

LIGNOMAD 25

III CONGRESO SOBRE CONSTRUCCIÓN CON MADERA Y OTROS MATERIALES LIGNOCELULÓSICOS

24, 25 Y 26 DE SEPTIEMBRE DE 2025 – GRANADA

SISTEMAS DE FORJADOS SOSTENIBLES DE MADERA PARA LA EDIFICACIÓN EN ALTURA EN ANDALUCÍA

Antonio Jesús Rodríguez Pérez^a, Antolino Gallego Molina^a, Lázuli Fernández-Lobato^b

^aDepartamento de Física Aplicada, Universidad de Granada

^bDepartamento de Ingeniería Gráfica, Diseño y Proyectos, Universidad de Málaga
lazuli@uma.es

1. INTRODUCCIÓN

El sector de la construcción es responsable de aproximadamente el **35% de las emisiones de CO₂** y del **40% del consumo energético total** en Europa, siendo uno de los principales retos para la transición hacia una economía descarbonizada. La madera ha resurgido como material estructural sostenible gracias a su capacidad de almacenar carbono y su idoneidad para procesos industrializados. Frente a sistemas convencionales, reduce la huella de carbono hasta en un **65%**.

En Andalucía, el proyecto *Life Wood for Future* impulsó el uso de especies locales como **chopo (densidad media 450 kg/m³)** y **pino laricio (500 kg/m³)**, fomentando el aprovechamiento forestal regional. Los sistemas híbridos madera-hormigón alcanzan luces de **8–9 m**, pero presentan huellas elevadas superiores a **90 kg CO₂ eq/m²**, dificultando la circularidad.

Este estudio desarrolla un forjado seco con luz máxima de **5,00 m**, que prioriza sostenibilidad, eficiencia ambiental y cumplimiento de normativa acústica y estructural.

2. OBJETIVOS

El objetivo principal es diseñar un sistema de forjado completamente seco que cumpla con los requisitos estructurales y acústicos exigidos por el **DB-SE y DB-HR del CTE**, alcanzando valores de **DnT,A ≥ 50 dB** y **LnT,w ≤ 65 dB**. Se busca incrementar la masa superficial hasta **200–210 kg/m²** sin recurrir a hormigón, manteniendo un peso propio **<2,0 kN/m²**, lo que permite cimentaciones más ligeras y reduce la demanda de recursos.

El sistema debe resistir sobrecargas de **2,00 kN/m²**, siendo apto para edificaciones residenciales plurifamiliares en altura con hasta **cinco plantas**. Además, pretende reducir la huella de carbono en al menos un **25%** respecto a soluciones híbridas madera-hormigón y disminuir tiempos de ejecución en un **30–35%** gracias a su prefabricación. También busca fomentar el uso de especies locales, dinamizando la economía forestal regional, y alcanzar costes competitivos en el rango **330–450 €/m²**, impulsando la industrialización sostenible.

3. METODOLOGÍA

El trabajo se desarrolló en dos fases. La primera consistió en una revisión normativa y técnica, considerando el **Código Técnico de la Edificación (CTE)**, Eurocódigo 5 y normas acústicas como **EN ISO 10140**. Se analizaron forjados ligeros existentes, identificando factores críticos como rigidez, deformación y comportamiento acústico.

En la segunda fase se diseñó un sistema compuesto por: viguetas de madera laminada **GL24h** dispuestas cada **1,00 m**, tablero tricapa tipo **K1 Multiplan (30 mm, 15 kg/m²)** y una capa granular encapsulada de árido fino **≤4 mm** con cal hidráulica, de densidad **1.700 kg/m³** y espesor **110 mm**.

El modelo estructural se verificó mediante **Dlubal**, comprobando flechas **≤L/500** y frecuencia natural **≥8 Hz**.

