

## DETERMINACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE EN MEDIDAS DE AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO: EJEMPLO DE APLICACIÓN A UN GRAN NÚMERO DE DATOS

PACS: 43.55.Rg

María Machimbarrena<sup>1</sup>, Carolina Rodrigues A. Monteiro<sup>1</sup>, Reine Johansson<sup>2</sup>, Stefano Pedersoli<sup>1</sup>, Sean Smith<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Valladolid – Applied Physics Department; Avenida de Salamanca s/n , 47014 Valladolid, Spain

<sup>2</sup>INTECO International Technology Consulting, Sländgatan 6, 451 62 Uddevalla, Sweden

<sup>3</sup>Edinburgh Napier University - Institute for Sustainable Construction; Colinton Rd 42, EH10 5BT Edinburgh, Scotland, UK

### RESUMEN

La acústica en la edificación es un campo en el cual la incertidumbre de un ensayo se expresa generalmente bien de acuerdo a la normativa en vigor o no se expresa en absoluto. En un mundo en el que las prestaciones acústicas de los elementos constructivos y de soluciones constructivas en conjunto son frecuentemente confrontadas al cumplimiento de una exigencia, parece conveniente facilitar el cálculo de incertidumbre asociado a un ensayo.

La norma UNE EN ISO 12999 indica los valores de incertidumbre asociados a medidas de aislamiento a ruido aéreo e impacto realizadas en distintas condiciones, obtenidos a partir de ensayos interlaboratorio. El objetivo del presente artículo es incentivar la realización del cálculo de incertidumbre individualizado no sólo en ensayos de aislamiento acústico, sino en todo el ámbito de la acústica de la edificación. Para ello se presenta una posible metodología y aplicación de la misma a un gran número de medidas de aislamiento a ruido aéreo in situ. Los resultados demuestran que la incertidumbre del valor global  $D_{nTA}$  depende del rango de frecuencias incluido en el cálculo, aumentando ligeramente cuando el rango se extiende por debajo de 100 Hz.

### 1 INTRODUCCIÓN

La medida del aislamiento acústico en la edificación está regulada por las correspondientes normas tanto para ensayos en laboratorio UNE EN ISO 10140 [1] como in situ [2–4], algunas de las cuales se encuentran en fase de borrador final. Tradicionalmente la incertidumbre asociada a estas medidas se ha reportado bien de acuerdo a la correspondiente normativa de incertidumbre en medidas de aislamiento UNE EN ISO 12999-1 [5] o no se ha reportado en absoluto. Los valores de incertidumbre reflejados en la norma UNE EN ISO 12999-1 se han obtenido a partir de los resultados de un conjunto numeroso de ensayos interlaboratorio efectuados en diversos países Europeos (principalmente Alemania, pero también Francia, Suecia, Italia y Portugal).

Los valores de incertidumbre indicados en la norma pueden ser utilizados para determinar si un elemento constructivo o una solución constructiva cumplen con la exigencia normativa en cada caso y puede llegar a alcanzar implicaciones legales en caso de conflicto.

Según varios autores [6–8], no es posible ceñirse al protocolo establecido en la GUM [9] para efectuar el cálculo de incertidumbre en medidas de aislamiento acústico o parece razonable mantener la idea de incertidumbre en condiciones de repetibilidad y reproducibilidad tal y como se hace en la UNE EN ISO 12999-1 y se hacía anteriormente en la derogada UNE 20140 [10]. Una de las razones es que algunas magnitudes como son el tiempo de reverberación o el nivel de presión sonora, no se miden directamente sino que se obtienen integrando en una determinada región del espacio, lo cual requiere ciertas hipótesis de base. Cuando dichas hipótesis no se cumplen completamente, resulta difícil construir un modelo matemático que incluya todos los posibles efectos y es precisamente por esto por lo que hasta ahora no se acostumbra a calcular la incertidumbre en medidas de aislamiento de acuerdo a GUM y en muchas ocasiones se reporta la incertidumbre de un ensayo como la incertidumbre asociada a un determinado método de medida tal y como establece la UNE EN ISO 12999-1. Sin embargo esto no está exento de problemas, pues la propia incertidumbre del objeto, entre otras cosas, no está incluida en los resultados.

