

ESTUDIO DE LA MEJORA DE AISLAMIENTO A RUIDO DE IMPACTO DE SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS MIXTAS CLT / HORMIGÓN + NEUMÁTICO FUERA DE USO EN PROBETAS DE TAMAÑO REDUCIDO*

STUDY OF THE IMPROVEMENT OF IMPACT NOISE INSULATION OF MIXED CONSTRUCTION SOLUTIONS CLT / CONCRETE + END-OF-LIFE TYRES IN SMALL-SIZED TEST SPECIMENS

Jose-Antonio Balmori^{1,}*



<https://orcid.org/0000-0003-4385-5765>

Marta Herráez²

<https://orcid.org/0000-0001-9037-8805>

Alberto Gutiérrez²

<https://orcid.org/0009-0006-5111-6398>

Milagros Casado³

<https://orcid.org/0000-0002-1860-5230>

María Machimbarrena⁴

<https://orcid.org/0000-0003-3484-4159>

RESUMEN

La madera contralaminada es un producto industrializado de madera que ha incrementado exponencialmente su uso en la industria de la construcción debido a su eficiencia estructural, su ligereza, su carácter sostenible y su competitividad económica. Así, en los últimos años, se está utilizando este producto para la construcción de edificación colectiva (edificación en altura) en toda Europa, desarrollando un nuevo sistema estructural y constructivo eficiente y de alta calidad. Sin embargo, el uso de estos sistemas constructivos ligeros empleando madera contralaminada, en comparación con los sistemas pesados tradicionales, no presentan un buen comportamiento de aislamiento al ruido de impacto en los suelos de sus construcciones colectivas. Para alcanzar aislamientos similares a los sistemas tradicionales, en el diseño de las estructuras de madera se incorporan nuevos materiales elastoméricos, la mayoría con un coste elevado, en colaboración con materiales de mayor densidad (mortero/hormigón) o multicapa (aislantes acústicos específicos). Este estudio investiga la

¹Universidad de Valladolid. Escuela Técnica Superior de Arquitectura. GIR Estructuras y Tecnología de la madera. Valladolid, España.

²Universidad de Valladolid. Escuela de Ingenierías Industriales. Valladolid, España.

³Universidad de Valladolid. Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias. GIR Estructuras y Tecnología de la madera. Palencia, España.

⁴Universidad de Valladolid. Escuela Técnica Superior de Arquitectura. GIR Arquitectura y Energía. Valladolid, España.

*Este artículo es una versión revisada por pares del trabajo presentado previamente en el III Congreso Ibero- Latinoamericano de la Madera en la Construcción (CIMAD), celebrado en Madrid, España en junio 2024. Editora asociada: Eva Hermoso-Prieto

*Autor de correspondencia: joseantonio.balmori@uva.es

Recibido: 26.07.2024 Aceptado: 29.11.2024

introducción de materiales elásticos fabricados a partir de neumáticos fuera de uso (NFU), con propiedades elásticas semejantes a los elastómeros actuales, como alternativa para mejorar el comportamiento acústico de estas construcciones ligeras. Para ello, se realizan ensayos en laboratorio de la reducción de transmisión del ruido de impacto sobre especímenes de tamaño reducido, con distintos espesores de manta de NFU, sobre una base de panel mixto de madera contralaminada (CLT) y hormigón. Los resultados muestran mejoras de aislamiento a ruido de impacto (>8 dB) en todos los casos estudiados (mantas de NFU de 4 mm, 10 mm y 20 mm) por encima de los 160 Hz. También se alcanzan mejoras de aislamiento por encima de los 250 Hz al sustituir parcialmente (15%) árido por granalla NFU en la dosificación de la losa de hormigón. La introducción de este tipo de materiales (neumáticos fuera de uso) en la industria de la construcción como aislantes acústicos permite reutilizar, de forma controlada, un material que actualmente genera graves problemas medioambientales por su incontrolado almacenamiento y escaso volumen reciclado. Así mismo, contrarresta las limitaciones acústicas de los productos derivados de la madera, como los paneles mixtos CLT-hormigón, e incrementando las ventajas de sostenibilidad de estos sistemas constructivos de madera.

Palabras clave: Aislamiento acústico, construcción con madera, madera contralaminada (CLT), neumático fuera de uso, sostenibilidad.

ABSTRACT

Cross-laminated timber is an industrialised wood product that has increased exponentially in its use in the construction industry due to its structural efficiency, lightness, sustainable character and economic competitiveness. Thus, in recent years, this product is being used for the construction of collective buildings (high-rise buildings) throughout Europe, developing a new efficient and high quality structural and construction system. However, the use of these lightweight construction systems using cross-laminated timber, compared to traditional heavyweight systems, do not have a good impact sound insulation performance in the floors of collective buildings. To achieve similar insulation to traditional systems, new elastomeric materials, most of them expensive, need to be introduced in wooden structures design, in collaboration with higher density materials (mortar/concrete) or multilayer materials (specific acoustic insulator materials). This study investigates the introduction of elastic materials made from end-of-life tyres (ELT, hereinafter NFU) with elastic properties similar to current elastomers as an alternative to improve the acoustic performance of these lightweight constructions. To this end, laboratory tests are carried out on the reduction of impact noise transmission on small specimens, with different thicknesses of NFU blanket, on a mixed panel base of cross-laminated timber (CLT) and concrete. The results show impact sound insulation improvements (>8 dB) in all cases studied (4 mm, 10 mm and 20 mm NFU blankets) above 160 Hz. Insulation improvements above 250 Hz are also achieved by partially (15%) replacing aggregate with NFU shot in the concrete slab dosage. The introduction of these materials (end-of-life tyres) in the construction industry as acoustic insulators enables the controlled reuse of a material that currently generates serious environmental problems due to its uncontrolled storage and low recycling volume. Besides, it compensates the acoustic limitations of wood-based products, such as cross-laminated timber, and increases the sustainability advantages of these timber construction systems.

Keywords: Sound insulation, timber construction, cross-laminated timber (CLT), end-of-life tyres, sustainability.

INTRODUCCIÓN

Las normativas de edificación europeas actuales demandan a la industria de la construcción sistemas más eficientes energéticamente, más sostenibles, más confortables (con mayores requerimientos de aislamiento acústico), y que incorporen en su fabricación materiales reciclados (European Union. Decision No 1386/2013/EU 2013). Dentro de estas nuevas demandas, la construcción colectiva con productos industrializados derivados de la madera, tal como la madera contralaminada (CLT) ha tomado ventaja frente a los sistemas tradicionales por sus ventajas de sostenibilidad, bajo impacto y competitividad económica (Brandner *et al.* 2016, Harte *et al.* 2017). Sin embargo, la relativa baja densidad y bajo módulo elástico de la madera, en comparación con los sistemas tradicionales de construcción pesada, limitan las prestaciones de aislamiento acústico al ruido de impacto (Bucur 2006), siendo este aspecto uno de sus puntos débiles en su uso en edificación colectiva (Kohrmann 2016, Jayalath *et al.* 2021).

