

SIMULACIÓN POR EL FEM DE LA TRANSMISIÓN DEL RUIDO DE IMPACTOS EN SUELOS PESADOS

PACS: 43.40.Kd

Magdaleno, Jesús; Martín Bravo, M^a Ángeles; García Terán, José M^a; Tarrero, Ana Isabel
Escuela de Ingenierías Industriales. Universidad de Valladolid
C/ Francisco Mendizábal n^o 1
47014 Valladolid
Tel. 34 983 423 525
magdal@uva.es

ABSTRACT

Impact sound reduction improvement using floor coverings is determined according to tests defined in different standards. This paper presents a simulation of the test method described in the standard UNE EN-ISO 16251-1, using the finite element method (FEM). Different boundary conditions, excitation sources and mesh are analyzed. FEM models have achieved satisfactory results of impact sound pressure level reduction.

RESUMEN

La mejora del aislamiento acústico al ruido de impacto mediante el revestimiento del suelo se determina de acuerdo con ensayos definidos en diferentes normas. Esta comunicación recoge la simulación del método de ensayo normalizado descrito en la norma UNE EN-ISO 16251-1 utilizando el método de los elementos finitos (FEM) y se analizan diferentes modelos de las condiciones de contorno, fuentes de excitación y mallas. Los modelos FEM han conseguido resultados adecuados de los valores de la reducción del nivel de presión de ruido de impactos.

1. INTRODUCCIÓN

Una solución para mejorar el aislamiento acústico, sobre todo al ruido de impactos, es el uso de suelos flotantes. El conjunto consiste, básicamente, en un forjado u otro soporte resistente, un material aislante a ruido de impactos (capa elástica) y un acabado suficientemente rígido. La estructura de capas puede ser más compleja, por ejemplo introduciendo, entre el acabado y el material aislante, una capa de mortero o placas de yeso laminado [1]. El material aislante y el acabado provocan una discontinuidad perpendicular a la dirección de recorrido de las ondas de vibración que produce una menor transmisión. Es importante que no existan conexiones rígidas con las paredes perimetrales. El suelo flotante se considera un revestimiento y, desde el punto de vista acústico, se caracteriza por:

- La mejora del índice global de reducción acústica, ponderado A, ΔR_A , en dBA;
- La reducción ponderada del nivel de presión de ruido de impactos (reducción del nivel global de presión de ruido de impactos), ΔL_w , en dB.

La reducción del nivel de presión de ruido de impactos (ΔL) se define como la reducción resultante de la instalación del recubrimiento de suelo de ensayo sobre un suelo de referencia específico. Su estimación se trata en la norma EN ISO 12354-2:2001 [2], anexo C, aunque su uso está indicado si no están disponibles los valores medidos. Se contemplan dos casos, expresados en las Ec. 1 y Ec. 2.

- Suelos hechos a base de arena/cemento o sulfatos de calcio:

$$\Delta L = 30 \log \frac{f}{f_o} \text{ dB} \quad \text{Ec. 1}$$

- Suelos flotantes asfálticos o suelos flotantes secos:

$$\Delta L = 40 \log \frac{f}{f_o} \text{ dB} \quad \text{Ec. 2}$$

La frecuencia de resonancia del sistema, f_o , puede calcularse con la Ec. 3, donde s' es la rigidez dinámica por unidad de área de la capa elástica, en meganewtons por metro cúbico, y m' es la densidad superficial del suelo flotante, en kilogramos por metro cuadrado.

$$f_o = 160 \sqrt{\frac{s'}{m'}} \quad \text{Ec. 3}$$

La medida en laboratorio de ΔL viene especificada en EN ISO 10140-1:2011 [3], anexo H, y deben seguirse las directrices para las medidas indicadas en EN ISO 10140-3:2011 [4] y los requisitos de instalaciones y equipos indicados en EN ISO 10140-5:2011 [5]. Para tener valores comparables entre laboratorios, se utilizan los valores de un suelo de referencia, que idealizan los valores medidos. Se determinan por la diferencia entre los valores medidos en un suelo de referencia sin recubrimiento y el mismo suelo con recubrimiento (Ec. 4). $L_{n,r,0}$ es el nivel de presión de ruido de impactos normalizado del suelo de referencia sin el recubrimiento y $L_{n,r}$ es el nivel de presión de ruido de impactos normalizado del suelo de referencia con el recubrimiento.

