

CONTRIBUCIÓN A LA EVALUACIÓN ACÚSTICA DE SUELOS LAMINADOS

Gadea Borrell¹, J. M.; Segura Alcaraz¹, J.; Vera Guarinos², J.; Francés Monllor², J.; Alba Fernández³, J.; Carbajo Sanmartín², J.

¹ Departamento de Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras.
Escuela Politécnica Superior de Alcoy - Plaza de Ferrándiz y Carbonell, s/n. Alcoy (03801)
jsegura@mcm.upv.es; jmadea@mes.upv.es

² Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Alicante. Campus de San Vicente del Raspeig, (03690).
jfmonllor@ua.es; Jesus.carbajo@ua.es; jramis@ua.es

³ Instituto para la Gestión Integrada de las Zonas Costeras
Escuela Politécnica Superior de Gandía- Universidad Politécnica de Valencia
Carretera Nazaret-Oliva S/N. Grao de Gandía 46730 (Valencia) jesalba@fis.upv.es

Resumen

El incremento del uso de suelos laminados en las viviendas de nueva construcción, ya sea por motivos estéticos, o para conseguir mejores condiciones térmicas y acústicas, y verificar la normativa, ha motivado la realización de numerosos estudios al respecto.

La mayoría de estos estudios están dirigidos en el sentido de garantizar el cumplimiento de la normativa, y son relativamente pocos los enfocados a evaluar lo agradable o desagradable del ruido que este tipo de suelos emite.

En este trabajo se presenta una alternativa para comparar el ruido de suelos laminados desde el punto de vista perceptivo que, en principio exige una configuración menos complicada que las normativas o recomendaciones actuales. Básicamente, se trata de utilizar una losa de hormigón de menos de un metro cuadrado encima de la cual se instala el suelo laminado. Lo que se registra es el ruido producido por bolas de distintos materiales y pesos dejadas caer desde una determinada altura en ambiente prácticamente anecoico. A partir de la señal obtenida con cada impacto se extraen diferentes parámetros psicoacústicos como sonoridad, tonalidad, rugosidad, etc.

Además, partir de los datos experimentales se calibra un modelo numérico de elementos finitos en dos dimensiones. El modelo simula la interacción fluido estructura entre el suelo laminado y el aire circundante, pudiéndose obtener la distribución de presiones sonoras que varía según el material intercalado utilizado. El modelo simula la cámara anecoica mediante un contorno de absorción infinita que elimina los efectos de la reverberación.

Palabras-clave: suelos laminados, parámetros psicoacústicos, elementos finitos, interacción fluido estructura, contorno de absorción infinita.

Abstract

The present work tries to configure a simple system of acoustic measurements on floating floors. Standards must be kept in mind; but a simple model that allows obtaining good results is used. The floating floors are compound of a superior layer of covering floor. A material that absorbs the vibration is inserted under the covering floor. In the experience the psychoacoustic parameters are quantified to measure the pleasant or unpleasant of the sound in different absorbent materials of the vibration.

A finite element model is proposed. In this model the interaction fluid-structure is considered as well as a contour of infinite absorption to simulate the nonexistence of reverberation in the anechoic chamber. The model is analyzed by means of a transient analysis. A time-sound pressure signal is obtained. This signal is processed to obtain the FFT that allows observing the frequencies that project a major sound intensity.

Keywords: Floating floors, psychoacoustic parameters, interaction fluid-structure, contour of infinite absorption

1 Introducción

El nivel general de ruido en un recinto afecta a la comodidad del usuario. Para analizar la molestia que este ruido causa, además de su nivel sonoro existen otros aspectos a tener en cuenta. Los estudios realizados por Hugo Fastl y Eberhard Zwicker [1] explican que para el mismo nivel de sonido, no todas las frecuencias suenan en el oído humano con la misma sensación de intensidad. Asimismo otros aspectos del sonido como la tonalidad, la aspereza, la agudeza, etc., del mismo provocan en los seres humanos sensaciones de mayor o menor agrado. Puede darse el caso, por ejemplo de que un sonido de un nivel alto, no sea tan desagradable como otro de nivel sonoro menor. Estos aspectos tratados en psicoacústica se tienen en cuenta en este trabajo.

Los suelos laminados son cada vez más usados en construcción de edificios, debido a que la actual normativa del Código Técnico de la Edificación ha incrementado los requisitos acústicos de las construcciones. Estos suelos laminados consisten en disponer sobre el suelo del forjado, generalmente de terrazo, una primera capa de material (elástico, amortiguador y/o aislante) sobre la que se coloca el suelo laminado. La primera capa de material sobre la que se apoya el suelo laminado suele ser de varios tipos, polietilenos espumados, reciclados de madera, cauchos, etc., materiales que deben cumplir la exigencia de amortiguar y aislar.

