



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

**Propuesta de nueva metodología de
medida de aislamiento acústico en
forjados ligeros**

Autor:

Gutiérrez Morejón, Alberto

Cotutor:

Balmori Roiz, José Antonio

Estructuras

Dpto. CAIT-MMCTE

Tutora:

Herráez Sánchez, Marta

Ingeniería Mecánica

Dpto. CMeIM

Valladolid, Julio 2023.

RESUMEN

La evolución de la construcción trae consigo nuevas posibilidades para la edificación de viviendas, así como nuevos retos a los que hacer frente. Un ejemplo de estas innovaciones son las construcciones prefabricadas, consistentes en estructuras más ligeras y más flexibles. Sin embargo, estas construcciones no presentan un buen comportamiento de aislamiento al ruido de impacto en los suelos de sus construcciones multiplanta.

En este trabajo, se trata de establecer una nueva metodología para el estudio del aislamiento al ruido de impacto en suelos ligeros, como alternativa a la utilizada en salas acondicionadas, mediante maquetas de tamaño reducido, a partir de la normativa para suelos pesados.

Se estudiará la mejora del aislamiento al ruido de impacto conseguida utilizando revestimientos de diferentes espesores de "Neumático Fuera de Uso" (NFU), una posible solución al problema descrito. Y también, la mejora introduciendo NFU en la fabricación misma del forjado.

PALABRAS CLAVE: Ruido de impacto, Forjados ligeros, Construcciones prefabricadas (Passivhaus), Neumático Fuera de Uso NFU, Madera Contralaminada CLT.

ABSTRACT

The construction's evolution brings with it new possibilities for dwellings' edification, as well as new challenges to be faced. One example of these innovations is passive houses, consisting of lighter and more flexible structures. However, these constructions do not have a good impact sound insulation performance in the floors of their multiplanar constructions.

In this work, the aim is to establish a new methodology for the study of impact noise insulation in lightweight floors, as an alternative to that used in conditioned rooms, by means of small floor mock-ups, based on the standards for heavy floors.

Improvement of impact noise insulation will be studied by using coatings of different thicknesses of "Waste-Tire Rubber" (or "Tire Out of Use", NFU), a possible solution to the described problem, will be studied. And also, the improvement by introducing NFU in the manufacture of the floor slab itself.

KEYWORDS: Impact sound, Lightweight floors, Passive house (Passivhaus), Tire Out Of Use, Cross-laminated wood CLT.

AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer a mis padres y a mi hermana el apoyo incondicional durante todos estos años, y por aconsejarme para ser siempre la mejor versión de mí.

A mi grupo de amigos, que han sido una vía de escape en los momentos no tan buenos que ha habido durante esta etapa de mi vida. Me llevo los mejores recuerdos.

A mi tutora, Marta Herráez Sánchez, por sus consejos y por haberme dado la posibilidad de llevar a cabo este proyecto; y también a José Antonio Balmori Roiz y a María Machimbarrena Gutiérrez por haberme involucrado en él.

A los profesores Álvaro Magdaleno y Álvaro Iglesias, del departamento de Estructuras, que han estado siempre dispuestos a ayudarme con mi propósito.

Y a todas aquellas personas con las que he compartido buenos momentos durante estos años de universidad.

Índice

Índice de figuras

Índice de tablas

1. Introducción y objetivos.....	1
1.1. Antecedentes del proyecto.....	1
1.2. Introducción y Justificación del estudio	3
1.3. Objetivos.....	7
1.4. Organización del documento.....	8
2. Caracterización de ensayos a ruido de impacto.....	9
2.1. Presentación de la normativa sobre aislamiento a ruido de impacto en cámaras normalizadas	10
2.2. Presentación de la normativa sobre aislamiento a ruido de impacto con maquetas para suelos pesados.....	13
2.3. Estudios de investigación sobre ensayos de maquetas de suelos ligeros	17
3. Propuesta de metodología para suelos ligeros.....	24
3.1. Descripción de la Cadena de medida.....	24
3.1.1. Medida de la respuesta vibratoria: Acelerómetros	24
3.1.2. Equipo de excitación mecánica: Máquina de impactos.....	25
3.1.3. Equipo de adquisición y procesado en frecuencias	30
3.2. Maqueta de suelo ligero	36
3.3. Montaje del ensayo: Realización y Descripción de la maqueta y de la estructura soporte.....	38
3.3.1. Fabricación y recogida de los componentes de las muestras	38
3.3.2. Estructura soporte.....	43
3.3.3. Sobre los acelerómetros, y las capas de revestimiento y maqueta....	44
3.4. Muestras de ensayo.....	49
3.4.1. Muestra 1: Maqueta estándar junto a capa de “NFU4”	50
3.4.2. M. 2: Maqueta estándar junto a capa de “NFU10”	51
3.4.3. M. 3: Maqueta estándar junto a capa de “NFU20”.....	52
3.4.4. M. 4, 5 y 6: Losa de hormigón con gránulos de NFU junto a capa de “NFU4”, “NFU10” y “NFU20”.....	53
3.5. Últimos aspectos a la hora de llevar a cabo el ensayo.....	53
4. Presentación e interpretación de los resultados:.....	57

4.1. Maqueta con dosificación estándar	57
4.1.1. Influencia del ruido de fondo	59
4.1.2. Repetibilidad de los niveles de aceleración en el tiempo.....	60
4.1.3. Repetibilidad espacial de los niveles de aceleración	60
4.1.4. Resultados de la mejora del aislamiento a ruido de impacto	61
4.2. Maqueta de hormigón con Neumático reciclado Fuera de Uso NFU	62
4.2.1. Influencia del ruido de fondo	63
4.2.2. Repetibilidad de las medidas en el tiempo	64
4.2.3. Repetibilidad espacial	65
4.2.4. Resultados mostrados como indica la norma	66
4.3. Comparativa entre los dos tipos de forjado.....	67
5. Presupuesto.....	69
6. Conclusiones y líneas de futuro.....	71
6.1. Conclusiones.....	71
6.2. Líneas futuras.....	73
Bibliografía	74

Anexos

ANEXO A: RESULTADOS DE TODOS LOS ENSAYOS REALIZADOS

Gráficas y tablas

ANEXO B: GUÍA BREVE DE MANEJO DEL PROGRAMA “DewesoftX”

Para medición de análisis en octavas con acelerómetros

ANEXO C: ASPECTOS A LA HORA DE REALIZAR EL ENSAYO

Documento Excel, pasos a seguir y lista de verificación

ANEXO D: CARTAS DE CALIBRACIÓN

Cartas de calibración de los acelerómetros usados.

Índice de figuras

Fig. 1 Gráficos acerca del año de construcción de la vivienda (izquierda), y la eficiencia energética de las edificaciones (derecha), siendo A la mayor posible, y F la menor. [mdsagenda2030-a].....	1
Fig. 2 Cadena de valor de la rehabilitación de viviendas en España. [mdsagenda2030-a].....	2
Fig. 3 Objetivos de Desarrollo Sostenible. [Ramoneda].....	3
Fig. 4 Resumen de los principios de la construcción 'Passivhaus'. Información: [Passivhaus]. Fuente: Elaboración propia.	4
Fig. 5 Propiedades de la madera contralaminada (CLT), destacando la desventaja del poco aislamiento acústico conseguido, tanto aéreo como de impacto [Álvarez]. Elaboración propia.	6
Fig. 6 Diferentes denominaciones de la transmisión del ruido [Hassan].....	9
Fig. 7 Ilustraciones de la instalación de ensayo que define la norma [Hassan], y de cómo se transmite el ruido provocado por la máquina en el ensayo. Elaboración propia.....	11
Fig. 8 Dimensiones de la losa de hormigón a utilizar (izquierda), e indicación de la necesidad de colocar unos soportes elásticos bajo ésta (derecha).....	14
Fig. 9 Estructura montada para la medición del revestimiento acorde con lo establecido en la norma ISO 10140-3 (Izquierda); y resultados de la mejora del aislamiento al ruido de impacto de los diferentes revestimientos caracterizados, colocando un suelo flotante sobre las muestras (derecha). [Arenas].....	18
Fig. 10 Algunas imágenes del montaje del ensayo para la caracterización de los revestimientos según la norma descrita en el apartado 2.1. de este documento. [Martins].....	18
Fig. 11 Ilustración de la geometría del suelo compuesto de madera y hormigón tipo I (Izquierda), y el suelo de madera y hormigón de tipo II (derecha). [Martins].....	19
Fig. 12 Tabla donde se expone qué muestras cumplen con la legislación sobre el ruido de impacto de veinticuatro países europeos. [Martins].....	19
Fig. 13 Montaje de la muestra según la norma que define un método alternativo para el estudio de forjados pesados, UNE-EN ISO 16251-1. [Foret].....	20
Fig. 14 Resultados de la mejora del aislamiento de ruido de impacto con: una alfombra como revestimiento (izquierda), un revestimiento de PVC (derecha); comparando los métodos presentados en las normas ISO 10140 y ISO 16251-1. [Foret]	21
Fig. 15 Maqueta de madera-hormigón. Se han fabricado hasta tres tipos, de diferentes dimensiones (izquierda). Ilustración de la posición de los acelerómetros y de la máquina de impactos sobre dicha maqueta (derecha). [Pereira].....	22
Fig. 16 Placa de madera (izquierda), y losa de hormigón (derecha), ambas de dimensiones semejantes a lo definido en la norma UNE-EN ISO 16251-1, y con la cadena de medida instalada. En ambas, el acelerómetro está adherido en la parte superior del montaje. [Pereira].....	22
Fig. 17 Resultados de la mejora del aislamiento al ruido de impacto en los suelos compuestos de madera-hormigón utilizando una capa de vinilo flexible (PVC) (superior), y utilizando un suelo flotante con un revestimiento de goma (inferior). [Pereira].....	23
Fig. 18 Izquierda Acelerómetro "DeltaTron Accelerometer Type 4513-B-001". Derecha: Acelerómetro " Miniature CCLD Accelerometer Type 4508-B-003 Fuente: Ficha técnica de ambos y pagina web de la marca comercializadora [Brüel].....	24
Fig. 19 Máquina de impactos estandarizada (izquierda), ilustración de ésta (derecha, elaboración propia).....	26
Fig. 20 Ilustración de la mejora propuesta para una de las fórmulas empíricas, en el que el sistema se desglosa de esta manera. Los términos "Y" hacen referencia a la respuesta global y local de la muestra, el término "C" se corresponde con el efecto de amortiguamiento, y el término "K" es la rigidez del elemento del sistema. Los términos "F" representan la fuerza [Rabold]	27
Fig. 21 Ilustración de la modificación realizada en el martillo central de la máquina [Lietzén].....	28

<i>Fig. 22: Representación temporal de la fuerza realizada por la máquina de impactos en las cinco posiciones (fila superior); fuerza modificada en las cinco posiciones mencionadas (fila central); y espectro en frecuencia del impulso realizado por el martillo, en las cinco posiciones (fila inferior). Fuente: [Lietzén]</i>	<i>29</i>
<i>Fig. 23 Espectro de fuerza de cada muestra estudiada, representando en el eje de ordenadas el módulo de la fuerza alcanzada. Se ha calculado mediante la media aritmética de los impulsos de fuerza del martillo en la posición 1 (izquierda.); el nivel de fuerza medio, calculado a través de los datos de las cinco posiciones de la máquina, en el rango de 20Hz hasta 3150Hz en bandas de tercios de octava (centro); y la desviación estándar del nivel de fuerza (derecha).</i>	<i>30</i>
<i>Fig. 24. Tarjeta de adquisición SIRIUS Mini.....</i>	<i>31</i>
<i>Fig. 25 Canales de conexión de la tarjeta SIRIUS Mini.....</i>	<i>32</i>
<i>Fig. 26 Configuración usada para cada uno de los tres acelerómetros (de izquierda a derecha, canal 2, 3 y 4), la imagen inferior es común para los tres.</i>	<i>32</i>
<i>Fig. 27 Configuración para el análisis de octavas.....</i>	<i>33</i>
<i>Fig. 28 Localización del módulo FFT.....</i>	<i>33</i>
<i>Fig. 29. Fórmula para la conversión de los datos medidos por el acelerómetro del canal 2 a nivel de aceleración. Ha de realizarse esto para cada canal.....</i>	<i>34</i>
<i>Fig. 30 Configuración realizada para el análisis de FFT.....</i>	<i>34</i>
<i>Fig. 31 “FFT” en el módulo de “matemáticas” del programa.....</i>	<i>35</i>
<i>Fig. 32 Disposición propia para la visualización durante la toma de medidas.</i>	<i>36</i>
<i>Fig. 33 Estructura soporte junto a una de las maquetas instalada encima (izquierda), y una ilustración de la composición de las maquetas, con sus espesores definidos (derecha, elaboración propia).</i>	<i>37</i>
<i>Fig. 34 Estructura soporte más una maqueta (izquierda), ilustración del sistema (derecha, elaboración propia)</i>	<i>37</i>
<i>Fig. 35 Tablero de CLT, con las dimensiones del mismo indicadas. Elaboración propia</i>	<i>39</i>
<i>Fig. 36 Preparación del encofrado para elaborar la placa de hormigón (izquierda superior), encofrado listo para verter el hormigón fresco (derecha superior), detalle del montaje de la construcción de la malla de acero (izquierda inferior), y elaboración de la mezcla (derecha inferior).....</i>	<i>40</i>
<i>Fig. 37 Losas de hormigón fabricadas, estando el hormigón aun fresco.....</i>	<i>41</i>
<i>Fig. 38 Revestimientos utilizados sin montar, de distintos espesores.</i>	<i>41</i>
<i>Fig. 39 Ilustración de las patas usadas, con sus dimensiones, elaboración propia (Izquierda, elaboración propia), y planchas de Sylomer comercializadas (derecha)</i>	<i>42</i>
<i>Fig. 40 Proceso de construcción de la estructura soporte.</i>	<i>43</i>
<i>Fig. 41 Estructura soporte, junto al tablero de CLT (izquierda), modo de colocación de las planchas de Sylomer (derecha).....</i>	<i>44</i>
<i>Fig. 42 Imagen del proceso de colocación de los acelerómetros en la cara del tablero situada más cerca del terreno, con los sistemas de referencia designados.</i>	<i>45</i>
<i>Fig. 43 Detalle de la instalación de los acelerómetros A y D.....</i>	<i>45</i>
<i>Fig. 44. Representación gráfica de los acelerómetros y las patas de la máquina de impactos. Elaboración propia.</i>	<i>46</i>
<i>Fig. 45 Patas de la máquina numeradas</i>	<i>46</i>
<i>Fig. 46 Ilustración de las dos posiciones donde se sitúa la máquina de impactos. Elaboración propia.</i>	<i>47</i>
<i>Fig. 47 Capa de NFU, de espesor: 4mm (izquierda). Ilustración de dicha capa (derecha, elaboración propia)</i>	<i>48</i>
<i>Fig. 48 Capa de NFU, de espesor: 10mm (izquierda). Ilustración de dicha capa (derecha, elaboración propia)</i>	<i>48</i>
<i>Fig. 49 Capa de NFU, de espesor: 20mm (izquierda). Ilustración de dicha capa (derecha, elaboración propia)</i>	<i>49</i>

<i>Fig. 50 Losa de hormigón estándar. Se ha realizado la misma operación de señalización en la losa de hormigón con granalla de NFU (izquierda). Ilustración de dicha losa (derecha, elaboración propia).</i>	49
<i>Fig. 51 Imagen de la primera muestra examinada (superior) y un dibujo tridimensional de cuál es la composición de la muestra (inferior, elaboración propia).</i>	50
<i>Fig. 52 Imagen de la segunda muestra examinada (superior) y un dibujo tridimensional de cuál es la composición de la muestra (inferior, elaboración propia).</i>	51
<i>Fig. 53 Imagen de la tercera muestra examinada (superior) y un dibujo tridimensional de cuál es la composición de la muestra (inferior, elaboración propia).</i>	52
<i>Fig. 54 Esquema de la notación usada. Elaboración propia.</i>	54
<i>Fig. 55 Captura de pantalla de la pestaña “Exportar” del programa “DewesoftX”. Se deben seleccionar, únicamente, las filas de la “8” hasta la “14”.</i>	55
<i>Fig. 56 “Checklist” del ensayo de una muestra. En el anexo C se encuentra el resto de la lista de verificación.</i>	56
<i>Fig. 57 Comparativa del nivel de aceleración alcanzado usando los distintos revestimientos de NFU en el forjado de hormigón estándar con CLT, a cada tercio de octava en frecuencia. Primera medida. Fig. A-4 del Anexo A.</i>	58
<i>Fig. 58 Comparativa del nivel de aceleración alcanzado usando los distintos revestimientos de NFU en el forjado de hormigón estándar con CLT, a cada tercio de octava en frecuencia; además del forjado “desnudo”. Segunda medida. Fig. A-12 del anexo A.</i>	58
<i>Fig. 59 Comparativa del ruido de fondo para la muestra formada por: hormigón estándar, panel de CLT y NFU de espesor 4mm. Segunda medida. Fig. A-9 del Anexo A.</i>	59
<i>Fig. 60 Comparativa entre las mediciones hechas en momentos distintos, enfrentando cada capa de aislante por separado, para comprobar la repetibilidad. Hormigón estándar. Fig. A-13 del Anexo A.</i>	60
<i>Fig. 61 Comparativa de la respuesta obtenida en el acelerómetro de la posición “d” para los tres revestimientos en maqueta estándar: nfu4, nfu10, y nfu20. Primera medida. Fig. A-7 del Anexo A.</i>	61
<i>Fig. 62 Aislamiento al ruido de impacto conseguido con las distintas muestras (con respecto al hormigón estándar sin ningún aislante), para el rango de 50-5000Hz, en tercios de octava. Fig. A-14 del Anexo A.</i>	61
<i>Fig. 63 Comparativa del nivel de aceleración alcanzado usando los distintos aislantes de NFU en el forjado de hormigón con NFU, y con CLT, a cada frecuencia. Primera medida. Fig. A-21 del Anexo A.</i>	62
<i>Fig. 64 Comparativa del nivel de aceleración alcanzado usando los distintos revestimientos de NFU en el forjado de hormigón con NFU, y con CLT, a cada frecuencia. Primera medida. Fig. A-29 del Anexo A.</i>	63
<i>Fig. 65 Comparativa del ruido de fondo para la muestra formada por: hormigón con NFU, panel de CLT y NFU de espesor 20mm. Primera medida. Fig. A-20 del Anexo A.</i>	64
<i>Fig. 66 Comparativa entre las mediciones hechas en momentos distintos, enfrentando cada capa de aislante por separado, para comprobar la repetibilidad. Hormigón con NFU. Fig. A-30 del Anexo A.</i>	64
<i>Fig. 67 Comparativa de la respuesta obtenida en el acelerómetro de la posición “a” para los tres revestimientos, y ninguno, en maqueta NFU: sin0, nfu4, nfu10, y nfu20. Segunda medida. Fig. A-32 del Anexo A.</i>	65
<i>Fig. 68 Aislamiento al ruido de impacto conseguido con las distintas muestras (con respecto al hormigón con NFU sin ningún aislante), para el rango de 50-5000Hz, en tercios de octava. Fig. A-31 del Anexo A.</i>	66
<i>Fig. 69 Comparativa de los valores de ΔL, mejora del aislamiento al ruido de impacto conseguido, de todos los revestimientos y en las dos tipos de maquetas.</i>	67

Índice de tablas

<i>Tabla 1 Algunas de las propiedades del CLT usado [Balmori]. Elaboración propia.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 2 Composición de las losas de hormigón. Elaboración propia.</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 3 Especificaciones de los revestimientos usados. Elaboración propia.....</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 4 Propiedades mecánicas y especificaciones de los tipos de planchas de Sylomer usadas. Elaboración propia.</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 5 Coordenadas de los puntos marcados para colocar acelerómetros, en milímetros, referenciados al sistema de coordenadas de la Fig. 44</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 6 Coordenadas de los puntos marcados para colocar las patas de la máquina, en milímetros, referenciados al sistema de coordenadas de la Fig. 46.</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 7: Resumen de la mejora del aislamiento al ruido de impacto conseguida con algunas de las muestras estudiadas. Elaboración propia.</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 8: Salario que requiere un trabajador recién graduado, tras la resolución del 8 de mayo de 2023.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 9: Costes asociados a la mano de obra y al material. Se detalla el precio por unidad de los elementos, y la amortización de los equipos utilizados. Elaboración propia.....</i>	<i>70</i>

1. Introducción y objetivos

En este apartado se presenta una introducción al ámbito en el que se centra este estudio, se explican las razones por las que este estudio es necesario, así como los objetivos que se proponen, y una sección dedicada a la explicación de la estructuración del documento.

1.1. Antecedentes del proyecto

Ante la crisis climática que estamos viviendo durante estas décadas, y que afecta a todo el planeta, conseguir que las edificaciones en ciudades, pueblos y demás poblaciones sean más resilientes ante condiciones climáticas adversas y, a la vez, más sostenibles, es una meta muy ambiciosa [mdsagenda2030-a]. Tanto es, que esto forma parte de los Objetivos de Desarrollo Sostenible presentados por la ONU.

En cuanto a la construcción, España posee el parque inmobiliario más antiguo de todo el continente europeo, pues el 80% de las edificaciones del país tienen más de 20 años, como indica el Ministerio de Derechos Sociales y Agenda 2030 [mdsagenda2030-a]. Según el estudio, de entre todas estas viviendas, las construidas durante los años 1976 y 2006, son ineficientes energéticamente (Fig. 1).

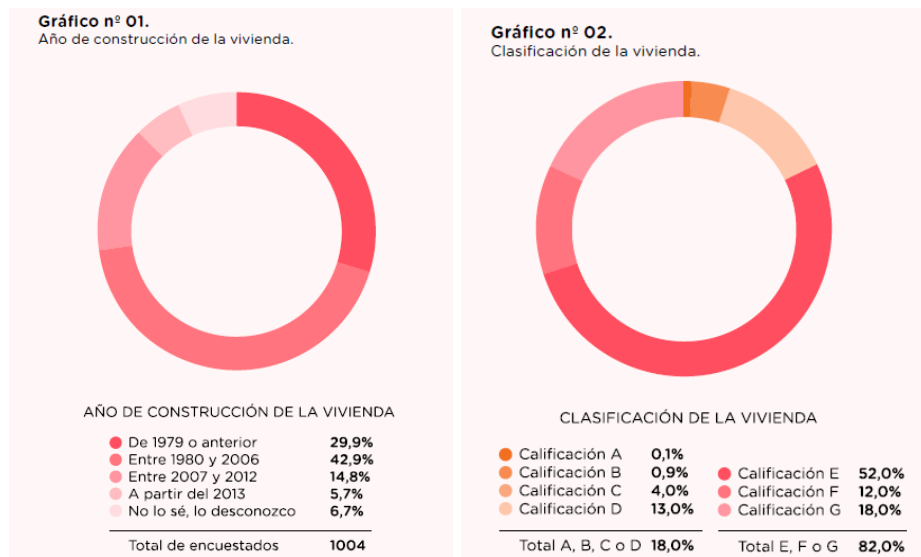


Fig. 1 Gráficos acerca del año de construcción de la vivienda (izquierda), y la eficiencia energética de las edificaciones (derecha), siendo A la mayor posible, y F la menor. [mdsagenda2030-a]

La rehabilitación de las construcciones hechas en España para poder utilizar recursos sustentables es necesaria para superar la problemática medioambiental, y ya no solo para mejorar su eficiencia energética, también es necesario dotar de accesibilidad a los edificios, por la tendencia creciente al envejecimiento de la población. Debido a la crisis ocasionada por la COVID-19,

recursos como los fondos europeos “Next Generation” se han tramitado para ayudar, en parte, a resolver este asunto.

Por ello, se ha elaborado un documento guía para llevar a cabo dicha rehabilitación de la vivienda en España [mdsagenda2030-a]. En este informe se presenta un esquema de la cadena de valor para la rehabilitación de los edificios, elaborado por el Observatorio 2030 del CSCAE, la Secretaría de Estado para la Agenda 2030 y el equipo técnico de la Consultora LLYC (Fig. 2).

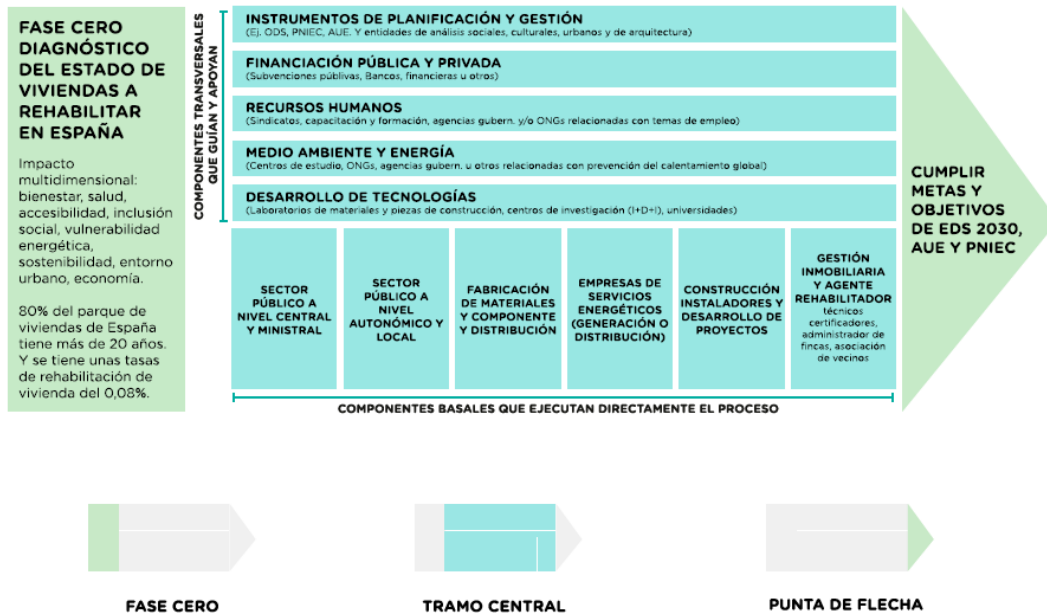


Fig. 2 Cadena de valor de la rehabilitación de viviendas en España. [mdsagenda2030-a]

Dicho informe se focaliza en el tramo central, y está dividido en dos. Por un lado, están las organizaciones que constituyen la base del proceso, así como el Gobierno Central, las Autonomías y los Ayuntamientos; y empresas que fabrican y distribuyen los materiales necesarios, entre otros. Y, por otro lado, están los factores que sirven como guía, como son los instrumentos de planificación y gestión, y los recursos humanos, entre otros.

La rehabilitación de los edificios afecta directamente a la sostenibilidad de las ciudades, y para promover su realización, se han creado políticas tanto nacionales como internacionales. Los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030 (Fig. 3), establecidos por la Organización de Naciones Unidas (ONU) el 25 de septiembre de 2015, se convirtieron en la herramienta de planificación más relevante en todo el mundo. Sus objetivos, que son 17, estructurados en 169 metas, son apoyados por 193 países, y promueven, entre otros asuntos, el fortalecimiento de la paz universal, la erradicación de la pobreza [mdsagenda2030-a], la igualdad entre personas y la sostenibilidad del planeta [mdsagenda2030-b].



Fig. 3 Objetivos de Desarrollo Sostenible. [Ramoneda]

El estudio que se presenta en este Trabajo de Fin de Grado está en relación con varios de ellos [Ramoneda]. En concreto, con el objetivo nº9, Industria, innovación e infraestructura. En él se habla del uso de recursos locales y sostenibles para la construcción de edificios, así como desarrollar procesos o herramientas que mejoren la calidad medioambiental de estos. También con el Objetivo nº11, Ciudades y comunidades sostenibles, donde se especifica que hay que disminuir el impacto medioambiental que supone el proceso de construcción, y dotar a las ciudades de una mejor calidad de vida sin perjudicar el medioambiente. Otros objetivos relacionados son el objetivo nº12, Producción y consumo responsables, que habla de la reutilización de productos para disminuir la generación de residuos y evitar la pérdida de valor de estos. Esto se consigue diseñando sistemas desmontables para separarlos a la hora de reciclarlos, informando, además al consumidor, de esta práctica. Y con el objetivo nº13, Acción por el clima, que señala la necesidad de disminuir el transporte de materiales para reducir el impacto medioambiental. Para ello, es esencial la investigación de nuevas soluciones constructivas para agrandar el mercado que puede utilizar el sector de la construcción.

1.2. Introducción y Justificación del estudio

Las construcciones domésticas más vanguardistas de nuestra época se caracterizan por estar hechas de materiales que minimizan la huella de carbono, contribuyendo al ahorro energético y, por tanto, impulsando al sector de la arquitectura hacia un camino más sostenible [Torralba]. Estas construcciones se caracterizan por ser más ligeras y esbeltas, lo que puede afectar a la respuesta dinámica de la estructura ante el movimiento de personas o máquinas ya que estas construcciones presentan un bajo

amortiguamiento tanto acústico como vibratorio [Bernardo] [Aragón]. Las casas prefabricadas se caracterizan por usar este tipo de materiales, y presentan el problema acústico mencionado. A continuación, se hace hincapié en la información que se ha recopilado acerca de estas construcciones.

El estándar de construcción 'Passivhaus' [Passivhaus] se ha convertido, hoy en día, en la opción más eficiente energéticamente dentro del mercado de la vivienda: las condiciones térmicas dentro de las edificaciones que siguen estos criterios son ideales en cada periodo del año, logrando un ahorro energético que oscila entre el 80% y el 90% comparado con la solución tradicional [Medgón]. Dicha aptitud para lograr el confort térmico se consigue con un buen aislamiento en las envolventes verticales de la vivienda, que generan estanqueidad en el interior. Para conseguir un aire limpio y renovado, se utilizan sistemas de ventilación controlados; y las ventanas, hechas de PVC, deben estar certificadas por el 'Passivhaus Institut', órgano responsable de la certificación de este tipo de viviendas. Las ventanas deben presentar una buena estanqueidad térmica, y a la vez, ser capaces de captar radiación solar [Rehau]. La Fig. 4 recoge algunas de las características de estas viviendas.