$$\Delta L = L_{n,r,0} - L_{n,r} \quad \text{Ec. 4}$$

Los suelos de referencia normalizados se especifican en [5]: un suelo de referencia pesado y tres tipos de suelos de referencia ligeros. Para cada uno de ellos se dan valores de los niveles de presión de ruido de impactos normalizados para el suelo de referencia sin recubrimiento ($L_{n,r,0}$), el nivel normalizado ponderado de la presión de ruido de impactos para el suelo de referencia sin recubrimiento ($L_{n,r,0,w}$) y el término de adaptación espectral para el suelo de referencia sin recubrimiento ($C_{I,r,0}$). La reducción ponderada del nivel de presión de ruido de impactos (ΔL_w), se determina mediante el procedimiento descrito en EN ISO 717-2:2013 [6].

$$\Delta L_w = L_{n,r,0,w} - L_{n,r,w} \quad \text{Ec. 5}$$

Para reducir los costes de los ensayos se están investigando diferentes alternativas, con ensayos sobre modelos simplificados no normalizados, que permitan comparar las potenciales reducciones de ruido de impactos de las diferentes soluciones constructivas y materiales [7]. La norma EN ISO 16251-1:2015 [8] utiliza una losa de hormigón de 1,2 m × 0,8 m × 0,2m, apoyada en cuatro soportes elásticos. Los resultados han sido evaluados por varios grupos de investigación [9]-[13], y son aproximados a los obtenidos con el modelo de EN ISO 10140 para recubrimientos que reaccionan localmente, como determinados recubrimientos blandos, por ejemplo PVC y linóleo.

En esta comunicación se analiza la reducción del nivel de presión de ruido de impactos (ΔL) mediante modelos de elementos finitos (FEM), tomando como referencia el modelo de ensayo descrito en la norma EN ISO 16251-1:2015 [8]. Para ello se utilizan diferentes modelos, en los que se modifican las condiciones de contorno, las fuentes de excitación y las mallas.

2. DEFINICIÓN DEL MODELO DE CÁLCULO

La instalación a modelizar consiste en una losa de hormigón, colocada sobre soportes blandos en sus cuatro esquinas. El tamaño de la losa es de 120 cm x 80 cm x 20 cm. La superficie de los apoyos es de 8 cm x 8 cm. Sobre esta losa se coloca una capa elástica y una placa flotante de hormigón, para simular un suelo flotante.

Se utilizarán dos capas elásticas, que se identificarán como muestras M2 y M6, con una rigidez dinámica de 5,34 y 13,93 MN/m³, respectivamente. Con la muestra M2 se estudiará la influencia de algunos de los parámetros utilizados en los modelos. Las conclusiones obtenidas se aplicarán en el caso cuando se usa de la muestra M6 como capa elástica. El material que se utiliza en la losa y en la placa flotante es hormigón, con un módulo de Young (E) de 32 GPa, un coeficiente de Poisson (ν) de 0,2, una densidad (ρ) de 2400 Kg/m³ y un factor de pérdida interno (η_{int}) de 0,01. La placa flotante tiene un espesor de 20 mm.

Para los apoyos de la losa se han utilizado dos modelos. Un modelo utiliza elementos 3D con un material elástico de densidad 10 kg/m³, coeficiente de Poisson 0,3 y módulo de Young variable, según la frecuencia propia que se determine. Estos módulos de Young han estado en torno a los 8 MPa. El segundo modelo para los apoyos, utiliza elementos tipo muelle, también con rigidez variable según la frecuencia propia que se determine.

De acuerdo con estudios anteriores [14], en la losa y en la placa flotante se utilizan mallas con elementos 2D, tipo “*Thin shell parabolic quadrilateral*”, con la formulación de lámina gruesa de Mindlin. Se utiliza un tamaño nominal de elemento de 50 mm, resultando 504 elementos y 1597 nodos. La malla se muestra en la Figura 1.

