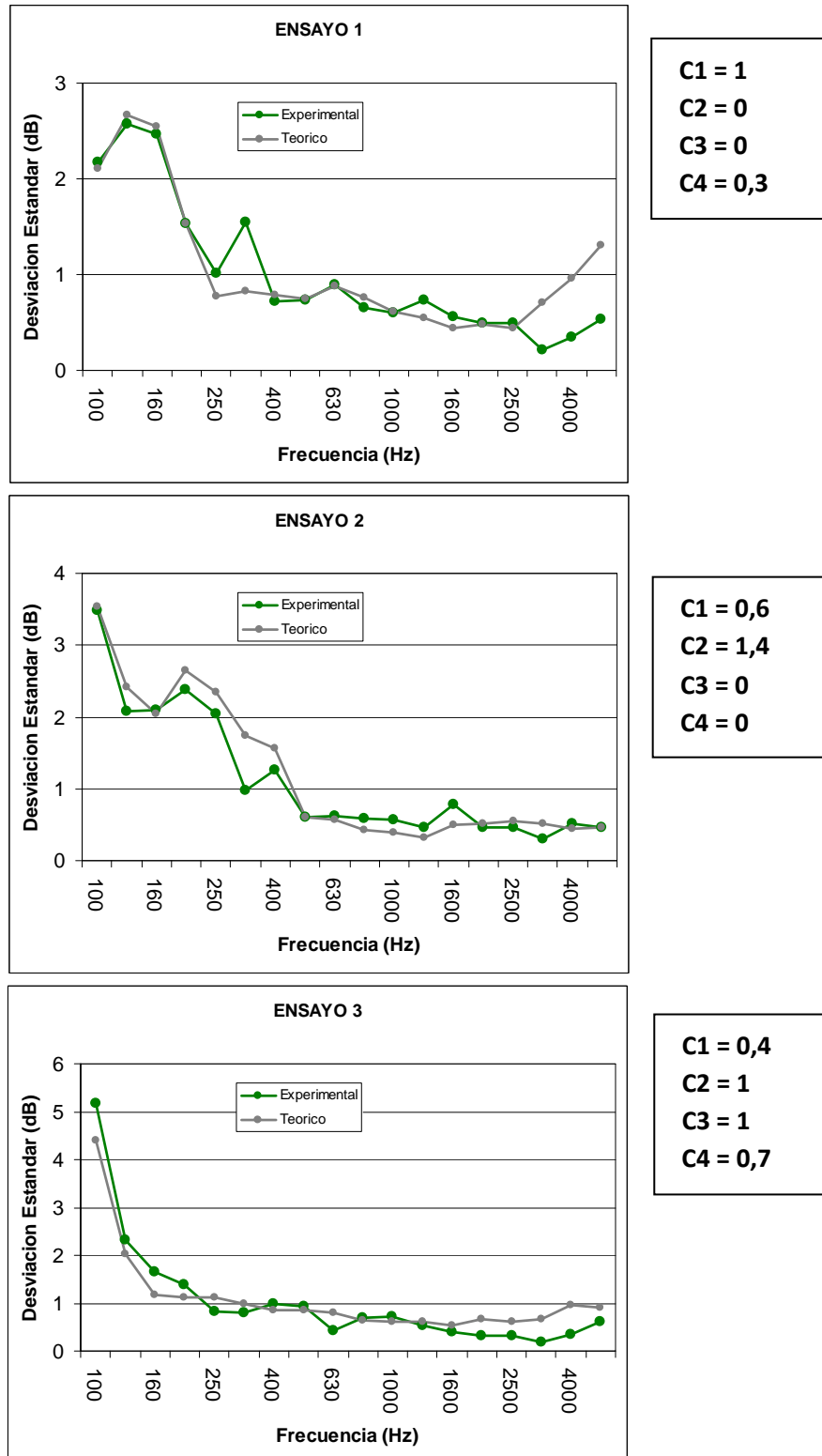


Figura 5. Resultados de los ajustes a la expresión (1).