Por ello, las mejoras del aislamiento acústico de los sistemas constructivos con madera continúan siendo un reto a analizar y ensayar, para alcanzar diseños más eficientes (Caniato *et al.* 2021, Mohajerani *et al.* 2020). Una de las estrategias de diseño para mejorar el aislamiento al ruido de impacto es la utilización de elementos pesados (losas mortero/hormigón) y el desacople de capas mediante la colocación de materiales elastoméricos (bandas o mantas elásticas) (Tonelli *et al.* 2014).

El uso de láminas elásticas como aislante a ruido de impacto ha sido analizado ampliamente sobre estructuras pesadas (estructuras de hormigón). De este modo, Foret *et al.* (2011) muestra la mejora que supone a bajas frecuencias la colocación de distintas bandas de materiales elásticos de espesor reducido.

Por otro lado, otros investigadores como Pereira *et al.* (2016) han analizado la mejora acústica aportada por capas de hormigón sobre estructuras de madera. Donde, con espesores reducidos (<50 mm) sobre estructuras de madera, alcanzan mejoras claras a altas frecuencias, pero con limitaciones a bajas frecuencias. Con el objetivo de mejorar las prestaciones a bajas frecuencias sin aumentar desproporcionadamente la masa de las losas de hormigón (colocadas fundamentalmente por requerimientos acústicos y no puramente estructurales), algunos investigadores han utilizado ambas estrategias: masa y bandas elásticas.

Así, la incorporación de materiales elásticos para la reducción de la transmisión de ruido de impacto entre la estructura de madera y la losa de hormigón ha sido estudiada por Arenas y Sepúlveda (2022), determinando que el aumento de rigidez y la rotura elástica entre ambos elementos aumenta significativamente el aislamiento a ruido de impacto. Otra línea de investigación similar, pero sustituyendo las capas elásticas por agregados de materiales elásticos dentro de los áridos del propio hormigón, ha sido realizada por Martins *et al.* (2015), realizando una investigación sobre la agregación de material elástico directamente en la dosificación del hormigón. Aplicado a capas de compresión de estructuras mixtas madera-hormigón, obtiene mejoras significativas en el aislamiento a ruido de impacto con agregados de corcho natural, reduciendo además la masa de la estructura.

Dentro de estas estrategias, utilización de materiales elásticos en formato de manta o agradados, se abre una línea de investigación reciente, como es la incorporación de material reciclado proveniente de los neumáticos fuera de uso (NFU) para mejorar el comportamiento frente al ruido de impacto. En la actualidad, los neumáticos fuera de uso generan graves problemas medioambientales debido a que son no-biodegradables, tienen una vida útil muy corta y su reciclado es un proceso complejo y caro. Por ello, simplemente se acumulan en instalaciones a cielo abierto, con el riesgo de alta toxicidad en caso de incendio (Downard *et al.* 2015). No obstante, con un proceso industrial sencillo (triturado) puede emplearse en construcción como banda/manta elástica (Aliabdo *et al.* 2015), o como un agregado (granalla/gránulos) incorporados en porcentajes bajos en la dosificación de morteros u hormigones con el fin de mejorar sus propiedades elásticas (Bu *et al.* 2022).

Esta investigación se centra en las mejoras de aislamiento acústico al ruido de impacto de soluciones constructivas mixtas CLT con hormigón, utilizando productos derivados de neumático fuera de uso (NFU). El uso de este material se analiza tanto como en formato de banda elástica en colaboración con una losa de hormigón, como en formato de granalla agregada directamente a la dosificación de la losa de hormigón.

METODOLOGÍA

Los ensayos se realizan de acuerdo con la norma UNE-EN ISO 16251-1 (2015), que permite la determinación de la mejora del aislamiento al ruido de impacto empleando muestras de tamaño reducido, adaptando esta normativa específica a las singularidades de estructuras ligeras de madera. Como soporte base se toma un panel de CLT (tricapa) de dimensiones 1200x800 mm y espesor 60 mm (Tabla 1), sobre el que se coloca una losa (no conectada) de hormigón en dos variantes. Una losa (Losa A) de espesor 50 mm de hormigón estándar (H-25); y otra losa (Losa B) de espesor 50 mm hormigón con dosificación experimental que incluye gránulos de Neumático Fuera de Uso (NFU) de diámetro 2,5-4 mm (Tabla 2). En esta última losa (Losa B) se ha sustituido parcialmente (<15 %) árido por granalla de NFU ($\phi < 4$ mm) de la dosificación del hormigón empleado.

Tabla 1: Propiedades del CLT usado.

Código	Especie	Espesor (mm)	Densidad (kg/m³)	MOE (MPa)
CLT-60/3capas	<i>Populus x euroamericana</i> I-214	60	365,3 (9,6)	7550,8 (8,9)

() Desviación estándar

Tabla 2: Especificaciones de las losas de hormigón usados.

Código	Espesor (mm)	Densidad (kg/m³)	Dosificación NFU (%)	Granulometría NFU (mm)
Losa A	50	2127,1	0	Sin aditivo NFU
Losa B	50	1785,4	15	de 2,5 a 4

Estas losas de hormigón se montan y desmontan sobre el panel de CLT (soporte base) tal y como se muestra en la Figura 1, generando dos especímenes que denominaremos “CLT+ Losa A” y “CLT+Losa B”. Sobre estos especímenes se instalarán 3 tipos de mantas de NFU, de distinto espesor (Tabla 3) para estudiar la mejora de aislamiento a ruido de impacto que proporcionan. En concreto, se ensayan ambos especímenes sin revestimiento y con las 3 mantas de NFU de espesores 4/10/20 mm (NFU4/NFU10/NFU20). Estas mantas de NFU son fabricadas por la empresa BERLÁ (Valladolid, España), y sus propiedades pueden consultarse en Balmori *et al.* (2023).

Tabla 3: Especificaciones de las mantas de NFU usados.

Código	Producto	Espesor (mm)	Densidad (kg/m³)	Composición
NFU4	Manta de caucho	4	980,0 (12,8)	Granulometría de 0,5 mm -2,5 mm. Conformada por desenrollo.
NFU10	Manta de caucho	10	783,5 (13,4)	Granulometría de 0,5 mm -2,5 mm. Conformada por desenrollo.
NFU20	Loseta de caucho	20	760,9 (16,5)	Granulometría de 0,5 mm -2,5 mm. Conformada por moldeado.

() Desviación estándar (kg/m³)

Cada espécimen de forjado tipo de CLT con losa se coloca sobre una estructura soporte que está aislada de las vibraciones provenientes del suelo mediante elastómeros comerciales tipo Sylomer SR42 bajo CLT, y tipo Sylomer SR450 en suelo (Figura 1), garantizando un correcto aislamiento en un modelo elástico de análisis siguiendo las indicaciones de la norma UNE-EN ISO 16251-1 2015.

