

EFECTO DE LA VIBRACIÓN DE LA PARED SOBRE LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE L2 EN ENSAYOS UNE EN ISO 140-4 Y 140-5

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

Abstract

In the measurement of sound insulation following standards UNE EN ISO 140-4 and 140-5 the uncertainty of the final magnitude is mainly associated to the average sound pressure levels L2 measured. A parameter what allows us to quantify the spatial variation of the sound pressure level is the standard deviation of the pressure levels measured at the different points of the room. In this work, we propose a theoretical calculus of this standard deviation as a combined uncertainty of the standard deviation already proposed in the literature focused in the room geometry and the standard deviation associated to the wall vibrational field.

Resumen

En los ensayos de aislamiento acústico según normas UNE EN ISO 140-4 y 140-5 el valor de L2 es un promedio espacio-temporal de los niveles de presión sonora medidos en diferentes posiciones de la sala receptora. La desviación estándar de estos valores se puede considerar como una medida de la uniformidad del campo sonoro en el recinto. Se analiza este parámetro en función de la frecuencia y se propone un cálculo teórico del mismo como una incertidumbre combinada de la desviación estándar derivada de modelos teóricos centrados en la geometría del recinto y la desviación estándar asociada a la vibración de la pared separadora.

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de una medición acústica es asignar un valor al mesurando. Este valor es únicamente una aproximación o estimación del mesurando y debe ir acompañado de una indicación de la incertidumbre en la medición que refleja el grado de desconocimiento que se tiene de su valor exacto [1]. Los diferentes descriptores del aislamiento acústico tienen como base la diferencia de niveles sonoros en 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.

En el caso ideal de que los campos sonoros en los recintos de ensayo fuesen totalmente difusos, los niveles sonoros medidos en distintas posiciones de un recinto serían absolutamente uniformes. Sin embargo, en la práctica fuera del laboratorio encontramos tanta variedad de campos sonoros como de recintos. En este sentido es difícil establecer reglas generales sobre los promedios medidos para estas magnitudes fundamentalmente en el régimen de bajas frecuencias. Simplemente la presencia de los modos propios en cada recinto da lugar a una dispersión espacial en los valores del nivel de presión sonora que se miden en los diferentes puntos del mismo. Sin embargo, hay otros muchos factores que afectan a cómo se establece el campo sonoro en un recinto y por tanto, a cómo son los valores que se miden en las distintas posiciones: 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, de cómo la propagación del sonido tiene lugar entre la sala emisora y receptora... [2] En la misma línea, en el caso de una fachada el cambio de nivel y el campo sonoro en el recinto receptor dependen del tipo de fachada, propagación del sonido desde la fuente, efectos de difracción...

En esta línea, el valor de la incertidumbre combinada resultante para las distintas magnitudes de salida según la norma ISO 140 depende fundamentalmente de la dispersión de las medidas que se tomen para obtener el nivel promedio de presión sonora en los recintos emisor y receptor. En la literatura se han publicado diferentes estudios sobre la distribución espacial de los niveles de presión sonora en un recinto para explicar desde un punto de vista teórico el significado del valor promedio del nivel de presión sonora que se utiliza para hacer los cálculos en los ensayos de aislamiento. 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 [3, 4].

En este trabajo se muestran resultados de ensayos "in situ" según normas UNE EN ISO 140-4 y 140-5 en los que se analiza la desviación estándar asociada a las distintas posiciones utilizadas para el cálculo del valor promedio de L_2 . Se muestran resultados de ejercicios de repetibilidad para ver como comparan mediciones llevadas a cabo por distintos técnicos. Se analiza cualitativamente la forma de la curva de la desviación estándar asociada a L_2 y se muestran resultados de ajuste a un modelo teórico que tiene en cuenta la pared separadora además de la geometría del recinto.

