

CONTRIBUCIÓN A LA CUANTIFICACIÓN DE LA TRANSMISIÓN POR FLANCOS

Ramis, J. ¹; Alba, J. ²; Segovia, EE³; Francês Monllor, J. ¹; Carbajo, J. ¹

¹Dpto. Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal.
Universidad de Alicante - Apdo. Correos, 99; 03080 Alicante

²Instituto para la Gestión Integrada de las Zonas Costeras
Escuela Politécnica Superior de Gandía- Universidad Politécnica de Valencia
Carretera Nazaret-Oliva S/N. Grao de Gandia 46730 (Valencia)

³Departamento de Ingeniería de la Construcción y Obras Públicas.
Universidad de Alicante - Apdo. Correos, 99; 03080 Alicante

{jramis@ua.es, jesalba@fis.upv.es, enrique.gonzalo@ua.es, jfmonllor@ua.es, jesus.carbajo@ua.es}

Resumen

Como es sabido, las medidas en el ámbito de la acústica de la edificación requieren un gran esfuerzo económico y de tiempo. Hay dos caminos para que este esfuerzo sea menor. Los programas de simulación y los modelos a escala.

La cuantificación de la transmisión por flancos en el contexto de la predicción del aislamiento acústico es un problema actual. Uno de los puntos clave en el cálculo es la determinación de la diferencia de velocidades entre superficies (paredes o suelos) adyacentes.

En este trabajo se presentan los avances en el proceso seguido para un ajuste de un modelo numérico que permitirá, aplicando el Método de Elementos Finitos (MEF) cuantificar la variable mencionada. El punto de partida son las medidas experimentales efectuadas sobre un prototipo formado por una losa de hormigón sobre la que se levantan las paredes con diferentes espesores. Se presentan algunos de los resultados obtenidos hasta el momento.

Palabras-clave: transmisiones laterales, aislamiento acústico, índice de reducción vibracional, método de elementos finitos.

Abstract

As we all know, the measurements in the subject of acoustics building require a large economical effort and are time consuming. There are two ways to diminish this effort: the use of simulation codes and the scale models.

The calculation of the side transmission, concerning the prediction of the acoustic isolation, is an present problem. One of the key points in the calculation is the determination of the difference between the adjacent surface (walls or floors) velocities.

In this work we present the advances we have made in the process of making a fit of a numerical model that will allow us, applying the Finite Element Method (FEM) to quantify the previously mentioned variables. The starting point is the experimental measurements that we have made using a prototype constituted by a concrete stone, on which walls with different thicknesses are built. We present some of the results that we have obtained up to date.

Keywords: Lateral transmissions, acoustic isolation, vibration reduction rate, finite elements method.

1 Introducción

En los últimos cinco años, con el proceso de discusión abierto para la mejora de la calidad acústica de la edificación, se ha reconocido la importancia del uso de herramientas predictivas para valorar previamente el estado acústico en fase de proyecto. Actualmente ya no se cuestiona la importancia del conocimiento del efecto de los flancos en el aislamiento acústico global en un diseño completo de cualquier unidad de uso [1]. Es más, se fomenta el uso de métodos reconocidos como base para la predicción previa del efecto de un flanco y su repercusión en el conjunto del diseño.

El método reconocido más habitual para valorar acústicamente la transmisión por flanco es el de valorar el índice de reducción vibracional que podemos asociar a la unión en un camino determinado, desde el recinto emisor al receptor, diferente al camino principal. Este índice de reducción vibracional, que nace del método SEA y se simplifica para el uso de ecuaciones relativamente más sencillas, engloba la transmisión de energía en el camino decidido y las pérdidas asociadas a los elementos constituyentes de la unión.

Actualmente se puede obtener el índice de reducción vibracional mediante el uso de fórmulas empíricas reconocidas para ciertas soluciones constructivas y en un conjunto determinado de diseños rígidos o con elementos elásticos insertados. Esto se ha recogido en el DB-HR del CTE [2] que referencia las normas UNE-EN 12354 [3-5] donde se pueden encontrar las diferentes formulaciones y sus limitaciones.

Otra técnica que puede ser factible es la obtención de información del flanco en una edificación, mediante procedimientos de medida similares a los detallados en las normas UNE-EN ISO 10848 [6], con el uso de diferente equipamiento y la medición de multitud de datos de diferencias de niveles de velocidad y tiempos de reverberación estructural, para obtener datos sobre transmisión de energía y pérdidas. Se pueden encontrar ya diferentes trabajos sobre esta temática [7-9].

