

ESTUDIO DE LA CORRELACIÓN ENTRE VALORES DE 1/3 DE OCTAVA DE AISLAMIENTO A RUIDO AEREO Y SU IMPACTO EN LA INCERTIDUMBRE DEL VALOR GLOBAL

PACS: 06.20 fb, 43.55.Rg.+p

Carolina Monteiro¹; Marcel Borin¹; Reine Johansson²; María Machimbarrena³

1. Harmonia Acústica – Centro de Pesquisa e Desenvolvimento; Av. Mofarrej, 1200, CEP 05311-00, São Paulo-SP, Brasil; carolina.monteiro@harmoniaacustica.com.br; marcel.borin@harmoniaacustica.com.br

2. INTECO - International Technology Consulting, Uddevalla, Sweden. reine.johansson@inteco.se

3. Departamento de Física Aplicada – ETS de Arquitectura, Universidad de Valladolid; Av. de Salamanca s/n CP 47014, Valladolid, España; mariao@opt.uva.es

Palabras clave: Incertidumbre, ISO 12999-1, valores globales de aislamiento

ABSTRACT.

Traditionally in the field of building acoustics no individual uncertainty calculations are performed for sound insulation measurements. One of the settled justification is that it is impossible to retrieve correlation between 1/3 octave bands when considering single number quantity uncertainty. To enlighten this issue, this paper presents, for airborne sound insulation, a study on the correlation between 1/3 octave bands values using a large set of in situ airborne sound insulation measurements. The results of this study enable to verify if it is possible to identify how big these correlations are or if there is a general rule, and its influence on single number ratings uncertainty calculations.

RESUMEN

Tradicionalmente en acústica de edificios, no se realizan cálculos individuales de incertidumbre para ensayos de aislamiento. La justificación establecida para no hacerlos, es que es imposible identificar la correlación entre bandas de 1/3 de octava cuando se considera la incertidumbre de un valor global. En este estudio se investigan las correlaciones entre valores de 1/3 de octava utilizando datos de medidas in situ de aislamiento a ruido aéreo. Los resultados permiten verificar si es posible cuantificar estas correlaciones y si existe una regla general, y la influencia de las mismas en el cálculo de incertidumbre de los valores globales de aislamiento.

INTRODUCCIÓN

La incertidumbre asociada a un ensayo de aislamiento, bien sea en laboratorio para caracterizar un producto de construcción, o in situ para caracterizar un espacio construido, es de gran importancia desde el punto de vista reglamentario. En Europa existe normativa relativa al aislamiento acústico en la edificación en numerosos países [1] y, en muchas ocasiones, el incumplimiento de dicha normativa conlleva procedimientos judiciales. Para verificar el cumplimiento de la normativa, es imprescindible proporcionar el resultado del ensayo de aislamiento con su correspondiente incertidumbre de medida.

Tradicionalmente la incertidumbre asociada a las medidas de aislamiento en la edificación se ha reportado bien de acuerdo a la correspondiente normativa de incertidumbre en medidas de aislamiento, actualmente UNE EN ISO 12999-1 [2], o no se ha reportado en absoluto. Sin embargo, los valores de incertidumbre reflejados en [2] se han obtenido a partir de los resultados de un conjunto numeroso de ensayos interlaboratorio efectuados en algunos pocos países Europeos (principalmente Alemania, pero también Francia, Suecia, Italia y Portugal) y por tanto pueden estar afectados por la limitación de la muestra de partida.

En contra de lo expresado por diversos autores [3–5], también es posible realizar cálculos individualizados de incertidumbre asociados a cada ensayo de aislamiento [7–12], ajustándose todo lo posible a las indicaciones reflejadas en la GUM [6]. Concretamente, Machimbarrena et al. proponen en [7] un posible método de cálculo y demuestran que los valores promedio de incertidumbre del aislamiento a ruido aéreo calculados de acuerdo al método propuesto convergen con los reflejados en la norma UNE EN ISO 12999-1.

