

SIMULACIÓN POR EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS DE LA TRANSMISIÓN DEL SONIDO EN EDIFICIOS

PACS: 43.40.At

Magdaleno Martín, Jesús; Martín Bravo, M^a Ángeles; García Terán, José M^a
Escuela de Ingenierías Industriales. Universidad de Valladolid
C/ Francisco Mendizábal nº 1
47014 Valladolid
Tel.: 34 983 423 500
Fax: 34 983 423 490
magdal@uva.es

ABSTRACT

This paper analyzes some of the latest works published in the field of vibro-acoustic simulation in buildings by using finite element method, mainly in impact sound transmission. Also, some applications of the finite element method in vibro-acoustic evaluation of sound transmission in buildings are exposed. The use of finite element software in this field has important advantages since it facilitates the performance of projects and provides good results at a lower price and shorter completion period.

RESUMEN

En esta comunicación se analizan algunos de los últimos trabajos publicados en el campo de la aplicación del método de los elementos finitos en vibro acústica en edificios, sobre todo en la simulación de la transmisión del ruido de impactos. También se presentan algunas aplicaciones del método de los elementos finitos en el cálculo vibro acústico de la transmisión del sonido en edificios. El uso de programas de elementos finitos en este campo presenta importantes ventajas, ya que facilita la realización de proyectos y proporciona buenos resultados a un precio más económico y un plazo de realización más corto.

1. INTRODUCCIÓN

El diseño y construcción de edificios con un comportamiento acústico adecuado es una tarea a la que se están dedicando muchos esfuerzos en investigación. Esto indica que existen problemas sin resolver en este campo, algunos de los cuales se mencionarán en esta comunicación, aunque uno de los principales puede ser la falta de eficiencia y precisión de los modelos de predicción disponibles [1-2].

La predicción precisa del comportamiento acústico de los edificios y sus componentes es una línea abierta de investigación hacia la construcción eficiente. Los modelos de cálculo que presenta la normativa actual no son todo lo precisos que sería deseable [3], lo que puede llevar a que un número significativo de viviendas puedan estar incumpliendo la normativa vigente [4]. En la actualidad, los ensayos resultan especialmente costosos, con equipo altamente especializado, y alargan mucho el tiempo de desarrollo de nuevas soluciones constructivas. En este contexto, el disponer de modelos virtuales fiables supone un importante ahorro que puede

hacer posible extender la construcción eficiente. La aplicación de simulaciones en otras áreas ha demostrado ser un factor clave en su desarrollo (automoción, aeronáutica, naval...). Es muy importante desde el punto de vista práctico poder realizar simulaciones con distintas soluciones constructivas y hacerlo todo con fiabilidad y rapidez.

El método de los elementos finitos (MEF) es una herramienta ampliamente utilizada en ingeniería para simular algunos fenómenos físicos cuando la resolución analítica no es abordable, por ejemplo por la complejidad geométrica del problema. Una referencia clásica sobre los fundamentos del MEF es [5]. Entre las principales ventajas del MEF puede destacarse que disminuye (aunque no evita) el número de ensayos necesarios durante el diseño de un producto (entendido este término en un sentido amplio). Por ejemplo, en automoción es una herramienta indispensable en el proceso de diseño, disminuyendo la necesidad de ensayos en prototipos y, como consecuencia, acortando el tiempo de desarrollo de los componentes y abaratando los costes.

El uso del MEF para la simulación del comportamiento acústico de los edificios permite analizar la mayoría de las variables y condiciones de contorno, pudiendo conseguir resultados fiables en ciertas aplicaciones [3]. Sin embargo, su empleo en este campo aún no ha alcanzado la madurez que ha conseguido en otros ámbitos, por lo que existen varios equipos de investigación, y proyectos con la colaboración de empresas, que trabajan en su utilización.