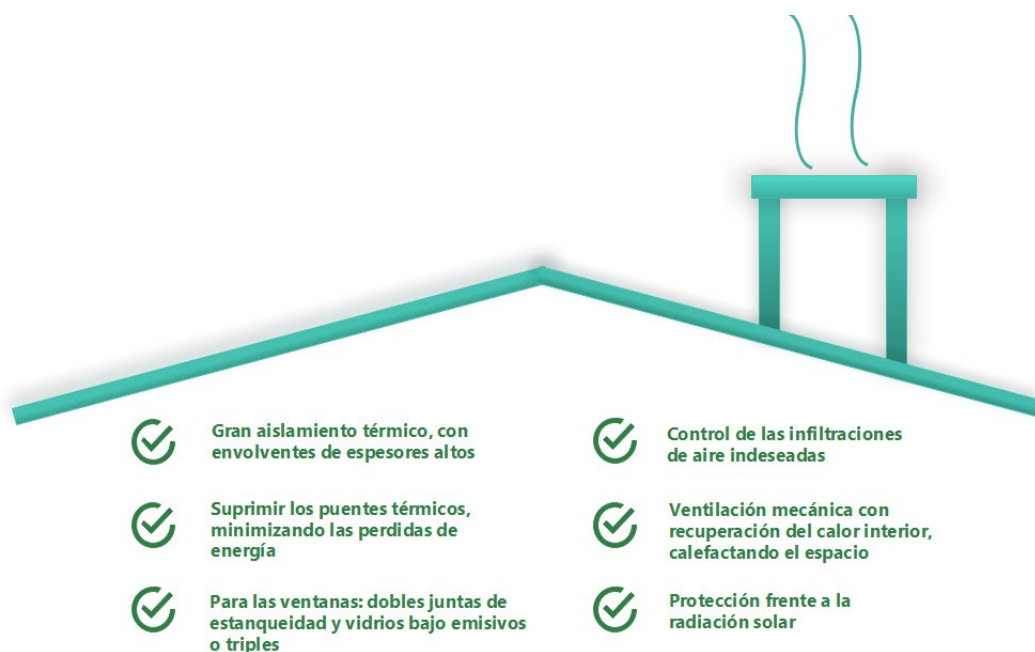


Fig. 4 Resumen de los principios de la construcción 'Passivhaus'. Información: [Passivhaus]. Fuente: Elaboración propia.

Esta técnica de edificación más avanzada supone unos costes mayores que la construcción convencional (entre un 10-15%) [Medgón], debido a la complejidad encontrada en llegar al rendimiento óptimo. Sin embargo, el ahorro energético del que presumen las casas prefabricadas reduce drásticamente el precio de la vivienda a largo plazo.

En resumen, la construcción “Passivhaus” ofrece una buena precisión a la hora de crear la vivienda; además, requiere de menos tiempo que la construcción tradicional, y presenta una mejor calidad de vida en general [Jayalath].

La empresa “Medgón | Fabricación de Edificios Passivhaus y Casas Pasivas”, ubicada en Carrión de los Condes, Palencia, mostró la problemática acústica que tenían sus construcciones pasivas multiplanta, y un equipo de investigación de la Universidad de Valladolid, conformado por arquitectos, ingenieros forestales, físicos e ingenieros acústicos, investigó sobre el tema. Es aquí donde se plantea la necesidad de este estudio: hallar un procedimiento, que no conlleve un alto coste, para estudiar el aislamiento al ruido de impacto, conseguido con ciertos materiales en los denominados forjados ligeros (en inglés, *lightweight floor*), con maquetas de tamaño reducido. La metodología de maquetas de tamaño reducido (*small floor mock-up*) ya está implementada en forjados pesados (*heavy floors*) mediante la normativa [UNE16251], pero aún no existe una normativa equivalente en forjados ligeros. Por ello, una de las aportaciones de este trabajo será presentar una metodología similar pero adaptada a los forjados ligeros. Además, y en concreto, este trabajo permitirá obtener una estimación de las propiedades aislantes que supone la introducción de distintas capas de Neumático reciclado Fuera de Uso (NFU) sobre un formado ligero construido con madera y hormigón (*timber-concrete floor*).

Esta propuesta de estudio se trasladó al concurso “Desafío Universidad-Empresa”, en la edición 2021, obteniéndose el tercer premio en el certamen. El concurso se lleva a cabo por la Fundación Universidades y Enseñanzas Superiores de Castilla y León (FUESCYL) para impulsar la realización de proyectos tecnológicos, del ámbito científico, en los que participan universidades y empresas [tcue]. La necesidad tecnológica es planteada por la empresa o entidad de interés social, y son los investigadores quienes tratan de encontrar una solución al problema expuesto.

Volviendo al tema central, las construcciones prefabricadas comienzan con un “esqueleto” de la vivienda hecho de madera (actuando como la capa de compresión que poseen todos los edificios domésticos), aunque pueden ser fabricadas con este en su totalidad. Dicho material se caracteriza por tener propiedades tensionales relativamente altas (módulo elástico de 8000MPa) teniendo en cuenta su ligereza, y con tal nivel de prefabricación que hace que sus costes de distribución, transporte y almacenamiento sean reducidos [Martins], [Kohrmann], [Álvarez]. Habitualmente, la madera se presenta en forma de tablas que, combinando estas, se forman capas. Colocando al menos 3 capas, perpendiculares entre sí y encoladas, se obtienen tableros denominados madera contralaminada (llamados CLT, *Cross-laminated wood* en

inglés) [Álvarez]. Son los paneles que utilizaremos en nuestros ensayos. La Fig. 5 recoge algunas propiedades de esta forma de presentación de la madera.

Sin embargo, la madera es un material que presenta poca resistencia a la transmisión del sonido por impacto y vía aérea a bajas frecuencias (en el rango de 50Hz a 100Hz) [Jayalath]. Por lo cual, en muchas ocasiones, se agregan capas de otros materiales, lo que permite un aumento de la masa de estas construcciones, y así, se mejora el comportamiento acústico de las estructuras ligeras, como las construidas con madera [Tonelli].

PROPIEDADES DEL 'CLT'	
Aislamiento térmico aceptable, considerado material higrotérmico	Capacidad para almacenar la humedad, así como mantener un buen nivel de humedad en espacios
Deformaciones plásticas en uniones, disipando la energía del efecto de un movimiento sísmico	Prop. mecánicas Mod. elástico: 8000MPa (E) Mod. de cortadura: 8000MPa (G) Resistencia a flexión: 16MPa ($f_{m,k}$) Resistencia a compresión: 17MPa ($f_{r,k}$)
Configuración más robusta debido a la colocación de las capas perpendicularmente	Aislamiento acústico
Densidad media de 450-500kg/m ³	Contenido de humedad del 12 ± 2%
	Es "almacén" de CO ₂

Fig. 5 Propiedades de la madera contralaminada (CLT), destacando la desventaja del poco aislamiento acústico conseguido, tanto aéreo como de impacto [Álvarez]. Elaboración propia.

Por otro lado, se considera Neumático Fuera de Uso (NFU) al residuo proveniente de los neumáticos desechados por el poseedor de éstos. La gestión para controlar su generación como residuo, la utilización de este para cumplir funciones diferentes para las que se usaba (lo que permite la revalorización del producto) y el posible reciclado de este residuo, entre otros aspectos; se regula a través del Real Decreto 1619/2005, de 30 de diciembre, modificado en el año 2020. Este real decreto establece obligaciones al productor de neumáticos, al generador de NFU, y al gestor de este residuo, como priorizar la preparación de este para su reutilización [mtransicioneo].

En cuanto al estudio llevado a cabo en la Universidad de Valladolid, se comentan algunos de los aspectos de los que se caracteriza este proyecto. Mediante la definición de un nuevo método para estudiar forjados ligeros se conseguiría una manera más ágil y económica que la propuesta para cámaras homologadas en laboratorios acreditados, y también la caracterización como posible aislante acústico del Neumático Fuera de Uso (NFU) .

- Reducir el impacto ambiental, usando materiales sostenibles y reciclados en la construcción de edificios, como lo son la madera y el NFU. El NFU resulta difícil de reciclar, siendo dudoso si es rentable tratar de gestionar este material para convertirlo en un nuevo producto. Por ello, su incorporación en un sector como es el de la construcción, permitiría una reutilización de este material en grandes volúmenes. La madera, como material natural, buen aislante térmico y captador de CO₂, es una buena opción para acompañar al NFU y así, contribuir al medioambiente.
- Facilitar la evaluación acústica de propuestas constructivas, definiendo una metodología más barata y que puede ser realizada por fabricantes sin la necesidad de recurrir a grandes instalaciones con cámaras de ensayo homologadas.
- Apoyo a la economía local, ya que muchas empresas en nuestra comunidad se dedican a la preparación y utilización de la madera, además de la existencia de algunas otras que reciclan Neumático Fuera de Uso en Palencia, León y Burgos. Además, estos sistemas entrarían dentro un mercado circular, por usar materiales que en un futuro tendrán seguro una aplicación, en el mismo ámbito o diferente.
- Mejora de la logística constructiva, en cuanto a la reducción de los tiempos de ejecución, calidad de las construcciones, y posible disminución de los costes de fabricación si se consolida un coste competitivo.

1.3. Objetivos

Una vez detallada la información sobre la que basa este estudio experimental, se enumeran los objetivos a conseguir en este Trabajo Fin de Grado.

- Desarrollar y poner a punto una propuesta de metodología para el estudio del aislamiento al ruido de impacto en forjados ligeros con maquetas, como alternativa a los ensayos acústicos en cámaras homologadas de laboratorios acreditados. Para conseguirlo, inicialmente habrá que adquirir conocimientos acerca de la instrumentación empleada en el ensayo (acelerómetros, máquina de impactos y un nuevo equipo de adquisición y procesado de datos). También será necesario analizar el procedimiento descrito en la normativa para maquetas de suelos pesados, así como la búsqueda y síntesis de la bibliografía centrada en ensayos de suelos ligeros reproducidos con maquetas. Esto permitiría reunir suficiente información para redactar una posible segunda parte de la norma para medición de la mejora del aislamiento al ruido de impacto, en este caso, para suelos ligeros de pequeñas dimensiones.

- Aplicación de dicha metodología para caracterizar el comportamiento como aislante ante el ruido de impacto de distintos revestimientos de Neumático Fuera de Uso (NFU) colocados sobre dos tipos de maquetas ensayadas. Esto aportará un análisis comparativo de su comportamiento frente al ruido de impacto, entre los distintos revestimientos junto con los dos tipos de forjados ligeros creados.

Además de los objetivos técnicos, se incluyen una serie de objetivos académicos que consisten en desarrollar las competencias profesionales vinculadas a la profesión del Ingeniero Técnico Industrial especializado en Mecánica. Dichas competencias aparecen recogidas en el BOE, en la Orden Ministerial [CIN 351/2009].

1.4. Organización del documento

Se presenta este apartado donde se comenta la estructuración de este Trabajo de Fin de Grado, desarrollando los capítulos que aparecen en este informe, que son un total de seis.

El primer capítulo comienza con el contexto socioeconómico en el que se enmarca el interés y la necesidad de realizar este trabajo, así como una introducción al caso de estudio realizado, y la mención de los objetivos técnicos y académicos.

El capítulo dos plasma la investigación desarrollada acerca del estado del arte del tema, en el que se desarrollan los aspectos encontrados en dos normativas que explican distintas metodologías para el estudio del tema. Además, se exponen investigaciones realizadas recientemente.

A partir del capítulo tres se introduce la aportación propia del Trabajo de Fin de Grado. Este capítulo contiene la propuesta de metodología llevada a cabo, incluyendo la cadena de medida utilizada en la toma de datos, la presentación y el desarrollo del montaje de la estructura donde se colocan dos tipos de suelos ligeros reproducidos por una maqueta, así como las capas que lo componen; y otros aspectos a tener en cuenta a la hora de reproducir el ensayo.

Los resultados y la interpretación de ellos se encuentran en el capítulo 4, haciendo una distinción entre los dos tipos de suelos ligeros analizados, y comparando ambos con estudios desarrollados previamente.

El capítulo cinco desarrolla el presupuesto económico de las tareas realizadas en este Trabajo Fin de Grado.

Las conclusiones del trabajo, relacionadas con los objetivos, y las líneas futuras se encuentran en el capítulo seis, último capítulo de esta memoria.

2. Caracterización de ensayos a ruido de impacto

En una vivienda, el ruido denominado como “de impacto” se transmite cuando un sólido golpea a otro, provocando una aportación de energía que se transmite a través de este segundo cuerpo. En general, el ruido de impacto que más se produce, en los edificios, es el ruido provocado por las personas al andar. Aunque se denomine de esta manera, la mayor parte de la energía transferida se propaga por el aire. Realmente, en una situación de este tipo, se produce la reflexión del sonido sobre el primer cuerpo, la absorción del sonido por el segundo y la transmisión sonora en la habitación contigua si este segundo elemento es una envolvente de una sala. La transmisión de este fenómeno varía según la rigidez y la continuidad del elemento, y se transmite a gran velocidad por la estructura llegando hasta espacios muy lejanos a la fuente. Además, puede ocurrir que haya transmisión a través de los flancos en la unión del cerramiento [Hassan]. En la Fig. 6 se exponen otros tipos de ruidos que puede haber, además del que se ha explicado.

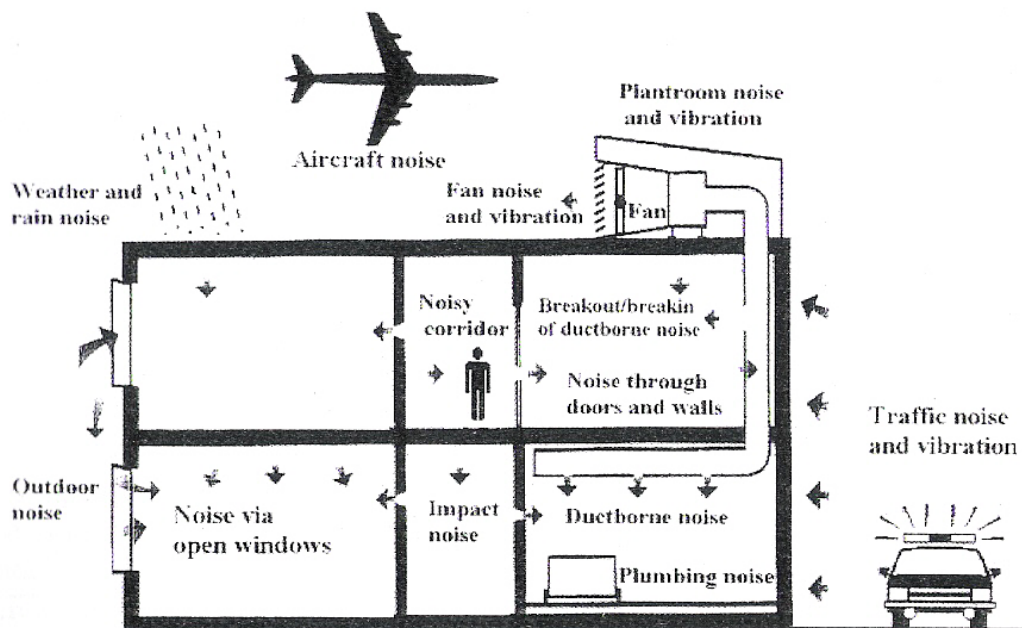


Fig. 6 Diferentes denominaciones de la transmisión del ruido [Hassan]

En particular, el ruido de impacto está más relacionado con el suelo de las edificaciones que con las paredes de los espacios, y supone un problema complejo, debido a que, en éste, es necesario controlar el ruido transmitido por el aire y por impacto, a diferencia de las envolventes verticales, en las que solo hay que atenuar el ruido transmitido por aire.

Actualmente, la introducción de un diseño acústico de gran calidad en una construcción aporta al mismo la aptitud de sostenibilidad [Hassan]. El aislamiento a ruidos que se propagan a través de sólidos por ruido de impacto

tiene un papel importante en el confort de las viviendas. En el ámbito de la construcción, este aspecto no se ha tenido tan en cuenta como otros, por lo que se desea que, en un futuro, este problema esté lo suficientemente controlado [Cordero].

Por ello, se trata de dar solución al efecto mencionado, mediante revestimientos para atenuar el sonido, absorbiéndolo y, a la vez, bloqueándolo. Este es el método más efectivo, aunque también hay que valorar la eliminación de la transmisión por los flancos, y evaluar la masa del elemento, Este último aspecto ya se ha mencionado en el apartado 1.2.

Los revestimientos para atenuar este ruido, también conocidos como mantas o capas, están hechas de fibras minerales artificiales [Hassan], y se suelen colocar sobre losas rígidas formando lo que se conoce como “suelo flotante”. La capa no debe estar adherida directamente, ya que el objetivo es que haya una disociación de las estructuras rígidas de los forjados, a través de la interposición de estos elementos.

Al factor de si un revestimiento sirve para controlar o no el ruido de impacto, se une el factor de que, un mismo revestimiento puede dar un comportamiento distinto dependiendo del tipo de acabado que tiene encima [Hassan]. Por ello, la estimación de esta transmisión se realiza de forma experimental, con métodos estandarizados.

En la actualidad, existen fundamentalmente dos normativas que indican cómo debe analizarse el aislamiento al ruido de impacto. En los siguientes apartados se desarrollan ambas metodologías.

2.1. Presentación de la normativa sobre aislamiento a ruido de impacto en cámaras normalizadas

La norma UNE-EN ISO 10140 describe, en sus partes 1, 3, 4 y 5, una metodología acerca del estudio del aislamiento a ruido de impacto para realizar en cámaras homologadas, en las que la transmisión sonora a través de los flancos se suprime.

Para llevarla a cabo, se utilizan dos habitáculos, uno dispuesto encima del otro. Se ha denominado como “recinto emisor” el espacio superior, y como “recinto receptor”, el inferior [UNE10140-3]. Para el recinto emisor, no hay ninguna regla de obligado cumplimiento sobre su forma y tamaño. En cambio, para el recinto receptor sí, se obliga a que el volumen de este debe ser mayor que 50m^3 [UNE10140-5]. El suelo a ensayar se coloca entre ambas estancias, y es aconsejable que la muestra ocupe todo el techo de la sala. Dicho techo debe tener una superficie de entre 10m^2 y 20m^2 , y la longitud de la arista más corta

que forma dicha superficie debe ser mayor que 2,3m. [UNE10140-5]. El recinto emisor, como su propio nombre denota, se usa para colocar la fuente emisora, que será una máquina de impactos normalizada, dispuesta en varias posiciones. En el recinto receptor, se colocará un micrófono único movido de posición en posición, una alineación de micrófonos fijos, o un micrófono en continuo movimiento [UNE10140-4]. Estos miden la presión sonora del lugar, que servirá para hallar el aislamiento conseguido.

La Fig. 7 resume, con dos ilustraciones, las características de la instalación de ensayo, así como los equipos que se utilizan.

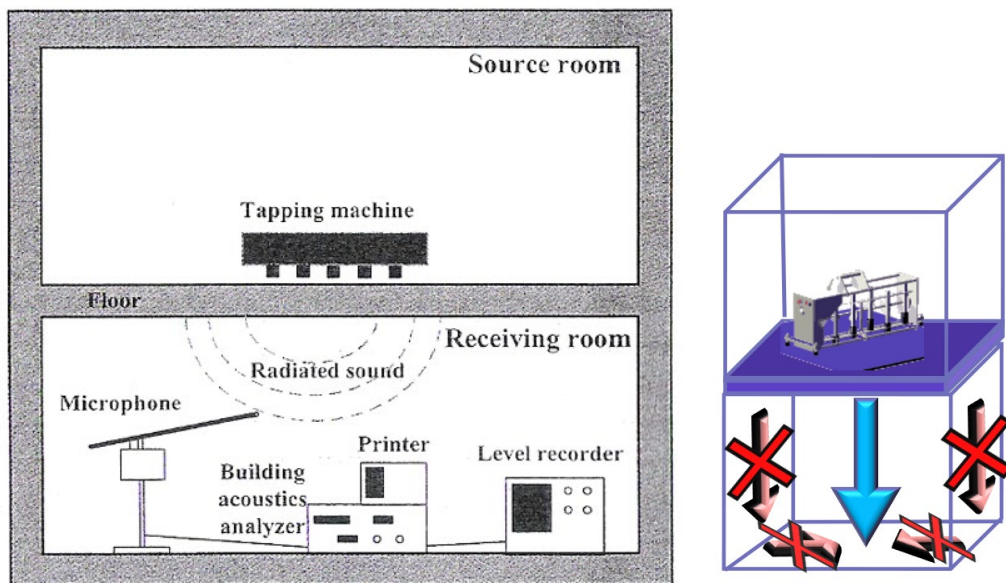


Fig. 7 Ilustraciones de la instalación de ensayo que define la norma [Hassan], y de cómo se transmite el ruido provocado por la máquina en el ensayo. Elaboración propia.

La norma define hasta tres categorías de revestimientos, y dos tipos de suelos de referencia, o maquetas. Dependiendo de la combinación escogida de ambos elementos, el procedimiento de ensayo cambia en el número de posiciones de la máquina de impactos y/o en la disposición de la misma sobre la muestra. Lo mismo pasa con los micrófonos utilizados en recinto inferior.

En la categoría uno se encuentran los recubrimientos pequeños y flexibles, como el corcho o la goma; en la categoría dos están las capas homogéneas y compuestas de algún componente rígido, consideradas como grandes (se cataloga como grande cuando este ocupa todo el techo del recinto receptor); y los recubrimientos flexibles y grandes pertenecen a la categoría tres [UNE10140-1].

Los suelos de referencia se dividen en pesados y ligeros. Se denomina suelo de referencia pesado cuando se utiliza una losa de hormigón armado, con un espesor de entre 100mm y 160mm, y con un área de al menos 10m². Hay

hasta tres tipos de suelos de referencia ligeros, y se encuentran definidos en la [UNE10140-5].

Como se ha comentado anteriormente, los micrófonos registran la presión sonora en bandas de tercios de octava en el recinto inferior. Con esta medición se calcula la reducción en el nivel de presión acústica de impactos normalizados (ΔL), tratando los datos de la siguiente manera.

En primer lugar, se calcula el nivel de presión acústica energético medio (L_{sb} , L_b) en bandas de tercios de octava mediante una de las dos formas presentadas en la documentación. Se usa una u otra dependiendo de si se usan micrófonos fijos o micrófonos en movimiento. En segundo lugar, se elimina el ruido de fondo de la medición aplicando una de las siguientes ecuaciones (Eq. 1, Eq. 2, Eq. 3), dependiendo del intervalo donde se encuentre la diferencia entre el nivel de señal combinado con el ruido de fondo (L_{sb}), y solo el nivel del ruido de fondo (L_b) [UNE10140-4].

$$L_i = L_{sb} \quad \text{si } L_{sb} - L_b \geq 15dB \quad \text{Eq. 1}$$

$$L_i = 10 * \log_{10} \left[10^{\frac{L_{sb}}{10}} - 10^{\frac{L_b}{10}} \right] dB \quad \text{si } 6dB \leq L_{sb} - L_b < 15dB \quad \text{Eq. 2}$$

$$L_i = L_{sb} - 1,3 dB \quad \text{si } L_{sb} - L_b < 6dB \quad \text{Eq. 3}$$

En tercer lugar, se aplica un término de corrección, que aumenta el valor del nivel de la presión acústica [UNE10140-3] (Eq. 4).

$$L_n = L_i + 10 \log \left(\frac{A}{A_0} \right)$$

Eq. 4 "A" es el área de absorción acústica calculado a partir del tiempo de reverberación, y "A₀", un área de referencia.

Por último, se halla la reducción en el nivel de presión acústica de impactos normalizados a través de la Eq. 5. L_{n0} hace referencia a la presión acústica de impactos normalizado del suelo sin el revestimiento, y L_n con el revestimiento colocado [UNE10140-1].

$$\Delta L = L_{n0} - L_n \quad \text{Eq. 5}$$

Algunos aspectos adicionales sobre cómo realizar el ensayo se exponen a continuación. En primer lugar, el suelo debería instalarse de manera similar a como se hace en la realidad, respetando las instrucciones de los fabricantes para la manipulación de los elementos que forman el suelo [UNE10140-3]

[UNE10140-1]. En segundo lugar, las mediciones deberían realizarse cuando la excitación mecánica sea estable, y sin la presencia de personas en el recinto receptor. Por último, en el caso de que no se pueda despreciar la transmisión del ruido aéreo, se debe hacer una corrección del nivel de presión siguiendo el apartado 5.4 de la norma [UNE10140-5].

La reducción en el nivel de presión acústica de impactos normalizados ponderada se halla mediante los recursos presentados en la norma UNE-EN ISO 717-2 [UNE717].

Este método resulta, principalmente, costoso y complejo, además de ser necesario la destrucción posterior de las muestras relativamente grandes, lo que incrementa los costes.

2.2. Presentación de la normativa sobre aislamiento a ruido de impacto con maquetas para suelos pesados

La norma UNE-EN ISO 16251-1 es una metodología que permite reducir las dificultades a la hora de determinar la mejora del aislamiento al ruido de impacto, ya que la solución que propone la serie de normas [UNE10140] requiere de una instalación de ensayo especial, algo costoso para pequeñas y medianas empresas. En dicha norma, se explica un método que proporciona resultados comparativos entre distintos revestimientos (también llamados capas). Toda la información plasmada en este apartado, con respecto a cómo se realiza el ensayo, ha sido obtenida de la norma [UNE16251].

El ensayo consiste en caracterizar el aislamiento conseguido con respecto al ruido de impacto al colocar distintas capas aislantes sobre una losa (en la norma se denomina placa) de hormigón de $(120\pm 5)\text{cm} \times (80\pm 5)\text{cm} \times (20\pm 1)\text{cm}$ (Fig. 8). Dichas capas han de tener la misma superficie horizontal que la losa. La losa se apoya sobre unos soportes elásticos en sus cuatro esquinas, para desacoplar la misma del suelo (Fig. 8). Estos soportes no deben tener una superficie superior a $10\text{cm} \times 10\text{cm}$. Además, la resonancia vertical de la losa colocada sobre los soportes debe ser menor a 20Hz. En cuanto a la superficie de la losa, ésta debe ser uniforme y lisa, con una tolerancia de $\pm 1\text{mm}$, medida desde un borde al opuesto.

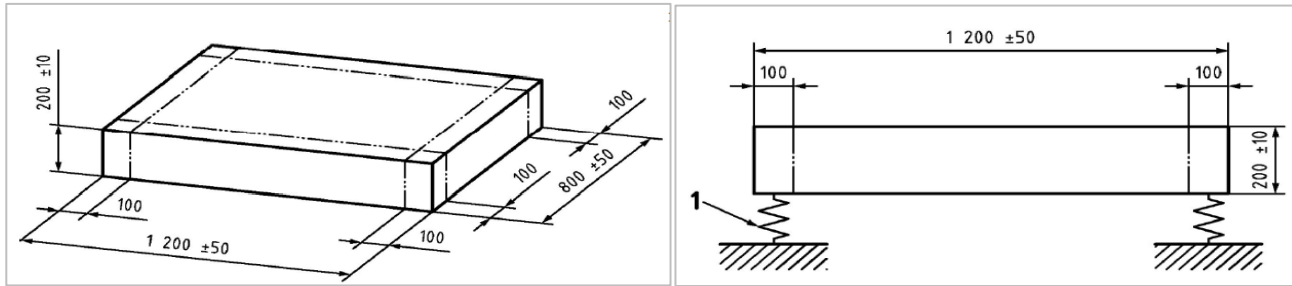


Fig. 8 Dimensiones de la losa de hormigón a utilizar (izquierda), e indicación de la necesidad de colocar unos soportes elásticos bajo ésta (derecha)

Para caracterizar el sistema, se utiliza, como excitación mecánica, una máquina de impactos; y para medir la respuesta vibratoria, acelerómetros. Se determinan los niveles vibratorios, en dos situaciones distintas, en el “recinto inferior” de la maqueta montada (es decir, los acelerómetros se colocan en la parte inferior de la maqueta): una con el revestimiento aislante, y otra sin él, para valorar el ruido de fondo que hay en el lugar. La señal medida por los acelerómetros se procesa y se filtra en bandas de tercios de octava (en el rango de 100Hz a 5000Hz). Si se requiere medir a bajas frecuencias, entonces se analizan las muestras desde 50Hz). Se recogen los datos en forma de los valores cuadráticos medios de la aceleración (a_{RMS}).

A la hora de preparar el ensayo, hay que tener en cuenta varios factores:

- El sistema de medición vibro-acústico (todos los aparatos que se vayan a usar) se debe calibrar antes y después de la medición. La temperatura del aire y la humedad deben registrarse antes y después de la medición.
- La capa de aislante no debe ser mayor que la superficie horizontal de la losa de hormigón. Se debe evitar que los bordes de la capa se levanten. Si fuera necesario, habría que aplicar un adhesivo y/ó una imprimación, y lógicamente, habría que respetar el tiempo de secado recomendado por el fabricante.
- Para los acelerómetros, se deben usar al menos cuatro posiciones para caracterizar las muestras. Se deben distribuir de manera uniforme y aleatoria, evitando líneas simétricas y manteniendo una distancia de 10cm con los bordes de la losa.
- En cuanto a la máquina de impactos, se debe colocar en al menos dos posiciones, evitando simetrías y paralelismos con el borde de la placa de hormigón, y dejando una distancia de 30cm entre las posiciones de la máquina. Los martillos que provocan el impacto no deben de estar a menos de 10cm de los bordes de la placa. Como es lógico, todos los apoyos de la máquina de impactos deben estar sobre la capa de aislante.

A la hora de realizar el ensayo, se deben hacer 3 ciclos:

- I. Medición del ruido de fondo con el revestimiento colocado y máquina de impactos apagada.
- II. Medición con el revestimiento y máquina de impactos encendida.
- III. Medición sin el revestimiento (solo losa) y máquina de impactos encendida.

Se aconseja designar los niveles de aceleración medidos de la siguiente forma:

$L'_{s,t,a}$:

- “s” indica el ciclo que estamos midiendo. Según la norma, “s” es igual a 1 cuando el revestimiento está colocado, y “s” igual a 0 sin el revestimiento puesto. Para el ruido de fondo no se coloca este subíndice. En nuestra metodología, hemos dado a cada revestimiento un valor distinto de “s”, para saber qué revestimiento se está caracterizando. (“s”: 1, 2, 3, ...)
- “t” se utiliza para designar la posición de la máquina de impactos, y se asocia un número para cada posición, en orden: 1, 2,
- Con el término “a” indicamos la posición de los acelerómetros: a, c, d, e, No se añade la posición “b” para evitar equivocaciones con la notación del ruido de fondo (background noise), definida más adelante.
- El signo ' indica la inclusión del ruido de fondo en la medida.