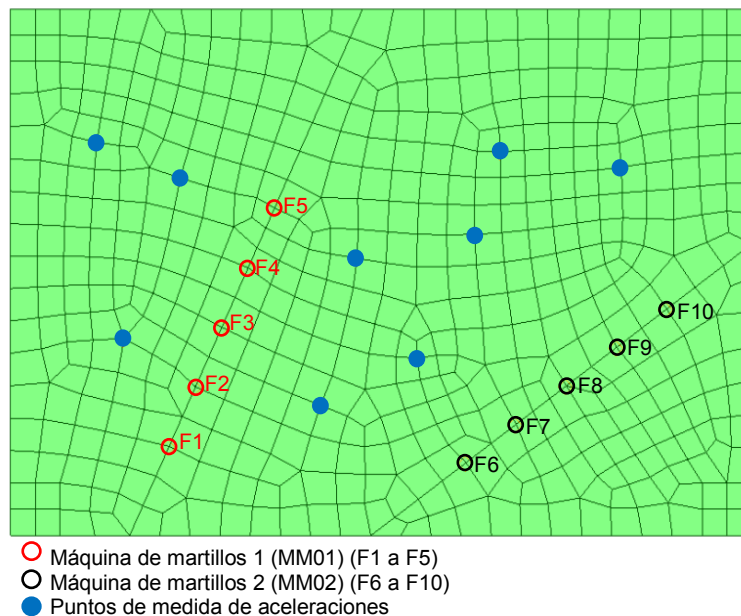


Figura 1: Malla de la losa, con indicación de los puntos de impacto y de los puntos de medida de aceleraciones.

Para las condiciones de contorno de movimientos, se consideran tres casos, dos tipos de apoyo y la condición de sólido libre. Un tipo de apoyo consiste en elementos 3D, tipo “*solid parabolic brick*”, con 8 elementos por apoyo (Figura 2a). Cada uno de los apoyos tiene unas dimensiones de 8 cm x 8 cm x 1 cm. El segundo tipo de apoyo introduce elementos muelle en la superficie (Figura 2b). En ambos casos, los nodos inferiores tienen impedidos todos los movimientos.

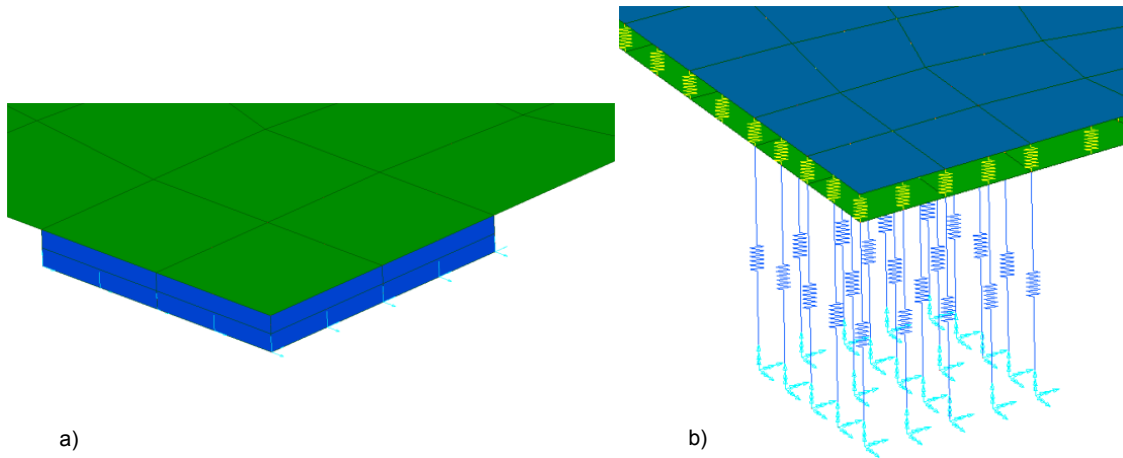


Figura 2: Tipos de apoyos: a) Elementos 3D y losa desnuda. b) Elementos muelle y modelo con capa elástica M2.

En cuanto a las excitaciones, se consideran tres tipos. La primera es una excitación tipo máquina de martillos (MM) [14]. La segunda es una excitación estacionaria puntual (MMFi, donde Fi es el punto de aplicación), en la que se concentra en un punto los impactos de la máquina de martillos, resultando la misma frecuencia de 10 Hz. Por último, se ha utilizado una carga de impacto.

3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

La Figura 3 muestra los resultados de ΔL para apoyos con una frecuencia de resonancia de 40 Hz, cuando se utiliza una excitación tipo máquina de martillos (MM). Además de los valores promedio de dos posiciones de la máquina de martillos, se representan las barras de error, que indican los valores máximo y mínimo para cada banda de un tercio de octava. También se representan las estimaciones dadas por las Ec. 1 y Ec. 2. Otros autores han publicado resultados utilizando frecuencias de resonancia de los apoyos entre 27 y 38 Hz [10]-[12].