Uno de los problemas encontrados en [7] al desarrollar el método de cálculo propuesto, es el tratamiento de la correlación entre bandas de tercio de octava a la hora de determinar la incertidumbre del parámetro D_{nTA} (y en general de cualquier valor global). Los estudios realizados por Wittstock [5,13], basados en datos experimentales obtenidos en un ensayo interlaboratorio sobre una mismo tipo de pared, demuestran que existe algún tipo de correlación, pero manifiestan que no es posible identificar el valor de la correlación entre bandas de tercio de octava en todos los casos. Sugiere, mientras no haya nuevas evidencias, situarse en el peor de los escenarios y suponer correlación positiva total, lo cual equivale a hacer el correspondiente coeficiente de correlación igual a 1 y maximizar la componente de la incertidumbre correspondiente. Este planteamiento es coherente con lo expuesto en el Anexo B de la norma ISO 12999-1 y en GUM donde se recomienda emplear un modelo conservador cuando no exista suficiente conocimiento para estimar adecuadamente la correlación entre variables. Dada la ausencia de información adicional al respecto, este ha sido el planteamiento utilizado por Machimbarrena et al. en [7,8], es decir, en el cálculo de incertidumbre se ha supuesto correlación positiva total entre todas las bandas de tercio de octava.

Otro planteamiento a este respecto es el seguido por Garg et al.[14] quienes calculan, para una base de datos de aislamiento a ruido aéreo medido en laboratorio en India, la incertidumbre de distintos parámetros considerando por un lado el caso más favorable (sin correlación entre las bandas de tercio de octava) y el más desfavorable (considerando correlación total entre bandas de tercio de octava).

El presente estudio trata de aportar valores más realistas por lo que respecta a los coeficientes de correlación anteriormente mencionados. Concretamente, se trata mejorar el estudio presentado en [7] calculando los coeficientes de correlación y sus promedios para la misma base de datos empleada en [7] para posteriormente recalcular la incertidumbre de los distintos valores globales y compararlos con los que se obtuvieron en [7]. Así mismo se trata de observar si el hecho de utilizar una base de datos amplia y heterogénea, por comparación con la empleada por Wittstock [5], permite detectar algún tipo de tendencia en las correlaciones, independientemente de la tipología constructiva.

OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo es ampliar la investigación por lo que respecta al cálculo individualizado de incertidumbre en medidas de aislamiento acústico, concretamente a través del estudio de los coeficientes de correlación entre bandas de tercio de octava. Particularmente se pretende:

- Calcular los valores de los coeficientes de correlación entre los valores de aislamiento a ruido aéreo D_{nT} , en bandas de 1/3 de octava, tomando como base de datos un gran número de medidas de aislamiento a ruido aéreo in situ.
- Calcular los valores promedio de los coeficientes anteriormente calculados, por bandas de tercio de octava.
- Incorporar los coeficientes de correlación obtenidos en el apartado anterior en el modelo de cálculo propuesto por Machimbarrena et al. en [7] y, para la base de datos completa, calcular la incertidumbre del valor global de aislamiento en dos rangos de frecuencia: 100–5000 Hz, $D_{nTA(100-5000)}$ y 50-5000 Hz, $D_{nTA(50-5000)}$
- Comparar los valores de incertidumbre obtenidos en el apartado anterior con los presentados en [7] y evaluar el efecto sobre la incertidumbre del valor único, de ampliar el rango inferior de frecuencias.

METODOLOGÍA

El estudio se ha realizado usando la base de datos original descrita en [7], es decir, se ha contado con un conjunto de 2081 medidas de aislamiento a ruido aéreo in situ, realizadas sobre 22 tipologías constructivas distintas. Todas las paredes han sido construidas en Reino Unido de acuerdo a las especificaciones de Robust Details [15]. Durante el proceso de construcción se realizaron inspecciones visuales y medidas in situ aleatorias con el fin de garantizar el cumplimiento de las especificaciones constructivas y regulatorias.