2. APLICACIONES DEL MEF EN VIBRO ACÚSTICA EN EDIFICIOS

A continuación se citan algunos casos de aplicaciones del MEF en vibro acústica, como muestra de la actividad desarrollada en este campo. No pretende ser una relación exhaustiva, sino adaptada al contexto de esta publicación. Por ejemplo, en el marco de Tecnicacústica, Gerges [6] analizó el estado del arte para la solución de problemas vibro acústicos por métodos numéricos como el MEF, el método de los elementos de contorno (BEM, Boundary Element Methods) y otros. En este análisis se incluían también casos prácticos.

Hopkins [7-8] estudia la transmisión de vibraciones entre placas con y sin aberturas, usando el MEF y el análisis estadístico de energía (SEA, Statistical Energy Analysis). En su estudio demuestra que los modelos según el MEF proporcionan suficiente precisión. Posteriormente el mismo autor recoge varias de sus aportaciones en [9], utilizando el MEF para calcular las frecuencias y formas modales de construcciones complejas.

En algún caso también se utiliza el MEF para validar resultados de otros métodos. Pagán [10] utiliza el MEF para validar un estudio sobre el comportamiento acústico de suelos ligeros realizado con el Waveguide Finite Element Method (WFEM). En esta tipología estructural la normativa no recoge de forma adecuada la percepción de molestia ocasionada por caída de cuerpos, pasos u otras fuentes, específicamente en estructuras de madera.

Ramis et al. en 2012 [2] evalúan el índice de reducción de vibración (K_{ij}) en uniones estructurales usando como referencia la norma EN 12354, presentando una metodología simple para estimar la diferencia entre las predicciones de la normativa y las obtenidas por el MEF con modelos 3D. En [3] Segovia et al. presentan un análisis, mediante el método de los elementos finitos, de algunas soluciones constructivas para la determinación de K_{ij} , con y sin suelos flotantes, para uniones en T. Del Rey et al. en 2010 [11] usaron el método de los elementos finitos para el estudio de las transmisiones laterales a través de K_{ij} , para el caso de soluciones constructivas con suelos flotantes con modelos en 2 dimensiones (2D) de unión en cruz y en T.

El disponer de una herramienta de predicción fiable y válida permite realizar estudios sobre las variables que afectan al comportamiento acústico. Seo en 2012 [12] calcula la reducción de las

vibraciones por impacto en suelos en forjados de edificios de apartamentos construidos con hormigón armado. Consideró tres tipos de modelos de elementos finitos con diferentes formas y condiciones de contorno. Los resultados mostraron que un modelo 2D simple puede predecir adecuadamente la vibración el suelo, además de que las características de los ruidos de impacto en el suelo están estrechamente relacionadas con las vibraciones de este. A partir de los resultados pudo realizar un proceso de optimización de las dimensiones del salón utilizando el método estadístico de Taguchi, consiguiendo reducir un 40% el nivel de aceleración máximo.

En cuanto a problemas con interacción fluido estructura, Arjunan [1] estudia el comportamiento acústico de un muro de doble hoja con uniones estructurales con modelos en 2D con deformación plana, calculando el índice de reducción acústica (R). El uso de modelos 2D para resolver problemas en tres dimensiones (3D) en este tipo de aplicaciones acústicas, fue introducido por Del Coz [13]. Este autor estudió la pérdida de transmisión (TL) a través de un muro de bloques de hormigón ligero en un rango de frecuencias amplio (de 100 a 5000 Hz). Ambos trabajos utilizan como referencia las correspondientes ediciones nacionales de las normas EN ISO 140 y EN ISO 717.

Poblet-Puig [14] utiliza el MEF para el cálculo del índice de reducción acústica (R) de una pared doble en el rango de las frecuencias bajas. Las curvas de índice de reducción acústica, utilizando modelos 2D y 3D, fueron similares [15].

Una aplicación en suelos laminados puede encontrarse en el trabajo de Gadea [16]. Utiliza un modelo numérico 2D, combinando del MEF y el método de las diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD), para simular la interacción fluido estructura entre el suelo laminado y el aire circundante. El resultado de este método proporciona la distribución de presiones sonoras según el material intercalado. El estudio también se realiza en 3D [17]. A través de la simulación numérica es posible determinar la calidad acústica de cada combinación de materiales.

3. RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DEL MEF EN EL ANÁLISIS VIBRO ACÚSTICO DE FORJADOS

Se han analizado dos tipos de forjados: un forjado de hormigón (HWF, Heavyweight floor) y un forjado ligero de madera (LWF, Lightweight floor). Las características de los materiales se indican en la Tabla 1.

Tabla 1: Características de los materiales de los forjados.

	HWF	LWF – Tablero	LWF - Vigas
Tipo de material	Hormigón	Madera aglomerada	Kerto
Módulo de Young (MPa)	26.000	3.400	4.400
Coefficiente de Poisson	0,2	0,4	0,4
Densidad (kg/m ³)	2.300	710	560

Las dimensiones son de 4 m por 2,465 m. En el caso del forjado de hormigón, el canto es de 0,3 m. Todo del contorno tiene impedidos los movimientos.

En la Tabla 2 pueden observarse las frecuencias propias del forjado HWF con modelos 3D y 2D. Como se puede observar, los resultados son similares por lo que, para esta aplicación, estaría justificado usar un modelo 2D, que requiere menos tiempo y esfuerzo de computación. En la Figura 1, como ejemplo, se observa el modo 7 (594-604 Hz) para esos mismos modelos, confirmando la similitud entre los dos resultados. También pueden apreciarse las mallas utilizadas. En la Figura 2 puede verse la respuesta en frecuencia debida a una carga puntual unitaria en el punto P1, situado en la misma posición que en el forjado LWF (Fig. 3).

Tabla 2: Forjado HWF: Frecuencias de los modelos 3D y 2D.

Modo	HWF - 3D	HWF - 2D	Modo	HWF - 3D	HWF - 2D
1	186	185	8	605	605
2	264	266	9	733	732
3	393	397	10	735	742
4	425	427	11	736	752
5	489	494	12	751	764
6	558	567	13	788	799
7	594	604	14	821	822

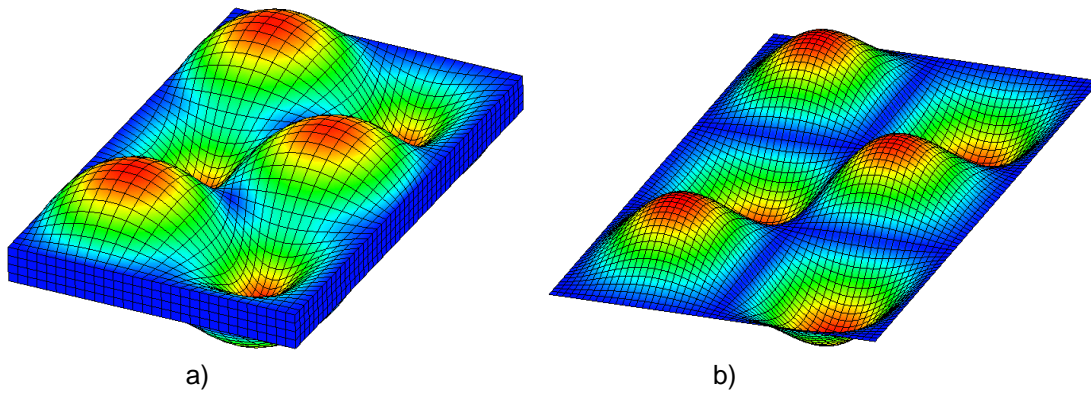


Figura 1: Forjado HWF: Modo 7 de los modelos a) 3D y b) 2D.