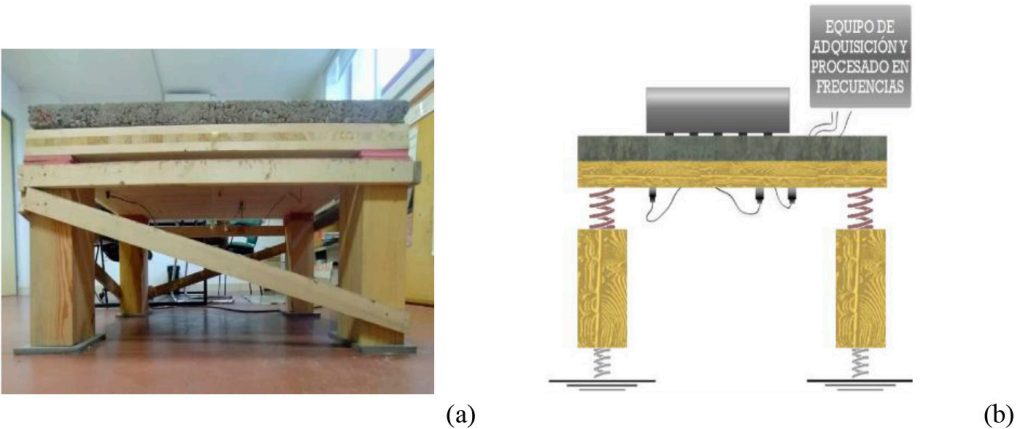


Figura 1: (a) maqueta instalada sobre una estructura de soporte (b) Representación esquemática del sistema.

La medición de vibraciones se realiza con 3 acelerómetros piezoeléctricos uniaxiales marca BRÜEL & KJAER modelo BK 4508-B-003, que se colocan en puntos concretos y constantes, aleatoriamente distribuidos (siguiendo las indicaciones de la norma UNE-EN ISO 16251-1 (2015)) fijados con cera en la cara inferior del panel de CLT (Figura 2a). Adicionalmente, se coloca un cuarto acelerómetro en la base de la estructura soporte para garantizar que el montaje tiene un correcto aislamiento vibratorio del espécimen respecto al ruido proveniente del suelo. El equipo de adquisición de datos utilizado es un SIRIUS mini de 4 canales, controlando toda la instrumentación y toma de datos con el software DEWEsoftX3 (2022). La excitación de la estructura se realiza, sin registrar entrada, empleando una máquina de impacto normalizada de la marca Look Line Acoustic modelo EM-050, colocada en dos posiciones diferentes en cada ensayo (Figura 2b), siguiendo las indicaciones de la norma UNE-EN ISO 16251-1 (2015).

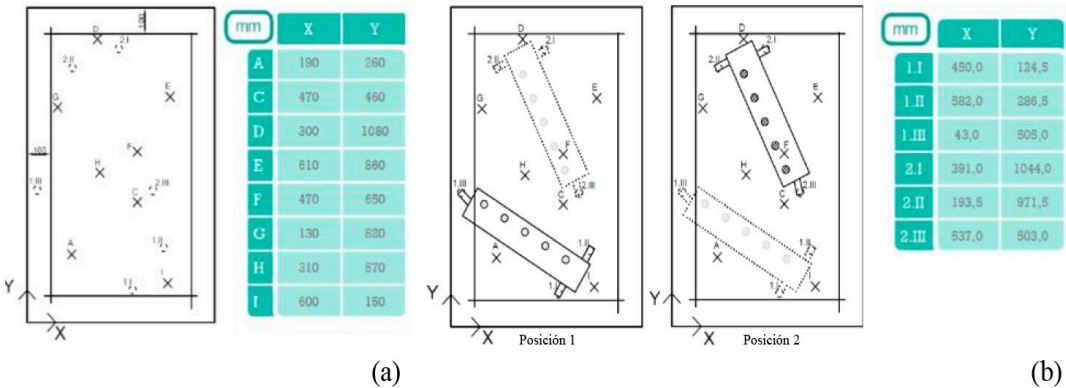


Figura 2: Instrumentación de los especímenes. (a) Posición de los 3 acelerómetros colocados en la cara inferior del CLT. (b) Posición de las patas de la máquina de ensayos en posición 1 y posición 2, colocada en la cara superior.

En un análisis de este tipo, (también conocido como análisis de la señal o dinámico), solo se necesita recoger la información de la respuesta del sistema, por lo que la cadena de medida consiste en usar acelerómetros, que recopilan los datos de aceleración de respuesta a lo largo del tiempo, y un equipo de procesamiento de medidas, que permite obtener el espectro la vibración registrada mediante el uso de Transformada Rápida de Fourier FFT. No obstante, es imprescindible provocar una perturbación, por lo que se utiliza una máquina de impacto normalizada (Figura 3), pero no se recoge información de la excitación durante su funcionamiento.



Figura 3: Montaje experimental de una probeta completa con la máquina de impactos en una de las posiciones de ensayo.

Siguiendo esta metodología, inspirada en la metodología utilizada en suelos pesados, recogida en la norma UNE-EN ISO 16251-1 (2015), se han realizado un total de 162 mediciones temporales, analizando su espectro en un rango de frecuencias de 50-5000 Hz con una precisión de bandas de tercios de octava.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Se han ensayados dos tipos de configuraciones previamente definidas, partiendo del mismo panel de CLT base, sobre el que se ha colocado en un caso, una losa de hormigón estándar (Losa A) y, en el otro caso, una losa de hormigón con granalla de NFU (Losa B). Con estas dos configuraciones, se han ensayado a su vez diversos recubrimientos de NFU (mantas de 4/10/20 mm) para evaluar la mejora a ruido de impacto de cada una de las variantes.

En todos los ensayos se ha medido el nivel de vibraciones de fondo y se han corregido las medidas según se indica en la norma UNE-EN ISO 16251-1 (2015) en caso de ser necesario. En lo sucesivo, los niveles expresados en el texto en dB, se refieren a dB de nivel de aceleración, tomando como aceleración de referencia es $a_0 = 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Espécimen con losa de hormigón estándar (Losa A)

En este apartado se estudia cómo se comportan las distintas mantas NFU cuando se colocan sobre el espécimen “CLT + Losa A”.

En la Figura 4 se muestran los espectros de los niveles de aceleración promedio espacial (tanto de las 3 posiciones del acelerómetro como de las 2 posiciones de la máquina) corregidos (eliminado el ruido de fondo), en bandas de tercios de octava. Se ha realizado en las cuatro posibles situaciones de ensayo, con los tres revestimientos (azul NFU4, rojo NFU10, negro NFU20), y sin revestimiento (gris SIN0 desnudo). Se pueden distinguir, principalmente, dos intervalos de frecuencia: hasta la banda de 200 Hz, el nivel de aceleración alcanzado en las cuatro situaciones es muy similar (variaciones del orden de 2,2 dB; 4,8 dB como máximo); y a partir de los 250 Hz, es cuando comienza a haber unas diferencias claras, sobre todo, entre los niveles alcanzados por el espécimen sin revestimiento y, en menor medida, por el espécimen con los revestimientos (llegando a encontrarse una diferencia de hasta 74,6 dB, entre sin0 y NFU10), y con la capa de NFU de espesor 4 mm y las capas con espesores mayores (llegando a encontrarse diferencias de hasta 30,7 dB entre NFU4 y NFU10).