El trabajo se ha abordado en dos etapas: la primera ha consistido en el cálculo de los coeficientes de correlación entre bandas de 1/3 de octava para el parámetro D_{nTA} definido según la ecuación (1) y la segunda ha consistido en calcular la incertidumbre de los valores globales incorporando los resultados de la etapa anterior.

$$D_{nTA} = \frac{\sum_i 10^{\left(\frac{D_{nTi}}{10}\right)}}{\sum_i^N 10^{\left(\frac{L_i - D_{nTi}}{10}\right)}} \quad (1)$$

Etapas 1: D_{nT} : Cálculo de los Coeficientes de Correlación Entre Bandas de 1/3 de Octava.

Partiendo de los valores frecuenciales del parámetro D_{nT} , se ha calculado, para la base de datos completa, el coeficiente de correlación de Pearson entre todas las bandas de 1/3 de octava comprendidas entre 50 Hz y 5000 Hz, según la ecuación (2).

$$r(x, y) = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \sum(y - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

Donde la variable “x” representa $D_{nT,i}$ y la variable “y” representa $D_{nT,j}$, y donde los subíndices “i”, “j” se corresponden con cualesquiera dos bandas de 1/3 de octava entre 50-5000 Hz ($1 \leq i / j \leq 21$) o 100-5000 Hz ($4 \leq i / j \leq 21$). Los cálculos de valores promedio de los coeficientes de correlación se efectuaron por separado para cada uno de los 22 sistemas constructivos y para la base de datos completa (2081 medidas de aislamiento a ruido aéreo in situ). Los resultados que se presentan en el apartado siguiente, Tabla 1, se corresponden con la base de datos completa, pues se observó un comportamiento análogo en todos los casos.

Eatapa 2: Determinación de la Incertidumbre de los Valores Globales Considerando los Coeficientes de Correlación Calculados.

Para la determinación de la incertidumbre de los valores globales $D_{nTA(100-5000)}$ y $D_{nTA(50-5000)}$, se han considerado las mismas 300 medidas empleadas en [7], que a su vez han sido seleccionadas de la base de datos completa. El proceso de cálculo seguido es el descrito en [7] excepto por lo que respecta al paso 4, puesto que en vez de considerar correlación positiva total entre las bandas de 1/3 de octava, se han incluido en el cálculo los valores obtenidos de acuerdo a lo descrito el epígrafe anterior y que presentarán en la Tabla 1. Los pasos seguidos han sido:

1. Recopilar los datos primarios de medida L_1 , L_2 , L_b and T_{20} de los 300 ensayos seleccionados.
2. Determinar la incertidumbre estandarizada para cada una de las variables de entrada $u(L_1)$, $u(L_2)$, $u(L_b)$, u_{ins} and $u(T)$
3. Determinar la incertidumbre combinada $u(D_{nTi})$ donde “i” se corresponde con cada una de las bandas de 1/3 octava, según la ecuación (3).

$$u^2(X) = \sum_{i=1}^N C_i^2 u^2(D_{nTi}) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N C_i C_j u(D_{nTi}) u(D_{nTj}) r(D_{nTi}, D_{nTj}) \quad (3)$$

donde C_i / C_j son los coeficientes de sensibilidad calculados según la ecuación (4).

$$C_i = \frac{\partial X}{\partial D_{nTi}} = \frac{10^{\left(\frac{L_i - D_{nTi}}{10}\right)}}{\sum_i^N 10^{\left(\frac{L_i - D_{nTi}}{10}\right)}} \quad (4)$$

4. Calcular la incertidumbre del valor único D_{nTA} según se describe en [7]. En el caso del parámetro $D_{nTA(50-5000)}$, por ejemplo, se ha empleado la ecuación (5) pero incorporando los coeficientes de correlación previamente calculados de acuerdo a la ecuación (2). Para el parámetro $D_{nTA(100-5000)}$ sólo se modifica la cantidad de bandas de frecuencia incluidas en los sumatorios.

