

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD E INCERTIDUMBRE DE MEDIDAS “IN SITU” DEL AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO DE PAREDES PESADAS

Cristian Mondaca Marino¹, Carolina R. A. Monteiro¹, María Machimbarrena¹, Sean Smith²

¹Departamento de Física Aplicada, E.T.S de Arquitectura, Universidad de Valladolid, España.

²Institute for Sustainable Construction, Edinburgh Napier University, Edinburgh, UK.
(carolarqurb@gmail.com, cristianmondaca@yahoo.es, maria@opt.uva.es, Se.Smith@napier.ac.uk)

Resumen

En el presente trabajo se realiza un análisis exploratorio del comportamiento de aislamiento acústico a ruido aéreo de diferentes paredes de soluciones constructivas pesadas, teniendo como base los datos de medidas “in situ” de aislamiento a ruido aéreo. El objetivo es determinar el comportamiento de variabilidad e incertidumbre de cientos de soluciones similares; en particular se analiza una extensa base de datos de medidas de aislamiento acústico, recolectada a lo largo de cinco años, correspondientes a paredes pesadas de uso habitual en Reino Unido. Los resultados del análisis muestran que a pesar del alto desempeño de aislamiento acústico se debe tener presente la gran variabilidad que puede presentar un mismo diseño de pared en situaciones de recintos diferentes, siendo poco recomendable extrapolar comportamiento de aislamiento acústico de una situación en otra levemente distinta a pesar de la baja correlación de los valores globales de aislamiento y las diferentes configuraciones de espacio o de superficie separadora. Además los valores de aislamiento acústico, incertidumbre e índices globales no exhiben comportamientos de distribución normal. Este efecto se debe considerar en el momento del diseño de las soluciones constructivas y en el caso de la estimación de la incertidumbre por métodos de simulación como por ejemplo el método de Montecarlo.

Palabras-clave: Aislamiento acústico, incertidumbre, variabilidad, Estimación densidad de núcleo.

Abstract

This paper performs an investigative analysis of the acoustic behavior of different heavy walls, based on the measurement "in situ" of airborne sound insulation. The objective is to evaluate the performance of variability and uncertainty of hundreds of similar solutions; in particular, it was analyzed an extensive database of airborne sound insulation measurements, collected over five years, for heavy walls commonly used in the UK. Test results show that despite the high performance of acoustic insulation it is necessary to take into account the great variability that may present the same wall design in different dwellings, and it is not recommended to extrapolate acoustic behavior of a slightly different situation in other, despite the low correlation of single number values to different room configuration or separating surface. Besides sound insulation values, uncertainty and global indices reveal behaviors not normally distributed. This effect should be considered when designing construction solutions and in the case of estimating the uncertainty by simulation methods such as Monte Carlo method.

Keywords: Airborne sound insulation, uncertainty, variability, Kernel Density Estimators.

PACS no. 43.55.-n, 43.55.Ti

1 Introducción

Es bien conocido que paredes de idéntico diseño puede presentar diferentes comportamientos de aislamiento al ruido cuando se mide su rendimiento “in situ”. Esto se puede deber a deficiencias en la construcción, diferencias en la calidad de los materiales utilizados o errores en la interpretación del diseño. También pueden existir diferencias en los valores de aislamiento acústico obtenidos en mediciones producto de problemas de reproducibilidad de las mediciones, la incertidumbre asociada a la cadena de medición o un inadecuado procedimiento de medición [1].

Existe escasa literatura en la cual se analice de forma sistemática el comportamiento de variabilidad del aislamiento al ruido aéreo en el dominio de la frecuencia (como el R' o D_{nt}) en paredes de similar diseño, y de cómo afectan los cambios de volumen y superficie del área común de las diversas configuraciones que se pueden dar en un edificio o vivienda.

Por ejemplo Öqvist *et al* [1] realizan un análisis de 30 apartamentos similares en una nueva urbanización en donde miden índices de reducción aparente al ruido aéreo y al ruido de impacto, determinando su variabilidad. Sin embargo existe muy poca literatura que realice un análisis de configuraciones similares realizadas en diversas urbanizaciones a lo largo de varios años. En este trabajo se analizará la variabilidad de paredes similares implementadas a lo largo de 5 años por indicaciones de un catálogo utilizado en Reino Unido que ha permitido cumplir de forma exitosa con la legislación en cuanto a la protección frente al ruido en las viviendas. Para este motivo se ha analizado una base de datos con mediciones realizadas en diversas obras supervisadas por la empresa Robust Details Ltd en la cual se recoge el comportamiento de aislamiento acústico de diversas configuraciones.

En la sección 2 se desarrolla brevemente el tipo de configuraciones y las características técnicas de las soluciones constructivas y base de datos a ser analizada. En la sección 3 se realiza un análisis estadístico exploratorio respecto del comportamiento de los índices de aislamiento acústico al ruido aéreo en frecuencias de tercio de octava y el comportamiento de los índices globales de aislamiento acústico respecto del volumen de la sala receptora y área común de unión entre recintos, además del comportamiento de la incertidumbre en las mediciones. Finalmente en la sección 4 se realiza una breve discusión y conclusiones.