2. MÉTODO Y MEDICIONES

2.1. MÉTODO DE MEDIDA

La norma que dicta como se han de realizar los ensayos de medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción es la UNE EN ISO 140. Los ensayos "in situ" de aislamiento a ruido aéreo entre locales se han realizado según la parte 4 de esta Norma. Los valores de L_1 y 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 ha sido colocada cerca de las esquinas de la sala emisora.

La parte 5 de esta Norma, "Mediciones in situ del aislamiento acústico a ruido aéreo de elementos de fachadas y de fachadas" especifica dos métodos para la medición del aislamiento a ruido aéreo de elementos de fachada y de fachadas completas. Los valores de L_2 medidos en el interior de los recintos y presentados en este trabajo corresponden a la medida de fachadas

completas siguiendo el método con altavoz. El nivel de presión sonora promedio se ha obtenido como el promedio del nivel medido en cinco posiciones de micrófono.

Para ambas partes, la Norma especifica que las posiciones deben distribuirse uniformemente en el máximo espacio permitido dentro de cada local. 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 de cada uno de los recintos. 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:

$$\sigma(L_2) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (L_{2j} - \overline{L}_2)^2}$$

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.

2.2. MEDICIONES

Los datos que se muestran en este trabajo son el resultado de distintas mediciones llevadas a cabo por técnicos del Laboratorio de Acústica y Vibraciones de la Universidad Politécnica de Madrid en la forma descrita en el apartado anterior. Algunas son mediciones simples llevadas a cabo en viviendas de distintas ciudades españolas. Algunos otros datos son el resultado de pruebas de repetibilidad o de participación en ejercicios de intercomparación llevados a cabo por el laboratorio.

En el caso de 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 [5].

Los volúmenes de los recintos de los datos que se muestran en el siguiente apartado oscilan entre 20 y 100 m³.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Conocer cómo es el campo sonoro en el interior de un recinto es fundamental para entender el resultado de las mediciones que se llevan a cabo. La situación real que nos encontramos fuera del laboratorio es que existe tanta variedad de campos sonoros como recintos. La práctica habitual es hacer todos los análisis basados en dos modelos ideales:

campo sonoro difuso o campo sonoro modal. En este trabajo, se ha escogido la desviación estándar como parámetro fácil de calcular y que permite analizar las variaciones espaciales del nivel de presión sonora en un recinto. En la práctica, sería también necesario considerar la variación temporal. No obstante, en la siguiente discusión se ha asumido que la incertidumbre debida al promedio temporal asociado al nivel de presión sonora en cada posición del recinto es despreciable. En este primer estadio del trabajo y para hacer más sencillo el análisis nos hemos fijado exclusivamente en los niveles de presión sonora medidos en el recinto receptor para el cálculo de L_2 y en la desviación estándar de estos niveles.

En la Figura 1 se muestra la desviación estándar de L_2 en función de la frecuencia para cinco ensayos "in situ" según UNE EN ISO 140-4 llevadas a cabo por tres operadores distintos en un mismo recinto y en las condiciones de repetibilidad descritas en el apartado 2.2.. Mientras que aproximadamente por encima de los 400 Hz la desviación estándar medida es prácticamente independiente de las posiciones de micrófono escogidas para el ensayo, si que se miden valores diferentes entre 100 y 400 Hz. Estos diferentes valores de la desviación estándar se traducen en variaciones de la diferencia de niveles de un ensayo a otro de 3-4 dB que conviene tener en cuenta que se están produciendo.