Se evaluaron los parámetros acústicos **DnT,A** y **LnT,w** mediante **CYPECAD MEP**, incorporando falsos techos y láminas desacoplates. Finalmente, se optimizó el diseño para equilibrar sostenibilidad, ligereza y cumplimiento normativo.

4. RESULTADOS

El sistema propuesto actúa como diafragma rígido, transmitiendo cargas verticales y horizontales y cumpliendo los criterios del Eurocódigo 5 para estructuras ligeras en altura. Sin la capa granular encapsulada, el aislamiento acústico fue insuficiente (**Ln,w = 70 dB**), superando el límite establecido por el CTE (**≤65 dB**), evidenciando la transmisión excesiva de vibraciones en forjados ligeros tradicionales.

Con la incorporación de la masa encapsulada, la superficie pasó de **15 kg/m²** a **200 kg/m²**, reduciendo **Ln,w a 63 dB** y aumentando el aislamiento aéreo a **Rw = 51 dB**, permitiendo cumplir con los requisitos normativos incluso en viviendas colectivas.

Además, la capa granular mejoró el control de vibraciones, reduciendo su propagación en un **30%** respecto a forjados estándar.

El impacto ambiental se situó en **55–80 kg CO₂ eq/m²**, un **40–45% menor** que en sistemas híbridos (**90–180 kg CO₂ eq/m²**).

El coste final estimado fue de **340 €/m²**, un **30% inferior** al de sistemas CLT, que superan los **480 €/m²**, destacando su viabilidad económica y la reducción de tiempos de ejecución en un **35%** gracias a la prefabricación y el montaje en seco.

5. CONCLUSIONES

El sistema seco con capa granular encapsulada resuelve las limitaciones acústicas de los forjados ligeros, alcanzando **DnT,A ≥50 dB** y **LnT,w ≤63 dB**, cumpliendo las exigencias del CTE.

Su ligereza (**<2,0 kN/m²**) permite cimentaciones más eficientes y su aplicación en edificios de hasta **cinco plantas**.

El uso de madera local reduce la huella de carbono en **hasta 90 kg CO₂ eq/m²**, favoreciendo la economía forestal regional y disminuyendo la dependencia de materiales importados.

El proceso completamente en seco reduce tiempos de ejecución en un **35%**, minimizando residuos y mejorando la circularidad.

Esta solución representa una alternativa sostenible, industrializable y competitiva, que equilibra habitabilidad, eficiencia energética y rendimiento técnico.

Con un coste medio de **330–450 €/m²**, se posiciona como una opción viable para el desarrollo de edificaciones residenciales en altura, respondiendo a los retos ambientales y constructivos actuales.

