

## APLICACIONES DEL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS EN LA TRANSMISIÓN ESTRUCTURAL DEL SONIDO EN EDIFICIOS

PACS: 43.40.At

Martín Bravo, M<sup>a</sup> Ángeles; Magdaleno Martín, Jesús; García Terán, José M<sup>a</sup>; Tarrero Fernández, Ana Isabel  
Escuela de Ingenierías Industriales. Universidad de Valladolid  
C/ Francisco Mendizábal n<sup>o</sup> 1  
47014 Valladolid  
Tel.: 34 983 423 500  
Fax: 34 983 423 490  
maruchi@eii.uva.es

### ABSTRACT

This work includes some applications of the finite elements method for evaluating structural sound transmission in buildings, with validation and verification processes analysis. The vibration reduction index is calculated for a rigid cross-joint, and the influence of some parameters is reviewed, as the excitation force, the use of acceleration or velocity as measured data, the thickness and the loss factor. The impact sound transmission is calculated with two-dimensional and three-dimensional models, obtaining similar results in both cases.

### RESUMEN

En este trabajo se incluyen algunas aplicaciones del método de los elementos finitos en la evaluación de la transmisión estructural del sonido en edificios, con un análisis de los procesos de verificación y validación. Se ha calculado el índice de reducción de vibraciones de una unión en cruz vertical y la transmisión del ruido de impacto en suelos, evaluando en el primer caso la influencia de diversos parámetros en los modelos utilizados, como la fuerza de excitación, la obtención de valores en aceleración y velocidad, los espesores y el factor de pérdida. En el segundo caso, los modelos con elementos bidimensionales obtienen resultados similares a los que utilizan elementos tridimensionales.

### 1. INTRODUCCIÓN

Las simulaciones computacionales en ingeniería están más presentes cada día. En el campo de la vibroacústica en edificios aún no se aplican estas herramientas con la misma intensidad que en otros campos, como en automoción o aeronáutica. Algunos de los problemas que se presentan están relacionados con la falta de eficiencia y precisión de los modelos de predicción utilizados hasta ahora.

Los modelos de cálculo computacionales pueden ayudar a mejorar la predicción del comportamiento acústico en servicio de los edificios, facilitando el cumplimiento de la normativa, y mejorando la calidad de vida. También pueden mejorar la fiabilidad y rapidez en el

desarrollo de nuevos productos, disminuyendo la necesidad de ensayos que resultan especialmente costosos, con equipos altamente especializados, y que alargan mucho el tiempo de desarrollo de nuevas soluciones constructivas.

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. 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 Código Técnico de la Edificación, y en particular el documento sobre protección frente al ruido (DB HR), ha supuesto un avance cualitativo, con requisitos de aislamiento acústico en la edificación final (aislamiento acústico in situ). Proporciona nuevos métodos de predicción, incluyendo la transmisión por flancos, pero aún existen problemas de falta de eficiencia y precisión de los modelos disponibles [1], [2], [3] y [4].

Algunas aplicaciones del MEF para evaluar la transmisión acústica del sonido en edificios se recogen en [5], como por ejemplo Hopkins [6] y [7], que 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 [8], utilizando el MEF para calcular las frecuencias y formas modales de construcciones complejas.

En este trabajo se incluyen algunas de las aplicaciones del método de los elementos finitos en la evaluación de la transmisión estructural del sonido en edificios, relacionadas sobre todo con las transmisiones por flancos, como el cálculo del índice de reducción vibracional, y la simulación de la transmisión del ruido de impactos. Se incide en la necesidad de incluir procesos de verificación y validación de los modelos utilizados y se evalúa la influencia de diversos parámetros sobre los resultados.

## **2. VERIFICACIÓN Y VALIDACIÓN**

Los métodos computacionales de cálculo necesitan herramientas para evaluar la fiabilidad y precisión de sus resultados. La verificación y la validación son los principales métodos y procedimientos usados con este fin, valorando las limitaciones, las debilidades y la incertidumbre de las simulaciones [9] y [10].