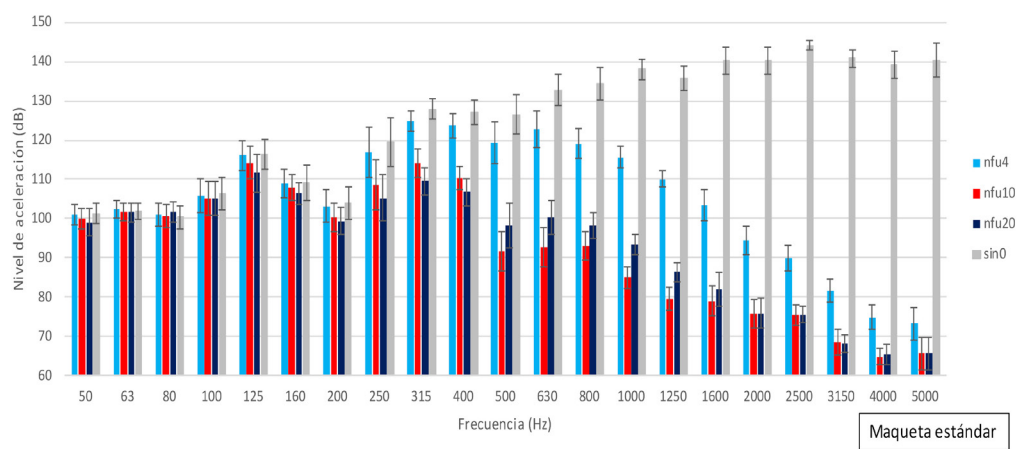


Figura 4: Espectro de los niveles promedio de aceleración promedio medidos sobre el espécimen *CLT*+ *Losa A* en cuatro condiciones distintas: Sin revestimiento (*sin0*) y con los tres revestimientos ensayados (*NFU4*, *NFU10* y *NFU20*).

A partir de estos valores se obtiene, para cada una de las mantas investigadas, la mejora del aislamiento al ruido de impacto ΔL en cada banda de tercio de octava, de acuerdo con la Ecuación 1, que incluye todas las combinaciones posibles entre posiciones de acelerómetros y posiciones de la máquina de impactos:

$$\Delta L = \frac{1}{t * a} \sum_t \sum_a \Delta L_{t,a} \text{ dB} \quad (1)$$

Donde ($\Delta L_{t,a}$), es la diferencia entre los niveles de aceleración conseguidos para cada posición de los acelerómetros “a”, y para cada posición de la máquina de impactos “t” sobre la losa estándar (*Losa A*) sin revestimiento y los niveles de aceleración obtenidos para ese mismo par de posiciones y para la manta considerada. Este procedimiento de cálculo se ajusta a lo sugerido en la norma UNE-EN ISO 16251-1 (2015) para suelos pesados.

La Figura 5a representa la mejora obtenida en todo el rango de frecuencias investigado mientras que la Figura 5b representa una ampliación de la Figura 5a, para un rango de frecuencias restringido entre 50 Hz y 400 Hz.

Los resultados revelan que, a bajas frecuencias (desde los 50 Hz hasta los 100 Hz), la mejora de aislamiento a ruido de impacto es relativamente pequeña (del orden de 1 dB). Sin embargo, por encima de 100 Hz, todos los revestimientos mejoran el aislamiento a ruido de impacto, siendo, en el rango de 100 Hz hasta 400 Hz (Figura 5b), mejor el *NFU20* (hasta 3,5 dB más que *NFU10*); mientras que, en el rango que va desde 500 Hz hasta 2000 Hz (Figura 5a), el *NFU10* aísla más que el *NFU20* (hasta 6,5 dB más).



Figura 5: Mejora del aislamiento al ruido de impacto conseguido con las distintas mantas (con respecto al hormigón estándar sin ningún revestimiento), en tercios de octava. (a) Rango completo 50-5000 Hz. (b) Rango restringido 50-400 Hz. Escala ampliada.

Espécimen con losa de hormigón con granalla de neumatico reciclado fuera de uso -NFU- (Losa B)

En este caso, el estudio se realiza sobre el espécimen CLT+Losa B. Los ensayos y cálculos realizados son los mismos descritos anteriormente para el espécimen CLT+Losa A, incluido el cálculo correspondiente a la mejora de aislamiento a ruido de impacto empleando la Ecuación 1.

La Figura 6 muestra los niveles de aceleración obtenidos sobre el espécimen CLT+Losa B sin revestimiento (gris SIN0 desnudo) y tras instalar los tres revestimientos (azul NFU4, rojo NFU10, negro NFU20). Se pueden distinguir, de nuevo, dos rangos de distinto comportamiento: desde los 50 Hz hasta los 125 Hz, los niveles son muy similares (diferencias del orden de 5 dB, 11,4 dB como máximo) en las cuatro situaciones, y a partir de los 160 Hz, comienzan a aparecer diferencias en los niveles alcanzados (en esa banda, la diferencia entre SIN0 y NFU20 es del orden de 8 dB).

La muestra sin revestimiento se aleja de las que sí tienen revestimiento a altas frecuencias, y sucede, aunque en menor medida, como en el caso de las muestras con la losa de hormigón estándar (Figura 4), que los niveles de aceleración con el revestimiento ‘NFU10’ son menores que con la manta de espesor 20 mm (NFU20) (valores del orden de 8 dB de diferencia), en el rango que va desde los 500 Hz hasta los 1600 Hz, lo cual se traduce en que, en ese rango de frecuencias, el revestimiento NFU10 proporcionaría mejor aislamiento a ruido de impacto.

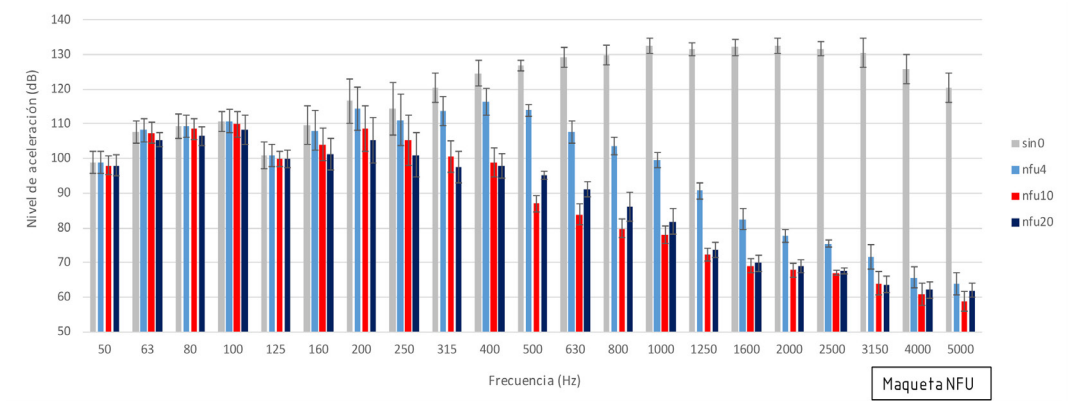


Figura 6: Niveles promedio de aceleración medidos sobre el espécimen CLT+Losa B en cuatro condiciones distintas: SIN revestimiento y con los tres revestimientos ensayados (NFU4, NFU10 y NFU20).

