

DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE REDUCCIÓN VIBRACIONAL Y ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS INVOLUCRADOS

PACS: 43.55.Rg

Martín Bravo M^a A¹.; Tarrero Fernández A.I.¹.; Aparicio Colino A¹.; González Suárez J².;
Machimbarrena Gutiérrez M².

¹E.U. Politécnica. Universidad de Valladolid

Francisco Mendizábal n^o 1

470014 Valladolid

Tef: 34 983 423 500

Fax: 34 983 423 490

E-mail: maruchi@sid.eup.uva.es, ana@sid.eup.uva.es

²E.T.S. de Arquitectura. Universidad de Valladolid

ABSTRACT

This paper shows a practical case of an in situ measure of the vibrational reduction index. Firstly, to this end, we measure all the parameters which are necessary for its calculus (structural reverberation time, difference in the vibration speed level, total factor losses and equivalent absorption length). Each magnitude is measured on a field situation and with a configuration in the spectres analyzer. In this paper each of these parameters will be analysed in detail, describing the process of measure to achieve each of them. We also include the graphics of these parameters as well as the place where they can be found, as there are not many surveys where we can find these values in order to make some comparisons.

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es la determinación del índice de reducción vibracional de la estructura de un edificio, a partir de la medida de todos los parámetros que intervienen en dicho cálculo. Entre estas magnitudes se encuentran el tiempo de reverberación estructural, la diferencia del nivel de velocidad de vibración, el factor de pérdidas total y la longitud de absorción equivalente. En este artículo, se analizan estos parámetros de forma minuciosa, describiendo el proceso de medida y el método de cálculo seguido para obtener cada uno de ellos. De los resultados obtenidos se muestran las tendencias y el rango en que se encuentran dichos valores.

1.- INTRODUCCIÓN

El aislamiento acústico entre recintos ha sido estudiado ampliamente en las últimas décadas, concluyéndose que cuando el sonido procedente de un recinto emisor alcanza un recinto receptor, lo hace principalmente a través del paramento separador de ambos recintos, denominado pared separadora. Sin embargo, aunque la mayor parte de la transmisión sonora ocurre a través de esta pared, existen otros caminos alternativos por donde el sonido puede alcanzar el recinto receptor [7]. Por tanto, la transmisión sonora entre recintos puede ser de dos tipos: transmisión directa, que ocurre a través de la pared separadora; y transmisiones secundarias que se producen a través del resto de los paramentos y uniones que son comunes en ambos recintos, llamadas transmisiones indirectas o transmisiones por flancos [1,2].

Hasta ahora, el procedimiento habitual para reducir los niveles acústicos en un recinto se lleva a cabo a través del aislamiento de la superficie separadora (que es por donde discurre la mayor parte de la transmisión). Existen numerosos estudios que facilitan datos de mejoras y optimizaciones del aislamiento de este paramento entre dos recintos. Sin embargo, son muy escasos los estudios que tratan de las transmisiones indirectas [8, 9,10] y es el conocimiento profundo de estas transmisiones lo que proporciona capacidad de actuación para lograr un aislamiento sonoro adecuado. Para poder actuar en acústica arquitectónica es fundamental conocer muy bien los caminos más importantes de transmisión sonora, discernir si son las transmisiones directas o las transmisiones por flancos las que contribuyen con mayor aporte energético al nivel de ruido existente en el recinto receptor [5], y sobre todo, tratar de cuantificar dicho aporte energético.

En lo que respecta a la transmisión por flancos existe un parámetro, denominado índice de reducción vibracional, cuyo significado está relacionado con la transmisión de potencia vibracional a través de una unión entre elementos estructurales, normalizada con objeto de hacerlo invariante. En este artículo se propone la determinación *in situ* y bajo condiciones reales de esta magnitud, para cada uno de los flancos de transmisión entre dos salas adyacentes, así como la medición y análisis de los parámetros involucrados, según normativa en su estimación final.