El material de la capa superior suele tener un espesor de entre 7 y 11 mm y se compone de una capa de reciclado de madera prensado y una capa fina más resistente a las agresiones, sobre la que se camina. En este trabajo se analiza el sonido que se refleja en una cámara prácticamente anecoica al impactar con distintos tipos de bolas de acero y otros materiales sobre el conjunto formado por una losa de hormigón sobre la que se coloca un terrazo, encima el material viscoelástico y a continuación el suelo laminado.

2 Comportamiento de los suelos flotantes

2.1 Un modelo simple

El modelo consiste en dos vigas que están ensambladas por una capa intermedia elástica continua. La elasticidad de cada capa se puede describir por una constante del resorte s por unidad de longitud de la viga, tal y conforme se puede observar en la figura 1.

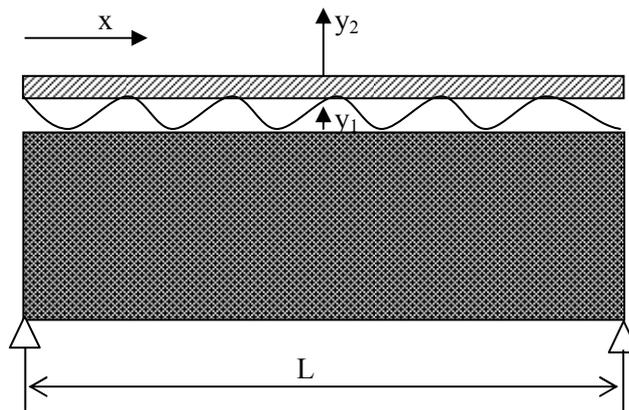


Figura 1 – Esquema analítico

La propagación de la energía vibratoria en estructuras puede tomar la forma de distintos tipos de ondas: longitudinales, transversales, de torsión y principalmente de flexión.

En placas, las ondas de flexión son de importancia primordial puesto que se acoplan fácilmente al sonido aerotransportado.

El valor de la velocidad de onda a flexión en un panel puede ser utilizado para los cálculos del sonido irradiado por éste [2].

El modelo de un suelo flotante basado en ondas de flexión puede acercarse razonablemente a la realidad de su funcionamiento. El sistema de las ecuaciones que gobiernan el movimiento por lo tanto se basa en ondas de flexión, asumiéndose que el movimiento dominante de la placa está en un plano perpendicular a la misma.

Si la capa intermedia de material se describe como un resorte ideal, las ecuaciones del movimiento que gobiernan el modelo son (1):

$$\begin{aligned} \frac{\partial^4 y_1}{\partial x^4} - k_1^4 \cdot y_1 &= -\frac{s}{D_1} (y_1 - y_2) \\ \frac{\partial^4 y_2}{\partial x^4} - k_2^4 \cdot y_2 &= -\frac{s}{D_2} (y_2 - y_1) \end{aligned} \quad (1)$$

Donde:

y_1 es el desplazamiento de la viga de la base según se puede observar en la figura 3

y_2 es el desplazamiento de la viga superior según se puede observar en la figura 3

D_1 es la rigidez a flexión de la viga de la base

D_2 es la rigidez a flexión de la viga superior

s es la constante del resorte supuesto en la capa intermedia

k_1 es el número de onda de la viga de la base

k_2 es el número de onda de la viga superior. Ambas se definen como $k_i = \left(\frac{\mu_i \cdot \omega^2}{D_i} \right)^{\frac{1}{4}}$ donde μ_i es la

masa por unidad de área y ω es la frecuencia angular.

En este modelo la base está apoyada y la viga superior se encuentra libre descansando sobre el resorte representado por el material intercalado.

2.2 Normativa de evaluación de suelos laminados

Actualmente el comportamiento acústico de los suelos flotantes se evalúa con las normas EPLF [3].

El esquema de la figura 2, tomado de la propia normativa define el sistema de evaluación acústica de la misma. Una máquina de impactos sobre el modelo de suelo laminado situado en una cámara acondicionada anecoicamente cuya señal sonora se capta por un micrófono de medida y se procesa para obtener la sonoridad específica en bandas Bark.