A continuación, se presenta la mejora del aislamiento obtenida con cada manta NFU con respecto al espécimen CLT+Losa B sin revestimiento. La Figura 7a representa la mejora obtenida en todo el rango de frecuencias investigado, mientras que la Figura 7b representa una ampliación de la Figura 7a, para un rango de frecuencias restringido entre 50 Hz y 400 Hz.

Como puede observarse, a diferencia de lo observado para el espécimen CLT+Losa A, a bajas frecuencias, el revestimiento NFU20 es el que mejor se comporta (hasta un valor para ΔL de 2,2 dB). En la banda de 125 Hz, los revestimientos de NFU10 y NFU20 se comportan de forma análoga y a partir de esta frecuencia, ambos mejoran significativamente el aislamiento (un aumento de 5 dB con respecto a la banda de 125 Hz) y siempre mucho más que el revestimiento NFU4. En el rango de 125 Hz hasta los 400 Hz (Figura 7b), la muestra con la capa de espesor 20 mm supera, en cuanto al aislamiento, a la de 10 mm, y entre los 400 Hz y los 1600 Hz, (Figura 7a), es el revestimiento NFU10 el que proporciona la mayor mejora del aislamiento al ruido de impacto (hasta una diferencia de 6,2 dB con respecto a NFU20), igualándose su comportamiento en el rango de frecuencias por encima de 1600 Hz.

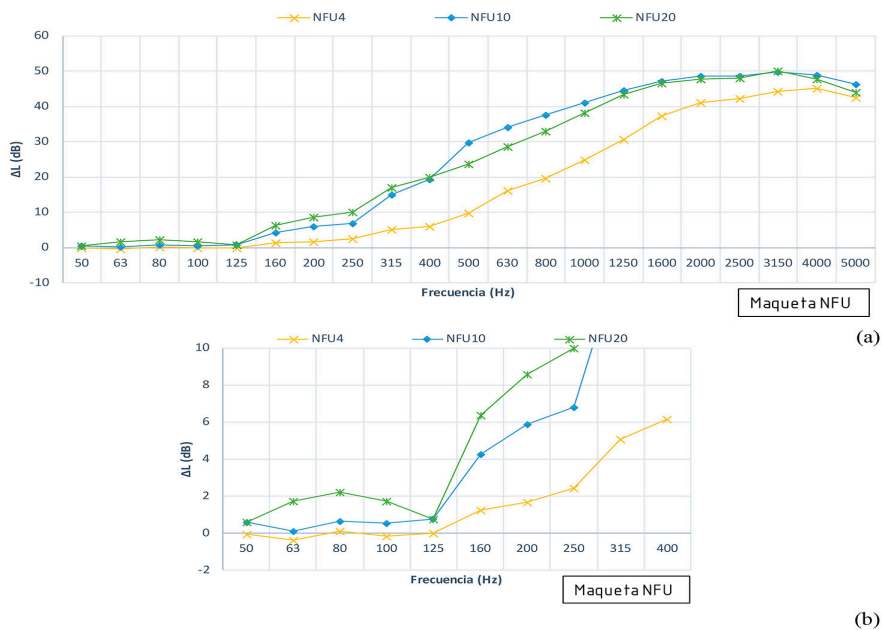


Figura 7: Mejora del aislamiento al ruido de impacto conseguido con las distintas mantas (con respecto al hormigón con NFU sin ningún revestimiento), en tercios de octava. (a) Rango completo 50-5000 Hz. (b) Rango restringido 50-400 Hz. Escala ampliada.

Comparativa entre los dos tipos de losas

Si bien en ambas configuraciones (CLT+Losa A, y CLT+Losa B) el uso de mantas de NFU mejora el aislamiento a ruido de impacto (Figura 4 y Figura 6), los resultados experimentales (Figura 8). evidencian que el espécimen cuya losa de hormigón incluye la granalla de NFU en su composición (Losa B), presenta un mejor comportamiento frente al ruido de impacto por encima de los 250 Hz, mostrando un comportamiento variable por debajo. Por tanto, la incorporación de granalla NFU a la muestra de hormigón es una propuesta muy interesante a considerar cuando se desee mejorar las prestaciones a ruido de impacto de soluciones constructivas ligeras que incluyan una losa de hormigón.

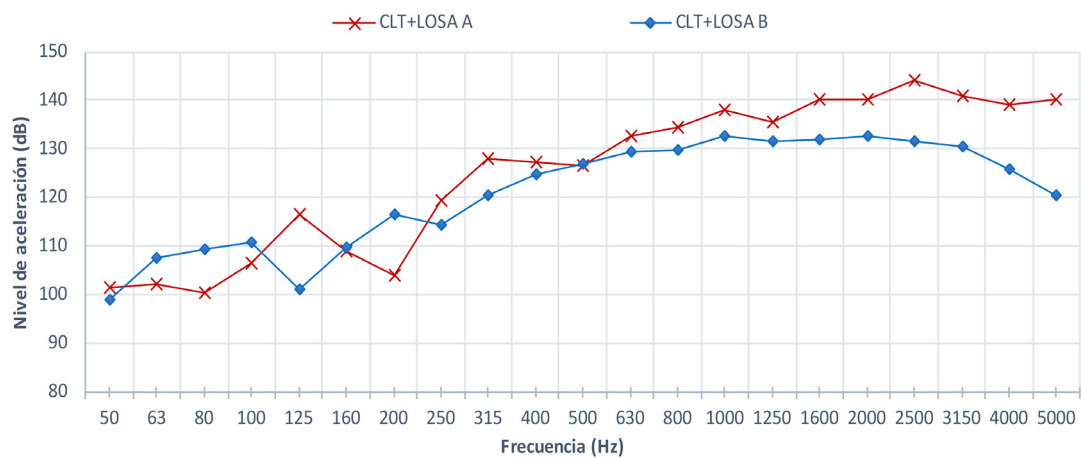


Figura 8: Comparativa del nivel de aceleración promedio medido en el forjado de hormigón estándar (CLT+Losa A) y en el forjado con granalla de NFU (CLT+Losa B), ambos sin revestimientos.

La Figura 9a es una superposición de las Figura 5a y Figura 7a. Esto permite comparar la mejora de aislamiento al ruido de impacto (ΔL) para cada espesor de aislante NFU cuando se instala sobre los distintos especímenes bajo estudio: CLT+Losa A y CLT+Losa B. Las líneas de color amarillo y verde representan la mejora de aislamiento del revestimiento de NFU10 colocado sobre los especímenes que incorporan la Losa A y la Losa B respectivamente. Las líneas azul y negra, corresponden análogamente al revestimiento NFU20 y las dos líneas restantes, que son las de color rojo y fucsia, al revestimiento NFU4. Se pueden distinguir, principalmente, dos intervalos de frecuencia: hasta los 200 Hz (Figura 9b), la mejora de aislamiento obtenido en las seis situaciones es muy similar (variaciones del orden de 2,2 dB - 6,8 dB como máximo); y, a partir de los 250 Hz (Figura 9a), es cuando comienza a haber unas diferencias claras, llegando a encontrarse diferencias de hasta 30,7 dB entre NFU4 y NFU10.