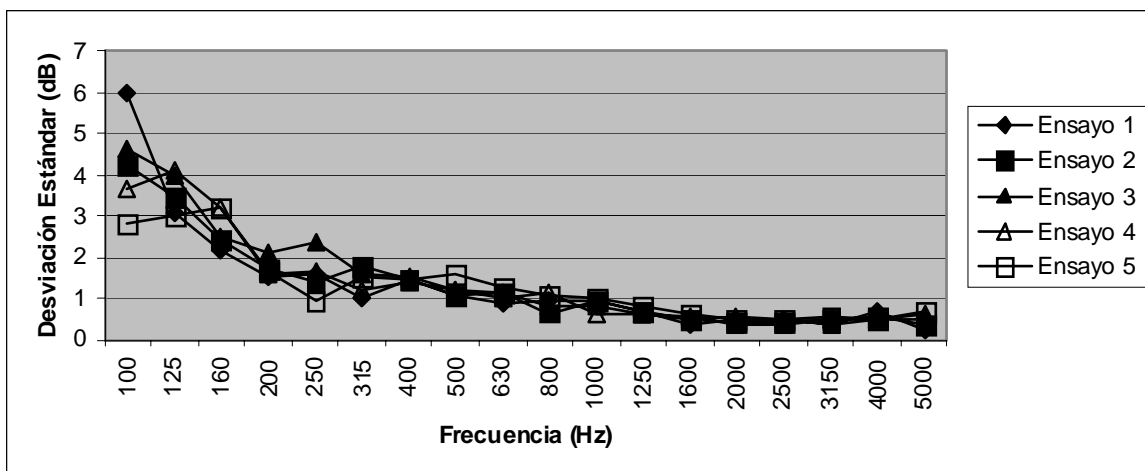


Figura 1. Desviación estándar para L_2 según UNE EN ISO 104-4 para cinco ensayos llevados a cabo por tres técnicos diferentes bajo condiciones de repetibilidad.

Un ejemplo de similares características se muestra en la Figura 2 en el que en un mismo recinto se han llevado a cabo ensayos "in situ" según UNE EN ISO 140-4 y 140-5. Independientemente del tipo de ensayo se reproduce de nuevo la situación descrita en la Figura 1: las diferencias en el valor de la desviación estándar se registran fundamentalmente por debajo de los 400 Hz. No obstante, en la Figura 2 se ha optado por mostrar los datos relativos a un solo ensayo llevado a cabo por un mismo técnico. Con este ejemplo se quiere mostrar el diferente comportamiento para cada tipo de ensayo de la desviación estándar por debajo de los 300 Hz. Una primera diferencia es el menor valor la desviación estándar a 100 Hz para el caso del ensayo realizado según UNE EN ISO 140-5. Esta diferencia puede estar asociada a la distancia de la fuente sonora del recinto receptor, siendo mayor para este tipo de ensayo y por tanto mayor la contribución del campo reverberante. La segunda diferencia es la forma de la dependencia de la desviación estándar con la frecuencia en dicho intervalo. Esta dependencia puede estar relacionada con las características de la pared separadora a través de la cual se está produciendo principalmente la transmisión del sonido. En la misma figura se ha representado la diferencia de niveles L_1-L_2 para cada uno de los ensayos. La principal

diferencia entre ambas paredes es que la fachada del ensayo 140-5 posee una superficie acristalada lo que puede explicar la disminución de aislamiento a 160 Hz.