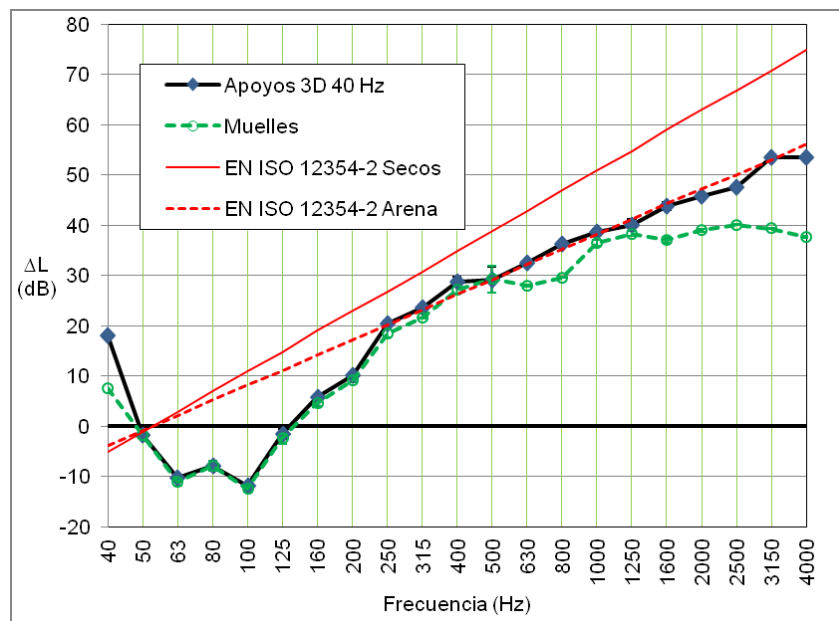


Figura 3: Reducción del nivel de presión de ruido de impactos Para apoyos con elementos 3D y muelles, con una frecuencia de resonancia de 40 Hz. Excitación tipo máquina de martillos (MM). Capa elástica M2.

Teniendo en cuenta los intervalos de las barras de error, puede decirse que la influencia de la posición de la máquina de martillos es pequeña en general, aunque en algunos casos sí es significativa. Por lo tanto, parece recomendable utilizar, al menos, dos posiciones de dicha máquina de martillos.

Cuando se utilizan condiciones de sólido libre, los resultados de ΔL se muestran en la Figura 4, comparados con el apoyo modelizado con elementos 3D de 40 Hz, con excitación tipo MM. Los resultados con la condición de sólido libre se representan para la excitación tipo MM y para la excitación tipo impacto en el punto F3.

Se observa un desplazamiento importante en los resultados del modelo sólido libre con excitación tipo máquina de martillos, debido a que la rutina de cálculo incluye, automáticamente, muelles para corregir la singularidad del sistema. Cuando la excitación es tipo impacto, dichos elementos no influyen apreciablemente en los resultados, por lo que los resultados son semejantes a los obtenidos con otras vinculaciones y excitaciones, aunque aparecen efectos no deseados en alguna banda de frecuencia. Una translación de los resultados obtenidos en el modelo sólido libre con la excitación tipo MM, proporciona resultados casi equivalentes a los obtenidos con el modelo de apoyos 3D (sólido libre corregido en la Figura 4).