La verificación es el proceso para evaluar la correcta programación del código de cálculo y de las rutinas asociadas al modelo matemático adoptado. Por ejemplo evalúa si, entre los miles de líneas de programación, existen errores que puedan hacer que los resultados no reproduzcan el modelo matemático conceptual pretendido, o que no lo hagan con la precisión esperada. En este sentido, los resultados computacionales se comparan con resultados de modelos analíticos conocidos que adoptan una simplificación de la realidad. También pueden compararse con resultados de otros programas de simulación.

La validación es el proceso por el cual se determina la precisión de los resultados de la simulación en relación con un modelo físico experimental. Se trata de demostrar la precisión de la simulación en relación con la realidad física, usando geometrías y condiciones realistas.

La Figura 1, basada en [11], [12] y [13], representa un esquema de lo indicado en los párrafos anteriores. La realidad física, percibida mediante la experimentación, requiere de una modelización para ser representada mediante modelos matemáticos (modelización), considerando solamente las variables que tienen una influencia significativa sobre el fenómeno que se esté considerando. El tratamiento computacional requiere de la programación en lenguaje informático de los códigos necesarios para su ejecución, comprobando su adecuada

implementación mediante el proceso de verificación. Los resultados obtenidos por los modelos computacionales pretenden representar una cierta realidad física, por lo que debemos comprobar si, efectivamente, se ha conseguido en un grado suficiente, mediante la validación.

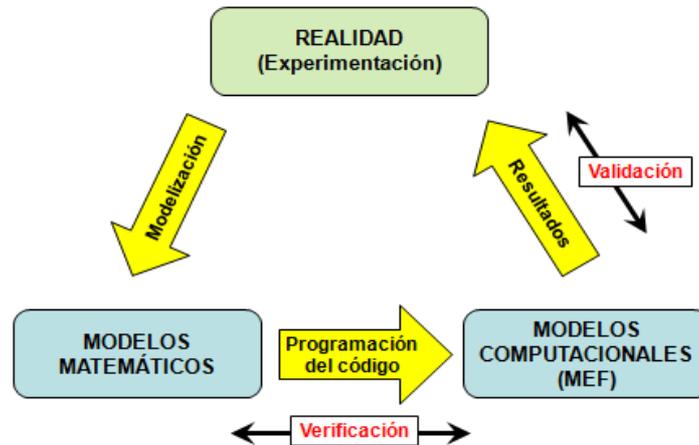


Figura 1: Procesos de verificación y validación.

Como referencia para estos procesos, desde hace más de veinte años la “International Association of the Engineering Modelling, Analysis and Simulation Community” (NAFEMS), organización sin ánimo de lucro e independiente, ha desarrollado test de verificación y validación (Benchmarks) [14]. Aunque los principales códigos comerciales de cálculo por el MEF han desarrollado sus propios problemas de verificación y referencia, usan los test de NAFEMS para documentar su fiabilidad y calidad. Otra referencia utilizada para la verificación y validación es la guía de validación publicada por AFNOR (Association Française de Normalisation) [15] y escrita por la SFM (Société Française des Mécaniciens). En el campo de la mecánica de fluidos computacional se están realizando otras aportaciones significativas [10]. También en el campo de la acústica se han realizando aportaciones [16].

Un ejemplo del uso de los test de verificación se muestra en la Figura 2, donde se recogen los resultados de diferentes modelos del test 13 de NAFEMS [14], usado como referencia para el análisis de vibraciones forzadas. Este test consiste en una placa cuadrada delgada simplemente apoyada en el contorno con varias condiciones de excitación. En dicha Figura 2, se recogen los errores relativos de las diferentes respuestas dadas, por varios programas y varios modelos, para las ocho primeras frecuencias naturales.

