

ESTUDIO DE LA TRANSMISIÓN POR FLANCOS MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS (3D)

PACS: 43.55.Rg

Ramis, J.¹; Carbajo1, J.¹; Segovia, E.¹; Del Rey, R.²; Alba, J.²

1: Dpto. Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal

Universidad de Alicante

Apdo. Correos, 99; 03080 Alicante

E-mail: jramis@ua.es, jesus.carbajo@ua.es, enrique.gonzalo@ua.es

2: Instituto para la Gestión Integral de Zonas Costeras

Escuela Politécnica Superior de Gandía. Universidad Politécnica de Valencia

C/ Paraninfo nº 1, 46730 Grao de Gandía. Valencia

E-mail: roderey@doctor.upv.es, jesalba@fis.upv.es

ABSTRACT

The aim of this work is to obtain a more accurate approach of the acoustic insulation prediction on constructive solutions, quantifying the contribution of the structure borne sound. It is necessary to point out that the standard UNE-EN 12354, in his parts 1, 2 and 3, provides some tools for its estimation. However, these tools are not accurate enough and a better quantification of sound flanking transmission is needed. Numerical methods can facilitate the implementation of acoustic projects and provide better results at a low economic cost. In this work we present 3D Finite Element Model for the determination of vibration reduction index on joints with and without floating soils.

Key-words: flanking transmission, acoustic isolation, coupling loss factor, finite elements.

RESUMEN

El objeto de este trabajo es obtener una predicción más precisa del aislamiento acústico en soluciones constructivas, cuantificando la contribución de la transmisión por flancos. Es necesario señalar que la norma UNE-EN 12354, en sus partes 1, 2 and 3, proporciona algunas herramientas para esta estimación. Sin embargo, estas herramientas no son todo lo precisas que sería deseable y es necesaria una cuantificación mejor. Los métodos numéricos pueden facilitar la realización de proyectos y proporcionar mejores resultados a un precio más económico. En este trabajo, presentamos un análisis mediante el método de los elementos finitos de algunas soluciones constructivas para la determinación del índice de reducción vibracional con y sin suelos flotante.

Palabras-clave: transmisión por flancos, aislamiento acústico, factor de pérdidas por acoplo, elementos finitos

1. INTRODUCCIÓN

El método reconocido más habitual para valorar acústicamente la transmisión por flancos es el de cuantificar el índice de reducción vibracional. Actualmente se puede obtener mediante el uso de fórmulas empíricas reconocidas para ciertas soluciones constructivas para un conjunto limitado de diseños rígidos o con elementos elásticos insertados. Esto se ha recogido en el DB-HR del CTE [1] que referencia las normas UNE-EN 12354 [2-4] 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 [5], 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.

En este trabajo se realiza un estudio mediante el método de los elementos finitos, de diferentes configuraciones en Cruz y en T, comparando las mismas situaciones con las expresiones empíricas que se señalan en la UNE-EN 12354-1, con el fin de poder comparar los resultados con lo que marcan las fórmulas predictivas, a través de la simulación del proceso de medición, intentando valorar y comprobar diferentes hipótesis que se realizan en la 12354-1.

2. CONCEPTOS

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. 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 y 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) y 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 10848-1, 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. Para la obtención de la diferencia de velocidades la norma marca una serie de limitaciones geométricas.

La determinación de la diferencia de velocidades junto con el tiempo de reverberación estructural es el primer paso la obtención de K_{ij} in situ. La normativa correspondiente para la determinación de la diferencia de velocidades exige unas condiciones de acoplamiento entre los elementos que forman la unión, si estas condiciones no se cumplen, los datos obtenidos de las mediciones in situ no son representativas de la distribución de energía entre dichos elementos, no siendo válidas para la obtención del índice de reducción vibracional.

Así, debido a la dependencia de la precisión de los datos de entrada en las ecuaciones empíricas, 12354-1:2004 y debido a lo comentado anteriormente sobre las mediciones in situ, 10848, se debe pensar en la simulación numérica como una herramienta para la caracterización de los elementos de construcción, y poder así estudiar su comportamiento acústico.

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 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 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.

3. DESCRIPCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

El método de los elementos finitos es muy conocido [6,7] y no corresponde a este trabajo una descripción completa del mismo. Nos limitamos a los datos más relevantes.