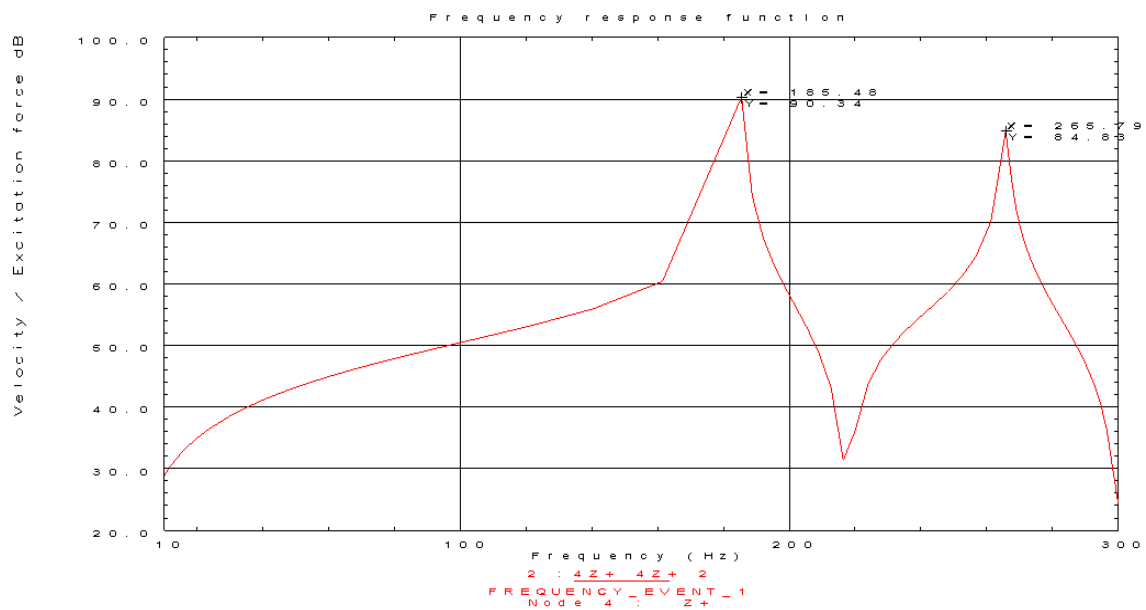


Figura 2: Forjado HWF 2D: Respuesta a una carga puntual unitaria en el punto P1.

El forjado LWF, compuesto de un tablero horizontal de madera aglomerada y vigas de madera microlaminada, se ha mallado como se muestra la Figura 3. En la Figura 4 se muestra el primer modo de vibración y en la Figura 5 se cuantifica la respuesta en frecuencia a una carga puntual unitaria en el punto P1. Un análisis detallado, que no es objeto de esta comunicación, puede valorar el diferente comportamiento acústico de ambas soluciones estructurales. Por ejemplo, se observa que el forjado LWF responde a frecuencias menores que el forjado HWF.

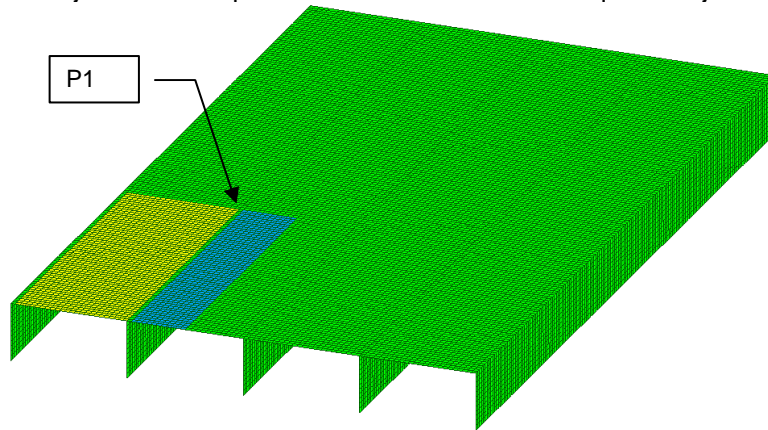


Figura 3: Forjado LWF con la posición del punto de aplicación de la carga unitaria.

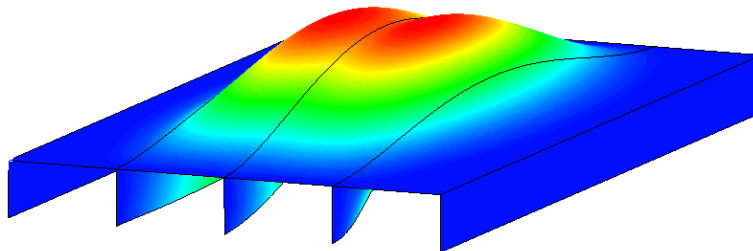


Figura 4: Forjado LWF: Modo 1.