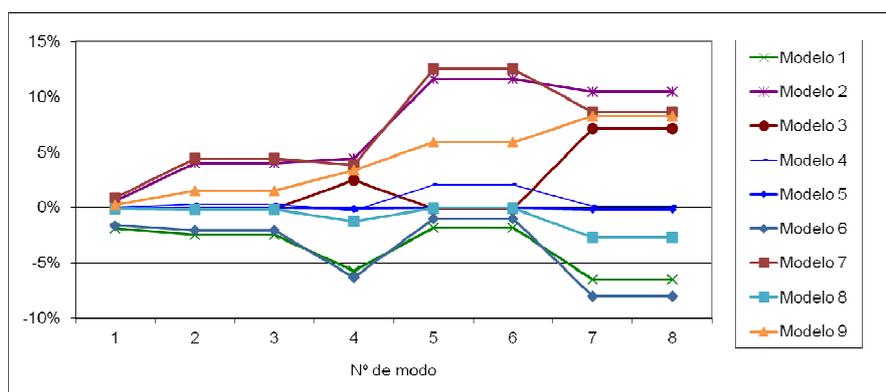


Figura 2: Errores respecto a la referencia para diferentes modelos del test 13 de NAFEMS.

En ella se observan diferencias significativas entre diferentes programas y entre diferentes mallas. El uso del tipo de elemento y de la densidad de malla adecuados pueden ser críticos, por lo que debe justificarse dicha elección, por ejemplo con gráficos de convergencia. Una explicación más detallada de estos aspectos se sale del objetivo de esta comunicación, pero se quiere hacer patente la necesidad de que los programas de cálculo por el MEF se apliquen cuidadosamente y por personal con la formación adecuada.

### 3. CÁLCULO POR EL MEF DEL ÍNDICE DE REDUCCIÓN DE VIBRACIONES DE UNA UNIÓN EN CRUZ VERTICAL

#### 3.1. Procedimiento

Entre las magnitudes utilizadas para caracterizar la transmisión por flancos se encuentra el índice de reducción de vibraciones de la unión ( $K_{ij}$ ) [17] y [18]. Puede utilizarse para comparar productos, expresar un requisito o como dato de entrada en los métodos de predicción descritos en la normativa. La norma EN 12354-1 [18] proporciona valores empíricos para algunos tipos de unión en función de la magnitud  $M$  definida en la Ec. 1.

$$M = \log \frac{m'_i}{m_i} \quad \text{Ec. 1}$$

Su determinación en laboratorio puede realizarse según lo indicado en [17]. Para el cálculo por el MEF se ha seguido un procedimiento semejante, determinando los niveles de velocidad de cada superficie. Tratándose de una excitación estructural estacionaria puede usarse la Ec. 2. A partir de estos resultados se calcula la diferencia de niveles de velocidad ( $D_{v,ij}$ ) entre parejas de elementos. Una explicación más detallada puede encontrarse en [2], [17] y [18].

$$L_v = 10 \cdot \log \frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2}{n \cdot v_0^2} \text{ dB} \quad \text{Ec. 2}$$

Para la aplicación del MEF en el cálculo del índice de reducción de vibraciones de una unión en cruz, se ha definido un modelo en el que se han utilizado las referencias dimensionales y la notación de [17], con valores dimensionales y condiciones fijados a partir de los datos en [18] anexo H, [19] y [20]. El programa utilizado ha sido I-DEAS™. En la Figura 3 puede observarse una de las mallas utilizadas, con diferentes colores como referencia para las condiciones geométricas sobre las posiciones de la fuente de excitación y los transductores, dadas en [17]. Los elementos utilizados son bidimensionales (2D) parabólicos y las aristas se consideran empotradas.