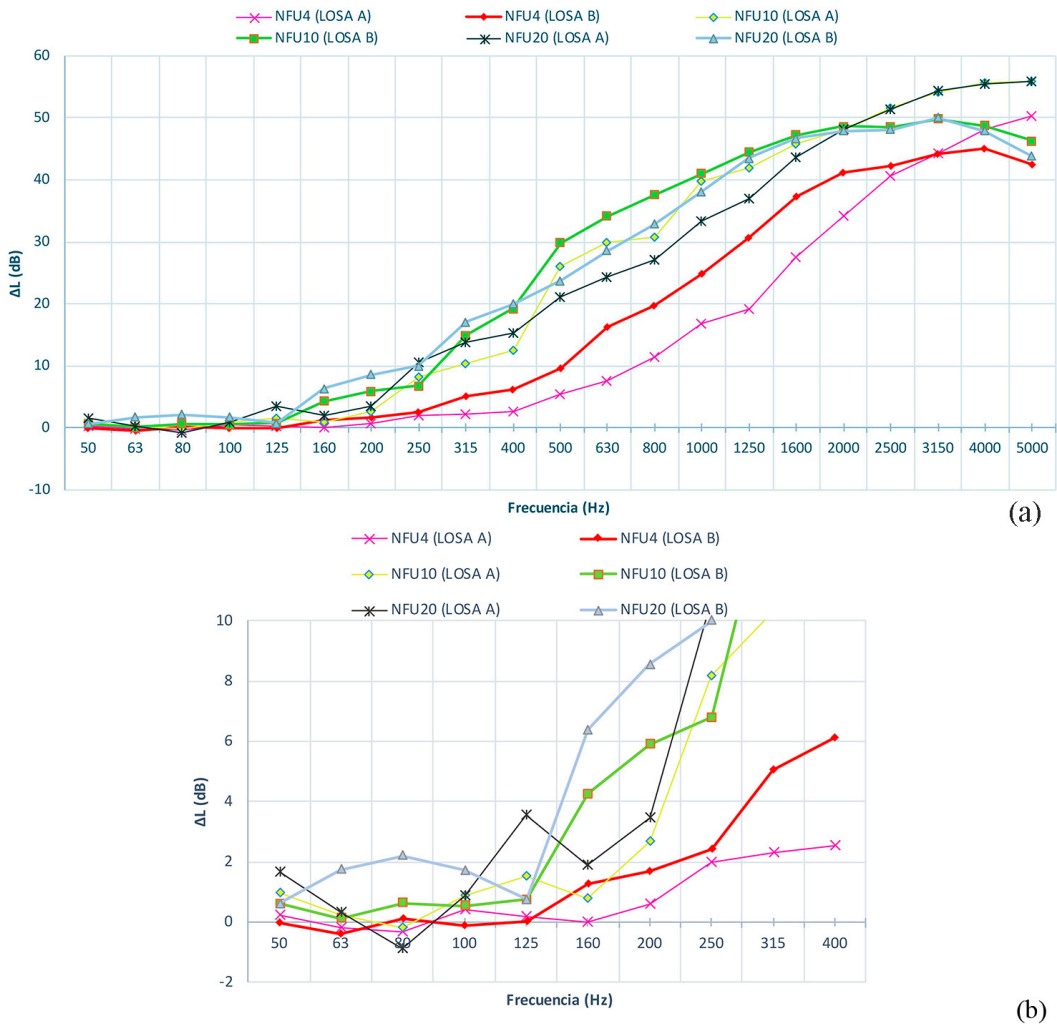


Figura 9: Mejora del aislamiento al ruido de impacto (ΔL) medido con las distintas mantas NFU, respecto a los correspondientes especímenes (con Losa A /con Losa B) sin revestimiento, en tercios de octava.
(a) Rango completo 50-5000 Hz. (b) Escala ampliada del rango entre 50-400 Hz.

A bajas frecuencias, la mayor mejora de aislamiento (ΔL) se consigue con la manta de neumático fuera de uso de espesor 20 mm (NFU20) colocada sobre el espécimen con losa NFU (Losa B) (hasta un valor de ΔL de 2,2 dB). A partir de esta banda, hasta los 400 Hz, las capas ‘NFU10’ y ‘NFU20’ colocadas sobre la losa NFU (Losa B), presentan, ambas, el mejor aislamiento a ruido de impacto (con una diferencia, entre ellas, del orden de 3 dB). A medias y altas frecuencias, es decir, a partir de los 500 Hz y hasta los 2000 Hz, el revestimiento de espesor 10mm, situado sobre la losa NFU (Losa B), presenta el mejor aislamiento posible con respecto al resto de situaciones estudiadas (hasta 5,5 dB más que el NFU10 en la losa estándar (Losa A), en una de las bandas de frecuencia). Por encima de 2000 Hz, el revestimiento de espesor 20 mm (NFU20) es el que aporta una mayor mejora, independientemente del tipo de losa sobre la que se coloque (una diferencia de 5,7 dB con respecto a la línea más cercana, que es la del revestimiento NFU4 sobre la losa estándar (Losa A)).

Los valores de mejora de aislamiento acústico obtenidos (Figura 9) son muy similares a los valores alcanzados en otras investigaciones (Foret *et al.* 2011, Pereira *et al.* 2016, Arenas y Sepúlveda 2022) en referencia al comportamiento acústico de los diferentes revestimientos combinados con suelos ligeros.

Robustez los ensayos

Ruido de fondo

Los ensayos se han llevado a cabo en laboratorio, en un entorno controlado y bajo condiciones constantes. No obstante, como ya se ha comentado anteriormente, se ha realizado la comparación del ruido de fondo con el nivel de aceleración de las mediciones durante el ensayo, evaluando y corrigiendo la influencia de este factor sobre los valores obtenidos en cada banda de frecuencia en los ensayos. La Figura 10 muestra los resultados de niveles de aceleración medidos sobre ambos especímenes, con la manta NFU4, tanto en reposo (ruido de fondo b4) como bajo la acción de la máquina de impactos (nfu4).

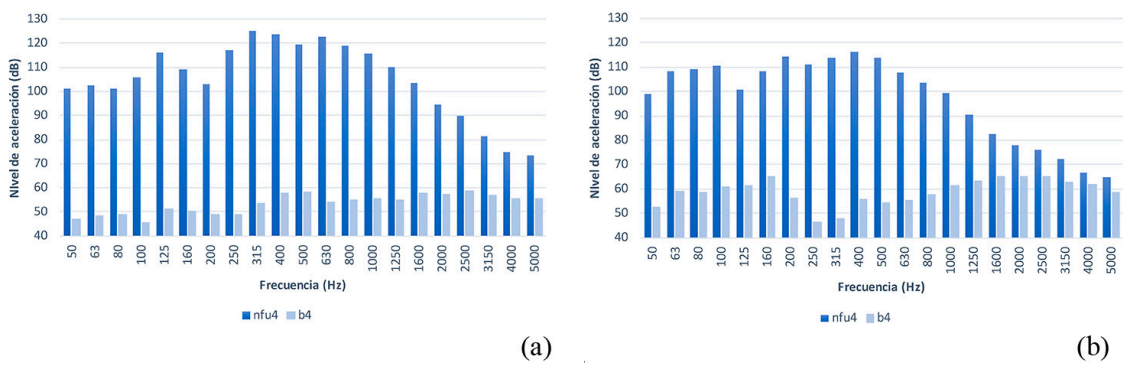


Figura 10: Comparativa del ruido de fondo (b4-azul claro) con medidas durante un ensayo (a) hormigón estándar, panel de CLT y NFU de espesor 4 mm. (b) hormigón con NFU, panel de CLT y NFU de espesor 4 mm.