## 2 ¿POR QUÉ REALIZAR CÁLCULOS DE INCERTIDUMBRE EN ACÚSTICA DE EDIFICIOS?

El objetivo de una medida es determinar el valor de una magnitud de interés, el mensurando. En este caso el mensurando puede ser el nivel de presión sonora, el índice de reducción sonora o cualquiera de los posibles valores únicos, como por ejemplo el  $D_{nT,A}$ . Realizar una medida no es más que obtener un valor de un universo de posibles valores, puesto que generalmente cuando se realiza una medida varias veces, se obtienen resultados diferentes. La variabilidad observada en el resultado de medidas repetidas, se debe a que los parámetros que afectan a dicha medida son cambiantes. A pesar de que es imposible identificar todos los parámetros que afectan a una medida, sí es posible identificar los más significativos y estimar sus efectos sobre el resultado de la medida. Es más, frecuentemente es posible construir un modelo matemático (teórico, empírico o mixto) que determine cómo éstos afectan a la medida.

Existen muchos procedimientos para estimar la incertidumbre asociada a un ensayo, sin embargo las entidades de acreditación miembros del International Laboratory Accreditation Cooperation Mutual Recognition Arrangement (ILAC MRA) han acordado exigir a los laboratorios acreditados que determinen la incertidumbre de los ensayos siguiendo las indicaciones de UNE EN ISO 17025 [11], GUM y sus suplementos y/o ISO Guide 35 [12]. Para los laboratorios de ensayo también se recomienda el uso de GUM [13], aunque se admiten excepciones por ejemplo en aquellos casos en los que el proceso de determinación de la incertidumbre está incluido en una norma de ensayo. El documento ILAC G17 [13] sin embargo establece que dichas normas deben ser revisadas por las correspondientes entidades de normalización. Esto implica que cualquier norma de nuevo desarrollo o revisión de norma que vaya a ser utilizada en el ámbito del acuerdo ILAC MRA debería, en la medida de lo posible, utilizar la GUM o cualquier otro documento elaborado por las entidades de acreditación, cuando incluya un proceso de estimación de la incertidumbre de medida como parte de los contenidos de la norma.

Es cierto que en algunos campos de la ciencia tradicionalmente se trabaja con los conceptos de reproducibilidad y repetibilidad, lo cual puede ser considerado adecuado siempre que la componente de reproducibilidad sea significativamente mayor que el resto de las componentes de la incertidumbre total, y se pueda considerar despreciable la aportación de cada una de las demás componentes. Sin embargo, para cumplir con la UNE EN ISO 17025 es importante investigar y documentar otras posibles componentes de la incertidumbre que puedan afectar al resultado de una medida.

Concretamente en el campo de la acústica de la edificación, la estimación de la incertidumbre asociada a un método de medida se ha realizado de acuerdo a la UNE EN ISO

5725 [14,15]. Los planteamientos de la UNE EN ISO 5725 y de la GUM son distintos. Por una parte la UNE EN ISO 5725 considera el procedimiento de medida como una “caja negra” y no necesita conocer en detalle de qué manera cada uno de los parámetros que afectan a la medida contribuye a la incertidumbre total asociada a la misma, mientras que la GUM tiene un

planteamiento que requiere un modelo para poder efectuar el análisis de la incertidumbre asociada a un ensayo.

Uno de los argumentos comúnmente utilizados para no ceñirse al uso de la GUM en el campo de la acústica de la edificación es la no existencia de un modelo completo para los mensurandos. Sin embargo, a pesar de que la GUM precisa de algún tipo de modelo, no estrictamente necesario que el modelo sea completo. De hecho la propia palabra “modelo” implica que no es una descripción perfecta de la realidad y la GUM señala que una de las componentes de la incertidumbre que siempre debe ser tenida en cuenta es la del propio modelo.

Por lo que respecta a sistemas no-lineales, existe un suplemento a la GUM [9] que indica cómo usar el método de Monte Carlo (simulaciones) para propagar las funciones de densidad de probabilidad en el modelo y así obtener una estimación de la incertidumbre de la medida. La GUM también incluye ejemplos de cómo utilizar desarrollos en serie de Taylor de orden superior para tratar la incertidumbre de sistemas no lineales.

