

LIGNOMAD 25

III CONGRESO SOBRE CONSTRUCCIÓN CON MADERA Y
OTROS MATERIALES LIGNOCELULÓSICOS

24, 25 y 26 de septiembre · Granada

María Pilar Giraldo Forero, Ana María Lacasta Palacio,
Adelaida Martín Martín y Antolino Callego Molina

LIBRO DE PONENCIAS



UNIVERSIDAD
DE GRANADA



UIMA

Unidad de Investigación
de la Madera Estructural
de Andalucía



LIFE MADERA PARA EL FUTURO
LIFE Wood for Future ha recibido financiación del Programa
LIFE de la Unión Europea [LIFE 20 CCM / ES / 001656]



*Fuente: Bonsai Arquitectos
Vivienda unifamiliar en Ogíjares (Granada). Vigas laminadas de chopo y
pino laricio MCLam. Demostrador del Proyecto LIFE Wood for Future*

LIGNOMAD 25

III CONGRESO SOBRE CONSTRUCCIÓN
CON MADERA Y OTROS MATERIALES
LIGNOCELULÓSICOS

24, 25 Y 26 DE SEPTIEMBRE DE 2025 – GRANADA

Edición
Adelaida Martín
Pilar Giraldo
Ana María Lacasta
Antolino Gallego

Maquetación
Adelaida Martín

Red Lignomad
info@lignomad.com
www.lignomad.com

Unidad de Investigación de la Madera Estructural de Andalucía (UIMA)
Universidad de Granada, Azucarera de San Isidro, Campus UGRSostenible
uima@ugr.es
www.uima.es

Editores: Comité organizador (UIMA-Universidad de Granada, Red Lignomad)

Comité Organizador
Antolino Gallego Molina
Francisco Rescalvo Fernández
Adelaida Martín Martín
Yaiza Fuentes García
Rafael Bravo Pareja
Carlos Cruz Rodríguez
Ana María Lacasta Palacio
María Pilar Giraldo Forero

Comité Científico
José Manuel Cabrero
Miguel Esteban Herrero
Francisco Arriaga Martitegui
Eva Hermoso Prieto
Maite de Troya Franco
Luis-Alfonso Basterra Otero
Ana María Lacasta Palacio
Laia Haurie Ibarra
Edgar Seguéas Aguasca
Azahara Soilán Cañas
María Pilar Giraldo Forero
Manuel Touza Vázquez
María Portela Barral
Manuel Guaita Fernández
Josu Benito Ayúcar

ISBN: 978-84-09-78213-0

LIGNOMAD 25

ÍNDICE

ÍNDICE	7
1. PRÓLOGO	15
Comité Organizador	
Comité Científico	
Ponencias principales (invitadas)	
Áreas temáticas	
2. EXPOSITORES, PATROCINADORES Y COLABORADORES	25
3. PONENCIAS	41
4. PONENCIAS PRINCIPALES	395
5. PROGRAMA	401

RESÚMENES DE PONENCIAS

1. MADEXTER II una nueva herramienta para la asignación paramétrica de las clases de uso de la norma UNE-EN 335. Fernández-Golfin Seco, J.I., Conde García, M.ª, Tenorio, J.A., Conde García, M.	42
2. Viabilidad del uso del chopo en paneles de CLT: paneles monoespecie y multiespecie pino-chopo, Yaiza Fuentes-García, Carlos Cruz, Francisco J. Rescalvo, Guillaume Pot, Louis Denaud, Rafael Bravo, Antolino Gallego	50
3. Empleo de bioadhesivo para la elaboración de madera microlaminada de chopo: cortante en línea de cola y flexión. Francisco J. Rescalvo, Carlos Cruz, Yaiza Fuentes-García, Louis Denaud, Rafael Bravo y Antolino Gallego	57
4. Efecto del contenido de humedad en la resistencia mecánica de la especie de bambú <i>Guadua Angustifolia</i> Kunth. Kenneth Ayala, Carlos Osuna-Sequera, Eva Hermoso	63
5. Centro de visitantes del Parque Nacional Sierra de las Nieves: Análisis comparativo de materiales. Santiago Matute Díez, María Romero Cuberos	70
6. Optimización de vigas laminadas mixtas aplicando la simulación numérica. Carlos Cruz, Yaiza Fuentes-García, Francisco J. Rescalvo, Rafael Bravo, Antolino Gallego	77
7. Comunicar con madera. Toca Madera · Sounds Wood. Irene Jimeno Guadalix	83
8. Mapa Colaborativo-Interactivo Construcción con Madera. Irene Jimeno Guadalix	88
9. Guía de Rehabilitación de Estructuras de Madera. Irene Jimeno Guadalix	94
10. Análisis experimental y modelación de uniones estructurales de madera. Nicol López Rodríguez, José Manuel Cabrero, Ignacio Arteaga, Borja Iraola, Peter Tanner, Carlos Lara, Pablo Guindos	100
11. Análisis inverso y diseño computacional para caracterizar madera de pino mediante vibraciones. Mario Requena, Roberto Palma, Carlos Cruz, Yaiza Fuentes-García, Francisco J. Rescalvo, Antolino Gallego	106

12. Problema inverso bayesiano para la calibración de vigas huecas tipo cajón mediante ensayos experimentales. Roberto Palma, Carlos Cruz, Yaiza Fuentes-García, Francisco J. Rescalvo, Antolino Gallego	113
13. Evaluación de tableros de partículas de <i>Ulmus pumila</i> fabricados con resinas de urea/formaldehído modificadas con celulosa microfibrilar y lignosulfonatos. Eduardo Bordallo López, Tamara Coello García	118
14. De la teoría a la práctica: la arquitectura temporal en madera como herramienta pedagógica. Holger Patricio Cuadrado Torres	124
15. Impulso de la bioeconomía local en la construcción: vivienda-demostrador en Ogíjares (Granada). Luis Llopis García, Eva Chacón Linares	130
16. Durabilidad de la madera en construcción. Aproximación española de la norma UNE-EN 460:2023. David Lorenzo, Juan Fernández-Golfín, Manuel Touza, Fernando Peraza	136
17. Sistema estructural mixto integral madera-hormigón con conexión a rasante mediante tableros perforados. Dolores Otero-Chans, Javier Estévez-Cimadevila, Emilio Martín-Gutiérrez, Félix Suárez-Riestra, José A. Vázquez-Rodríguez	143
18. Bioeconomía Circular en Territorios de Montaña: Avances del Proyecto PRISMA en Madera Contralaminada y Residuos de Aserraderos. Rayder Leonardo, José Manuel Cabrero, Jordi Gené, Eduard Correal Mòdol, M. Pilar Giraldo	149
19. Ethris, elemento modular de construcción. Carlo Micheletti, Francesco Verzura	155
20. Una Atmósfera en Madera. Iñaki del Prim Gracia	162
21. Estudio numérico y experimental de uniones dentadas a flexión de madera de Pinus Nigra. Rafael Bravo, Carlos Cruz, Yaiza Fuentes-García, Francisco J. Rescalvo, Antolino Gallego	169

22. Sello de Calidad AITIM para empresas de montaje y puesta en obra de estructuras y elementos constructivos de madera. Guillermo Gómez del Pozo, David Lorenzo Fouz, Fernando Peraza Sánchez, Jose Enrique Peraza Sánchez	176
23. Empleo de fotogrametría rectificada para la obtención de características geométricas de elementos de madera de madera recuperada de edificios existentes. Pablo González-Serna, Josu Benito-Ayúcar, Daniel Luengas-Carreño	177
24. Mapas de Termitas y metodología de inspección de cascos urbanos en base a la norma UNE-56418:2016. Caso práctico en el casco antiguo de Areatza, Bizkaia. Josu Benito-Ayúcar, Pablo González-Serna, Josu Arancón-Cuadrado, Daniel Luengas-Carreño	183
25. TIK Timber: un sistema portátil para la evaluación no destructiva de la madera. Desarrollo y validación. Irene Gil-Martína, Elisabet Suarez, Andrés M. Roldán, Yaiza Fuentes-García, Antolino Gallego	190
26. Casa Patio Tropical. Proyecto demostrativo de un sueño forestal. Alberto de la Torre Castellano, Antonio G. de la Torre Castellano	197
27. Análisis del uso de un modelo de intercambio (EM) para la estimación de costes inicial de proyectos en edificación industrializada de madera. Claudia Rojas, Claudio Mourgues, Pilar de la Rosa, Harrison Mesa, Francisco Ruz, Pablo Guindos	205
28. Modelización y análisis de la función estructural de la zapata en entramados de madera tradicionales. David Blanco, Andrés Lyond, Miguel Esteban	212
29. El corcho como material de construcción. Enrique Torres Álvarez	219
30. Madera de chopo aplicada al proyecto. Miguel Martínez Monedero, Ignacio de Teresa Fernández-Casas, Adelaida Martín Martín, Rocío López Berenguer , Mario Sánchez Samos, Jaime Vergara Muñoz	220
31. Uso de rollizos de bambú y de madera en 10 proyectos. Ignacio de Teresa Fernández-Casas, Alejandro Jesús González Cruz, Juan Carlos Bamba Vicente	229

32. Soluciones de la ingeniería para el uso técnico de madera aserrada en sistemas estructurales eficientes alternativos a estructuras masivas. Miguel V. Broto Cartagena	238
33. BUOs como proyecto demostrativo de la industria forestal. Cecilia López Muiños, Juan José Otero Vázquez, Luis Ángel López Gómez	239
34. Diseño y prefabricación de infraestructura de protección de madera natural sin tratamientos. Cristina Ouzande Lugo, Cristina Ezcurra de la Iglesia	246
35. Construir con madera: seguridad, eficiencia y sostenibilidad. María Mora	253
36. Análisis estructural de cajones de madera de pino y chopo. Esteban Hernández Salazar	260
37. Comportamiento de productos derivados del bambú sometidos a ciclos de envejecimiento acelerado. Alina Avellaneda, Laia Haurie, María Pilar Giraldo, Ana M. Lacasta	261
38. Influencia de la exposición en cámara de envejecimiento acelerado sobre el color y la reacción al fuego en siete especies de madera. Alina Avellaneda, Laia Haurie, María Pilar Giraldo, Ana M. Lacasta	268
39. El rol de los residuos vegetales y los bio-aglutinantes en las propiedades térmicas y acústicas de los bio-compuestos. Brenda Arias-Cárdenas, Ana M. Lacasta, Laia Haurie	275
40. Hacia un nuevo concepto de estructuras laminares reticulares de madera. A.J. Lara-Bocanegra, C. Martínez-Criado, A. Roig, A. Majano-Majano	283
41. La breve historia del puente de madera sobre el río Duratón, en Peñafiel. Alfonso Lozano, Julio Vivas, David Lorenzo, Felipe Álvarez, Mar Alonso, Marcos Braña	289
42. Evaluación del potencial de la madera de pino silvestre (<i>Pinus sylvestris</i> L.) termotratada para aplicaciones tecnológicas. Silvia Gómez Fernández, Mario Azaña Galán, Gonzalo Caballé, José Luis Villanueva Hernández	296
43. Evaluación de sistemas de bloqueo de taninos en productos de madera para su uso en exterior. Isabel Fernández, Oliva Fernández, Soledad Rodríguez, Amelia González	303

44. Proyecto Pegollu - Almacén d’Horros del Principado de Asturias: conservación del patrimonio cultural y sostenibilidad. Elena Pérez, Estefanía Sánchez, Fernando Mora, Soledad Rodríguez	309
45. Caracterización de puentes peatonales de madera en España mediante análisis modal experimental. Soledad Rodríguez, Elena Pérez, Pelayo Madrazo, Julio Vivas, Juan Carlos Santos	315
46. Comparación de huella de carbono para un edificio de mediana altura en Madrid, homologación utilizando un diseño en CLT. Alberto Gonzalez, Víctor Rosales, Miguel Esteban, Carmen Avilés	321
47. Aproximación en el desarrollo de un producto de recuperación para excedentes de placas de CLT: Prototipo de pasarela peatonal. Víctor Rosales, Camila Arevalo, Claudio Montero, Gerardo Saelzer, Alan Jara-Cisterna	327
48. De lo vernáculo a lo contemporáneo: análisis estructural de sistemas mixtos de tapia y madera. A. Blanca-Hoyos, R.A. Castro, I. Arto, F. Ávila, R. Gallego, E. Puertas	334
49. Intervenciones en el Patrimonio Industrial con Madera en España. Daniel F. Llana, Guillermo Íñiguez-González, Miguel Esteban, Ignacio Bobadilla, Francisco Arriaga	335
50. Woodex+: La evolución económica y precisa en la estimación de la densidad y la evaluación de la madera de construcción. Ignacio Bobadilla Maldonado, Roberto Martínez López, Carlos Taboada de La Fuente, Daniel Fernández Llana y Miguel Esteban Herrero.	341
51. Edificio de madera de dos plantas y dos vanos como demostrador practicable a escala para ensayos estáticos y dinámicos. Alberto Izquierdo, Alejandro Barrio, Juan-José Villacorta, Lara del Val, Antolín Lorenzana y Roberto D. Martínez.	347
52. Validación numérica de la respuesta estática y dinámica de un panel CLT. Patricia Vallelado-Cordobés, Jose-Antonio Balmori, Álvaro Magdaleno, Milagros Casado, Luis-Alfonso Basterra.	353
53. Reposición de la caseta de aperos del Parador de San Francisco en la Alhambra de Granada. Virginie Claude Brazille, Mikel Cervera Nagore, Carlos Benavides de la Fuente.	359

54. Evaluación de la capacidad termiticida del quitosano contra <i>Reticulitermes grassei</i> Clément. Sara M. Santos, María Teresa de Troya-Franco, Lee Robertson, Luis Acuña-Rello, Pablo Martín-Ramos, Milagros Casado-Sanz, Roberto D. Martínez-López, Eleana Spavento	367
55. Lilu’s House: vivienda, empresa y living lab. Pere Linares, Laia Haurie, Antonio Ortiz, Inma Rodriguez Cantalapiedra	373
56. Actuación integral de reparación de la estructura de madera del Centro de Visitantes El Dornajo del Parque Nacional de Sierra Nevada. Carlos Benavides, Alfonso Bermejo, Carlos Cruz, Luís I. Durán, Miguel Fernández, Antolino Gallego, Francisco Rescalvo	380
57. Sistemas de forjados sostenibles de madera para la edificación en altura en Andalucía. Antonio Jesús Rodríguez Pérez, Antolino Gallego Molina, Lázuli Fernández-Lobato, Juan Franquelo Soler	381
58. Revisión preliminar de sistemas híbridos madera-hormigón enfocados a la mejora de soluciones modulares. Emilio Luengo, Sandra Monteiro, Eva Hermoso, Alfredo Dias	388

1. PRÓLOGO

PRÓLOGO

El comité organizador de **LIGNOMAD 25** quiere dar la bienvenida a todas las personas que participan en esta tercera edición del Congreso sobre Construcción con Madera y otros Materiales Lignocelulósicos, que se celebra en **la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad de Granada** los días **24, 25 y 26 de septiembre de 2025**.

Después de las experiencias previas en **Barcelona (2017) y Santiago de Compostela (2019)**, esta nueva edición llega a Granada con la intención de mantener el espíritu de encuentro y diálogo que caracteriza a LIGNOMAD. Nuestro objetivo es ofrecer un espacio en el que investigadores, profesionales, empresas e instituciones puedan compartir avances, resultados y proyectos relacionados con la construcción en madera y materiales naturales.

La madera y los materiales lignocelulósicos tienen un papel cada vez más importante en la transición hacia una construcción más sostenible y la puesta en valor de nuestras materias primas endógenas, fomentando la gestión forestal sostenible, la prevención de incendios y la despoblación rural. Por eso, el programa del congreso combina **conferencias invitadas de especialistas de reconocido prestigio**, la presentación de **comunicaciones científico-técnicas**, un **espacio expositivo con empresas del sector** y una **visita técnica** a obras representativas en Granada y Málaga.

Queremos agradecer el esfuerzo de todas las personas que han enviado sus contribuciones, el trabajo riguroso del comité científico en la revisión de los textos, y el apoyo de las entidades patrocinadoras y colaboradoras que han hecho posible la organización de este encuentro.

Esperamos que LIGNOMAD 25 sea, además de un foro para el intercambio de conocimiento, una oportunidad para estrechar lazos profesionales y personales entre quienes compartimos el interés por la madera y los materiales naturales en la construcción.