En este trabajo se realiza un estudio mediante el método de los elementos finitos, con el objetivo final de reajustar nuevas fórmulas de predicción para este tipo de uniones, en función de la relación de masas y simulando la medición en diferentes posiciones de medida y excitación que se describe en la UNE-EN ISO 10848-1, valorando la influencia de las colocaciones de sensores y excitadores en la obtención de los valores finales del índice de reducción vibracional.

2 Índice de Reducción Vibracional

2.1 Definición de Índice de Reducción vibracional

El índice de reducción vibracional, K_{ij} , se define como la magnitud relacionada con la transmisión de potencia vibratoria a través de una unión entre elementos estructurales, normalizada con el objeto de hacerla una magnitud invariante [6]. Se determina normalizando la diferencia de niveles de velocidad promediados en todas direcciones sobre la unión, con la longitud de la unión y la longitud de absorción equivalente, si fuera relevante, de ambos elementos según la siguiente ecuación:

$$K_{ij} = \frac{D_{v,ij} + D_{v,ji}}{2} + 10 \log \frac{l_{ij}}{\sqrt{a_i \cdot a_j}} \quad (1)$$

donde:

$D_{v,ij}$ es la diferencia del nivel de velocidad entre los elementos i y j, cuando el elemento i es excitado, en decibelios

$D_{v,ji}$ es la diferencia del nivel de velocidad entre los elementos j e i, cuando el elemento j es excitado, en decibelios

l_{ij} es la longitud común de la unión entre los elementos i y j, en metros.

a_i es la longitud de absorción equivalente del elemento i, en metros.

a_j es la longitud de absorción equivalente del elemento j, en metros

La longitud de absorción equivalente se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$a = \frac{2.2 \cdot \pi^2 \cdot S}{c_0 \cdot T_s} \sqrt{\frac{f_{ref}}{f}} \quad (2)$$

donde:

T_s es el tiempo de reverberación estructural del elemento i o j, en segundos

S es el área del elemento i o j en metros cuadrados.

f es la frecuencia central de la banda, en hercios.

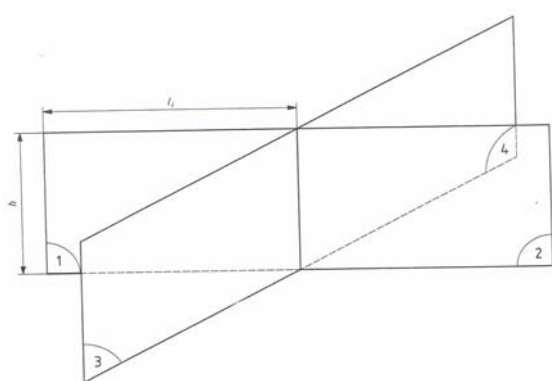
f_{ref} es la frecuencia de referencia; 1000 Hz.

c_0 es la velocidad del sonido en el aire, en metros por segundo.

2.2 Determinación experimental del índice de reducción vibracional

Tal y como se especifica en la UNE-EN ISO 10848-1 [6], es posible obtener el valor de K_{ij} utilizando como base las ecuaciones (1) y (2), a partir de la medición de la diferencia de niveles de velocidad a través de la unión en ambas direcciones y la medición del tiempo de reverberación estructural de los dos elementos. Sin embargo, en la misma normativa prácticamente se desecha el uso de excitación con ruido aéreo, recomendando el uso de máquina de impactos modificada o vibrador, para realizar una excitación directa sobre el elemento de ensayo. Además, debe ser estacionaria, en función del método de medida elegido.

Para la obtención de la diferencia de velocidades, se toman, en condiciones de laboratorio, las condiciones geométricas que se señalan en la figura 1, con las distancias tomadas desde la superficie.



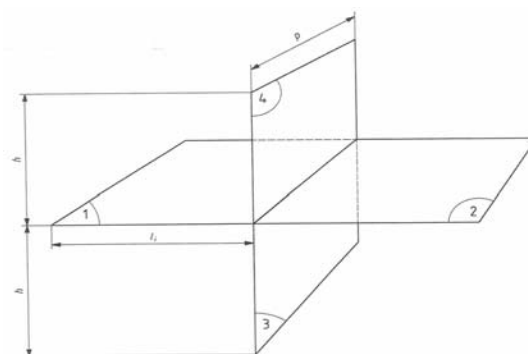
Condiciones para unión de ensayo vertical.