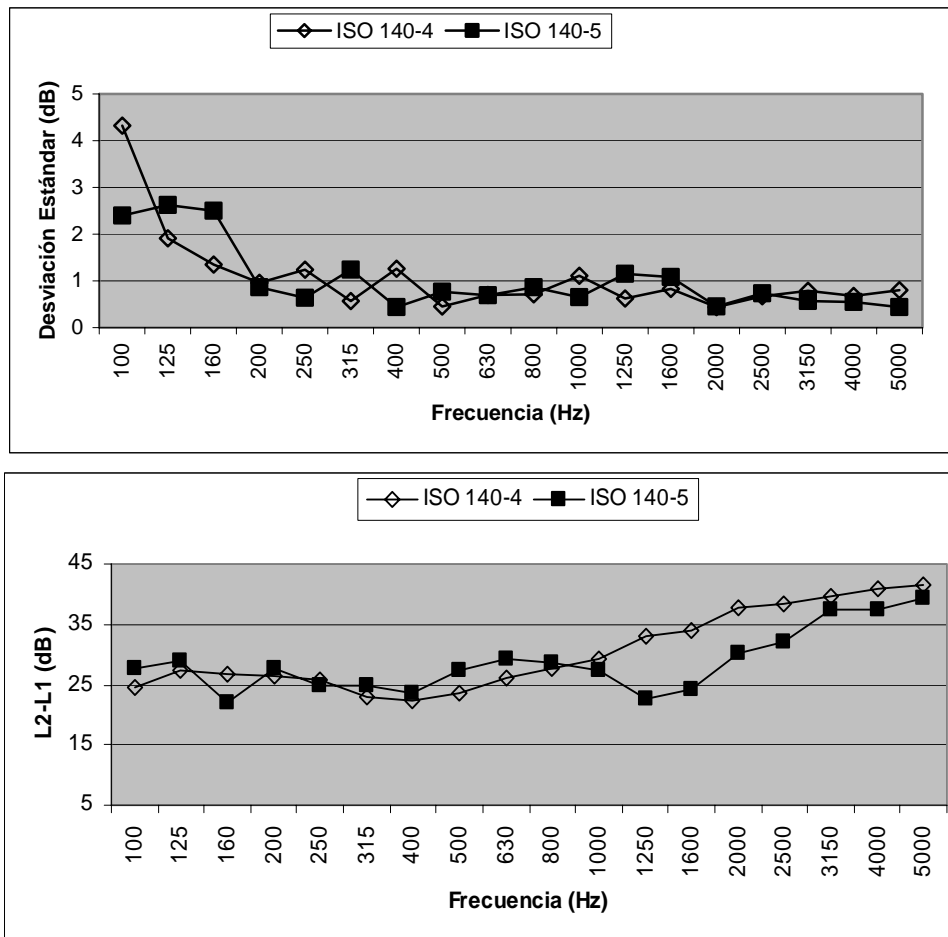


Figura 2. Desviación estándar para ensayos según normas UNE EN ISO 140-4 y 140-5 llevados a cabo en el mismo recinto. También se ha representado la diferencia de niveles medida en ambos ensayos.

En los diferentes ensayos según UNE EN ISO 140-4 y 140-5 realizados por el Laboratorio de Acústica y Vibraciones en distintos recintos de volúmenes comprendidos entre 20 y 100 m³ se ha observado el comportamiento que acabamos de ilustrar en las Figuras 1 y 2. A frecuencias intermedias, entre 400 y 3500 Hz, la desviación estándar es aproximadamente independiente del volumen, de las características de la pared separada a través de la que está teniendo lugar la transmisión y se puede suponer aproximadamente menor o igual a 1 dB [6].

Para frecuencias comprendidas entre los 100 y los 400 Hz 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. Este segundo comportamiento se ha observado principalmente para ensayos de fachada. En la Figura 3 se muestran dos ejemplos de ensayos de fachada que ilustran estos dos tipos de dependencia. Los ensayos de fachadas se han realizado en recintos de distintas geometrías y características estructurales de la parte ciega de la fachada. Pero la diferencia fundamental en estos ensayos está en los diferentes cerramientos de hueco de la fachada y diferentes factores de acristalamiento, esto es de porcentaje de superficie acristalada. Al aumentar el factor de acristalamiento aumenta el nivel de inmisión en el recinto. Por razones de confort térmico y

ahorro energético las ventanas habitualmente tienen un acristalamiento doble, (vidrios monolíticos o laminados), separados por una cámara. En la práctica la cámara suele ser de 6 a 16 mm, y la frecuencia masa-aire-masa del sistema formado por los dos vidrios y la cámara se sitúa en las bajas frecuencias [7]. Es probable que este es el efecto que se observe en el comportamiento de la desviación estándar ya que coincide con una disminución del aislamiento a baja frecuencia.