Comité Organizador de LIGNOMAD 25

COMITÉ ORGANIZADOR

- Antolino Gallego Molina**
Doctor en Física, Catedrático de Universidad,
UIMA – Unidad de Investigación de la Madera de Andalucía,
Universidad de Granada
- Francisco Rescalvo Fernández**
Doctor Ingeniero de Edificación, Investigador Postdoctoral,
UIMA – Unidad de Investigación de la Madera de Andalucía,
Universidad de Granada
- Adelaida Martín Martín**
Doctora Arquitecta, Profesora Contratada Doctora,
UIMA – Unidad de Investigación de la Madera de Andalucía,
Universidad de Granada
- Yaiza Fuentes García**
Doctora Arquitecta, Profesora Contratada Doctora,
UIMA – Unidad de Investigación de la Madera de Andalucía,
Universidad de Granada
- Rafael Bravo Pareja**
Doctor Arquitecto, Profesor Contratado Doctor,
UIMA – Unidad de Investigación de la Madera de Andalucía,
Universidad de Granada
- Carlos Cruz Rodríguez**
Doctor Arquitecto, Profesor Titular de Universidad,
UIMA – Unidad de Investigación de la Madera de Andalucía,
Universidad de Granada
- Ana María Lacasta Palacio**
Doctora en Físicas, Profesora Catedrática de Universidad,
Departamento de Tecnología de la Arquitectura,
Universitat Politècnica de Catalunya
- María Pilar Giraldo Forero**
Doctora Arquitecta, Investigadora y Profesora Asociada,
INCAFUST / CTFC – Institut Català de la Fusta / Centre de Ciència i Tecnologia Forestal de Catalunya,
Universitat Politècnica de Catalunya

COMITÉ CIENTÍFICO

- José Manuel Cabrero**
Doctor Arquitecto, Catedrático de Universidad,
Cátedra Madera Onesta, Departamento de Construcción, Instalaciones y Estructuras,
Universidad de Navarra
- Miguel Esteban Herrero**
Doctor Ingeniero de Montes, Profesor Titular de Universidad,
ETSI Montes, Forestal y del Medio Natural,
Universidad Politécnica de Madrid
- Francisco Arriaga Martitegui**
Doctor Arquitecto, Catedrático de Universidad,
Departamento de Ingeniería y Gestión Forestal y Ambiental, ETSI Montes, Forestal y del Medio Natural,
Universidad Politécnica de Madrid
- Eva Hermoso Prieto**
Doctora Ingeniera de Montes, Científica Titular,
Departamento de Productos Forestales,
ICIFOR-INIA, CSIC
- Maite de Troya Franco**
Doctora en Ciencias Biológicas, Científica Titular,
Departamento de Productos Forestales, Grupo de Protección de Maderas,
ICIFOR-INIA, CSIC
- Luis-Alfonso Basterra Otero**
Doctor Arquitecto, Catedrático de Universidad,
Grupo de Investigación Estructuras y Tecnología de la Madera,
Universidad de Valladolid
- Ana María Lacasta Palacio**
Doctora en Físicas, Profesora Catedrática de Universidad,
Departamento de Tecnología de la Arquitectura,
Universitat Politècnica de Catalunya
- Laia Haurie Ibarra**
Doctora en Químicas, Profesora Agregada,
Departamento de Tecnología de la Arquitectura,
Universitat Politècnica de Catalunya

Edgar Segués Aguasca
Doctor Arquitecto técnico y Arquitecto, Profesor asociado,
Departamento de Tecnología de la Arquitectura,
Universitat Politècnica de Catalunya

Azahara Soilán Cañas
Doctora Ingeniera de Montes, Técnico,
Centro de Innovación e Servizos Tecnolóxicos da Madeira de Galicia (CIS Madeira),
Axencia Galega da Industria Forestal (XERA)

María Pilar Giraldo Forero
Doctora Arquitecta, Investigadora y Profesora Asociada,
INCAFUST / CTFC,
Universitat Politècnica de Catalunya

Manuel Touza Vázquez
Doctor Ingeniero de Montes, Técnico,
Centro de Innovación e Servizos Tecnolóxicos da Madeira de Galicia (CIS Madeira),
Axencia Galega da Industria Forestal (XERA)

María Portela Barral
Dirección Técnica y de Calidad de PEMADE Lab, Investigadora,
PEMADE – Plataforma de Ingeniería de la Madera Estructural,
Universidad de Santiago de Compostela

Manuel Guaita Fernández
Doctor Ingeniero Agrónomo, Catedrático de Universidad,
PEMADE – Plataforma de Ingeniería de la Madera Estructural,
Universidad de Santiago de Compostela

Josu Benito Ayúcar
Arquitecto, Investigador,
Laboratorio de Materiales de Construcción / Lab Services,
TECNALIA

Soledad Rodríguez Lazcano
Ingeniera Civil & Forestal, Coordinadora de I+D+i y Servicios Tecnológicos,
Área de Madera Estructural y Construcción,
CETEMAS – Centro Tecnológico Forestal y de la Madera de Asturias

Dolores Otero Chans
Doctora Arquitecta, Profesora Titular de Universidad,
Grupo de Investigación en Estructuras Arquitectónicas (GEA),
Universidad de A Coruña

Emilio Martín Gutiérrez
Doctor Arquitecto, Profesor Titular de Universidad,
Grupo de Investigación en Estructuras Arquitectónicas (GEA),
Universidad de A Coruña

Antolino Gallego Molina
Doctor en Física, Catedrático de Universidad,
UIMA – Unidad de Investigación de la Madera de Andalucía,
Universidad de Granada

Francisco Rescalvo Fernández
Doctor Ingeniero de Edificación, Investigador Postdoctoral,
UIMA – Unidad de Investigación de la Madera de Andalucía,
Universidad de Granada

Edgar Lafuente Jiménez
Ingeniero de Montes,
Jefe de Área de Industria y Construcción con Madera,
CESEFOR

José Luis Villanueva Hernández
Ingeniero de Montes,
Director de Transferencia en Industria y Construcción con Madera,
CESEFOR

Alfonso Lozano Martínez-Luengas
Doctor Ingeniero Industrial,
Área de Ingeniería de la Construcción,
Universidad de Oviedo

Pablo González Serna
Arquitecto, Investigador,
Laboratorio de Materiales de Construcción / Lab Services,
TECNALIA

Arritokieta Eizaguirre Iribar
Doctora Arquitecta, Investigadora,
Laboratorio de Fuego / Lab Services,
TECNALIA

Xabier Olano Azkune
Ingeniero Industrial, Responsable de Laboratorio,
Laboratorio de Fuego / Lab Services,
TECNALIA

Almudena Majano Majano
Doctora Arquitecta, Profesora Titular,
Grupo de Investigación Construcción con Madera,
Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid

Jose Ramón Aira Zunzunegui
Doctor Ingeniero de Montes, Profesor Contratado Doctor,
Grupo de Investigación Construcción con Madera (GICM),
Universidad Politécnica de Madrid

Daniel Fernández Llana
Doctor Ingeniero Agrónomo, Investigador Postdoctoral,
Grupo de Investigación Construcción con Madera (GICM),
Universidad Politécnica de Madrid

PONENCIAS PRINCIPALES (INVITADAS)

Francisco Arriaga. Grupo de Construcción con Madera Universidad Politécnica de Madrid.
Durabilidad de las estructuras de madera.

María Pilar Giraldo. INCAFUST Institut Català de la Fusta - CTFC Centre de Ciència i Tecnologia Forestal de Catalunya.
La madera frente al fuego: el arte de arder con previsibilidad.

Luis Alfonso Basterra. ETS Arquitectura Universidad de Valladolid.
Prevenir sin proteger.

Jorge Blasco. Estudi m103, SLP. Escola Tècnica Superior d’Arquitectura Universitat Politècnica de Catalunya.
La importancia del detalle independiente del tamaño.

ÁREAS TEMÁTICAS

- Caracterización de especies de madera
- Estructuras de madera y sistemas constructivos
- Técnicas de evaluación y diagnosis de estructuras de madera
- Biocomposites basados en materiales lignocelulósicos
- Prestaciones de materiales naturales
- Comportamiento frente al fuego / Durabilidad
- Uso de la madera y otros materiales naturales en construcción / proyectos arquitectónicos
- Rehabilitación de estructuras de madera
- Tratamiento, mantenimiento y conservación preventiva de estructuras de madera

2. EXPOSITORES PATROCINADORES Y COLABORADORES

EXPOSITORES



PATROCINADORES



COLABORADORES





arquima
soluciones industrializadas con madera

ARQUIMA somos una empresa de vanguardia que lidera el sector de la construcción industrializada con soluciones eficientes, sanas y sostenibles en madera.

Ofrecemos una de las fábricas de entramado ligero más productivas del país con gran capacidad para fabricar desde complejos residenciales hasta fachadas y equipamientos.



PÁGINA WEB



CATÁLOGO



www.arquima.net
Tel. 93 682 10 06
info@arquima.net





MADERA ESTRUCTURAL

“No plantamos árboles para construir
con madera, **construimos con madera**
para plantar más árboles”



www.iberolam.com
info@iberolam.com



SOLUCIONES Y SERVICIOS

Somos una empresa andaluza de madera técnica estructural ubicada en Granada surgida para la transferencia de conocimiento generado en el proyecto **LIFE Wood for Future** coordinado por la **Universidad de Granada**.

Iberolam Timber&Technology es una herramienta clave para impulsar un ecosistema industrial de construcción con madera en el sur de España y promover la gestión forestal sostenible y una construcción más ecológica con materia prima de proximidad.

Nuestra compañía está comprometida con los retos ambientales y sociales de nuestro territorio, la construcción industrializada baja en carbono y la lucha contra la despoblación rural.

QUÉ HACEMOS

➤ DISEÑO Y SUMINISTRO DE SISTEMAS ESTRUCTURALES EN MADERA

Fabricación y suministro de estructuras completas en CLT, entramado ligero, vigas laminadas y soluciones mixtas madera-hormigón. Adaptación del sistema constructivo a cada proyecto, con mecanizado industrial propio y criterios de optimización estructural y logística.

➤ MONTAJE DE ESTRUCTURAS CON EQUIPO PROPIO

Montaje especializado de estructuras de madera técnica. Coordinación de la fabricación, transporte y montaje in situ con medios propios. Control de calidad y tiempos en fase de obra.

➤ MODELADO BIM Y FABRICACIÓN DIGITAL

Modelado 3D con Cadwork orientado a fabricación y montaje. Integración de fases de diseño, producción y obra mediante herramientas digitales y procesos industriales.

➤ ASESORÍA Y CÁLCULO ESTRUCTURAL

Soporte técnico a arquitectos, promotoras y constructoras en el diseño, cálculo y resolución de uniones de estructuras de madera. Asistencia desde fases tempranas de proyecto.

➤ ESTUDIOS Y DOCUMENTACIÓN TÉCNICA

Elaboración de informes técnicos, memorias estructurales, detalles constructivos y documentación para licitación o ejecución, con enfoque especializado en sistemas de madera.

➤ INSPECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE ESTRUCTURAS EXISTENTES

Aplicación de ensayos no destructivos in situ, inspección visual y análisis de patologías estructurales en madera. Evaluación de clase resistente y determinación de intervenciones necesarias.

➤ ENSAYOS MECÁNICOS DESTRUCTIVOS Y CLASIFICACIÓN

Caracterización estructural de elementos de madera mediante ensayo mecánico. Clasificación según normativa técnica para proyectos de refuerzo o rehabilitación.

➤ REFUERZO ESTRUCTURAL CON FIBRA DE CARBONO

Diseño y ejecución de soluciones de refuerzo para estructuras de madera mediante laminados de fibra de carbono. Cálculo, dimensionado y dirección técnica de las intervenciones.



LA MADERA DEL MAÑANA TOMORROW'S TIMBER TALKS

CONOCE LAS ÚLTIMAS TENDENCIAS EN CONSTRUCCIÓN CON MADERA



Asociación
Española para
la Sostenibilidad
Forestal

- ✓ Talleres inspiradores
- ✓ Dirigidos a profesionales del sector de la construcción
- ✓ Novedades en madera y productos de madera
- ✓ Certificación de proyectos PEFC



Con el apoyo de:



CERTIFICACIÓN PEFC: ¿QUÉ GARANTIZA?

- Origen de bosques gestionados de forma sostenible.
- Protección de biodiversidad, suelo, agua y derechos de comunidades locales.
- Trazabilidad controlada mediante auditorías independientes.

PASOS

- 1 Selecciona proveedores con certificación PEFC (<https://pefc.org/find-certified>)
- 2 Solicita que los productos contengan >70% de material PEFC. En la factura o albarán, deberá aparecer la declaración formal "X% PEFC Certificado".



VENTAJAS PARA ARQUITECTOS, CONSTRUCTORES Y PROMOTORES

- ✓ **Diferenciación competitiva:**
Preferencia en proyectos sostenibles y licitaciones públicas
- ✓ **Cumplimiento de regulaciones:**
EUDR, CSRD, taxonomía verde, DNSH
- ✓ **Reconocimiento internacional:**
BREEAM, LEED, HQE, DGNB, RICS Ska, Built Green
- ✓ **Reputación y transparencia:**
Frente a inversores, clientes y administraciones
- ✓ **Reducción de huella de carbono:**
Uso de madera local y de proximidad
- ✓ **Mayor disponibilidad de proveedores certificados**



PEFC
PEFC/14-1-1

PEFC España
915910088
www.pefc.es



PEFC, EL SISTEMA DE CERTIFICACIÓN FORESTAL LÍDER EN EL MUNDO

PEFC es el sistema de certificación forestal más implantado en España y en el mundo y, por tanto, la mayor fuente global de productos forestales sostenibles. En España, con 3 millones de hectáreas gestionadas por 80.000 selvicultores y propietarios forestales suministran madera y otros recursos forestales a cerca de 1.900 empresas certificadas en Cadena de Custodia (más de 1.200 de ellas del sector de la madera). A nivel mundial, 295 millones de hectáreas, 750.000 propietarios y cerca de 30.000 empresas están certificados PEFC.

Consulta el listado de proveedores con certificación PEFC en el
Buscador de productos PEFC <https://pefc.org/find-certified>





Somos diseñadores, somos fabricantes y somos instaladores de madera laminada, madera contralaminada y entramado ligero.

Somos Egoín.

www.egoín.com

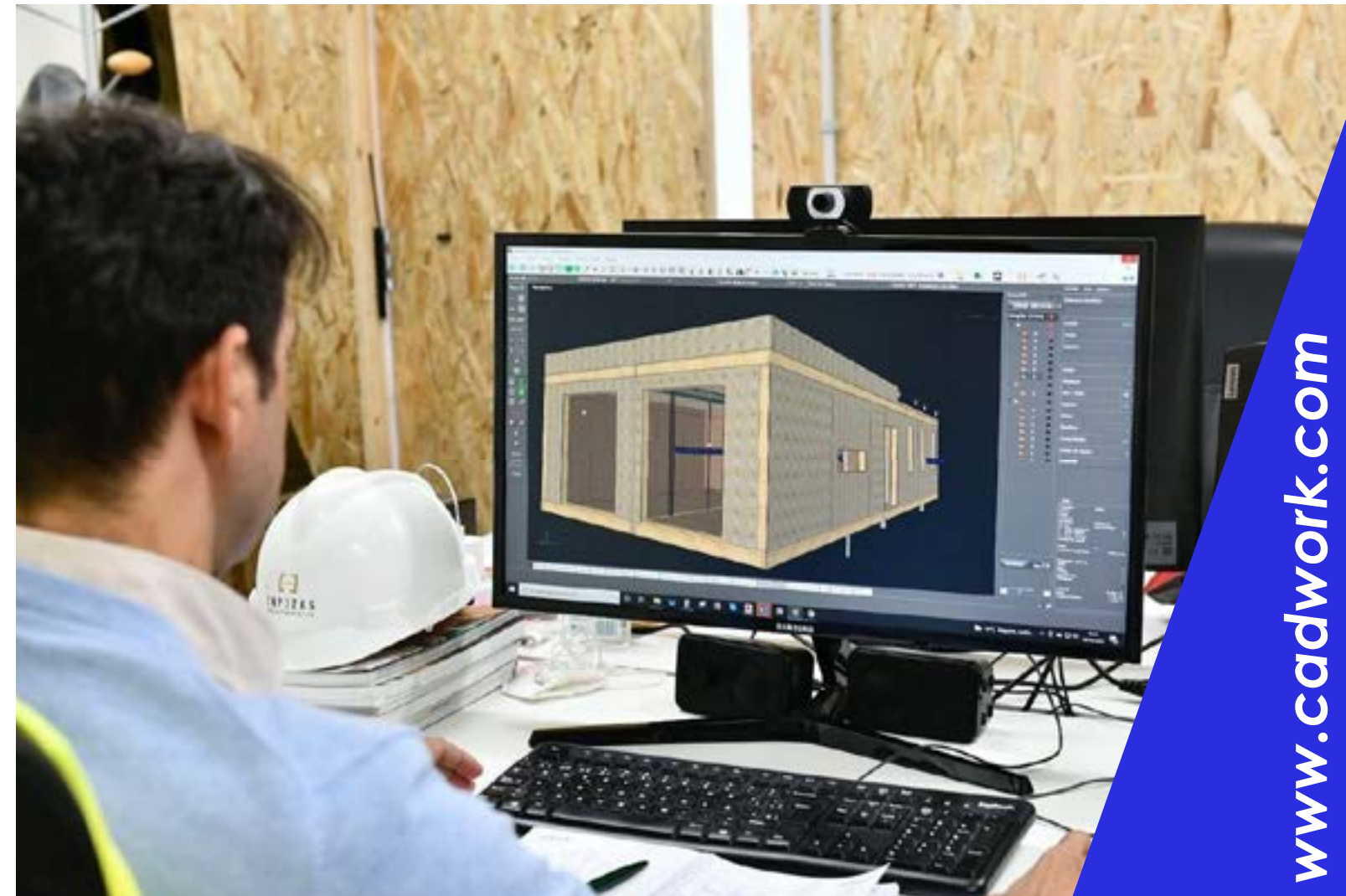
egoín WOOD GROUP
We Are Wood.

cadwork®

El software de las empresas de construcción en **madera**.



CLT	■	SIP	■
entramado ligero	■	madera laminada	■
macizo	■	madera aserrada	■



Hundegger WALL-Master

Automatiza la producción e insuflado de paredes de entramado ligero

HUNDEGGER

Innovationen für den Holzbau

El Hundegger WALL-Master está disponible en tres variantes:

- Hundegger WALL-Master 3200
- Hundegger WALL-Master 3800
- Hundegger WALL-Master 4500



hundegger.com

Ventajas destacadas:

- Soluciones de mesa flexibles adaptadas a las necesidades de cada cliente
- Interfaz universal para dispositivos de fijación de cualquier fabricante
- Grapado preciso en el ángulo estructural requerido
- Cambio automático de herramientas (hasta 12 posiciones)
- Sistema de seguridad colaborativo

3. PONENCIAS

1. MADEXTER II una nueva herramienta para la asignación paramétrica de las clase de uso de la norma UNE-EN 335

Fernández-Golfin Seco, J.I.^a, Conde García, M.^a, Tenorio, J.A.^b, Conde García, M.^c
^a Instituto de Ciencias Forestales (ICIFOR-INIA-CSIC), Madrid. ^b Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción (IETcc-CSIC), Madrid. ^c Departamento de Ingeniería Forestal de la Universidad de Córdoba, Unidad Asociada al CSIC por el ICIFOR-INIA y el IETcc
golfin@inia.csic.es

Palabras clave: Madera, Clases de uso, Construcción en madera.

Resumen

La herramienta Madexter II incluye el sistema paramétrico de cálculo de las clases de uso de la versión anterior, mejor ajustado y adicionado con un nuevo y más sencillo sistema de determinación del índice de exposición básica (I_{so}), basado en el empleo de un visor GIS que, adicionalmente, incorpora información sobre la dirección de los vientos dominantes de lluvia, el valor de índice de lluvia batiente o del Riesgo de Deformación y Agrietamiento, entre otros.

1. Introducción

La excelente valoración ambiental inicial de los productos de madera, puesta de manifiesto en las declaraciones ambientales de producto y edificio, se puede revertir si una incorrecta prescripción de los materiales o un inapropiado diseño propician fallos prematuros que obliguen a continuas intervenciones de mantenimiento, reparación y/o rehabilitación. Por todo ello es necesario dar pautas para conseguir que los productos sean correctamente prescritos y las soluciones constructivas diseñadas de forma que en todo momento la vida útil prescrita quede garantizada (1).

De todos los agentes de la degradación de la madera en servicio, es el binomio humedad-temperatura del material (clima del material), el que más afecta al comportamiento físico-mecánico y biológico de los productos de la madera. La correcta estimación de las condiciones climáticas en las que un producto de madera vaya a trabajar (expresadas en forma de clases de uso), junto con la adopción de las medidas de diseño, prescripción de producto y, en su caso, de tratamiento químico protector son aspectos que todo proyectista ha de ser capaz de manejar cuando construye con madera y se plantea la durabilidad como meta (1).

La clase de uso hace exclusivamente referencia al riesgo de degradación biológica de la madera que compone el producto (fundamentalmente por la acción de hongos e insectos), mientras que la clase de servicio aplicada a la prescripción de los productos guarda relación con su permanencia estructural en el tiempo. La norma UNE-EN 335:2013 (2) es la que establece los criterios generales de asignación de las cinco clases de uso que considera, en función de la evolución estimada del contenido de humedad de la madera a lo largo del año.

A nuestro criterio, la mayor debilidad de la norma EN 335:2013 radica en que deja un enorme margen de discrecionalidad y notables dudas sobre qué clase asignar en las distintas condiciones de servicio. Además de una mayor concreción creemos que la norma debería considerar las diferentes condiciones de higrometría que se pueden dar en el interior de los edificios contempladas en la norma EN ISO 137886 (4), previendo la posible de presencia de puntos de condensación.