Repetibilidad de los niveles de aceleración en el tiempo

Del mismo modo, se han repetido los mismos ensayos sobre los mismos puntos de lectura y en distintas posiciones de acelerómetros en periodos de tiempo distinto, y tras desmontar y montar cada espécimen. El objeto de estos ensayos redundantes es verificar la repetibilidad de los valores obtenidos entre ensayos, garantizando de este modo la robustez del sistema de medida.

La Figura 11 muestra, a título de ejemplo, los resultados de las dos medidas distintas realizadas sobre el espécimen CLT+Losa A, para dos revestimientos distintos (a) NFU10 y (b) NFU20.

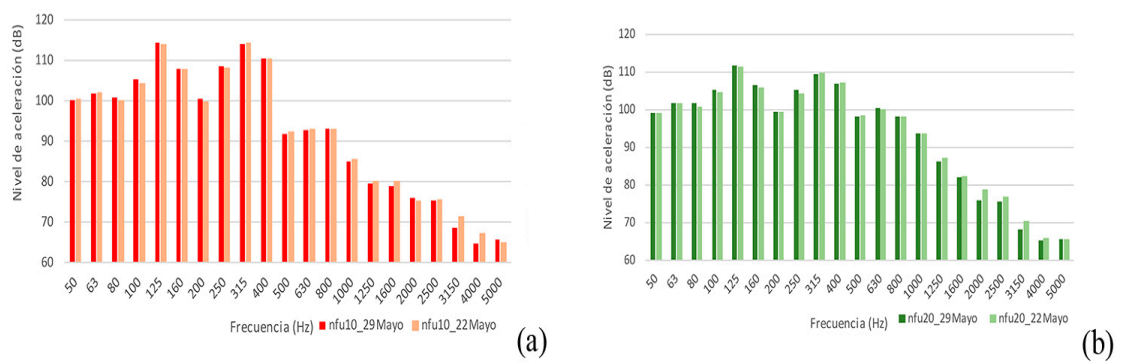


Figura 11: Comparativa entre las mediciones hechas en dos momentos distintos para comprobar la repetibilidad. (a) muestra NFU de 10 mm. (b) muestra NFU de 20 mm.

Muestreo espacial de los niveles de aceleración

Debido a las características del ensayo, cabe esperar que los niveles de vibración medidos muestren una cierta dependencia espacial. Por lo que la norma UNE-EN ISO 16251-1 (2015), en la que se inspira este trabajo, propone la realización de un mínimo muestreo espacial de los niveles de vibración medido, usando así mismo dos posiciones de máquina de impacto distintas y propone emplear como resultado para cada espécimen el promedio de los todos los niveles de aceleración medidos, Ecuación 1. En este trabajo, se han empleado tres posiciones de acelerómetro y, a la vista de los resultados, el muestreo espacial realizado se considera razonable para el tipo de ensayo y muestras ensayadas.

La Figura 12 muestra, para el espécimen CLT+Losa B, los niveles de aceleración medidos en las tres posiciones de acelerómetro, para dos revestimientos distintos (a) NFU4 y (b) NFU20. Se observa claramente la dependencia del nivel de aceleración con la posición del acelerómetro, tal y como cabe esperar.

Las Figura 4 y Figura 6 (que muestran valores promedios) incluyen las barras de desviación estándar correspondientes a los ensayos sobre cada espécimen. Los valores de desviación estándar calculados oscilan entre 0,3 y 8 dB en función de las muestras y bandas de tercio de octava consideradas, siendo ligeramente mayores en los especímenes sin revestimiento, lo cual tiene sentido pues están más condicionados por posibles modos de vibración de los especímenes.

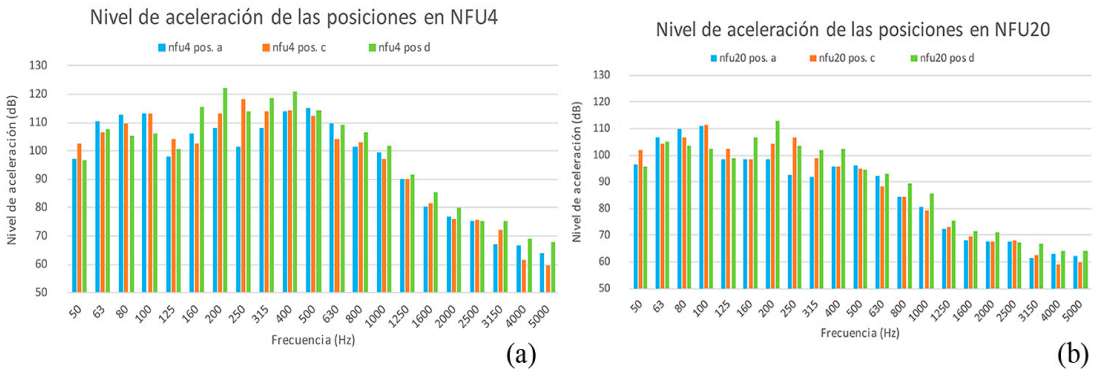


Figura 12: Especimen CLT+Losa B: Niveles de aceleración medidos en las tres posiciones de acelerómetro, para dos revestimientos distintos (a) NFU4 y (b) NFU20.

CONCLUSIONES

Se ha desarrollado una nueva metodología basada en la norma UNE-EN ISO 16251-1 (2015) para el estudio de la mejora del aislamiento al ruido de impacto sobre especímenes de pequeño tamaño de forjados ligeros de madera (en concreto, paneles de CLT + losa de hormigón de espesor reducido (<50 mm)).

Es potencialmente viable, desde el punto de vista técnico y de prestaciones acústicas, el uso de materiales reciclados procedentes de NFU en edificación para mejorar el aislamiento a ruido de impacto. Puede aplicarse de forma directa, en formato de mantas de pequeño espesor sobre un forjado mixto CLT + losa de hormigón, alcanzando mejoras significativas en todos los casos estudiados por encima de los 160 Hz. También puede aplicarse de forma directa, en formato de granalla, en la dosificación de hormigones. La sustitución parcial (<15%) árido por granalla de NFU ($\phi < 4$ mm) de las mezclas de hormigones y morteros empleados en rellenos de suelos, mejora el comportamiento acústico al ruido de impacto de estos elementos a frecuencias medias y altas, reduciendo su peso (entorno a un 10%). En el caso estudiado, el forjado mixto CLT + Losa B presenta un mejor comportamiento frente al ruido de impacto que el forjado CLT+ Losa A, por encima de los 250 Hz.