$h \geq 2,3 \text{ m}$

$3,5 \text{ m} \leq l_i \leq 6 \text{ m}$ para los elementos i

$$\left| \frac{l_i - l_j}{l_i} \right| \geq 0,1$$

para todas las combinaciones l_i, l_j



Condiciones para unión de ensayo horizontal.

$h \geq 2,3 \text{ m}$

$3,5 \text{ m} \leq l_i \leq 6 \text{ m}$ para los elementos 1 y 2

$4 \text{ m} \leq p \leq 5 \text{ m}$ para los elementos i

$$l_1 > l_2, \left| \frac{l_1 - l_2}{l_1} \right| \geq 0,1$$

Figura 1 – Condiciones geométricas de la 10848-1

Por tanto, existen una serie de limitaciones claras para los tamaños de las muestras que deben ensayarse, desde el punto de vista de laboratorio, por lo cual, aún será más complicada la medición “in situ”.

Respecto a la medida de la diferencia de velocidades, existen una serie de limitaciones. Si se mide con máquina de impactos en el suelo, debe tomarse como referencia la UNE-EN ISO 140-6. En la figura 2 se muestra el área mínima a tener en cuenta, donde el área sombreada muestra la zona donde no se debe colocar la máquina.

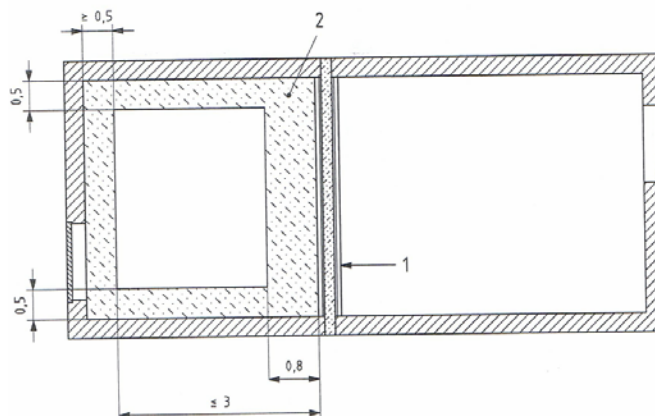


Figura 2 – Área válida para el uso de la máquina de impactos

Algunas de las condiciones indicadas en la norma son las siguientes:

- Deben realizarse en cada elemento 3 posiciones de excitación y 9 de transductor (3* excitación).
- Las posiciones deben distribuirse aleatoriamente pero no simétricamente.

- La posición del transductor y puntos de excitación deben cumplir las siguientes distancias mínimas:
 - 0.5 m entre los puntos de excitación y los límites del elemento a ensayar.
 - 1 m entre los puntos de excitación y las posiciones de transductor asociadas.
 - 0.5 m entre cada posición del transductor.

Para la medición del tiempo de reverberación estructural se puede seguir la normativa ISO 3382. Se excita el elemento constructivo con un golpe de martillo y se obtiene el tiempo que tarda en caer el sonido 60 dB. Realmente el rango debe situarse entre 5, 20 o 25 dB por debajo del nivel máximo, teniendo en cuenta principalmente el rango superior de las curvas. La norma indica al menos tres puntos de excitación por al menos tres posiciones de transductor para la obtención del tiempo de reverberación estructural. Las condiciones de colocación son similares a las de la medida de la diferencia de velocidades.

Además de este procedimiento, debe tenerse en cuenta las posibles limitaciones en el proceso de medida, tanto del nivel de velocidad como del tiempo de reverberación estructural, dado por la norma, que puede cuestionar en algunos casos el valor final obtenido.

2.3 Fórmulas empíricas para el índice de reducción vibracional

El Documento Básico de Protección Frente al Ruido (DB-HR) del Código Técnico de la Edificación (CTE) refieren a las normas UNE –EN 12354 [3-5] para la predicción del comportamiento acústico en diferentes situaciones. El método detallado descrito en el DB-HR utiliza las fórmulas de predicción que contienen dichas normas. En el caso concreto de la UNE –EN 12354-1: se puede encontrar un anexo con fórmulas obtenidas a través de datos empíricos, para tipos habituales de uniones, en el momento de desarrollo de la norma.