Para superar las carencias observadas en la norma UNE-EN 335, el seno del proyecto MADEXTER, se propuso en 2017 un sistema paramétrico de asignación de las clases de uso apoyado por una hoja de cálculo que ayudaba en su aplicación práctica (1, 3). En 2025 se lanzó una segunda y más completa versión, MADEXTER II, que es la que se presenta en este trabajo y que aporta los aprendizajes de 8 años de uso así como unas herramientas complementarias de gran utilidad para la asignación de los índices básicos por condición de uso.

2. Metodología

El método de asignación paramétrica de clases de uso empleado en la calculadora MADEXTER, sigue los principios generales establecidos en la norma ISO 15686-1 (5), considerando un sistema factorial que integra el efecto de todas aquellas variables que asociadas tanto al clima como al diseño tienen influencia sobre el clima del material.

La asignación de la clase de uso se inicia determinando el valor del índice de exposición básica (I_{s0}), en función de la condición de uso considerada. Los criterios empleados para su determinación por condición de uso son los siguientes:

1. **Elementos de madera ubicados completamente al interior.** Se usarán los valores de I_{s0} de la tabla 1, establecidos en función de las clases de higrometría interior de la norma EN ISO 13788 (4).

Tabla 1. Valores del índice de exposición básica para elementos ubicados al interior de edificios dotados de envolvente térmicasen función de su Clase de Higrometría interior.

Clase de higrometría Interior	Tipo de edificio y/o local	I_{s0}
1	Edificios desocupados, almacenes de bienes secos	1,0
2	Oficinas, edificios de oficinas con una ventilación y ocupación normal	1,0
3	Espacios en los que no se prevea una alta producción de humedad, tales como edificios residenciales y viviendas con baja ocupación	1,0
4	Pabellones deportivos, cocinas industriales, restaurantes, piscinas con sistemas continuos de control de la higrometría interior (80% máximo).	2,0
5	Edificios en los que se prevea una gran producción de humedad -lavanderías, destilerías, piscinas sin sistemas de control continuo de la higrometría interior-	3,0
Nota 1: En las clases de higrometría 1 a 4, debe poder excluirse la presencia de condensaciones. Nota 2: En clase higrométrica 4 quedarán incluidos los materiales de cubierta y fachada que estén ubicados al exterior del aislamiento térmico pero protegidos por una barrera impermeabilizante.		

2. **Elementos de madera en condiciones de semi-exterior.** Se usarán los valores del I_{s0r} calculados de acuerdo con el criterio de la tabla 2:

Tabla 2. Cálculo del valor del índice de exposición básica para elementos ubicados al interior

Contenido de humedad equilibrio	$\leq 12\%$	12 a 18%	$> 18\%$
Anual (por el valor medio anual)	1	2	3
Mensual (por cada mes)	-0,15	0	+0,3
I_{s0}	$\sum$	$\sum$	$\sum$

3. **Elementos de madera ubicados al exterior fuera del contacto con el suelo.** El cálculo del I_{s0} de la localidad se efectuará en dos etapas:

- i. Primera etapa: Se calcula el índice de Scheffer, (1, 8) para un período de, al menos, 10 años.
- ii. Segunda etapa: Se asigna el valor del I_{s0r} en función del índice Scheffer, aplicando el criterio de la tabla 3 (1).

Tabla 3 Criterio de conversión del valor del índice Scheffer en valor del índice de exposición básica (I_{s0}).

Índice Scheffer	Tipo de estación	I_{s0}
$IS \leq 35$	Seca	3,0
$35 < IS \leq 70$	Húmeda	3,3
$70 < IS \leq 100$	Muy húmeda	3,5
$IS > 100$	Extremadamente húmeda	3,7

Una de las novedades de la calculadora MADEXTER II (2025) radica en la existencia de un visor GIS que puede ser invocado desde la propia calculadora que permite, para cada ubicación geográfica, obtener los datos calculados de los índices de exposición básica exterior (I_{s0_e}) y semiexterior ($I_{s0_{se}}$), junto con otros datos relevantes, como son: el índice de lluvia batiente, la dirección de los vientos dominantes de lluvia, el índice Scheffer, o el índice de Riesgo de Degradación y Agrietamiento (RDA). Una completa explicación de este visor queda recogida en (9), y el acceso a la misma se puede conseguir en el siguiente enlace <https://experience.arcgis.com/experience/3fa031ae706b4edb87ad9e887c7243cd>.

En condiciones de uso exterior, el valor del índice de exposición básica (I_{s0}) podrá ser modificado por un factor de severidad climática (k_{s1}), que tiene en cuenta la existencia de condiciones de entorno especiales, tales como: 1) La orientación respecto de los vientos dominantes de lluvia, 2) La configuración urbana (protección por parte de edificaciones cercanas), 3) La existencia de accidentes geográficos (elevaciones, valles, lagunas, ríos cercanos, proximidad al mar, etc.) que generen protección o incrementen el riesgo o 4) Cualquier otro factor que a criterio

del proyectista incremente, o reduzca, la severidad del clima de la zona en la zona de contacto con el elemento de madera bajo análisis. Los criterios quedan reflejados en la tabla 4.

Tabla 4. Valores del factor de severidad climática (ks1) en función de las variables de exposición

Severidad climática	Descripción	Factor (k _{s1})
Baja	Ubicación en la que todas las variables climáticas de entorno son protectoras: •Existe protección frente a vientos dominantes de lluvia por presencia de accidentes geográficos, edificaciones colindantes •Existe larga distancia (>5 km) a grandes fuentes de humedad (grandes ríos, lagos o mar)	0,8
Media	Ubicación en la que se da al menos una de las siguientes situaciones: •Existe marcada exposición a vientos dominantes de lluvia por estar la edificación aislada fuera de entorno urbano o carecer de protección por presencia de accidentes del terreno, y/o •Existe una distancia media (3 a 5 km) a grandes fuentes de humedad (grandes ríos, lagos o mar) En aplicaciones de interior se empleará, con carácter general, este valor del coeficiente.	1,0
Elevada	Ubicación en la que se dan, al menos, dos de las siguientes situaciones: •Existe exposición a vientos dominantes de lluvia por estar la edificación aislada fuera del entorno urbano y sin protección por accidentes del terreno, y/o •La edificación se encuentra situada en el fondo de valles angostos con limitación en el número de horas de soleamiento, y/o •Existe proximidad (1 a 3 km) a grandes fuentes de humedad (grandes ríos, lagos o mar), y/o •Existe en la localidad presencia de nieblas persistentes durante 30 a 60 días/año.	1,1
Severa	Ubicación en la que se dan ,al menos, tres de las siguientes situaciones: •Exposición a vientos dominantes de lluvia por estar la edificación aislada fuera del entorno urbano y sin protección por accidentes del terreno, y/o •Edificación situada en el fondo de valles angostos, por el que discurre una corriente de agua y en el que existe una limitación en el número de horas de soleamiento, y/o •Existen en la proximidad accidentes topográficos y/o de situaciones que generan un microclima especialmente húmedo, y/o •Existe cercanía a grandes fuentes de humedad (mar)n inferior a 1 km, y/o •Existe en la localidad presencia de nieblas persistentes durante más de 60 días/año	1,2
Nota 1: Cuando las distintas fachadas de los edificios estén sometidas a distintos niveles de severidad climática (normalmente por su diferente exposición a vientos dominantes de lluvia), el proyectista podrá optar por adoptar la exposición más desfavorable para el conjunto de las cuatro orientaciones, o bien efectuar un análisis independiente de cada una de ellas. Nota 2: Con carácter general en las condiciones de interior y semi-exterior, ks1 tomará el valor de 1.		

El producto del valor del índice de exposición básica (I_{s0}) por el factor de severidad climática (k_{s1}) se denomina índice

de exposición mesoclimática (I_s) (1).

$$I_s=I_{s0} \cdot k_{s1} \qquad (1)$$

La herramienta MADEXTER incorpora la posibilidad de aplicar el efecto de una serie de factores adicionales por diseño que se ha comprobado que reducen el contenido de humedad de la madera en servicio. Estos son los siguientes:

- Geometría del elemento (k_{s2})
- Aleros y cornisas (k₃)
- Distancia al suelo (k_{s4})
- Diseño constructivo, evaluado de acuerdo con su incidencia en la retención del agua de lluvia y la facilidad de secado del elemento (k_{ss})
- Otras variables. Este factor adicional (k_{se}) puede ser empleado por el proyectista para considerar la presencia de riesgos especiales.

En el caso de aplicar todos o parte de los criterios reductores anteriores, la ecuación (1) anterior quedaría como sigue (2):

$$I_{sk}=s0 \cdot k_{s1} \cdot k_{s2} \cdot k_{s3} \cdot k_{s4} \cdot k_{s5} \cdot k_{s6} \qquad (2)$$

Donde I_{sk} es el que se denomina índice característico de exposición, que es el que sirve para la asignación paramétrica de la clase de uso de la norma EN 335, de acuerdo con el criterio establecido en la tabla 5 (1).

Los criterios de asignación de valores para los coeficientes reductores del riesgo climático (k_{s2} a k_{se}) son, en gran medida, coincidentes con los propuestos en el seno del proyecto europeo Woodexter (6,7), figurando ampliamente descritos y explicados en (1, 10).

Tabla 5. Criterios de asignación de clases de uso en función del valor calculado del índice de exposición característica

Asignación de clases de uso	
Índice de exposición característica (I_{sk})	Clase de uso (EN 335)
0-1,5	1
>1.5 hasta 2.5	2
>2.5 hasta 3.5	3.1
>3.5 hasta 4.5	3.2
>4.5	4*

(*) En el caso de medio marino sería CU5

Conclusiones

Desde el lanzamiento en 2017 de la primera versión de la herramienta en Excel MADEXTER, esta ha sido empleada en decenas de proyectos de edificación y ha demostrado su utilidad para el cálculo objetivo y paramétrico de las clases de uso definidas en la norma europea EN 335. La herramienta ha contribuido a que los proyectistas optimicen los diseños constructivos y/o prescriban de manera adecuada la protección química preventiva aplicada a los productos de madera en los edificios.

La segunda versión de esta herramienta, MADEXTER II, incorpora un sistema nuevo y más sencillo para la determinación del índice básico de exposición (I_{s0}), basado en el uso de un visor SIG, válido para todo el territorio español. Asimismo, integra funcionalidades de gran interés para la determinación de otros factores de especial relevancia en la optimización del diseño y en la garantía de la vida útil del material, como la identificación de la dirección de las lluvias impulsadas por el viento, así como la evaluación del riesgo por deformación y agrietamiento (RDA) de la madera.

Siendo la asignación de las clases de uso la principal utilidad de la herramienta MADEXTER II, esta contiene otras funcionalidades que permiten orientar al proyectista en la prescripción de la clase técnica de producto de madera en función de la clase de servicio, en la prescripción del tipo de tratamiento preventivo a aplicar o en la elección del tipo de madera más adecuado en cada condición de servicio.

La herramienta MADEXTER II, junto con sus instrucciones, puede descargarse en la web de Maderia, <https://maderia.org/>

Agradecimientos

A la Agencia Española de Meteorología, AEMET, por los datos climáticos suministrados para el conjunto de las estaciones nacionales para el periodo 2011-2021.

Referencias

(1) Fernández-Golfín Seco JI.; Peraza Sánchez, F.; Touza Vázquez M.; Arriaga Martitegui F. (2018). *“Guía para la asignación de clases de uso y de servicio a los productos de la madera”*. Monografía INIA Serie Forestal nº 30. 95 pp. España. ISBN: 978-84-7498-582-5.

(2) EN 335:2013 *Durabilidad de la madera y de los productos derivados de la madera. Clases de uso: definiciones, aplicación a la madera maciza y a los productos derivados de la madera.*

(3) Fernández-Golfín Seco JI.; Peraza Sánchez, F. (2017). *“Herramienta para la asignación de clases de uso de la norma UNE-EN 335”*. AITIM, 2017, pp: 25-29.

(4) UNE-EN ISO 13788:2016 (Corrected version 2020-05). *“Características higrotérmicas de los elementos y componentes de edificación. Temperatura superficial interior para evitar la humedad superficial crítica y la condensación intersticial. Métodos de cálculo”*.

(5) ISO 15686-1:2011 (confirmed 2020). *“Buildings and constructed assets — Service life planning. Part 1: General principles and framework”*.

(6) Thelandersson, S; Isaksson, T; Suttie, E; Frühwald Hansson, E; Toratti, T; Grüll, G; Viitanen, H; Jermer, J. (2011). *“Service life of wood in outdoor above ground applications: Engineering design guideline”*. Background document. Rapport TVBK-3061, ISSN 0349-4969. Lund University, Sweden.

(7) Thelandersson, S. (2013). *“Service life evaluation of wood-an engineering approach”*. IRG/WP 13-20515. IRG, Stockholm.

(8) Scheffer TC (1971). *“A climate index for estimating potential for decay in wood structures above ground”*. Forest Prod. J. 21(10):25–31.

(9) Fernández-Golfín Seco, J.I.; Conde García, M.; Conde García, M.; Garnica Muñoz, J.; Martínez Fernández, J. (2025). *“Un visualizador cartográfico para la determinación de la clase de uso de la madera en aplicaciones de exterior y semiexterior en España”* Comunicación en el 9º Congreso Forestal Español. 16-20 junio, Gijón, España.

(10) Conde García, M. (2023). *“Evaluación del comportamiento funcional de la madera maciza en condiciones de uso exterior”*. Tesis Doctoral de la Universidad de Córdoba, España. <https://helvia.uco.es/xmlui/handle/10396/26015>

2. Viabilidad del uso del chopo en paneles de CLT: paneles monoespecie y multiespecie pino-chopo

Yaiza Fuentes-García^a, Carlos Cruz^a, Francisco J. Rescalvo^a, Guillaume Pot^b, Louis Denaud^b, Rafael Bravo^a, Antolino Gallego^a
^aUIMA-UGR, Azucarera de San Isidro, Campus UGRSostenible, Granada. ^bLaBoMaP, Arts Et Metiers Institute of Technology, HESAM Université, 71250 Cluny, France.
yaizafg@ugr.es

Palabras clave: chopo, delaminación, flexión, madera contralaminada, pino.

Introducción

La madera contralaminada (CLT) es un producto estructural que ha favorecido la construcción en altura con madera gracias a su rigidez bidireccional, estabilidad dimensional y capacidad de prefabricación (1). Su fabricación en Europa se basa principalmente en coníferas como Picea abies y Pinus sylvestris, cuyas propiedades homogéneas facilitan la estandarización (2). En el sur de España, existen especies locales infrautilizadas con potencial estructural, como el chopo (Populus x euramericana), de rápido crecimiento, y el pino laricio (Pinus nigra), con buenas propiedades mecánicas. Aunque el primero presenta baja densidad y rigidez, ha demostrado ser viable como capa transversal en paneles CLT (3), mientras que el segundo permite mejorar el rendimiento global en configuraciones mixtas (4). Estas combinaciones pueden equilibrar rigidez y ligereza (5), pero requieren validación experimental conforme a criterios normativos, tanto en comportamiento mecánico como en durabilidad.

Este estudio analiza el comportamiento estructural de paneles CLT fabricados con chopo y pino laricio mediante ensayos no destructivos, ensayos a flexión y pruebas de delaminación, evaluando su idoneidad para aplicaciones estructurales con madera de proximidad.

Material y metodología

Material

Los paneles CLT se fabricaron con madera de chopo (Populus x euramericana, clon MC) de la Vega de Granada y pino laricio (Pinus nigra) procedente de los montes de Navahondona-Parque Natural de Cazorla, Segura y las Villas de Jaén. La madera fue aserrada, secada por debajo del 18% de humedad y clasificada por resonancia longitudinal con el software BING (6). El módulo de elasticidad dinámico medio (MoEdin) fue de 9368±607 y 11561±2124 MPa para el chopo y el pino, respectivamente. A partir de las láminas que se encontraban dentro del rango de una desviación estándar respecto a la media, se fabricaron cinco configuraciones de paneles de tres capas (20/20/20 mm) y dimensiones de 610×1700 mm (ancho x largo): dos monoespecie (C/C/C y P/P/P) y tres mixtas (P/C/P, C/C/P y P/C/C), como se observa en la Figura 1. Se fabricaron 2 paneles por configuración, de los cuales se obtuvieron 2 probetas de 300x1700 mm (ancho x largo) por cada panel para ensayar a flexión, resultando un total de 6 probetas por configuración.

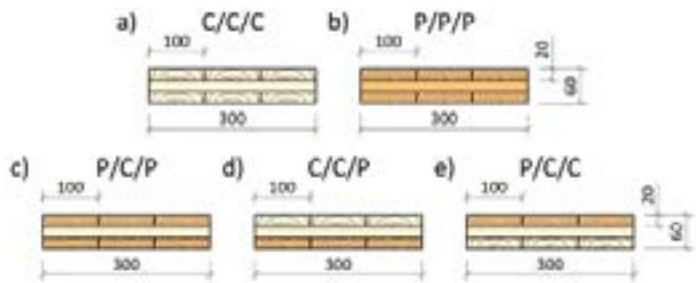


Figura 1. Configuraciones de CLT. a) Monoespecie chopo. b) Monoespecie pino. c) Pino/chopo/pino. d) Chopo/chopo/pino. e) Pino/chopo/chopo. Dimensiones en mm.

Ensayos no destructivos

Previo al encolado, las láminas seleccionadas se caracterizaron mediante ensayos no destructivos (END) para obtener el módulo de elasticidad dinámico en dirección longitudinal y transversal, $MoE_{din,Llam'}$ $MoE_{din,Tlam'}$ respectivamente y su módulo de cortante dinámico $G_{din,lam}$. Se empleó adhesivo PUR monocomponente (Loctite HB S709), aplicado manualmente y prensado 24 h a 1 N/mm². Todas las probetas se caracterizaron mediante vibración libre en tres direcciones (Figura 2a) para obtener el módulo de elasticidad dinámico en sentido longitudinal y en dos direcciones transversales ($MoE_{din,Lp'}$ $MoE_{din,T1p}$ y $MoE_{din,T2p'}$ respectivamente), además del módulo a cortante dinámico de cada dirección ($G_{din,T1p}$ y $G_{din,T2p'}$ respectivamente), con apoyos elásticos XYLOFON PLATE (Figura 2b).

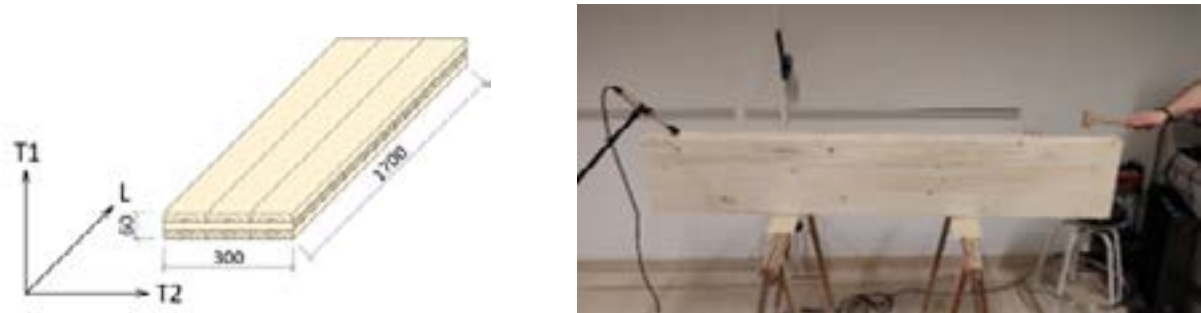


Figura 2. Ensayos no destructivos (END) en paneles CLT. a) Determinación de las tres orientaciones de medida. b) Ensayo en dirección T2 ($MoE_{din,T2p}$) sobre panel de chopo. Dimensiones en mm.