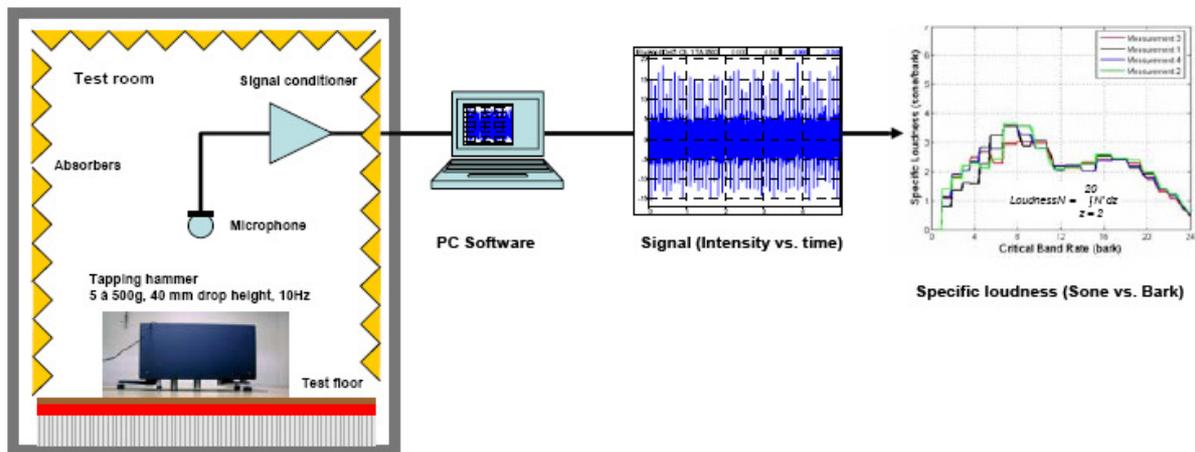


Figura 2 – Esquema de medición de la norma EPLF

Más concretamente se trata de:

1. Una máquina de impactos estandarizada se coloca en un piso instalado en una cámara semi-anecoica.
2. Los cinco martillos que golpean el suelo laminado generan un espectro de frecuencias del sonido característico del tipo de suelo.
3. El sonido aerotransportado es tomado por un micrófono de medida, analizado por una computadora para posteriormente determinar los parámetros psicoacústicos.

4. Los resultados de la prueba se presentan en un gráfico, un solo valor de la sonoridad y un porcentaje de mejora respecto de la sonoridad correspondiente a un suelo de referencia.
5. Los resultados de la prueba son fácilmente comprensibles para un usuario final porque se expresan en tanto por cien de mejora respecto del suelo de referencia.

La evaluación de la bondad acústica se hace de la manera siguiente:

1. Los niveles de presión sonora de un piso estándar de referencia consiste en un tablero de 7 milímetros de suelo laminado sobre una capa de 3 milímetros de PE-espuma.
2. La prueba se realiza midiendo con filtros de tercio de octava (250 a 6300 hertzios)
3. La sonoridad específica (sone) representada en curvas de bandas críticas (Bark) se calcula como un valor simple de la sonoridad N integrando sobre las curvas de las bandas críticas. En la figura 3 se observa el ejemplo de las bandas críticas correspondientes al suelo de referencia y a un suelo testado cualquiera. La determinación de la sonoridad específica se obtiene integrando según las ecuaciones siguientes (2):

$$SonoridadNref = \int_{z=2}^{20} Nref' dz \text{ (sone)} \quad (2)$$

$$SonoridadNtest' = \int_{z=2}^{20} Ntest' dz \text{ (sone)}$$

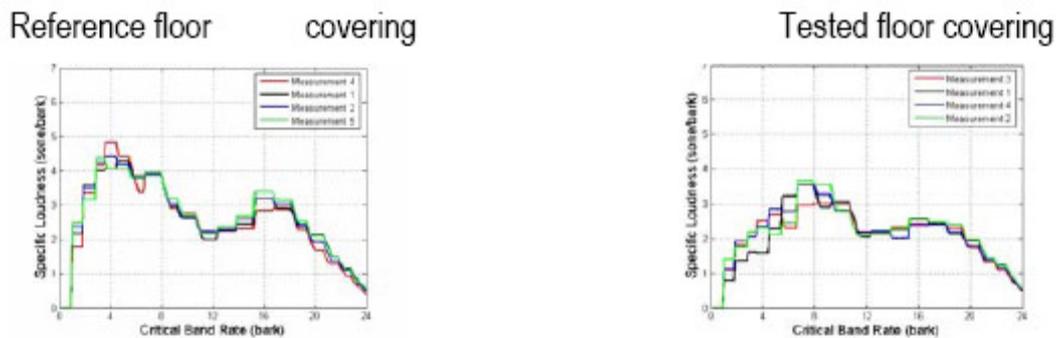


Figura 3 – Bandas críticas (Bark) del suelo de referencia y de un ejemplo de suelo testado

4. Se calcula la media aritmética de los 4 valores más bajos de 8 medidas correspondientes a una combinación concreta de materiales del suelo, teniendo por tanto los sone correspondientes al suelo de referencia y los del suelo testado.
5. La diferencia entre el suelo de referencia y el suelo testado se calcula en % obteniéndose la reducción de sonoridad.

$$reducción = 100 \cdot \frac{(N_m)_{suelodereferencia} - (N_m)_{suelotestado}}{(N_m)_{suelodereferencia}} \% \quad (2)$$

6. Dependiendo del porcentaje de reducción comparado al suelo de referencia, el suelo testado se clasifica en las clases SL0, SL10, SL20, SL30 de sonoridad según se observa en la figura 4.