El uso de mantas anti impacto de NFU de distintos espesores, se logran los mejores resultados generales para el revestimiento de NFU10. Destaca su comportamiento en el rango de 500-2000 Hz: pues se alcanzan reducciones en el nivel de aceleración (mejoras) ΔL entre 25-45 dB, con ligeras diferencias (1-5 dB) respecto

a lo obtenido con el revestimiento de NFU20. En el resto de los rangos de frecuencia, su comportamiento es similar al de NFU20 (diferencias menores, del orden de 1 dB).

Si se compara el efecto de las distintas mantas anti impacto colocadas sobre los dos especímenes (CLT+Losa A y CLT+Losa B), se observa que entre 160-400 Hz, las capas NFU10 y NFU20 se comportan mejor cuando se instalan sobre el espécimen CLT+Losa B (hasta un valor de ΔL de 5-20 dB, con una diferencia de 3-5 dB con respecto al comportamiento de las muestras más próximas). En el rango 500-2000 Hz, destaca el NFU10 también situado sobre el espécimen CLT+Losa B (con diferencias del orden de 2-7 dB, con respecto al comportamiento de las muestras más próximas). Por último, en el rango 2000-5000 Hz, presenta mejor aislamiento la manta NFU20 sobre el espécimen CLT+Losa A (con diferencias del orden de 3-5 dB, con respecto al ΔL de las muestras más próximas).

A la vista de todo lo expuesto, se considera necesario seguir investigando en la optimización de los métodos de ensayo como en el uso de nuevos materiales reciclados como materiales aislantes acústicos.

Contribución de los autores

J. A. B.: Conceptualización, investigación, redacción-borrador original, redacción-revisión y edición. M. H.: Metodología, supervisión, investigación, procesado de datos, redacción-borrador original. A. G.: Metodología, supervisión, investigación, procesado de datos, redacción-borrador original. M. C.: Metodología, redacción-borrador original, redacción-revisión y edición. M. M.: Adquisición de financiación, conceptualización, metodología, revisión.

Agradecimientos

Investigación desarrollada con los fondos del Tercer Premio del Concurso Desafío Universidad-Empresa (edición 2021) financiado por la Junta de Castilla y León. Proyecto: FORjados MIXtos SOSTenibles: FORMISOS. Investigador principal: María Machimbarrena Gutiérrez. Código: NT19. Agradecer la colaboración y apoyo de la empresa Medgón Contratas y Servicios S.L.

REFERENCIAS

AENOR. 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). UNE-EN ISO 16251-1:2015. Madrid, España.

Aliabdo, A.A.; Abd Elmoaty, A.E.M.; AbdElbaset, M.M. 2015. Utilization of waste rubber in non-structural applications. *Construction and Building Materials* 91: 195-207. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.080>

Arenas, J.P.; Sepúlveda, L. 2022. Impact sound insulation of a lightweight laminate floor resting on a thin underlayment material above a concrete slab. *Journal of Building Engineering* 45. e103537. <http://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103537>

Balmori, J.A.; Casado-Sanz, M.; Machimbarrena, M.; Quirós-Alpera, S.; Mostaza, R.; Acuña, L. 2023. The Use of Waste Tyre Rubber Recycled Products in Light weight Timber Frame Systems as Acoustic Insulation: A Comparative Analysis of Acoustic Performance. *Buildings* 14(1). e35. <https://doi.org/10.3390/buildings14010035>

Brandner, R.; Flatscher, G.; Ringhofer, A.; Schickhofer, G.; Thiel, A. 2016. Cross laminated timber (CLT): overview and development. *European Journal of Wood and Wood Products* 74: 331-351. <http://doi.org/10.1007/s00107-015-0999-5>

Bu, C.; Zhu, D.; Lu, X.; Liu, L.; Sun, Y.; Yu, L.; Xiao, T.; Zhang, W. 2022. Modification of Rubberized Concrete: A Review. *Buildings* 12 (7): 999. <https://doi.org/10.3390/buildings12070999>

Bucur, V. 2006. *Acoustics of wood*. 2nd Edition. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/3-540-30594-7>

Caniato, M.; Marzi, A.; Monteiro da Silva, S.; Gasparella, A. 2021. A review of the thermal and acoustic properties of materials for timber building construction. *Journal of Building Engineering* 43. e103066. <http://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103066>

DEWEsoftX3. 2023. Award-Winning Data Acquisition and Digital Signal Processing Software. <https://dewesoft.com/products/dewesoftx>.

Downard, J.; Singh, A.; Bullard, R.; Jayarathne, T.; Rathnayake, C.M.; Simmons, D.L.; Wels, B.R.; Spak, S.N.; Peters, T.; Beardsley, D.; Otainer, C.; Stone, E. 2015. Uncontrolled combustion of shredded tires in a landfill-Part 1: Characterization of gaseous and particulate emissions. *Atmospheric Environment* 104: 195-204. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.12.059>

EU. 2013. Living Well, within the Limits of Our Planet. Decision No 1386/2013/EU of the European Parliament and of the Council of 20 November 2013 on a General Union Environment Action Programme to 2020. Brussels, Belgium.

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: Aalborg, Denmark.

Harte, A.M. 2017. Mass timber - the emergence of a modern construction material. *Journal of Structural Integrity and Maintenance* 2: 121-132. <http://doi.org/10.1080/24705314.2017.1354156>

Jayalath, A.; Satheeskumar, N.; Gunawardena, T.; Mendis, P.; Aye, L. 2021. Airborne and impact sound performance of modern lightweight timber buildings in the Australian construction industry. *Case Studies in Construction Materials* 15. e00632. <http://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00632>

Kohrmann, M. 2016. Numerical Methods for the Vibro-Acoustic Assessment of Timber Floor Construction. PhD Thesis. Technical University of Munich (TUM). <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1326503/1326503.pdf>

Martins, C.; Santos, P.; Almeida, P.; Godinho, L.; Dias, A. 2015. Acoustic performance of timber and timber-concrete floors. *Construction and Building Materials* 101(1): 684-691. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.142>

Mohajerani, A.; Burnett, L.; Smith, J. V.; Markovski, S.; Rodwell, G.; Rahman, M.T.; Kurmus, H.; Mirzababaei, M.; Arulrajah, A.; Horpibulsuk, S.; Maghool, F. 2020. Recycling waste rubber tyres in construction materials and associated environmental considerations: A review. *Resources, Conservation and Recycling* 155. e104679. <http://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104679>

Pereira, A.; Mateus, D.; Godinho, L.; Monteiro, S.; Dias, A. 2016. Evaluation of impact sound reduction of floor coverings on timber and timber-concrete floors using vibration measurements. En: 9^o Congreso Ibérico de Acústica EuroRegio2016, del 13-15 de junio de 2016, Porto, Portugal. <https://documentacion-sea-acustica.es/publicaciones/Oporto16/25.pdf>

Tonelli, C.; Grimaudo, M. 2014. Timber building and thermal inertia: Open scientific problems for summer behaviour in Mediterranean climate. *Energy and Buildings* 83: 89-95. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.12.063>