$$u^2(D_{nTA(50-5000)}) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{10^{\left(\frac{L_i - D_{nTi}}{10}\right)}}{\sum_k 10^{\left(\frac{L_k - D_{nTk}}{10}\right)}} \right)^2 u(D_{nTi})^2 + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \left[\left(\frac{10^{\left(\frac{L_i - D_{nTi}}{10}\right)}}{\sum_k 10^{\left(\frac{L_k - D_{nTk}}{10}\right)}} \right) \left(\frac{10^{\left(\frac{L_j - D_{nTj}}{10}\right)}}{\sum_k 10^{\left(\frac{L_k - D_{nTk}}{10}\right)}} \right) u(D_{nTi}) u(D_{nTj}) r(D_{nTi}, D_{nTj}) \right] \quad (5)$$

En las ecuaciones 1 a 5:

- X puede referirse a $D_{nTA(50-5000)}$ o a $D_{nTA(100-5000)}$
- N: El número total de bandas de 1/3 de octava incluidas en el cálculo
- Los subíndices "i"/"j" aluden a cada una de las bandas de 1/3 de octava
- L_i/L_j se corresponden con los valores de ponderación A normalizados
- $r(D_{nTi}, D_{nTj})$ son los coeficientes de correlación que se presentan en la Tabla 1

Tras la realización de todos los cálculos, las incertidumbres de acuerdo a la ecuación (5) se han comparado con los resultados obtenidos en [7].

RESULTADOS

Resultados del Cálculo de los Coeficientes de Correlación Entre Bandas de 1/3 de Octava.

La Tabla 1 muestra los valores de coeficientes de correlación calculados según se describe en el apartado anterior, ecuación (2). Como se puede observar, el coeficiente de correlación es igual o mayor que 0,5 para entre 8 y 14 bandas de frecuencia adyacentes por encima de 160 Hz. Sin embargo por debajo de esta frecuencia los valores de correlación son menores. Esto indica una correlación significativa entre las bandas de frecuencia media/alta que no parece ser tan importante a bajas frecuencias.

Tabla 1: Coeficientes de correlación

j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
i	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	
1	50	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	63	0,0	1,0	0,6	0,4	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	80	0,0	0,6	1,0	0,6	0,4	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	100	0,0	0,4	0,6	1,0	0,6	0,5	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0
5	125	0,0	0,3	0,4	0,6	1,0	0,7	0,6	0,5	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1
6	160	0,0	0,2	0,3	0,5	0,7	1,0	0,8	0,7	0,6	0,6	0,5	0,5	0,4	0,4	0,3	0,3	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2
7	200	0,0	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,6	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3
8	250	0,0	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7	0,9	1,0	0,9	0,8	0,8	0,7	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,3
9	315	0,0	0,1	0,1	0,3	0,4	0,6	0,8	0,9	1,0	0,9	0,9	0,8	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,4
10	400	0,0	0,1	0,1	0,2	0,4	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	0,9	0,9	0,8	0,7	0,7	0,7	0,6	0,7	0,6	0,5	0,4
11	500	0,0	0,1	0,1	0,2	0,3	0,5	0,6	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	0,9	0,8	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6	0,5
12	630	0,0	0,0	0,1	0,2	0,3	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,0	0,9	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7	0,6	0,5
13	800	0,0	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,0	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,5
14	1000	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,4	0,5	0,6	0,6	0,7	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	0,9	0,8	0,8	0,8	0,7	0,6
15	1250	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,9	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	0,8	0,8	0,6
16	1600	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	0,8	0,7
17	2000	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,4	0,4	0,5	0,6	0,6	0,7	0,8	0,8	0,8	0,9	1,0	1,0	1,0	0,9	0,8	0,7
18	2500	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,4	0,4	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	0,9	0,9	0,7
19	3150	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	1,0	0,9	0,8
20	4000	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	0,9
21	5000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,8	0,9	1,0

Este resultado converge con lo obtenido por [5], sin embargo conviene observar que la baja correlación a bajas frecuencias está fuertemente condicionada por la variabilidad de los resultados a bajas frecuencias y en este estudio la variabilidad por debajo de 100 Hz resultó elevada incluso para un mismo lugar de ensayo. Así mismo cabe recordar que la toma de datos se realizó de acuerdo a la norma ISO 140-4 utilizando la técnica de barrido manual para el muestreo del nivel de presión sonora en todos los recintos y, al no emplearse ningún procedimiento específico de medida a bajas frecuencias, los datos medidos a bajas frecuencias están afectados por la no difusividad y comportamiento modal de los recintos de medida.