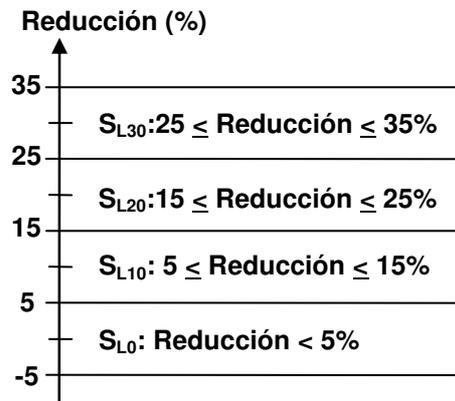


Figura 4 – Esquema incluido en la norma EPLF para indicar los rangos de reducción de sonoridad correspondientes a cada porcentaje

Como intensidad según la definición psicoacústica del profesor Zwicker es una medida lineal, un suelo SL20 es percibido por una persona como el 20% más silencioso que el suelo de referencia.

3 Sistema de análisis y medición propuesto

En una cámara prácticamente anecoica se dispone una base de hormigón de 40*40 cm² sobre la cual se coloca un bloque de terrazo para aplanar perfectamente el plano superior, sobre el cual se coloca el material amortiguador, y encima colocar el suelo laminado. A un metro de distancia se coloca un micrófono de medida conectado a un analizador Harmonie que capta las señales para ser procesadas por el paquete informático 01-dB.

Sobre el sistema ideado de suelo flotante se lanzan bolas de acero de distintos pesos a través de un tubo de PVC de 0.7 m de largo inclinado 30° y con el punto de salida a 1 m del suelo laminado como se puede observar en la figura 5.

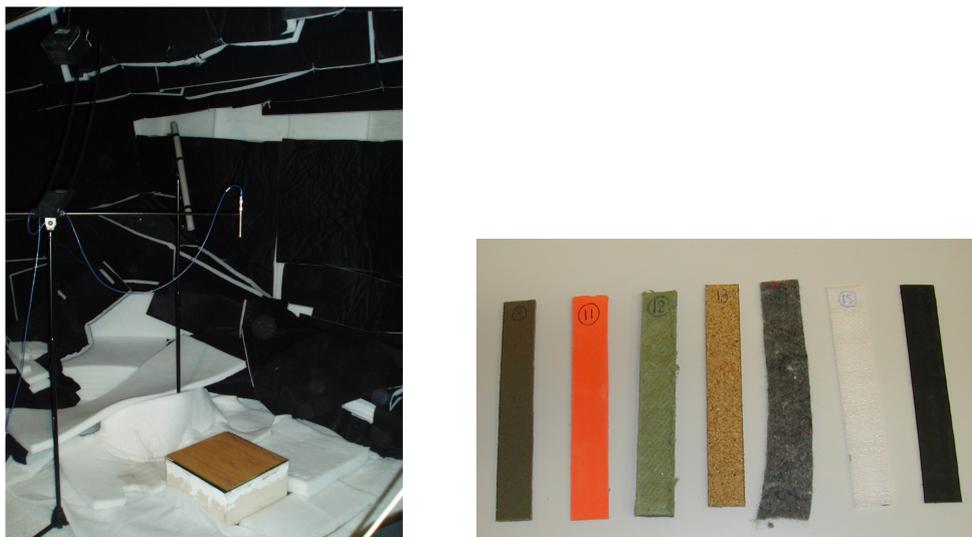


Figura 5 – Montaje utilizado para las grabaciones y algunos de los materiales intercalados usados.

Se utiliza suelo laminado de los tipos AC4 y AC5, siendo el AC5 de una calidad algo superior a la del AC4. Por otro lado se intercalan entre el suelo laminado y el terrazo 21 tipos de materiales elegidos entre materiales reciclados, cauchos, corcho, etc., algunos de los cuales se pueden observar en la figura 5, con distintos valores de densidad, módulos elásticos, etc. Sobre el modelo real creado se lanzan las bolas de acero de modo que solo impacten una vez sobre el suelo para cada bola tirada. Para cada combinación de materiales se realizan varios impactos de distintas bolas. Posteriormente se procesan toda esta serie de datos obteniendo para cada combinación de materiales el promedio de las señales de los impactos, que a su vez sirve para obtener los correspondientes parámetros psicoacústicos.

El sistema empleado es bastante más simple que el recomendado por la normativa de suelos flotantes EPLF [3]

Asimismo se calibra un modelo numérico de elementos finitos en dos dimensiones. De este modo se puede observar la variación de la presión sonora en un punto coincidente con la posición del micrófono de la experiencia, al cambiar la combinación de materiales del suelo flotante, y sobre todo al cambiar ciertas características de estos materiales. Esta simulación pretende estar en concordancia con la respuesta del modelo real.

El modelo simulado con el programa ANSYS incluye por un lado el conjunto de hormigón, material amortiguante y suelo laminado. Este conjunto se envuelve por una fina capa de elementos de aire cuyos nodos del mallado comparten los grados de libertad tanto de la estructura sólida como del fluido aire. Estos nodos conforman la interfase fluido-estructura, que permite transmitir al aire circundante la presión sonora transmitida por los impactos. El aire circundante se engloba en un círculo en el que los nodos externos conforman un contorno de absorción infinita para simular el funcionamiento sin reverberación de la cámara anecoica.