2.- DESCRIPCIÓN DE LAS SALAS DE ENSAYO

Las medidas se han realizado en un antiguo edificio de la Universidad de Valladolid (España). En la Figura1 se muestra una representación de la vista en planta de las salas de ensayo, así como de la notación utilizada para cada una de las paredes. Las paredes verticales son fábrica de medio pie de ladrillo con un espesor de 15 cm con enfoscado y pintura por ambas caras, aportando una masa de 150 Kg/m². Los forjados están compuestos de bovedilla de 25 cm más una capa de compresión de 5 cm, mortero y cerámica con enfoscado y pintura por su parte inferior, dando un espesor de 37 cm y una densidad superficial de masa de 400 Kg/m².



Figura 1 Salas de ensayo utilizadas para realizar las medidas de los coeficientes K_v.

3.- PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DEL ÍNDICE DE REDUCCIÓN VIBRACIONAL.

El cálculo del índice de reducción vibracional K_{ij} [6], se puede realizar mediante dos métodos recogidos en la normativa [10840-1], que se denominan Método 1, y Método 2. El Método 1 es un método de cálculo directo mediante excitación aérea, y el Método 2 es un método de cálculo indirecto mediante excitación estructural. En este trabajo se va a aplicar el segundo método. La excitación estructural implica la utilización de una máquina de impactos para la excitación de los paramentos en el recinto emisor. En este caso el cálculo del índice de reducción vibracional responde a la Ecuac 1.

$$k_{ij} = \overline{D_{v,ij}} + 10 \log \frac{l_{ij}}{\sqrt{a_i \cdot a_j}} \quad [\text{dB}] \quad (1)$$

Donde i y j son dos paramentos de dos recintos contiguos con una unión común; $\overline{D_{v,ij}}$ es la diferencia de nivel de velocidad en la unión, promediada entre los elementos i y j en dirección ij [dB]; l_{ij} es la longitud de acoplamiento común entre el elemento i y el j, es decir, la longitud común de la unión [m] y a_i es la longitud de absorción equivalente del elemento i [m].

La longitud de absorción equivalente [1] se calcula según la Ecuación 2:

$$a_j = \frac{2.2 \cdot \pi^2 \cdot S_j}{T_{s,j} \cdot c_o \cdot \sqrt{\frac{f}{f_{\text{ref}}}}} \quad [\text{m}] \quad (2)$$

Donde S_j es la superficie del elemento j [m^2]; c_o es la velocidad del sonido en el aire, f es la frecuencia [Hz], f_{ref} es la frecuencia de referencia (1.000 Hz) y $T_{s,j}$ es el tiempo de reverberación estructural del elemento j [s].

Tanto S_j , c_o , f_{ref} y f , son datos conocidos. Sin embargo para cada uno de los paramentos es preciso determinar experimentalmente el tiempo de reverberación estructural. Este parámetro se define como el tiempo que debe transcurrir para que, una vez excitado un paramento, el nivel de velocidad disminuya 60 dB. El significado físico de este término es idéntico al del tiempo de reverberación de un recinto, con la salvedad de que el ruido generado corresponde a un impacto sobre la estructura de análisis. El cálculo del tiempo de reverberación estructural [3] se realiza según la Ecuación 3. En este estudio, el T_s se mide in situ mediante la excitación puntual de un paramento producida con un martillo, comparándose estos resultados con los obtenidos en la Ecuación 3.

$$T_s = \frac{2.2}{f \cdot \eta_{ref}} \quad [s] \quad (3)$$

Donde η_{total} es el factor de pérdidas [-], cuyo cálculo responde a la Ecuación 4. Gerretsen [3] indica que el factor de pérdidas, viene especificado en la norma ISO 140-1 [6], sin embargo, para caracterizar el factor de pérdidas en paramentos de laboratorio es más apropiado expresar este factor en función de la masa superficial del paramento de ensayo t y como se muestra en la Ecuación 4, donde m' es la densidad superficial del elemento Kg/m^2 .

$$\eta_{ref} = 0.01 + \frac{m'}{800 \cdot \sqrt{f}} \quad [-] \quad (4)$$

La diferencia de nivel de velocidad en la unión promediada en dirección entre los elementos i y j es un parámetro que ha de calcularse según la Ecuación 5.

$$D_{v,ij} = L_{v,i} - L_{v,j} \quad [dB] \quad (5)$$

Donde $L_{v,i}$ es el nivel de velocidad de vibración de las partículas del elemento i [dB].