2 Datos y métodos

2.1 Tipología de configuraciones constructivas

Se analizarán dos tipos de configuraciones de paredes de un catálogo de la empresa Robust Details Ltd. de Reino Unido, que cuenta con una base de datos con 354 paredes a las cuales se han medido “in situ” sus valores de aislamiento acústico. En el grupo de datos existen dos configuraciones diferentes, 199 paredes con una cavidad de 75 mm en su interior, y 160 paredes con una cavidad de 100 mm en su interior. Cada una de estas paredes tiene registros de medidas de aislamiento acústico en un rango de frecuencia de 50-5000 Hz en una banda de tercio de octava.

Todos los cálculos se han realizado utilizando el software Matlab® en su versión 2012, implementando rutinas que permiten los cálculos de los valores de aislamiento acústico de las paredes a ser analizadas y los cálculos estadísticos, junto con el método no-paramétrico utilizado.

En la figura 1 se puede ver el modelo de paredes considerada en nuestro análisis. Este modelo se ha analizado en dos variaciones particulares, con una cavidad de 75 mm y con una cavidad de 100 mm. El resto de las especificaciones son similares respecto de los espesores y materiales a ser utilizados, una partición de doble hoja con cámara (75mm o 100 mm) utilizando bloques de hormigón más trasdosado (placas de yeso adheridas). La densidad de los bloques puede variar entre los 1,350kg/m³ y los 2,300 kg/m³.

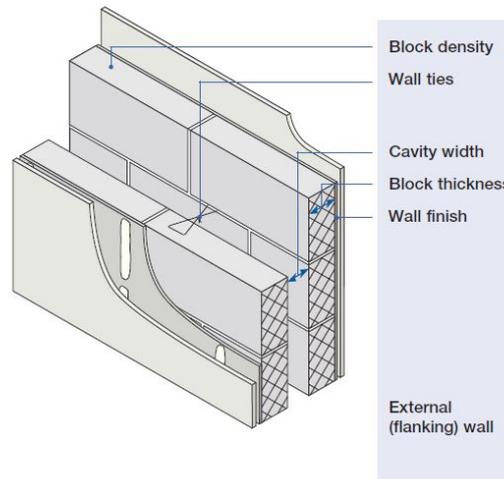


Fig. 1: Modelo de pared analizadas.

2.2 Métodos estadísticos exploratorios

En nuestro análisis utilizaremos estadísticos básicos aplicados a los valores de aislamiento acústico comprendidos entre los 50 a 5000 Hz. Además consideraremos las distribuciones de los valores según banda de frecuencia y comportamiento de la variabilidad de los valores medidos.

Para esto utilizaremos la estimación de la densidad de núcleo o función de distribución de *kernel*, que es una herramienta no-paramétrica para estimar la función de densidad de probabilidad de una variable aleatoria y así determinar el tipo de distribución de los valores de aislamiento acústico según banda de frecuencia, lo cual puede facilitar el ajuste a un modelo paramétrico que en general son más sencillos de manejar, pero que pueden cometer errores significativos si no se cumplen los supuestos de estos modelos o se ha realizado un ajuste inadecuado.

2.3 Estimación de densidad de núcleo

En este trabajo se utilizarán las técnicas de estimación no-paramétricas y en particular las estimaciones *kernel* (o de núcleo) para aproximar la función de densidad de probabilidad de la variable aleatoria correspondiente, a los valores de aislamiento por banda de frecuencia en una resolución de tercio de octava. Aunque un histograma puede ser útil para examinar la distribución de una variable, presenta inconvenientes que se pueden resumir en cuatro críticas [2]:

- Su representación puede cambiar radicalmente dependiendo del ancho de la barra de división para su representación.
- La elección del origen del ancho de la barra también influye en cierta medida en la forma obtenida.
- Existe una pérdida de información, ya que las observaciones se sustituye por el punto central del intervalo en cada una de las barras de representación.
- La función de densidad subyacente se asume a menudo como una función suave y continua, en cambio el histograma no lo es.

Estos problemas pueden ser solucionados usando un procedimiento no-paramétrico de estimación de la distribución por medio de estimar la función de densidad de probabilidad de una variable basándose en una muestra. La estimación de densidad “Kernel” o de núcleo es esencialmente una forma sofisticada de ponderar promedios de la distribución usando una función de ponderación, llamada función de núcleo [2], [3].

Los estimadores basados en núcleos fueron introducidos por Rosenblatt [4] en 1956 y Parzen [5] en 1962. La idea en la que se basa este método es la siguiente. Si X es una variable aleatoria con función de distribución F y densidad f , entonces en cada punto de continuidad x de f se tiene que

$$f(x) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{2h} (F(x+h) - F(x-h)) \quad (1)$$

Dada una muestra X_1, \dots, X_n proveniente de la distribución F , para cada h fijo, $F(x+h)-F(x-h)$ se puede estimar por la proporción de observaciones que yacen en el intervalo $(x-h, x+h)$. Por lo tanto, tomando un h pequeño, un estimador natural de la densidad es

$$\hat{f}_{n,h}(x) = \frac{1}{2hn} \Delta \{X_i : X_i \in (x-h, x+h)\} \quad (2)$$

donde $\Delta\{\dots\}$ indica el número de elementos del conjunto. Otra manera de expresar este estimador es considerando la función de peso w definida como

$$w(x) = \begin{cases} 1/2 & \text{si } |x| < 1 \\ 0 & \text{cc} \end{cases} \quad (3)$$

de manera que el estimador de la densidad f en el punto x se puede expresar como

$$\hat{f}_{n,h}(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{h} w\left(\frac{x - X_i}{h}\right) \quad (4)$$

Pero este estimador no es una función continua, tiene saltos en los puntos $X_i \pm h$ y su derivada es 0 en todos los otros puntos. Por ello se ha sugerido reemplazar a la función w por funciones más suaves K , llamadas núcleos, lo que da origen a los estimadores de núcleos.