Cuando se trata de la incertidumbre de los valores globales, los datos experimentales [8,16] muestran que existe correlación entre los valores obtenidos en los distintos 1/3 de octava, si bien es cierto que existe poca información al respecto hasta el momento. Es necesario investigar más este aspecto bien a partir de datos experimentales o mediante cálculos, aunque si esto no fuera posible, la GUM permite el uso de correlaciones basados en la experiencia. En el caso de suponer una correlación positiva entre todas las bandas posiblemente se sobreestime la componente de la incertidumbre asociada a la correlación, pero a falta de otra información, esta opción parece la adecuada pues es la más conservadora. Si la experiencia corrobora que los coeficientes de correlación máximos son menores, entonces se podrá utilizar un valor menor que la unidad en la estimación de la incertidumbre de medida.

La sistemática propuesta en la UNE EN ISO 12999-1 para estimar la incertidumbre de medida sin realizar cálculos individuales es en cierto modo contraria a la UNE EN ISO 17025 y a otros procedimientos de acreditación. En algunos países como España y Portugal, las entidades de acreditación exigen a los laboratorios contar con procedimientos de estimación de incertidumbre conformes a la GUM o EA-4/02 [17]. Dado que los diversos laboratorios cuentan con personal, equipos y elementos de ensayo distintos, parece sensato que la incertidumbre asociada al ensayo sea diferente a pesar de haberse realizado de acuerdo a un mismo método de ensayo. Es esto precisamente lo que motiva este artículo, desde el cual se recomienda contar con un procedimiento de cálculo de incertidumbre, de acuerdo a GUM, aplicable a cada ensayo realizado, especialmente cuando se trate de medidas in situ.

### 3 OBJETIVO

Como ya se ha comentado, el principal objetivo de este artículo es animar a los laboratorios acreditados, consultores e investigadores que trabajen en el campo de la acústica de edificios a efectuar cálculos de incertidumbre lo más ajustados a la GUM posibles. No sólo por lo que respecta a ensayos de aislamiento sino para cualquier ensayo realizado por un laboratorio acreditado, como pudiera ser la absorción acústica.

En un artículo publicado recientemente [18] se ha descrito en detalle una propuesta de procedimiento para la estimación de la incertidumbre asociada a un ensayo de aislamiento a

ruido aéreo in situ. Presentamos en este artículo un resumen del anterior con el fin de extender el ámbito de influencia al ámbito iberoamericano, conscientes de que en ocasiones, en estos congresos más orientados a la comunidad de habla hispana o portuguesa se accede a un público diferente que a través de las revistas especializadas.

#### 4 RESULTADOS DE UN CASO DE ESTUDIO

Uno de los parámetros más comúnmente utilizado para evaluar el aislamiento a ruido aéreo in situ es la diferencia de niveles estandarizada,  $D_{nT}$

$$D_{nT} = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{T}{T_0} \quad \text{en dB} \quad (1)$$

donde  $L_1$  es el promedio energético del nivel de presión sonora en la sala emisora,  $L_2$  es el promedio energético del nivel de presión sonora en la sala receptora,  $T$  es el tiempo de reverberación en la sala receptora y  $T_0$  es el tiempo de reverberación de referencia, que para el caso de viviendas es  $T_0 = 0.5$  s. Se trata de una magnitud que depende de la frecuencia y que en la mayor parte de los casos se mide en bandas de 1/3 de octava entre 100 Hz y 5000 Hz, aunque esto puede variar de unos países a otros. Este parámetro puede ser transformado en un valor global o valor único de distintas formas [19, 20], y el valor obtenido es el que se emplea para verificar el cumplimiento de las exigencias de los correspondientes Códigos de la Edificación o legislación aplicable. Este mismo procedimiento se utiliza a la hora de ensayar y declarar las prestaciones de aislamiento de puertas, ventanas o soluciones constructivas completas ensayadas en laboratorio.