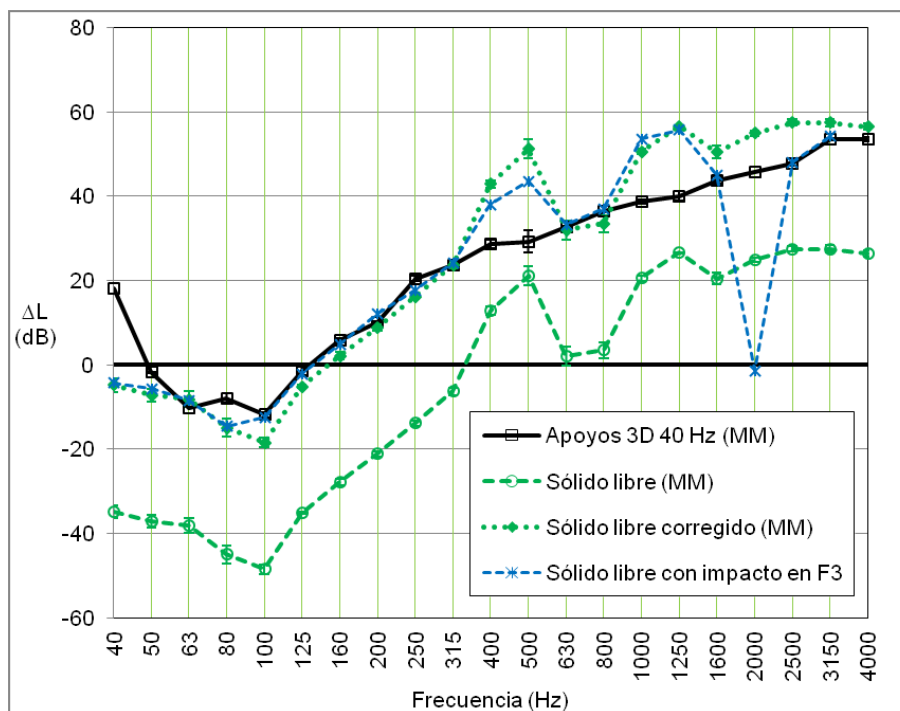


Figura 4: Reducción del nivel de presión de ruido de impactos cuando los apoyos son elementos 3D (40 Hz) y cuando la condición es de sólido libre. Excitación tipo máquina de martillos (MM) y excitación tipo impacto en el punto F3.

Para valorar la influencia de concentrar en un punto los impactos de la máquina de martillos, se ha estudiado la excitación tipo estacionaria puntual en F3 (MMF3). Los resultados se representan en la Figura 5, donde puede apreciarse que la respuesta a este tipo de excitación es similar a la respuesta a la excitación tipo máquina de martillos (MM), aunque esta última es más regular y evita la utilización de mayor número de puntos de excitación para alcanzar resultados más precisos.

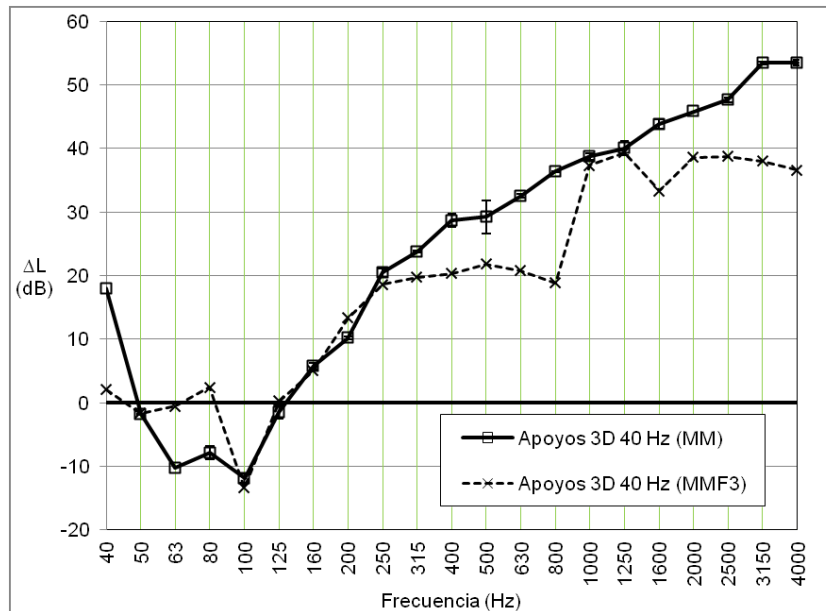


Figura 5: Reducción del nivel de presión de ruido de impactos cuando los apoyos son elementos 3D (40 Hz) para una excitación tipo máquina de martillos (MM) y una excitación tipo estacionaria puntual en F3 (MMF3).

A continuación se aplicarán estas condiciones cuando la capa elástica es la muestra M6. Los resultados de ΔL se muestran en la Figura 6, junto con la estimación de la norma EN ISO 12354-2:2001 para suelos secos y los resultados del modelo con la condición de sólido libre, que puede ayudar en la validación del modelo. Los mejores resultados se obtienen, en este caso, cuando la frecuencia de resonancia de los apoyos es 36 Hz.