El estimador de núcleos de una función de densidad f calculado a partir de una muestra aleatoria X_1, \dots, X_n de dicha densidad se define como

$$\hat{f}_{n,h}(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - X_i}{h}\right) \quad (5)$$

donde la función K se elige generalmente entre las funciones de densidad conocidas y h es un parámetro llamado ventana, parámetro de suavizado o ancho de banda, el cual determina las propiedades estadísticas del estimador y el sesgo crece y la varianza decrece con h [6]. Es decir que si h es grande, los estimadores están sobreesuavizados y son sesgados, y si h es pequeño, los estimadores resultantes están subsuavizados, lo que equivale a decir que su varianza es grande. A pesar que la elección del núcleo K determina la forma de la densidad estimada, la literatura sugiere que esta elección no es crítica, al menos entre las alternativas usuales y más importante es la elección del tamaño de la ventana. Para determinar un ancho de banda con el cual comenzar, una alternativa es calcular el ancho de banda óptimo si se supone que la densidad tiene una forma específica¹.

¹ La ventana óptima en el sentido de minimizar el error medio cuadrático integrado (definido como la esperanza de la integral del error cuadrático sobre toda la densidad) fue calculada por Silverman [3] y depende de la verdadera densidad f y del núcleo K . Al suponer que ambos la densidad y el núcleo son normales, la ventana óptima resulta $h_{opt} = 1.06\sigma n^{-1/5}$ donde σ es la desviación estándar de la densidad.

3 Análisis de variabilidad e incertidumbre de las soluciones constructivas

3.1 Comportamiento de los valores de aislamiento acústico en el dominio de la frecuencia

En la figura 2 se pueden ver los valores de aislamiento de 199 paredes con una cavidad de 75 mm junto con un gráfico de la desviación estándar de los valores según banda de frecuencia. De la figura se observan valores de aislamiento altos y crecientes en frecuencia, con una caída en el nivel de aislamiento en la frecuencia de 2500 Hz.

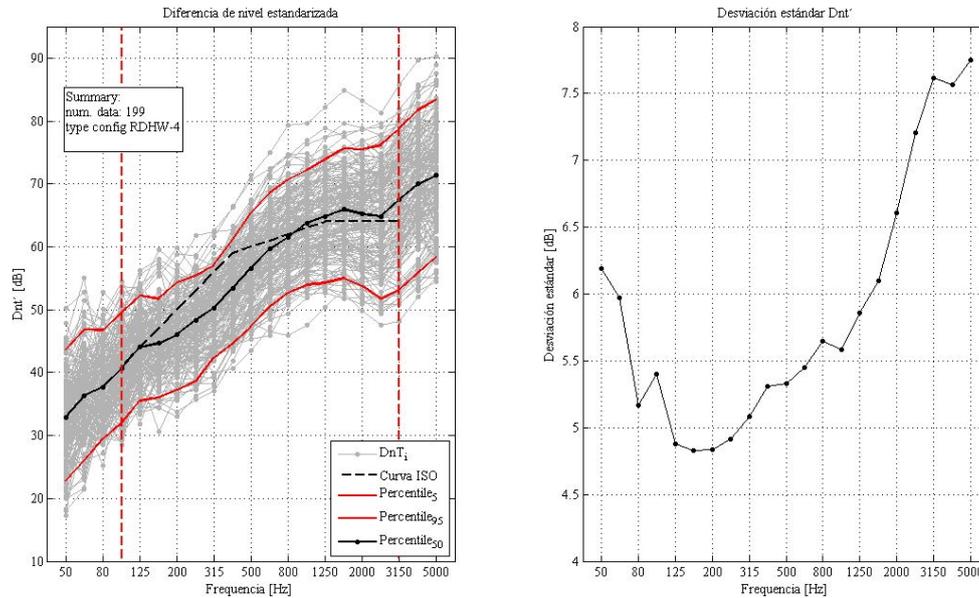


Fig. 2: Aislamiento acústico de paredes con una cavidad de 75 mm.

En el caso de los valores de desviación estándar, se puede apreciar que las bandas que presentan mayor volatilidad son las bajas (por debajo de los 100 Hz) y altas frecuencias (por sobre los 1250 Hz.), que en este caso son superior a 5.5 dB en alta frecuencia y por sobre 5 dB en baja frecuencia.