Para el ruido de fondo, $L_{b,a}$:

- “b” indica que la medida corresponde a la medición del ruido de fondo. Se añade un indicativo para saber a qué revestimiento hace referencia ese ruido de fondo. Por ej., “b10”.
- “a” para la posición del acelerómetro: a, c, d, e,
- El ruido de fondo se recoge con la máquina colocada encima de la maqueta montada, indistintamente de la posición en la que se encuentre.

Otros aspectos a tener en cuenta a la hora de realizar la medición son los siguientes: el tiempo de medición del nivel de aceleración debe ser superior a 20s (en nuestro caso se ha empleado un tiempo superior, unos 25s), y las posiciones de los martillos de la máquina de impactos, con y sin revestimiento, deben coincidir con una tolerancia de ± 2 cm.

La normativa nos indica cómo debemos analizar los datos para obtener el aislamiento conseguido con el revestimiento: En primer lugar, se determina el nivel de aceleración de todas las mediciones recogidas en valores cuadráticos medios (RMS), mediante la Eq. 6. Esto lo realiza el programa de adquisición y procesado de datos. Después, se deben corregir las medidas tomadas con y sin el revestimiento, eliminando la contribución del ruido de fondo, y para ello,

se hace uso de las ecuaciones Eq. 7, Eq. 8 y Eq. 9. Estas son las mismas que define la norma [UNE10140-4] para la corrección del ruido de fondo, pero con otra nomenclatura.

$$L_a = 10 * \log_{10} \frac{1}{T_m} \int_0^{T_m} \frac{a(t)^2}{a_0^2} dt \text{ dB}$$

Eq. 6. a_0 es la aceleración de referencia: 10^{-6} m/s^2 .

$$L_{s,t,a} = L'_{s,t,a} \quad \text{si } L'_{s,t,a} - L_{b,a} \geq 15 \text{ dB} \quad \text{Eq. 7}$$

$$L_{s,t,a} = 10 * \log_{10} \left[10^{\frac{L'_{s,t,a}}{10}} - 10^{\frac{L_{b,a}}{10}} \right] \text{ dB} \quad \text{si } 6 \text{ dB} \leq L'_{s,t,a} - L_{b,a} < 15 \text{ dB} \quad \text{Eq. 8}$$

$$L_{s,t,a} = L'_{s,t,a} - 1,3 \text{ dB} \quad \text{si } L'_{s,t,a} - L_{b,a} < 6 \text{ dB} \quad \text{Eq. 9}$$

En tercer lugar, se obtiene $\Delta L_{t,a}$ que es la diferencia entre los dos (sin y con revestimiento) niveles de aceleración conseguidos para cada posición de los acelerómetros “a”, y para cada posición de la máquina de impactos “t”, a cada frecuencia (Eq. 10). Es decir, para todas las combinaciones posibles entre posiciones de acelerómetros y posiciones de la máquina de impactos.

$$\Delta L_{t,a} = L_{0,t,a} - L_{s,t,a}$$

Eq. 10

Por último, se define la mejora del aislamiento al ruido de impacto alcanzado por la muestra analizada (ΔL), para cada frecuencia, que se calcula como el promedio de las distintas posiciones (acelerómetro y máquina), según la Eq. 11.

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

Eq. 11

También se evalúa la llamada mejora del aislamiento al ruido de impacto ponderado (ΔL_w , weighted impact sound improvement), que se realiza de acuerdo con lo presentado en la norma [ISO717].

Una vez tratados los datos, hay que presentar los resultados. La norma puntualiza lo siguiente:

- Se presentan los valores, en bandas de frecuencia (1/3 octava), de la mejora del aislamiento al ruido de impacto promedio (ΔL). Es necesario indicar la mejora del aislamiento al ruido de impacto ponderado, conseguida con el revestimiento correspondiente, ΔL_w .

- Si la corrección del ruido de fondo alcanza los 1,3 dB, el valor de la mejora correspondiente se debe designar como “> ΔL ” .

2.3. Estudios de investigación sobre ensayos de maquetas de suelos ligeros

Se realiza una recopilación bibliográfica de diversos estudios que presentan ensayos para analizar el comportamiento acústico de los forjados ligeros en edificios, caracterizando revestimientos propuestos para mejorar la transmisión de sonido a través de estos forjados. Algunos de estos se han realizado en cámaras acústicas normalizadas de laboratorios acreditados, como define la norma UNE-EN ISO 10140-3 [UNE10140-3], y otros han seguido la metodología presentada en el norma UNE-EN ISO 16251-1, explicada en el apartado 2.2. de este trabajo.

Arenas et al. [Arenas] presenta un estudio, con ensayos realizados en cámaras acústicas normalizadas [UNE10140-3], para encontrar una expresión empírica que permita predecir el aislamiento al ruido de impacto (a partir de ahora denominado ΔL), con interés a bajas frecuencias, conseguido mediante paneles elásticos y en función de la rigidez dinámica, obtenida esta última mediante una metodología estandarizada en la norma ISO 9052-1 [UNE29052]. Aparte de este objetivo, también caracteriza, mediante una máquina de impactos (Fig. 9), hasta trece paneles elásticos en un suelo ejemplo compuesto de hormigón y la capa aislante a analizar (que juntos forman el llamado suelo laminado), y un contrapiso donde se apoyan las dos capas anteriores. Algunos de los aislantes son: goma reciclada, polímeros como EVA o polietileno, y corcho compacto, Mediante los tres aislantes que poseen la máxima rigidez dinámica, Arenas observa una correlación entre este parámetro y el factor de amortiguamiento: cuando la rigidez decrece, el aislamiento al ruido de impacto aumenta.

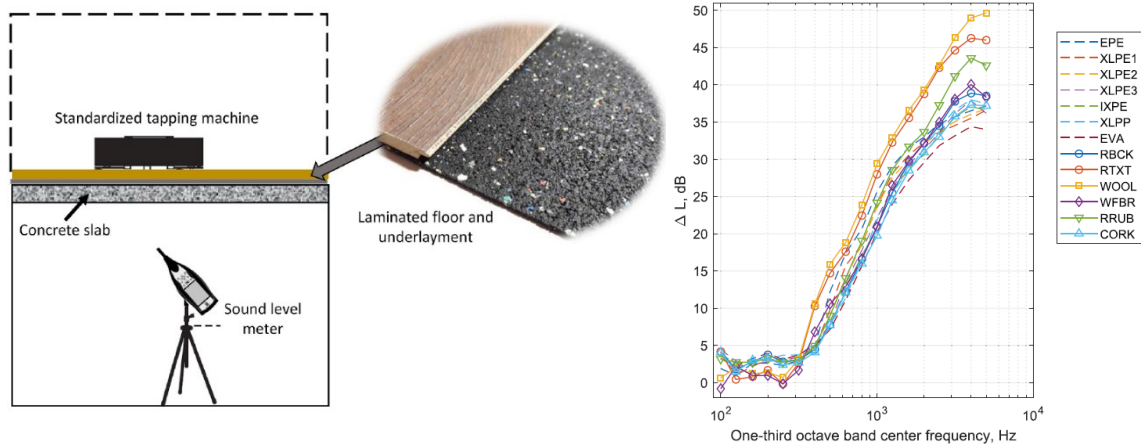


Fig. 9 Estructura montada para la medición del revestimiento acorde con lo establecido en la norma ISO 10140-3 (Izquierda); y resultados de la mejora del aislamiento al ruido de impacto de los diferentes revestimientos caracterizados, colocando un suelo flotante sobre las muestras (derecha). [Arenas]

Martins et al. [Martins] presenta también ensayos realizados en cámaras acústicas normalizadas (Fig. 10) y trata de aunar información sobre la respuesta acústica, tanto ruido de impacto como el ruido aéreo, de distintos suelos: un suelo de madera (timber, sin ningún tipo de revestimiento), un suelo de madera-hormigón (timber-concrete) de composición estándar, y un tercer suelo de madera junto con una capa de hormigón de composición ligera, fabricado con agregados de corcho (timber-concrete-cork) (Fig. 11). En estas dos últimas construcciones, ha dispuesto un suelo flotante de fibra de madera y resina, más un panel de aglomerado de corcho.



Fig. 10 Algunas imágenes del montaje del ensayo para la caracterización de los revestimientos según la norma descrita en el apartado 2.1. de este documento. [Martins]

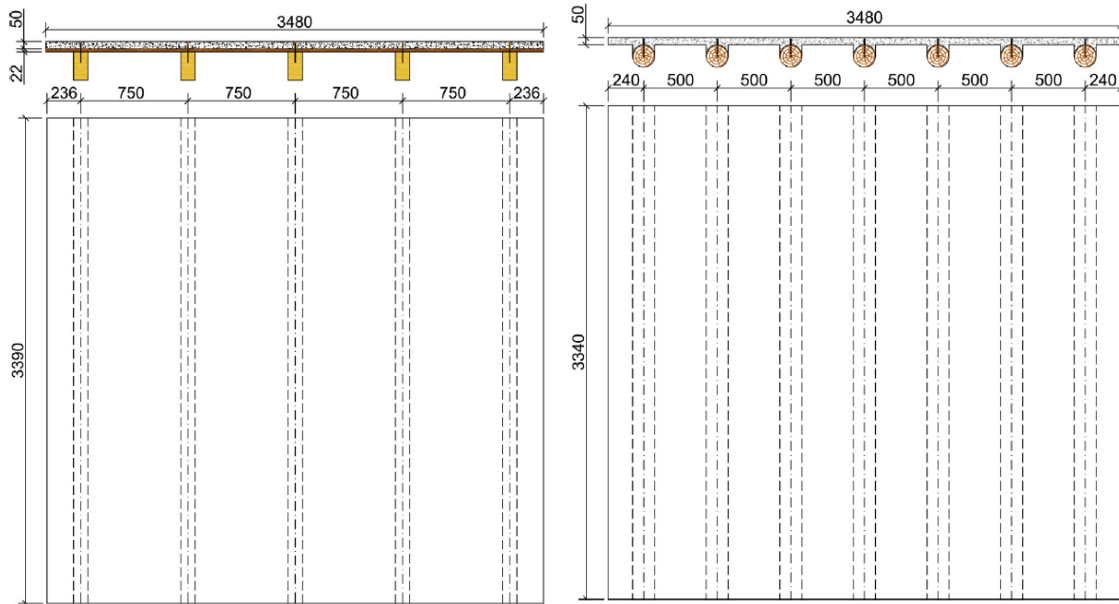


Fig. 11 Ilustración de la geometría del suelo compuesto de madera y hormigón tipo I (Izquierda), y el suelo de madera y hormigón de tipo II (derecha). [Martins]

El estudio, ejecutado según la norma ISO 10140, compara, en un principio, las soluciones sin agregar el falso techo, obteniendo curvas que, a altas frecuencias, se observan bastantes diferencias en el nivel de aceleración medido, entre el suelo de madera y los de madera-hormigón. Estos últimos presentan una tendencia similar, siendo un poco mejor el suelo con los agregados de corcho, que, aunque tenga menor masa que la otra muestra, esta composición ayuda a atenuar el ruido de impacto, sobre todo a altas frecuencias (Fig. 12).

Country	Estimated Equivalent $L'_{n,w}$ (dB) [25] Multi-storey housing	$L_{n,w}$ (dB)					
		TF	TC1	TC2	TFc	TC1c	TC2c
Austria	≤47						x
Belgium	≤57				x	x	
Czech Rep.	≤58				x	x	
Denmark	≤53				x	x	
Estonia	≤53				x	x	
Finland	≤53				x	x	
France	≤57				x	x	
Germany	≤53				x	x	
Hungary	≤55				x	x	
Iceland	≤58				x	x	
Ireland	≤61				x	x	
Italy	≤63				x	x	
Latvia	≤54				x	x	
Lithuania	≤53				x	x	
Netherlands	≤53				x	x	
Norway	≤53				x	x	
Poland	≤58				x	x	
Portugal	≤60				x	x	
Slovakia	≤58				x	x	
Slovenia	≤58				x	x	
Spain	≤64				x	x	
Sweden	≤56				x	x	
Switzerland	≤52				x	x	
UK	≤61				x	x	

Fig. 12 Tabla donde se expone qué muestras cumplen con la legislación sobre el ruido de impacto de veinticuatro países europeos. [Martins]

Se concluye el estudio comprobando si las soluciones constructivas cumplen con el Nivel de Presión Sonora a Ruido de Impacto Normalizado Ponderado $L'_{n,w}$ (dB), (ponderado según la norma UNE- EN ISO 717-2) (en inglés, Weighted Normalized Impact Sound Pressure Level), definidas por la legislación de hasta 24 países. Se ha obtenido que el suelo de madera, además de los dos suelos de madera-hormigón realizados, no cumplen con dicha legislación. Para que sean aceptados por los requerimientos de cada país, los suelos de madera-hormigón deben instalarse junto con el falso techo (Fig. 12).

Por otro lado, respecto a ensayos realizados con muestras pequeñas (maquetas) Foret et al. [Foret], hace un estudio comparativo entre resultados conseguidos por el método realizado en cámaras acústicas normalizadas UNE-EN ISO 10140, y los resultados obtenidos mediante el método de maquetas, presentado en la norma ISO 16251-1 [UNE16251], para analizar la mejora de la reducción del ruido de impacto con revestimientos de suelo para el caso de suelos pesados, Para ello, fabricaron una placa de hormigón de dimensiones aceptadas por la normativa, y de un espesor de 20mm. Las cuatro esquinas de la losa se apoyan en cuatro patas hechas de ladrillo, con un soporte elástico de 10x10cm² como mediador entre ambos cuerpos, para aislar la losa de las vibraciones transmitidas por el suelo y viceversa (Fig. 13). Han usado dos tipos de revestimientos, simplemente colocados encima y no pegados, para este ensayo: una alfombra y 9 suelos diferentes de PVC.



Fig. 13 Montaje de la muestra según la norma que define un método alternativo para el estudio de forjados pesados, UNE-EN ISO 16251-1. [Foret]

Aunque la frecuencia de resonancia del conjunto, obtenida excitando la losa más la alfombra con una pelota de goma, no está por debajo del valor mencionado en la norma, los datos son concordantes en todo el rango de tercios de octava, desde 100Hz hasta 5000Hz, habiendo alguna discrepancia en torno a 400Hz, y a más de 2000Hz. A altas frecuencias, se conjetura que es debido a la forma de sujeción de los acelerómetros.

A partir de la losa de hormigón más la alfombra (Fig. 14), el estudio determina, además, la influencia de otros parámetros mediante una investigación exhaustiva, como la influencia de la posición de la máquina de impactos o de los acelerómetros, así como el número de posiciones usadas en ambos casos. Se halla que los resultados se ajustan muy bien a los de la norma ISO 10140-3 cuando se modifican las posiciones de la máquina y la de los acelerómetros, y que no es significativo realizar las medidas con una tercera posición de la máquina de impactos o con más acelerómetros. Los revestimientos de PVC muestran un resultado similar al observado con la alfombra (Fig. 14).

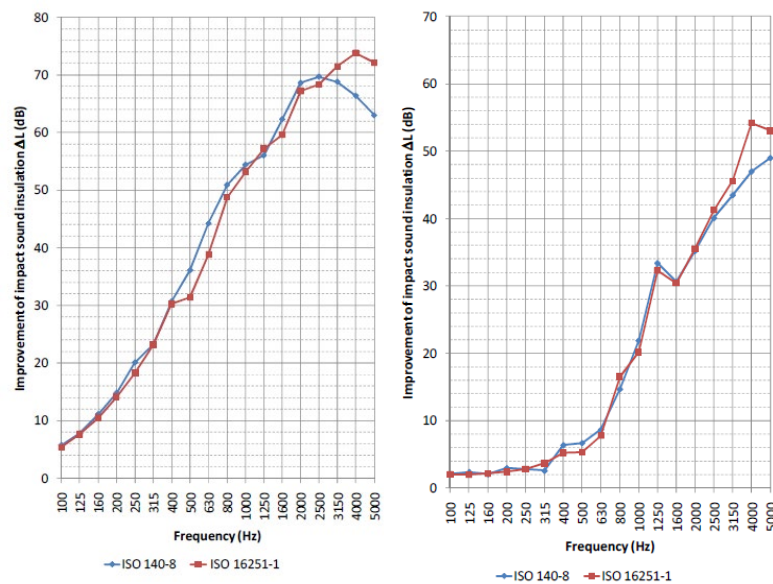


Fig. 14 Resultados de la mejora del aislamiento de ruido de impacto con: una alfombra como revestimiento (izquierda), un revestimiento de PVC (derecha); comparando los métodos presentados en las normas ISO 10140 y ISO 16251-1. [Foret]

Pereira et al. [Pereira] presenta un ensayo sin conseguir un buen aislamiento al ruido de impacto a bajas frecuencias, al analizar la reducción del ruido de impacto proporcionada por suelos de madera, y suelos de madera más una capa de hormigón (Fig. 15) (en total, tres suelos de este tipo, de diferentes dimensiones), colocando sobre dichos suelos dos aislantes y dos suelos flotantes. Estos cuatro son dispuestos sobre los suelos ejemplo en diferentes momentos, y son: una alfombra y láminas de vinilo (suelo LVT) como aislantes, y una capa de corcho compacto y una de goma como suelos flotantes.

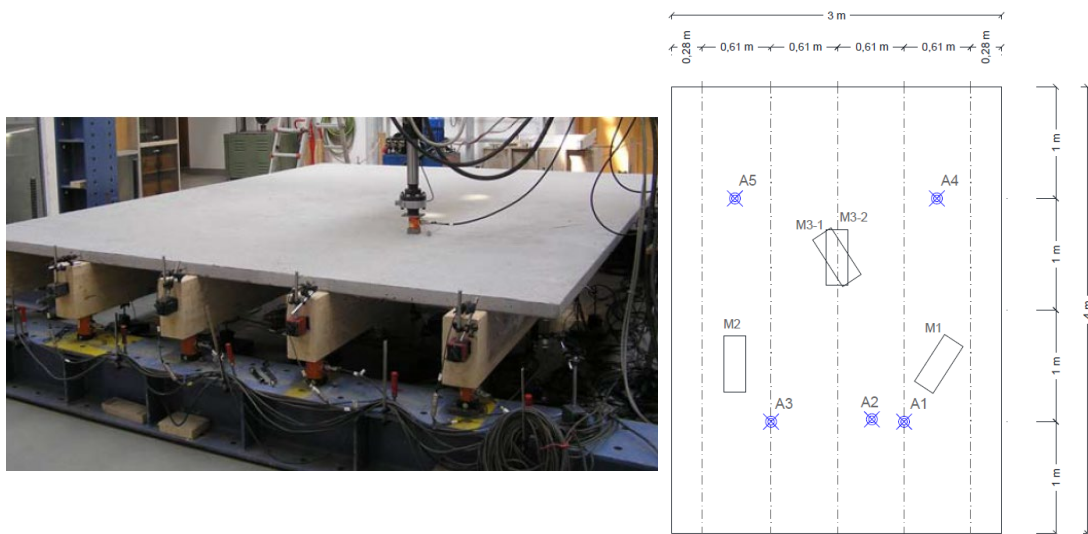


Fig. 15 Maqueta de madera-hormigón. Se han fabricado hasta tres tipos, de diferentes dimensiones (izquierda). Ilustración de la posición de los acelerómetros y de la máquina de impactos sobre dicha maqueta (derecha). [Pereira]

El documento sigue el método descrito en la norma ISO 16251-1, y el suelo de referencia a partir del que razona esa conclusión, es una losa de hormigón. Es decir, se compara la diferencia del nivel de aceleración conseguido a través de la muestra de madera y las dos maquetas compuestas de madera-hormigón, junto con dos aislantes y dos suelos flotantes (analizados estos en todas las maquetas), con respecto a una losa de hormigón “desnuda” (Fig. 16).



Fig. 16 Placa de madera (izquierda), y losa de hormigón (derecha), ambas de dimensiones semejantes a lo definido en la norma UNE-EN ISO 16251-1, y con la cadena de medida instalada. En ambas, el acelerómetro está adherido en la parte superior del montaje. [Pereira]

A frecuencias altas, se consigue una evidente mejora del aislamiento al ruido de impacto con el hormigón, siendo las soluciones constructivas de madera, más el elemento aislante o suelo flotante, poco eficaces. A bajas frecuencias se consigue un bajo aislamiento por parte de las dos muestras. En cuanto a los suelos compuestos de madera y hormigón (Fig. 17), la reducción del ruido estudiado, para cada frecuencia, es muy similar a lo conseguido con la losa de hormigón de referencia.

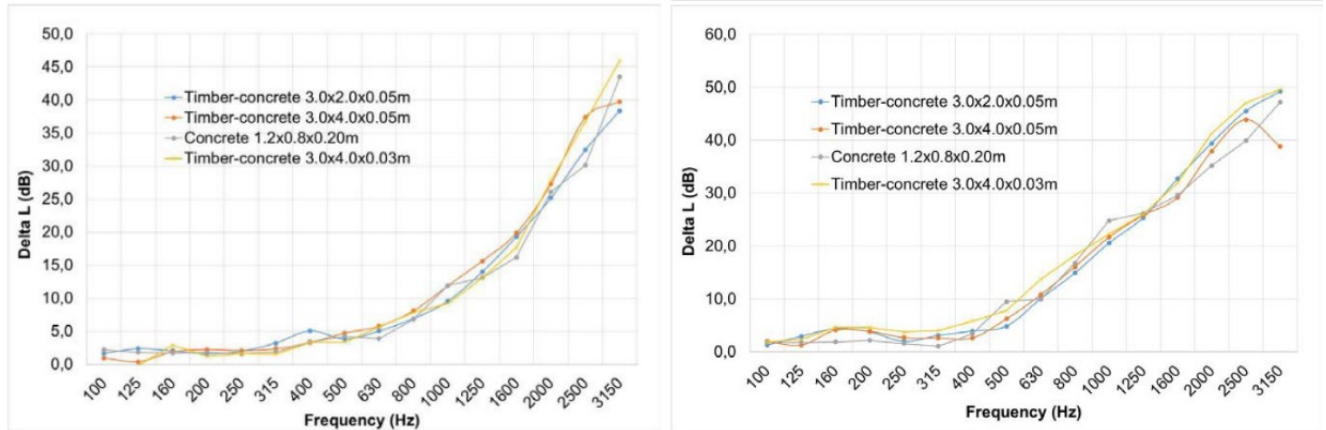


Fig. 17 Resultados de la mejora del aislamiento al ruido de impacto en los suelos compuestos de madera-hormigón utilizando una capa de vinilo flexible (PVC) (superior), y utilizando un suelo flotante con un revestimiento de goma (inferior). [Pereira]

Todos estos estudios, y muchos más, necesitan ser analizados en un marco común para obtener conclusiones significativas acerca de cómo las diferentes soluciones que se proponen se comportan entre sí [Jayalath].

3. Propuesta de metodología para suelos ligeros

A continuación, se presenta la metodología planteada para el estudio de suelos ligeros, inspirada en su mayoría en la normativa sobre maquetas para suelos pesados y en los estudios de suelos ligeros, sobre maquetas, presentados en la bibliografía consultada.

3.1. Descripción de la Cadena de medida

Para valorar los equipos de medida a utilizar, es necesario analizar el tipo de estudio que se quiere llevar a cabo. En nuestro caso, no se caracteriza el comportamiento absoluto del forjado ligero reproducido en un maqueta (mencionado en los objetivos descritos en el punto 1.3.), es una metodología comparativa entre distintos revestimientos.

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 respuesta a lo largo del tiempo, y un equipo de análisis de medidas. No obstante, es imprescindible provocar una perturbación, por lo que se utiliza una máquina que lo produce, pero no se recoge información durante su funcionamiento.

3.1.1. Medida de la respuesta vibratoria: Acelerómetros

Para medir la respuesta vibratoria de nuestra estructura se utilizan acelerómetros uniaxiales, que son transductores piezoeléctricos que permiten generar una señal eléctrica proporcional a la componente de la aceleración perpendicular a la superficie de medida. Se han usado hasta tres acelerómetros, de la marca "Brüel & Kjær", y los modelos usados son los siguientes: "DeltaTron Accelerometer Type 4513-B-001" Fig. 18 izquierda. Dos "Miniature CCLD Accelerometer Type 4508-B-003" 1 derecha.

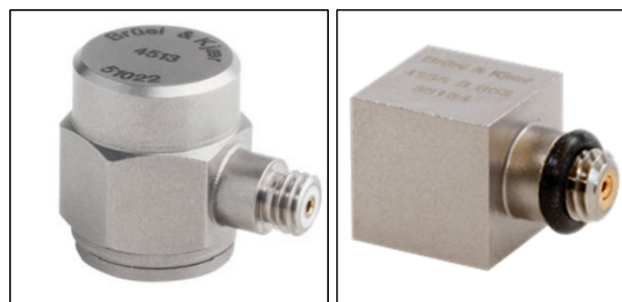


Fig. 18 Izquierda Acelerómetro "DeltaTron Accelerometer Type 4513-B-001". Derecha: Acelerómetro " Miniature CCLD Accelerometer Type 4508-B-003 Fuente: Ficha técnica de ambos y pagina web de la marca comercializadora [Brüel]

Ambos acelerómetros se caracterizan por ser piezoeléctricos y, además, son “acelerómetros IEPE”, de electrónica incorporada. Es decir, con conexión directa al sistema de procesado [Brüel]. También poseen la tecnología “TEDS” (Transducer Electronic Data Sheet), basada en un chip integrado en el sensor, que facilita al equipo de adquisición saber los parámetros significativos a la hora de configurar el canal correspondiente al acelerómetro en el equipo de adquisición, como la sensibilidad o el rango de frecuencia (para el acelerómetro “Type 4513-B-001”, la sensibilidad es $10,02\text{mV/ms}^{-2}$ y el rango de frecuencia es de 1 a 10000Hz; y para el acelerómetro 4508-B-003, la sensibilidad es 10mV/ms^{-2} y el rango de frecuencia es de 0,3 a 8000Hz); así como evitar los errores que pueden suceder al introducir los parámetros de forma manual [Dewesoftmanual].

Por último, los dos tienen un peso pequeño (8,6g el acelerómetro con código 4513-B-001, y 4,8g, el acelerómetro con código 4508-B-003), comparado con las maquetas a ensayar (el mínimo peso de 85,7kg), lo que hace que sean válidos para el estudio [Brüel].

3.1.2. Equipo de excitación mecánica: Máquina de impactos

La máquina de impacto Fig. 19 se encarga de excitar el sistema, imitando un “taconeo” sobre el suelo a caracterizar. El modelo es “EM-050”, comercializada por “Look Line Acoustics”, y cumple con las especificaciones presentadas en las normativa asociada [MImpactos].

Es de tipo electromagnético, en vez de funcionar por medio de un mecanismo formado por cadenas, poleas o engranajes que transmiten el movimiento a un eje (en ese caso, sería de tipo mecánico). Está compuesta de 5 cilindros de acero macizo, y funciona debido a la aplicación de un campo magnético inducido en cinco bobinas, una para cada martillo.

Los cilindros se elevan, debido al campo magnético, por una camisa de cilindro o guía, cuya función es la de retener al cilindro lateralmente. La inducción del campo magnético está meditada para que los cilindros caigan, de forma sincronizada (uno detrás de otro), desde una altura de 40mm y golpeen la superficie en un tiempo muy corto de tiempo (100ms), antes de volver a subir y repetir el ciclo. El doble impacto por rebote se evita debido a las levas que hay. El peso de la máquina es de 12kg y los martillos no están colocados de manera simétrica y esto se muestra con claridad en la representación esquemática de la Fig. 19. [MImpactos]

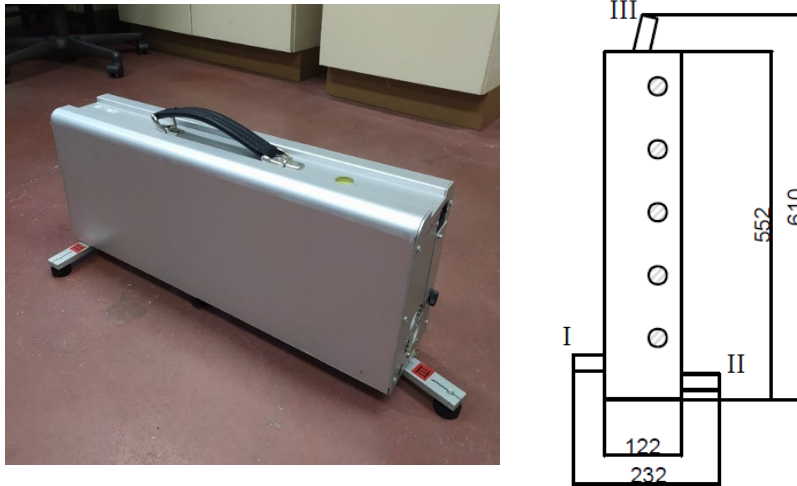


Fig. 19 Máquina de impactos estandarizada (izquierda), ilustración de ésta (derecha, elaboración propia)

Se trata de un equipo que se ha utilizado en estudios para poder generar una fuente de sonido artificial. Los siguientes artículos que se describen a continuación la utilizan para alcanzar diferentes objetivos.

El estudio de Wittstock et al. [Wittstock] se centra en la incertidumbre de las fuentes sonoras utilizadas en los métodos estandarizados por la ISO para caracterizar el ruido aéreo y por impacto que generan dichas fuentes. También se interesa en la predicción de la potencia sonora provocada por estos equipos. Para llevar a cabo estos objetivos, se ha caracterizado, hasta en siete laboratorios, una máquina de impactos estandarizada. Los valores experimentales recopilados han permitido validar las conjeturas teóricas que había acerca del tema.

En el caso del artículo de Rabold et al. [Rabold], se intenta encontrar un modelo numérico que permita obtener resultados similares a los que se obtendrían experimentalmente de la máquina de impactos estandarizada, para así evitar la preparación de ensayos complejos que estudian la optimización de los suelos ligeros en cuanto a ruido de impacto. Anteriormente se han realizado algunas propuestas, pero ninguna tiene en cuenta la velocidad relativa entre la vibración de la estructura y la excitación del martillo. Se propone aplicar, a dicho modelo que simula el efecto de la máquina de impactos, algunas formulas empíricas obtenidas de la bibliografía respectiva, presentadas en el informe de la menos complejas a la que más. Mejorando estas contribuciones, se consigue, finalmente, un modelo válido que permite comparar los resultados de las medidas experimentales con lo simulado, de manera correcta (Fig. 20). Incluso el modelo se acerca a deducir los picos de resonancia del sistema.