Resultados de la Determinación de la Incertidumbre del Parámetro D_{nTA}

Con el fin de evaluar el efecto sobre la incertidumbre del valor global al ampliar el rango de frecuencias inferior, se ha calculado la incertidumbre teniendo en cuenta dos posibles rangos de frecuencia: de 100–5000 Hz, $D_{nTA(100-5000)}$ y de 50–5000 Hz, $D_{nTA(50-5000)}$. Los cálculos se han hecho utilizando las mismas 300 medidas empleadas en [7] y analizando el comportamiento de los cerramientos pesados y ligeros por separado y en conjunto.

Las figuras 1-3 muestran los resultados obtenidos en este estudio (con coeficientes de correlación calculados a partir de la base de datos total) y se comparan con los obtenidos en [7] (suponiendo correlación total positiva entre bandas de tercio de octava). Todas las figuras muestran tanto la dispersión de los valores de incertidumbre calculados como sus correspondientes valores promedio.

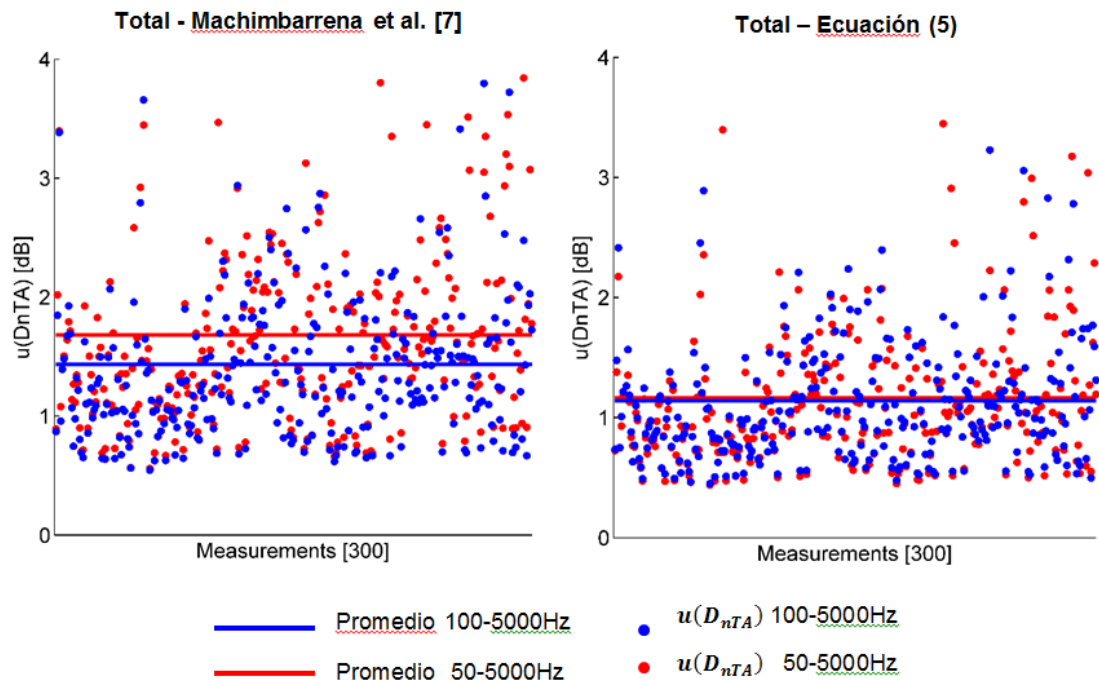


Figura 1: Dispersión de los valores de $u(D_{nTA})$ y valor promedio $\overline{u(D_{nTA})}$ para la base de datos de 300 medidas mixta: pesadas + ligeras.