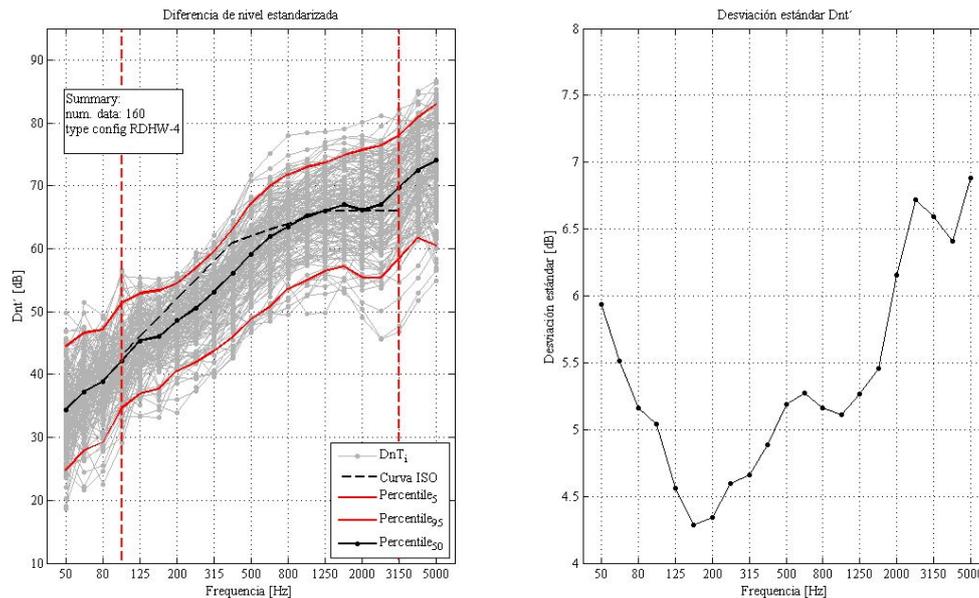


Fig. 3: Aislamiento acústico de paredes con una cavidad de 100 mm.

De forma similar, se pueden ver en la figura 3 valores de aislamiento de 160 paredes con una cavidad de 100mm, junto con un gráfico de la desviación estándar de los valores según banda de frecuencia. De la figura se observan valores de aislamiento altos y crecientes en frecuencia, con una caída en el nivel de aislamiento entre la banda de los 2500 y 3150 Hz. En el caso de los valores de desviación estándar, se puede apreciar que las bandas que presentan mayor volatilidad son las de baja frecuencia (por debajo de los 100 Hz) y en las altas frecuencias (por sobre los 1250 Hz.), en ambos casos con valores por sobre los 6 dB. También se puede ver que el comportamiento de la desviación estándar presenta una disminución de la volatilidad en torno a los 160 Hz de forma similar al caso anterior, pero agregando una importante disminución de la volatilidad en la banda de los 1000 Hz y 4000 Hz, que es mucho más leve en el caso anterior.

Tabla 1: Estadísticos básicos de paredes con cavidad de 75 mm.

| | 50 | 63 | 80 | 100 | 125 | 160 | 200 | 250 | 315 | 400 | 500 |
|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Min. | 17,3 | 21,5 | 25,2 | 28,5 | 31,9 | 30,6 | 33,0 | 35,7 | 37,0 | 40,7 | 43,5 |
| Max. | 50,3 | 55,0 | 52,8 | 54,5 | 56,2 | 59,6 | 59,8 | 61,8 | 62,6 | 66,4 | 71,4 |
| Media | 32,7 | 36,2 | 38,0 | 40,6 | 44,0 | 44,6 | 46,0 | 47,8 | 50,1 | 53,1 | 56,4 |
| Mediana | 32,9 | 36,4 | 37,7 | 40,6 | 44,0 | 44,7 | 46,0 | 48,3 | 50,3 | 53,4 | 56,6 |
| Desv. estándar | 6,2 | 6,0 | 5,2 | 5,4 | 4,9 | 4,8 | 4,8 | 4,9 | 5,1 | 5,3 | 5,3 |
| | 630 | 800 | 1000 | 1250 | 1600 | 2000 | 2500 | 3150 | 4000 | 5000 | |
| Min. | 45,9 | 46,0 | 47,6 | 50,3 | 51,8 | 49,7 | 47,6 | 48,2 | 52,0 | 54,4 | |
| Max. | 75,0 | 79,3 | 79,6 | 82,2 | 84,9 | 83,2 | 81,2 | 85,8 | 89,7 | 90,3 | |
| Media | 59,4 | 61,6 | 63,4 | 64,8 | 65,4 | 64,9 | 64,7 | 67,2 | 69,9 | 71,1 | |
| Mediana | 59,6 | 61,5 | 63,8 | 64,8 | 65,9 | 65,2 | 64,8 | 67,6 | 70,0 | 71,4 | |
| Desv. estándar | 5,5 | 5,6 | 5,6 | 5,9 | 6,1 | 6,6 | 7,2 | 7,6 | 7,6 | 7,7 | |

Tabla 2: Estadísticos básicos de paredes con cavidad de 100 mm.

| | 50 | 63 | 80 | 100 | 125 | 160 | 200 | 250 | 315 | 400 | 500 |
|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Min. | 18,7 | 21,6 | 22,6 | 29,1 | 33,3 | 33,1 | 33,9 | 37,4 | 39,5 | 42,6 | 46,6 |
| Max. | 49,8 | 51,5 | 49,4 | 56,5 | 55,4 | 55,2 | 56,1 | 59,3 | 62,1 | 65,9 | 71,7 |
| Media | 34,4 | 37,2 | 38,6 | 42,3 | 45,5 | 46,1 | 48,1 | 50,2 | 52,3 | 55,5 | 58,7 |
| Mediana | 34,4 | 37,2 | 38,9 | 42,1 | 45,4 | 46,0 | 48,5 | 50,5 | 53,2 | 56,1 | 59,1 |
| Desv. estándar | 5,9 | 5,5 | 5,2 | 5,0 | 4,6 | 4,3 | 4,3 | 4,6 | 4,7 | 4,9 | 5,2 |
| | 630 | 800 | 1000 | 1250 | 1600 | 2000 | 2500 | 3150 | 4000 | 5000 | |
| Min. | 48,5 | 49,5 | 49,7 | 49,8 | 53,0 | 49,1 | 45,5 | 46,8 | 51,7 | 55,0 | |
| Max. | 75,1 | 78,0 | 78,4 | 78,5 | 79,1 | 80,0 | 81,2 | 82,2 | 85,0 | 86,6 | |
| Media | 61,5 | 63,5 | 64,9 | 66,0 | 66,6 | 66,3 | 66,5 | 69,0 | 71,9 | 73,3 | |
| Mediana | 61,9 | 63,5 | 65,2 | 66,0 | 67,0 | 66,1 | 67,0 | 69,7 | 72,5 | 74,0 | |
| Desv. estándar | 5,3 | 5,2 | 5,1 | 5,3 | 5,5 | 6,2 | 6,7 | 6,6 | 6,4 | 6,9 | |