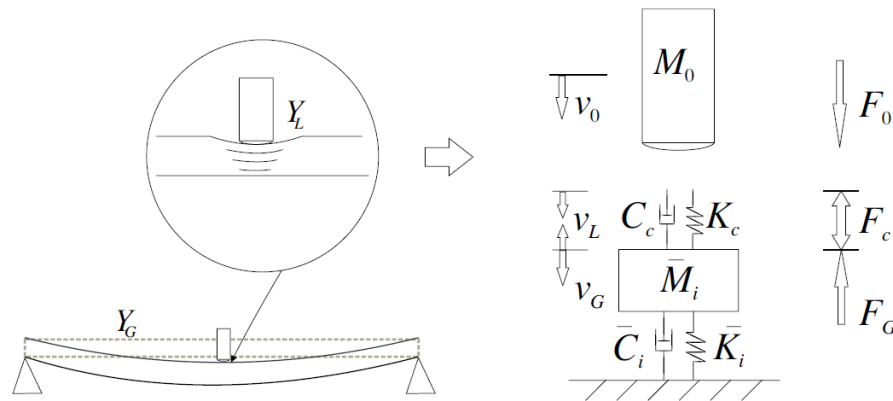


Fig. 20 Ilustración de la mejora propuesta para una de las fórmulas empíricas, en el que el sistema se desglosa de esta manera. Los términos "Y" hacen referencia a la respuesta global y local de la muestra, el término "C" se corresponde con el efecto de amortiguamiento, y el término "K" es la rigidez del elemento del sistema. Los términos "F" representan la fuerza [Rabold]

Por último, Lietzén et al. [Lietzén] describe el comportamiento de la máquina de impactos sobre suelos ligeros, materia que interesa para este Trabajo de Fin de Grado. El estudio comienza afirmando que la interacción entre la máquina de impactos estandarizada y el suelo excitado con ella, es diferente según el tipo de suelo a caracterizar. Por ello, el objetivo de este informe es justificar esto, y para ello, se estudia el impulso temporal generado por la máquina, y el espectro en frecuencias, de manera experimental. Se utilizan hasta veinticuatro suelos de madera, algunos compuestos de un tablero de CLT y una losa aligerada prefabricada (de hormigón), y en otros casos, se presentan estos dos elementos por separado. Además, se han combinado con un parquet multicapa, con un suelo de PVC, y con un suelo flotante hecho de lana de roca y dos paneles de cartón yeso.

En primer lugar, se ha modificado la máquina de impactos añadiendo, al martillo central, un sensor de fuerza en el extremo del cilindro que golpea el suelo para medir la fuerza ejercida, y un sensor de aceleración en el extremo contrario para medir el movimiento del martillo, como se ilustra en la Fig. 21.

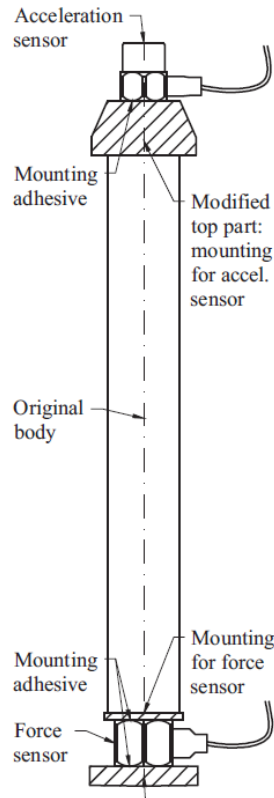


Fig. 21 Ilustración de la modificación realizada en el martillo central de la máquina [Lietzén]

Tras ajustar algunos aspectos por la alteración introducida, la máquina se ha colocado hasta en cinco posiciones en cada muestra, sin cambiar su situación al estudiar distintas muestras. En las medidas de los sensores, se han buscado los impulsos que realiza el martillo, y se ha establecido el valor a cero de la medición de la fuerza durante los impactos del martillo alterado, cuando los otros martillos actúan. Se presenta, en la Fig. 22, la respuesta temporal sin modificar, la medida alterada, y el espectro en frecuencias conseguido, todo ello, en cada posición donde se ha colocado la máquina. Aunque el espectro en frecuencias no es exactamente plano, que es como debería ser teóricamente, es similar a éste, descendiendo a partir de los 1000Hz.

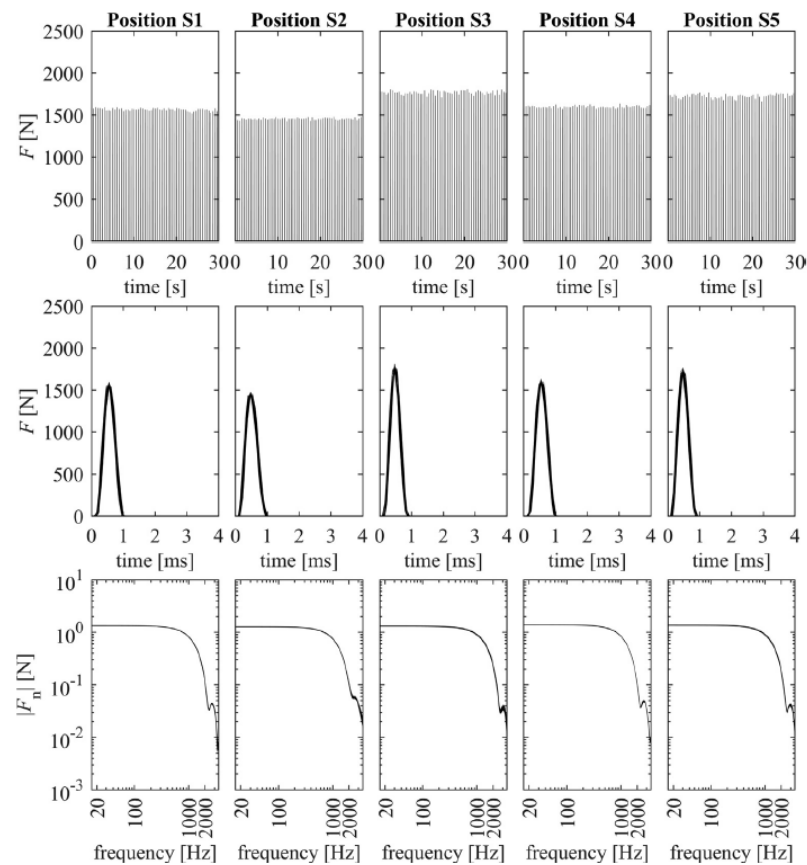


Fig. 22: Representación temporal de la fuerza realizada por la máquina de impactos en las cinco posiciones (fila superior); fuerza modificada en las cinco posiciones mencionadas (fila central); y espectro en frecuencia del impulso realizado por el martillo, en las cinco posiciones (fila inferior). Fuente: [Lietzén]

Las siguientes graficas (Fig. 23) representan, de izquierda a derecha, los espectros en frecuencia de la media aritmética de todas las fuerzas periódicas individuales que suceden en cada muestra, cuando la máquina se sitúa en la posición 1; el nivel de fuerza en bandas de tercios de octava desde 20Hz hasta 3150Hz; y la desviación estándar de estos niveles.

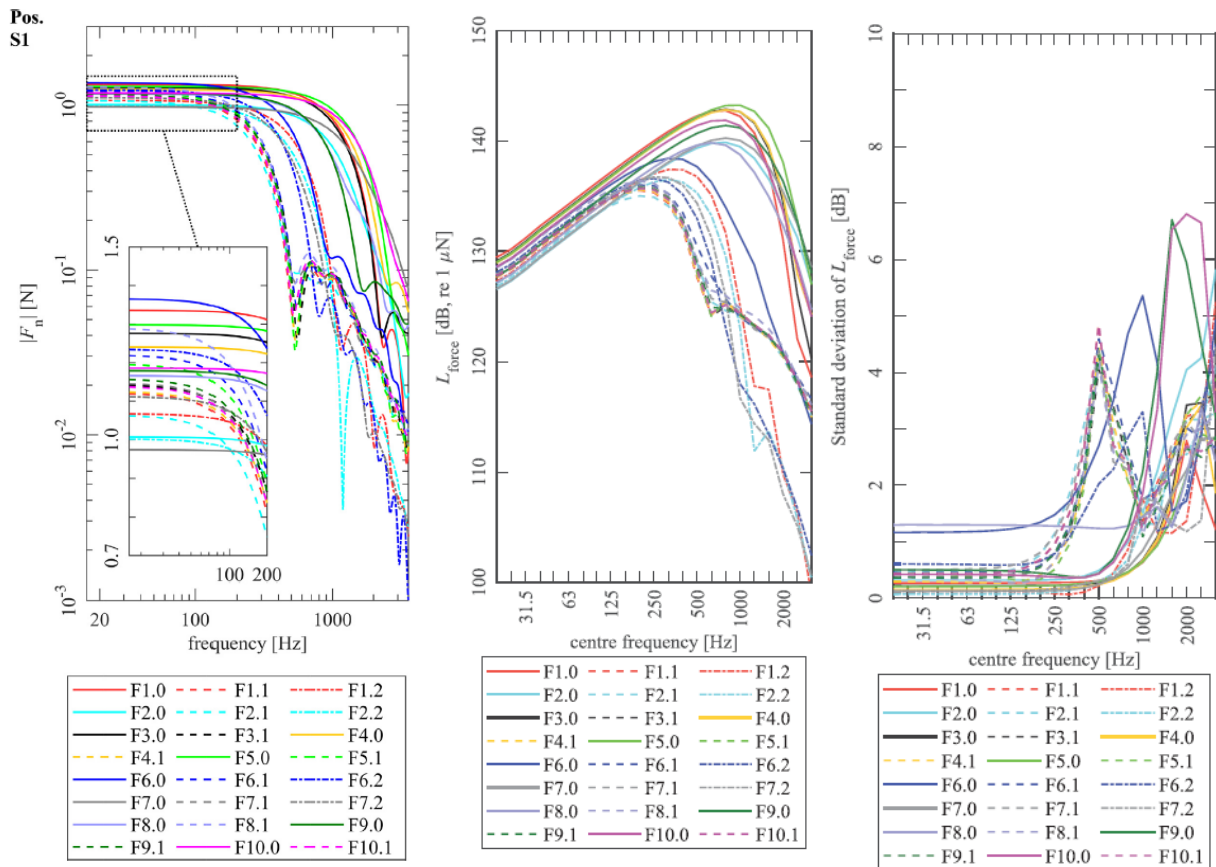


Fig. 23 Espectro de fuerza de cada muestra estudiada, representando en el eje de ordenadas el módulo de la fuerza alcanzada. Se ha calculado mediante la media aritmética de los impulsos de fuerza del martillo en la posición 1 (izquierda.); el nivel de fuerza medio, calculado a través de los datos de las cinco posiciones de la máquina, en el rango de 20Hz hasta 3150Hz en bandas de tercios de octava (centro); y la desviación estándar del nivel de fuerza (derecha).

Los resultados con el vinilo acolchado y el suelo flotante están dibujados con líneas discontinuas y puntos.

Estas gráficas afirman lo enunciado al principio de este artículo, haciéndose las diferencias, entre los espectros, más grandes a partir de los 500Hz. Otra conclusión a la que llega el estudio es que la maquina excita las muestras de madera estudiadas de manera estacionaria. Es decir, la vibración de la estructura no influye en la fuerza que ejerce la máquina sobre ella.

La bibliografía que hay acerca de este tema revela que hace falta más información acerca del comportamiento de las estructuras ligeras excitadas por la máquina de impactos.

3.1.3. Equipo de adquisición y procesado en frecuencias

Para la toma de datos, se ha hecho uso del programa “DEWsoftX3”, líder mundial como software para la adquisición y tratamiento de datos , tanto en el

dominio temporal como en el dominio de las frecuencias, creado por la empresa del mismo nombre “DEWEsoft”. Es necesario disponer de una tarjeta de adquisición de datos de la misma marca para medir la información, por lo que se ha usado la tarjeta “SIRIUS Mini” (Fig. 24). Se caracteriza por tener cuatro canales analógicos para la conexión de transductores, con una frecuencia de muestreo máxima de 200kHz y un rango dinámico de hasta 160dB. Es una opción portátil, alimentada solamente por conexión USB a un ordenador [Sirius].



Fig. 24. Tarjeta de adquisición SIRIUS Mini

Este equipo es de nueva adquisición en el departamento, por lo que gran parte del trabajo de este estudio ha sido realizar una exhaustiva lectura de los manuales facilitados por la marca para comprender la interfaz del software, las opciones de medición y los parámetros a tener en cuenta para la obtención de medidas correctas. En el Anexo B se explican los módulos utilizados para realizar la obtención de los datos, así como los pasos a seguir para configurar el programa, mientras que, aquí, se resume la configuración de los parámetros utilizados para realizar las medidas.

Todas las etiquetas que aparecen en la interfaz de este programa se citarán, en este documento, **en negrita**.

En la Fig. 25 se muestra una captura de los canales que posee la tarjeta de adquisición para realizar las medidas. Se han usado tres de los cuatro canales (activando **Used**, columna izquierda) que posee la tarjeta de adquisición, todos menos el primero. Se han conectado tres acelerómetros para registrar la respuesta del sistema, y en la Fig. 26 se muestran los parámetros característicos

de cada acelerómetro, definidos en el programa seleccionando, en la columna derecha de los canales, **Setup**. (**Measure**→**Ch, Setup**→**Analog In**)

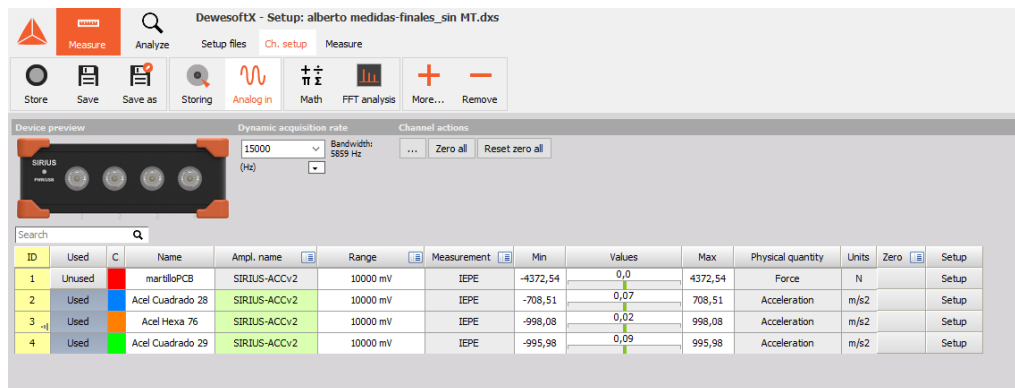


Fig. 25 Canales de conexión de la tarjeta SIRIUS Mini

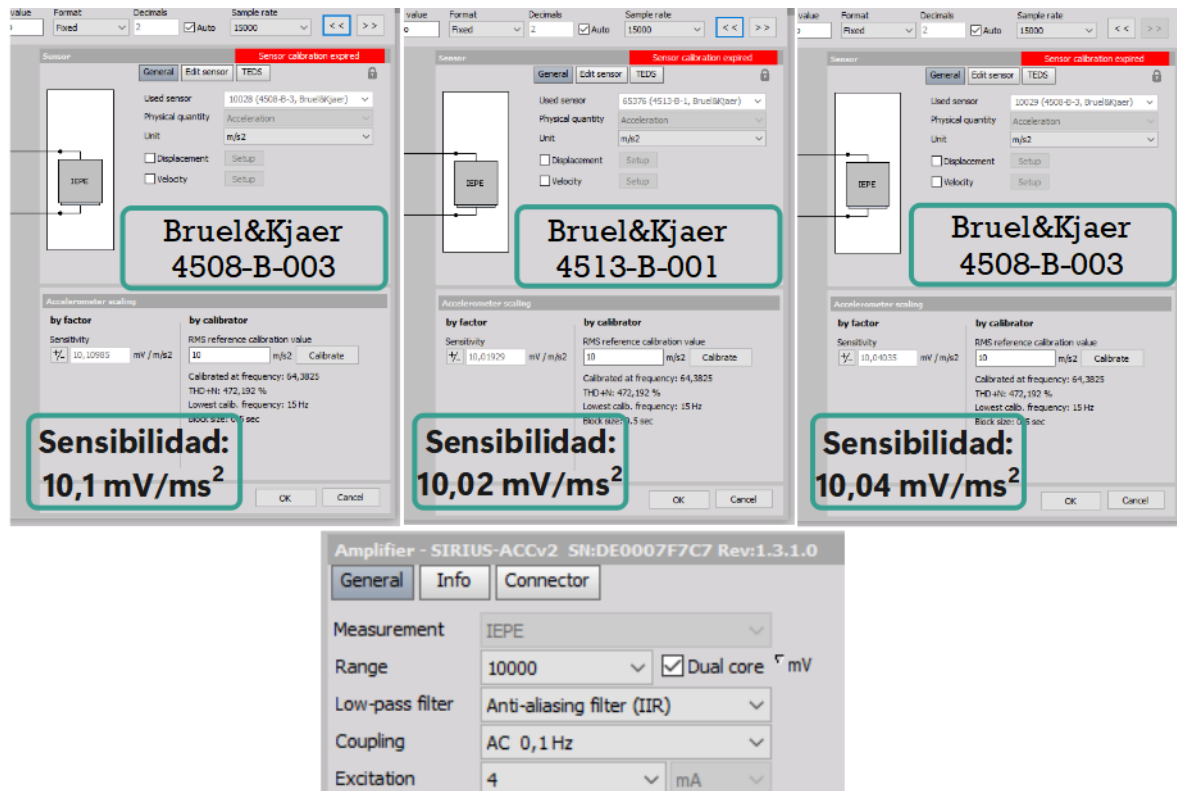


Fig. 26 Configuración usada para cada uno de los tres acelerómetros (de izquierda a derecha, canal 2, 3 y 4), la imagen inferior es común para los tres.

Dentro del módulo de **Math** (**Measure**→**Ch, setup**→**Math**) se añade el submódulo de análisis de octavas (en inglés, “octave analysis CPB Constant Percentage Bandwidth), pulsando en **Add Math**, y después, en **Octave Analysis**. La configuración se presenta en la Fig. 27. Pulsando en la pestaña **More** hemos añadido, al igual que hemos hecho con el módulo de **Math**, el módulo de análisis en el dominio de las frecuencias mediante la transformada rápida de Fourier (Fast Fourier Transform), **FFT Analysis** (Fig. 28).

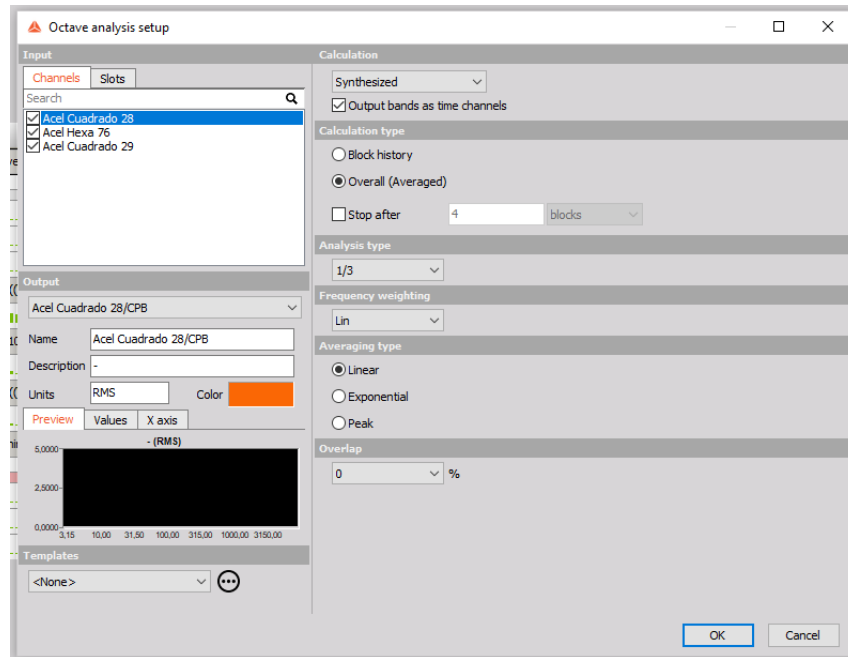


Fig. 27 Configuración para el análisis de octavas

Se destaca la importancia de marcar **Overall (Averaged)** para realizar el promedio del nivel de aceleración alcanzado en toda la medición y no observar solo un instante determinado de la medida; seleccionar, como tipo de análisis, la opción de tercios de octava; y activar () los tres canales donde se encuentran conectados los acelerómetros. Para el resto de los parámetros, es recomendable seguir la configuración que se muestra en la Fig. 27.

El programa evalúa la amplitud de la aceleración (promediado RMS) y no el nivel de aceleración (unidades $\text{dBref}10^{-6}\text{ms}^{-2}$), por lo que es necesario realizar el cálculo del nivel de aceleración, seleccionando **Formula**, en cada acelerómetro, aplicando la Eq. 6 tres veces (Fig. 29).

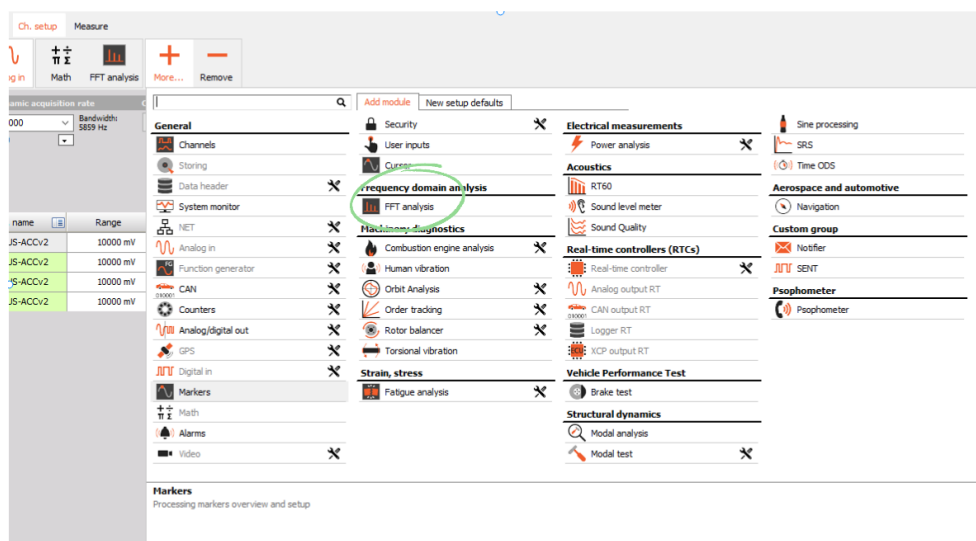


Fig. 28 Localización del módulo FFT.

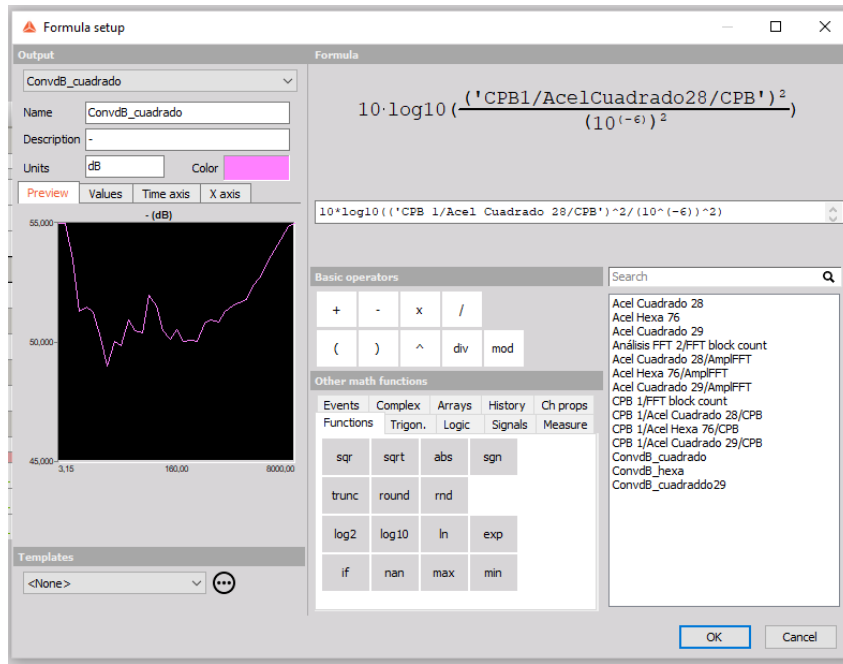


Fig. 29. Fórmula para la conversión de los datos medidos por el acelerómetro del canal 2 a nivel de aceleración. Ha de realizarse esto para cada canal.

El módulo de análisis en el dominio de la frecuencia FFT Analysis se ha preparado por si, en un estudio futuro, se analizan las frecuencias de resonancia del sistema. De todos modos, es útil visualizar la transformada rápida de Fourier a la hora de recoger las medidas, ya que puede informar sobre la coherencia de estas. En la Fig. 30 se muestran la configuración utilizada.

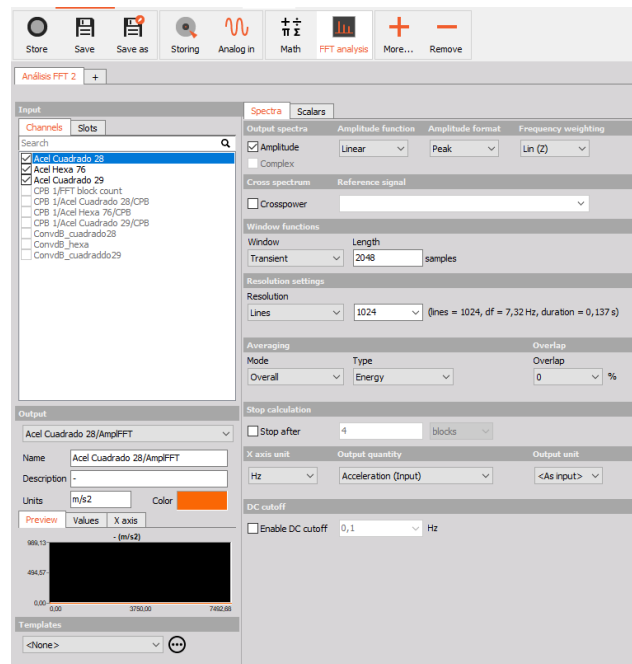


Fig. 30 Configuración realizada para el análisis de FFT

Se destaca, de la Fig. 30, la selección () de los tres acelerómetros; la elección, dentro de **Output spectra**, **Amplitude**, con el resto de las opciones como en la imagen; la elección de ventana tipo “transitorio” (**Transient**, en **Window**); el tipo de promediado (**averaging**) como **Overall**; y, por último, la resolución en frecuencias del sistema (**Resolution settings**), que puede ser la que desee el usuario.

Acerca de lo último mencionado, el programa utiliza la frecuencia de muestreo (**Dynamic acquisition rate**), indicada por el usuario en la ventana de la ruta **Measure**→**Ch**, **Setup**→**Analog In**, y el número de líneas especificado en la Fig. 30 para realizar el cálculo. En el anexo B se explica un poco más acerca del cálculo de la resolución en frecuencias.

Además de todo esto, para poder exportar los datos, es necesario añadir, en **Math**, el submódulo de **FFT**, configurado como se muestra en la Fig. 31.

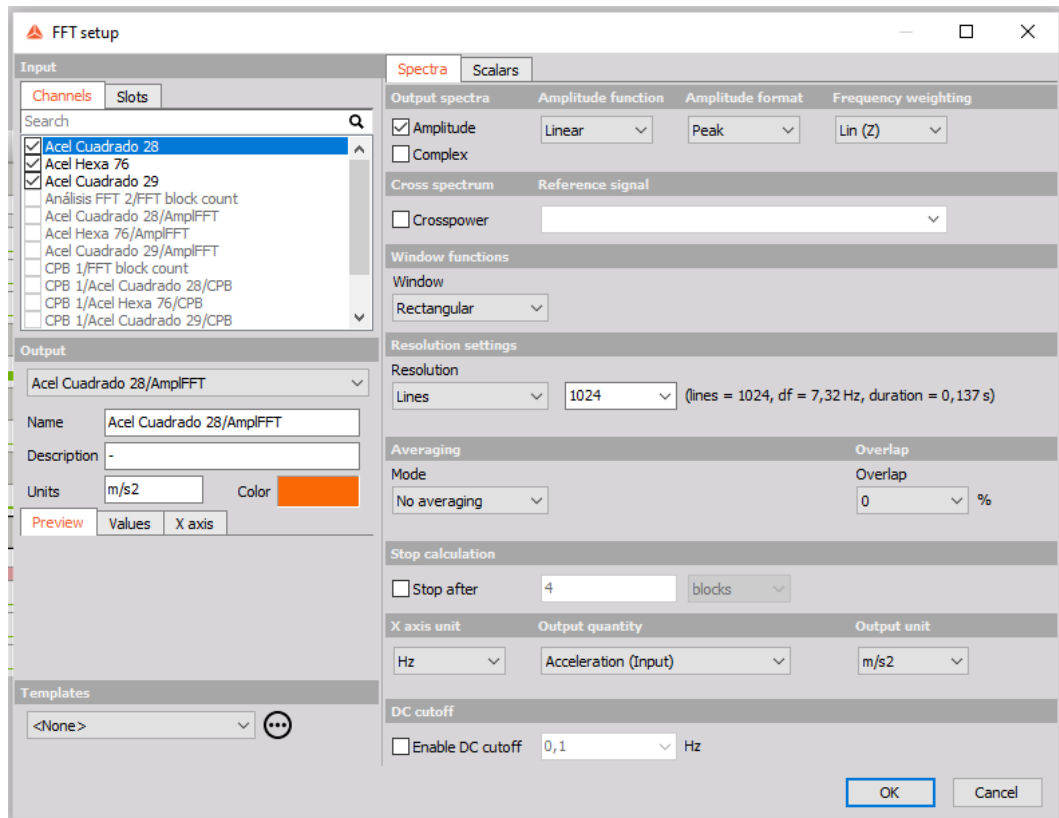


Fig. 31 “FFT” en el módulo de “matemáticas” del programa

Como consejo, acerca de la configuración de la resolución en cada módulo de operaciones del programa (Fig. 30 y Fig. 31), es muy recomendable que ésta sea la misma en todas las pestañas, para evitar confusiones.