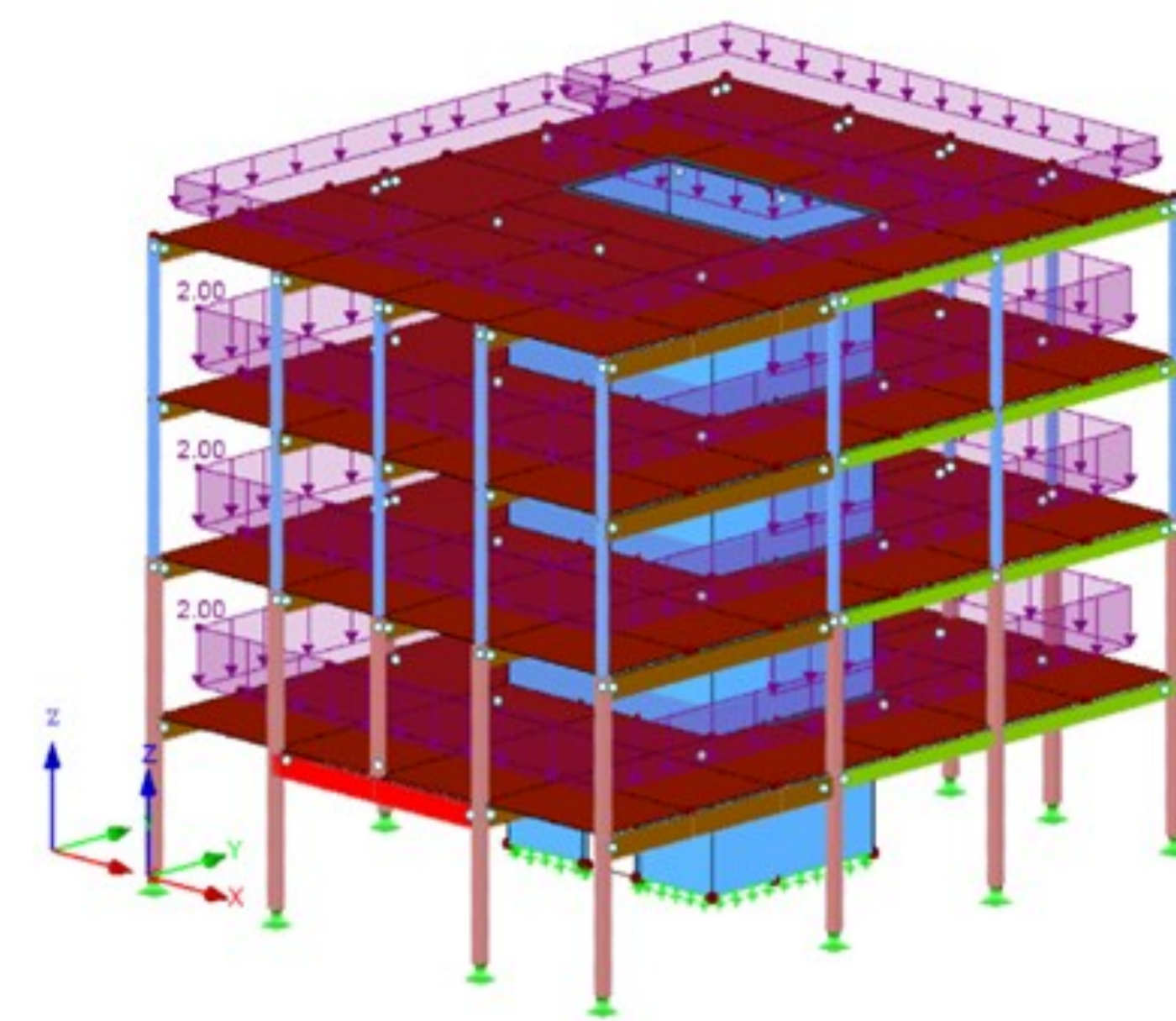


Fig. 1: Análisis estructural de cargas residenciales según el CTE (Código Técnico de la Edificación) en un edificio de varias plantas en Linares, Jaén. Estructura principal: vigas y pilares prefabricados GL24h.



Fig. 2: Panel estructural macizo de madera estructural tipo K1 Multiplan, fabricado por Mayr-Melnhof Holz.

Load q [KN/m ²]	Outer layer = 6.7 mm Panel thickness				
	20 mm	26 mm	30 mm	35 mm	40 mm
1	1.86	2.27	2.49	2.75	2.98
1.5	1.62	2.05	2.25	2.48	2.69
2	1.48	1.88	2.09	2.31	2.51
2.5	1.37	1.75	1.97	2.18	2.37
3	1.29	1.64	1.86	2.09	2.27
3.5	1.22	1.56	1.76	2.01	2.18
4	1.17	1.49	1.69	1.92	2.11
4.5	1.13	1.43	1.62	1.85	2.05
5	1.09	1.39	1.57	1.79	1.99

Tabla 1: Luces máximas permitidas, en metros, en el caso de carga H para viga de dos vanos con carga uniformemente distribuida. Debe tenerse en cuenta el peso propio del panel, con anchos de vano iguales.



Fig. 3: Sección constructiva tipo. Forjado estructural K1 Multiplan o similar