3.1 Evaluación de los registros

Los parámetros psicoacústicos de los promedios de las señales grabadas de los impactos de las bolas para cada combinación de material absorbente con el tipo de suelo laminado AC4 y AC5, se pueden observar en las tablas 1 y 2 respectivamente. Estos tres parámetros psicoacústicos más representativos de la señal impulsiva se han incluido en las figuras 6 y 7

Los parámetros seleccionados son los siguientes:

- La sonoridad representa la intensidad del sonido percibida por el oído y se mide en sones. Un sone es el nivel dado por un tono puro de 1 kHz a 40 dB. Para las demás frecuencias el nivel de sonido y la frecuencia se alteran para dar la misma impresión de Sonoridad.
- La sonoridad 10% parámetro utilizado para calcular la molestia objetiva.
- La molestia objetiva. Es una medida del nivel de desagrado con que se percibe un ruido, y es una combinación de los parámetros psicoacústicos aspereza, fluctuación, tonalidad y sonoridad 10%.

Tabla 1 – Parámetros psicoacústicos con suelo laminado AC4 combinado con los 21 materiales intercalados, más el caso SM en el que se apoyó directamente el suelo laminado sobre el terrazo.

Suelo laminado AC4 combinado con 21 materiales absorbentes de la vibración y un caso sin material absorbente																						
Mat. Absorbente	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18	M19	M20	M21	SM
Sonoridad	44,1	53,3	43,7	42,2	44,6	45,8	39,1	43,4	42,8	44,0	58,2	46,8	50,5	47,1	52,2	46,2	44,0	54,9	51,2	49,7	51,2	41,6
Molestia objetiva	6,5	12,4	6,3	4,0	4,9	8,9	5,0	4,6	53,5	5,8	11,6	21,1	7,9	54,4	10,6	6,3	4,1	8,8	6,8	7,1	8,3	5,3
Sonoridad 10%	2,7	4,4	2,5	1,7	2,0	3,4	2,1	1,9	12,6	2,4	4,3	6,8	3,1	12,7	3,9	2,6	1,8	3,4	2,7	2,8	3,2	2,1

Tabla 2 – Parámetros psicoacústicos con suelo laminado AC5 combinado con los 21 materiales intercalados, más el caso SM en el que se apoyó directamente el suelo laminado sobre el terrazo.

Suelo laminado AC4 combinado con 21 materiales absorbentes de la vibración y un caso sin material absorbente																						
Mat. Absorbente	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18	M19	M20	M21	SM
Sonoridad	40,9	41,4	40,6	44,6	39,0	42,2	39,7	38,4	43,9	42,8	43,3	41,6	46,6	43,1	40,3	41,1	44,1	44,7	43,8	43,0	44,1	41,7
Molestia objetiva	6,8	27,5	6,9	8,2	6,4	8,6	4,8	9,0	6,3	6,5	9,2	8,5	17,8	6,0	7,5	8,1	7,4	6,8	39,8	7,4	5,3	8,0
Sonoridad 10%	2,8	7,5	2,8	3,2	2,6	3,4	2,1	3,5	2,6	2,7	3,6	3,3	6,0	2,5	2,9	3,2	3,0	2,8	10,1	3,0	2,3	3,1

En las gráficas 6 y 7 siguientes se observa que el nivel de desagrado de la señal es mucho mayor en los materiales 9, 12, 14 para el AC4. Para el AC5 los materiales con mayor nivel de desagrado son el 2, 13 y 19.

Si calculamos el promedio de los resultados de sonoridad 10% y de la molestia objetiva del AC4 y el AC5 se obtiene la grafica de la figura 8 en la que se puede observar que los peores materiales son el material 2, el 9, el 14 y el 19.

El material 9 es de poliestireno expandido con un espesor de 1.5 mm y una capa de papel de aluminio. El 2 es un caucho muy espumado de 2.5 mm de espesor. El 14 es un fieltro de desechos textiles de 3 mm de espesor, y el 19 es un material parecido al 2 pero con un módulo elástico mayor que éste.

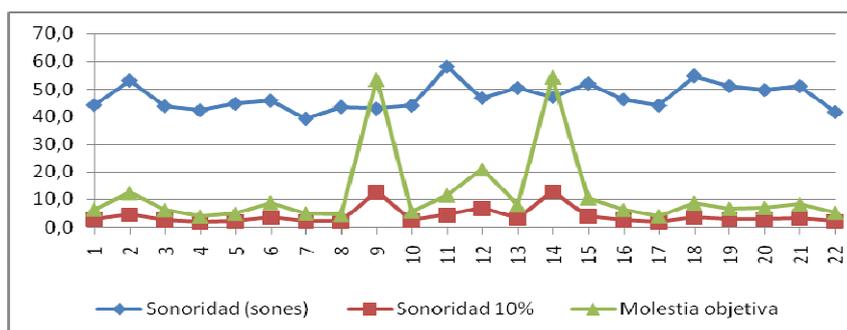


Figura 6 – Parámetros psicoacústicos más representativos con suelo laminado AC4 combinado con los 21 materiales intercalados, más el caso 22 en el que se apoyó directamente el suelo laminado sobre el terrazo.