En **Measure** → **Measure**, se procede a realizar la medida de los datos (Fig. 32). Para disponer de la forma mostrada los gráficos, se ha hecho uso de “registradores” temporales (**Recorder**), de gráficos para visualizar “FFT” (FFT

Preview), y de gráficos para visualizar análisis octavas (Octave Preview), además de una lampara indicadora para saber cuándo se está almacenando la medición (Indicator Lamp), y un medidor digital para saber el tiempo de medida (Digital Meter); todos ellos añadidos en Widgets. En el anexo B se detalla la configuración de cada gráfica y “widget” usado.

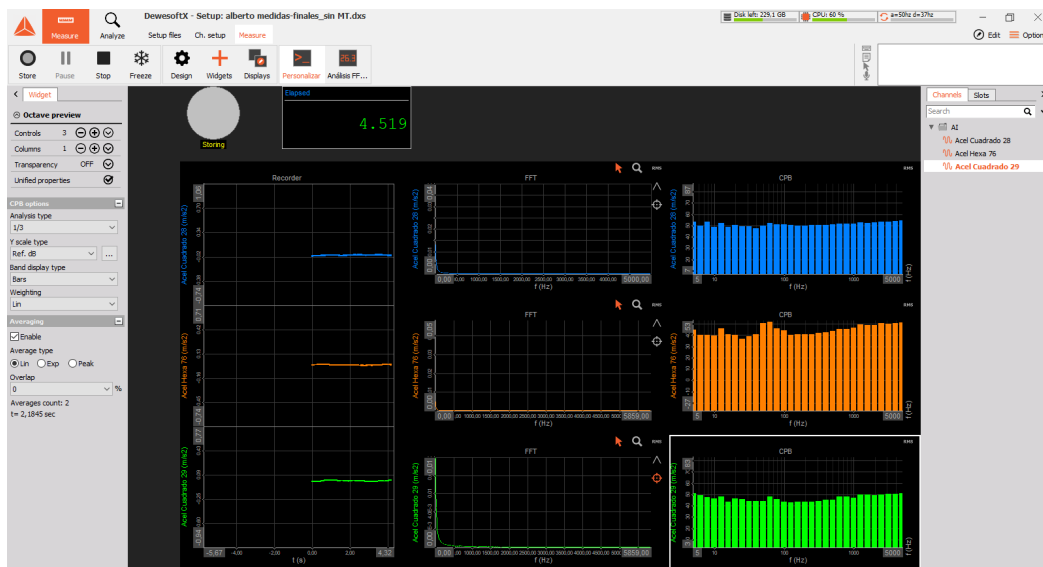


Fig. 32 Disposición propia para la visualización durante la toma de medidas.

El programa ya estaría listo para su uso. Las opciones que se encuentran en **Storing** vienen definidas más adelante, en el apartado 3.4. de este informe.

Por último, es importante enfatizar en que una de las ventajas que posee el programa, es que puede analizar los datos en frecuencias, creando espectros para interpretar los resultados recogidos en el dominio del tiempo.

3.2. Maqueta de suelo ligero

Se han creado dos maquetas que simulan ser un suelo ligero de pequeñas dimensiones. Una de ellas está compuesta de un tablero de madera contralaminada (CLT) y una losa de hormigón con dosificación estándar; y la otra, se ha obtenido combinando el mismo tablero de CLT con una losa de hormigón cuya dosificación incluye gránulos de Neumático Fuera de Uso (NFU) (Fig. 33).

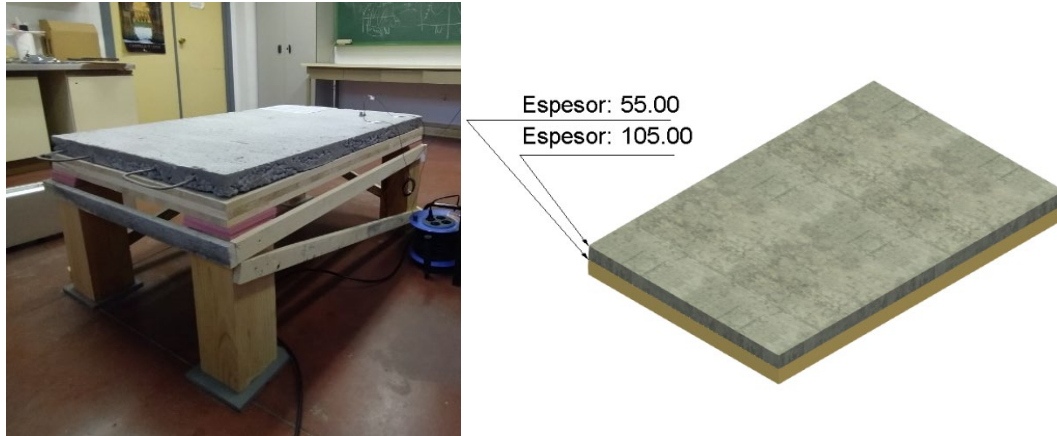


Fig. 33 Estructura soporte junto a una de las maquetas instalada encima (izquierda), y una ilustración de la composición de las maquetas, con sus espesores definidos (derecha, elaboración propia).

Debido a la necesidad de provocar una desconexión entre las muestras de estudio (denominado así a la maqueta de suelo ligero más un revestimiento acústico), y los alrededores de las mismas, se ha creado una estructura soporte compuesta de cuatro patas de madera, unidas entre sí con tablas atornilladas, y de varias planchas de un material antivibratorio (más adelante denominado como Sylomer), que corresponden a los soportes elásticos nombrados en la norma [UNE16251].

En la Fig. 34, se muestra el montaje final de la estructura soporte (similar a la de otros estudios, Fig. 13 y Fig. 16) junto con una de las maquetas conformadas; y una ilustración que representa el detalle de los soportes elásticos, conseguidos con las planchas mencionadas, y la disposición de los distintos equipos de medida en el ensayo (como se ha indicado, se presenta todo esto en este apartado para dar un contexto a lo siguiente).

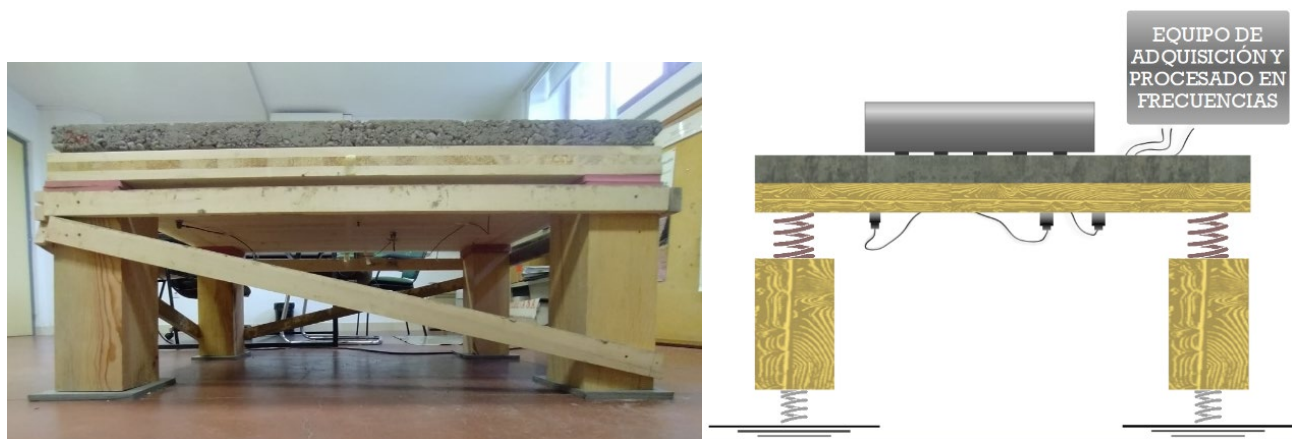


Fig. 34 Estructura soporte más una maqueta (izquierda), ilustración del sistema (derecha, elaboración propia)

3.3. Montaje del ensayo: Realización y Descripción de la maqueta y de la estructura soporte

Detalle las características del montaje realizado para poner a punto el ensayo experimental.

3.3.1. Fabricación y recogida de los componentes de las muestras

Los elementos, o capas, que forman las soluciones constructivas planteadas son las siguientes:

- Panel de madera contralaminada (CLT) (Fig. 35).

Se trata de un tablero hecho de chopo, del clon “Populus x euroamericana Guinier I-214”, encolado con Adhesivo de Poliuretano (PUR). Esta especie se encuentra cultivada, en su mayor parte, en la comunidad autónoma de Castilla y León, con respecto al resto de comunidades; y dicho clon es el más extendido dentro del cultivo de chopo. Se permite el uso de hasta 29 clones de chopo, como material forestal de reproducción, en nuestro país [Balmori].

Posee un alto contenido en polisacáridos, un alto contenido de holocelulosa (de hasta un 80%, compuesto de un 50% de celulosa y un 30% de hemicelulosa), y bajo contenido en lignina. Este último factor aporta, a esta madera, un aspecto fibroso [Balmori]. A continuación, se presenta una tabla con algunas de sus propiedades (Tabla 1).

Madera de chopo, del clon Populus x euroamericana I-214			
Humedad (%)	Densidad (kg/m ³)	Modulo de elasticidad (MPa)	Resistencia última a rotura (MPa)
10,57	365,35	7550,78	39,60

Tabla 1 Algunas de las propiedades del CLT usado [Balmori]. Elaboración propia

La madera de chopo se emplea, principalmente, para fabricar tableros de partículas, tableros contrachapados y embalajes industriales. En segundo plano, también se produce pasta de papel con esta especie [Balmori].

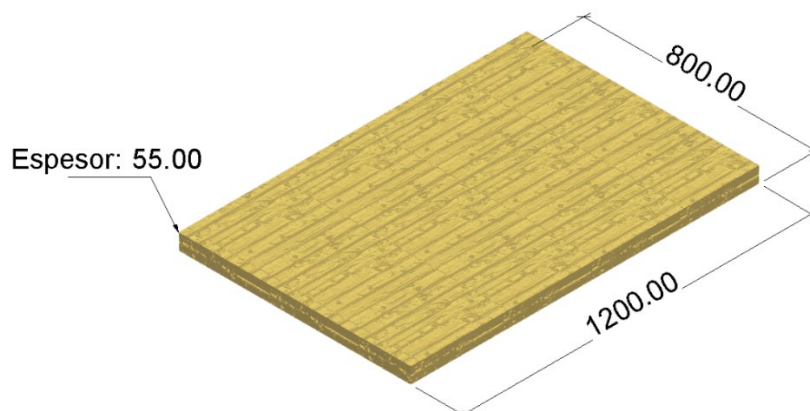


Fig. 35 Tablero de CLT, con las dimensiones del mismo indicadas. Elaboración propia.

- Losas de hormigón.

Se han fabricado dos tipos de losas. Una con una dosificación de agua, cemento, grava y arena estándar, para conseguir hormigón de resistencia “H25”, que a partir de ahora denominaremos losa de hormigón estándar. Y otra losa sustituyendo parte de la arena con granalla de NFU, que a partir de ahora denominaremos losa de hormigón con granalla de NFU. De ambas, se han elaborado dos, para futuros ensayos o por si sucede algún contratiempo durante la realización de las medidas, como algún defecto o grietas en el elemento. A continuación, en la Tabla 2 se presenta la dosificación usada.

Hormigón estándar			Hormigón con granalla de NFU		
Resistencia característica		H25	Resistencia característica		H25
Relación agua cemento		0,5	Relación agua cemento		0,5
Relación grava/arena		75/25	Relación grava/arena		60/40
Volumen (m ³)		0,048	Volumen (m ³)		0,048
Densidad probeta teórica (kg/m ³)		2465	Densidad probeta teórica (kg/m ³)		2345
Densidad probeta medida (kg/m ³)		2127,08	Densidad probeta medida (kg/m ³)		1785,42
Dosificación (teórica)	Agua (dm ³)	175	Dosificación (teórica)	Agua (dm ³)	175
	Cemento (kg/m ³)	350		Cemento (kg/m ³)	350
	Arena (kg/m ³)	485		Arena+granalla(kg/m ³)	775
	Grava (kg/m ³)	1455		Grava (kg/m ³)	1045
Mód. Granulométrico (Fuller)	Arena	3,16	Mód. Granulométrico (Fuller)	Arena	3,16
	Grava	5,21		Grava	5,21
Peso (kg)		102,1	Peso (kg)		85,7

Tabla 2 Composición de las losas de hormigón. Elaboración propia.

En primer lugar, se ha creado el encofrado, con las medidas oportunas, mediante listones de madera, y a continuación se ha llevado a cabo el corte y

la colocación de barras de acero (B500S, de diámetro 6mm) para formar la malla característica de la que se compone el hormigón armado Fig. 36 .



Fig. 36 Preparación del encofrado para elaborar la placa de hormigón (izquierda superior), encofrado listo para verter el hormigón fresco (derecha superior), detalle del montaje de la construcción de la malla de acero (izquierda inferior), y elaboración de la mezcla (derecha inferior).

Posteriormente, se ha realizado la dosificación de la mezcla para elaborar el hormigón (Fig. 36), y una vez preparado, se ha vertido el compuesto sobre los encofrados, obteniendo como resultado lo observado en la Fig. 37.



Fig. 37 Losas de hormigón fabricadas, estando el hormigón aun fresco.

- Capa de aislante

Hasta tres capas de distintos espesores de neumático fuera de uso (NFU) se han caracterizado Fig. 38. En la Tabla 3 se detallan las características de las mismas

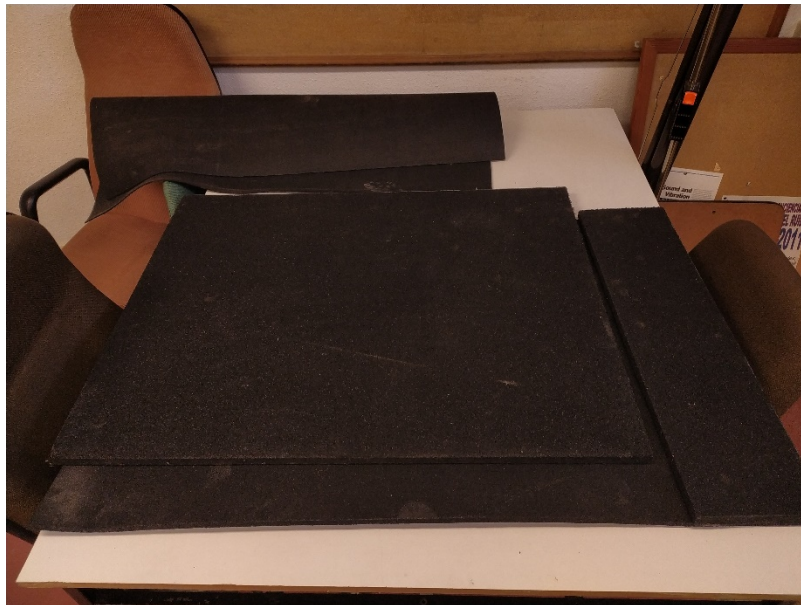


Fig. 38 Revestimientos utilizados sin montar, de distintos espesores.

Revestimientos utilizados				
Producto	Código	Espesor (mm)	Densidad (kg/m ³)	Composición
Manta de caucho	NFU4	4	980, 0	Conformada a partir de caucho reciclado (NFU)
Rollo de caucho	NFU10	10	776,8 - 790,2	Conformada a partir de granos de caucho reciclado (NFU) de granulometría 0,5-2,5 mm
Loseta de caucho	NFU20	20	752,7 - 769,2	Conformada a partir de granos de caucho reciclado (NFU) de granulometría 0,5-2,5 mm

Tabla 3 Especificaciones de los revestimientos usados. Elaboración propia.

Además, se han realizado unas patas de madera; y se ha utilizado unas planchas de ‘Sylomer’, de tipo “SR42” y “SR450”, material absorbente de vibraciones y ruidos, que usaremos para aislar toda la estructura de ensayo de las vibraciones transmitidas por el terreno, y viceversa (Fig. 39). En el siguiente apartado, se detalla dónde están situadas.



Fig. 39 Ilustración de las patas usadas, con sus dimensiones, elaboración propia (Izquierda, elaboración propia), y planchas de Sylomer comercializadas (derecha)

Las planchas de Sylomer, definidas en su catálogo como la mejor solución antivibrante, son resistentes a altas cargas (desde 100kg/m² hasta 1000t/m², dependiente de la densidad), factor a tener en cuenta si estamos colocando, encima de estas, paneles aislantes y losas de hormigón de gran peso. En su catálogo se describen muchas más de las propiedades presentadas aquí (Tabla 4), para los diferentes tipos de planchas comercializadas, y en diferentes condiciones de montaje, mediante gráficas [Sylomer].

PLANCHAS DE SYLOMER								
Material	Tipo	Cantidad	Dimensiones (cm ³)	Rango de trabajo a compresión (carga estática) (MPa)	Factor de pérdida mecánica (amortiguamiento)	Modulo elastico 'E' (MPa) a carga maxima	Modulo elastico dinámico 'E' (MPa) a carga maxima	Resistencia a la deformación (MPa) para deformarlo un 10%
Poliuretano de célula mixta	SR42 (rosa)	2x4	15x15x2,5	0,042	0,16	0,282	0,611	0,047
Poliuretano de célula mixta	SR450 (gris)	1x4	15x15x2,5	0,450	0,11	3,30	5,04	0,42

Tabla 4 Propiedades mecánicas y especificaciones de los tipos de planchas de Sylomer usadas. Elaboración propia.

3.3.2. Estructura soporte

Para el análisis de las maquetas de suelos ligeros, se ha construido, utilizando los tablonces de madera usados en el encofrado de las losas de hormigón, una especie de mesa (Fig. 41) donde apoyar las muestras de estudio. La Fig. 40 reúne algunas imágenes del proceso de construcción de la misma.



Fig. 40 Proceso de construcción de la estructura soporte.

Las tablas del encofrado se han dispuesto, en primer lugar, de forma horizontal, uniendo los listones de madera, antes mencionados, que hacen de pata de la estructura. Después, para reforzar el sistema en la dirección vertical (perpendicular al suelo) y, en general restringiendo el movimiento de una forma más completa de toda la estructura, se han situado más tablonces uniendo, diagonalmente, las patas del sistema, como se muestra en la Fig. 41.

Para aislar la maqueta de las vibraciones del suelo y viceversa, se coloca el material aislante mencionado. Las planchas de Sylomer están colocadas entre la parte inferior de la pata y el suelo (de color gris), y entre la parte superior de la pata y la maqueta (de color rosa) (Fig. 41). En esta última zona se han colocado dos planchas en vez de una, para mejorar la desconexión.



Fig. 41 Estructura soporte, junto al tablero de CLT (izquierda), modo de colocación de las planchas de Sylomer (derecha)

3.3.3. Sobre los acelerómetros, y las capas de revestimiento y maqueta

Siguiendo con el método propuesto, hay que definir la posición que tendrá la máquina sobre la muestra, y las posiciones de los acelerómetros.

Para el caso de los acelerómetros se han dispuesto, aleatoriamente, en la parte inferior de la maqueta, como explica la norma para el estudio de suelos pesados [UNE16251]. Hemos utilizado tres acelerómetros para la realización de la medida, aunque se han marcado hasta ocho posiciones para futuras mediciones, y se han colocado dejando un espacio de 10cm con todo el perímetro de la maqueta, como se puede observar en la Fig. 42.

Para llevar a cabo el proceso descrito en el anterior párrafo, se ha desmontado la maqueta y se han marcado los puntos con un sistema de referencia que, al volver a colocar el tablero, en la estructura soporte junto a la losa de hormigón, éste coincide con el designado en dicha losa. La Fig. 42 aclara este aspecto del proceso de preparación del ensayo.

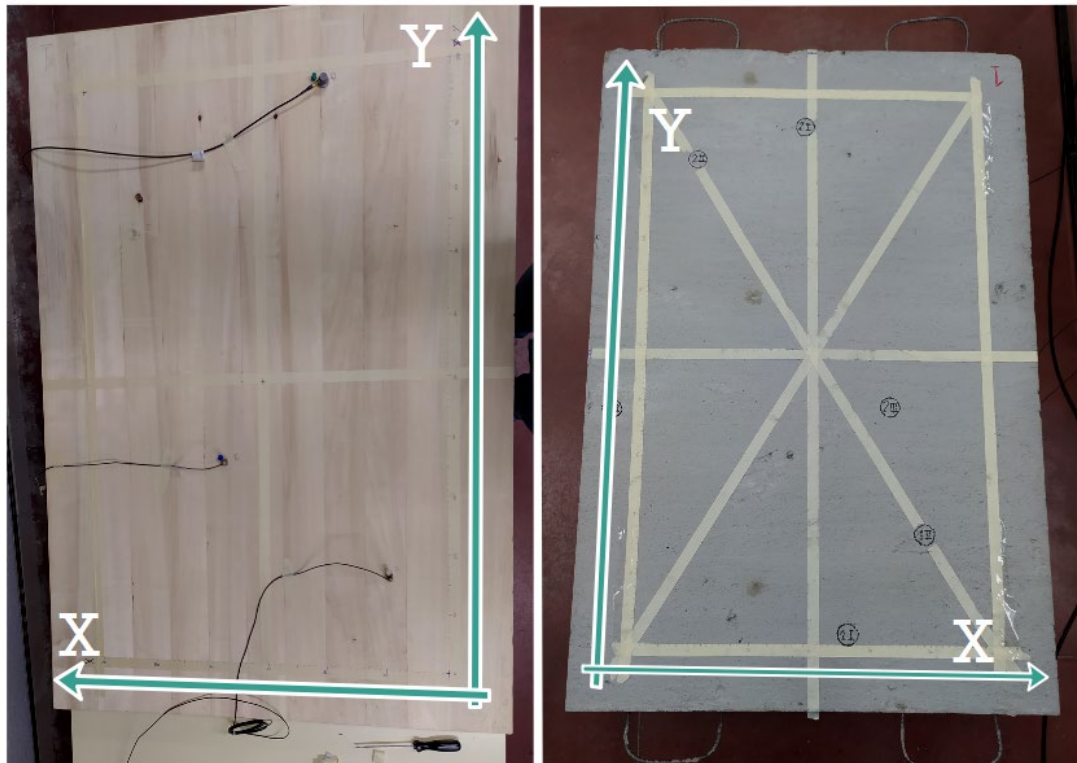


Fig. 42 Imagen del proceso de colocación de los acelerómetros en la cara del tablero situada más cerca del terreno, con los sistemas de referencia designados.

La disposición de los cables es importante, debido a que interfieren en la medición si estos se mueven. Por ello, se han sujetado al tablero con cinta de carroceros. La Fig. 43 detalla cómo se han sujetado los acelerómetros al tablero, que ha sido mediante cera de abeja, lo cual permite una sujeción sin introducir amortiguamiento entre la base del acelerómetro y la estructura a medir.



Fig. 43 Detalle de la instalación de los acelerómetros A y D.

Debido a que, a simple vista, no se puede observar la situación de estos puntos, se han colocado chinchetas de color para ubicar las posiciones de los acelerómetros, por si alguno se suelta y hay que volverlo a colocar.

En la Fig. 44 aparecen ilustradas las posiciones de los acelerómetros (marcadas con una X), así como los puntos donde se sitúan las patas de la máquina de impactos (definidos mediante un círculo discontinuo). Este último aspecto, se detallará más adelante. La Tabla 5 define las coordenadas de estos puntos, tomando como referencia el sistema de ejes dibujado en la Fig. 44, que es el que se ha marcado en la losa de hormigón Fig. 42. Los acelerómetros se han situado en las posiciones “a”, “c” y “d”.

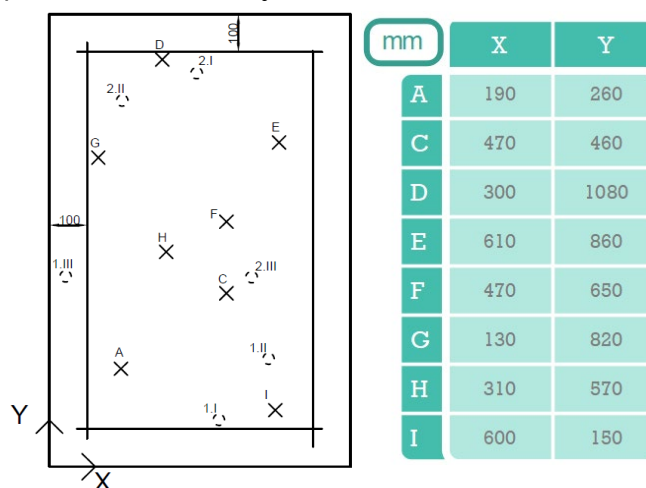


Fig. 44. Representación gráfica de los acelerómetros y las patas de la máquina de impactos. Elaboración propia.

Tabla 5 Coordenadas de los puntos marcados para colocar acelerómetros, en milímetros, referenciados al sistema de coordenadas de la Fig. 44

Los acelerómetros ya están preparados para su uso. Lo siguiente es fijar la posición de la máquina de impactos. En concreto, es necesario definir al menos dos posiciones de la máquina, cumpliendo con lo enunciado en la norma UNE-EN ISO 16251-1. En la Fig. 46, se muestran estas dos posiciones, ubicando la máquina en el espacio mediante la situación sobre la maqueta de las patas de la máquina. Estas están completamente abiertas, y se han enumerado con números romanos, como se muestra en la Fig. 45. La Tabla 6 indica las coordenadas cartesianas de estos puntos, referenciadas al sistema de la Fig. 46.

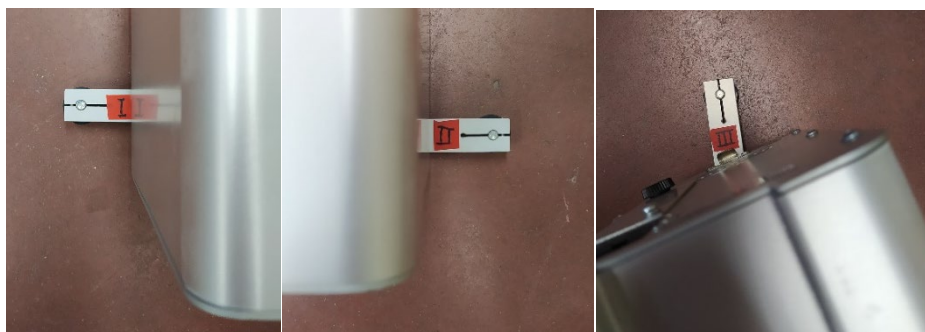


Fig. 45 Patas de la máquina numeradas

También se puede observar, en la Fig. 46, la ubicación de los martillos que generan la excitación mecánica. Estos, como se menciona en la norma que hemos utilizado como referencia para el ensayo, deben estar dentro del perímetro establecido al dejar 10cm con los márgenes de la maqueta. Se ha marcado dicho perímetro con cinta de carroceros como se puede ver en las Fig. 47, Fig. 48, Fig. 49 y Fig. 50.

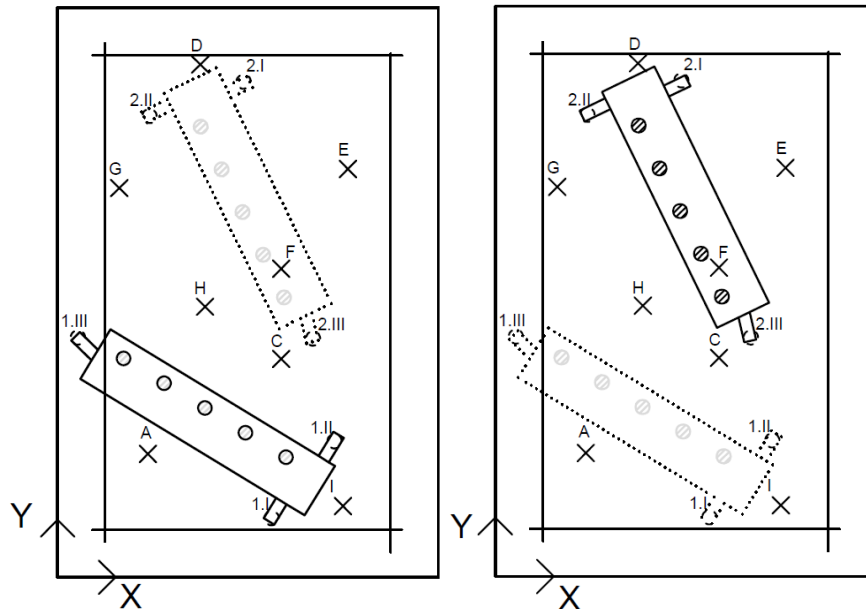


Fig. 46 Ilustración de las dos posiciones donde se sitúa la máquina de impactos. Elaboración propia.

mm	X	Y
1.I	450,0	124,5
1.II	582,0	286,5
1.III	43,0	505,0
2.I	391,0	1044,0
2.II	193,5	971,5
2.III	537,0	503,0

Tabla 6 Coordenadas de los puntos marcados para colocar las patas de la máquina, en milímetros, referenciados al sistema de coordenadas de la Fig. 46.

Debido a que la máquina se instala en la parte superior, donde se colocan los diferentes revestimientos, ha sido necesario marcar de alguna manera la situación de las patas de la máquina en todos los revestimientos, además de las dos losas de hormigón, ya que ha de situarse siempre en las mismas posiciones, con una tolerancia de ± 2 cm. Las siguientes figuras (Fig. 47, Fig. 48, Fig. 49, Fig. 50) plasman las dimensiones de los revestimientos, así como de la

losa de hormigón, y la forma en la que se ha señalado el factor descrito, delimitando con rotuladores la forma del apoyo de la máquina.