El modelo en elementos finitos de Ansys tiene 5727 elementos (con elementos sólidos 3D de 20 nodos de alto orden que presentan comportamiento de desplazamiento cuadrático y tres grados de libertad por nodo: traslación in las direcciones nodales x, y y z). Los materiales se han modelado con comportamiento lineal y factor de pérdidas constante. El tamaño de los elementos se rellena si es menor que una decimal parte de la longitud de onda. En cuanto a las condiciones de contorno, se ha forzado que todos los nodos localizados en ambos extremos del modelo tengan tres grados de libertad. Para dar cuenta de la complejidad del modelo basta decir que para uniones en cruz se tienen 29,808 nodos y $3 \times 29808 = 89424$ grados de libertad. Los elementos utilizados son del tipo *Brick*, anudados en las esquinas y centros de cada borde. En la Figura 1 se pueden observar los modelos simulados de la unión en Cruz y unión en T.

Además de los modelos anteriores y con el fin de comparar los resultados obtenidos con estos con el caso en el que se interpone una lámina flexible, dos nuevos modelos han sido implementados, uno por cada una de las uniones bajo estudio. Algunos detalles del mallado empleado para esos modelos se muestran en la Figura 2.

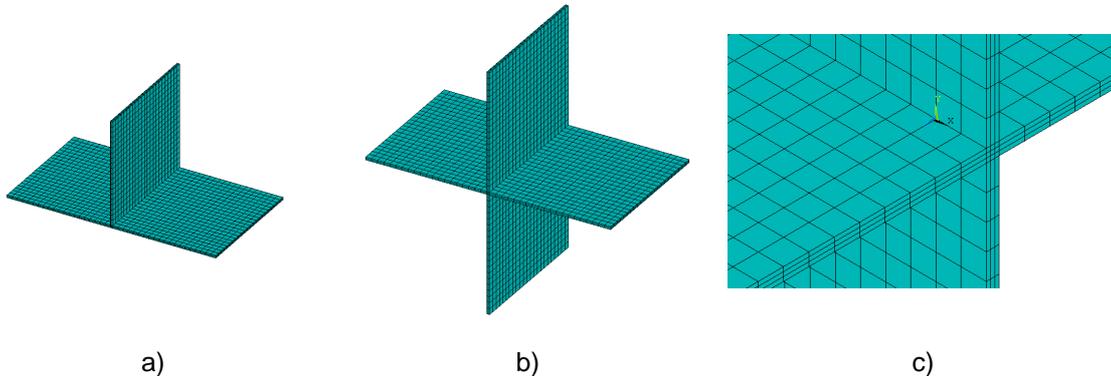


Figura 1. a) Unión en T. b) Unión en Cruz. c) Detalle del modelo.

Como se muestra en la figura superior, la lámina flexible no está ubicada como se especifica en [1] (Anexo E), dado que no existen ecuaciones estimadas para este tipo de uniones en las que la lámina no cubre la unión entera extendiéndose por toda la superficie del suelo (obviamente, las ecuaciones del índice de reducción de presión sonora de [2], Anexo C, no son directamente aplicables cuando se evalúa el K_{ij}).

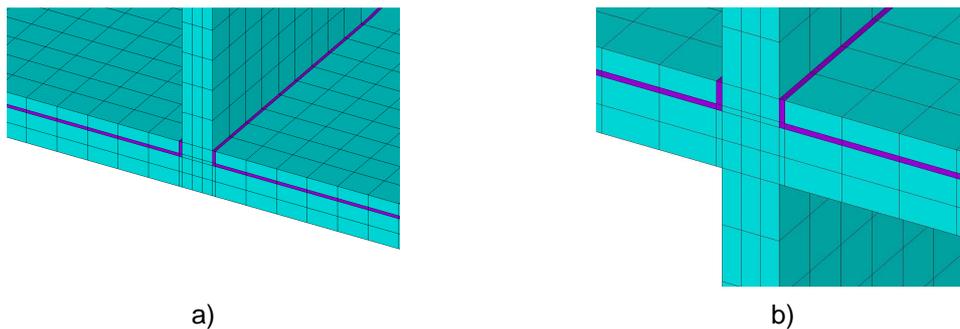


Figura 2. Modelos con lámina flexible. a) Unión en T. b) Unión en Cruz.

Para realizar un acercamiento al problema, se propone intentar simular las condiciones de la norma 10848, respecto a la colocación de fuentes de excitación y transductores de medida y respecto al tamaño de las muestras. Se han simulado materiales de 2400 kg/m^3 de densidad, $32 \cdot 10^9 \text{ Pa}$ de módulo de Young y 0,22 de coeficiente de Poisson. Los espesores simulados son de 10 y 20 cm y el factor de pérdidas interno de 0,01.