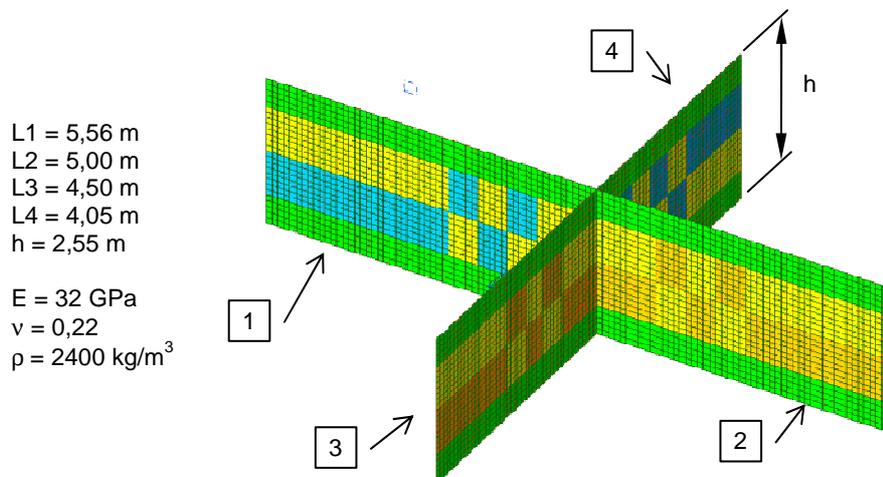


Figura 3: Modelo de cálculo, dimensiones y propiedades del material.

Para el cálculo se ha aplicado una excitación estacionaria de 10 Hz, similar a la proporcionada por la máquina de martillos normalizada [20], pero aplicada en un punto. El valor máximo de la fuerza es de 10 N. El tiempo de excitación ha sido de 10 s, no procesando en los resultados los primeros 0,5 s, para que se establezca la respuesta. Los espesores de pared considerados han sido 0,10, 0,15 y 0,20 m. Se han realizado cálculos para tres posiciones de excitación en la superficie 1 y una posición de excitación para cada una de las restantes superficies, con 9 puntos de medida en cada superficie. Los puntos de excitación y medida se han elegido aleatoriamente, con las restricciones de posición dadas en [17].

La calidad de la malla se ha analizado con los resultados de frecuencias naturales para los primeros 500 modos respecto a una referencia tomada para un modelo de 26901 nodos (Figura 4). Se observa una tendencia hacia resultados menos dispersos al aumentar el número de nodos, y una convergencia hacia valores con variaciones relativas máximas entorno al 1% para

el conjunto de resultados. Con el fin de completar los cálculos, sin utilizar mallas muy densas que ralenticen y dificulten los cálculos, se elige la malla de 15413 nodos (tamaño del elemento de 0,1 m)

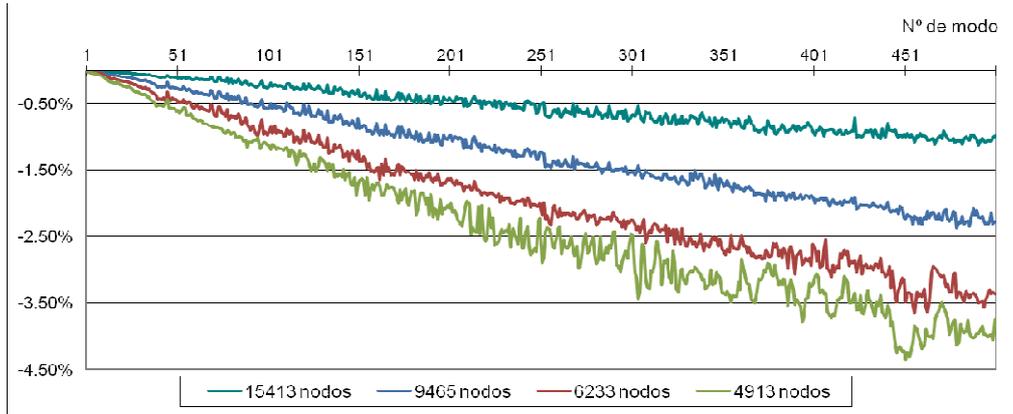


Figura 4: Diferencias en las frecuencias de los primeros 500 modos, para un espesor de 0.2 m, en función del número de nodos.