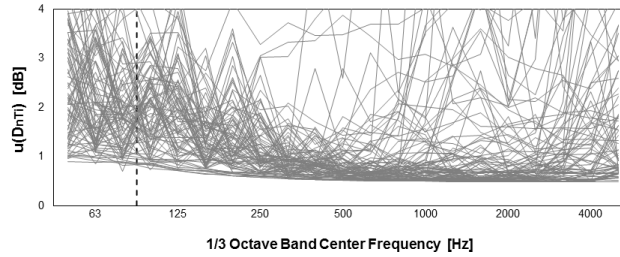
El caso que se presenta utiliza como punto de partida una base de datos de medidas de  $D_{nT}$  para cuatro tipos de paredes distintas: dos paredes pesadas (HWA y HWB) y dos paredes ligeras (LWA y LWB). En total se dispone de 1102 medidas diferentes. Todos los ensayos se han efectuado en UK sobre paredes construidas de acuerdo a las especificaciones de Robust Details (RD) [21]. Para garantizar el cumplimiento de la legislación vigente en UK y con las especificaciones de diseño y mano de obra de RD se realizaron inspecciones periódicas de la obra y medidas de acuerdo a la normativa de medida en vigor [22]. Los detalles de la base de datos y el desarrollo más detallado de todo el proceso se encuentran en [18].

El procedimiento para determinar la incertidumbre se puede resumir en la siguiente ecuación

$$u(D_{nT_i}) = \sqrt{[u_{rep}(L_1) \cdot c_{L_1}]^2 + [u_{rep}(L_2) \cdot c_{L_2}]^2 + \dots + [u_{rep}(L_b) \cdot c_b]^2 + [u(T) \cdot c_T]^2 + [u_{ins} \cdot c_{ins}]^2} \quad (2)$$

Donde la incertidumbre típica para cada uno de los estimadores de entrada se puede determinar incluyendo la desviación típica experimental así como otras posibles fuentes de incertidumbre como pueden ser la instrumentación y el ruido de fondo.

La figura 1 muestra una selección aleatoria de curvas de incertidumbre calculadas a partir del conjunto completo de datos experimentales de partida. Como se puede observar, la dispersión de los valores obtenidos es significativa, lo cual corrobora la necesidad de efectuar cálculos de incertidumbre detallados cuando se realizan medidas de aislamiento acústico. Esta dispersión es más evidente a bajas frecuencias que en frecuencias medias y altas, aunque también se observa una dispersión considerable a altas frecuencias.



**Figura 1:** Dispersión de los valores de incertidumbre  $u(D_{nT_i})$  calculados individualmente para el conjunto de datos

Para verificar el cumplimiento de una normativa, como ya se ha mencionado, se recurre al cálculo de valores globales. En este caso se ha elegido el parámetro utilizado en España:  $D_{nT,A}$

$$D_{nT,A} = -10 \log \sum_{i=1}^n 10^{(L_{Ar,i} - D_{nT,i})/10} \quad (3)$$

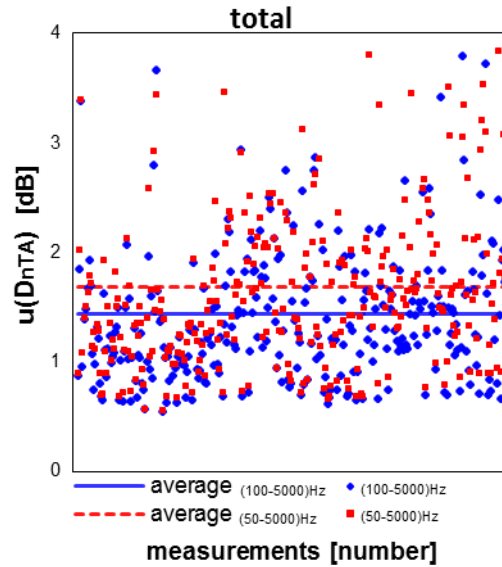
donde  $L_{Ar}$  el espectro normalizado de ruido rosa y el subíndice “i” se refiere a la banda de tercio de octava correspondiente tanto para el espectro de referencia como para la diferencia de niveles estandarizada.