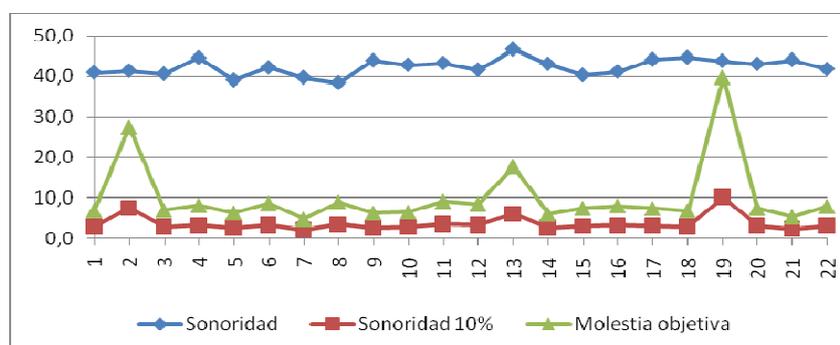


Figura 8 – Parámetros psicoacústicos más representativos con suelo laminado AC5 combinado con los 21 materiales intercalados, más el caso 22 en el que se apoyó directamente el suelo laminado sobre el terrazo.

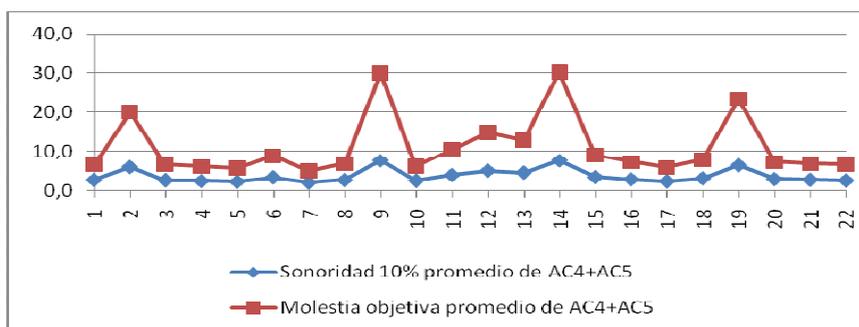


Figura 9 –Sonoridad 10% y molestia objetiva promedio.

3.2 Simulación en FEM

Se han lanzado dos simulaciones para dos combinaciones de materiales: AC4 con material 1 y AC4 con material 15. Las características de los materiales amortiguantes son las siguientes:

- El material 1 es un caucho con una densidad de 1100 kg/m^3 y un módulo de elasticidad de $3\text{e}6 \text{ Pa}$.
- El material 15 es un polietileno espumado con una densidad de 30 kg/m^3 y un módulo de elasticidad de $0.3\text{e}6 \text{ Pa}$.

El análisis transitorio se realiza con un impulso de 0.0005 s de duración de forma que al ser de tan pequeña duración se excitan las frecuencias medias-altas. De este modo se puede llegar a obtener una FFT con una frecuencia máxima de 4000 Hz .

En las figuras 10 y 11 se observan dos momentos de la progresión de las ondas de cada combinación de materiales simuladas. Si utilizamos la velocidad del sonido en el aire para calcular el avance de la presión sonora se comprueba que el resultado es coherente $344 \cdot 0.003225 = 1.19 \text{ m}$, ya que el radio del círculo de aire es de 1 metro

Con el paso del tiempo a 0.049 segundos del impacto se puede observar que el contorno de absorción infinita funciona al no existir reflexiones de onda.