Se aplica una fuerza constante en el margen de frecuencias considerado de 1 N en distintos puntos y se obtiene, mediante la simulación en elementos finitos, las velocidades en distintos puntos. Las distancias entre los puntos de aplicación de las fuerzas y entre los puntos de registro siguen el espíritu de la normativa.

A partir de las simulaciones, se obtiene el valor de las velocidades en diferentes posiciones i, j . Con estos datos, se obtiene el promedio según la norma y se obtiene el primer término de la expresión (1).

Para la obtención del tiempo de reverberación estructural, se sigue la siguiente expresión, dada por la 12354-1:

$$T_s = \frac{2,2}{f\eta_{TOT}} \quad (3)$$

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

$$\eta_{TOT} = \eta_{int} + \frac{m}{485\sqrt{f}} \quad (4)$$

siendo m la masa por unidad de área. La fórmula es válida, según la UNE-EN 12354-1, para $m < 800 \text{ kg/m}^2$.

4. RESULTADOS

4.1 Kij numérico para uniones en T

Los primeros resultados que se muestran son los obtenidos para uniones en T. Habiendo calculado las diferencias de nivel de velocidad como un promedio de varios puntos de fuente y de sensores y cumpliendo con las restricciones más relevantes, se obtiene el índice de reducción vibracional para la transmisión por flancos y se compara con los de la norma. En la Figura 3 se presentan los resultados para el caso de unión rígida simple.

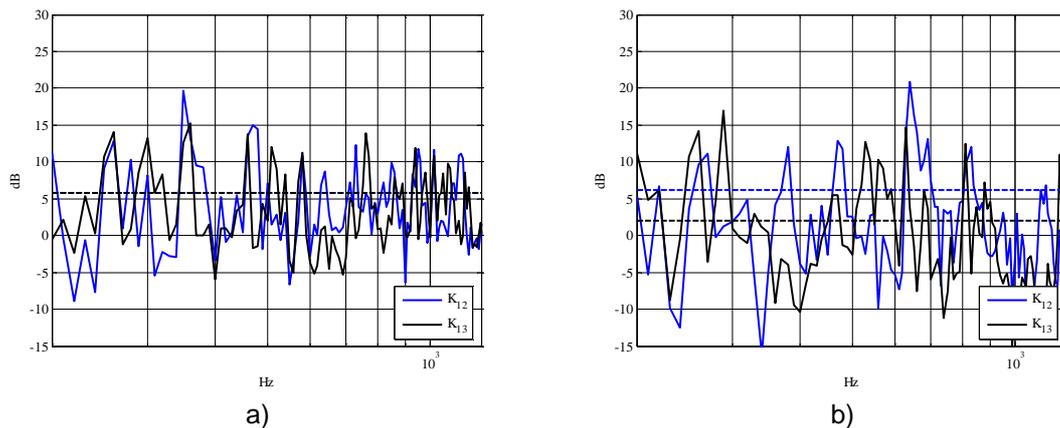


Figura 3. Índice de reducción vibracional K_{ij} para uniones rígidas en T (continua = numérica, discontinua = UNE-EN 12354). a) $M=0$. b) $M \neq 0$.

Los resultados obtenidos para el caso de los modelos con lámina flexible se muestran en la Figura 4.