Para determinar la incertidumbre del valor global, se ha supuesto una correlación total entre las incertidumbres de las distintas bandas de tercio de octava (lo cual como ya se ha comentado sobreestimaré la incertidumbre asociada al valor global, pero parece la mejor aproximación por el momento). Para efectuar el cálculo propuesto en la ecuación (4) se toma como valores de entrada los valores de incertidumbre calculados individualmente para cada una de las medidas  $u(D_{nT_i})$ . El cálculo se puede efectuar utilizando diversos rangos de frecuencias, (por ejemplo empezando en 50 Hz o 100 Hz y terminando a 5000 Hz). Esto se refleja en el subíndice. Para el caso particular  $D_{nTA(50-5000)}$ :

$$u(D_{nTA(50-5000)}) = \sum_{i=1}^N \left( \frac{10^{(L_i - D_{nT_i})/10}}{\sum_k 10^{(L_k - D_{nT_k})/10}} \right) \cdot u(D_{nT_i}) \quad (4)$$

Al suponer una correlación total, la ecuación (4) se convierte en una suma lineal en vez de tratarse de la raíz de la suma de los cuadrados.

La figura 2 representa, para el conjunto total de los datos, la dispersión de los valores de incertidumbre obtenidos para el valor global  $D_{nTA}$  así como el valor medio de dicha incertidumbre. Los cálculos se ha efectuado para dos rangos de frecuencia distintos (de 50 a 5000 Hz y de 100 a 5000 Hz). A la vista de los resultados, se puede deducir, con un nivel de confianza superior al 99,9% que  $u(D_{nTA})_{50-5000}$  es mayor que  $u(D_{nTA})_{100-5000}$ . Es decir, a partir de los datos experimentales de partida y con la hipótesis de correlación positiva total, la incertidumbre del valor global  $D_{nTA}$  sí aumenta al ampliar el rango de frecuencias utilizado en su cálculo.



**Figure 2:** Dispersión de los valores de  $u(D_{nTA})$  y valores promedios correspondientes  $\overline{u(D_{nTA})}$

Cuando un laboratorio acreditado emite un certificado de calibración o de ensayo, se suele reportar la incertidumbre expandida con un factor de cobertura  $k = 2$ , lo cual, si la distribución se puede suponer gaussiana, se corresponde con un nivel de confianza de aproximadamente 95%. En este caso de estudio se ha usado  $k = 1.7$ , lo cual se corresponde así mismo con un nivel de confianza del 95% cuando se realizan verificaciones de cumplimiento de exigencias unilaterales. La hipótesis de distribución gaussiana para los valores de  $D_{nTA}$  es discutible [23,24], pero al igual que en el caso de las correlaciones, parece la mejor hipótesis hasta la fecha. En todo caso se podía haber elegido cualquier otro valor. Para el  $D_{nTA(50-5000)}$ :

$$U(D_{nTA(50-5000)}) = k \cdot u(D_{nTA(50-5000)}) \quad (5)$$

La tabla 1 muestra la incertidumbre expandida calculada para cada uno de los cuatro tipos diferentes de paredes incluidas en este caso de estudio. Es importante mencionar que en este caso no se ha tenido en cuenta los grados de libertad ni otras posibles fuentes de incertidumbre.

Aunque se muestran los valores promedio, se ha observado que en casi el 10% de los casos estudiados ocurre que  $u(D_{nTA})_{50-5000} > 3$  dB y que la incertidumbre expandida correspondiente para  $D_{nTA(50-5000)}$  es  $U > 5.1$  dB. Esto puede ser definitivo a la hora de evaluar el cumplimiento de una exigencia normativa.

Los resultados de este estudio confirman que los valores de la incertidumbre expandida varían significativamente en función del tipo de pared y rango de frecuencias empleado, por lo cual se recomienda la realización de cálculos de incertidumbre individualizados para cada ensayo realizado in situ.

**Tabla 1:** Valor medio de la incertidumbre expandida calculada para el  $D_{nTA}$  de distintos tipos de paredes.

(valores medios)	$\overline{U(D_{nTA})}_{50-5000}$	$\overline{U(D_{nTA})}_{100-5000}$
Tipo de pared		
HWA_75	2.41	2.18
HWA_100	2.35	2.16
HWB_75	3.07	2.65
HWB_100	2.50	2.25

LWA_50	3.61	2.79
LWB_50	3.22	2.60

## 5 CONCLUSIONES

En la actualidad las exigencias en la edificación por lo que respecta a eficiencia energética, sostenibilidad y prestaciones acústicas son cada vez mayores. Cabe esperar que en el futuro los edificios residenciales sean calificados según sus prestaciones acústicas [25]. Es por tanto especialmente importante evaluar adecuadamente el aislamiento acústico y reportarlo con la incertidumbre asociada al ensayo correspondiente.