### 3.2. Resultados

A continuación se analiza la influencia de algunos parámetros sobre los resultados.

- Fuerza excitadora. Se ha comparado la diferencia de niveles de velocidad entre las superficies 1 y 2 ( $D_{v,12}$ ) con dos valores de fuerzas: 10 N y 100 N. Los valores entre uno y otro caso no difieren en más de un 0,1% en el rango de frecuencias de interés.
- Tiempo de excitación. Se ha analizado la diferencia de niveles de velocidad  $D_{v,12}$  para tiempos de excitación de 10 s y 20 s, encontrándose diferencias menores del 0,2 % en casi todos los casos.
- Nivel de aceleración o de velocidad. Se ha comparado la diferencia de nivel de aceleración ( $D_{a,12}$ ) con la diferencia de nivel de velocidad ( $D_{v,12}$ ), con resultados que no difieren más de 0,4 dB, entre 50 y 1000 Hz (Figura 5).

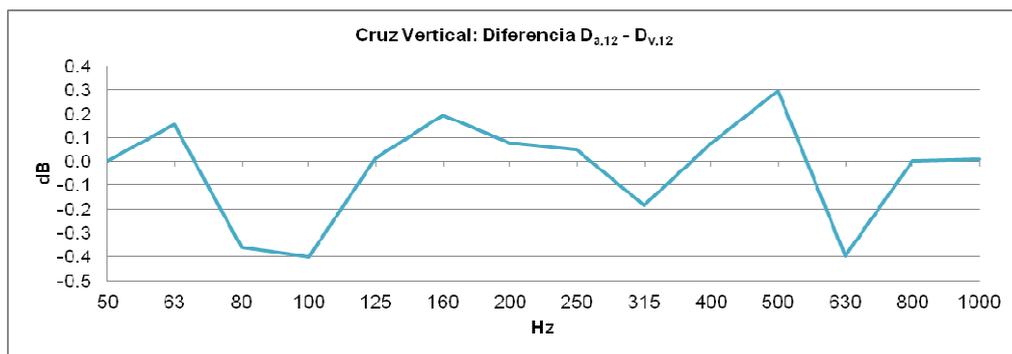


Figura 5: Diferencia de nivel de aceleración menos diferencia de nivel de velocidad.

- Diferentes espesores (masa por unidad de superficie). Los valores de  $K_{ij}$  obtenidos para diferentes espesores pueden observarse en la Figura 6, promediados y filtrados en bandas de un tercio de octava. Destaca el significativo aumento del valor obtenido con el espesor, para una frecuencia de 100 Hz.
- Factor de pérdida total ( $\eta_{tot}$ ) y tiempo de reverberación estructural ( $T_s$ ). Estos parámetros están relacionados [17]. Con una adecuada elección de los valores se puede ajustar el modelo para conseguir resultados más precisos (Figura 6) [2] [21].