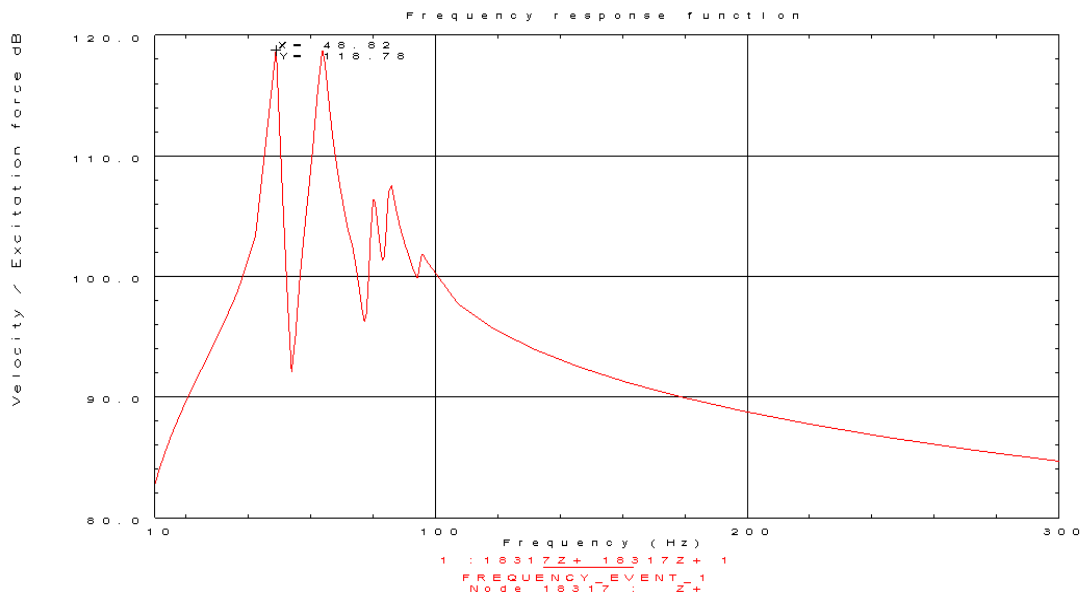


Figura 5: Forjado LWF: Respuesta a una carga puntual unitaria en el punto P1.

4. RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DEL MEF EN EL ANÁLISIS VIBRO ACÚSTICO DE MODELOS 2D

La elección del modelo 2D adecuado no siempre es directa. En la Figura 6 se muestran dos posibles modelos 2D de una unión en T. Cada uno de ellos tiene unas características que lo hacen adecuado para ciertos tipos de estudios y suponen unas limitaciones para otros. La explicación se sale del objetivo de esta comunicación, pero, la elección de una u otra modelización será una decisión crítica para aplicación de las posibles condiciones de contorno y para los resultados obtenibles. Por ejemplo, los modelos representados a la izquierda pueden recoger mejor la variación en el sentido del espesor. Los modelos representados a la derecha son láminas que pueden recoger mejor variaciones en profundidad (perpendicular a la T).