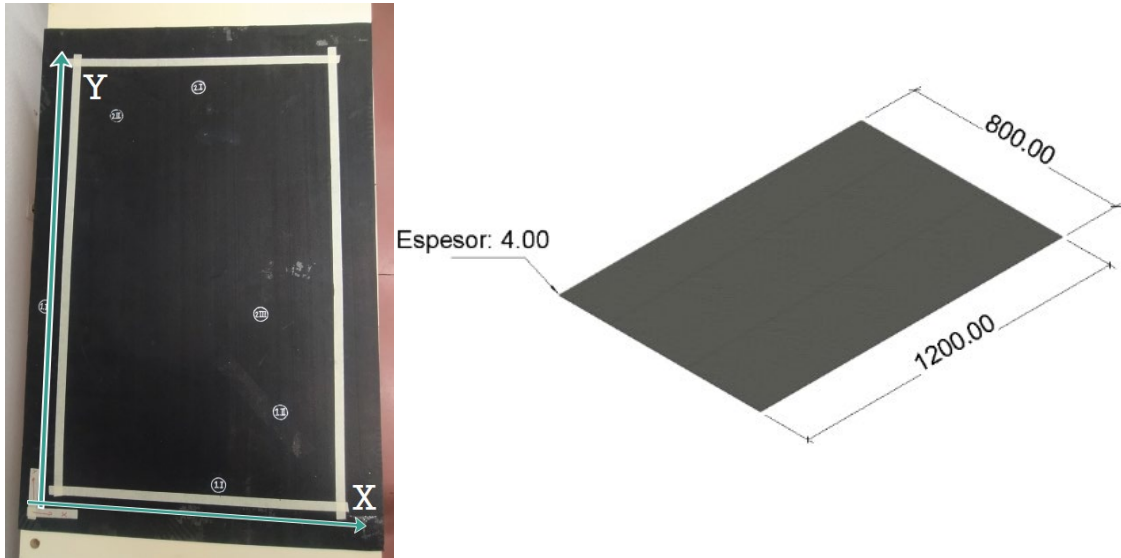


Fig. 47 Capa de NFU, de espesor: 4mm (izquierda). Ilustración de dicha capa (derecha, elaboración propia)

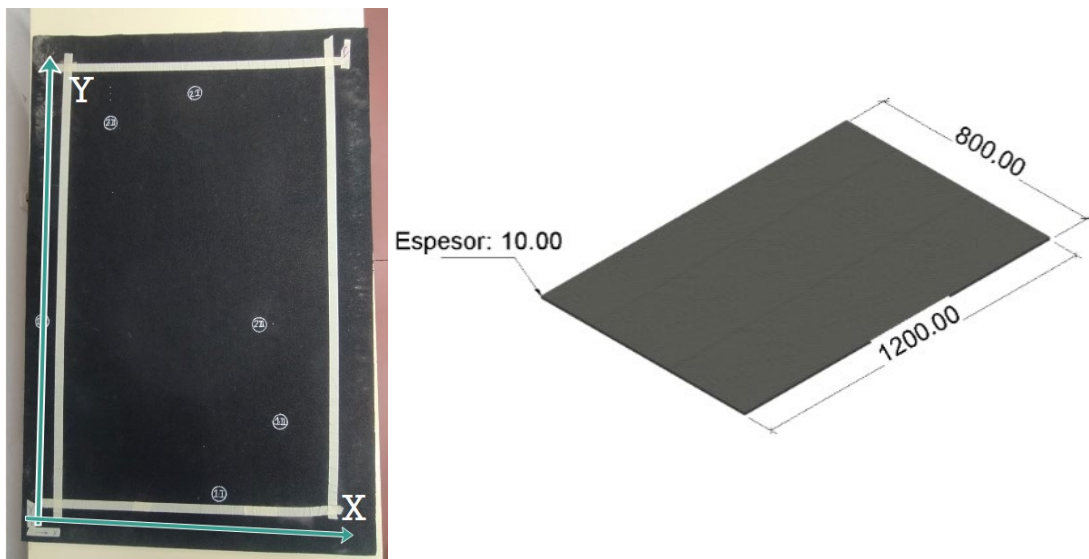


Fig. 48 Capa de NFU, de espesor: 10mm (izquierda). Ilustración de dicha capa (derecha, elaboración propia)

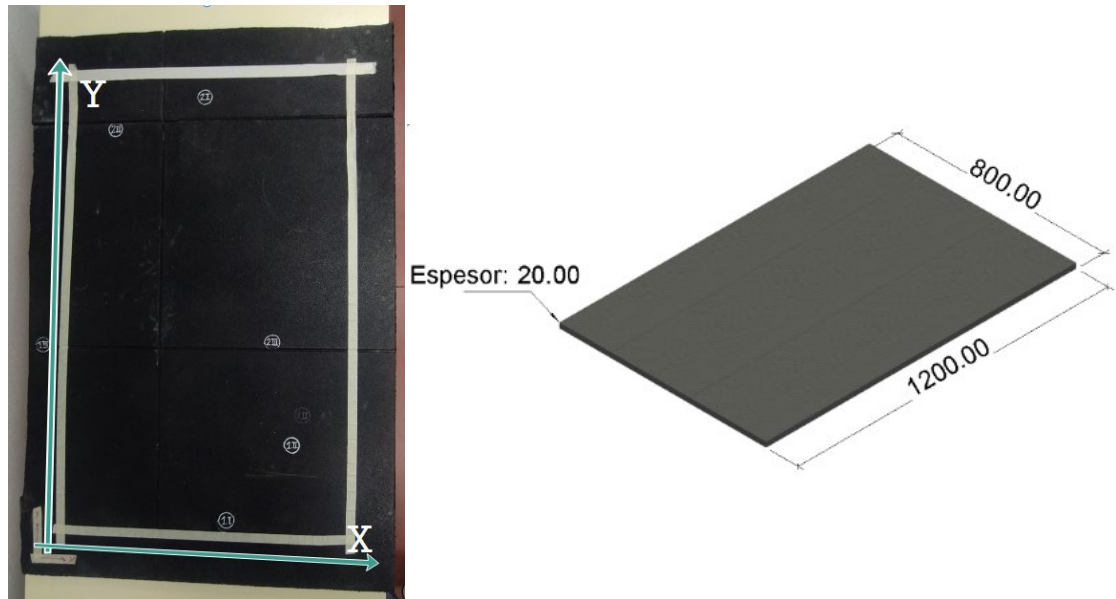


Fig. 49 Capa de NFU, de espesor: 20mm (izquierda). Ilustración de dicha capa (derecha, elaboración propia)

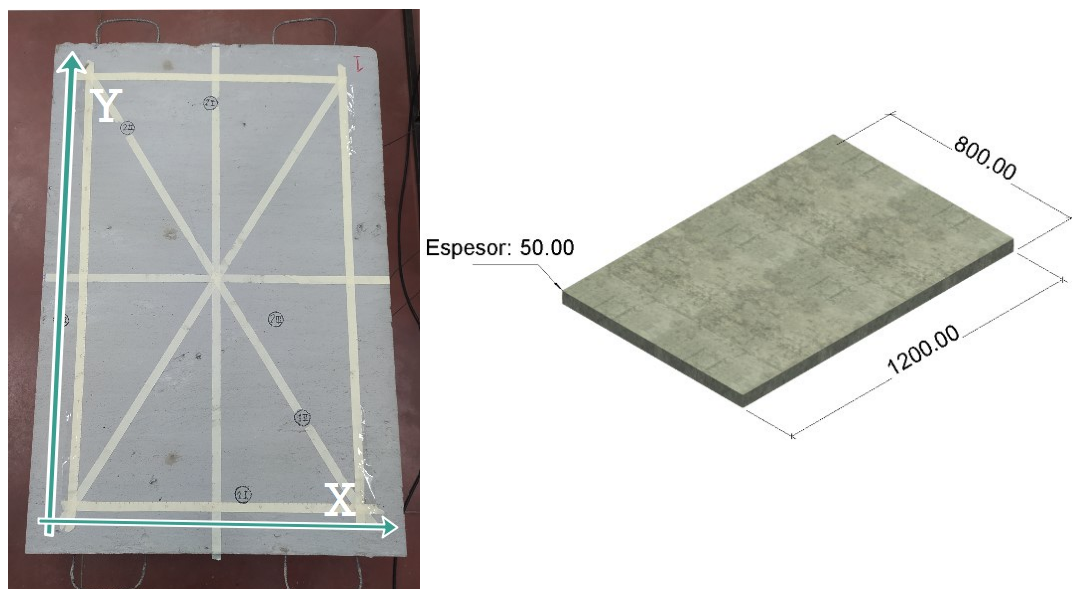


Fig. 50 Losa de hormigón estándar. Se ha realizado la misma operación de señalización en la losa de hormigón con granalla de NFU (izquierda). Ilustración de dicha losa (derecha, elaboración propia).

3.4. Muestras de ensayo

A continuación, se presentan los revestimientos de NFU junto a los dos tipos de maquetas usadas, que consisten en un montaje compuesto del tablero de CLT y una de las losas de hormigón, en el que se cambia solo la losa de hormigón para denominar el conjunto como otra maqueta; usados para caracterizar el comportamiento ante el ruido de impacto de cada revestimiento.

3.4.1. Muestra 1: Maqueta estándar junto a capa de “NFU4”

La Fig. 51 expone la muestra de estudio, con una foto del ensayo real, y una ilustración de la composición de la muestra.

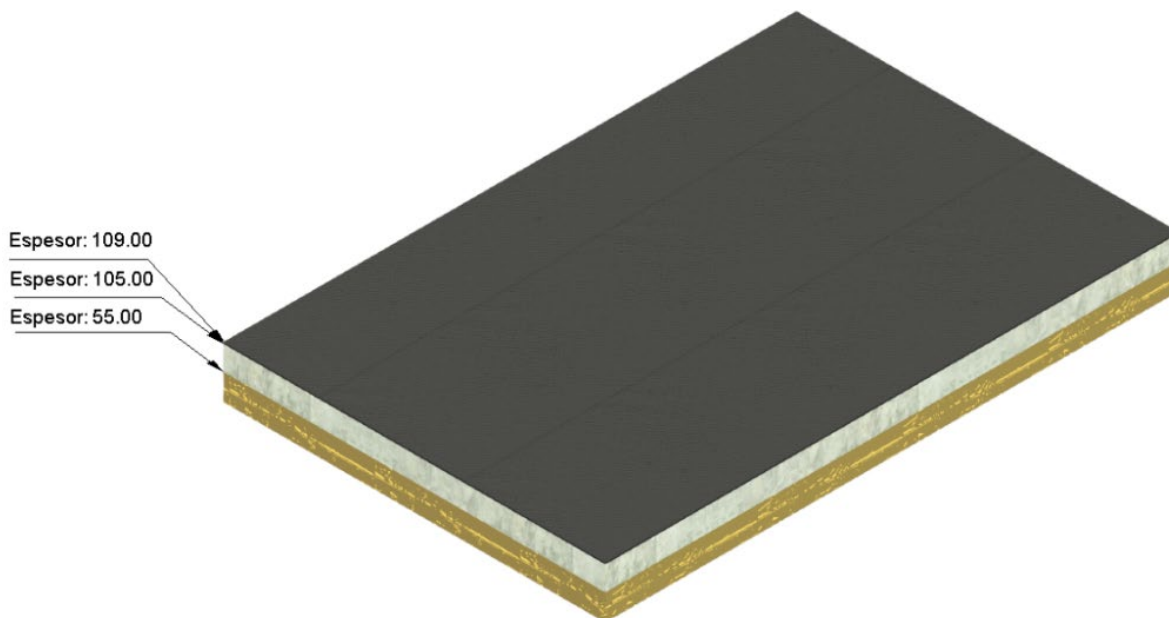


Fig. 51 Imagen de la primera muestra examinada (superior) y un dibujo tridimensional de cuál es la composición de la muestra (inferior, elaboración propia).

3.4.2. M. 2: Maqueta estándar junto a capa de “NFU10”

La Fig. 52 presenta, la segunda muestra que se ha analizado, compuesta del tablero de CLT, la losa de hormigón estándar y el revestimiento de NFU que tiene un espesor de 10mm.

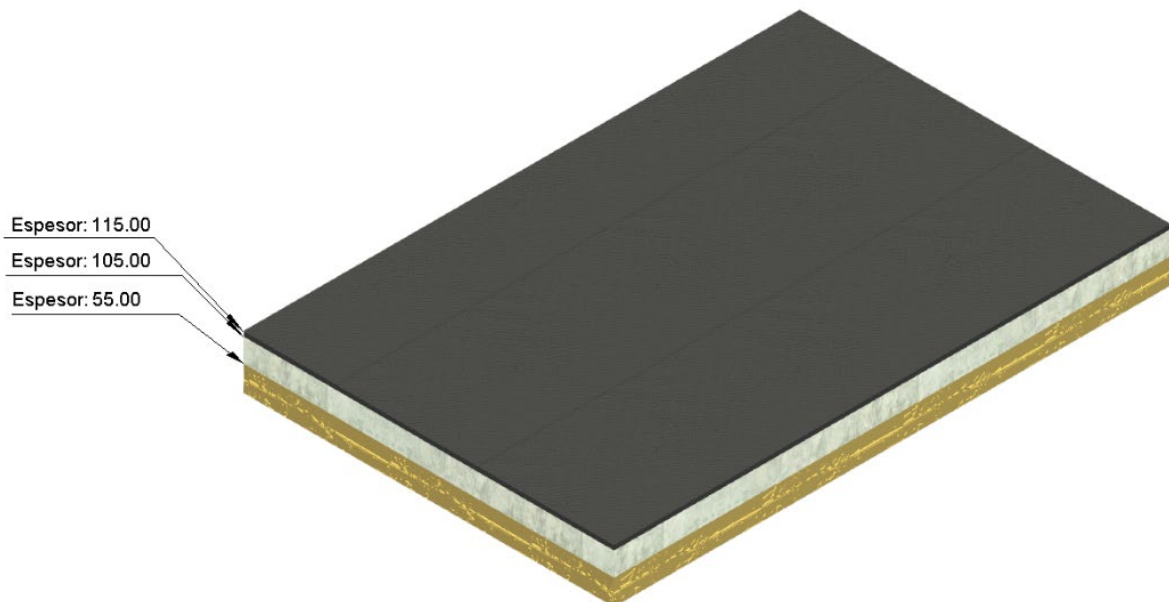


Fig. 52 Imagen de la segunda muestra examinada (superior) y un dibujo tridimensional de cuál es la composición de la muestra (inferior, elaboración propia).

3.4.3. M. 3: Maqueta estándar junto a capa de “NFU20”

La Fig. 53 enseña la tercera muestra de estudio, en el que se ha utilizado la capa, hecha de NFU, que tiene un espesor de 20mm, sobre la maqueta estándar.

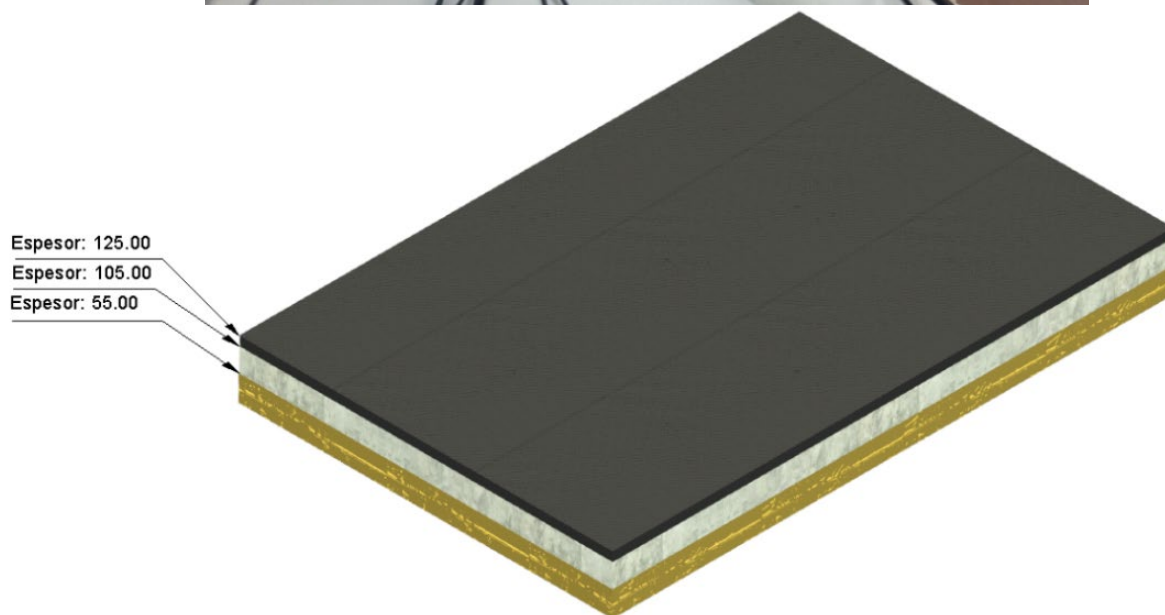


Fig. 53 Imagen de la tercera muestra examinada (superior) y un dibujo tridimensional de cuál es la composición de la muestra (inferior, elaboración propia).

3.4.4. M. 4, 5 y 6: Losa de hormigón con gránulos de NFU junto a capa de “NFU4”, “NFU10” y “NFU20”.

En este caso, las imágenes de las muestras de estudio podrían ser las mismas que las de las Fig. 51, Fig. 52 y Fig. 53, ya que en ellas no se puede diferenciar si la losa de hormigón posee una dosificación estándar, o está compuesta de gránulos de NFU. Por este motivo, se ha evitado insertar más imágenes de la muestras, para no llenar el informe con redundancias. La muestras están compuestas del tablero de CLT, la losa de hormigón con granalla de NFU, y los tres tipos de revestimiento, colocados sobre la maqueta en distintos momentos.

3.5. Últimos aspectos a la hora de llevar a cabo el ensayo

En este quinto apartado del capítulo tres se refleja la metodología planteada para mejorar la organización de ciertos aspectos a la hora de llevar a cabo el estudio. Esta metodología es parte del trabajo personal realizado para cubrir uno de los objetivos de este Trabajo Fin de Grado. Debido a la cantidad de medidas que se han de recopilar mediante el programa de adquisición de datos “DewesoftX”, se aportan las siguientes herramientas que aseguran una correcta aplicación de la misma.

En primer lugar, se propone una notación para los archivos de datos. A la hora de realizar el ensayo, hay que tener en cuenta que, en cada medición realizada con el programa, se consiguen los datos del espectro del nivel de aceleración de los tres acelerómetros para el rango de frecuencias de 50 a 5000Hz, dividido dicho rango en tercios de octava. En una muestra (es decir, maqueta más el revestimiento correspondiente), hay que ensayar colocando la máquina en dos posiciones, y además de esto, es necesario medir el ruido de fondo (con la máquina de impactos en una de las posiciones) para corregir la medida obtenida. Así, para una muestra, se generan hasta tres archivos de datos con el programa, con el espectro de la aceleración de los tres acelerómetros en cada archivo.

Como es necesario estudiar hasta tres revestimientos, más la ausencia del mismo, en dos maquetas diferentes (maqueta estándar y maqueta NFU), se generan hasta 24 archivos de datos en todo el ensayo.

La correspondiente notación se presenta en la Fig. 54, donde se ha comenzado (de izquierda a derecha) designando la maqueta que se ha utilizado (“forj” o “forj_NFU”); posteriormente, el revestimiento colocado o la ausencia de este;

la posición de la máquina de impactos; y, por último, la posición de los acelerómetros.

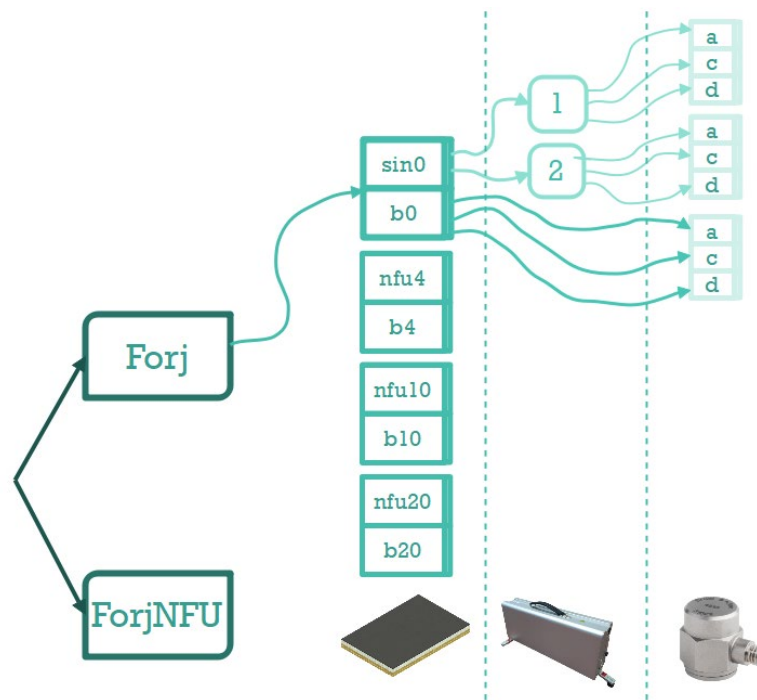


Fig. 54 Esquema de la notación usada. Elaboración propia.

Por ejemplo, “sin0” se refiere a la maqueta analizada con ningún revestimiento sobre ella, y todos los nombres de archivos que contienen “b” indican que la medida es del ruido de fondo. Un ejemplo de la notación de los archivos de datos sería el siguiente:

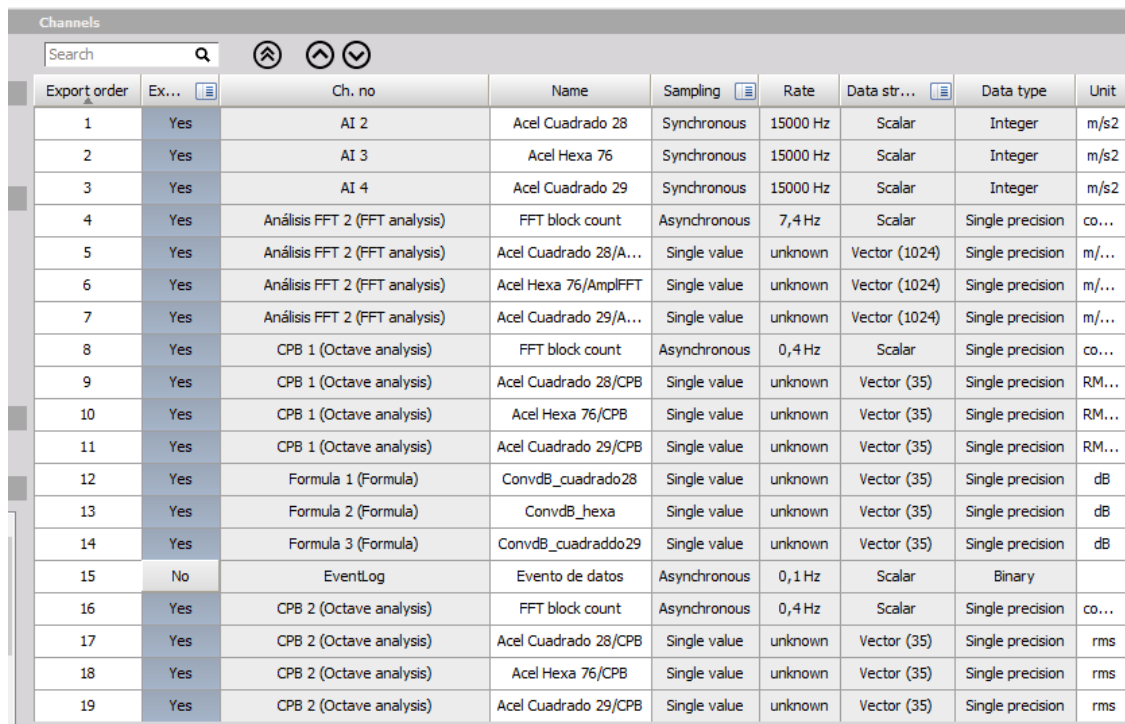
“Forj_nfu10_2_acd”

En segundo lugar, se ha creado un documento en Excel donde exportar los datos y realizar los cálculos pertinentes para el tratamiento de datos; y, en tercer lugar, se ha creado una hoja de instrucciones, con los pasos a seguir durante el ensayo, acompañado de una lista de verificación (“checklist”) como hoja de ruta de todos los ensayos a realizar, utilizada para facilitar la realización de la medición.

En cuanto al archivo “Excel”, en el que solo es necesario introducir los datos exportados en las casillas correspondientes, éste calcula las magnitudes mostradas en las ecuaciones Eq. 7, Eq. 8, Eq. 9, Eq. 10 y Eq. 11, y presenta las gráficas necesarias para ver, con más claridad, la tendencia del comportamiento de los parámetros estimados. Así, se procede, con más facilidad, a la interpretación y el razonamiento de los resultados, y de manera automática, por lo que puede servir como plantilla para futuros ensayos. En el Anexo C se explica cómo debe utilizarse el archivo Excel,

Para realizar la medición, se comienza en las opciones de **Storing** del programa. Aquí se cambia el nombre del archivo usando la notación descrita. Después, en la pestaña **Measure**→**Measure**, se graba la medida. Si se trata de la medición del ruido de fondo, simplemente se comienza pulsando en **Store**. Si lo que vamos a medir es la respuesta ante la excitación de la máquina, es conveniente encender primero esta y después comenzar a almacenar los datos. En ambos casos, se ha hecho una medición de hasta 25s de duración, inspirado con lo expuesto en la norma para suelos pesados, donde indica que debe hacerse mediciones de 20s o más. Una vez superado ese valor, se ha apagado la maquina después de parar el almacenamiento de datos.

Cada medida se exporta en la pestaña **Analyze**→**Export**. Se han elegido únicamente las filas que corresponden con los datos del análisis de octavas (**CPB 1 (Octave Analysis)**), así como la conversión a niveles de aceleración de la medida (**Formula 1, Formula 2, Formula 3**) (Fig. 55).



Export order	Ex...	Ch. no	Name	Sampling	Rate	Data str...	Data type	Unit
1	Yes	AI 2	Acel Cuadrado 28	Synchronous	15000 Hz	Scalar	Integer	m/s2
2	Yes	AI 3	Acel Hexa 76	Synchronous	15000 Hz	Scalar	Integer	m/s2
3	Yes	AI 4	Acel Cuadrado 29	Synchronous	15000 Hz	Scalar	Integer	m/s2
4	Yes	Análisis FFT 2 (FFT analysis)	FFT block count	Asynchronous	7,4 Hz	Scalar	Single precision	co...
5	Yes	Análisis FFT 2 (FFT analysis)	Acel Cuadrado 28/A...	Single value	unknown	Vector (1024)	Single precision	m/...
6	Yes	Análisis FFT 2 (FFT analysis)	Acel Hexa 76/AmplFFT	Single value	unknown	Vector (1024)	Single precision	m/...
7	Yes	Análisis FFT 2 (FFT analysis)	Acel Cuadrado 29/A...	Single value	unknown	Vector (1024)	Single precision	m/...
8	Yes	CPB 1 (Octave analysis)	FFT block count	Asynchronous	0,4 Hz	Scalar	Single precision	co...
9	Yes	CPB 1 (Octave analysis)	Acel Cuadrado 28/CPB	Single value	unknown	Vector (35)	Single precision	RM...
10	Yes	CPB 1 (Octave analysis)	Acel Hexa 76/CPB	Single value	unknown	Vector (35)	Single precision	RM...
11	Yes	CPB 1 (Octave analysis)	Acel Cuadrado 29/CPB	Single value	unknown	Vector (35)	Single precision	RM...
12	Yes	Formula 1 (Formula)	ConvdB_cuadrado28	Single value	unknown	Vector (35)	Single precision	dB
13	Yes	Formula 2 (Formula)	ConvdB_hexa	Single value	unknown	Vector (35)	Single precision	dB
14	Yes	Formula 3 (Formula)	ConvdB_cuadrado29	Single value	unknown	Vector (35)	Single precision	dB
15	No	EventLog	Evento de datos	Asynchronous	0,1 Hz	Scalar	Binary	
16	Yes	CPB 2 (Octave analysis)	FFT block count	Asynchronous	0,4 Hz	Scalar	Single precision	co...
17	Yes	CPB 2 (Octave analysis)	Acel Cuadrado 28/CPB	Single value	unknown	Vector (35)	Single precision	rms
18	Yes	CPB 2 (Octave analysis)	Acel Hexa 76/CPB	Single value	unknown	Vector (35)	Single precision	rms
19	Yes	CPB 2 (Octave analysis)	Acel Cuadrado 29/CPB	Single value	unknown	Vector (35)	Single precision	rms

Fig. 55 Captura de pantalla de la pestaña "Exportar" del programa "DewesoftX". Se deben seleccionar, únicamente, las filas de la "8" hasta la "14".

Por último, se han comparado los datos exportados en formato de archivo "Excel" con los mostrados en la pestaña **Measure**→**Measure** del software de adquisición de datos, verificando que son los mismos. Se han repetido todos estos pasos para cada medida.

En la Fig. 56, muestro una captura de cómo es la lista de verificación, en la que hay que cambiar el texto, subrayado en gris, por las características de la muestra y del ensayo.

- Ensayo "X".1.1:** Ruido de fondo del siguiente ensayo (Ensayo "X".1.2) (con la máquina de impactos colocada en una de las posiciones)
"compresion" _b"termino"
- Ensayo "X".1.2.1:** "definición de la maqueta de tipo: suelo ligero" "con/ sin revestimiento", posición 1 **"compresion" "aislante" _1**
- Ensayo "X".1.2.2:** "definición de la maqueta de tipo: suelo ligero" "con/ sin revestimiento", posición 2 **"compresion" "aislante" _2**

Fig. 56 "Checklist" del ensayo de una muestra. En el anexo C se encuentra el resto de la lista de verificación.

4. Presentación e interpretación de los resultados:

En este apartado, se presentarán e interpretarán los resultados más relevantes de las medidas realizadas, así como las magnitudes calculadas a partir de ellos, según se indicó en los apartados anteriores, que permitirán caracterizar el comportamiento a ruido de impacto de la muestra y la interpretación de los mismos. El desglose de todas las medidas se encuentra en el anexo A.

Antes de comenzar exponiendo los resultados, hay que recordar que los valores de vibración se representarán en forma de niveles de la componente normal de la aceleración, cuyas unidades son $\text{dBre}10^{-6}\text{m/s}^2$. El nivel de aceleración es una magnitud logarítmica y relativa. Así, si en nuestras medidas se registra una aceleración de 1ms^{-2} en la dirección perpendicular a la muestra, eso corresponde con un nivel de aceleración de 120dB. No hay que confundir estos dB de aceleración con los dB de nivel de presión sonora que conocemos en la vida cotidiana. Por ejemplo, en situaciones de medición del ruido de fondo, los niveles alcanzados son del orden de 40-60dB, lo que quiere decir que el acelerómetro está midiendo valores en un rango de 10^{-3} - 10^{-4}ms^{-2} .