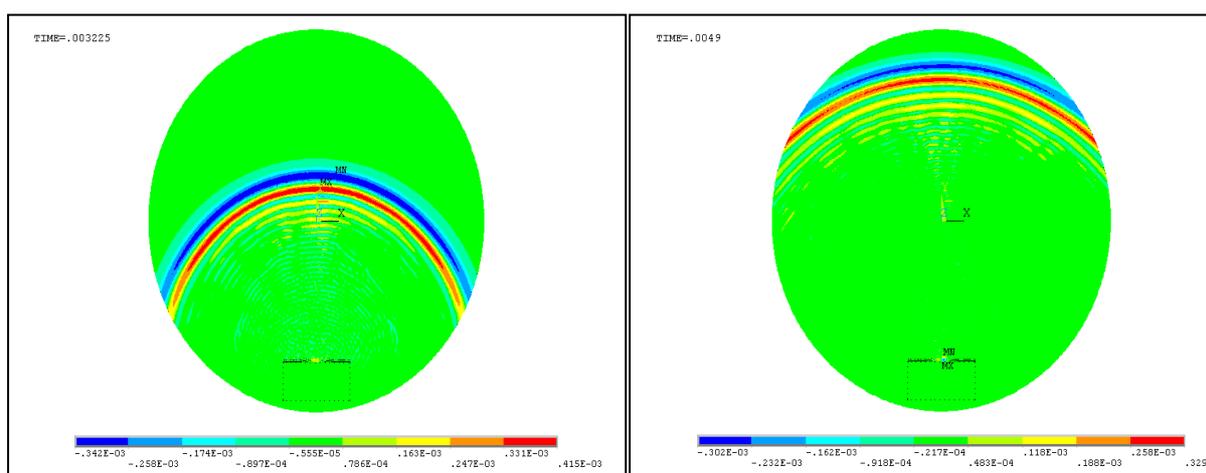


Figura 10 – Progresión de la onda sonora para AC4 y material 1

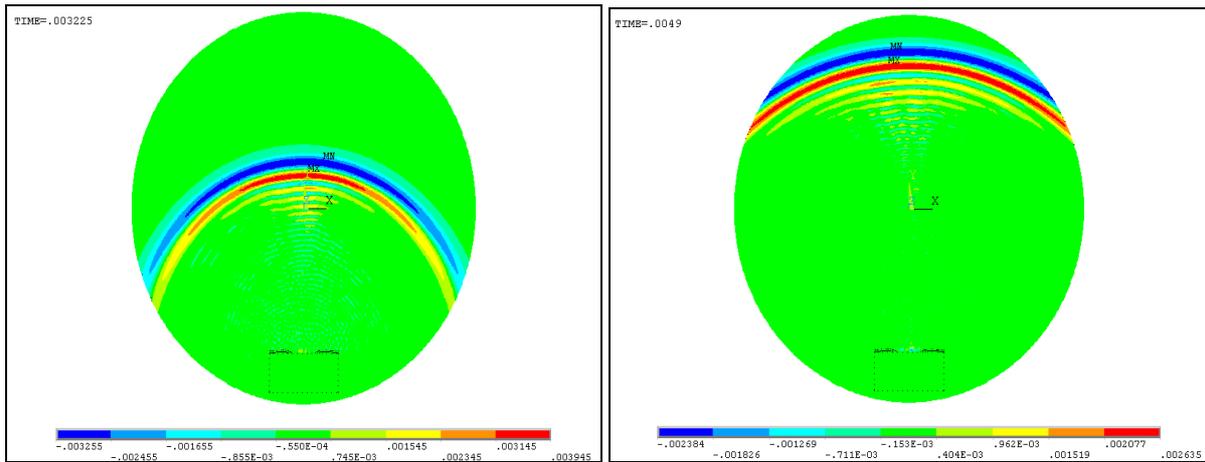


Figura 11 – Progresión de la onda sonora para AC4 y material 21

En el modelo simulado se obtiene la variación de presión sonora en un punto situado a 1 m de distancia del suelo laminado, haciendo coincidir la distancia con la posición del micrófono en el ensayo experimental. Esta señal impulsiva se representa por las gráficas de las figuras 12 y 13. La situada a la izquierda representa el transitorio y se ha obtenido procesando con MATLAB. También se obtiene la respuesta en frecuencia FFT que se sitúa a la derecha de la figura 12. Esta figura corresponde a la combinación de AC4 y material 1 cuya densidad y modulo de Young seon superiores a los del material 15 cuyas dos gráficas se han representado en la figura 13.

Se puede observar que la amplitud de la señal es superior en el material 15 que en el material 1, datos que coinciden cualitativamente con el método experimental.