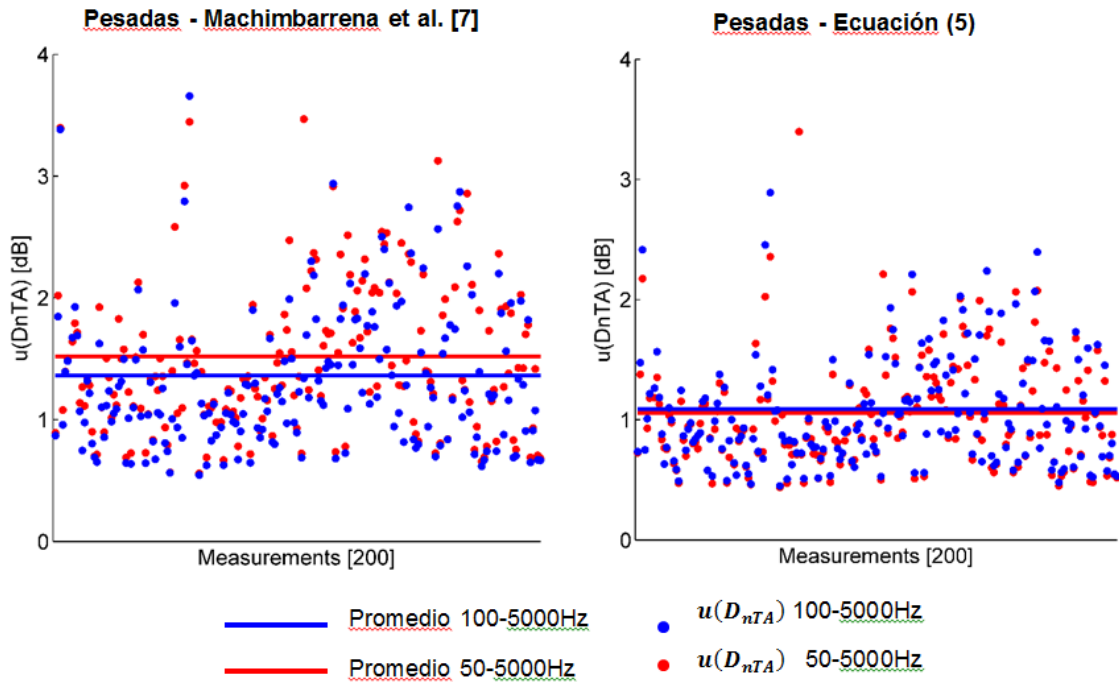


Figura 2: Dispersión de los valores de $u(D_{nTA})$ y valor promedio $\overline{u(D_{nTA})}$ para paredes pesadas.