En la tabla 1 se pueden ver un resumen de estadísticos básicos de los valores de aislamiento acústico según banda de frecuencia para la pared con una cavidad de 75 mm y de 100 mm. En el primer caso se pueden observar bandas con amplios rangos que separan los valores mínimos con los máximos

registrados en las bandas de los 50 y 5000 Hz, con valores de 25,2 y 28,6 dB respectivamente. Diferencias aun más amplias se pueden ver en el caso de paredes con una cavidad de 100 mm (tabla 2), en donde se pueden observar rangos por sobre los 35 dB de diferencia, en las bandas de 2500 y 3150 Hz, y de aproximadamente 31 dB en la banda de 50 Hz.

3.2 Análisis no-paramétrico

En el caso de considerar la distribución de los valores de aislamiento en cada una de las bandas de frecuencia se puede ver en la figura 4 que existe un comportamiento heterogéneo entre las bandas de frecuencia. En el caso de la pared con una cavidad de 75 mm se puede observar que algunas bandas presentan comportamientos muy alejados de una distribución normal gaussiana.

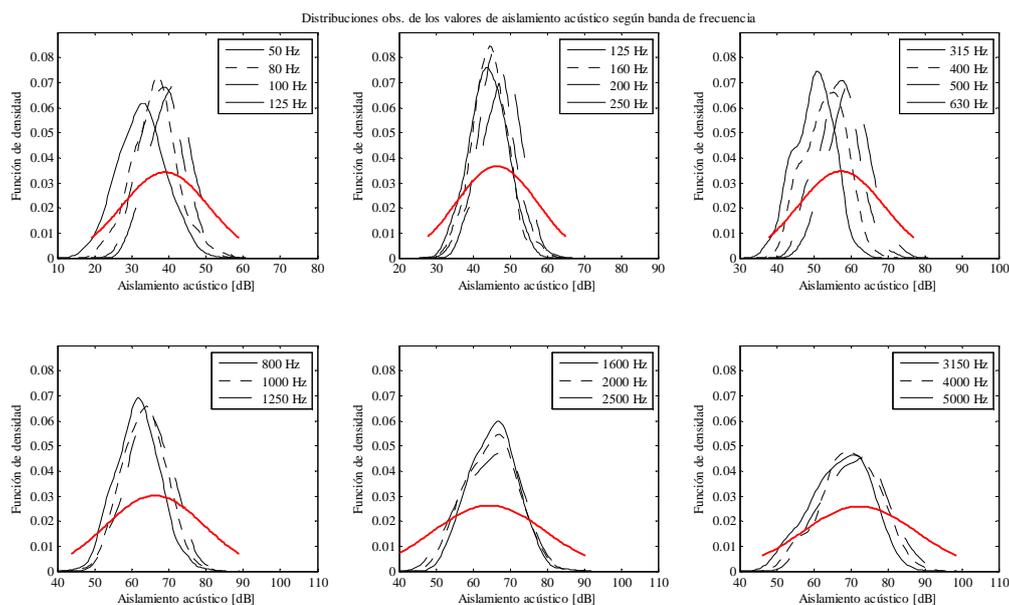


Fig. 4: Función de densidad de valores de aislamiento según banda de frecuencia, pared con cavidad de 75mm.