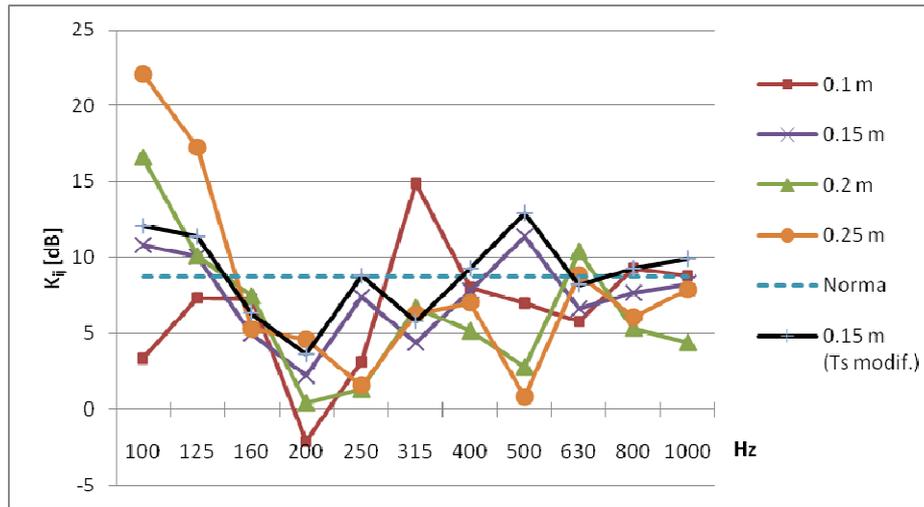


Figura 6: Valores de  $K_{ij}$  en uniones en cruz vertical, en función de la frecuencia, para diferentes espesores y con  $T_s$  modificado ( $M = 0$ ).

## 4. SIMULACIÓN DE LA TRANSMISIÓN DEL RUIDO DE IMPACTO EN SUELOS

### 4.1. Procedimiento

En este caso se analiza la respuesta al ruido de impacto en los suelos. Para poner de manifiesto las diferencias que pueden aparecer al considerar mallas 2D y 3D, se ha analizado la respuesta en frecuencia y el nivel de aceleración en ambos modelos. Las características físicas y geométricas, indicadas en la Figura 7, se basan en el suelo de referencia pesado, tipo C (hormigón pesado) descrito en la norma UNE-EN ISO 10140-5 [20], considerando su contorno empotrado. La calidad de la malla se ha comprobado con modelos 2D de 8772 nodos y 48308 nodos (referenciado como 2D2). El modelo 3D tiene 55684 nodos.

La excitación es similar a la producida por una máquina de martillos normalizada. Se trata de la aplicación de impactos con una fuerza de 10 N, durante 10 s, en 5 puntos separados 100 mm y formando  $45^\circ$  con los ejes de la placa (Figura 7). En cada punto el impacto es cada 0,5 s, resultando una frecuencia de excitación de 10 Hz.

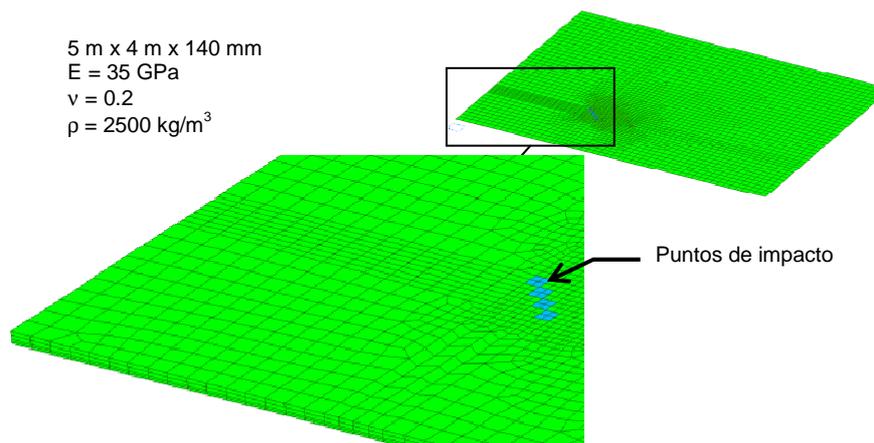


Figura 7: Modelo del suelo y puntos de aplicación de impactos.

### 4.1. Resultados

La respuesta en frecuencia que se obtiene (Figura 8) es muy similar para los modelos 2D y 3D, sobre todo a frecuencias bajas, aumentando ligeramente la diferencia a frecuencias altas. Los dos modelos 2D no muestran diferencias significativas, por lo que la densidad de malla es adecuada.