Las fórmulas se obtienen para el caso de uniones en que los elementos a ambos lados de la unión en el mismo plano tienen la misma masa, con lo cual, la relación de masas se reduce a dos. Algunos ejemplos de fórmulas empíricas, que posteriormente se usan en este trabajo son “Unión rígida en + de elementos homogéneos” de la figura 3 y la “Unión rígida en T de elementos homogéneos” de la figura 4.

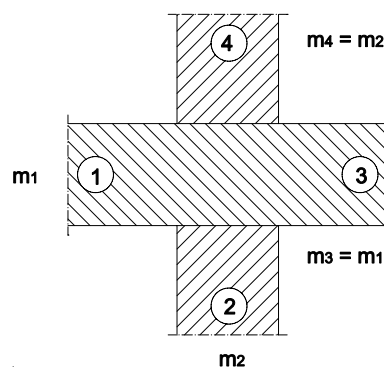


Figura 3. Unión rígida en + de elementos homogéneos

En el caso de la unión en cruz, se definen las siguientes relaciones para los índices de reducción sonora asociados:

$$K_{13} = 8,7 + 17,1M + 5,7 \cdot M^2 \quad \text{dB}; \quad 0 \text{ dB/octava} \quad (3a)$$

$$K_{12} = 8,7 + 5,7 \cdot M^2 (= K_{23}) \text{ dB}; \quad 0 \text{ dB/octava} \quad (3b)$$

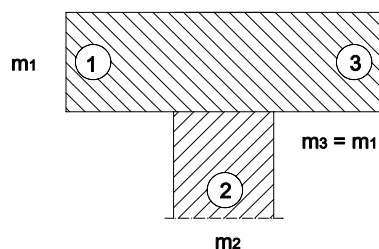


Figura 4. Unión rígida en T de elementos homogéneos

En el caso de la unión en T, se definen las siguientes relaciones para los índices de reducción sonora asociados:

$$K_{13} = 5,7 + 14,1 M + 5,7 \cdot M^2 \text{ dB}; \quad 0 \text{ dB/octava} \quad (4a)$$

$$K_{12} = 5,7 + 5,7 \cdot M^2 (= K_{23}) \text{ dB}; \quad 0 \text{ dB/octava} \quad (4b)$$

Las expresiones (3) y (4) están dadas en función de la magnitud M definida como:

$$M = \lg \frac{m'_{\perp i}}{m'_i} \quad (5)$$

siendo:

m'_i masa por unidad de superficie del elemento i en el camino de transmisión ij
 $m'_{\perp i}$ masa por unidad de superficie del otro elemento, perpendicular al i, que forma la unión

En el cálculo de estas masas sólo se cuenta el material base o forjado conectado a los elementos constructivos colindantes, y deben excluirse las masas de las capas de revestimiento, tales como suelos flotantes, trasdosados y techos suspendidos [3].

Se puede observar como las magnitudes dadas por (3) y (4) no tienen dependencia con la frecuencia. De hecho, según se indica en el DB-HR, en general la transmisión es poco dependiente de la frecuencia desde 125 a 2 kHz, por lo que se considera 0 dB/octava.

3 Desarrollo

3.1 Planteamiento

La secuencia es la siguiente: Se realiza una simulación aplicando FEM para obtener la distribución de velocidades en distintas superficies sobre unos modelos concretos, cuando se aplica una fuerza en un punto tratando de reproducir, en una primera aproximación, la norma de medida. A partir de estos datos, se obtiene el promedio de velocidades en una zona de cada una de las superficies a considerar y,

a partir de aquí, la diferencia de velocidades promedio entre las superficies implicadas. Para la obtención del tiempo de reverberación estructural, se sigue la siguiente expresión, dada por la UNE-EN 12354-1:

$$T_s = \frac{2,2}{f\eta_{TOT}}$$

el factor de pérdidas total se puede obtener mediante la relación:

$$\eta_{TOT} = \eta_{int} + \frac{m}{485\sqrt{f}} \quad (8)$$

Siendo m la masa por unidad de área. La fórmula es válida, para $m < 800 \text{ kg/m}^2$.