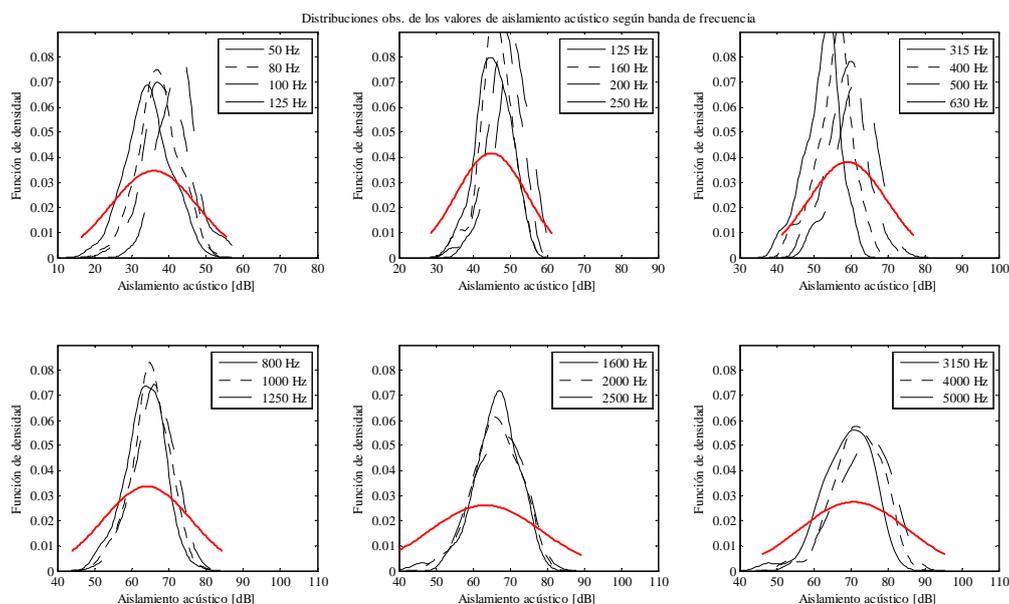


Fig. 5: Función de densidad de valores de aislamiento acústico según banda de frecuencia, pared con cavidad de 100mm.

Además en la figura 4 se puede apreciar distribuciones simétricas en baja y alta frecuencia, con la diferencia que en baja frecuencia los valores son más concentrados en torno al valor medio y en alta frecuencia se puede apreciar una dispersión mayor de los valores, además las bandas de 315 a 500 Hz muestran un comportamiento bimodal o concentración de datos en torno a dos valores diferentes.

En la figura 5 observamos el caso de paredes con un cavidad de 100 mm y de forma similar al caso anterior, las distribuciones de los valores según banda de frecuencia no muestran un comportamiento de distribución normal gaussiana, además existe un comportamiento asimétrico en la banda de 100, 500 y 5000 Hz, junto con distribuciones muy concentradas en torno al valor medio entre las bandas de 200 y 500 Hz. Las distribuciones tienden a dispersarse en alta frecuencia.

3.3 Variabilidad de los índices de aislamiento

Por otra parte hemos considerado el comportamiento de los índices globales de aislamiento acústico y ver su correlación con la razón de superficie común entre recintos separados por las paredes y el volumen del recinto receptor (S/V). En la figura 6 se puede observar la variabilidad del índice global de aislamiento acústico de las paredes con una cavidad de 75 mm y paredes con una cavidad de 100 mm.

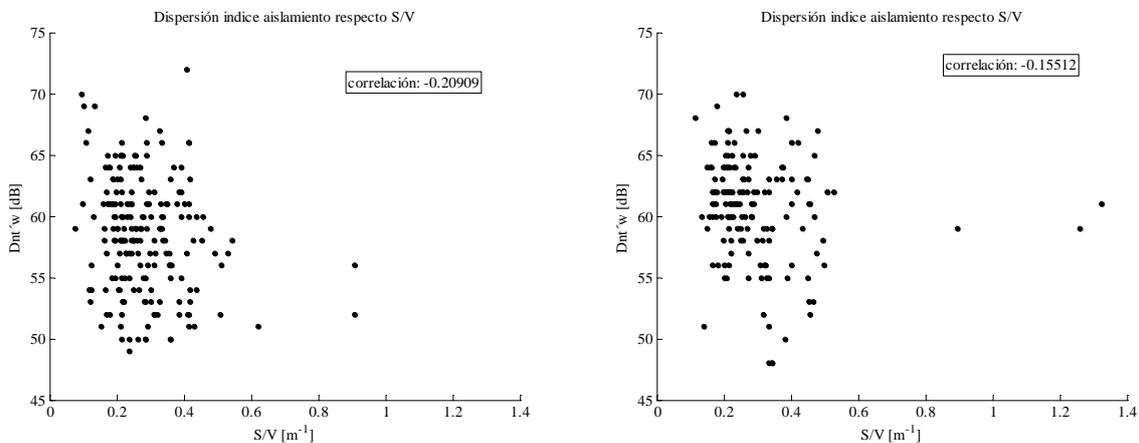


Fig. 6: pared con una cavidad de 75 y 100 mm.

De la figura se puede ver que las paredes presentan un amplio espectro de situaciones respecto de la relación entre la superficie de separación y volumen de la sala receptora, aunque concentrándose entre los valores de 0.1 y 0.5 en ambos casos, en nuestro caso representan situaciones en donde el volumen del recinto receptor es considerablemente más grande que la superficie en común.

Por otra parte se puede ver que en situaciones similares de relación S/V los índices globales de aislamiento pueden variar en forma importante de más de 10 dB y en general una muy baja correlación entre los índices de aislamiento globales y el factor S/V , lo que implica una muy baja incidencia de la geometría del recinto y superficie separadora en el desempeño del aislamiento acústico a ser obtenido en situaciones similares. Finalmente a nivel general no existe una diferencia significativa entre los valores globales de aislamiento acústico obtenidos por ambos tipos de paredes, debido probablemente a la alta eficiencia de la configuración, lo que provoca que cambios en la cavidad interior provoque un efecto poco significativo en el desempeño global del sistema.

En las siguientes figuras se analiza la relación entre los índices de aislamiento más habituales para caracterizar el desempeño del aislamiento acústico, en nuestro caso el índice aparente de aislamiento acústico R'_w y el índice normalizado de aislamiento acústico D_{nT} calculados en un mismo rango de frecuencia (100-3150 Hz).