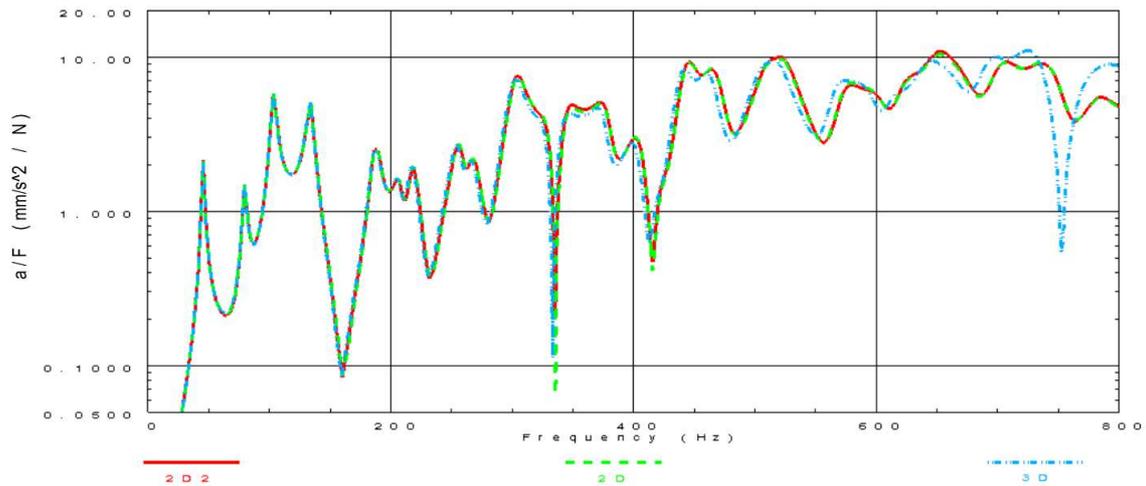


Figura 8: Respuesta en frecuencia para modelos 2D y 3D del suelo.

En la Figura 9 se representan, en función de la frecuencia, los resultados del nivel de aceleración ( $L_a$ ) obtenidos con modelos 2D y 3D. Se observa que los modelos 2D y 3D proporcionan resultados similares, por lo que se puede conseguir una simplificación significativa usando el modelo 2D.

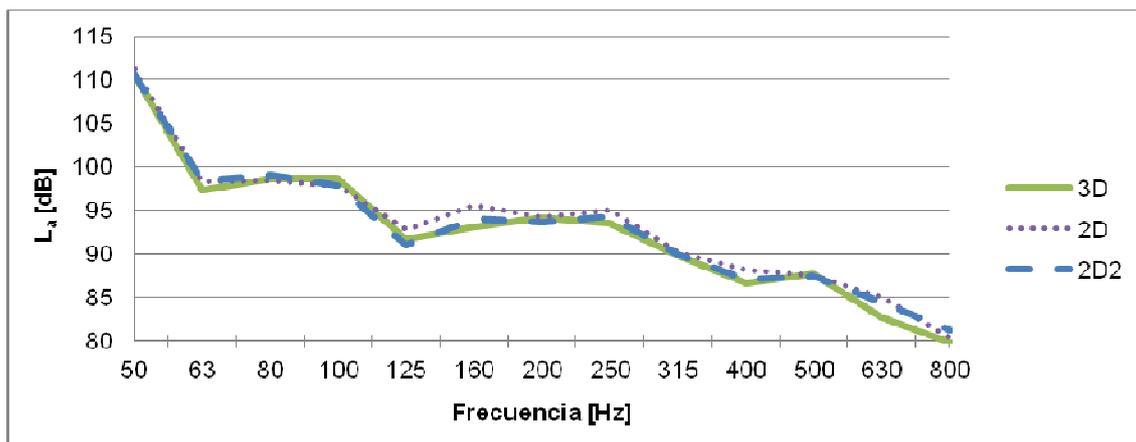


Figura 9: Nivel de aceleración ( $L_a$ ) para modelos 2D y 3D del suelo

## 5. CONCLUSIONES

La adecuada utilización del MEF requiere una metodología que evalúe la fiabilidad y precisión de los resultados obtenidos. Para este fin se utilizan principalmente los procesos de verificación y validación.