Al igual que otros métodos numéricos el primer paso es discretizar el medio, y un sistema continuo se divide en una serie de porciones finitas delimitadas por nodos. La exactitud de los resultados depende del número de elementos utilizados en el mallado. La ecuación del movimiento armónico a resolver es la siguiente:

$$\{F(t)\} = [M] \left\{ \frac{d^2 y}{dt^2} \right\} + [C] \left\{ \frac{dy}{dt} \right\} + [K] \{y\} \quad (6)$$

Donde $\{F(t)\}$ es la fuerza de excitación armónica, $[M]$ es la matriz de masa, $[C]$ es la matriz de amortiguamiento y $[K]$ es la matriz de rigidez [10]. Todos los suelos y paredes se consideran monolíticos con una densidad de 2400 kg/m^3 , $32 \cdot 10^9 \text{ Pa}$ de módulo de Young y 0,22 de coeficiente de Poisson. Los espesores simulados son de 10, 20 y 30 cm y el factor de pérdidas interno de 0,01. A partir de las simulaciones, se obtiene el valor de las velocidades en diferentes posiciones i, j .

3.2 Modelos estudiados

En la figura 5 (a) y b) se muestran los modelos utilizados. En todos los casos los suelos y las paredes son homogéneas, de hormigón de densidad volumétrica 2300 Kg/m^3 y el factor de pérdidas interno considerado es de 0,01. Se indica, en cada figura, el punto donde se aplica la fuerza constante en el margen de frecuencias considerado. Como se puede apreciar, se ha evitado la simetría.

El modelo a) se ha estudiado para distintos espesores de suelo y paredes verticales. Concretamente:

a.1) Forjado 10 cm y paredes 5 cm, a.2) Forjado 15 cm y paredes 5 cm, a.3) Forjado 20 cm, paredes 5 cm, a.4) Forjado 10 cm, paredes 10 cm

Para el promediado de velocidades se han tomado 16 elementos de superficie en cada elemento en la zona central del mismo para el caso del modelo a) y 64 para el correspondiente al b)

En el modelo b) se ha considerado un espesor para los forjados de 21.6 cm y de 10.8 para las paredes, que conduce a una densidad superficial de 500 kg/m^2 para los forjados (elementos horizontales) y 250 kg/m^2 para los verticales. Todos Los resultados que se presentan en la presente comunicación corresponden a cálculos realizados para las frecuencias de 500 y 1000 Hz.

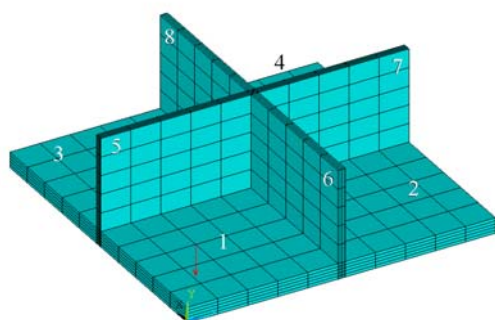


Figura 5 a)

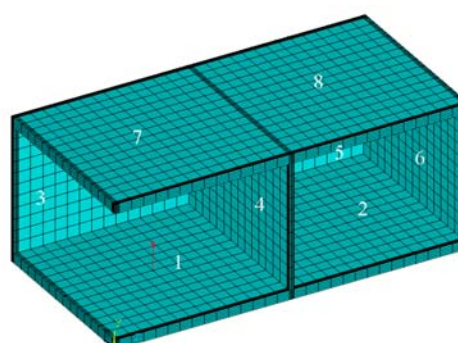


Figura 5 b) Dimensiones interiores 4x3x4 m

Figura 5. Modelos estudiados

3.3 Resultados para el modelo a)

Son los siguientes:

| | | | | |
|-----------------------|--------------|--------------|--------------|----------|
| M | -0.30 | -0.48 | -0.60 | 0 |
| K₁₂ | 1.97 | 0.27 | -0.72 | 5.7 |
| K₁₃ | | | | |
| K₁₅ | 6.22 | 7.00 | 7.77 | 5.7 |
| K₁₆ | | | | |

Tabla 1. Valores de los Índices de Reducción Vibracional según la Norma UNE-EN 12354 para cuatro configuraciones de masas diferentes. Configuración en Cruz

| | | | | |
|-----------------------|--------------|--------------|--------------|----------|
| M | -0.30 | -0.48 | -0.60 | 0 |
| K₁₂ | 12.87 | 5.9555 | 3.6248 | 15.685 |
| K₁₃ | 12.234 | 4.7553 | 2.1854 | 15.587 |
| K₁₅ | 10.18 | 10.973 | 1.6314 | 15.355 |
| K₁₆ | 9.6175 | 10.054 | 2.9721 | 15.139 |