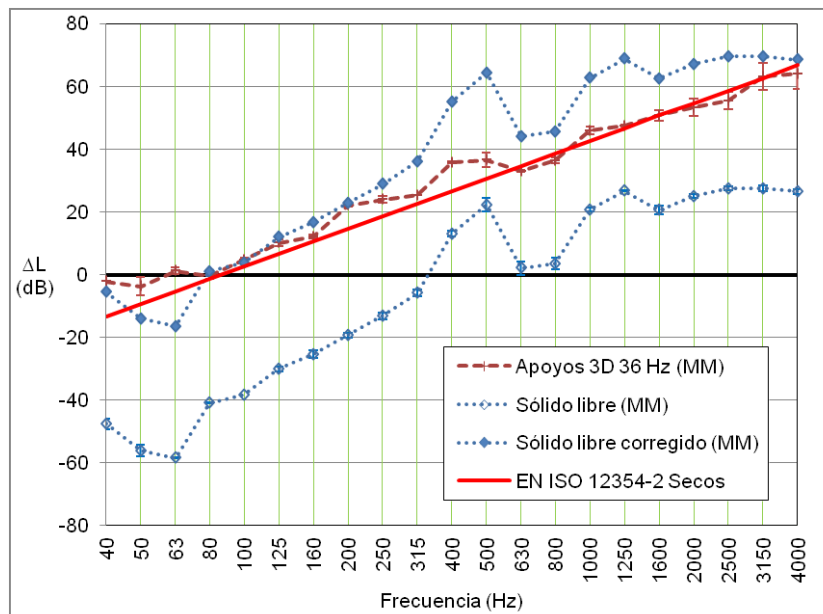


Figura 6: Reducción del nivel de presión de ruido de impactos cuando los apoyos son elementos 3D, con diferente frecuencia de resonancia. Excitación tipo máquina de martillos. Capa elástica M6.

En la Tabla 1 se muestran los valores del nivel de aceleración ponderado ($L_{a,w}$) y su correspondiente término de adaptación espectral para los modelos de losa desnuda, según la

norma EN ISO 717-2:2013 [6]. En la misma tabla se muestran los parámetros anteriores, junto con la reducción ponderada del nivel de presión de ruido de impactos (ΔL_w), para los modelos de capa flexible con la muestra M2 y muestra M6.

Tabla 1: Nivel de aceleración ponderado, término de adaptación espectral y reducción ponderada del nivel de presión de ruido de impactos, para los modelos con losa desnuda, muestra M2 y muestra M6.

	Losa desnuda		Muestra M2		Muestra M6
	Muelles 40 Hz	Apoyos 3D 40 Hz	Muelles 40 Hz M2	Apoyos 3D 40 Hz M2	Apoyos 3D 36 Hz M6
$L_{a,w}$ (dB)	38	39	33	33	19
C_i (dB)	-3	-3	10	10	6
ΔL_w (dB)			19	20	32

4. CONCLUSIONES

Los modelos FEM han conseguido resultados adecuados, para dos capas elásticas (muestras M2 y M6), de los valores de la reducción del nivel de presión de ruido de impactos (ΔL), del nivel de aceleración ponderado ($L_{a,w}$) y de la reducción ponderada del nivel de presión de ruido de impactos (ΔL_w). El mejor modelo para el cálculo de la reducción del nivel de presión de ruido de impactos es el caso de apoyos 3D, con excitación tipo máquina de martillos. Para los modelos de capa flexible con la muestra M2, resultaría un valor de $\Delta L_w=20$ dB, aunque podría esperarse un valor algo superior, dado el resultado para otros casos. Para los modelos de capa flexible con la muestra M6, resultaría un valor de ΔL_w entre 32 y 38 dB, dados los resultados para otros casos.

Con el FEM se ha podido estudiar la influencia de algunos de los parámetros utilizados en los modelos. Se ha comprobado que influencia de la posición de la máquina de martillos es pequeña en general, aunque en algunos casos puede llegar a ser significativa. Por lo tanto, parece recomendable utilizar, al menos, dos posiciones de dicha máquina de martillos.

En cuanto a la influencia del tipo de apoyos de la losa de hormigón, parece más adecuado utilizar apoyos modelizados con elementos 3D, sobre todo cuando se requieren resultados a frecuencias altas. Para frecuencias bajas y medias, los resultados con apoyos modelizados con elementos tipo muelle son casi coincidentes con los anteriores, por lo que puede ser una simplificación adecuada en algunos casos.