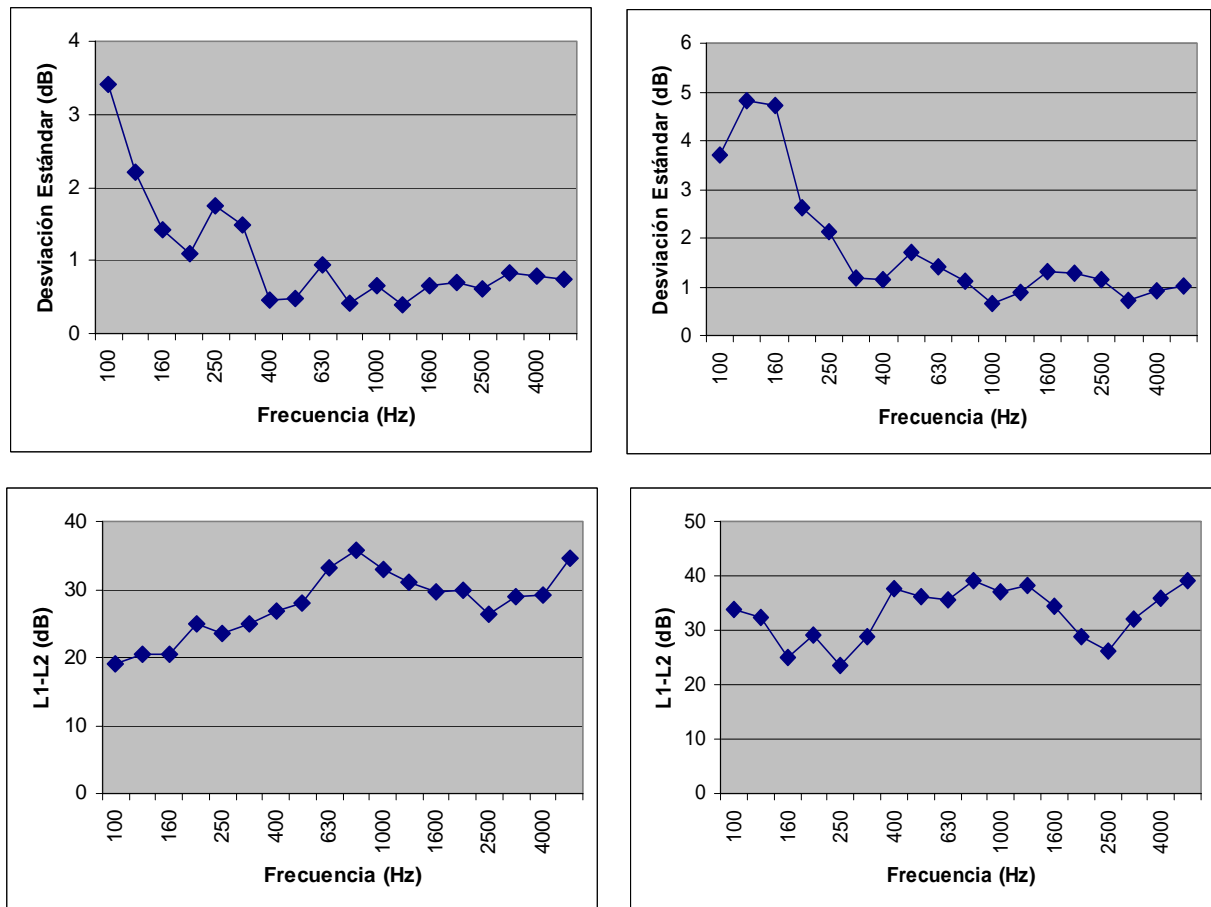


Figura 3. Desviación estándar y diferencia de niveles en función de la frecuencia para dos ensayos según UNE EN ISO 140-5. El primer recinto tiene volumen de 60 m³ y el segundo de 40 m³.