Tabla 2. Valores de los Índices de Reducción Vibracional para $f = 500\text{Hz}$ para cuatro configuraciones de masas diferentes. Configuración en Cruz

| | | | | |
|-----------------------|--------------|--------------|--------------|----------|
| M | -0.30 | -0.48 | -0.60 | 0 |
| K₁₂ | 1,9963 | 6,7846 | 4,5546 | 4,4594 |
| K₁₃ | 1,7745 | 10,867 | 3,9958 | 4,2527 |
| K₁₅ | 10,914 | 8,2229 | 8,5562 | 8,0173 |
| K₁₆ | 11,083 | 6,7573 | 8,6635 | 6,9537 |

Tabla 3. Valores de los Índices de Reducción Vibracional para $f = 1000\text{Hz}$ para cuatro configuraciones de masas diferentes. Configuración en Cruz

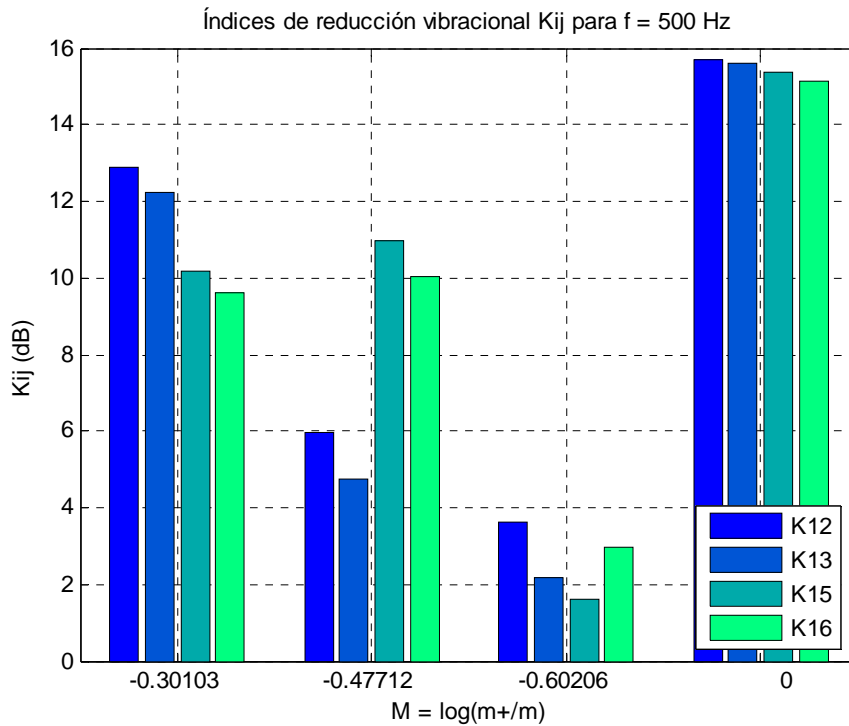


Figura 6. Índices de reducción vibracional entre diferentes superficies para los cuatro casos considerados para la frecuencia de 500 Hz

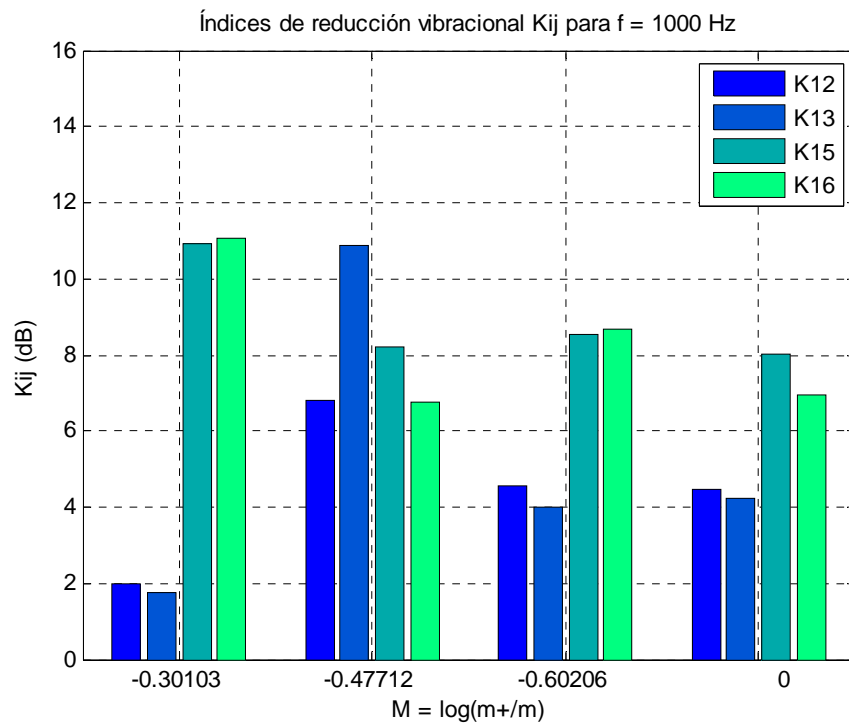


Figura 7. Índices de reducción vibracional entre diferentes superficies para los cuatro casos considerados para la frecuencia de 1000 Hz