Respecto al cálculo del índice de reducción de vibraciones de una unión en cruz vertical, se ha comprobado que el valor de la fuerza excitadora o la medida de aceleraciones o velocidades no afecta significativamente a los resultados entre 50 y 1000 Hz. Un tiempo de excitación de 10 s es suficiente para conseguir unos resultados estables. El espesor, y por lo tanto la masa por unidad de superficie, afecta sobre todo a frecuencias bajas. Una adecuada elección del factor de pérdida total ( $\eta_{tot}$ ), o del tiempo de reverberación estructural ( $T_s$ ), puede ajustar el modelo para conseguir resultados más precisos.

En cuanto a la transmisión del ruido de impacto en suelos, se ha comprobado que la respuesta en frecuencia y el nivel de aceleración, obtenidos con modelos 2D y 3D, proporcionan resultados similares, por lo que se puede conseguir una simplificación significativa del modelo.

## 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*.
- [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. *TECNIACUSTICA 2011*.
- [5] Magdaleno, J., Martín-Bravo, M., & García-Terán, J. (2013). Simulación por el método de los elementos finitos de la transmisión del sonido en edificios. *TECNIACUSTICA 2013*, Valladolid. pp. 983.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Hopkins, C. (2007). *Sound insulation*. Elsevier.
- [9] Babuska, I., & Oden, J. T. (2004). Verification and validation in computational engineering and science: Basic concepts. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 193(36-38), 4057-4066.
- [10] Oberkampf, W. L., & Trucano, T. G. (2008). Verification and validation benchmarks. *Nuclear Engineering and Design*, 238(3), 716-743.
- [11] Oberkampf, W. L., DeLand, S. M., Rutherford, B. M., Diegert, K. V., & Alvin, K. F. (2002). Error and uncertainty in modeling and simulation. *Reliability Engineering and System Safety*, 75(3), 333-357.
- [12] Lardeur, P., Scigliano, R., & Scionti, M. (2013). Verification and validation for the vibration study of automotive structures modelled by finite elements. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 48(1), 59-72.
- [13] Scigliano, R., Scionti, M., & Lardeur, P. (2011). Verification, validation and variability for the vibration study of a car windscreen modeled by finite elements. *Finite Elements in Analysis and Design*, 47(1), 17-29.
- [14] Maguire, J., Dawswell, D., & Gould, L. (1989). *Selected benchmarks for forced vibration*. Glasgow: NAFEMS.
- [15] Boissenot, Jean-Marc. (1990). *Guide de validation des progiciels de calcul de structures* AFNOR.
- [16] Molares, A. R., & Seoane, M. S. (2008). Benchmarking for acoustic simulation software. *Acoustics 08*, Paris.
- [17] UNE-EN ISO 10848-1:2007. Acústica. Medida en laboratorio de la transmisión por flancos del ruido aéreo y del ruido de impacto entre recintos adyacentes. Parte 1: documento marco.
- [18] 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 del ruido aéreo entre recintos.
- [19] UNE-EN ISO 10848-4:2011. Medida en laboratorio de la transmisión por flancos del ruido aéreo y del ruido de impacto entre recintos adyacentes. Parte 4: aplicación a las juntas con al menos un elemento pesado.
- [20] UNE-EN ISO 10140-5: 2011. Acústica. Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción. Parte 5: requisitos para instalaciones y equipos de ensayo.
- [21] Del Rey, R., Alba, J., Ramis, J., Julia, E., & Segura, J. (2012). Propuesta de fórmula empírica para el factor de pérdidas. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 28(3), 142-147.