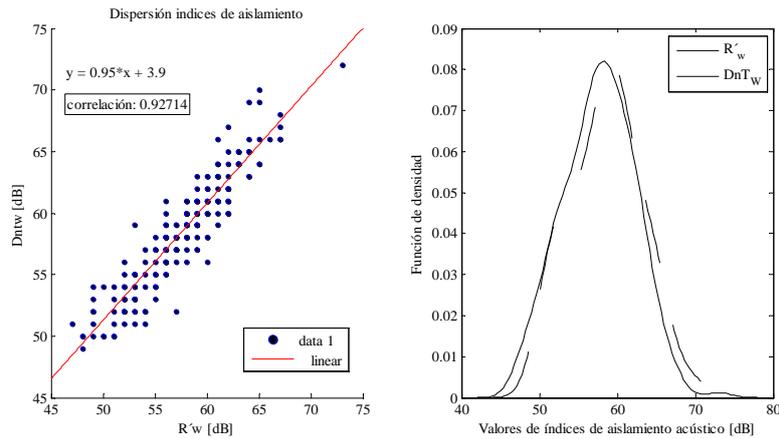


Fig. 7: Relación entre índices de aislamiento y funciones de densidad, pared con una cavidad de 75 mm.

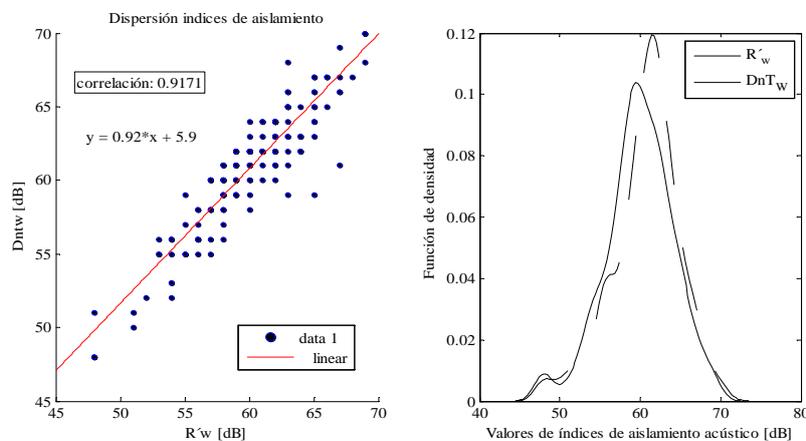


Fig. 8: Relación entre índices de aislamiento y funciones de densidad, pared con una cavidad de 100 mm.

En el caso de la pared con una cavidad de 75 mm (fig. 7) se puede ver que en general los valores de D_{nT} y R'_w tienen una correlación muy alta (0,92), con una relación positiva en donde D_{nT} es en promedio 3 dB mayor que R'_w . La función de densidad además muestra una distribución muy simétrica de los valores de aislamiento acústico, aunque muy alejado de una distribución normal gaussiana.

En el caso de la pared con una cavidad de 100 mm (fig. 8) se puede ver que en general los valores de D_{nT} y R'_w tienen una correlación muy alta (0,91), levemente menor que el caso anterior, con una relación positiva en donde D_{nT} es en promedio casi 6 dB mayor que R'_w . La función de densidad además muestra una distribución asimétrica de los valores de aislamiento acústico, con una tendencia hacia altos valores de aislamiento acústico.

3.4 Comportamiento de la incertidumbre en las medidas

En esta sección analizaremos el comportamiento de la incertidumbre de los valores medidos según tipo de pared. En la figura 9 se puede ver que las paredes en ambos casos presentan comportamientos muy diferentes según banda de frecuencia, con grandes valores de incertidumbre en los valores de aislamiento acústico entre las bandas de 200 y 400 Hz y entre 1600 y 2500 Hz en ambos casos, que son las banda de frecuencia que no presentan una gran desviación a nivel de aislamiento acústico al comparar todos los casos de paredes, sobre todo en baja frecuencia (200 Hz).

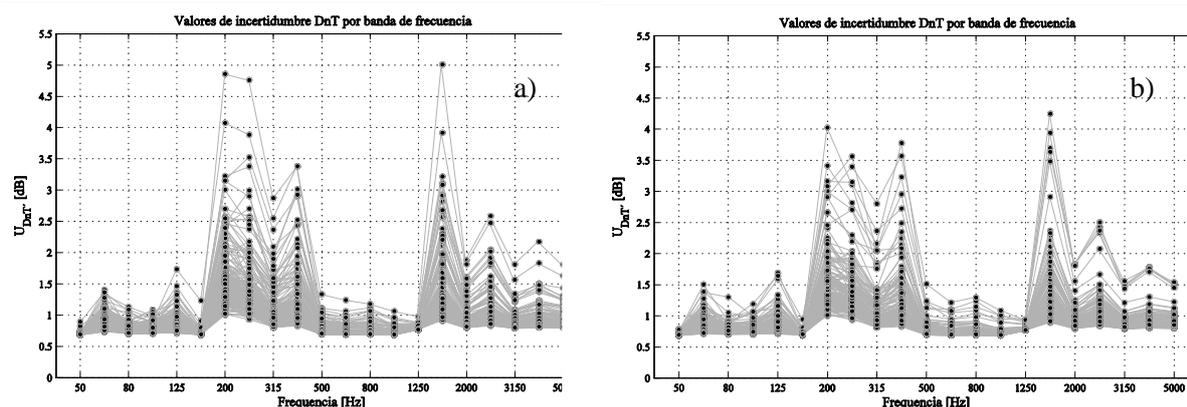


Fig. 9: Valores de incertidumbre por banda de frecuencia medidas de aislamiento acústico “in situ”: (a) Medianera con una cavidad de 75 mm., (b) Medianera con una cavidad de 100 mm.