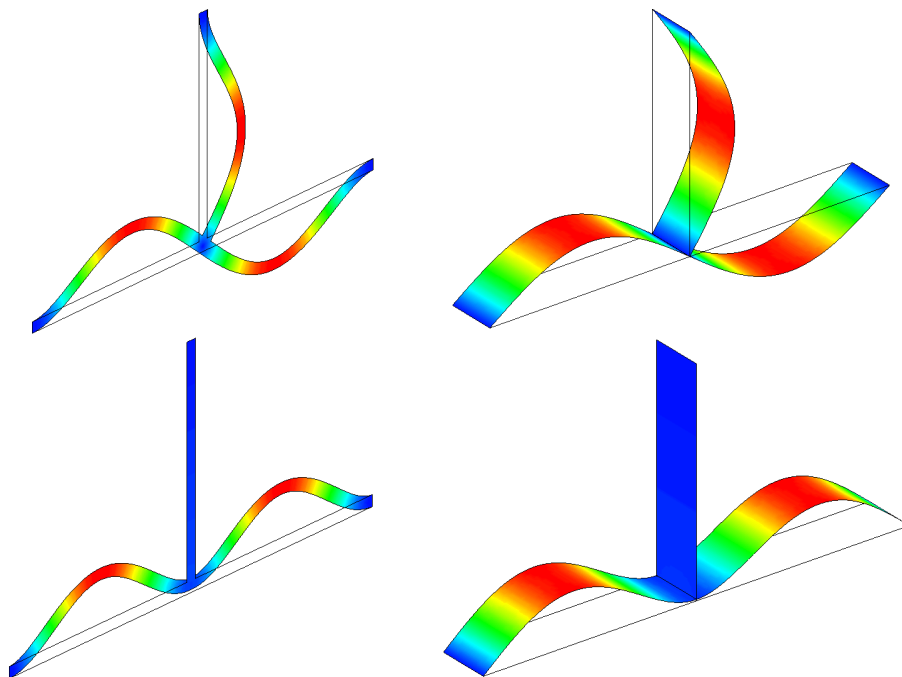


Figura 6: Ejemplos de diferentes modelos 2D de una unión en T.

En la Figura 7 se observa el efecto de una abertura en un muro sobre los modos de vibración. La potencia del MEF en el cálculo de geometrías complejas puede ser muy útil para evaluar el comportamiento en casos que no sean simples o en otros casos particulares.

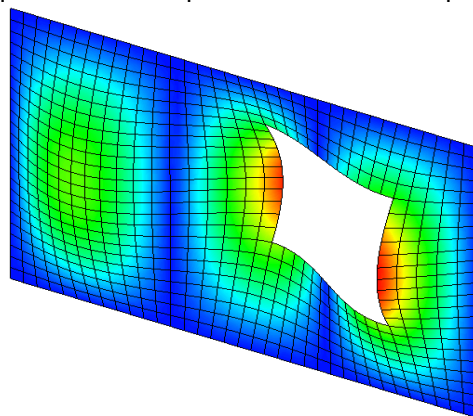


Figura 7: Ejemplo de modelo 2D de una pared con abertura.

5. CONCLUSIONES

Del análisis del estudio realizado sobre la aplicación del MEF y, sobre todo, la evolución que ha experimentado su aplicación en el campo de la acústica arquitectónica, podemos extraer las siguientes conclusiones:

- El MEF es una herramienta cada vez más usada en ingeniería, permitiendo aproximaciones más fiables al comportamiento real de las soluciones de diseño adoptadas.
- El uso del MEF para la simulación del comportamiento acústico de los edificios permite analizar la mayoría de las variables (materiales, dimensiones, formas constructivas...) pudiendo conseguir resultados fiables y relativamente rápidos.
- Su aplicación al cálculo de las transmisiones indirectas en edificios facilita la realización de proyectos y proporciona resultados a un precio económico y en un plazo de realización más corto. Disponer de modelos virtuales fiables supone un importante ahorro que puede hacer posible extender la construcción eficiente.
- En algunas aplicaciones, los modelos 2D pueden dar suficiente información sobre el comportamiento acústico.
- La elección del modelo 2D adecuado no siempre es directa. Algunas de las decisiones sobre el modelo de cálculo adoptado necesitan ser analizadas por equipos de investigación. La aplicación en acústica arquitectónica aún no ha alcanzado la madurez que ha conseguido en otros ámbitos.