Cuando se utilizan condiciones de sólido libre, se observa un desplazamiento importante en los resultados del modelo cuando la excitación es del tipo máquina de martillos. Cuando la excitación es tipo impacto, los resultados son semejantes a los obtenidos con otras vinculaciones y excitaciones. Una translación de los resultados obtenidos en el modelo sólido libre con la excitación tipo MM, proporciona resultados casi equivalentes a los obtenidos con el modelo de apoyos 3D, y puede servir de referencia para validar los resultados.

Se consigue una buena aproximación, en algunas bandas de frecuencia, entre los valores proporcionados por la excitación tipo máquina de martillos y la excitación tipo estacionaria puntual en F3. La respuesta de la máquina de martillos es más regular y evita la utilización de más puntos de excitación para alcanzar resultados más precisos, aunque es más costosa de modelizar.

La metodología utilizada permite realizar estudios sobre los parámetros involucrados sin utilizar de forma intensiva modelos físicos, que suelen ser más costosos y lentos. Además, se pueden detectar algunos problemas, antes de construir las instalaciones de ensayo, y realizar comprobaciones cruzadas entre los resultados experimentales y numéricos, para evitar errores.

REFERENCIAS

- [1] Ministerio de Fomento. (2011). *Catálogo informático de elementos constructivos, v2.1*. Retrieved 06/24, 2015, from <http://www.codigotecnico.org/index.php/menu-catalogo-informatico-elementos-constructivos>.
- [2] 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, (2001).
- [3] EN ISO 10140-1: 2011. Acústica. Medición en laboratorio del Aislamiento acústico de los elementos de construcción. Parte 1: Reglas de aplicación para productos específicos, (2011).
- [4] EN ISO 10140-3: 2011. Acústica. Medición en laboratorio del Aislamiento acústico de los elementos de construcción. Parte 3: Medición del aislamiento acústico al y ruido de impactos, (2011).
- [5] 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, (2011).
- [6] EN ISO 717-2: 2013. Acústica. Evaluación Del Aislamiento Acústico En Edificios y Elementos De Construcción. Parte 2: Aislamiento a Ruido De Impactos, (2013).
- [7] Branco, F. G., & Godinho, L. (2013). On the use of lightweight mortars for the minimization of impact sound transmission. *Construction and Building Materials*, 45(0), 184-191.
- [8] EN ISO 16251-1:2015. Acústica. Medición En Laboratorio De La Reducción De La Transmisión Del Ruido De Impacto Por Revestimientos De Suelo Sobre Un Suelo De Pequeñas Dimensiones. Parte 1: Suelos Pesados. (ISO 16251-1:2014), (2015).
- [9] Bjor, O. (2010). Simplified measurement of the reduction of transmitted impact noise by floor coverings. *Proceeding of the Baltic Nordic Acoustic Meeting*.
- [10] Foret, R., Chéné, J., & Guigou-Carter, C. (2011). A comparison of the reduction of transmitted impact noise by floor coverings measured using ISO 140-8 and ISO/CD 16251-1. *Forum Acusticum 2011, Aalborg, Denmark*, , 1371-6.
- [11] Pereira, A., Godinho, L., Mateus, D., Ramis, J., & Branco, F. G. (2014). Assessment of a simplified experimental procedure to evaluate impact sound reduction of floor coverings. *Applied Acoustics*, 79(0), 92-103.
- [12] Schmidt, J. -, Wittstock, V., & Langer, S. C. (2014). Uncertainties and validation procedures for the compact measurement setup. *INTERNOISE 2014 - 43rd International Congress on Noise Control Engineering: Improving the World through Noise Control*,
- [13] Mateus, D., Pereira, A., Gonçalves, H., Godinho, L., & Branco, F. (2013). Avaliação experimental da redução sonora de sistema de piso flutuante com lajetas em microbetão e em pedra. *Tecniacústica 2013*, Valladolid.
- [14] Martín-Bravo, M., Magdaleno, J., García-Terán, J., & Tarrero, F. (2014). Aplicaciones del método de los elementos finitos en la transmisión estructural del sonido en edificios. *Tecniacústica 2014*, Murcia. pp. 931.