Sin embargo, los valores de incertidumbre son levemente mayores para la pared con una cavidad de 75mm debido a la mayor variabilidad de los valores medidos de presión sonora en las bandas de 200 y 250 Hz y valores muy bajos de incertidumbre en las demás bandas, particularmente en la banda de 160 y 1250 Hz. Por otra parte una inspección de las distribuciones de los valores han mostrado asimetría con una tendencia hacia valores pequeños de incertidumbre, muy diferente de una situación de distribución normal², y con diferentes intensidades de concentración dependiendo de la variabilidad de los datos de incertidumbre, que no es uniforme en todas las bandas de frecuencia.

4 Discusión y conclusiones

Del análisis del comportamiento de las paredes de modelo similar pero con cavidades diferentes se ha podido ver que su desempeño de aislamiento acústico en general es alto y satisfactorio. Sin embargo, se debe de considerar la gran variabilidad que puede presentar un mismo diseño de pared en situaciones de recintos diferentes (aunque las diferencias sean pequeñas), siendo poco recomendable extrapolar comportamiento de aislamiento acústico de una situación en otra levemente distinta.

Esta variabilidad es explicada en una forma importante debido a los comportamientos en los extremos de la banda de medición, siendo mayor la variabilidad en baja y alta frecuencia, es decir, por debajo de los 100 Hz y por encima de los 3150 Hz que es el rango habitual de medición del aislamiento acústico, debido probablemente al comportamiento modal del sistema y al comportamiento de la cavidad interior y múltiples capas de materiales diferentes utilizados.

El comportamiento en los extremos se debe considerar en el caso de querer ampliar el rango de medición, debido a que una misma solución constructiva puede presentar valores muy diferentes de índice global de aislamiento acústico, dependiendo del rango de medida considerado. En otro trabajo presentado en este congreso discutimos el efecto de ampliar el rango de medida en los valores globales de aislamiento acústico debido al particular comportamiento de las paredes de uso habitual en la edificación de viviendas, y en general es significativo el incluir o excluir los valores por debajo de los 100 Hz o por encima de los 3150 Hz.

El análisis no-paramétrico ha mostrado ser muy útil para determinar la distribución que experimentan las variables medidas, en este caso los valores de aislamiento acústico a nivel de frecuencia y los valores de aislamiento global. En ambas situaciones se ha podido ver que en general las variables no se distribuyen según una distribución normal. Por otra parte los valores de aislamiento acústico presentan diferentes comportamiento según banda de frecuencia, siendo en algunas simétrica, en otras asimétrica y en general muy diferentes de una distribución normal gaussiana, lo que debe considerarse

² No hemos incluido los gráficos por motivos de espacio.

a la hora de modelar de forma paramétrica el comportamiento de las variables, o generar modelos que impliquen supuestos de la distribución de las variables.

En el caso del análisis de los valores globales de aislamiento acústico se ha podido ver que paredes similares, en condiciones similares de configuración pueden presentar valores muy diferentes de aislamiento acústico, no teniendo una gran influencia configuraciones diferentes de espacio o de superficie separadora, en los rango habituales que se presentan el factor S/V .

Finalmente al considerar el comportamiento de los valores de incertidumbre, se ha podido ver que pueden existir comportamientos muy diferentes de incertidumbre según banda de frecuencia, debido probablemente a los comportamientos de resonancia y vibraciones modales de los espacios medidos (adecuada estimación del tiempo de reverberación), el comportamiento de la fuente en baja frecuencia y en general de la metodología de medición en baja frecuencia; los comportamientos modales de las paredes, sus cavidades y múltiples capas al considerar frecuencias medias; y las características absorbentes y de impedancia de los materiales en el caso de considerar las altas frecuencias; fenómenos que inciden en valores de incertidumbres más grandes en algunas bandas específicas. Este efecto se debe considerar en el momento del diseño de las soluciones constructivas y en el caso de la estimación de la incertidumbre por métodos de simulación como por ejemplo el método de Montecarlo.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a la COST action TU0901, a la Universidad de Napier de Edinburgh-Escocia y particularmente a Robust Details Ltd por proveer los datos de campo utilizados en este estudio.

Referencias

- [1] Öqvist, R.; Ljunggren, F.; Ågren, A. Variations in Sound Insulation in Nominally Identical Prefabricated Lightweight Timber, Constructions. *Building Acoustics*, Vol. 17 (Number 2), 2010, pp. 91-103.
- [2] Härdle, W., Simar, L. (2004), *Applied Multivariate Statistical Analysis*, Springer.
- [3] Silverman, B. W. (1986), *Density Estimation for Statistics and Data Analysis*, London and New York, Chapman and Hall.
- [4] Rosenblatt, M. (1956). Remarks on some nonparametric estimates of a density function. *Ann. Math. Statist.* 27, pp. 832-837
- [5] Parzen, E. (1962). On estimation of a probability density function and mode. *Ann. Math. Statist.* 33, pp. 1065-1076.
- [6] Härdle, W. and Linton, O. (1994): *Applied Nonparametric Methods*. Handbook of Econometrics, Volume IV, Chapter 38. Elsevier Science.