Ensayos destructivos a flexión y delaminación

Los ensayos destructivos a flexión se realizaron a cuatro puntos con carga perpendicular al plano (UNE-EN 16351:2021) en una máquina MicroTest EM2 con célula de carga de 200 kN (Figura 3a). Se empleó una luz de 24·h y un control por desplazamiento de 9 mm/min (Figura 3b). Se calcularon la resistencia a flexión (f_m), el módulo de elasticidad estático global ($MoE_{est,p}$) a partir de un extensómetro de cable (marca ASM, modelo WS10). Asimismo, se calculó el módulo de elasticidad en la zona de máxima tracción ($MoE_{est,tracción,p}$) a partir de las deformaciones registradas por galgas extensométricas HBM (longitud de rejilla 10 mm, modelo 10/120 LY41-2L/0.5M), empleando la ecuación 1. Las dimensiones y la densidad se corrigieron al 12% de humedad conforme a UNE-EN 408:2011+A1:2012 y UNE-EN 13183-1:2002.

$$MoE_{est,tracción,va} = (\sigma_2 - \sigma_1) / (\epsilon_2 - \epsilon_1) \quad (1)$$

Por último, los ensayos de delaminación se realizaron según el procedimiento descrito en el anexo B de la UNE-EN 16351:2021, aplicando ciclos de presión y humedad para verificar la calidad del encolado. Se ensayaron un total de 30 probetas (10 por configuración), correspondientes a las configuraciones C/C/C, P/P/P y P/C/P, representativas de las cinco tipologías de paneles evaluadas (Figura 1).

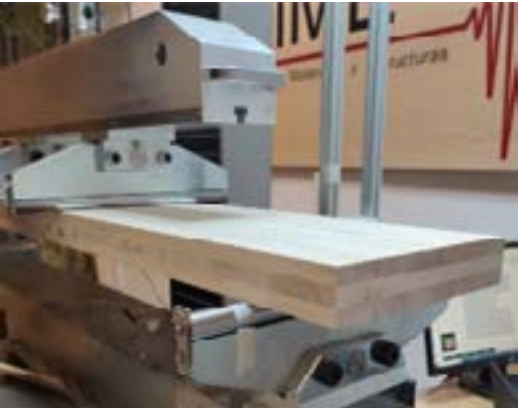
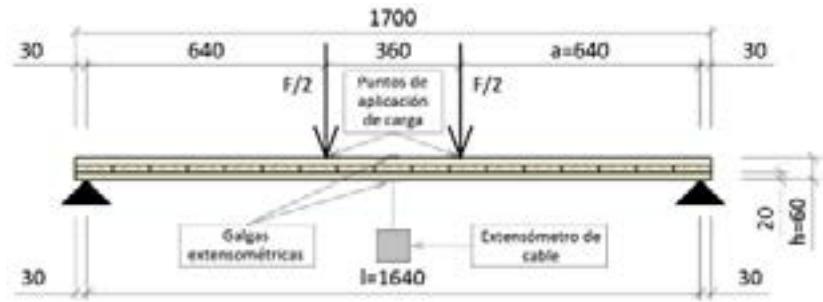


Figura 3. Ensayo a flexión a cuatro puntos en paneles CLT. a) Configuración del ensayo. Dimensiones en mm. b) Vista del ensayo en panel monoespecie de chopo.

Resultados

Propiedades dinámicas de láminas y paneles

Las láminas de pino laricio presentaron valores superiores a los del chopo en $MoE_{din,Ulam'}$, $MoE_{din,Tlam}$ y $G_{din,lam'}$ con incrementos del 21,2%, 8,8% y 21,7%, respectivamente. La desviación estándar fue un 196,1% mayor en el pino, atribuida a una mayor incidencia de nudos o desviación de fibra. En los paneles monoespecie de pino, el $MoEdin,Lp$ disminuyó un 29,4% respecto al valor medio de las láminas, reflejando la pérdida de rigidez inducida por la capa transversal. El $G_{din,T1}$ en la configuración P/P/P fue un 58,5% mayor en comparación con las configuraciones que incorporan chopo en la capa transversal.

Propiedades mecánicas a flexión

En los ensayos destructivos a flexión, los paneles P/P/P y P/C/P alcanzaron resistencias un 15,4% y 23,1% superiores en comparación con la configuración C/C/C, respectivamente. En cambio, las configuraciones C/C/P y P/C/C no mostraron diferencias significativas respecto al panel monoespecie de chopo C/C/C (Figura 4a). El $MoE_{est,p}$ de la configuración P/P/P fue un 37,2% mayor respecto a C/C/C, mientras que la configuración mixta P/C/P tuvo una diferencia del 5,6% con respecto al panel P/P/P (Figura 4b). En cuanto a la densidad, el mixto P/C/P presentó una reducción del 8,5% respecto al panel P/P/P y un incremento del 24,7% respecto a C/C/C (Figura 4c).

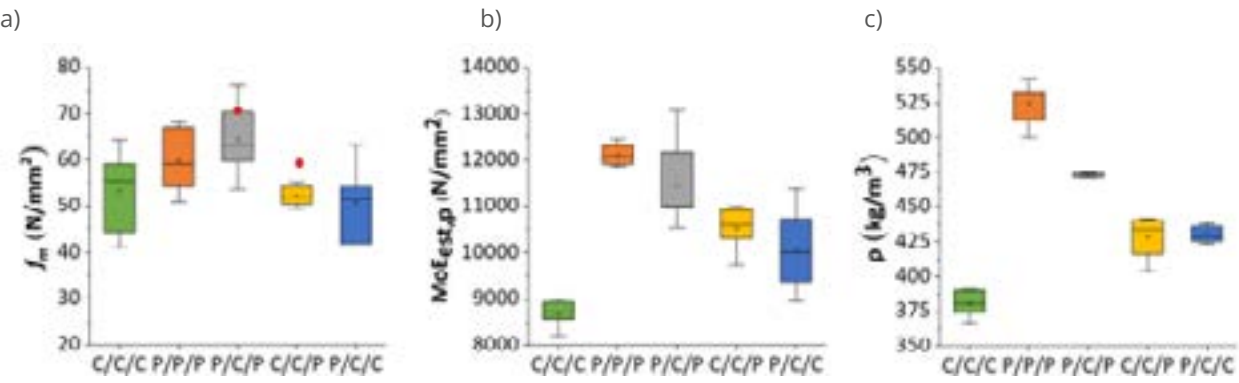


Figura 4. Propiedades a flexión de las configuraciones de CLT. a) Resistencia a flexión (f_m). b) Módulo de elasticidad estático ($MoEst,p$). c) Densidad (p).

Las curvas tensión–deformación (σ – ϵ) (Figura 5a) muestran un comportamiento lineal en todas las configuraciones, con menor pendiente y leve plasticidad en el panel C/C/C. Las configuraciones con pino en ambas caras (P/P/P y P/C/P) alcanzaron mayor módulo de elasticidad y presentaron rotura frágil. La configuración con dos tercios de chopo C/C/P, combinó un buen módulo de elasticidad con rotura más dúctil, gracias al pino en tracción y al comportamiento elasto-plástico del chopo en compresión. Los modos de fallo observados fueron principalmente por tracción en la lámina inferior, intensificados por la presencia de nudos (Figura 5b). En algunos casos (Figura 5c), la rotura avanzó entre capas, sin registrarse fallo por cortante de rodadura.



Figura 5. Comportamiento mecánico en ensayos de flexión de paneles CLT. a) Curvas σ – ϵ medias por configuración. b) Rotura por tracción en lámina con nudo. c) Rotura por esfuerzo cortante

Comparación entre ensayos dinámicos y estáticos

Las diferencias entre $MoE_{din,T1}$ y MoE_{est} fueron en promedio del 6,6%. En configuraciones monoespecie esta diferencia fue del 4%, mientras que en las configuraciones mixtas se observó mayor dispersión, alcanzando un 12,3% y un 11,6% en C/C/P y P/C/C, respectivamente. No obstante, se obtuvieron correlaciones elevadas ($R^2>0,74$), especialmente en paneles con mayor proporción de chopo.

Ensayos de delaminación

Todos los paneles cumplieron los requisitos establecidos en la UNE-EN 16351:2021, con valores de delaminación muy inferiores al límite del 10%. En las configuraciones P/P/P, se registraron valores promedio del 1,1%, mientras que los C/C/C mostraron un comportamiento aún más favorable, con valores medios del 0,6 %. Las configuraciones mixtas presentaron resultados intermedios, oscilando entre el 0,7% y el 1,4%, sin presencia de fallos cohesivos. Esto valida su uso en CLT estructural en Clase de Servicio 1.

Conclusiones

Las elevadas correlaciones entre $MoE_{din,Llam}$ y $MoE_{din,Lp}$ ($R^2>0,93$) validan la clasificación previa de las capas externas para predecir el comportamiento global del panel.

En los ensayos a flexión, la configuración P/C/P combinó alto $MoE_{est,p}$ y resistencia con menor densidad, siendo la

opción más eficiente donde se prioriza la ligereza. En cuanto a los ensayos de las configuraciones C/C/P y P/C/C, estas ofrecieron una resistencia similar a C/C/C, pero con mayor $MoE_{est,p}$, lo que confirma su idoneidad estructural con mayor proporción de chopo.

Todos los paneles cumplieron los requisitos de delaminación de la UNE-EN 16351:2021, validando el uso del chopo con adhesivo PUR en CLT (Clase de Servicio 1).

Referencias

(1) Schickhofer, G.; Brandner, R.; Bauer, H. *Introduction to CLT – Product Properties – Strength Classes*. 2016, 9–32.
(2) Gustafsson, A.; Bogström, E.; Fröbel, J. *CLT Handbook: Cross-Laminated Timber*. 2019.
(3) Wang, Z.; Fu, H.; Chui, Y.-H.; Gong, M. 2014 *World Conference on Timber Engineering* (WCTE 2014). 2014.
(4) Sharifi, J. *In-Plane Shear Modulus of Cross-Laminated Timber*. 2021.
(5) Serrano, E.; Danielsson, H. *Evaluation of Test Methods for CLT Shear Stiffness at Out-of-plane Loading*. 2023.
(6) *Non-destructive testing of wood* | PicoTech Library. 2009.

3. Empleo de bioadhesivo para la elaboración de madera microlaminada de chopo: cortante en línea de cola y flexión

Francisco J. Rescalvo^a, Carlos Cruz^a, Yaiza Fuentes-García^a, Louis Denaud^b, Rafael Bravo^a, Antolino Gallego^a
^aUIMA-UGR, Azucarera de San Isidro, Campus UGRSostenible, Granada. ^bLaBoMaP, Arts Et Metiers Institute of Technology, HESAM Université, 71250 Cluny, France.
rescalvo@ugr.es

Palabras clave: Bioadhesivo, lignina, cortante, flexión, LVL.

1. Introducción

Según Architecture2030.org [1], los edificios generan alrededor del 40% de las emisiones de gases de efecto invernadero. A diferencia del resto de materiales, la madera absorbe CO₂ para producir oxígeno, quedándose almacenado durante la vida útil del producto. A grandes rasgos, se diferencian dos grupos de productos de madera técnica: basados en madera aserrada y en chapa. Del primero se desarrollan productos como la madera laminada (GLT) o contralaminada (CLT). Del segundo, productos como la madera microlaminada (LVL).

El CLT ha permitido dar el salto en altura a la edificación con madera, pero con un crecimiento del 300% anual, ejerce presión sobre el recurso maderero. Por ello, el uso de especies de rápido crecimiento pueden permitir reducir dicha presión y valorizar esta madera. El LVL es un producto de alta resistencia con el mayor consumo de adhesivo para su elaboración (6% en peso frente al 3,5% de la madera laminada) [2]. Por ello, en este trabajo se estudia el uso de un bioadhesivo que sustituya el adhesivo químico empleado actualmente [3,4]. En concreto, un adhesivo desarrollado en colaboración con la empresa Betanzos HB, mezclando lignina de eucalipto y agua. En este trabajo se presentan los resultados de ensayos en línea de cola y flexión (plana y de canto).

2. Materiales y métodos

2.1 Madera, adhesivos y elaboración de probetas

Para el estudio se empleó madera de chopo del clon MC (Populus x euramericana (Dode) Guinier) de la Vega de Granada (sur de España). Tras la corta, la madera se desenrolló en chapas de 1300 x 2500 x 2,7 mm. Con la chapa se elaboraron paneles de 350 x 52 x 1400 mm (ancho x alto x largo) de los cuales se extrajeron las probetas para los ensayos de calidad de encolado y flexión (Figura 1). En total se elaboraron 8 paneles, 4 empleando el adhesivo tradicional de poliuretano (PUR) de la marca LOCTITE HB S709 PURBOND y 4 empleando el bioadhesivo en base lignina (LIG) suministrado por la empresa Betanzos HB. En el caso del adhesivo PUR, se aplicó según indicaciones del fabricante con un rendimiento de 180 kg/m². En el caso de la lignina, basándose en estudios previos del grupo de investigación UIMA, se aplicó con un rendimiento de 500 g/m² y una temperatura de aplicación del adhesivo de 30 °C. En ambos casos, se aseguró que el tiempo de curado fuera suficiente para que el contenido de humedad del panel fuera inferior al 16%.

Respecto de las probetas de calidad de encolado, siguiendo las indicaciones de la norma UNE-EN 14374:2005 [5], se mecanizaron con un ancho de 75 mm, una distancia libre de mordazas de 110 mm y una distancia efectiva entre ranuras de 25 mm, siendo la zona de evaluación la chapa central de la probeta. En el caso de las vigas a flexión, es necesario evaluar las diferentes propiedades mecánicas en dos direcciones de sección: viga plana o flatwise (FW-chapas horizontales) y viga de canto o edgewise (EW-chapas verticales). Se estableció una dimensión de viga de 52 x 52 mm² en sección y una longitud de 1040 mm. De cada panel se extrajeron 5 vigas, siendo ensayadas en FW o EW de forma alterna con el fin de evitar posibles efectos locales del panel en los resultados mecánicos.

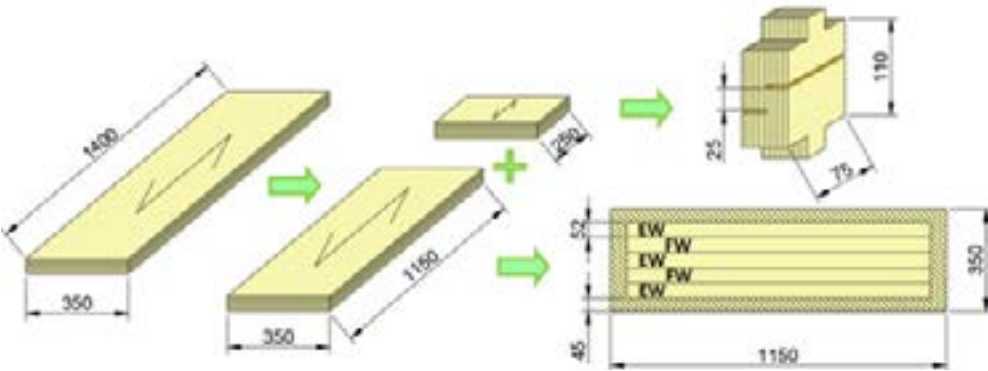


Figura 1. Proceso de elaboración de paneles de LVL y extracción de probetas para calidad de encolado y ensayo a flexión. Dimensiones en mm.

2.2 Ensayos de cortante en línea de cola y a flexión a 4 puntos

En ambos casos, los ensayos mecánicos se llevaron a cabo utilizando una máquina de ensayos universal del fabricante MICROTTEST®, modelo EM2/200, equipada con un actuador eléctrico con capacidad máxima de 200 kN. Para el ensayo de calidad del encolado (cortante en línea de cola), se emplearon las mordazas de tracción de MICROTTEST®, con un ancho máximo de agarre de 50 mm (Figura 2-a). El ensayo se realizó por control de posición con una velocidad de 30 mm/min (rotura según UNE-EN 314-1:2007 en 30 s). Se calculó la tensión máxima a cortante en la zona de evaluación (25 x 75 mm²).

En el caso de las vigas a flexión a 4 puntos, en primer lugar se realizaron ensayos no destructivos empleando el método de resonancia [6], obteniendo el módulo de elasticidad dinámico (MoEdin) y posteriormente ensayos a flexión a 4 puntos (Figura 2-b) según la norma UNE-EN 408:2011 [7] para obtener la tensión máxima de rotura y el módulo de elasticidad estático (MoE_{est}). El ensayo se llevó a cabo por control de posición con una velocidad de 9 mm/min.

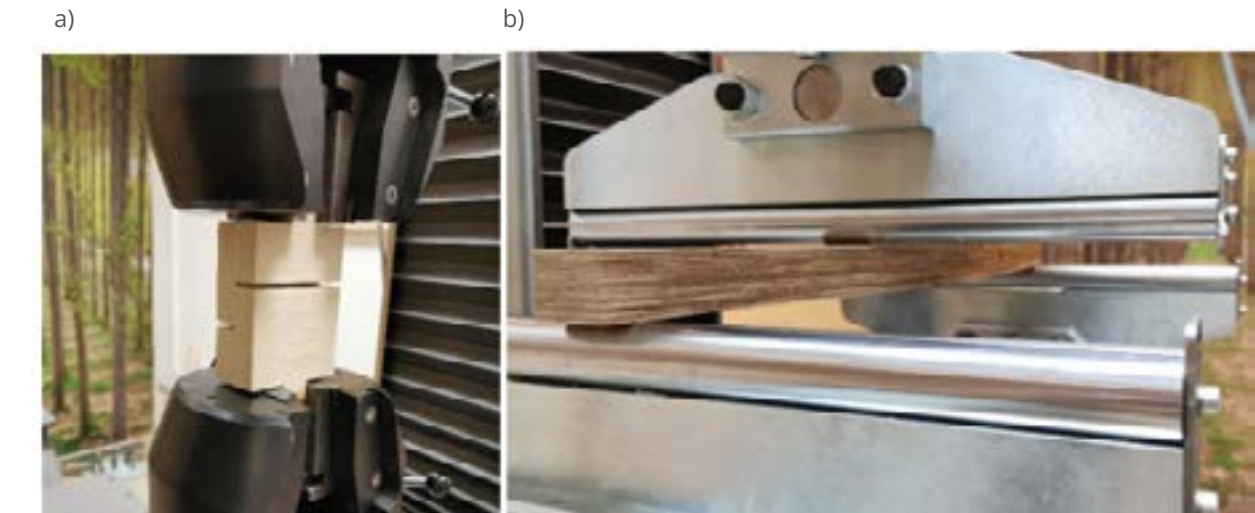


Figura 2. Imagen de ensayos en máquina multiensayos. a) Ensayo a cortante para calidad de encolado con adhesivo PUR. b) Ensayo a flexión a 4 puntos en posición plana o FW con bioadhesivo.