Estos valores se pueden obtener a partir de las medidas de amplitud de aceleración de cada elemento. También existe la posibilidad de medir directamente estos valores in situ, y comprobar si coinciden con los valores obtenidos a partir de la aceleración.

Por el principio de reciprocidad se cumple la Ecuación 6. Este principio viene impuesto por el método de cálculo, debido al promedio de niveles de velocidad que se realiza en la Ecuación 7, y que a su vez se utiliza para obtener el índice de reducción vibracional según la Ecuación 1.

La validez de esta aproximación se analiza en este trabajo, debido a que en ciertas ocasiones la transmisión en la dirección ij no es equivalente a la transmisión en la dirección ji , por lo que pudiera ser más conveniente calcular por un lado el índice de reducción vibracional para el camino ij mediante el valor correspondiente de $D_{v,ij}$ y por otro lado el valor de K_{ji} , para el camino ji , con el valor correspondiente de $D_{v,ji}$; todos estos cálculos se realizarían sin aplicar la Ecuación 7 en los casos en que la diferencia entre los valores de la diferencia de nivel de velocidad en un sentido y en otro fueran muy dispares.

$$K_{ij} = K_{ji} \quad (6)$$

$$\bar{D}_{v,ij} = \frac{1}{2}(D_{v,ij} + D_{v,ji}) \quad (7)$$

4.- ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS INVOLUCRADOS EN EL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE REDUCCIÓN VIBRACIONA.

En las siguientes secciones se realiza un análisis de los parámetros involucrados en el cálculo del índice de reducción vibracional, así como de este último. Estos parámetros son: el tiempo de reverberación estructural, el factor de pérdidas total, la longitud de absorción equivalente y la diferencia de nivel normalizada por flancos.

4.1 TIEMPO DE REVERBERACIÓN ESTRUCTURAL

Se define el T_s y se mide *in situ* con la ayuda de un analizador de espectros y un martillo. El martillo se utiliza para excitar los paramentos de forma puntual. La caída del nivel de velocidad de vibración de las partículas de un paramento excitado con el martillo es lineal, por lo que realizando una regresión lineal en el intervalo medido en el que cae el nivel de velocidad, se puede extrapolar el cálculo para la caída de 60 dB.

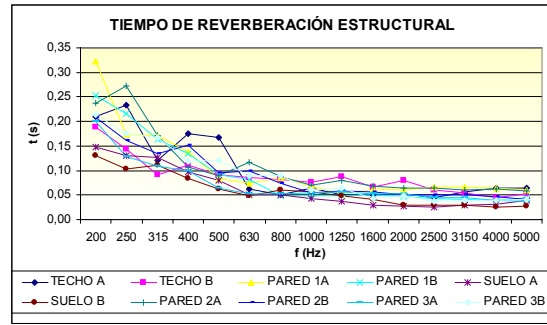


Figura 2: T_s para cada paramentos de las salas de ensayo

En la Figura 2 se representa el T_s medido para cada uno de los paramentos. En esta gráfica destaca que los paramentos que menor T_s poseen son los dos suelos de las salas. Esto es así porque los suelos están situados en la planta baja del edificio, y su espesor es mayor que el del resto de los paramentos. En esta figura también se aprecia que en todos los paramentos el T_s disminuye a medida que aumenta la frecuencia.