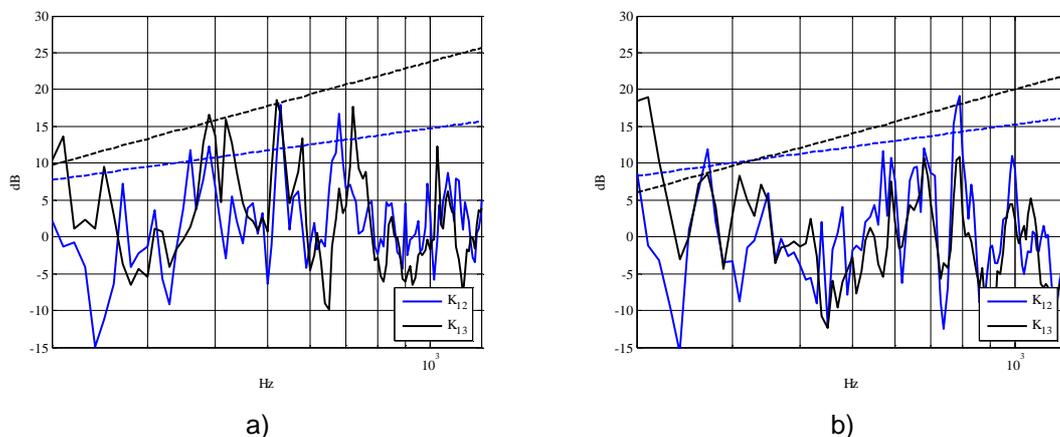


Figura 4. Índice de reducción vibracional K_{ij} para uniones rígida en T con lámina flexible (continua = numérica, discontinua = UNE-EN 12354). a) $M=0$. b) $M \neq 0$.

4.2 Kij numérico para uniones en Cruz

A continuación se presentan los resultados correspondientes a las uniones en Cruz. En la Figura 5 se presentan los resultados para el caso de unión rígida simple.

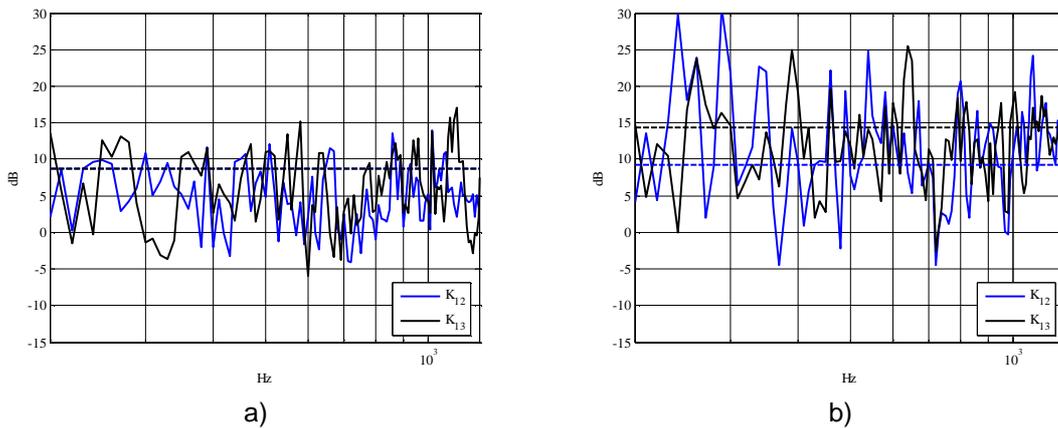


Figura 5. Índice de reducción vibracional K_{ij} para uniones rígidas en Cruz (continua = numérica, discontinua = UNE-EN 12354). a) $M=0$. b) $M\neq 0$.

Los resultados obtenidos para el caso de los modelos con lámina flexible se muestran en la Figura 6.

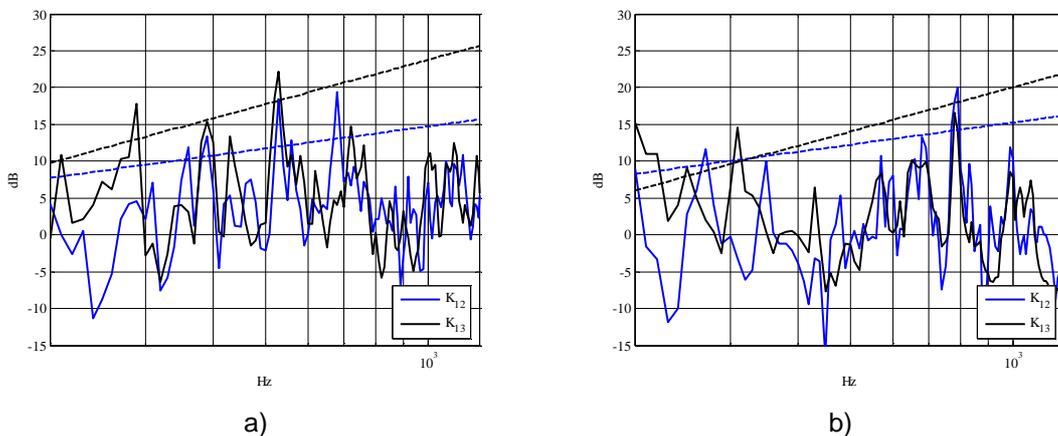


Figura 7. Índice de reducción vibracional K_{ij} para uniones rígida en Cruz con lámina flexible (continua = numérica, discontinua = UNE-EN 12354). a) $M=0$. b) $M\neq 0$.