3. Resultados

3.1 Calidad del encolado

El adhesivo no ecológico tradicional de poliuretano presenta 2 fases en su comportamiento:

- Fase 1: Comportamiento lineal hasta un valor medio de 3,2±0,3 MPa, dónde se inicia una elevada deformación a cortante en el plano de cola.
- Fase 2: Rotura de la madera a un valor medio de 5,0±0,7 MPa.

Por otro lado, la lignina presenta únicamente una Fase 1, alcanzando un valor de resistencia de 3,0±0,4 MPa (similar al adhesivo tradicional) pero fallando por adhesivo o con un bajo % de rotura de madera (Figura 3). Esto indica que la lignina tiene buenas propiedades adherentes, aunque no alcanza la tensión de rotura a cortante del chopo [8].

a)



b)



Figura 3. Fallo típico adherente de cada tipo de adhesivo. a) PUR. b) Bioadhesivo (LIG).

3.2 Comportamiento a flexión

La Tabla 1 presenta los valores promedio y desviación estándar de las diferentes propiedades obtenidas. En este caso y según los resultados previos, se aseguró que el contenido de humedad de la línea de cola se encontrara por debajo del 18%. La Figura 4 muestra la relación carga-desplazamiento para los distintos casos.

Nomenclatura	Humedad [%]	Tensión máx. [Mpa]	MoE _{din} [Mpa]	MoE _{est} [Mpa]
PUR-FW	8±3	68±6	9562±218	9506±617
LIG-FW	14±3	40±7	11345±350	10369±455
PUR-EW	9±2	69±5	9551±300	9635±494
LIG-EW	11±3	56±8	10879±485	9868±787

Tabla 1. Nomenclatura y principales propiedades obtenidas. Valores promedio ± desviación estándar.

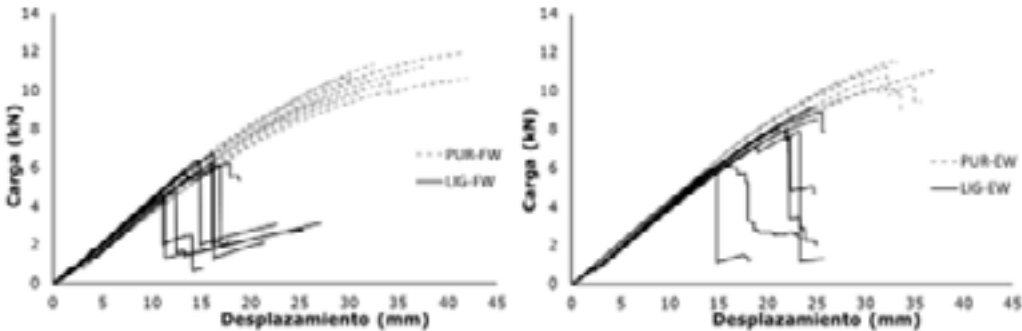


Figura 4. Relación carga-desplazamiento de LVL a flexión a 4 puntos. a) Plana o Flatwise. b) Canto o Edgewise. PUR: Poliuretano. LIG: Lignina

Como se observa en la Figura 4 y Tabla 1, en general las vigas elaboradas con lignina obtienen menor resistencia a flexión que las elaboradas con adhesivo PUR, en línea con lo observado en ensayos similares con adhesivos lignocelulósicos [9]. Este efecto se acentúa en la posición plana o FW, con un descenso de la resistencia de un 41%, debido a que el cortante en la línea neutra es más crítico. Como se observó en el ensayo de calidad del encolado, la lignina no alcanza la Fase 2 a cortante. Al colocar la viga de canto, esta reducción de la resistencia es del 19%, produciéndose una adecuada rotura por madera a tracción. Respecto de la rigidez, se observan buenas correlaciones entre los módulos elásticos dinámicos (no destructivo) y estáticos (destructivo), con variaciones por debajo del 10%. Comparando ambos adhesivos, estadísticamente no se presentan diferencias en cuanto a su módulo de elasticidad más allá de la variación propia de la madera.

Observando el comportamiento mecánico (Figura 4), cabe destacar que las vigas elaboradas con lignina, aún con menor resistencia, presentan un comportamiento de fallo dúctil frente a la rotura frágil que se observa en las vigas PUR. Este fallo se observa en que la rotura no se produce de forma súbita, sino que el fallo se produce de forma escalonada. Tras dichos escalones las vigas con lignina presentan un tramo con resistencia consante en torno a

5 mm de media, aspecto importante en términos de seguridad

4. Conclusiones

Se concluye que el bioadhesivo en base lignina representa una alternativa viable y más sostenible al adhesivo PUR para aplicaciones no estructurales o con demandas moderadas, siendo especialmente relevante en el contexto actual de descarbonización y economía circular en el sector de la construcción con madera. La solución al problema de la polaridad de la lignina podría hacer que esta mejorara en términos de adherencia y por ende, en términos de comportamiento a flexión.

En los ensayos de calidad del encolado, la lignina presentó una única fase de deformación, con rotura mayoritariamente en el plano adhesivo. Esto indica una buena capacidad de adherencia, aunque su resistencia última a cortante es inferior a la del substrato lignocelulósico, lo que limita su desempeño en situaciones críticas de esfuerzo transversal.

En los ensayos a flexión a cuatro puntos, las vigas elaboradas con bioadhesivo en base lignina mostraron reducciones de resistencia mecánica respecto al PUR siendo esta última menos sensible por la distribución del esfuerzo de cortante fuera de la línea neutra. Sin embargo, el comportamiento mecánico de las vigas con lignina mostró un fallo progresivo y dúctil, en contraste con la rotura frágil observada en las vigas PUR, lo que podría suponer una ventaja en aplicaciones donde se priorice la seguridad estructural frente a fallos abruptos.

Referencias

(1) <https://www.architecture2030.org/old-why-the-built-environment/>. Último acceso: 09/09/2025

(2) Hemmilä V.; Adamopoulos, S.; Karlsson, O.; Kumar A. *Development of sustainable bio adhesives for engineered wood panels* – A review. RSC Adv. 2017, 7, 385–433. Doi: 10.1039/C7RA06598A

(3) Winandy, J.E.; Morrell J.J. *Improving the utility, performance, and durability of wood and bio based composites*. Ann. For. Sci. 2017, 74, 29. Doi: 10.1007/s13595-017-0625-2

(4) Hass, P.; Wittel, F.K.; Mendoza, M.; Herrmann, H.J.; Niemz, P. *Adhesive penetration in beech wood Part I: Experiments*. Wood Sci. and Tech. 2012, 46, 243-256. Doi: 10.1007/s00226-011-0410-6

(5) UNE-EN 14374:2005. *Estructuras de madera. Madera microlaminada (LVL)*. Requisitos. AENOR

(6) Rescalvo, F.J.; Duriot, R.; Pot, G.; Gallego, A.; Denaud, L. *Enhancement of bending properties of Douglas-fir and poplar laminate veneer lumber (LVL) beams with carbon and basalt fibers reinforcement*. Constr. Build. Mater. 2020, 254, 120185. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120185

(7) UNE-EN 408:2011. *Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas*. AENOR

4. Efecto del contenido de humedad en la resistencia mecánica de la especie de bambú *Guadua Angustifolia* Kunth

Kenneth Ayala^a, Carlos Osuna-Sequera^b, Eva Hermoso^b
^aUniversidad Católica de Santa María, Arequipa-Perú. ^bICIFOR-INIA, CSIC, Madrid-España.
carlos.osuna@inia.csic.es

Palabras clave: bambú, contenido de humedad, resistencia compresión, secado, pentaborato.

Resumen

El objeto del presente estudio es analizar el efecto del contenido de humedad en las propiedades mecánicas de compresión axial de la especie de bambú *Guadua angustifolia* Kunth, que aun siendo ampliamente cultivada en Perú existe una escasez en su caracterización. Se prepararon muestras bajo cuatro condiciones: estado verde, impregnadas con pentaborato, secas al aire y secas mediante un protocolo de secado artificial. Los resultados muestran diferencias significativas en la resistencia a compresión con valores que oscilan entre 19,84 N·mm⁻² (verde) y 47,14 N·mm⁻² (seco).

1. Introducción

Perú ocupa el noveno lugar mundial en extensión de recursos forestales y el segundo en América Latina; sin embargo, el sector forestal representa solo el 1 % del PIB nacional (7). Esta paradoja se agrava por la deforestación (estimada en 260.000 hectáreas anuales) con impactos significativos sobre la biodiversidad y las emisiones de gases de efecto invernadero (8).

En respuesta, el Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, a través del Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR), ha priorizado el aprovechamiento sostenible del bambú, en particular de la especie *Guadua angustifolia* Kunth, mediante Programas de Desarrollo Forestal Sostenible y manuales técnicos. No obstante, mientras existen estudios sobre el secado del bambú y caracterización mecánica de otras especies del género (*G. lynnclarkiae*, *G. weberbaueri*, *G. superba*), la *G. angustifolia* Kunth aún carece de protocolos técnicos, especialmente en lo referente al secado artificial y su impacto estructural (6).

Asimismo, el “Manual de manejo integral del bambú” (8) reconoce la ausencia de métodos aplicados de secado artificial en Perú, señalando como reto su implementación para la industrialización y exportación del material. Por otro lado, los programas nacionales de secado de madera tampoco contemplan especies nativas, limitando su aplicabilidad directa al bambú peruano (1).

A nivel internacional, el interés por el bambú crece por ser una especie de crecimiento rápido, económico y sostenible. Por ejemplo, en Europa, principal importador global, se ha demostrado el potencial del bambú como recurso económico y ambiental (3-4).

Este contexto evidencia la necesidad de generar conocimiento técnico sobre el comportamiento del bambú bajo distintos métodos de secado. Por ello, el objetivo del presente trabajo es encontrar evidencias empíricas sobre la influencia del contenido de humedad en la resistencia a compresión axial de *G. angustifolia* Kunth, contribuyendo al desarrollo de criterios de clasificación estructural para su uso industrial.

2. Materiales y métodos

El estudio se realizó en el Laboratorio de Productos de Madera para la Construcción del ICIFOR-INIA, CSIC. El material de ensayo consistió en culmos maduros de 4 años de *G. angustifolia* Kunth procedentes de plantaciones en Mocupe (Chiclayo, Perú), seleccionados por su homogeneidad en diámetro, longitud y ausencia de defectos visibles. Las probetas se seccionaron longitudinalmente conforme a los requisitos dimensionales de la norma ISO 22157:2019 para ensayos mecánicos en bambú.

Se establecieron cuatro tratamientos con 12 probetas para cada uno: (1) ECN: estado verde, contenido de humedad (CH) > 30 %; (2) ECP: impregnadas con pentaborato sódico; (3) ECNN: secadas al aire hasta equilibrio higroscópico ambiental; y (4) ECS: secadas en estufa hasta CH < 10 % mediante protocolo controlado. Las probetas se identificaron y acondicionaron durante 72 h en cámara climática bajo condiciones controladas de temperatura ($27 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$) y humedad relativa ($70 \pm 5\text{ }\%$) antes del ensayo para estandarizar el CH y evitar sesgos en las propiedades mecánicas.

Se registraron dimensiones (diámetros ortogonales), peso y volumen para calcular la densidad aparente, y el contenido de humedad se determinó mediante secado en estufa (UNE-EN 13183-1, $103 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 24 h). Los ensayos de compresión axial se realizaron en una máquina universal, aplicando la carga de forma continua hasta la rotura. Se registraron los esfuerzos de compresión y los datos de deformación, y los resultados se analizaron estadísticamente mediante un análisis de la varianza para identificar diferencias significativas entre tratamientos. Adicionalmente, se observó una variación en el diámetro promedio de las probetas entre diferentes tratamientos (de 92 mm en ECNN a 96 mm en ECN y ECP), reflejando los efectos del secado o impregnación.

Los equipos utilizados incluyeron: máquina de ensayo universal, estufa de secado, cámara climática HPPeco (Memmert), balanzas de alta resolución, indicadores digitales de precisión (Mitutoyo) y xilohigrómetro capacitivo HT 85 T.

3. Resultados y discusión

Los resultados referentes al contenido de humedad (CH) mostraron que las muestras saturadas tenían un promedio del 54,80 % de CH significativamente superior al de las otras condiciones. Esta elevada humedad, consecuencia de la absorción rápida de agua en un entorno de inmersión de 24 h, evidencia la alta higroscopicidad del material, que debe considerarse en aplicaciones estructurales expuestas a ambientes húmedos. En contraste, las muestras impregnadas con pentaborato, secadas al aire, presentaron un CH promedio de 12,86 %, mientras que las secadas mediante protocolo de secado artificial alcanzaron un promedio del 8,20 %, valores que se consideran óptimos para usos industriales y constructivos.

Respecto a la densidad, las muestras en estado verde presentaron el valor más elevado ($881,63\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), atribuible al incremento de masa por saturación sin una expansión proporcional del volumen. Las impregnadas con pentaborato alcanzaron una densidad media de $691,09\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, efecto de la incorporación del compuesto en la matriz del bambú. Las secas por protocolo de secado artificial obtuvieron la menor densidad ($567,97\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), lo que puede asociarse a la pérdida significativa de agua libre, mejorando la estabilidad dimensional y facilitando su transformación industrial.

Los ensayos de compresión axial evidencian la influencia del tratamiento en el comportamiento mecánico. La

resistencia máxima de compresión fue menor en las muestras verdes (19,84 N·mm⁻²), confirmando el esperado debilitamiento estructural inducido por el exceso de humedad, el cual favorece la deformación plástica del material bajo carga. En contraste, las muestras tratadas con pentaborato alcanzaron una media de 42,20 N·mm⁻², mientras que las muestras sin tratamiento obtuvieron 40,15 N·mm⁻². Las muestras secadas por protocolo de secado artificial destacaron con un promedio de 47,14 N·mm⁻², demostrando que el secado controlado es una estrategia eficaz para optimizar la resistencia mecánica del bambú.

Se comprobó que reducir el contenido de humedad (CH) mejora la resistencia mecánica, tanto según la literatura científica como mediante ensayos de laboratorio. Las muestras secas por protocolo controlado incrementaron su resistencia a compresión paralela a la fibra un 11,71 % respecto a las impregnadas con pentaborato, un 17,41 % respecto a las secadas al aire y un 137,63 % respecto a las muestras en estado verde. El secado resultó ser el tratamiento más eficaz, aunque tanto la impregnación como el secado muestran potencial como técnicas de acondicionamiento del bambú para uso estructural. En la Figura 1 se muestra la relación entre la resistencia a compresión y el contenido de humedad, así como la media por tratamiento.

En los ensayos de compresión, considerando el cambio de longitud y la longitud inicial (Lo), las probetas verdes (ECN) mostraron 5 % de deformación; las impregnadas (ECP) y secadas al aire (ECNN), 4 %; y las secadas por protocolo (ECS), 3 %. La deformación de las verdes fue más elástica (reversible), mientras que en las demás fue más plástica (permanente). Así, las ECS presentan mayor rigidez y, por tanto, mejor capacidad estructural y prestaciones mecánicas para aplicaciones constructivas o industriales. Los resultados del análisis ANOVA, exceptuando el tratamiento ECN por la gran diferencia de CH, resultaron tener unos valores de F = 2,07 y p = 0,142, por lo que no hubo diferencias estadísticas significativas entre ellos (p-valor ≥ 0,05).

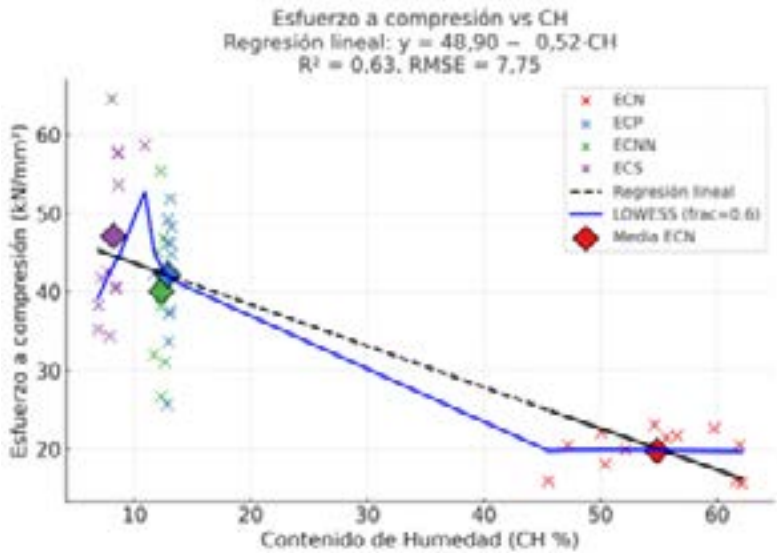


Figura 1. Relación entre el contenido de humedad y el esfuerzo a compresión del bambú según tratamiento

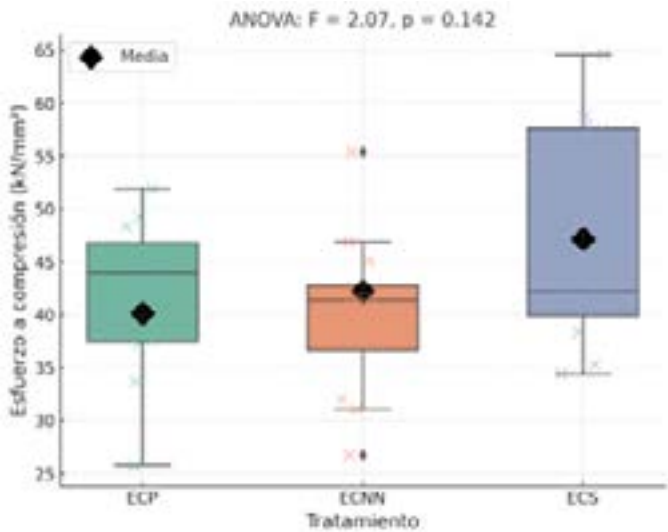


Figura 2. Comparación del esfuerzo a compresión por tratamiento (ANOVA, $p = 0,142$)

El uso de tratamientos adecuados, como el secado controlado, permite no solo mejorar las propiedades físicas y mecánicas, sino también aumentar la durabilidad y predictibilidad del comportamiento del material en obra. Como conclusión, la *G. angustifolia* Kunth muestra un rendimiento mecánico altamente dependiente de su estado higroscópico. Las técnicas de secado y tratamiento influyen directamente a su densidad y resistencia a la compresión, aspectos clave para su estandarización como material estructural sostenible.