4.2 FACTOR DE PÉRDIDAS TOTAL

Para determinar el factor de pérdidas se considera un sistema físico que intercambia energía con otros sistemas mediante un acoplamiento débil, y E es la energía vibracional del sistema en condiciones estacionarias, en la banda de frecuencias $f + \Delta f$; si mediante excitaciones externas, se inyecta una cantidad de energía al sistema, ΔE , en esa misma banda de frecuencias, y durante un periodo de tiempo correspondiente a la frecuencia f , con la finalidad de mantener E constante, entonces se define el factor de pérdidas tal y como se indica en la Ecuación 8.

$$\eta_{total} = \frac{\Delta E}{2\pi E} \quad [-] \quad (8)$$

Por otro lado, η_{total} es el factor de pérdidas total [-], cuyo cálculo responde a la Ecuación 4, que a su vez establece una relación de este parámetro con el T_s y como se muestra en la ecuación 3, que es la que se ha utilizado para realizar los cálculos. En las Figuras 3 y 4 se muestran los valores de este parámetro para los paramentos de las salas de ensayo.

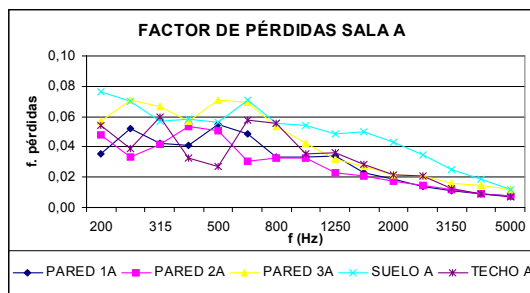


Figura 3 η_{total} para los paramentos de la sala A

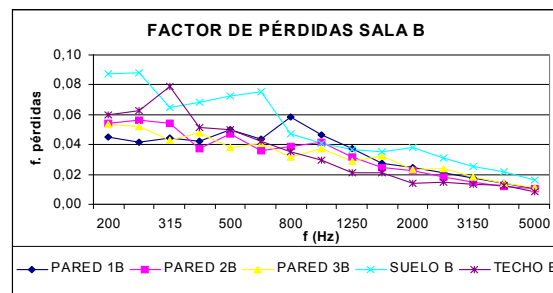


Figura 4 η_{total} para los paramentos de la sala B

Habitualmente el valor del η_{total} se expresa en dB, que viene dado por la Ecuación 9.

$$\eta_{total} [dB] = 10 \log \left(\frac{\eta_{total}}{10^{-12}} \right) \quad [dB] \quad (9)$$

En las Figuras 5 y 6 se muestran dos representaciones del η_{total} en dB para los cinco paramentos de ensayo de la sala A y de B respectivamente. De estas figuras se puede destacar que η_{total} se halla entre 90 y 110 dB, y decae con la frecuencia sobre todo a partir de la frecuencia de 1.000 Hz. Este resultado indica que a medida que aumenta la frecuencia, la

energía es absorbida por la pared de una forma más rápida, y la vibración se extingue antes para frecuencias altas que para frecuencias bajas. Este resultado es muy similar al mostrado en [4] donde se estudia el aislamiento acústico para suelos compuestos de vigas y bloques. Se observa la coincidencia en la tendencia de las gráficas así como el rango de valores del factor de pérdidas, con un máximo de 109 dB para frecuencias bajas (160 Hz), una tendencia regular y uniforme para frecuencias entre 200 y 1000 Hz, y un decaimiento brusco con la frecuencia a partir de los 1000 Hz, con un valor mínimo de 98 dB a la frecuencia de 5000 Hz.

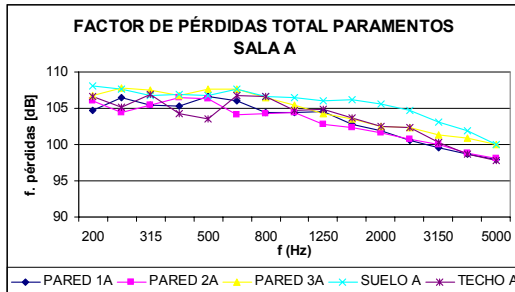


Figura 5 η_{total} para los paramentos de la sala A.