En la literatura se han propuesto algunos modelos teóricos para explicar el comportamiento de la desviación estándar en función de la frecuencia. Suponiendo un campo difuso y despreciable la contribución del campo directo, la expresión resultante para la desviación estándar es la siguiente [8]:

$$\sigma = \frac{5,57}{\sqrt{1+0,238BT}}$$

siendo B el bando de ancha y T el tiempo de reverberación. En esta misma línea, y principalmente para bajas frecuencias Lubman propone la siguiente expresión [9]:

$$\sigma = \frac{4,34}{-0,22 + \sqrt{1+0,319N}}$$

siendo N el número de modos normales para cada ancho de banda. Existe un acuerdo razonable entre estos modelos y los resultados experimentales solo en determinados intervalos de frecuencia. Ejemplos de ellos se recogen en las referencias [6] y [10]. En esta línea, sería interesante generar un modelo que permita alcanzar un mejor ajuste de la desviación estándar sobre todo a bajas frecuencias. Una primera aproximación tanto en ensayos según UNE EN ISO 140-4 y 140-5 se ha hecho para el caso en que la desviación estándar disminuye con la frecuencia. Los primeros resultados ya se han publicado para ensayos según UNE EN ISO 140-4 [10].

En este trabajo se muestran los primeros ajustes para ensayos de fachadas:

La mayoría de paredes en los recintos y edificios son rectangulares con uniones rectas que se asume que son uniformes. Las reflexiones difusas en estas uniones son poco probables, mucho más cuando en las paredes existen fronteras adicionales formadas por el perímetro de puertas y ventanas. Por tanto, es difícil asumir campos vibracionales difusos sobre paredes y suelos. Al igual que en recintos, los campos vibracionales difusos sobre superficies representa una situación ideal más que la realidad. A menudo se asume que son difusos simplemente en orden a simplificar los cálculos. Por estas razones, como modelo teórico proponemos una incertidumbre combinada resultante de la contribución de la desviación estándar descrita por la expresión (1) y de la desviación estándar asociada al campo vibracional de la pared separadora [10]. La dificultad estriba en elegir el modelo para representar la desviación estándar que represente el campo vibracional de la pared.

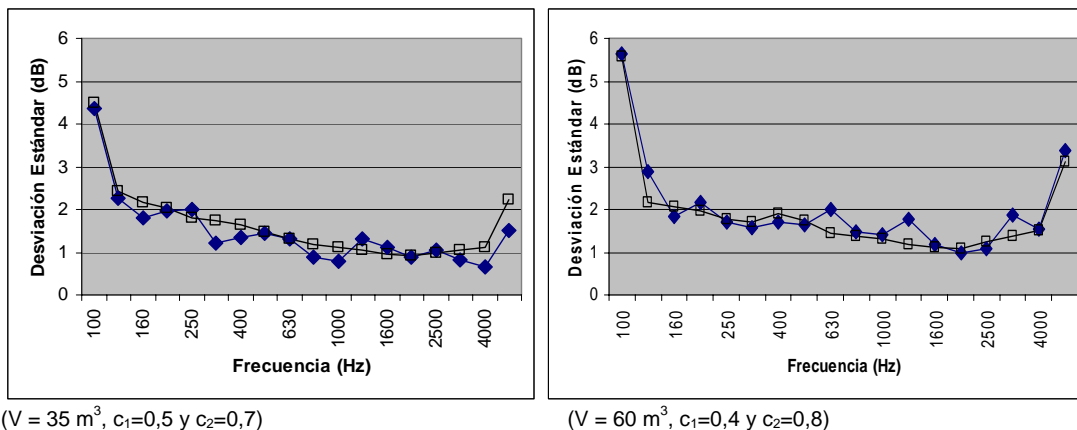


Figura 4. Ejemplos de ajuste de la desviación estándar para ensayos de fachada.