4. Conclusiones

El contenido de humedad influye de forma decisiva en las propiedades físicas y mecánicas del bambú *G. angustifolia* Kunth, afectando su densidad, estabilidad y resistencia. Las muestras en estado verde (CH = 54,8 %) presentan el menor desempeño (19,84 N·mm⁻²) y mayor deformación (5 %), con un comportamiento más elástico y baja rigidez por efecto de la plasticidad inducida por el agua. Las impregnadas con pentaborato logran resistencia intermedia (42,20 N·mm⁻²) y deformación del 4 %, mejorando su cohesión interna sin grandes cambios volumétricos. Las secadas al aire muestran valores similares (40,15 N·mm⁻²; 4 % de deformación), lo que confirma que la reducción del CH eleva notablemente la capacidad portante.

El mayor esfuerzo a compresión (47,14 N·mm⁻²) y menor deformación (3%) se obtuvo en las muestras secadas mediante protocolo controlado (CH ~8 %), que además presentan mayor rigidez y estabilidad dimensional, optimizando su comportamiento estructural. El secado técnico es el tratamiento más eficaz para mejorar las prestaciones mecánicas del bambú, por lo que la estandarización de protocolos de secado resulta clave para su uso seguro en aplicaciones industriales y estructurales, especialmente en regiones tropicales con alta variabilidad higroscópica.

5. Bibliografía

(1) CITE Madera. Técnicas de secado de la madera. Lima: Centro de Innovación Tecnológico de la Madera (CITEmadera); 2009. 65 p.

(2) Gauss C, Savastano H, Harries KA. Use of ISO 22157 mechanical test methods and the characterisation of Brazilian *P. edulis* bamboo. Constr Build Mater. 2019;228:116728. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.116728>

(3) International Bamboo and Rattan Organisation. Trade overview 2017: Bamboo and rattan commodities in the international market. Beijing: INBAR; 2019. Available from: https://www.inbar.int/resources/inbar_publications/trade-overview-2017-bamboo-and-rattan-commodities-in-the-international-market/

(4) Molari L, García JJ. On the radial variation of the transverse mechanical properties of bamboo. J Build Eng. 2021;33:101557. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2020.101557>

(5) Pra A, Masiero M, Barreiro S, Tomé M, Martinez De Arano I, Orradre G, et al. Forest plantations in Southwestern Europe: A comparative trend analysis on investment returns, markets and policies. For Policy Econ. 2019;109:102000. <https://doi.org/10.1016/J.FORPOL.2019.102000>

(6) Rodríguez K, Rodríguez J, García D, Guerra W, Rodríguez C, Del Castillo D, et al. Secado de tablillas de bambú nativo en la Amazonía Peruana. Iquitos: Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana – IIAP; 2022. 37 p.

(7) SERFOR. Estrategia Nacional para el Desarrollo del Bambú (PROBAMBÚ) 2022-2025. Lima: Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre; 2022. 118 p. Available from: <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/3930542/Estrategia%20Nacional%20para%20el%20Desarrollo%20del%20Bambú%20%28PROBAMBÚ%29%202022-2025.pdf.pdf?v=1670958924>

(8) SERFOR. Manual de manejo integral del bambú (*Guadua angustifolia* Kunth): Experiencias en la región Amazonas. Lima: SERFOR; 2021. 100 p. Available from: <https://repositorio.serfor.gob.pe/handle/SERFOR/919>

(9) Singnar P, Das MC, Sileshi GW, Brahma B, Nath AJ, Das AK. Allometric scaling, biomass accumulation and carbon stocks in different aged stands of thin-walled bamboos *Schizostachyum dullooa*, *Pseudostachyum polymorphum* and *Melocanna baccifera*. For Ecol Manag. 2017;395:81–91. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2017.04.001>

5. Centro de visitantes del Parque Nacional Sierra de las Nieves: Análisis comparativo de materiales

Santiago Matute Díez^a, María Romero Cuberos^b
^aArquitecto. Agencia de Medio Ambiente y Agua de Andalucía. santiago.matute@juntadeandalucia.es. ^bIngeniera de Montes. Agencia de Medio Ambiente y Agua de Andalucía. maria.romero.cuberos@juntadeandalucia.es

Palabras clave: Materiales, Huella de Carbono, Descarbonización, Ciclo de Vida.

1. Resumen

El sector de la construcción genera el 40% de las emisiones de gases de efecto invernadero, por lo que su transformación es clave para combatir el cambio climático. El Centro de Visitantes del Parque Nacional Sierra de las Nieves ha sido diseñado con criterios de funcionalidad, integración ambiental y uso de materiales renovables. Según el cálculo de su huella de carbono, estos materiales presentan un balance de emisiones negativo frente a los convencionales, como el acero y el hormigón. Los resultados refuerzan el compromiso de la administración andaluza con una construcción más sostenible.

2. Nuevo Centro de Visitantes

El Centro de Visitantes del Parque Nacional Sierra de las Nieves ha sido promovido por la Consejería de Sostenibilidad y Medio Ambiente de la Junta de Andalucía. La tipología del edificio se inspira en el carácter del parque, cuyos picos conservaban neveros todo el año, desde donde se distribuía nieve por Málaga en verano. Su forma hexagonal imita un copo de nieve, con un núcleo central y seis radios, reflejando un patrón natural que también aparece en el pinsapo, abeto andaluz emblemático del parque.



Figura 1. Sección 3D longitudinal. Fuente: Elaboración propia

El diseño del edificio incorpora criterios funcionales, formales y bioclimáticos para garantizar el confort natural en ventilación, iluminación y soleamiento. Se han considerado la utilidad, flexibilidad, eficiencia y los valores etnográficos del entorno. Ha obtenido la máxima calificación energética para reducir su huella ambiental durante su vida útil. Muchos elementos pueden desmontarse, permitiendo nuevos usos y reduciendo los residuos de construcción y demolición, estimados en 2 T/hab*año en España. El enfoque bioclimático y el contexto influyen en la imagen del edificio, su envolvente y prestaciones.

El edificio cuenta con un atrio central cuyo suelo es el terreno natural, integrando el entorno dentro del núcleo y organizando el espacio. Este atrio será transitable y adaptable a distintos usos según los visitantes. Los seis radios del edificio (Figura 2) contienen espacios trapezoidales, cada uno con una altura distinta, generando un juego de volúmenes que suaviza la axialidad y evoca la arquitectura vernácula local. (Figura 3).

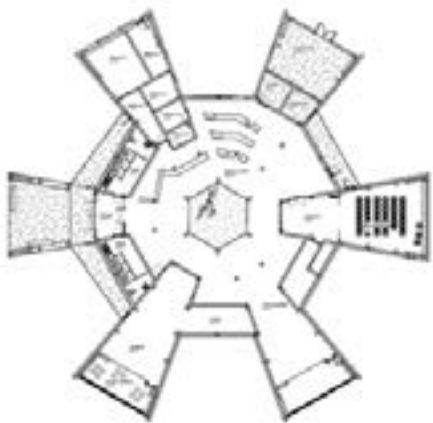


Figura 2. Planta del edificio. Fuente: Elaboración propia

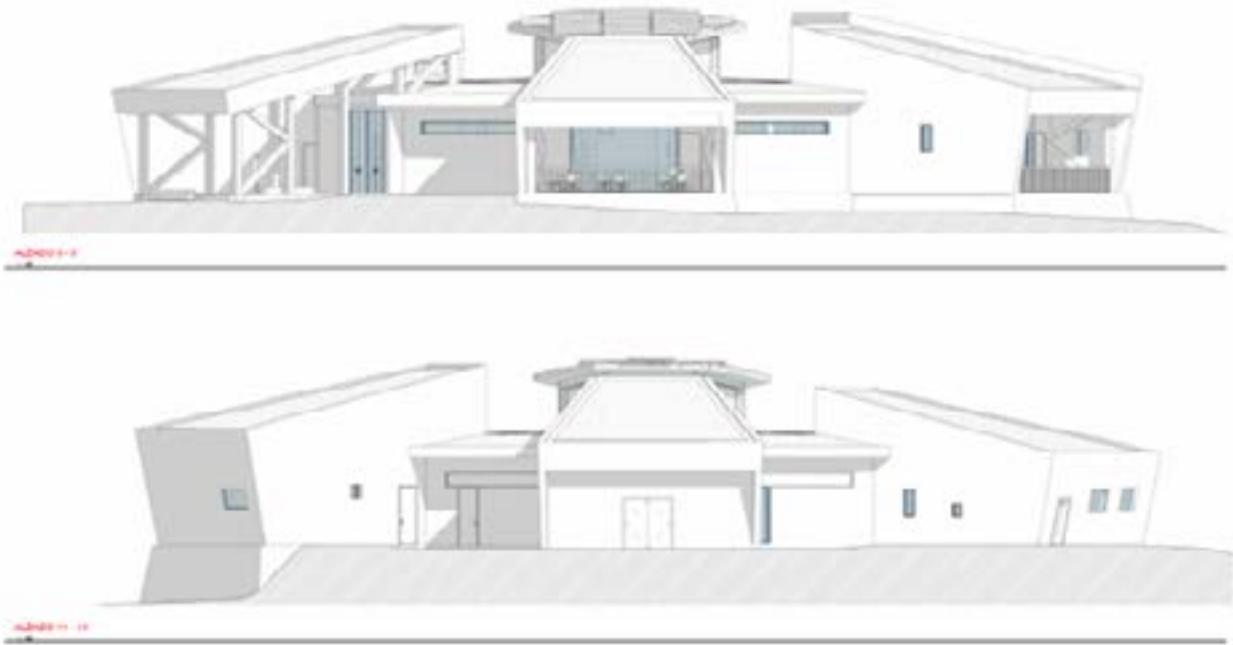


Figura 3. Alzado Sur 8-8' y Alzado Norte 11-11'.Fuente: Elaboración propia

Desde el punto de vista constructivo, la estructura, cerramientos y particiones están hechos principalmente de madera. La cubierta se compone de paneles CLT de 15 cm que sostienen una cubierta verde. Se han utilizado materiales naturales como corcho y fibras de cáñamo para el aislamiento, promoviendo la sostenibilidad y la integración con el entorno. La selección de materiales considera su impacto ambiental, naturaleza renovable y desempeño a lo largo de la vida útil. Se optimizan las propiedades bioclimáticas de la madera, corcho, cáñamo y cal tradicional para minimizar la huella ambiental sin comprometer el diseño y carácter del edificio. (Figura 4).

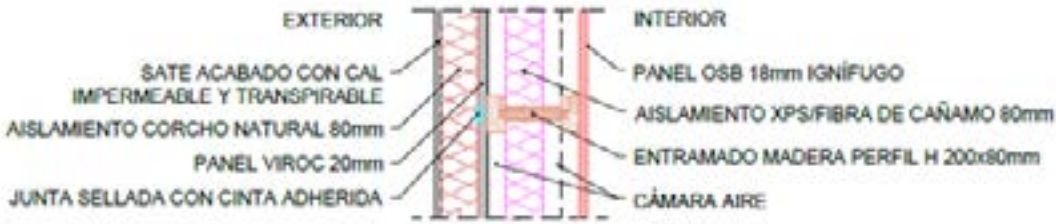


Figura 4. Sección constructiva por fachada

3. Objetivo: descarbonización

La huella ambiental es el principal criterio técnico que respalda la apuesta actual de la administración andaluza por la madera, y actúa como palanca para impulsar las políticas que fomentan de manera creciente el uso de este material en la edificación. El objetivo de este análisis es evaluar la huella ambiental del centro de visitantes del Parque Nacional Sierra de las Nieves, que se basa en madera estructural, y cuantificar la reducción de dicha huella en comparación con la que tendría el mismo edificio si se hubiera construido con materiales convencionales y no renovables, como el acero o el hormigón.

4. Metodología del análisis comparativo

El objetivo es comparar el modelo actual con dos alternativas convencionales del mismo edificio: una con estructura de acero y otra con hormigón (Figura 5). Partiendo del Modelo Madera, se modifican en Cype 3D-2022.e para que los edificios sean viables y cumplan requisitos técnicos. Se obtiene el despiece volumétrico de materiales para cada modelo. Los cerramientos y particiones de madera se sustituyen por soluciones convencionales, como cerámicos y plásticos. Cada modelo genera una lista detallada de materiales y mediciones. Los modelos convencionales mantienen la morfología, dimensiones, instalaciones, prestaciones, eficiencia energética, confort y tipología estructural con grandes luces y forjados inclinados, igual que el original.

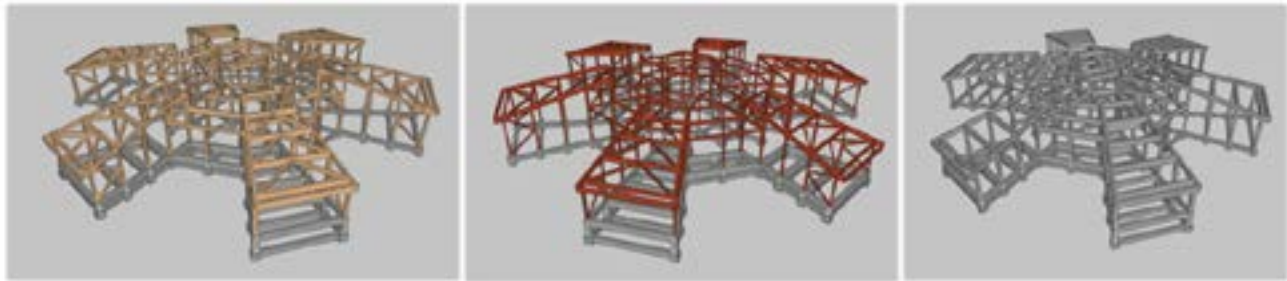


Figura 5. Imágenes 3D de las tres estructuras. Fuente: Elaboración propia

El Modelo Madera corresponde al diseño real del centro de visitantes del Parque Nacional Sierra de las Nieves, basado en madera estructural, combinado con sistemas de entramado y paneles de madera en los cerramientos, además de aislamientos de corcho y fibras vegetales. Estos materiales ayudan a reducir el impacto ambiental, actuando como sumideros de carbono y compensando las emisiones de otros materiales. La estructura de madera pesará 93 T, y el forjado sanitario, en hormigón, 287 T, solución replicada en los modelos convencionales. El forjado de la cubierta será totalmente de madera, con un peso de 91 T.

El Modelo Acero se basa en una estructura de acero, como elemento principal y en soluciones constructivas secundarias a base de subestructuras metálicas, cerramiento de bloques cerámicos y aislamiento industrial convencional. La estructura metálica tendría un peso total de 118 T. El forjado sanitario y el forjado de cubierta serían unidireccionales de hormigón armado con bovedillas. En el modelo acero las viguetas serían IPE 140. Como en el modelo de madera, el forjado sanitario tendría un peso de 287 T, el de la cubierta sería mucho más pesado, alcanzando 285 T.

El Modelo Hormigón se fundamenta en una estructura de pilares y vigas de hormigón armado. Como en el caso anterior, las soluciones constructivas complementarias se basarían en materiales cerámicos y aislamientos industriales, de uso común en la actualidad. La estructura de hormigón armado ascendería a 711 T, un peso mucho mayor que los modelos anteriores. El forjado sanitario sería el mismo que en los modelos anteriores, con un peso de 287 T, pero en el forjado de cubierta sería reticular de 40 cm de canto de hormigón armado por lo que ascendería a 634 T.

5. Análisis del Ciclo de Vida de los materiales

Para conocer la huella de carbono de los materiales se utiliza el Análisis del Ciclo de Vida, avalado por la ISO 14025. Este evalúa la carga ambiental de un producto o proceso, identificando y cuantificando el uso de materiales, energía, emisiones y vertidos. Además, permite diferenciar la huella de carbono en las distintas fases de vida del material.

El Análisis del Ciclo de Vida, normalizado por la ISO 14025, se publica para cada material en la Declaración Ambiental del Producto (DAP), que ofrece información verificable sobre su desempeño ambiental. La huella de carbono se mide en equivalente de CO₂ (CO₂eq), que representa la masa de gases de efecto invernadero emitidos. Este parámetro, conocido como GWP (Global Warming Potential), se expresa en kg de CO₂eq y es uno de los principales indicadores incluidos en la DAP de cada producto.

Teniendo en cuenta que la producción de madera requiere la fijación de carbono (biogénico), todos los materiales analizados derivados de ella, incluso el cemento-madera, tienen un balance negativo. Lo mismo ocurre con otros de origen vegetal como el corcho o las fibras de cáñamo.

Este proceso nos da como resultado las emisiones sería por unidad (kg CO₂ equiv/m³).

Tablero OSB=-753,00. Madera laminada y contralaminada=-685,35. SATE corcho=-198,00. Fibra de cáñamo=-68,10. XPS=48,67. Hormigón HA30=267,00. Termoarcilla 24=542,80. Acero laminado=4.749,60.

6. Resultados

El Modelo Hormigón es el más pesado y con mayor impacto ambiental en emisiones de GWP, mientras que el Modelo Madera es el más ligero. Aunque incluye materiales contaminantes, estos se compensan con madera y materiales naturales renovables, reduciendo su huella global. Por unidad de volumen, el acero genera más emisiones, seguido de materiales cerámicos, hormigón y poliestireno (XPS). Sin embargo, es importante considerar no solo el impacto por volumen, sino también la cantidad total de cada material en el edificio.

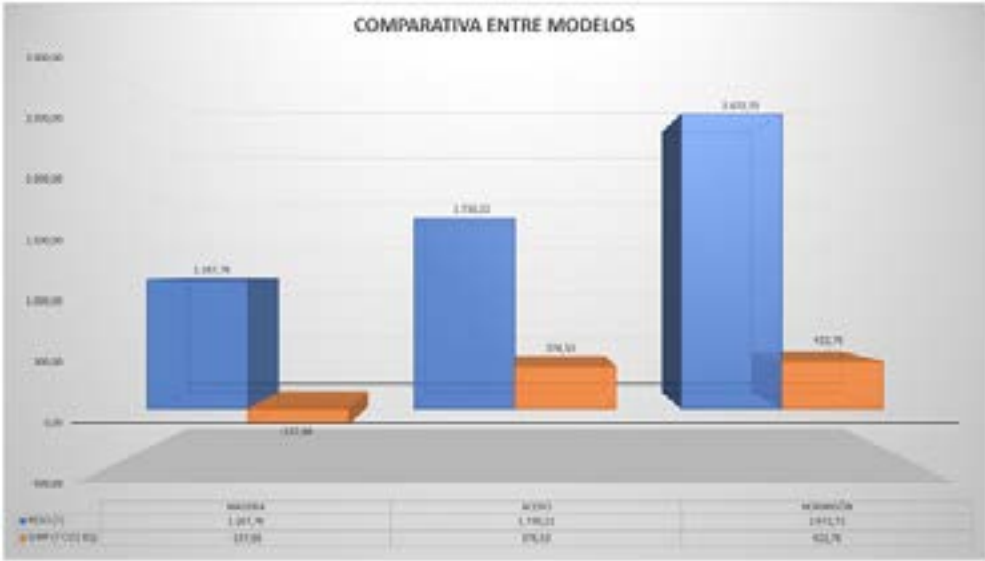


Figura 6. Comparativa entre modelos. Fuente: Elaboración propia

En la comparación de edificios viables, el Modelo Hormigón necesita más material, por lo que es más contaminante en términos globales. Aunque la producción de acero es más contaminante por unidad, el volumen de hormigón usado es mucho mayor. Por ello, el Modelo Hormigón resulta más contaminante que el Modelo Acero a nivel total de edificación (Figura 6).