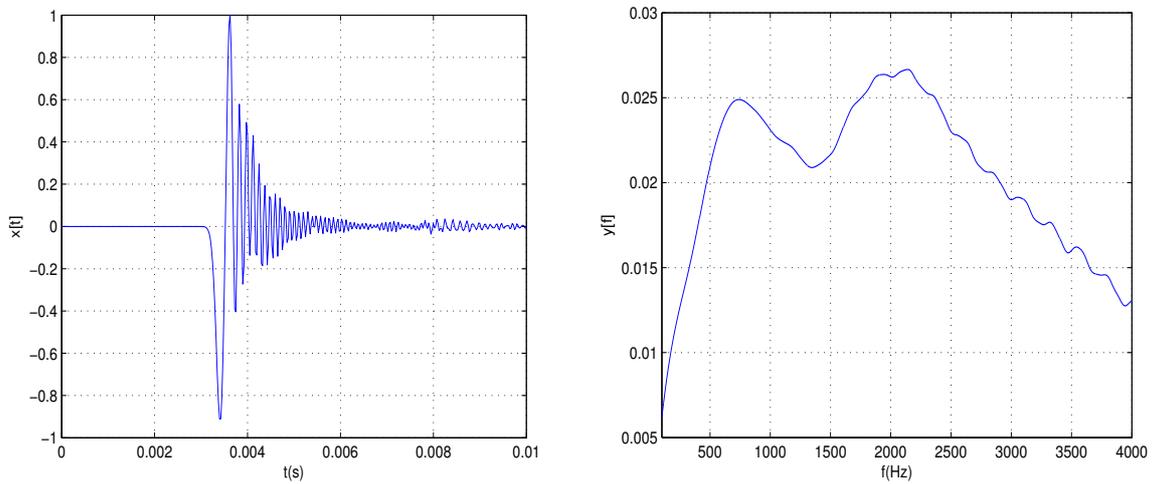


Figura 12 – Transitorio y respuesta en frecuencia para AC4 y material 1

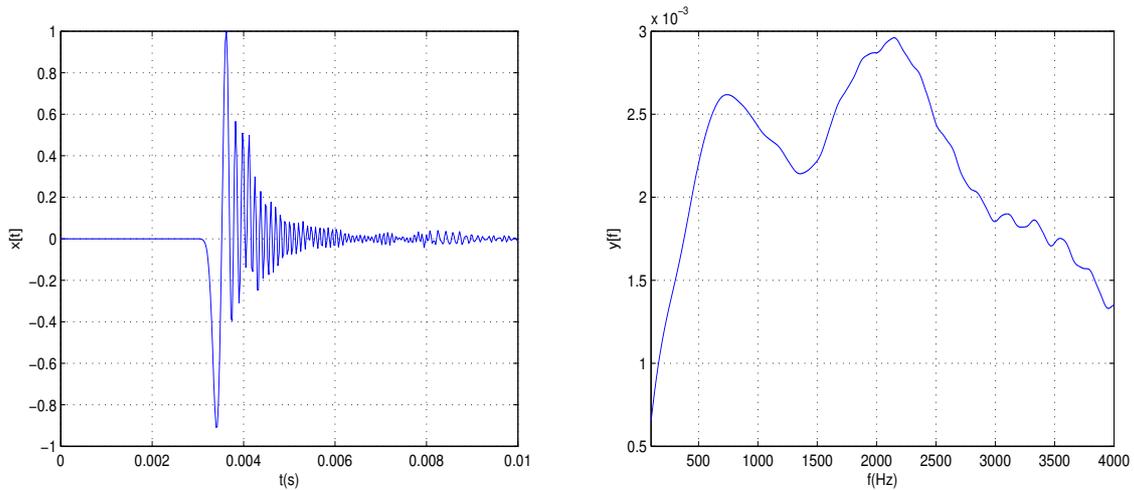


Figura 13 – Transitorio y respuesta en frecuencia para AC4 y material 15

4 Conclusiones

Se ha propuesto una configuración experimental para la evaluación de suelos laminados que es mucho más simple que la propuesta por la normativa. El análisis de los registros efectuados no confirma totalmente la viabilidad de la propuesta efectuada. El modelo numérico propuesto y aplicado nos permite diferenciar distintos tipos de materiales y las respuestas acústicas obtenidas a partir de este son similares a las obtenidas experimentalmente.

El siguiente paso será evaluar suelos laminados haciendo uso de una construcción como el que se indica en la figura 12, de forma que el suelo se instalará en uno de los planos horizontales. Se comparará el nivel de vibración en cada una de las paredes y los suelos adyacentes con la situación sin suelo laminado

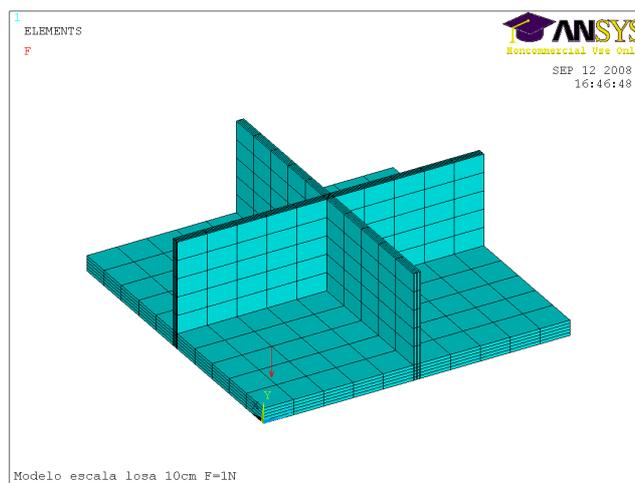


Figura 14 – Modelo a analizar en un futuro inmediato

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por Ministerio de Educación y Ciencia a través de los proyectos BIA2007-68098-C02-01 y BIA2007-68098-C02-02

Referencias

- [1] E. Zwicker, H. Fastl. Psychoacoustics. Facts and models. Ed. Springer. München, Germany 2007
- [2] Baron, N. Some acoustical properties of floating floors used on trains. Licentiate Thesis. Stockholm, Sweden 2004
- [3] Association of European Producers of Laminate Flooring. EPLF drum sound test norm 021029-3 “Laminate floor coverings-Determination of drum sound generate by means of a tapping machine”. Germany 2004.
- [4] Gadea, J.M.; Ramis, J.; Vera, J.; Yebra, M.S. Un método simple para la evaluación experimental del efecto tambor para suelos laminados. Tecnicústica, Gandia España, 2006