Una vez explicado esto, se describe cómo se presentan los resultados en este apartado. Se ha dividido el capítulo en tres partes, donde las dos primeras muestran los resultados de medidas en las mismas situaciones usando la maqueta estándar y la maqueta NFU, respectivamente; y el tercer apartado compara los resultados entre ambas maquetas. Dentro de los dos primeros apartados, se hace mención a distintos aspectos a tener en cuenta, como es la comparación del ruido de fondo y el alcanzado con la máquina encendida, la independencia de las medidas de la respuesta vibratoria con el tiempo y con la posición de la muestra donde se miden; y, por último, la expresión de los resultados de forma similar a la normativa encontrada para suelos pesados [UNE16251].

4.1. Maqueta con dosificación estándar

A continuación, se presentan 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, con los tres revestimientos (azul NFU4, rojo NFU10, negro NFU20) y sin revestimiento (gris SINO desnudo), y se han realizado dos medidas, en momentos distintos, que corresponden a las figuras Fig. 57 y Fig. 58. Además, se ha calculado la desviación típica de los valores medidos en cada muestra y en cada banda de frecuencia, según la siguiente ecuación (Eq. 12).

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N}}$$

Eq. 12

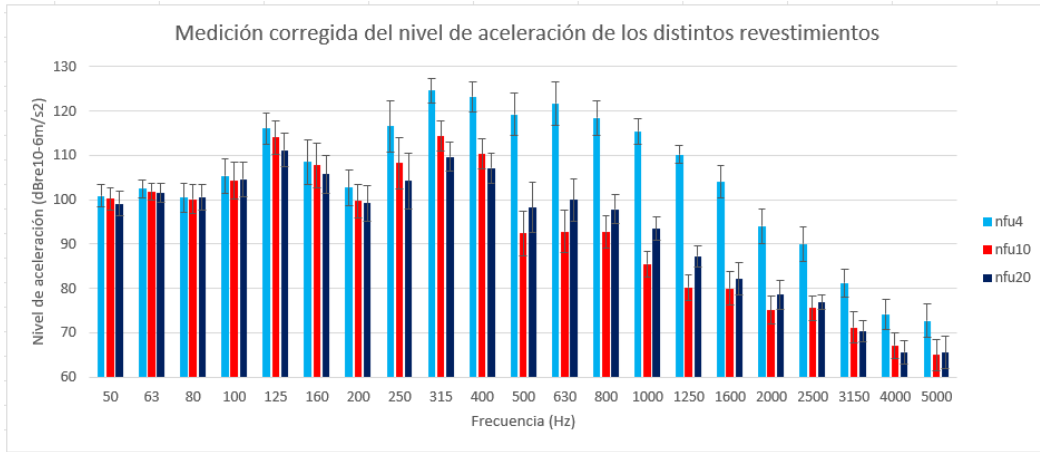


Fig. 57 Comparativa del nivel de aceleración alcanzado usando los distintos revestimientos de NFU en el forjado de hormigón estándar con CLT, a cada tercio de octava en frecuencia. Primera medida. Fig. A-4 del Anexo A.

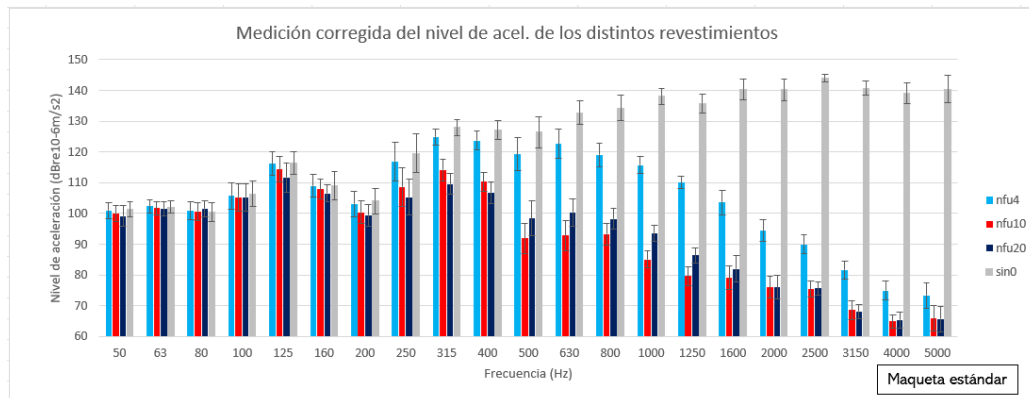


Fig. 58 Comparativa del nivel de aceleración alcanzado usando los distintos revestimientos de NFU en el forjado de hormigón estándar con CLT, a cada tercio de octava en frecuencia; además del forjado “desnudo”. Segunda medida. Fig. A-12 del anexo A.

En ellas se pueden distinguir, principalmente, dos intervalos de frecuencia: hasta los 200Hz, el nivel de aceleración alcanzado en las cuatro situaciones es muy similar (variaciones del orden de 2,2dB; 4,8dB como máximo); y a partir de los 250Hz, es cuando comienza a haber unas diferencias claras, sobre todo, entre los niveles alcanzados por la maqueta desnuda y por las maquetas con los revestimientos (llegando a encontrarse una diferencia de hasta 74,6dB, entre sin0 y NFU10), y con la capa de NFU de espesor 4mm y las capas con espesores mayores (llegando a encontrarse diferencia de hasta 30,7dB entre NFU4 y NFU10).

Los revestimientos acústicos son aptos para atenuar el sonido a medias y altas frecuencias, pero a bajas frecuencias no se consigue el mismo efecto [Martins].

Por otro lado, se encuentra otra tendencia: en el rango que va desde los 500Hz hasta los 2500Hz, el nivel de aceleración medido con el revestimiento de espesor 20mm es mayor que con el revestimiento de 10mm. Este resultado no es el esperado ya que, por razonamiento lógico, se piensa que, si el revestimiento es de un mayor espesor, éste permitirá reducir más la vibración, y por ende, aislar más el sonido.

4.1.1. Influencia del ruido de fondo

En este apartado, se pone en valor la validez de las medidas realizadas, por la clara diferencia en los niveles medidos cuando actúa la máquina sobre la muestra, y cuando está apagada, siendo esa diferencia menor a altas frecuencias (la mínima diferencia entre datos es 18dB). Por lo tanto, el ruido de fondo se demuestra que es despreciable, ya que la corrección es cero si se tiene una diferencia de más de 15dB (Eq. 7). Las medidas que no cumplen esa diferencia se han corregido con las otras ecuaciones presentadas (Eq. 8 y Eq. 9). Se ha hecho el cálculo del promedio de las tres posiciones, y se ha plasmado en gráficas. La Fig. 59 describe lo expuesto, y se trata de la muestra conformada por la maqueta estándar y el revestimiento de NFU con un espesor de 4mm. Anexo A para más detalles.

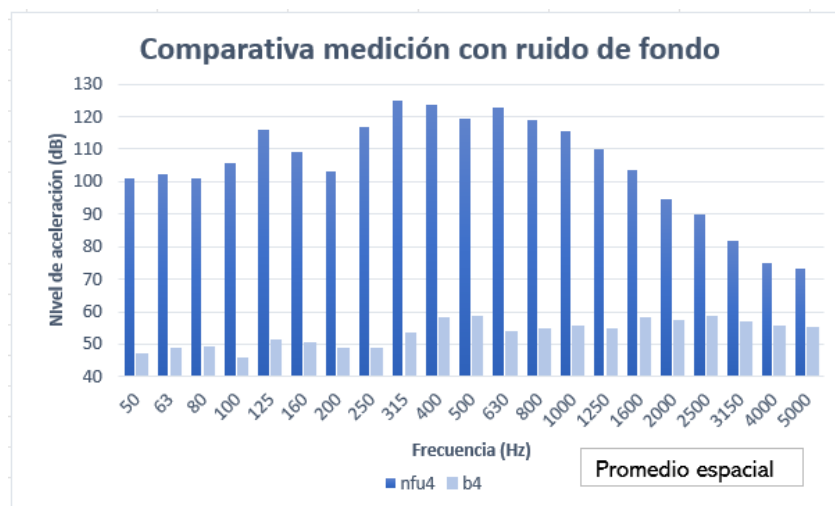


Fig. 59 Comparativa del ruido de fondo para la muestra formada por: hormigón estándar, panel de CLT y NFU de espesor 4mm. Segunda medida. Fig. A-9 del Anexo A.

En el anexo A se encuentra el resto de las gráficas que realizan esta comparativa, que presentan la misma tendencia.

4.1.2. Repetibilidad de los niveles de aceleración en el tiempo

La Fig. 60 presenta la comparativa del nivel de aceleración conseguido, con cada capa, en medidas llevadas a cabo en días distintos. Se representa todo esto de manera separada, es decir, los datos de la capa NFU4 se plasman en la gráfica con la paleta de colores azul; los datos de la capa NFU10, en la gráfica con la paleta de colores rojo; y los datos de la capa NFU20, en la gráfica con la paleta de colores verde. La diferencia de decibelios es del orden de menos de 1dB en todas las gráficas.

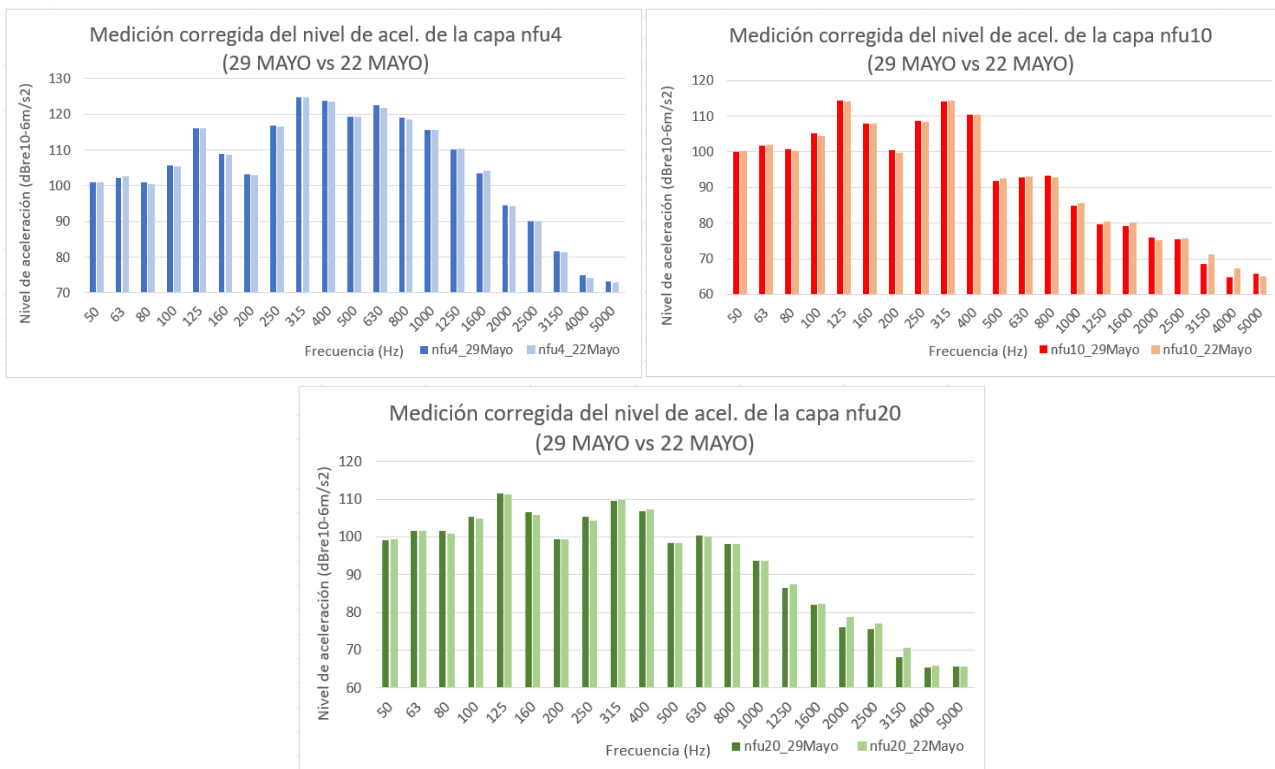


Fig. 60 Comparativa entre las mediciones hechas en momentos distintos, enfrentando cada capa de aislante por separado, para comprobar la repetibilidad. Hormigón estándar. Fig. A-13 del Anexo A.

4.1.3. Repetibilidad espacial de los niveles de aceleración

Mediante la comparación del nivel de aceleración conseguido en uno de los acelerómetros en las cuatro muestras, con el promedio realizado a partir de los tres acelerómetros, verificamos la no influencia de la posición donde se coloquen los equipos de medida de la respuesta vibratoria en la superficie inferior de las muestras. La Fig. 61 es un ejemplo de los valores alcanzados con uno de los acelerómetros, gráfica que es similar a la Fig. 57.

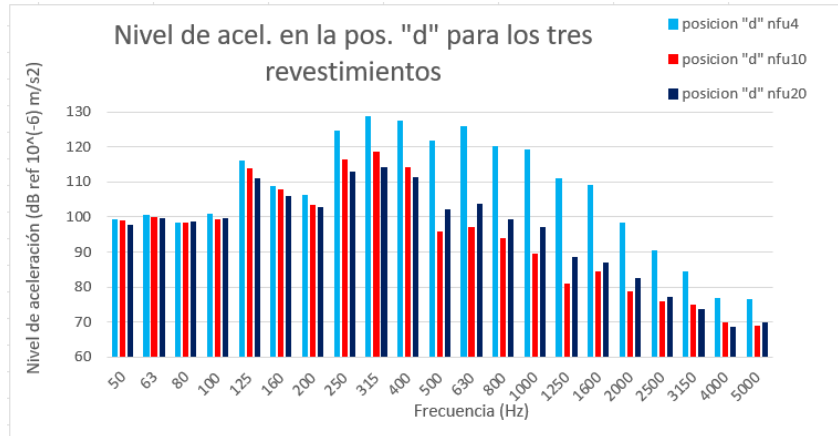


Fig. 61 Comparativa de la respuesta obtenida en el acelerómetro de la posición “d” para los tres revestimientos en maqueta estándar: nfu4, nfu10, y nfu20. Primera medida. Fig. A-7 del Anexo A.

4.1.4. Resultados de la mejora del aislamiento a ruido de impacto

Por último, la Fig. 62 muestra la mejora del aislamiento al ruido de impacto, hallada mediante la Eq. 11, así como un zoom en la zona de bajas frecuencias (Fig. 62 inferior) y representa el parámetro que indica el comportamiento comparativo entre distintos revestimientos de aislamiento de ruido de impacto.

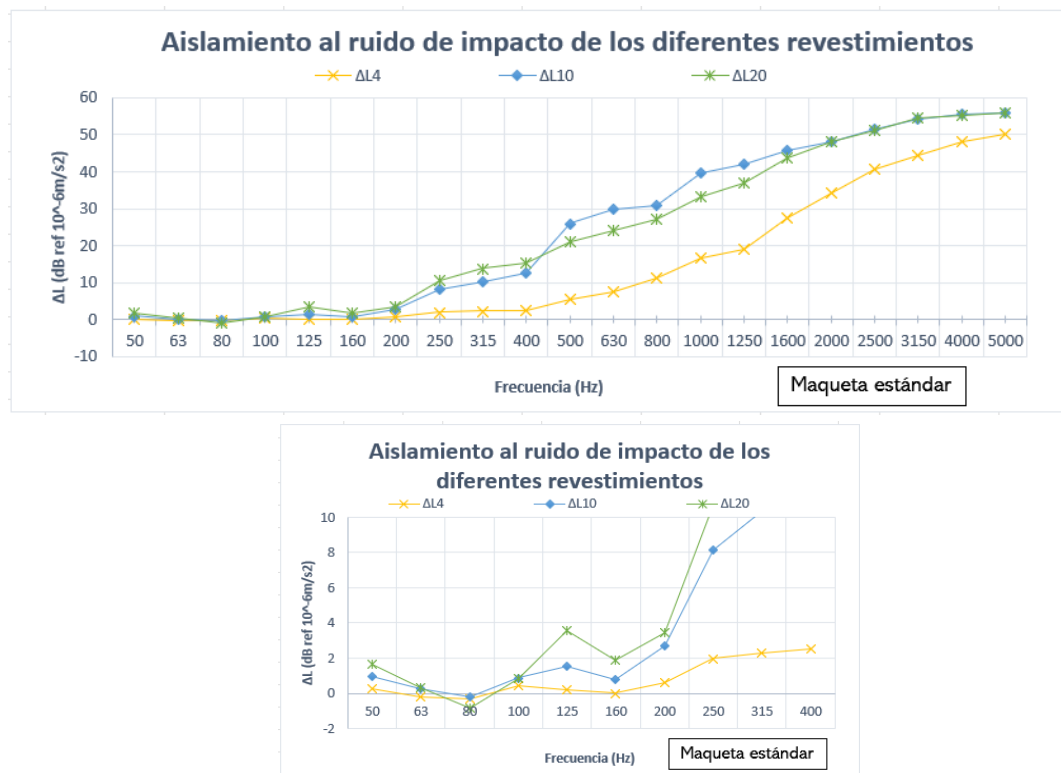


Fig. 62 Aislamiento al ruido de impacto conseguido con las distintas muestras (con respecto al hormigón estándar sin ningún aislante), para el rango de 50-5000Hz, en tercios de octava. Fig. A-14 del Anexo A.

Se recuerda que, para este parámetro, se comparan los niveles hallados con los tres revestimientos, con respecto a los niveles de la maqueta estándar sin revestimiento. Los resultados revelan que, a bajas frecuencias (desde los 50Hz hasta los 100Hz), el aislamiento es del orden de 1dB. Los tres revestimientos decaen en el aislamiento del ruido a 80Hz (0,5dB menos con respecto a los valores de bandas de frecuencia contiguas). A altas frecuencias, todos los revestimientos aíslan al ruido de impacto, siendo, en el rango de 100Hz hasta 400Hz, mejor el NFU20 (hasta 3,5dB más que NFU10); mientras que, en el rango que va desde 500Hz hasta 2000Hz, el NFU10 aísla más que el NFU20 (hasta 6,5dB más).

4.2. Maqueta de hormigón con Neumático reciclado Fuera de Uso NFU

Como antes se ha explicado, este apartado se usa para comentar los resultados conseguidos con la maqueta NFU, compuesta de CLT más hormigón con granalla de NFU. Las Fig. 63 y Fig. 64 expresan los niveles de aceleración obtenidos colocando, sobre la maqueta NFU, los tres revestimientos y ninguno. El ruido de fondo se ha eliminado de la medida mediante las ecuaciones, anteriormente descritas, Eq. 7, Eq. 8 y Eq. 9, y se obtiene, en ambas gráficas resultados similares. De nuevo, se ha calculado la desviación típica en todas las bandas de frecuencia para cada muestra, mediante la Eq. 12.

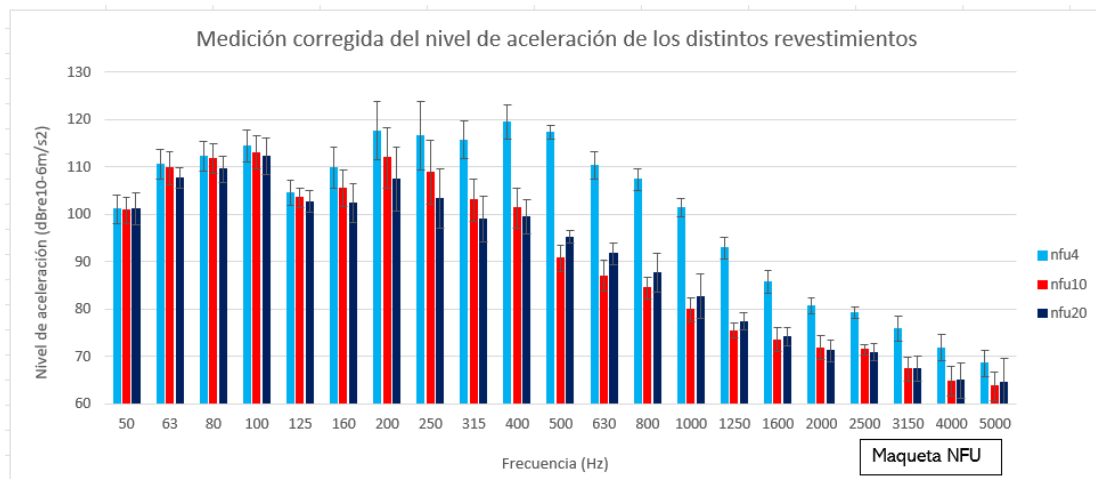


Fig. 63 Comparativa del nivel de aceleración alcanzado usando los distintos aislantes de NFU en el forjado de hormigón con NFU, y con CLT, a cada frecuencia. Primera medida. Fig. A-21 del Anexo A.

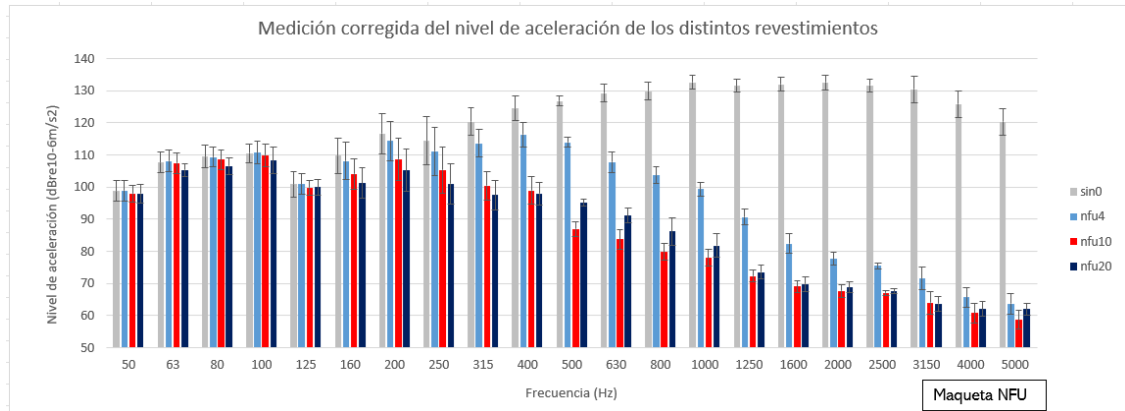


Fig. 64 Comparativa del nivel de aceleración alcanzado usando los distintos revestimientos de NFU en el forjado de hormigón con NFU, y con CLT, a cada frecuencia. Primera medida. Fig. A-29 del Anexo A.

En la Fig. 64, la muestra sin revestimiento aparece a la izquierda del resto de barras de medida, a diferencia de la Fig. 58. De nuevo, se muestran dos zonas de distinto comportamiento: desde los 50Hz hasta los 125Hz, los niveles son muy similares (del orden de 5dB, 11,4dB como máximo) en las cuatro situaciones, y a partir de los 160Hz, comienzan a aparecer diferencias en los niveles alcanzados (en esa banda, la diferencia entre SIN0 y NFU20 es del orden de 8dB). La muestra sin revestimiento se aleja de las que sí tienen revestimiento a altas frecuencias, y sucede, aunque en menor medida que en el caso de las muestras con la maqueta estándar, un aislamiento mejor con 'NFU10' que con la capa de espesor 20mm (valores del orden de 8dB de diferencia), en el rango que va desde los 500Hz hasta los 1600Hz (en el caso de la primera medida) o 2500Hz (en el caso de la segunda medida).

4.2.1. Influencia del ruido de fondo

Se ha llevado a cabo, también, la comparación del ruido de fondo con el nivel de aceleración estando la máquina encendida, en las medidas con la maqueta NFU. En la Fig. 65, que se representa el promedio de las tres posiciones medidas en la muestra formada por la maqueta NFU y el revestimiento de 20 mm de espesor, los valores del nivel de aceleración a bajas frecuencias del ruido de fondo se alejan mucho del nivel de aceleración con la máquina encendida (del orden de 50dB). Para el nivel de aceleración del ruido de fondo, éste aumenta a partir de los 400Hz (un aumento de 12dB con respecto a su valor en la banda anterior), y a altas frecuencias, cerca de los 5000Hz, los niveles se asemejan mucho (del orden de 9dB).

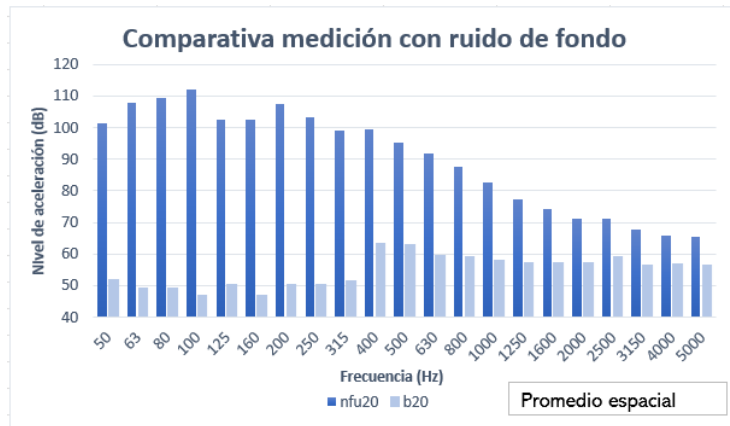


Fig. 65 Comparativa del ruido de fondo para la muestra formada por: hormigón con NFU, panel de CLT y NFU de espesor 20mm. Primera medida. Fig. A-20 del Anexo A.

En el anexo A, se encuentra el resto de graficas obtenidas para comparar este factor en las mediciones.

4.2.2. Repetibilidad de las medidas en el tiempo

La Fig. 66 plasma la semejanza entre las mediciones hechas en periodos de tiempo distintos, enfrentando las medidas de cada capa por separado (los datos de la capa NFU4 se encuentran en la gráfica con la paleta de colores azul; los datos de la capa NFU10, en la gráfica con la paleta de colores rojo; y los datos de la capa NFU20, en la gráfica con la paleta de colores verde). En este caso, todas las medidas llevadas a cabo una segunda vez, presentan una diferencia de valores constante (del orden de 3dB), en todas las bandas de tercios de octava.

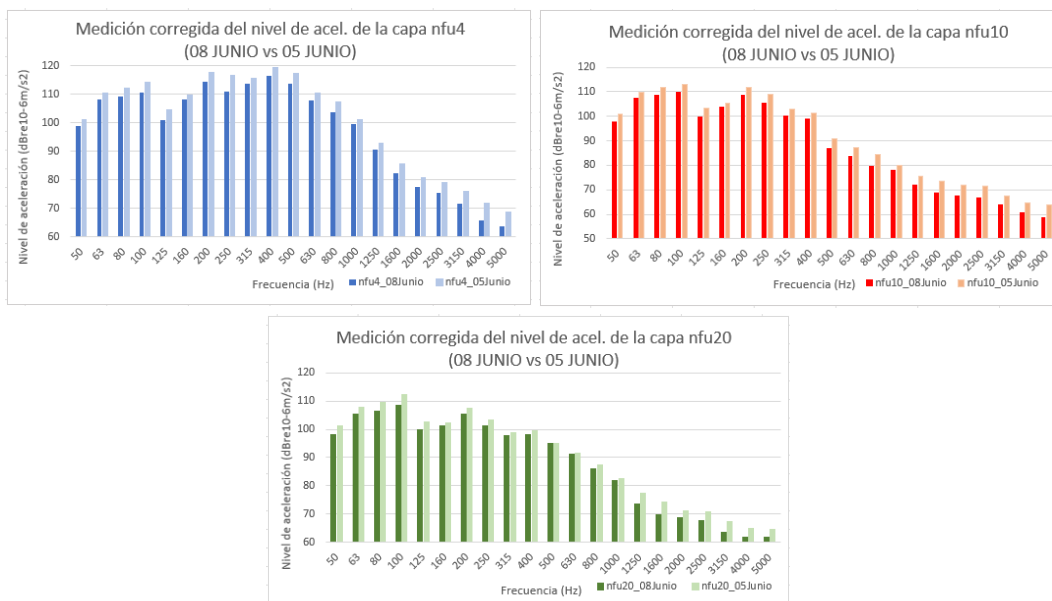


Fig. 66 Comparativa entre las mediciones hechas en momentos distintos, enfrentando cada capa de aislante por separado, para comprobar la repetibilidad. Hormigón con NFU. Fig. A-30 del Anexo A.

4.2.3. Repetibilidad espacial

Se ha comprobado, en esta maqueta conformada por el CLT y la losa de hormigón con granalla NFU, que la posición donde se sitúe el acelerómetro en la parte inferior del tablero de CLT es indiferente, ya que la Fig. 67 presenta una gran semejanza (analizada de forma visual) con la Fig. 63, que es el promedio de las medidas recogidas con los tres acelerómetros.

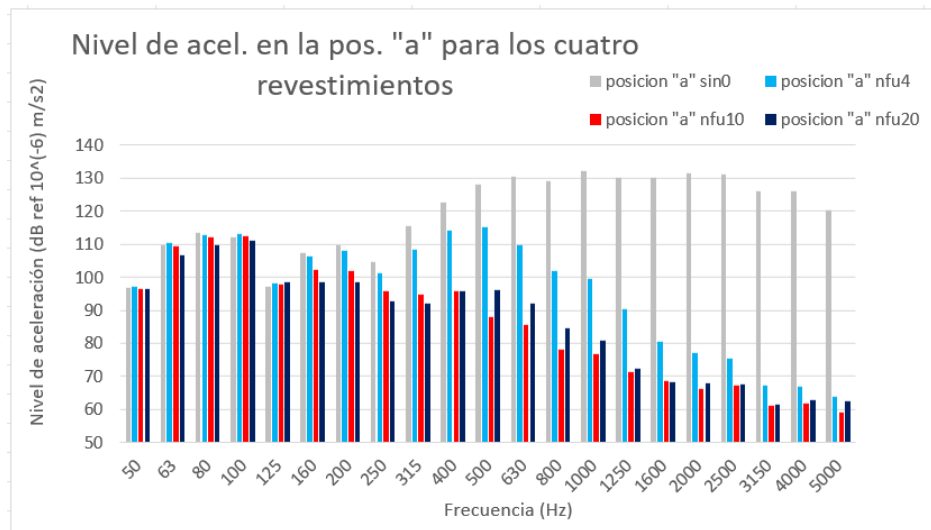


Fig. 67 Comparativa de la respuesta obtenida en el acelerómetro de la posición "a" para los tres revestimientos, y ninguno, en maqueta NFU: sin0, nfu4, nfu10, y nfu20. Segunda medida. Fig. A-32 del Anexo A.