REFERENCIAS

- [1] Arjunan, A., Wang, C. J., Yahiaoui, K., Mynors, D. J., Morgan, T., & English, M. (2013). Finite element acoustic analysis of a steel stud based double-leaf wall. *Building and Environment*, 67(0), 202-210.
- [2] Ramis, J., Segovia, E., Alba, J., Carbajo, J., & Godinho, L. (2012). Numerical evaluation of the vibration reduction index for structural joints. *Archives of Acoustics*, 37(2), 189-197.
- [3] Segovia, E., Carbajo, J., Godinho, L., Ramis, J., & Alba, J. (2012). Evaluación numérica de los índices de reducción vibracional en uniones en T. *ACUSTICA 2012. VIII Congreso Iberoamericano De Acústica, VII Congreso Ibérico De Acústica, 43º Congreso Español De Acústica -TECNIACUSTICA 2012- y EAA European Symposium on Environmental*.
- [4] Artís, P., García, C., Guasch, O., Janer, M., Rodríguez, P. V., Magrans, F., et al. (2011). Análisis experimental y simulación numérica de las vías de transmisión del ruido y vibraciones en edificación. proyecto vitraso. *42º Congreso Español De Acústica Encuentro Ibérico De Acústica. European Symposium on Environmental Acoustics and on Buildings Acoustically Sustainable*.
- [5] Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., Bugeda, G., Cervera, M., & de Navarra, Eugenio Oñate Ibáñez. (2004). *El método de los elementos finitos*, CIMNE.
- [6] Gerges, Samir N.Y. (2000). Estado da arte para solução dos problemas vibroacústica por métodos numéricos. *Acústica 2000, II Congreso Iberoamericano de Acústica. XXXI Congreso Nacional de Acústica -Tecnicaústica 2000-. II Congreso Ibérico de Acústica. II Jornadas Iberoamericanas de Acústica. EAA Symposium on Architectural Acoustics*.

- [7] Hopkins, C. (2003). Vibration transmission between coupled plates using finite element methods and statistical energy analysis. part 1: Comparison of measured and predicted data for masonry walls with and without apertures. *Applied Acoustics*, 64(10), 955-973.
- [8] Hopkins, C. (2003). Vibration transmission between coupled plates using finite element methods and statistical energy analysis. part 2: The effect of window apertures in masonry flanking walls. *Applied Acoustics*, 64(10), 975-997.
- [9] Hopkins, C. (2007). *Sound insulation*, Elsevier.
- [10] Pagán Muñoz, R. (2011). *Study of the acoustical performance of lightweight floors*.
- [11] Del Rey, Romina; Alba, Jesús; Ramis, Jaime & Escuder, Eva (2010). Aplicación del método de los elementos finitos para la simulación de las transmisiones por flanco en uniones con suelos flotantes. *Información Tecnológica*, Vol. 21(6), 67-78 (2010) Doi:10.1612/inf.Tecnol.4398it.09, Retrieved from <http://hdl.handle.net/10251/6882>
- [12] Seo, S. H., Yoo, S. Y., & Jeon, J. Y. (2012). An optimized floor design for heavy-weight impact vibration reduction in apartment buildings. *Noise Control Engineering Journal*, 60(5), 539-547.
- [13] Del Coz Díaz, J. J., Álvarez Rabanal, F. P., García Nieto, P. J., & Serrano López, M. A. (2010). Sound transmission loss analysis through a multilayer lightweight concrete hollow brick wall by FEM and experimental validation. *Building and Environment*, 45(11), 2373-2386.
- [14] Poblet-Puig, J., & Rodríguez Ferran, A. (2005). Dos ejemplos de aplicación de métodos numéricos en la modelización de la transmisión de ruido en edificación. *36º Congreso Nacional De Acústica (Tecnacústica 05), Encuentro Ibérico De Acústica y EAA Symposium-Terrassa*. Octubre, 2005
- [15] Poblet Puig, J. (2008). *Numerical modelling of sound transmission in lightweight structures*.
- [16] Gadea Borrell, J., Segura Alcaraz, J., Vera Guarinos, J., Francés Monllor, J., Alba Fernández, J., & Carbajo Sanmartín, J. (2008). Contribución a la evaluación acústica de suelos laminados. *Acústica 2008: V Congreso Ibérico De Acústica, 39º Congreso Español De Acústica -Tecnacústica'08-, Symposium Europeo De Acústica*.
- [17] Gadea Borrell, J. M. (2009). *Estudio del comportamiento acústico de recubrimientos de suelo derivados de la madera*. Universidad Politécnica de Valencia (Spain).