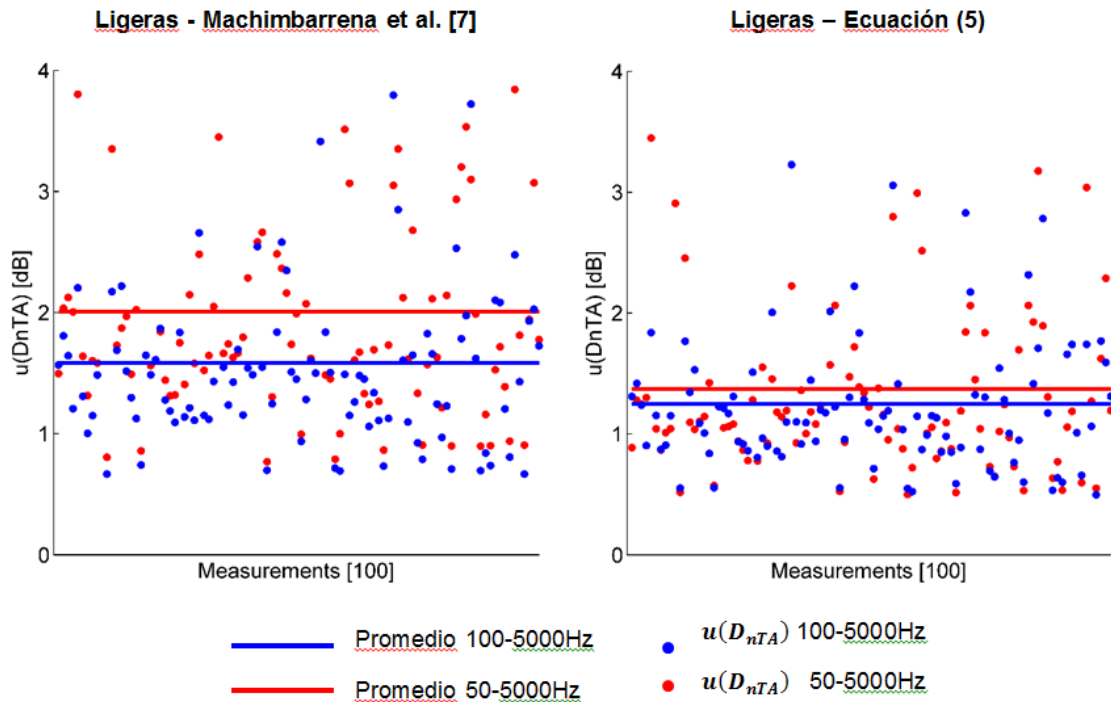


Figura 3: Dispersión de los valores de $u(D_{nTA})$ y valor promedio $\overline{u(D_{nTA})}$ para paredes ligeras.

Como se puede ver en las figuras 1-3, los resultados obtenidos en este estudio difieren de forma significativa de los presentados anteriormente en [7]. En el estudio anterior, al considerar correlación positiva total entre todas las bandas de tercio de octava, la incertidumbre del valor global con el rango de frecuencias ampliado $u(D_{nTA(50-5000)})$ resultaba mayor que la $u(D_{nTA(100-5000)})$. Sin embargo, si se emplean los coeficientes de correlación calculados en este estudio, se observa que la incertidumbre de los valores globales, considerando la base de datos completa o sólo los resultados de ensayo de paredes pesadas, es prácticamente independiente del rango de frecuencias elegido, tal y como ocurre en [5]. Cabe señalar que en el caso de paredes ligeras sí se observa un ligero aumento de la incertidumbre del valor global al ampliar el rango de frecuencias inferior.

CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO

Los valores de los coeficientes de correlación mostrados en la Tabla 1 son válidos sólo para este estudio, pero dado el tamaño y variedad de la base de datos empleada ((2081 medidas de aislamiento a ruido aéreo in situ) permiten concluir que efectivamente hay una correlación significativa entre los valores de D_{nT} en las bandas de tercio de octava por encima de 160 Hz.

Por lo que respecta a la correlación entre bandas de tercio de octava por debajo de 100 Hz, cabe destacar que es preciso seguir investigando ya que los artículos publicados hasta el momento basan sus resultados en ensayos que no contemplan la especificidad de las medidas a bajas frecuencias en recintos pequeños y por tanto se ven afectados de las limitaciones técnicas que provocan baja repetibilidad [16]. En el futuro se propone recalcular los coeficientes de correlación a bajas frecuencias tomando como base de datos ensayos medidos de acuerdo a la norma ISO 16283-1 y el procedimiento específico de bajas frecuencias cuando sea de aplicación y compararlos con los obtenidos en [5,7] así como los presentados en este estudio.