Tanto por los resultados obtenidos en este caso de estudio como por los resultados de otros autores, se concluye que es posible y recomendable la realización de estimaciones de incertidumbre individualizadas asociadas a cada ensayo. Es más, la gran variabilidad observada en la incertidumbre estimada en función del tipo de pared y rango de frecuencias, también indica la necesidad de realizar estos cálculos individualizados para no infraestimar la incertidumbre de una medida.

Esta propuesta se extiende igualmente a los ensayos de aislamiento a ruido de impacto y fachada. No se pretende que exista una única forma de estimar el aislamiento, sino que se propone que se incluyan unas directrices en la próxima versión de la norma UNE EN ISO 12999-1 como alternativa a la estimación de incertidumbre de medida basada en ensayos interlaboratorio. Si esta norma se va emplea en entornos y servicios acreditados, debería ser revisada para ajustarse a los documentos básicos mencionados en las guías ILAC.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] ISO 10140- Acoustics -- Laboratory measurement of sound insulation of building elements - parts 1 to 5. 2010.
- [2] ISO 16283-1:2014 Acoustics -- Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements -- Part 1: Airborne sound insulation. International Organization for Standardization; 2014.
- [3] ISO/FDIS 16283-2: Acoustics — Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements — Part 2: Impact sound insulation. 2015.
- [4] ISO/FDIS 16283-3: Acoustics — Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements — Part 3: Façade sound insulation. 2015.
- [5] ISO 12999-1 Acoustics -- Determination and application of measurement uncertainties in building acoustics -- Part 1: Sound insulation. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization; 2014.
- [6] Wittstock V. On the uncertainty of single-number quantities for rating airborne sound insulation. Acta Acust United With Acust 2007;93:375–86.
- [7] 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.

- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Luque P, Fernández D, Colina C de la, Simón F. Convergencia de la repetibilidad de ensayos de aislamiento a ruido aéreo in situ. Tecniacústica, Sociedad Española de Acústica; 2005.
- [11] ISO 17025:2005 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. International Laboratory Accreditation Cooperation; 2005.
- [12] ILAC P14:01/2013 ILAC Policy for Uncertainty in Calibration. International Laboratory Accreditation Cooperation; 2013.
- [13] ILAC-G17:2002 Introducing the Concept of Uncertainty of Measurement in Testing in Association with the Application of the Standard ISO/IEC 17025. International Laboratory Accreditation Cooperation; 2002.
- [14] ISO 5725-1:1994 Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results -- Part 1: General principles and definitions. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization; 1994.
- [15] ISO 5725-2:1994 Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results -- Part 2: Basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization; 1994.
- [16] Wittstock V. On the uncertainty of single-number quantities for rating airborne sound insulation. Acta Acust United with Acust 2007;93:375–86.
- [17] EA-4/02 M:2013 -- Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration. European co-operation for Accreditation; 2013.
- [18] 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.
- [19] ISO 717- Acoustics -- Rating of sound insulation in buildings and of building elements -- Part 1: Airborne sound insulation- Part 2: Impact sound insulation. 2013.
- [20] Mondaca C, Machimbarrena M, Monteiro CRA. Comparison of some global indices to adequately assess airborne sound insulation. Euronoise 2012, 2012.
- [21] Robust Details Ltd. Robust details handbook. Part E: Resistance to the passage of sound. 3rd ed. Milton Keynes, UK: 2013.
- [22] ISO 140-4:1998 Acoustics -- Measurement of sound insulation in buildings and of building elements -- Part 4: Field measurements of airborne sound insulation between rooms. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization; 1998.



- [23] Mahn J, Pearse J. The Uncertainty of the Proposed Single Number Ratings for Airborne Sound Insulation. *Build Acoust* 2012;19:145–72.
- [24] Mondaca C, Monteiro CRA, Machimbarrena M. Análisis de la variabilidad e incertidumbre de medidas “in situ” del aislamiento acústico a ruido aéreo de paredes pesadas. VIII Congr. Iberoam. Acústica, Evora: 2012.
- [25] COST TU0901. Building acoustics throughout Europe Volume 1: Towards a common framework in building acoustics throughout Europe. DiScript Preimpresion, S. L.; 2014.