7. Conclusiones

En cuanto a la metodología, por homogeneidad, objetividad de los parámetros utilizados y delimitación del alcance, su aplicación es válida para la comparación de los modelos.

De los modelos evaluados, el Modelo Hormigón es el más pesado y consume mayor volumen de materiales no renovables, con la mayor huella de carbono. El Modelo Acero es menos pesado pero tiene una huella similar debido a su alta energía en producción. El Modelo Madera es el más ligero y con menor consumo energético, con huella negativa por usar materiales naturales que compensan emisiones.

6. Optimización de vigas laminadas mixtas aplicando la simulación numérica

Carlos Cruz^a, Yaiza Fuentes-García^a, Francisco J. Rescalvo^a, Rafael Bravo^a, Antolino Gallego^a
^a UIMA-UGR, Azucarera de San Isidro, Campus UGRSostenible, Granada.
carlos.cruz@ugr.es

Palabras clave: Madera laminada encolada, optimización, simulación numérica, vigas laminadas multiespecie.

1. Introducción

El creciente uso de la madera como material estructural sostenible, con tasas de crecimiento anual cercanas al 300 % en el sector de la construcción, plantea la necesidad de desarrollar estrategias que optimicen el aprovechamiento de los recursos forestales.

Una de las líneas de trabajo más prometedoras es la fabricación de elementos estructurales multiespecie, en los que se combinan maderas con propiedades complementarias para mejorar el rendimiento global del producto [1]. En este contexto, el presente trabajo propone una metodología experimental y numérica para el diseño, análisis y caracterización de madera laminada encolada con la mezcla de 2 especies de frondosas: Eucalipto Globulus (EG), procedente de Galicia, y chopo MC (MC), cultivado en la Vega de Granada. El EG, por su elevada rigidez y resistencia, se emplea en las capas externas de la sección transversal, mientras que el chopo, de baja densidad, se utiliza en el núcleo, reduciendo el peso propio sin comprometer la capacidad resistente del conjunto [2][3].

2. Metodología

2.1 Caracterización en tabla y fabricación de viga laminada

Se realizaron ensayos no destructivos (END) y en máquina a flexión para determinar las propiedades mecánicas fundamentales de ambas especies en tabla. En concreto se realizaron END mediante el método de resonancia longitudinal y transversal ($MoE_{din,l}$ y $MoE_{din,t}$ respectivamente) como se observa en la Fig.1 [4]. Posteriormente, se llevaron a cabo ensayos estáticos en rango elástico de flexión a 4 puntos, obteniendo el módulo de elasticidad estático global MoE_{est} (Fig.1-c). Como era de esperar el EG obtuvo módulos de elasticidad superiores al MC en un 58%, con un $MoE_{din,l}$ de 21944 ± 551 y 9313 ± 212 MPa, respectivamente. En el apartado estático, esta diferencia fue del 55% comparando EG con MC, con un MoE_{est} promedio de 19556 ± 787 y 8942 ± 230 MPa respectivamente.



Figura 1. Ensayos mecánicos realizados: a) Ensayo NDT de resonancia longitudinal b) Ensayo NDT de resonancia transversal c) Ensayo de flexión a cuatro puntos.

Una vez caracterizadas las tablas, se fabricaron vigas laminadas de sección $75 \times 150 \text{ mm}^2$ y 3000 mm de largo, compuestas por 6 láminas con 15 mm de espesor cada una. La unión dentada de 15 mm de longitud y 4 mm de paso de diente, según [5]. Se usó adhesivo de poliuretano Loctite HB S709 PURBOND, aplicando 10 N/mm^2 en las uniones dentadas y 1 N/mm^2 en el encolado entre láminas [5]. Se elaboraron 30 vigas en total, siendo las 20 primeras mono especie de control, 10 vigas de eucalipto globulus y 10 vigas de chopo MC (EG_C y MC_C , respectivamente). Además, se fabricaron 10 vigas mixtas (EG_MC_C , EG_MC_O) siendo 5 de control y otras 5 optimizadas. En el caso de las optimizadas, se realizó una selección de tablas de EG (según Apartado 2.3). Los ensayos a flexión a cuatro puntos conforme a [6], permitieron determinar el MoE_{est} , rigidez elástica referente a $1/3$ de la carga máxima y la rigidez máxima referente a la carga máxima ($K_{1/3}$ y K_{qu} , respectivamente) comparando así la ductilidad y capacidad de absorción de energía, resistencia a flexión (MoR), densidad (ρ).

2.2 Modelo numérico para el cálculo del módulo de elasticidad longitudinal

Se desarrolló un modelo numérico paramétrico 3D mediante el método de elementos finitos (FEM) en Abaqus CAE

2025, asistido por programación en Python, para estimar el módulo de elasticidad longitudinal numérico (MoE_{FEM}) de las vigas. La simulación se basó en la distribución real del MoE_{est} obtenida a partir de la correlación entre ensayos dinámicos y estáticos de las tablas. El comportamiento global de las vigas se modeló mediante contactos cohesionados en uniones y caras laterales. Se empleó un modelo elástico lineal anisótropo con elementos tetraédricos (C3D4) y mallado refinado en las uniones dentadas (Fig. 2-a). Las condiciones de contorno replicaron el ensayo de flexión a cuatro puntos (Fig. 2-b).

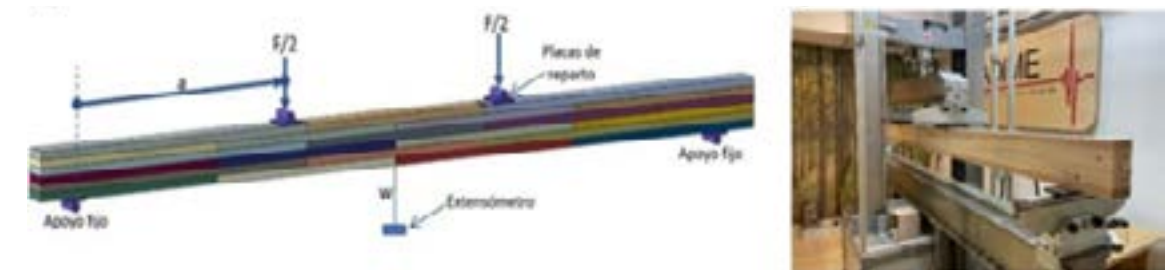


Figura 2. a) Modelo de elementos finitos de una viga de madera laminada encolada compuesta como un ensamblaje de tablas. b) Ensayo a flexión a cuatro puntos en vigas multiespecie.

2.3 Diseño de las vigas optimizadas

La estrategia planteada en este trabajo pretende equiparar la rigidez a flexión de las vigas mixtas EG_MC_C al de las vigas mono especie EG_C , únicamente actuando en el módulo de elasticidad de las tablas que se encuentran en las láminas de máximas tensiones (láminas externas) y en la zona central de la viga. En concreto, en las tablas superiores e inferiores marcadas en verde en la Fig. 3-a. Esto se traduce que únicamente se realiza una selección en el 12.5% del total de la viga, manteniendo la aleatoriedad de las tablas en el resto de la misma. Esta hipótesis fue validada mediante simulación numérica (Fig. 3-b).

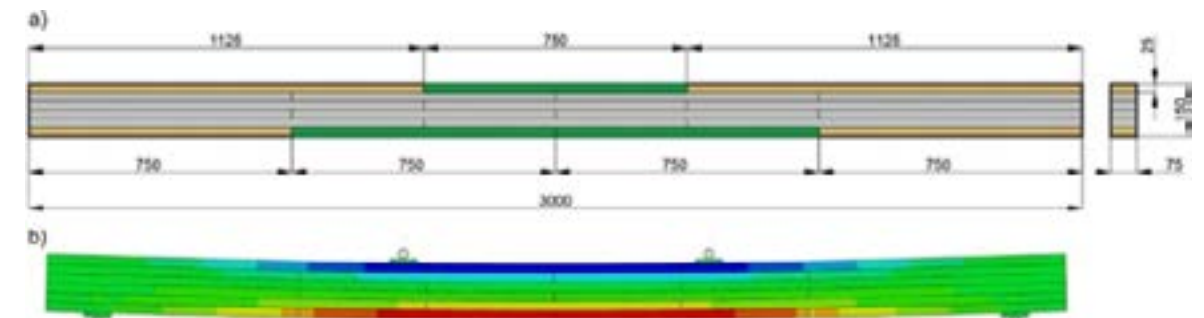


Figura 3. a) Diseño de las vigas laminas, comprobación de localización de las tensiones más elevadas b) Distribución de tensiones en modelado numérico

3. Resultados

La Tabla 1 resume los valores medios y desviación típica de los módulos de elasticidad dinámicos y estático, rigidez elástica y rigidez máxima, resistencia a flexión y densidad de las vigas optimizadas monoespecie y multiespecie de control *MC_C*, *EG_C*, *EG-MC_C* y las optimizadas *EG-MC_O*. La diferencia entre las vigas de control mixtas y monoespecie (*EG-MC_C* y *EG_C*) fue del 19%. El diseño optimizado consiguió reducir esta diferencia en tan solo un 8%, validando el modelo y el diseño.

La optimización mejoró las propiedades mecánicas de las vigas mulitespecie con respecto a las vigas mixtas de control consiguiendo un incremento medio de 11% en $MoE_{din,l}$, 6% en $MoE_{din,t}$, 13% en MoE_{st} , 23% en MoE_{FEM} , 14% en $K_{1/3}$ y 11% en K_{qu} .

La Fig.4 muestran las curvas de tensión-deformación de las 4 configuraciones. Se diferencian 3 grupos: Las vigas de madera de chopo, las mixtas de control y las monoespecie de *EG* y mixtas optimizadas mixta, no diferenciándose estadísticamente. Las vigas *MC_C* muestran una mayor ductilidad (Fig. 5-a) hasta la carga máxima de rotura. En cambio, la introducción del eucalipto ya sea en configuración monoespecie o mixta, presenta un comportamiento elástico lineal con rotura frágil y ninguna plasticidad (Fig. 5-b). Cabe destacar que las mixtas *EG_MC*, tanto de control como optimizadas (Fig. 5-c) fallan en la unión dentada de la lámina inferior de eucalipto, debido al agotamiento de la capacidad mecánica de la lámina subsiguiente de chopo (segunda lámina desde la cara inferior de la viga).

Tabla 1. Resultados del ensayo a flexión a cuatro puntos en las vigas de *MC_C*, *EG_C*, *EG-MC_C* y *EG-MC_O*.

		MC_C		EG_C		EG-MC_C		EG-MC_O	
Propiedades de Rigidez (N/mm2)		Media	DE	Media	DE	Media	DE	Media	DE
Módulo de elasticidad dinámico longitudinal	$MoE_{din,l}$	9499	212	21944	551	13330	223	14768	405
Módulo de elasticidad dinámico transversal	$MoE_{din,t}$	9325	224	20635	1788	16992	702	18004	880
Módulo de elasticidad estático	MoE_{est}	9245	284	19556	787	15802	854	17919	307
Módulo de elasticidad numérico	MoE_{FEM}	9788	665	20487	1541	16048	46	19795	459
Rigidez elástica	$K_{1/3}$	642	28	1288	58	1075	46	1221	8
Rigidez máxima	K_{qu}	560	27	1223	98	1048	60	1158	42
Propiedad resistente (N/mm²)									
Flexión	MoR	49	7	72	10	56	6	53	11

		MC_C		EG_C		EG-MC_C		EG-MC_O	
Propiedades de Rigidez (N/mm2)		Media	DE	Media	DE	Media	DE	Media	DE
Densidad (kg/m³)									
Densidad	ρ	389	3	813	47	516	19	545	24

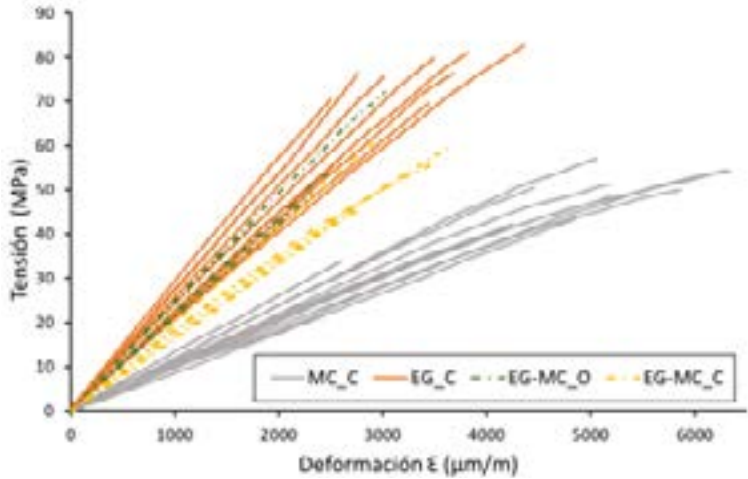


Figura 4. Diagrama de tensión deformación de las vigas



Figura 5. a) Rotura en viga monoespecia *MC_C*. b) Rotura en viga monoespecie de *EG_C* c) Rotura en viga multiespecie *EG_MC*.

4. Conclusiones

Este estudio valida el uso de vigas laminadas multiespecie combinando eucalipto globulus y chopo MC como solución estructural eficiente. Las configuraciones optimizadas, con disposición selectiva del eucalipto en zonas de máxima sollicitación, lograron módulos de elasticidad comparables a los de vigas monoespecie de eucalipto, reduciendo el uso de madera de alta rigidez sin comprometer la rigidez global del elemento. El modelo numérico desarrollado mostró una alta correlación con los resultados experimentales, con desviaciones relativas menores al 11 %, confirmando su validez como herramienta útil para el diseño sin necesidad de recurrir a ensayos experimentales extensivos. Además, los ensayos no destructivos ofrecieron resultados consistentes, respaldando su aplicación en la clasificación estructural de elementos multiespecie. Estos resultados evidencian un equilibrio eficaz entre rendimiento mecánico, eficiencia a nivel de material y a nivel estructural (local y global).

Referencias

[1] *Wood Handbook, Wood as an Engineering Material*, Centennial Edition. Madison, Wisconsin, 2010.

[2] G. Castro y F. Paganini, «Mixed glued laminated timber of poplar and Eucalyptus grandis clones», *Holz als Roh- und Werkstoff*, vol. 61, n.o 4, pp. 291-298, sep. 2003, doi: 10.1007/s00107-003-0393-6.

[3] C. Martins y A. M. P. G. Dias, «Bending properties of LVL made by Eucalyptus globulus Labill. and its potential for hybrid glulam beams», *Eur. J. Wood Prod.*, vol. 83, n.o 3, p. 97, jun. 2025, doi: 10.1007/s00107-025-02244-w.

[4] L. Brancheriau y H. Bailleres, «Natural vibration analysis of clear wooden beams: a theoretical review», *Wood Science and Technology*, vol. 36, n.o 4, pp. 347-365, ago. 2002, doi: 10.1007/s00226-002-0143-7.

[5] «UNE-EN 14080_Estructuras de madera_Madera laminada encolada y madera maciza encolada».

[6] «UNE 408-2011+A1_Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural».

7. Comunicar con madera. Toca Madera · Sounds Wood

Irene Jimeno Guadalix^a
^a Toca Madera·Sounds Wood, Calle Pico de la Pala, 1 Miraflores de la Sierra 28792, Madrid, España.
i.tocamadera@gmail.com

Palabras clave: comunicación, divulgación, conocimiento, madera, digital

La comunicación es el proceso mediante el cual se transmiten ideas, información y mensajes entre individuos, grupos o sistemas, permitiendo el intercambio de conocimiento y experiencias. En Toca Madera·Sounds Wood, se promueve la construcción con madera mediante actividades que combinan creatividad y accesibilidad, destacando este material como clave en la construcción sostenible.

El objetivo principal de Toca Madera·Sounds Wood es posicionar la madera como un recurso estratégico para el futuro de la construcción, educación y sostenibilidad, adaptándola a las demandas actuales de comunicación. Para ello, se implementan estrategias innovadoras que acercan el conocimiento técnico a diferentes públicos, con un enfoque especial en los entornos digitales.

1. Introducción

La madera ha acompañado a la humanidad desde sus orígenes, pero en el contexto contemporáneo de la construcción en España, su uso ha sido relegado por otros materiales, como el acero y el hormigón. Sin embargo, la creciente necesidad de soluciones sostenibles, la innovación técnica y la conciencia medioambiental están impulsando un renovado interés por este material. En este escenario, la divulgación y la comunicación juegan un papel esencial para acercar el conocimiento técnico a profesionales, estudiantes y ciudadanía.

Este artículo presenta mi experiencia con Toca Madera·Sounds Wood (1), una plataforma pionera en la divulgación de la construcción con madera en el ámbito hispanohablante, la cual lidero como arquitecta y consultora técnica. A través de mi recorrido profesional, analizo cómo la comunicación puede convertirse en una herramienta transformadora para el sector. (Fig. 1).

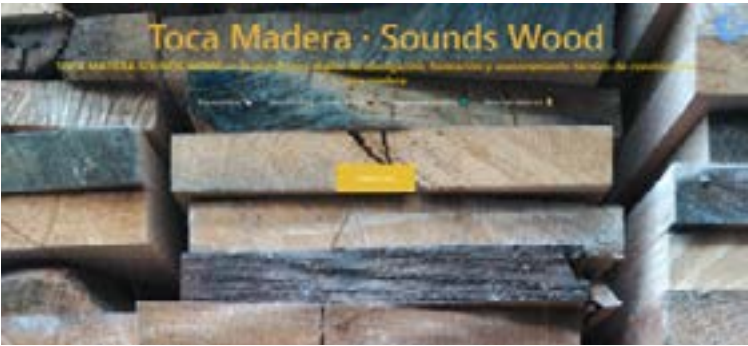


Figura 1. Página inicial del blog Toca Madera·Sounds Wood.
Fuente: Irene Jimeno Guadalix. Toca Madera·Sounds Wood

2. De la vocación a la acción: una trayectoria con propósito

Formada como arquitecta en la ETSAM (UPM) y especializada en Ingeniería de la Madera Estructural (PEMADE-USC), desde 2019 he compaginado mi actividad en Toca Madera·Sounds Wood con una jornada completa en el sector de la ingeniería farmacéutica. Desde hace un año, además, desarrollo mi labor como consultora técnica en obra nueva, rehabilitación y carpintería de armar. Mi trabajo combina el conocimiento técnico con una fuerte vocación divulgativa, que cristaliza en la creación de Toca Madera·Sounds Wood. Su enfoque combina rigor técnico, sensibilidad territorial y una capacidad única para conectar con públicos diversos.

Desde sus inicios como blog personal hasta convertirse en una plataforma de referencia, he participado activamente en:

- Cursos y másteres especializados (UPM, COATM, Gremi Fusta i Moble, Universidad de Lima, Universidad Nebrija, entre otros)
- Congresos y foros internacionales (EGURTEK, REBUILD, FIMMA + MADERALIA, WCTE) (Fig. 2).
- Publicaciones técnicas y medios de comunicación (TVE, El País, FSC, Spotify, Revista Montes, etc.)
- Organización de eventos sectoriales (Fórum Internacional de Construcción con Madera, CIMAD, REBUILD EXPO)



Figura 2. Maestra de Ceremonias Egurtek 2024 Fuente: Irene Jimeno Guadalix. Toca Madera·Sounds Wood

3. Toca Madera·Sounds Wood: una plataforma de impacto

Fundada en 2019, Toca Madera·Sounds Wood es una plataforma digital de divulgación, formación y asesoramiento técnico sobre construcción con madera. A pesar de estar liderada por una sola persona, su impacto ha sido posible gracias a una red de colaboraciones con profesionales, empresas e instituciones del sector.