Se observa una gran dispersión en los valores de incertidumbre calculados para los valores globales, lo cual refuerza la propuesta de la realización de estimaciones de incertidumbre individualizadas, especialmente si los resultados de ensayo se van a usar para verificar el cumplimiento de exigencias de aislamiento, tal y como se sugiere en [7]

Al salirse del escenario conservador planteado en [7] (correlación total positiva entre bandas de tercio de octava) y determinar la incertidumbre de los valores globales empleando los coeficientes de correlación calculados, se observa que la incertidumbre del valor global $D_{nT,A}$ es menos dependiente del rango de frecuencias empleado de lo observado en [7]. Este resultado por el momento se restringe a los datos empleados en este estudio y deberá ser corroborado empleando resultados de ensayos de aislamiento que hayan incorporado técnicas de medida destinadas a reducir la variabilidad y mejorar la repetibilidad a bajas frecuencias.

Agradecimientos

Los autores agradecen a COST TU0901, Robust Details Ltd y al Centro de Investigación Harmonia Davi Akkerman + Holtz por inspirar este trabajo y aportar los datos necesarios.

REFERENCIAS

- [1] Rasmussen B, Machimbarrena M, COST TU0901. Building acoustics throughout Europe. Volume 1: Towards a common framework in building acoustics throughout Europe. DiScript Preimpresion, S. L.; 2014.
- [2] ISO 12999-1 Acoustics -- Determination and application of measurement uncertainties in building acoustics -- Part 1: Sound insulation. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization; 2014.
- [3] Wittstock V. On the uncertainty of single-number quantities for rating airborne sound insulation. *Acta Acust United With Acust* 2007;93:375–86.
- [4] Wittstock V, Bethke C. On the uncertainty of sound pressure levels determined by third-octave band analyzers in a hemianechoic room. *Forum Acusticum*, Budapest, Hungary: 2005.
- [5] Wittstock V. Determination of Measurement Uncertainties in Building Acoustics by Interlaboratory Tests. Part 1: Airborne Sound Insulation. *Acta Acust United with Acust* 2015;101:88–98.
- [6] JCGM 101:2008 Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” — Propagation of distributions using a Monte Carlo method. vol. JCGM 101:2. Joint Committee For Guides In Metrology; 2008.
- [7] Machimbarrena M, Monteiro CRA, Pedersoli S, Johansson R, Smith S. Uncertainty determination of in situ airborne sound insulation measurements. *Appl Acoust* 2015;89:199–210.
- [8] Machimbarrena M, Monteiro CRA, Johansson R, Pedersoli S, Smith S. Determinación de la incertidumbre en medidas de aislamiento acústico a ruido aéreo: ejemplo de aplicación a un gran número de datos. *Tec.* 2015 -Valencia, Spain, n.d.
- [9] Michalski R. Metodologias para medição de isolamento sonoro em campo e para expressão da incerteza de medição na avaliação do desempenho acústico de edificações. COPPE/UFRJ, 2011.
- [10] Mahn J, Pearse J. The Uncertainty of the Proposed Single Number Ratings for Airborne Sound Insulation. *Build Acoust* 2012;19:145–72.
- [11] Navacerrada MA, Pedrero A, Díaz C. Study of the uncertainty of façade sound insulation measurements: Analysis of the ISO 12999-1 uncertainty proposal. *Appl Acoust* 2016;114:1–9.
- [12] Castillo JC. Evaluación de la incertidumbre de medida en un supuesto de aislamiento in situ a ruido aéreo. Universidad de Vigo, 2007.
- [13] Wittstock V. On the uncertainty of single-number quantities for rating airborne sound insulation. *Acta Acust United with Acust* 2007;93:375–86.
- [14] Garg N, Kumar A, Maji S. Measurement Uncertainty in Airborne Sound Insulation and Single-Number Quantities: Strategy and Implementation in Indian Scenario. *MAPAN* 2016;31:43–55.
- [15] Robust Details Ltd. Robust details handbook. Part E: Resistance to the passage of sound. 3rd ed. Milton Keynes, UK: 2013.
- [16] Hopkins C, Turner P. Field measurement of airborne sound insulation between rooms with non-diffuse sound fields at low frequencies. *Appl Acoust* 2005;66:1339–82.