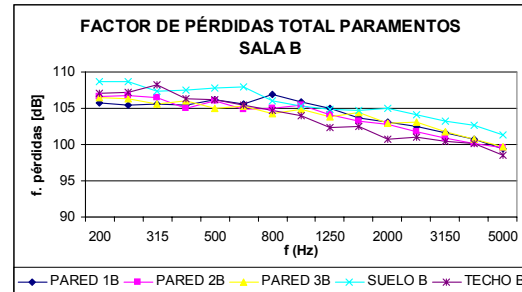


Figura 6 η_{total} para los paramentos de la sala B

4.3 DIFERENCIA DE NIVEL DE VELOCIDAD

La diferencia de nivel de velocidad, $D_{v,ij}$, es la diferencia entre el nivel medio de velocidad de un elemento i y un elemento j , cuando se excita el elemento i . Para medir esta magnitud, se puede utilizar excitación aérea o excitación estructural. En este caso se ha utilizado el método 2, la excitación estructural. De esta forma, se tiene que la diferencia de nivel de velocidad viene dada por la Ecuación 5. El método de medida consiste en impactar sobre un paramento i , y medir en varias posiciones de acelerómetro en ese paramento y en la otra sala, sobre el paramento j . El analizador de espectros, mide niveles de aceleración, por lo que es preciso realizar la conversión adecuada entre niveles de aceleración y velocidad, así como convertir aceleraciones a velocidades, para luego pasar las velocidades (promediadas para todos los puntos de ensayo) a su nivel de velocidad correspondiente mediante la Ecuación 10.

$$L_v = 10 \cdot \log \frac{v^2}{v_o^2} \quad [\text{dB}] \quad (10)$$

De esta forma, impactando sobre el paramento i , y midiendo sobre ese mismo paramento se obtiene $L_{v,i}$. Así mismo, impactando sobre el paramento i y midiendo sobre el paramento j , se obtiene $L_{v,j}$. La principal finalidad del cálculo de la diferencia de nivel de velocidad es la

estimación de los coeficientes K_{ij} , para lo cual se precisa el $\bar{D}_{v,ij}$, que es la diferencia de nivel de velocidad para el flanco ij y el flanco ji , promediado en ambos sentidos, según la Ecuación 7. El aspecto más destacable es la semejanza entre ambos sentidos de propagación de la vibración para un mismo flanco de estudio. Esta semejanza es mayor cuando se consideran paramentos de construcción semejante, como es el caso de las paredes 2A y 2B, que se muestra en la Figura 7 y las paredes 3A y 3B que se representa en la Figura 8. Estos paramentos poseen un tipo de construcción similar puesto que son parejas de paramentos internos y externos de las salas de ensayo. Los valores no son exactamente iguales puesto que en ellos aparecen puertas y ventanas distribuidas no uniformemente, y que también afectan a la transmisión.

En [4], se muestran algunas representaciones gráficas de la diferencia de nivel de velocidad en dB, para distintos puntos del paramento j . Los resultados recogidos en nuestro trabajo se aproximan al promedio realizado para todos los puntos del paramento j mostrado en la figura 19 de [4]. En dicho artículo se muestra una representación gráfica de la diferencia de nivel de velocidad entre un elemento i fijo, y un punto variable del elemento j . A medida que la distancia entre el punto del paramento i y el punto del paramento j se alejan en el espacio, la diferencia de nivel de velocidad se hace cada vez mayor, por lo que para realizar comparativas con nuestro estudio se puede realizar un promedio, encontrándose éste en un rango de entre 10 y 25 dB. Este rango coincide con los resultados obtenidos en nuestra campaña de medidas.

Estas coincidencias corroboran la validez de nuestras medidas, debido a que no es fácil encontrar resultados sobre estos parámetros en la bibliografía.