En el anexo A, se encuentra el resto de graficas obtenidas para comparar este factor en las mediciones.

4.2.4. Resultados mostrados como indica la norma

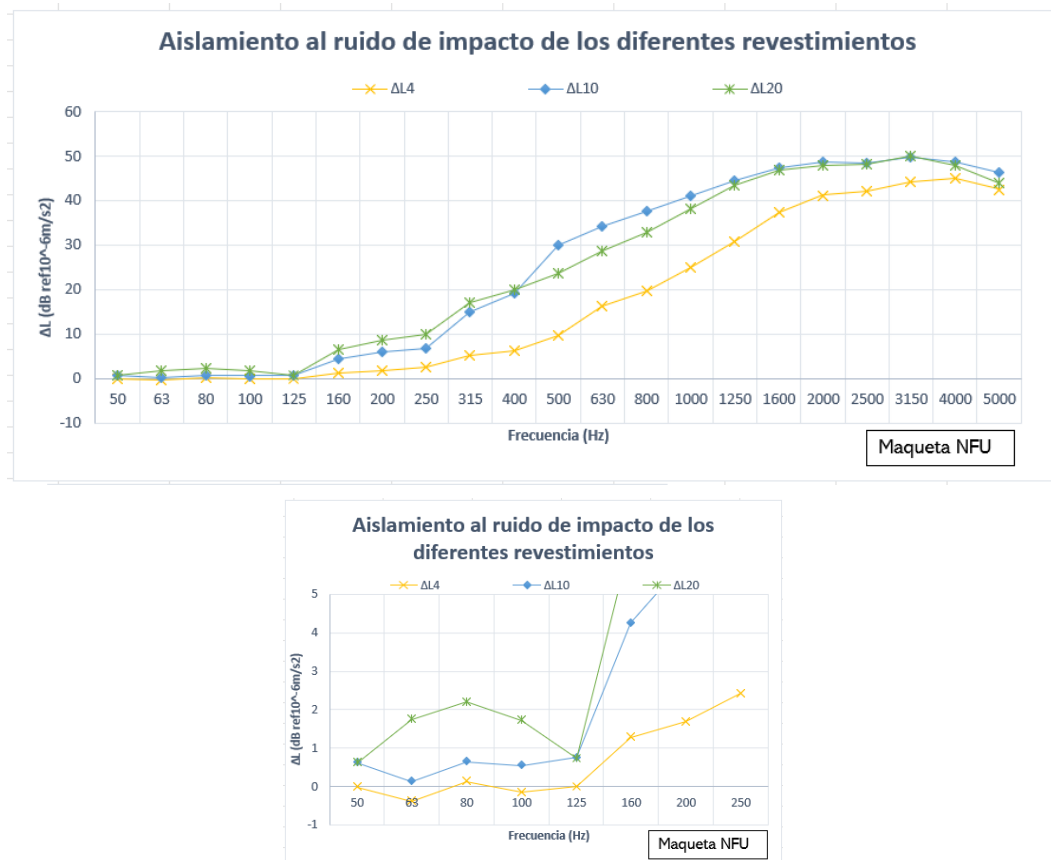


Fig. 68 Aislamiento al ruido de impacto conseguido con las distintas muestras (con respecto al hormigón con NFU sin ningún aislante), para el rango de 50-5000Hz, en tercios de octava. Fig. A-31 del Anexo A.

Como en el apartado 4.1.4, se presentan los resultados de forma similar a como se expone la normativa de suelos pesados, aplicando la Eq. 11 (Fig. 68). Los cálculos de la mejora del aislamiento se han hecho con respecto a la maqueta NFU sin revestimiento, y esta vez, en cambio, a bajas frecuencias se ha obtenido una mejora diferente en el aislamiento al ruido de impacto, siendo el revestimiento NFU20 el más destacado (hasta un valor para ΔL de 2,2dB). En la banda de 125Hz, los revestimientos de NFU10 y NFU20 coinciden, y a partir de esta frecuencia, ambos mejoran el aislamiento (un aumento de 5dB con respecto a la banda de 125Hz). En el rango de 125Hz hasta los 400Hz, la capa de espesor 20mm supera, en cuanto al aislamiento, a la de 10mm, y a partir de esta frecuencia, es el revestimiento NFU10 el que permite la mayor mejora del aislamiento al ruido de impacto (hasta una diferencia de 6,2dB con respecto a NFU20).

4.3. Comparativa entre los dos tipos de forjado

En los apartados 4.1.2 y 4.2.2 se han comentado, por separado, los resultados obtenidos al colocar los revestimientos en ambas maquetas. En éste, en cambio, se compararán los resultados de ambos tipos de forjado, mediante la magnitud ΔL , sin entrar a detalle en la diferencia entre los resultados obtenidos en una misma maqueta. De nuevo, se muestran los resultados como denota la norma [UNE16251].

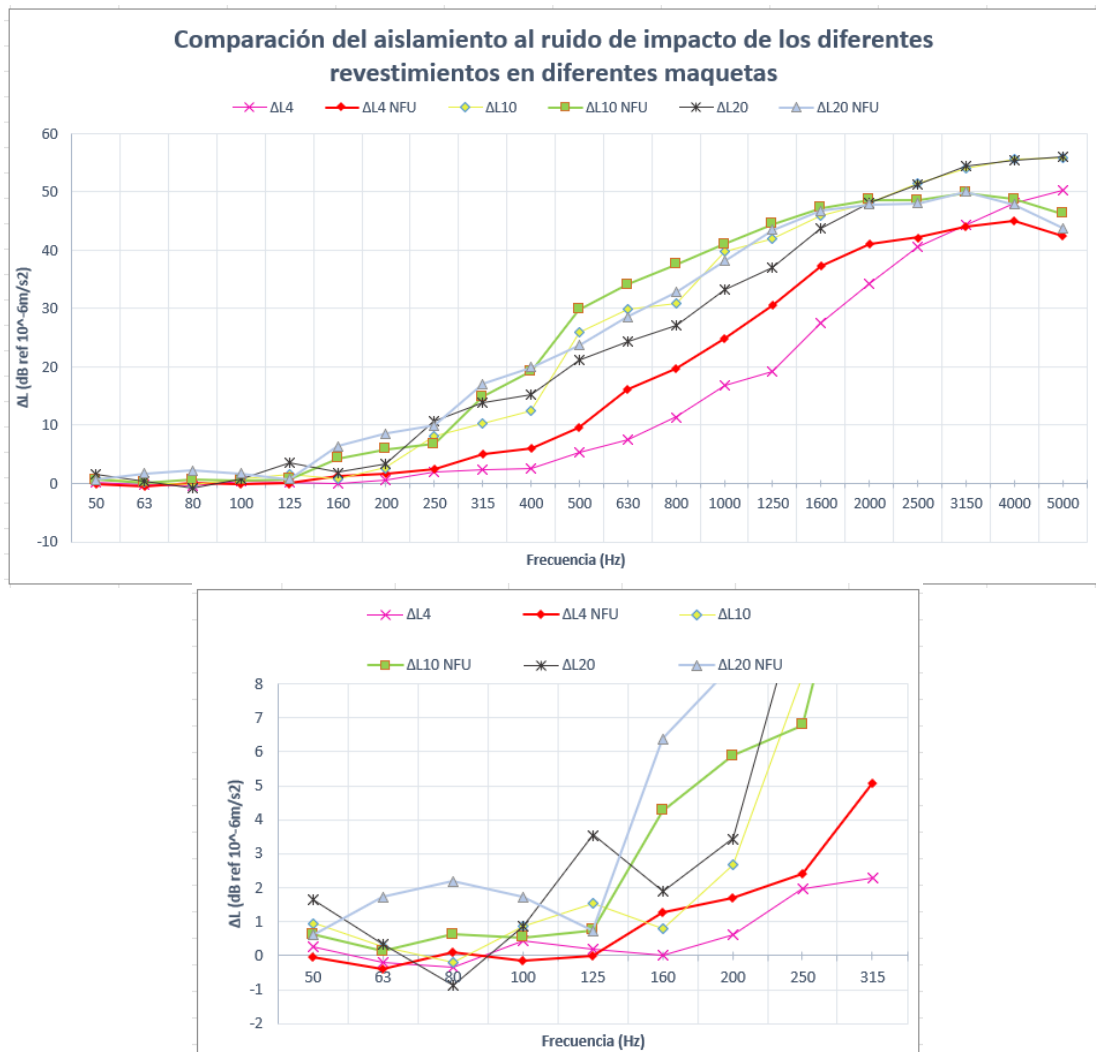


Fig. 69 Comparativa de los valores de ΔL , mejora del aislamiento al ruido de impacto conseguido, de todos los revestimientos y en las dos tipos de maquetas.

Las líneas de color amarillo y verde, (con símbolos de cubo y rombo respectivamente), representan el revestimiento de NFU10 que tiene, 10mm de espesor; mientras que, las líneas azul y negro, (con triángulos y cruces respectivamente), corresponden al revestimiento NFU20 de espesor de 20mm. Por último, las dos líneas restantes, que son las de color rojo y fucsia, son las que expresan el comportamiento del revestimiento NFU4.

A bajas frecuencias, el mejor aislamiento (ΔL) se consigue con la capa de Neumático Fuera de Uso de espesor 20mm colocada en la maqueta NFU (hasta un valor de ΔL de 2,2dB). En la banda de 125Hz, el mejor aislamiento lo aporta el mismo revestimiento, pero colocado en la maqueta estándar (hasta 2,8dB más con respecto al mismo revestimiento en la maqueta NFU). A partir de esta banda, hasta los 400Hz, las capas ‘NFU10’ y ‘NFU20’ colocadas en la maqueta NFU, presentan, ambas, el mejor aislamiento (con una diferencia, entre ellas, del orden de 3dB).

A medias y altas frecuencias, es decir, a partir de los 500Hz y hasta los 2000Hz, el revestimiento de espesor 10mm, situado sobre la maqueta NFU, presenta el mejor aislamiento posible con respecto al resto de situaciones estudiadas (hasta 5,5dB más que el NFU10 en la maqueta estándar, en una de las bandas de frecuencia). Si se exige un aislamiento a altas frecuencias (a partir de 2000Hz) conviene utilizar un revestimiento de espesor 20mm, independientemente de la maqueta (una diferencia de 5,7dB con respecto a la línea más cercana, que es la del revestimiento NFU4 en la maqueta estándar).

La siguiente tabla resume la mejora del aislamiento que se consigue con algunas de las muestras usadas, diferenciando intervalos de frecuencia para los que una muestra supera, en este aspecto, al resto (Tabla 7). Las celdas con un color de fondo naranja más claro indican un valor similar al mayor obtenido a cada frecuencia.

	BANDAS DE FRECUENCIA EN TERCIOS DE OCTAVA (Hz)																				
	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
ΔL_{20} NFU(dB)	0,6	1,7	2,2	1,7	0,7	6,4	8,6	10,0	17,1	20,0	23,7	28,6	32,8	38,1	43,5	46,7	47,8	48,1	50,1	47,9	43,8
ΔL_{10} NFU(dB)	0,6	0,1	0,6	0,5	0,8	4,3	5,9	6,8	15,0	19,2	29,9	34,1	37,6	41,0	44,5	47,3	48,7	48,5	49,8	48,8	46,3
ΔL_{20} (dB)	1,6	0,3	-0,9	0,9	3,5	1,9	3,4	10,7	13,8	15,3	21,1	24,3	27,0	33,3	36,9	43,7	48,1	51,3	54,4	55,4	56,0
ΔL_{10} (dB)	1,0	0,3	-0,2	0,9	1,5	0,8	2,7	8,2	10,3	12,5	26,0	30,0	30,8	39,8	42,0	45,9	48,1	51,5	54,1	55,7	55,9

Tabla 7: Resumen de la mejora del aislamiento al ruido de impacto conseguida con algunas de las muestras estudiadas. Elaboración propia.

Esta última gráfica (Fig. 69) es muy similar a lo encontrado en otros estudios referenciados en la bibliografía, como el de [Arenas] (Fig. 9), [Foret] (Fig. 14), o [Pereira] (Fig. 17), por lo que se considera que se ha hecho un buen análisis del comportamiento acústico de los diferentes revestimientos combinados con los dos tipos de suelos ligeros.

5. Presupuesto

Este apartado describe un estudio económico llevado a cabo para analizar los gastos que ha supuesto la realización de este Trabajo de Fin de Grado. Por un lado, se han tenido en cuenta las etapas de realización de este trabajo y el número de semanas necesarias para realizarlas. Por otro lado, se han analizado los costes asociados a cada factor involucrado, y se ha hallado el coste total del proyecto.

Este Trabajo de Fin de Grado ha tenido una duración de 520 horas, clasificadas en cuatro etapas presentadas a continuación. Para el cálculo de dichas horas empleadas se ha tenido en cuenta que, en un día, las horas efectivas han sido ocho; y que, en una semana, los días trabajados han sido cinco. Por lo tanto, se han empleado 65 días, lo que hace un total de 13 semanas.

- Estado de arte del proyecto (3 semanas, 15 días, 120 horas).

Esto engloba la lectura de documentos técnicos sobre el tema, normativa aplicada al ámbito de la acústica, libros acerca del marco teórico de las vibraciones y acústica, y páginas web relacionadas; así como el análisis, interpretación y síntesis de todo esto.

- Aprendizaje para el manejo del programa usado en la adquisición de datos “DewesoftX” (3 semanas, 15 días, 120 horas).

Para ello, se ha procedido a la lectura de los manuales proporcionados por la empresa comercializadora del programa, y se han realizado pruebas previas a la toma de datos para llevar a cabo este trabajo.

- Proceso de preparación del montaje de ensayo (2 semanas, 10 días, 80 horas)

Se incluye el desencofrado y montaje de la estructura soporte, preparación de las capas que componen los suelos ligeros (tanto revestimientos como maquetas), e instalación de los equipos de medida.

- Redacción del documento (5 semanas, 25 días, 200 horas)

En ese periodo, se ha redactado este documento, donde se recoge toda la información recopilada de la búsqueda bibliográfica hecha, así como el método llevado a cabo, y la presentación de los resultados.

Una vez descrito esto, se pasa a estudiar cuáles han sido los costes involucrados en este proyecto. Se analiza, en primer lugar, el coste de la mano

de obra empleada, en base a las horas trabajadas; y, en segundo lugar, los materiales que se han empleado, así como la amortización de los equipos.

El proyecto se ha realizado por un trabajador con la categoría profesional de recién ingeniero, que corresponde al grupo profesional II, con un nivel salarial 2, definido en el Boletín Oficial del Estado [DGT-a]. En base a esta información, se ha obtenido el coste de la mano de obra, expuesto en la Tabla 8, a partir de la resolución del 8 de mayo de 2023 [DGT-b].

Nivel salarial	Salario mensual x14 (€)	Anual	Plus convenio según art. 38 (€)	Total Anual	Total mensual (€)	Dias hábiles en un mes: 22 días	
						Total diario (€)	Total por hora (€)
2	1377,65	19287,10	2444,61	21731,71	1810,98	82,32	10,29

Tabla 8: Salario que requiere un trabajador recién graduado, tras la resolución del 8 de mayo de 2023.

Por último, se valoran los costes del material utilizado, plasmado en la Tabla 9.

En cuanto a la licencia del programa para la adquisición de datos, esta es de libre acceso. Para la amortización de los equipos, se ha hecho uso de las “Tablas de coeficientes de amortización del Impuesto sobre Sociedades”, vigentes actualmente [Iberley].

Costes de la mano de obra	Salarios (€/hora)	10,29	horas			Total (€)
			520,00			5350,61
Costes asociados al material	Equipo personal	Ordenador Dell Inspiron 15 5510	1	680	136	136
	Raton de la marca TECKNET	1	15	3	3	
	Equipos de medida	Miniature CCLD Accelerometer Type 4508-B-003	2	500	125	125
		DeltaTron Accelerometer Type 4513-B-001	1	500	125	125
	Hormigón	Barras de acero B500S ø6mm (L=3m)	20	2	-	40
		Sacos cemento CEM II - 32,5N (o 42,5R)	4	5	-	20
		Saco arena Tudela (basta) (25kg)	6	1	-	6
		Saco grava <16mm (25Kg)	12	1,2	-	14,4
	Sylomer	Sylomer SR42	8	5,75	-	46
		Sylomer SR450	4	60,53	-	242,12
Total (€)					6108,13	

Tabla 9: Costes asociados a la mano de obra y al material. Se detalla el precio por unidad de los elementos, y la amortización de los equipos utilizados. Elaboración propia.

El coste del trabajo es de 6108,13€

6. Conclusiones y líneas de futuro

Por último, en este apartado, se analizarán las conclusiones a las que se han llegado con este Trabajo de Fin de Grado, en relación con los objetivos descritos en el apartado 1.3. Además, se enumeran una serie de líneas futuras que servirán de guía para continuar con este proyecto.

6.1. Conclusiones

- Se ha desarrollado una propuesta de metodología para el estudio del aislamiento al ruido de impacto mediante maquetas de suelos ligeros. En esta metodología, se ha definido un montaje del ensayo y la configuración de los equipos de medida a utilizar; se ha realizado un documento Excel para el tratamiento de las mediciones, que puede servir como plantilla para futuras ocasiones; y se ha establecido una notación y una lista de verificación para asegurar una correcta medición. Con ello, se abre una nueva línea de investigación en el departamento, que permitirá realizar ensayos sobre otros tipos de forjados y otros tipos de revestimiento, que permitirá aportar información interesante en el campo del aislamiento al ruido de impacto.
- Se ha aplicado la metodología a los revestimientos de NFU colocados sobre los dos tipos de maquetas mencionados, y se ha obtenido información interesante del comportamiento en relación con el dominio de las frecuencias.
 - Concretamente, a bajas frecuencias (50-100Hz), no se consigue una mejora con ningún revestimiento (el nivel de aceleración en la muestra con el revestimiento, y sin él es similar, tan solo una diferencia del orden de 2,2dB). Para medias y altas frecuencias (125-5000Hz), la presencia del revestimiento hace reducir de manera importante los niveles de aceleración de la muestra, llegando a mostrar hasta 80dB menos a 5000Hz).
 - Con respecto a la mejora del aislamiento al ruido de impacto, los mejores resultados se tienen para el revestimiento de NFU10. Destaca su aislamiento en el rango de 500-2000Hz: valores de ΔL entre 25-45dB, con ligeras diferencias (1-5dB) 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 1dB).
 - En relación con la comparativa entre ambas maquetas, a bajas frecuencias (50Hz-100Hz), ambas aíslan el ruido de impacto de manera similar, sin proporcionar una mejora notable (valores de

ΔL del orden de 0-2dB). Desde 160-400Hz, las capas NFU10 y NFU20 presentan mejor aislamiento en la maqueta NFU (hasta un valor de ΔL de 5-20dB, con una diferencia de 3-5dB con respecto al comportamiento de las muestras más próximas). En el rango 500-2000Hz, destaca el NFU10 en la maqueta NFU (con diferencias del orden de 2-7dB, con respecto al comportamiento de las muestras más próximas). Y, por último, en el rango 2000-5000Hz, presenta mejor aislamiento NFU20 en la maqueta estándar (con diferencias del orden de 3-5dB, con respecto al ΔL de las muestras más próximas). En general, a bajas y medias frecuencias (desde 50-1600Hz), la maqueta NFU atenúa más las vibraciones que la maqueta estándar (según se mostró en la Tabla 7).

En cuanto a los objetivos académicos desarrollados, a continuación, se desglosan los trabajos de este Trabajo de Fin de Grado.

- Antes del desarrollo del tema central del documento, se ha hecho una exhaustiva lectura de bibliografía, analizando el contenido de los documentos encontrados y sintetizando su información. Esta es una de las competencias desarrollada.
- Además, con respecto a la lectura de documentos mencionada, dichos textos están relacionados con el tema de sostenibilidad y el medioambiente, lo que implica un desarrollo en los valores éticos del estudiante, desde el ámbito de la ingeniería.
- A la hora de llevar a cabo el ensayo presentado en este trabajo, se ha trabajado con otras personas del equipo de investigación del departamento, así como de otros equipos de investigación, adquiriendo, así, habilidad para trabajar en equipo. Aparte de esto, ha sido necesario aprender y trabajar de forma autónoma para poder mejorar las habilidades personales.
- Se han trabajado competencias en relación con la comprensión y dominio de los conceptos básicos sobre las leyes generales de la mecánica, en campos y ondas, en este caso de acústica y vibraciones, y su aplicación para la resolución de problemas propios de la ingeniería. Y se han aplicado para el caso del diseño de estructuras y construcciones industriales.
- Por último, se ha redactado este Trabajo de Fin de Grado, donde se recoge toda la información valiosa del proyecto realizado. Se ha adquirido mayor habilidad para la redacción de documentos técnicos del ámbito de la ingeniería.

6.2. Líneas futuras

En este apartado, se menciona una serie de líneas de futuro para continuar con este estudio.

- Llevar a cabo más ensayos como los presentados, utilizando revestimientos de NFU de otros espesores, así como combinar los que ya tenemos y poder analizar nuevas situaciones. También sería interesante combinar las capas que conforman los suelos ligeros de distinta manera y realizar una comparación con lo obtenido. Otra línea de futuro podría ser poseer un revestimiento de NFU20 íntegro, ya que el que se ha utilizado está dividido en dos partes.
- Utilizar otros paneles de madera contralaminada (CLT) obtenidos, para realizar un análisis comparativo con respecto a lo plasmado en este trabajo. Se dispone de un CLT de pino pinaster y de un CLT suministrado por la empresa gallega “XILONOR”, de pino pinaster y pino radiata.
- Comprobar si la función de desconexión, que es uno de los cometidos de la estructura soporte, es óptima. Para ello, se colocarán acelerómetros en los apoyos de la estructura, que son las patas.
- Desarrollar un modelo numérico para hallar una frecuencia de resonancia aproximada del sistema, mediante un software adecuado.
- Sería interesante comparar los resultados expuestos en el trabajo con los que se obtendrían en cámaras homologadas de laboratorios acreditados.

Bibliografía

- ❖ [Álvarez] Álvarez A. *El panel de madera contralaminada*. TFG en Fundamentos de la Arquitectura, Universidad de Valladolid (2022)
- ❖ [Aragón] Aragón R. *Prototipado de un sistema estructural a escala con pretensado exterior. Experimentación y simulación*. TFG en Ingeniería Mecánica, Universidad de Valladolid (2019)
- ❖ [Arenas] Arenas J.P., Sepulveda L. *Impact sound insulation of a lightweight laminate floor resting on a thin underlayment material above a concrete slab*. Journal of Building Engineering **45** (2022) (<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103537>)
- ❖ [Balmori] Balmori J.A. *Fabricación y caracterización de vigas dúo reforzadas de maderas de "Populus sp." y "Pinus Pinaster ait."* Tesis doctoral en la ETSAVA, Universidad de Valladolid (2019)
- ❖ [Bernardo] Bernardo S. *Registro, caracterización y modelado de las fuerzas verticales inducidas al andar* TFG en Ingeniería de Tecnologías Industriales (ITI), Universidad de Valladolid (2019)
- ❖ [Brüel] Pagina web de la empresa Brüel & Kjær, acelerómetros <https://www.bksv.com/es/transducers/vibration/accelerometers/ccld-iepe> (Último acceso: 26 de junio de 2023)
- ❖ [Cordero] Cordero de la Rosa S. *Análisis de nuevos índices de reducción del ruido de impacto en viviendas* TFG en Ingeniería Mecánica, Universidad de Valladolid (2018)
- ❖ [Dewesoftmanual] Pagina web de la empresa Dewesoft, donde se pueden descargar los manuales del software que comercializa DewesoftX <https://dewesoft.com/products/dewesoftx> (Último acceso: 26 de junio de 2023)
- ❖ [DGT-a] Dirección General de Trabajo. *Resolución de 27 de febrero de 2023, de la Dirección General de Trabajo, por la que se registra y publica el XX Convenio colectivo nacional de empresas de ingeniería; oficinas de estudios técnicos; inspección, supervisión y control técnico y de calidad*. Boletín Oficial del Estado. CVE: BOE-A-2023-6346. (2023).
- ❖ [DGT-b] Dirección General de Trabajo. *Resolución de 8 de mayo de 2023, de la Dirección General de Trabajo, por la que se registra y publica el Acta del acuerdo de revisión de las tablas salariales para el año 2023 del XX Convenio colectivo nacional de empresas de ingeniería; oficinas de estudios técnicos; inspección, supervisión y control técnico y de calidad*. Boletín Oficial del Estado. CVE: BOE-A-2023-11785. (2023).

- ❖ **[Foret]** Foret R., Chéné J. et al. *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)
- ❖ **[Hassan]** Hassan O. *Building Acoustics and Vibration. Theory and Practice.* World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. (2009)
- ❖ **[Iberley]** Iberley. *Tablas de coeficientes de amortización sobre el Impuesto sobre Sociedades.* <https://www.iberley.es/temas/contabilidad-deterioros-provisiones-65376> (Último acceso: 26 de junio de 2023)
- ❖ **[MImpactos]** *Máquina de impactos, página del comercializador* <http://www.lookline.com/Inglese/Tapping%20machine.htm> (Último acceso: 26 de junio de 2023)
- ❖ **[Jayalath]** Jayalath A., Satheeskumar N. et al. *Airborne and impact sound performance of modern lightweight timber buildings in the Australian construction industry.* Case Studies in Construction Materials **15** (2021) (<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00632>)
- ❖ **[Kohrmann]** Kohrmann M. *Numerical Methods for the Vibro-Acoustic Assessment of Timber Floor Construction.* PhD Thesis Universidad Técnica de Munich (2016)
- ❖ **[Lietzén]** Lietzén J. Miettinen J. et al. *Impact force excitation generated by an ISO tapping machine on wooden floors.* Applied Acoustics **175** (2021) (<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107821>)
- ❖ **[Martins]** Martins C., Santos P. et al. *Acoustic performance of timber and timber-concrete floors.* Construction and Building Materials **101** (2015) 684 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.142>)
- ❖ **[mdsagenda2030-a]** Ministerio de Derechos Sociales y Agenda 2030. *Claves de sostenibilidad para acelerar el proceso de rehabilitación de viviendas en España.* Ministerio de Derechos Sociales y Agenda 2030 (junio 2022)
- ❖ **[mdsagenda2030-b]** Ministerio de Derechos Sociales y Agenda 2030. *Objetivos de Desarrollo Sostenible* <https://www.mdsocialesa2030.gob.es/agenda2030/index.htm> (Último acceso: 26 de junio de 2023)
- ❖ **[Medgón]** Medgón, *Fabricación de Edificios Passivhaus y Casas Pasivas* <https://www.medgon.com/que-es-passivhaus/> (Último acceso: 26 de junio de 2023)
- ❖ **[mtransicioneco]** Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico. *Neumáticos* <https://www.mdsocialesa2030.gob.es/agenda2030/index.htm> (Último acceso: Último acceso: 26 de junio de 2023)

- ❖ **[Passivhaus].** *Guía del estándar Passivhaus: Edificios de consumo energético casi nulo.* Ministerio de Industria, Turismo y Comercio y el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) (2011)
- ❖ **[Pereira]** Pereira A., Mateus D., et al. *Evaluation of impact sound reduction of floor coverings on timber and timber-concrete floors using vibration measurements.* (2016) EuroRegio2016. (<https://documentacion.sea-acustica.es/publicaciones/Oporto16/25.pdf>)
- ❖ **[Rabold]** Rabold A., Buchschmid M. et al. *Modelling the excitation force of a standard tapping machine on lightweight floor structures.* **Building Acoustics** 52 (2010) (<https://hal.science/hal-01509349/document>)
- ❖ **[Ramoneda]** Ramoneda C. *Los objetivos de desarrollo sostenible en el sector de la construcción.* <https://aislamientosostenibilidad.es/los-objetivos-de-desarrollo-sostenible-ods-en-el-sector-de-la-construccion/> (Último acceso: 26 de junio de 2023)
- ❖ **[Rehau]** Grupo Rehau. *Ventanas Passivhaus REHAU con certificación oficial.* <https://www.rehau.com/es-es/ventanas-passivhaus> (Último acceso: 26 de junio de 2023)
- ❖ **[Sirius]** Dewesoft, Equipo físico para la adquisición de datos. <https://dewesoft.com/es/productos/mini> (Último acceso: 26 de junio de 2023)
- ❖ **[Sylomer]** Catálogo de la empresa comercializadora de este material “AMC Mecanocaucho” <https://www.mecanocaucho.com/es-ES/productos/sylomer/> (Último acceso: 26 de junio de 2023)
- ❖ **[tcue]** RED TCUE: Transferencia de conocimiento Universidad-Empresa. *Más información - Ganadores “Desafío Universidad Empresa” Edición 2021* <https://www.redtcue.es/desafio/desafio-2021/ganadores/item/544-masinfo-ganadores-2021> (Último acceso: 26 de junio de 2023)
- ❖ **[Tonelli]** Tonelli C., Grimaudo Muchschmid M. *Timber building and thermal inertia: Open scientific problems for summer behavior in Mediterranean climate.* **Energy and buildings** 83 (2014) 89-95 páginas. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.12.063>)
- ❖ **[Torralba]** Torralba R., *Hacia un Desarrollo sostenible. El uso de materiales de km0 en arquitectura.* **TFG en Estudios en Arquitectura, Universidad de Zaragoza** (2021) (<https://zaquan.unizar.es/record/101361>)
- ❖ **[UNE10140-1] [UNE10140-3] [UNE10140-4] [UNE10140-5] UNE-EN ISO 10140.** *Acústica. Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción.* **International Organization for Standardization** (febrero 2022).
- ❖ **[UNE16251] UNE-EN ISO 16251-1 – 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.** **International Organization for Standardization** (marzo 2015).

- ❖ [UNE29052] UNE-EN 29052-1 (Equivalente a ISO 9052-1: 1989) - Acústica - *Determinación de la rigidez dinámica - Parte 1: Materiales utilizados bajo suelos flotantes en viviendas.* International Organization for Standardization (junio 1994).
- ❖ [UNE717] UNE-EN ISO 717-2 – Acústica - *Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción – Parte 2: Aislamiento a ruido de impactos.* International Organization for Standardization (septiembre 2021)
- ❖ [Wittstock] Wittstock V., Scheck J. et al. *Structure-borne sound sources in buildings – Estimating the uncertainty of source properties and installed power from interlaboratory test results.* Acta Acustica **6** (2022) (<https://doi.org/10.1051/aacus/2022012>)