Los valores más altos de los coeficientes de sensibilidad corresponden a las paredes más cercanas a las posiciones de micrófono escogidas para el ensayo. En particular, cuanto menor es  $\sigma(L_2)$  a bajas frecuencias, mayor es el coeficiente calculado para la pared separadora. Y el menor valor de  $\sigma(L_2)$  calculado corresponde al caso en que menor es la distancia de la pared separadora a las dos posiciones de micrófono escogidas delante de la misma y para las que predomina la transmisión directa. La desviación estándar a bajas frecuencias aumenta cuanto mayor es el coeficiente de sensibilidad para las paredes laterales, esto es cuando para las posiciones escogidas predomina la transmisión indirecta.

## 5. CONCLUSIÓN

Es difícil establecer como es el campo sonoro en un recinto y por tanto un modelo teórico que permita explicar la dependencia espectral de la desviación estándar asociada al nivel de presión sonora. Avanzando en un trabajo ya iniciado en nuestro grupo, para un ensayo de aislamiento a ruido aéreo hemos analizado la contribución de la desviación estándar asociada al campo vibracional de las paredes que delimitan el recinto a la desviación estándar de  $L_2$ . Para este ensayo la menor desviación estándar a bajas frecuencias se ha medido para aquel ensayo en el que para las posiciones de micrófono escogidas la energía sonora llega fundamentalmente a través de la pared separadora. No obstante, son necesarios ensayos de este tipo en otros recintos para poder generalizar las conclusiones obtenidas.

## 6. REFERENCIAS

- [1] Hopkins C.: Sound Insulation, Elsevier, Oxford, 2007.
- [2] Maluski S. y Gibbs B. M., Applications of a finite element model to low frequency sound frequency sound insulations in dwellings, J. Acoust. Soc. Am. 108 (4), (2000), 1741-1751.
- [3] Osipov A., Meesb P. y Vermeif G., Low frequency airborne sound transmission through single partitions in buildings, Applied Acoustics 52 (1997), 273-288.
- [4] Navacerrada M. A., Díaz C. y Pedrero A., Comportamiento de la desviación estándar asociada a la medida del nivel promedio de  $L_2$  según norma UNE EN ISO 140-5: 1999 en función del volumen del recinto y del tiempo de reverberación, Proceedings de Tecnicacústica 2010.
- [5] Navacerrada M. A., Díaz C. y Pedrero A., Qualitative behaviour of  $L_1$  and  $L_2$  standard deviation in insulations measurements according to standard UNE EN ISO 140-4, Proceedings of Forum Acusticum 2011.
- [6] Navacerrada M. A. , Díaz C. y Pedrero A., Efecto de la vibracion de la pared sore la desviacio estandar de  $L_2$  en ensayos UNE EN ISO 14-4 y 140-5, Proceedings de Tecnicacustica 2011
- [7] Navacerrada M. A., Díaz C. y Pedrero A., Pressure level standard deviation at low frequencies: effect of the wall vibrational field, Archives of Acoustics 37 (4), 561-569 (2012).
- [8] ISO 140-4 (1998), Acoustics. Measurement of sound insulation in buildings and of building elements. Part 4: Field measurements of airborne sound insulation .
- [9] ISO 140-2 (1991), Acoustics. Measurement of sound insulation in buildings and of building elements. Part 2: Determination, verification and application of precision data
- [10] UNE-EN 20140-2: Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de edificación. Parte 2: Determinación, verificación y aplicación de datos de precisión.
- [11] Davy J. L., The relative variance of the transmission function of a reverberation room, Journal of Sound and Vibration 77, 455-479 (1981).
- [12] Lyon R. H., Statistical analysis of power injection and response in structures and rooms, Journal of the Acoustical Society of America 45, 545-565 (1969).
- [13] Craik R., On the accuracy of sound pressure level measurements in rooms, Applied Acoustics 29, 25-33 (1990).
- [14] Schroeder M. R., Effect of frequency and space averaging on the transmission responses of multimode media, Journal of the Acoustical Society of America 46 (1), 277-283 (1969).