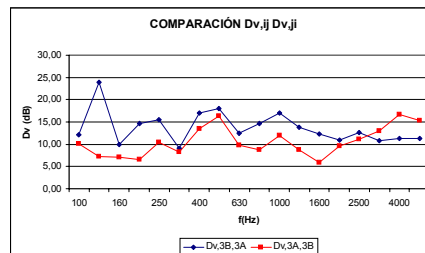
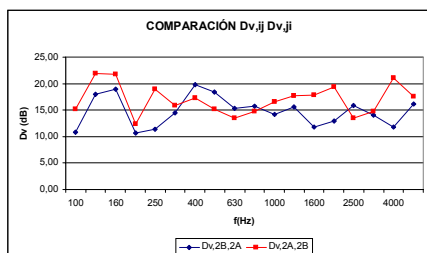
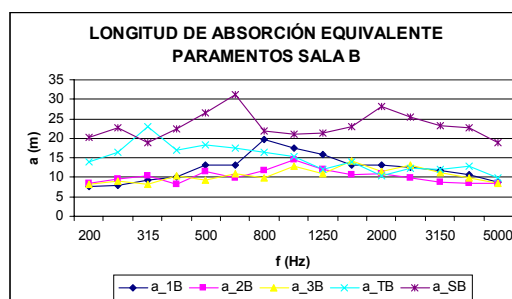
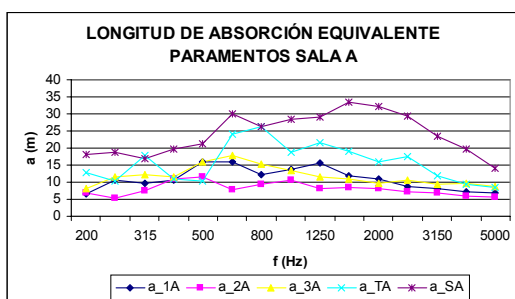


Figura 7 Diferencia del nivel de velocidad para el flanco 2A, 2B. Figura 8 Diferencia del nivel de velocidad para el flanco 3A, 3B.

4.4 LONGITUD DE ABSORCIÓN EQUIVALENTE

Una magnitud relevante para el cálculo de los coeficientes K_{ij} mediante el método 2, es la longitud de absorción equivalente, que es función del tiempo de reverberación estructural, y que en este trabajo se mide para cada uno de los paramentos.



Figuras 9 y 10 Longitud de absorción equivalente de los paramentos de la sala A y de la sala B.

Se define la longitud de absorción equivalente [2] como la longitud de una arista imaginaria totalmente absorbente de un elemento al que se le supone una frecuencia crítica de 1000 Hz y que da las mismas pérdidas que las pérdidas totales del elemento en una situación dada. El cálculo de esta magnitud se realiza según la Ecuación 2 para cada elemento i , donde se observa que es directamente proporcional a la superficie de cada paramento e inversamente proporcional al tiempo de reverberación estructural. En las figuras 9 y 10 se muestran las longitudes de absorción equivalentes para cada uno de los paramentos de ensayo de la sala A y de la sala B respectivamente. En ambas gráficas se observa que los paramentos con una longitud de absorción mayor son los suelos y los techos, como era de esperar por ser los que más energía absorben, y para el resto de los paramentos la diferencia es poco significativa puesto que hay que considerar que

4.5 ÍNDICE DE REDUCCIÓN VIBRACIONAL

El índice de reducción vibracional, K_{ij} , es una magnitud muy relevante en la transmisión por flancos por estar relacionada con la transmisión de potencia vibracional a través de una unión entre elementos estructurales. Esta magnitud se determina normalizando la diferencia de niveles de velocidad promediados en todas las direcciones sobre la unión con la longitud de la unión y la longitud de absorción equivalente, si fuera relevante, de ambos elementos según la ecuación 1. Para el cálculo del índice de reducción vibracional, aplicando el método 2, se utilizan los valores mostrados en los apartados anteriores, del T_s , longitud de absorción