3.4 Resultados para el modelo b)

Son los siguientes

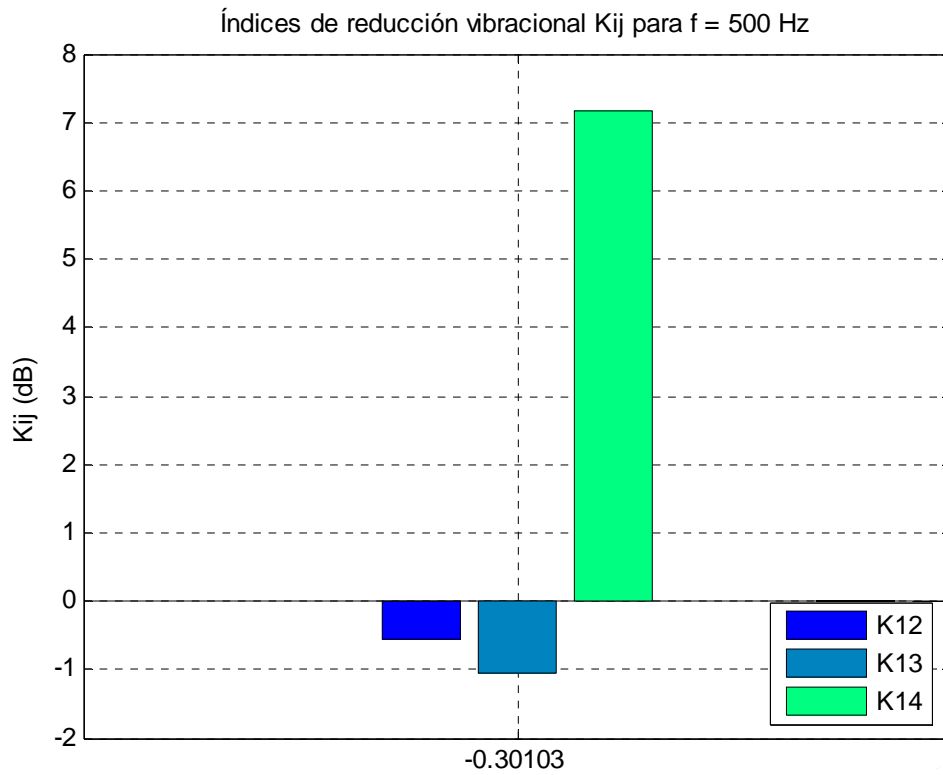


Figura 8. Valores de los Índices de Reducción Vibracional para f = 500Hz para el modelo 5 b)

| | |
|-----------------------|--------------|
| M | -0.30 |
| K₁₂ | -0,56528 |
| K₁₃ | -1,0579 |
| K₁₄ | 7,1592 |

Tabla 4. Valores de los Índices de Reducción Vibracional para f = 500Hz para una habitación