Comparado con los niveles de presión sonora en recintos, es más difícil calcular una estimación razonable de la variación espacial de la vibración de una pared o un suelo. En este sentido, como primera aproximación, se ha tomado como referencia la curva medida por Hopkins ([2], página 399) para paredes de fábrica de hormigón. Esta curva reproduce la forma de distintas superficies ya que los valores exactos dependen de la terminación de la superficie, propiedades del material, dimensiones de la pared y tipo de excitación. Sin embargo, se ha considerado como una buena aproximación para un primer ajuste de la desviación estándar. En esta primera aproximación las características de la pared, así como la influencia de su campo vibracional se recogen en su coeficiente de sensibilidad. De manera que la expresión de la incertidumbre combinada resultante usada para el ajuste ha sido la siguiente:

$$u_C = \sqrt{c_1^2(\text{geometria})u_1^2(\text{geometria}) + c_2^2(\text{pared})u_2^2(\text{pared})}$$

En el ajuste los coeficientes de sensibilidad se han dejado como parámetros libres. En la Figura 4 se muestran dos ejemplos de ajuste para ensayos de fachada. Distintos ajustes son posibles para distintos valores del coeficiente de sensibilidad, el que se ha escogido como válido es aquel para el que resulta un error cuadrático medio menor. Es claro que este modelo necesita un mayor refinamiento y que no explica las distintas situaciones medidas experimentalmente. No obstante, es un punto de partida y contribuye a explicar algunos casos particulares.

4. CONCLUSIONES

Basados en el análisis de la desviación estándar calculada para los distintos valores de L_2 medidos en la sala receptora para ensayos según normas UNE EN ISO 140-4 y 140-5 en este trabajo se han puesto de relieve algunos aspectos importantes de los ensayos “in situ”:

- Aún siguiendo las condiciones descritas en la Norma y en condiciones de repetibilidad puede haber diferencias significativas entre los distintos ensayos: se obtienen resultados diferentes a baja frecuencia dependiendo de las posiciones de micrófono escogidas. Es conveniente tener en cuenta que se pueden producir estas diferencias.
- Se han analizado las diferencias que se observan en la desviación estándar dependiendo de si es un ensayo según UNE EN ISO 140-4 o 140-5. Se ha analizado de una manera sencilla a que pueden ser debidas esas diferencias y se ha propuesto un modelo teórico que ajusta razonablemente bien algunos de los resultados medidos. Estos resultados han puesto de manifiesto el efecto fundamental de las características de la pared separadora determinando la distribución espacial del campo en un recinto.

5. REFERENCIAS

- [1] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, International Organization for Standardization, 1995.
- [2] C. Hopkins: Sound Insulation, Elsevier, Oxford, 2007.
- [3] S. Maluski y B. M. Gibbs, Applications of a finite element model to low frequency sound frequency sound insulations in dwellings, J. Acoust. Soc. Am. 108 (4), (2000), 1741-1751.
- [4] A. Osipov, P. Meesb y G. Vermeif, Low frequency airborne sound transmission through single partitions in buildings, Applied Acoustics 52 (1997), 273-288.
- [5] 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.
- [6] M. A. Navacerrada, C. Díaz y A. Pedrero, 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, Tecniacústica 2010.
- [7] C. Díaz, El aislamiento acústico (III), Cuadernos del Instituto Juan de Herrera de la Escuela de Arquitectura de Madrid (3-51-12).
- [8] M. R. Schroeder, Effect of frequency and space averaging on the transmission responses of multimode media, J. Acoust. Soc. Am. 46 (1), (1969), 277-283.
- [9] J. M. Craik, On the accuracy of sound pressure level measurements in rooms, Applied Acoustics 29, (1990), 25-33.
- [10] M. A. Navacerrada, C. Díaz y A. Pedrero, Qualitative behaviour of L_1 and L_2 standard deviation in insulations measurements according to standard UNE EN ISO 140-4, Forum Acusticum 2011.