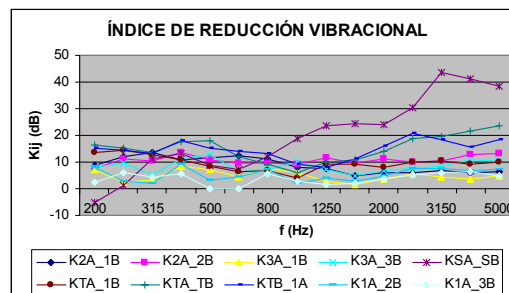


Figura 11 Índice de reducción vibracional

equivalente, y diferencia de nivel de velocidad.

En algunos flancos se observan valores muy irregulares para los coeficientes, y esto es debido a uno de los parámetros que intervienen en el cálculo. El parámetro en cuestión es la diferencia de nivel de velocidad promediada para ambas direcciones de transmisión. Este parámetro introduce irregularidades debido a que se promedia la transmisión en el sentido ij con la transmisión en el sentido ji , con la finalidad de que se pueda concluir que K_{ij} es igual a K_{ji} .

5.- CONCLUSIONES

Las principales conclusiones obtenidas de este estudio son:

- El tiempo de reverberación estructural decae con la frecuencia. Los resultados obtenidos coinciden con la aproximación propuesta por Gerretsen
- El factor de pérdidas decae con la frecuencia y puede aproximarse de forma teórica para paramentos de gran densidad superficial
- La diferencia de nivel de velocidad promediada en ambos sentidos es una aproximación no adecuada en el caso de paramentos con diferencias constructivas
- La tendencia de los parámetros involucrados en el cálculo de los K_{ij} coinciden con los observados en otros trabajos y proporciona cierta validez a este estudio.

Trabajo realizado con el proyecto con referencia BIA2004-07102-C03-03

BIBLIOGRAFÍA

- [1] UNE-EN 12354-1 Acústica de la edificación. Estimación de las características acústicas de las edificaciones a partir de las características de sus elementos. Parte 1: Aislamiento acústico a ruido aéreo entre recintos, 2000.
- [2] UNE-EN 12354-2 Acústica de la edificación. Estimación de las características acústicas de las edificaciones a partir de las características de sus elementos. Parte 2: Aislamiento acústico a ruido de impacto entre recintos.
- [3] Gerretsen, E. Using the structural reverberation time in standardizing laboratory measurements of the sound reduction index. PACS REFERENCE: 43.55 Rg
- [4] Hopkins, C. Airborne sound insulation of beam and block floor: Direct and Flanking Transmission". Building Acoustics Vol 11, number 1. Pg. 1-25. 2004
- [5] Esteban, A. Cortés, A. Villot, M. Martin, C. Vibration reduction index K_{ij} in hollow constructions: Application of the European standard EN 12345 to the Spanish constructions. PACS Reference 43.55 Rg. 2003.
- [6] prEN ISO 10848-1 Acoustics- Laboratory measurement of the flanking transmission of airborne and impact noise between adjoining rooms. Part 1: Frame document. 1999.
- [7] Szudrowicz, B. Izeweska, A. Simplified evaluation of flanking transmission based on the mean mass an mean area of flanking elements. Applied Acoustics, 46. Pp. 307-319. 1995.
- [8] Alba, J. Ramis, J. Sánchez-Morcillo, V.J. Improvement of the prediction of transmission loss of double partitions with cavity absorption by minimization techniques. Journal of sound and vibration. Pp. 793-804. 2003.
- [9] Kawai, Yasuhito. A chart for estimating the distance attenuation of flanking sound passing through open windows in the exterior wall of adjoining rooms and its experimental verification. Applied Acoustics 65. Pp 958-996. 2004.
- [10] Craik, R.J.M. The contribution of long flanking paths to sound transmission in building. Applied Acoustics 62. Pp 29-46. 2001.