Debe resaltarse el hecho de que, tanto para el caso de uniones rígidas simples (en T o en Cruz) como con lámina flexible, algunos de los valores del índice de reducción vibracional son menores que el $K_{ij_{min}}$ especificado en [1], y por tanto, deben ser despreciados.

5. DISCUSIÓN

Nos centraremos exclusivamente en uniones rígidas. Con el fin de hacer converger los resultados de las simulaciones y las ecuaciones empíricas de la UNE-EN 12354, se

propone un ajuste del primero de ellos. Asumiendo que los elementos i y j que forman parte de la unión evaluada tiene una longitud de absorción equivalente $l_{ij} = 4.5$ m y la misma superficie $S = 16$ m², se define un “factor de acoplamiento” τ que relaciona los factores de pérdidas totales de los elementos i y j de la forma $\tau = \eta_i/\eta_j$. La expresión resultante para el K_{ij} sería:

$$K_{ij} = Dv_{ij} - 5\log(10.47\tau\eta_i f) \quad (5)$$

donde se realizan las sustituciones apropiadas ($c_0 = 340$ m/s, $f_{ref} = 1000$ Hz). Evaluando la expresión anterior para diferentes valores de τ en un flanco de transmisión de la unión en Cruz, donde se asume un valor de $\eta_j=0.01$, puede apreciarse la relación inversa entre el parámetro τ y el K_{ij} resultante (para ello se realiza un ajuste lineal de dichas curvas, siendo $\tau=3.3$ el ajuste que más se aproxima a la norma).

Sin embargo, a diferencia de los modelos con lámina flexible, la norma no considera la dependencia con la frecuencia en uniones rígidas, por lo que se necesita un análisis más exhaustivo. Para llevar éste a cabo, se añade un término T dependiente de la frecuencia a la ecuación (9), quedando:

$$K_{ij} = Dv_{ij} - 5\log(10.47\tau\eta_i^2 f) - T \quad (6)$$

este término “logarítmico” T puede introducirse en el segundo término de la expresión (10) como kf (siendo k una variable dependiente de la frecuencia), quedando:

$$K_{ij} = Dv_{ij} - 5\log(10.47k\tau\eta_i^2 f^2) \quad (7)$$

Por lo tanto, reemplazando los valores de τ y η_j que mejor se ajustan a la norma y dando valores a k para corregir la dependencia con la frecuencia, se consigue la convergencia entre la norma y las simulaciones. La curva k obtenida para el caso descrito se muestra en la Figura 8.

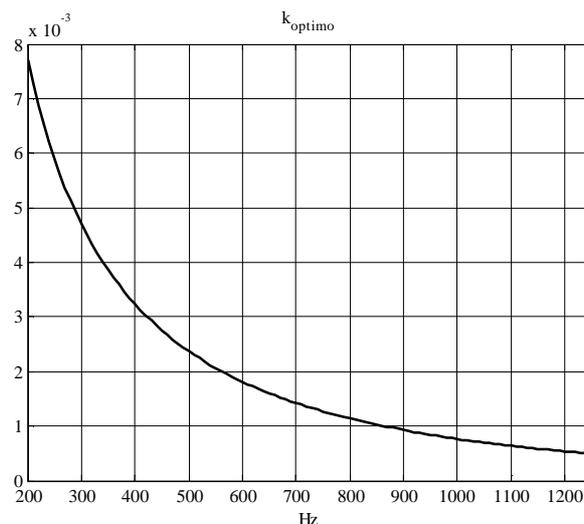


Figura 8. Curva k

De igual modo, para conseguir resultados similares para uniones con láminas flexibles, deberían llevarse a cabo en ese caso ajustes exponenciales de las curvas de los K_{ij} .

6. CONCLUSIONES

Se han presentado una serie de modelos 3D en elementos finitos para la determinación del índice de reducción vibracional en diferentes soluciones constructivas. Se muestran los resultados para uniones en T y en Cruz, con y sin lámina flexible intermedia.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ministerio de Ciencia e Innovación la financiación del proyecto cuya referencia es BIA2010-17723, en el contexto del cual se ha realizado este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] 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
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] ISO 10848-parts 1, 2 and 3. Laboratory measurement of the flanking transmission of airborne and impact sound between adjoining rooms.
- [6] C. Zienkiewicz, *El método de los elementos finitos*, Ed. Reverté, (1982)
- [7] *ANSYS theory reference 8.1*, ANSYS Inc, (2003).