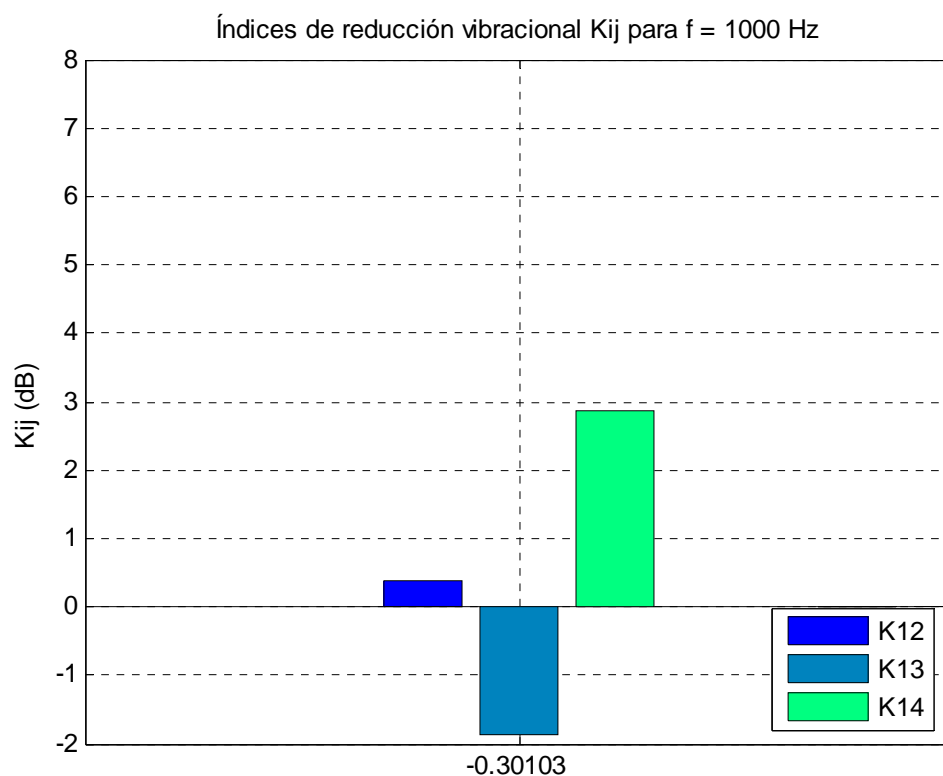


Figura 8. Valores de los Índices de Reducción Vibracional para f = 1000Hz para el modelo 5 b)

| | |
|-----------------------|--------------|
| M | -0.30 |
| K₁₂ | 0,37553 |
| K₁₃ | -1,8709 |
| K₁₄ | 2,8812 |

Tabla 5. Valores de los Índices de Reducción Vibracional para f = 1000Hz para una habitación

4 Conclusiones y futuras líneas de trabajo

Actualmente se está pendiente de finalizar la ejecución de la obra, para realizar medidas experimentales que permitirán ajustar los modelos numéricos y extrapolar los resultados a viviendas. Al mismo tiempo, se están llevando a cabo medidas en viviendas con recintos de dimensiones similares a los del modelo de la figura 5 b).

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia (BIA2007-68098-C02-01 y BIA2007-68098-C02-02).

Referencias

- [1] Alba, J., Ramis, J., Escuder, E., del Rey, R. Effect of the estimation of the wall/floor junction type on the acoustic isolation. Acoustics'08. Paris. 29 Junio-4 Julio 2008.
- [2] REAL DECRETO 1371/2007, de 19 de octubre, por el que se aprueba el documento básico «DB-HR Protección frente al ruido» del Código Técnico de la Edificación y se modifica el Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación
- [3] UNE EN 12354-1: 2000 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.
- [4] UNE EN 12354-2: 2001 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 impactos entre recintos.
- [5] UNE EN 12354-3: 2001 Acústica de la edificación. Estimación de las características acústicas de las edificaciones a partir de las características de sus elementos. Parte 3: Aislamiento acústico a ruido aéreo contra el ruido del exterior.
- [6] ISO 10848-parts 1, 2 and 3. Laboratory measurement of the flanking transmission of airborne and impact sound between adjoining rooms.
- [7] Alba, J., Venero, J., del Rey, R., Ramis, J., Escuder, E. Vibration Reduction Index of different junctions measured in situ. ICA 2007.2-7 September 2007.
- [8] M^a A. Martín, A. I. Tarrero, A. Aparicio, J. González, M. Machimbarrena “Determinación del índice de reducción vibracional y análisis de los parámetros involucrados”. *Tecniacústica 2006, 37º Congreso nacional de acústica. Encuentro ibérico de acústica. EAA Symposium on Hydroacoustics*, Gandia, 18-20 octubre, 2006
- [9] J. Alba, J. Ramis, J. Venero, E. Escuder, L. Bertó, “Medida in situ de transmisiones indirectas y análisis de su influencia en el aislamiento acústico de una medianera”, *Tecniacústica 2006, 37º Congreso nacional de acústica. Encuentro ibérico de acústica. EAA Symposium on Hydroacoustics*, Gandia, 18-20 octubre, 2006.
- [10] Zienkiewick O. C., Taylor R. L., “El método de los elementos finitos”, 4ª edición Mc Grau Hill, CIMNE (Barcelona) Volumen 1 y 2 (1993)