Tabla 1. Principales actividades

Iniciativa	Descripción	Impacto
Mapa Colaborativo Interactivo (2)	Base de datos de más de 800 proyectos con madera con más de 15 parámetros técnicos de clasificación	Más de 200.000 visitas. Referenciado en plataformas nacionales e internacionales
Biblioteca online (3)	Más de 45 referencias técnicas y didácticas sobre madera	Acceso gratuito para estudiantes y profesionales del sector de la construcción
Juegos educativos (4)	“Pasalatabla”, “¿quién quiere ser maderero?”, “timberial”	Aprendizaje lúdico e inclusivo
Reels y vídeos técnicos (5)	Contenido audiovisual accesible y riguroso	Difusión masiva en redes sociales
Difusión de eventos (6)	Agenda actualizada de congresos y jornadas técnicas del sector maderero	Promoción de la participación sectorial
Una charla con amigos (7)	Directos de Instagram con grandes profesionales de la construcción con madera	Acercar y facilitar las conexiones entre los distintos agentes de la cadena de valor de la madera.
Blog técnico (1)	Más de 100 artículos y 8.000 seguidores	Referente en España y Latinoamérica
Redes sociales (1)	Instagram, LinkedIn, TikTok, X, Facebook	Alcance combinado de decenas de miles de usuarios
Difusión de formaciones técnicas (8)	Cursos y másteres sobre construcción con madera, tanto online como presenciales, impartidos en todo el territorio nacional.	Contribución a una base de conocimientos sólida y a una formación adecuada para los futuros técnicos del sector.

4. Más allá de la divulgación: docencia, publicaciones y liderazgo sectorial

Mi labor no se limita a la comunicación digital. Mi participación como docente, ponente y organizadora en múltiples espacios ha consolidado mi papel como referente técnico dentro del sector.

4.1. Publicaciones destacadas

Guía de Rehabilitación de Estructuras de Madera (2024): +50.000 visitas en una semana
Informe anual MASS MADERA – Built by Nature (2022–2023)
Informe sobre construcción industrializada en altura con madera técnica (2022)
+40 artículos técnicos en la revista Madera y Construcción (FINSa)

4.2. Participación en eventos

EGURTEK, REBUILD, FIMMA + MADERALIA, Have a Wood Day, MEETMAT, Mass Timber Seminar Spain, entre otros
Docencia en UPM, UPV, Universidad de Lima, Universidad Nebrija, COAATM, Gremi Fusta i Moble
Jurado ADVANCED ARCHITECTURE AWARDS 2025
Coordinadora del bloque de madera en REBUILD EXPO 2025
Organización del Fórum Internacional de Construcción con Madera (desde 2019)

5. Conclusiones: comunicar para construir

La experiencia de Toca Madera-Sounds Wood demuestra que la divulgación no es un accesorio, sino un pilar estratégico para transformar el sector de la construcción con madera. Comunicar con rigor, empatía y creatividad permite:

- Romper barreras técnicas y culturales
- Fomentar vocaciones y formación especializada
- Conectar agentes del sector y generar comunidad
- Impulsar una arquitectura más sostenible y consciente

En un momento clave para la transición ecológica y la innovación constructiva, iniciativas como esta son esenciales para construir no solo con madera, sino con conocimiento compartido.

Referencias

- (1) Toca Madera-Sounds Wood <https://tocamaderablog.com/>
- (2) Mapa Colaborativo – Interactivo. Construcción con Madera <https://tocamaderablog.com/mapa-colaborativo-construccion/>
- (3) Leer para aprender <https://tocamaderablog.com/leer-para-aprender/>
- (4) Aprender jugando <https://tocamaderablog.com/category/juego/>
- (5) Madera en vídeo <https://tocamaderablog.com/category/madera-en-video/>
- (6) Publicación de eventos <https://tocamaderablog.com/category/eventos/>
- (7) Una charla con amigos <https://tocamaderablog.com/category/charla-entre-amigos/>
- (8) Formación con madera <https://tocamaderablog.com/category/formacion/>

8. Mapa Colaborativo-Interactivo Construcción con Madera

Irene Jimeno Guadalix^a
^a Toca Madera·Sounds Wood, Calle Pico de la Pala, 1 Miraflores de la Sierra 28792, Madrid, España.
i.tocamadera@gmail.com

Palabras clave: mapa, colaborativo, proyectos, innovación, datos,

El mapa Colaborativo-Interactivo Construcción con Madera es una herramienta digital para la búsqueda, clasificación y organización de proyectos arquitectónicos e ingenieriles con madera a nivel global, convirtiéndose en una base de datos técnica de referencia para el sector maderero. Su objetivo principal es promover el interés en la arquitectura con madera, facilitando su preservación, estudio y visibilidad, tanto nacional como internacional.

1. Introducción

En un mundo que exige soluciones constructivas más sostenibles, la madera ha resurgido como un material clave por su bajo impacto ambiental, su capacidad de almacenamiento de carbono y su versatilidad técnica. En este contexto, el Mapa Colaborativo Interactivo de Construcción con Madera, impulsado por la plataforma Toca Madera · Sounds Wood (1), representa una herramienta pionera que une sostenibilidad, tecnología y colaboración abierta. Su objetivo es claro: visibilizar, documentar y conectar proyectos construidos con madera en todo el mundo. (Fig. 1).



Figura 1. Mapa Colaborativo-Interactivo. Construcción con Madera
Fuente: Irene Jimeno Guadalix. Toca Madera·Sounds Wood

2. ¿Qué es el mapa colaborativo-interactivo?

El mapa es una base de datos digital, accesible y en constante crecimiento, que recopila más de 1.000 proyectos construidos con madera en todo el mundo (2). Utiliza Google My Maps para geolocalizar cada obra y permite filtrar los resultados según más de 15 parámetros técnicos, como el tipo de madera, el sistema constructivo, el uso del edificio o los profesionales involucrados. Su carácter colaborativo permite que cualquier persona o entidad pueda aportar nuevos proyectos, mientras que su diseño interactivo facilita la exploración personalizada de la información. Esta combinación lo convierte en una herramienta única para profesionales, investigadores, estudiantes y promotores del sector.

culturales diversos. Estudios académicos y técnicos, gracias a la riqueza de datos y la posibilidad de filtrar por múltiples criterios.

Inspiración para nuevos proyectos, al ofrecer una visión panorámica de soluciones reales y aplicadas. Además, se ha convertido en una herramienta útil para la docencia, la investigación y la formulación de políticas públicas. (Fig. 4).

Figura 4. Recopilación de datos
Fuente: Irene Jimeno Guadalix. Toca Madera·Sounds Wood

2.5. Impacto cultural y profesional

- El impacto del mapa se manifiesta en varios niveles:
- Académico: como recurso didáctico en universidades y escuelas técnicas.
 - Profesional: facilitando la conexión entre diseñadores, fabricantes y constructores.
 - Cultural: promoviendo una visión contemporánea de la madera como material de vanguardia.
 - Normativo: aportando datos útiles para el desarrollo de normativas y políticas públicas.

3. Proyección futura

El equipo de Toca Madera·Sounds Wood continúa trabajando para mejorar la herramienta. Entre las posibles mejoras se encuentran:

- Integración con bases de datos BIM.
- Visualización 3D de los proyectos.
- Estadísticas automatizadas por región, tipología o sistema constructivo.
- Traducción multilingüe para ampliar su alcance internacional.

4. Conclusión

El Mapa Colaborativo Interactivo de Construcción con Madera no es solo una base de datos: es una red de conocimiento, una plataforma de inspiración y una herramienta de transformación. Su enfoque abierto, riguroso y participativo lo convierte en un modelo replicable para otros sectores de la construcción sostenible. En un mundo que exige soluciones responsables con el medio ambiente, iniciativas como esta son clave para construir un futuro más verde, eficiente y colaborativo.

Accede al mapa escaneando la imagen QR. (Fig. 5).



Figura 5. Acceso QR al Mapa Colaborativo-Interactivo. Construcción con Madera
Fuente: Irene Jimeno Guadalix. Toca Madera·Sounds Wood

Referencias

(1) www.tocamaderablog.com Toca Madera·Sounds Wood.

(2) <https://www.google.com/maps/d/embed?mid=1SXTcyRNVCMbt4lvf2ubHpPpT1ssdn9Rr&hl=es&ehbc=2E312F> width="640" height="480 Mapa Colaborativo-Interactivo. Construcción con Madera.

(3) <https://tocamaderablog.com/mapa-colaborativo/>

(4) <https://tocamaderablog.com/mapa-colaborativo-construccion/>

(5) <https://tocamaderablog.com/analisis-mundial-mapa/>

(6) <https://tocamaderablog.com/analisis-europea-mapa/>

9. Guía de Rehabilitación de Estructuras de Madera

Irene Jimeno Guadalix^a
^a Toca Madera·Sounds Wood, Calle Pico de la Pala, 1 Miraflores de la Sierra 28792, Madrid, España.
i.tocamadera@gmail.com

Palabras clave: rehabilitación, patologías, madera, estructuras, conservación,

La “Guía de Rehabilitación de Estructuras de Madera” aborda la necesidad de promover el uso de la madera en el sector de la construcción y la rehabilitación, atrayendo a nuevas generaciones y capacitando a los profesionales actuales. Este recurso técnico pone énfasis en la conservación de los centros históricos, gran parte de los cuales fueron edificados en madera antes del auge del acero y el hormigón en el siglo XX. Estos edificios, muchos con más de 100 años de antigüedad, enfrentan un envejecimiento estructural que requiere intervención inmediata.

1. Introducción

La Guía de Rehabilitación de Estructuras de Madera es un recurso técnico que no solo busca actualizar los conocimientos de los profesionales actualmente activos en el sector, sino también atraer a nuevas generaciones hacia una práctica constructiva más sostenible. En este contexto, la conservación del patrimonio construido en madera adquiere una relevancia estratégica, tanto desde el punto de vista arquitectónico como ambiental.

La metodología y estructura de esta guía surgen durante mi formación en el Máster de Ingeniería de la Madera Estructural en PEMADE, en el contexto del desarrollo de mi Trabajo Fin de Máster (TFM). En ese momento, partía de la idea —equivocada, pero reveladora— de que la rehabilitación era la única aplicación estructural posible para la madera, lo que motivó el enfoque inicial del proyecto y dio origen también a la iniciativa Toca Madera·Sounds Wood.

A partir del seguimiento de obra, en Madrid de un edificio residencial con estructura de madera recopilé una gran cantidad de información técnica que analicé, depuré y sintetisé en una serie de folletos. Estos documentos recogían las bases técnicas más comunes en las intervenciones de rehabilitación estructural con madera, organizadas con un enfoque claro, accesible y didáctico. La elaboración de estos materiales se sustentó en las referencias bibliográficas consultadas durante el proceso de investigación y en la experiencia directa de obra.

Originalmente concebidos como herramientas de uso personal, estos folletos evolucionaron con el tiempo y fueron ampliados a medida que profundizaba en la materia, incorporando nuevos conocimientos técnicos y experiencias profesionales. Aunque no aportan contenidos inéditos respecto a la bibliografía especializada, sí contribuyen significativamente a la accesibilidad del conocimiento técnico, mediante un formato gráfico, sintético y de gran difusión.

Cabe destacar el apoyo y la colaboración fundamentales de cuatro entidades del sector: FINSA, CADWORK, Fundación Gómez-Pintado y Eiffage Conscytec, cuyo compromiso con la divulgación técnica permitió la impresión y distribución gratuita de más de 6.000 ejemplares de cada modelo a lo largo del territorio nacional. Actualmente, estos materiales pueden obtenerse bajo demanda, cubriendo únicamente los costes de impresión y envío.

2. Guía de Rehabilitación de Estructuras de Madera

La Guía de Rehabilitación de Estructuras de Madera constituye una herramienta técnica de referencia para la intervención en edificaciones construidas con este material. Está compuesta por cinco folletos que describen, de forma sistemática, las fases y conocimientos necesarios para llevar a cabo un proceso de rehabilitación estructural en madera. Estos documentos representan una primera aproximación metodológica integral, orientada a la

preservación, consolidación y puesta en valor de este tipo de estructuras. (Fig. 1)

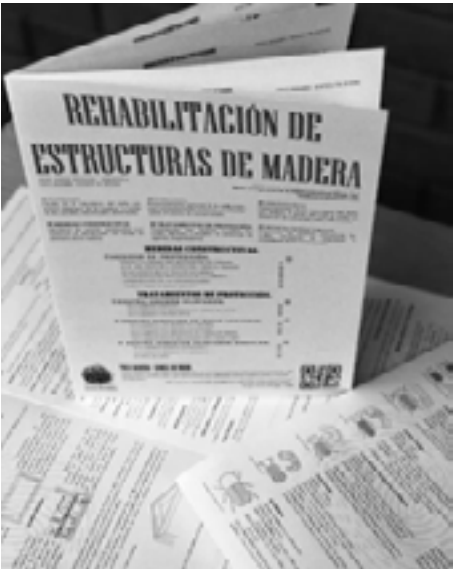


Figura 1. La Guía de Rehabilitación de Estructuras de Madera.
Fuente: Irene Jimeno Guadalix. Toca Madera-Sounds Wood

Hasta la década de 1990 no existía en España una normativa oficial específica sobre el uso estructural de la madera. Ante esta carencia, los técnicos recurrían frecuentemente a las normas DIN alemanas, cuyos valores característicos no difieren sustancialmente de los actuales. Posteriormente, el Eurocódigo 5 introdujo un mayor rigor en las exigencias de cálculo, lo cual quedó finalmente consolidado en el Código Técnico de la Edificación (CTE), hoy de obligado cumplimiento. Este marco normativo ha contribuido a disipar muchas de las dudas tradicionales asociadas al uso de la madera como material estructural. No obstante, persiste una cierta reticencia —ya sea por desconocimiento o por falta de interés— que dificulta su conservación, restauración y rehabilitación.

La guía destaca que toda intervención en edificaciones existentes debe partir del reconocimiento de las características arquitectónicas originales —estructurales, funcionales y estéticas— que conforman la identidad del inmueble. El objetivo de la rehabilitación no debe limitarse a la reparación del daño, sino orientarse a la conservación integral del bien, mejorando su eficiencia funcional y prolongando su vida útil. Este enfoque requiere compatibilizar los valores históricos y patrimoniales con las exigencias técnicas y normativas contemporáneas.

2.1. Patología

Este apartado se centra en el análisis de los distintos tipos de patologías que pueden presentarse en las estructuras de

madera, identificando su origen y tipología. (Fig. 2) Se clasifica el deterioro según agentes degradadores (biológicos, físicos, químicos y mecánicos) y se proporciona al técnico una base clara para reconocer visual y funcionalmente los daños. Se promueve una lectura estructural del daño, entendiendo la patología no como un fenómeno aislado, sino como un indicador del comportamiento general de la estructura. (1), (2), (3), (4), (5), (6), (7) y (8)



Figura 2. Clasificación de los insectos xilófagos de ciclo larvario
Fuente: Irene Jimeno Guadalix. Toca Madera-Sounds Wood. Autoría propia y adaptación de otras fuentes

2.2. Inspección y diagnóstico

Se establece una metodología básica de observación visual para evaluar el estado general de la estructura. Se detallan los aspectos clave a revisar (humedades, fisuras, deformaciones, etc.) y se orienta la redacción de un informe técnico inicial.intervención compatible con la seguridad estructural, según el principio de conservación estructural. A partir de la información recogida en la inspección, se analiza la gravedad y evolución de los daños. El objetivo es definir criterios técnicos que justifiquen o descarten la necesidad de intervención estructural. (1), (2), (3), (5), (6), (7), (9) y (10)

2.3. Medidas constructivas

Se presentan soluciones constructivas preventivas que reducen el riesgo de deterioro, como mejoras en la ventilación, detalles constructivos adecuados o elección de especies de madera resistentes. Incluye tratamientos preventivos y curativos contra agentes biológicos. Se describen tipos de productos, métodos de aplicación y su integración dentro de una estrategia global de conservación. (3), (5), (6), (9), (10), (11) y (12)

2.4. Medidas estructurales

Se recogen soluciones para reforzar o sustituir elementos estructurales dañados, con intervenciones que aseguren la resistencia, estabilidad y rigidez del edificio, manteniendo en lo posible el sistema estructural original. (Fig. 3) (3), (5), (7), (13), (14), (15), (16), (17) y (18)

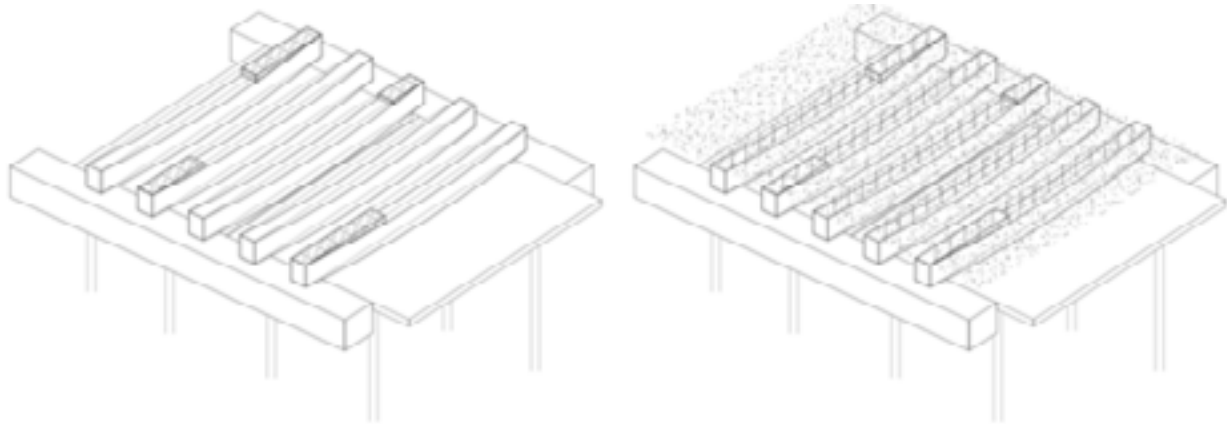


Figura 3. Losa de hormigón sobre el forjado
Fuente: Irene Jimeno Guadalix. Toca Madera-Sounds Wood. Autoría propia

2.5. Cálculo de forjado de entramado

Se ofrece una guía básica para el cálculo de forjados de madera y sistemas mixtos madera-hormigón, combinando normativa vigente y ejemplos prácticos, aplicable tanto a forjados nuevos como existentes. (19)

3. Conclusiones

Este trabajo busca contribuir a un cambio de paradigma en la percepción de la madera dentro del sector de la construcción, promoviendo su valoración, conservación y uso responsable. La Guía de Rehabilitación de Estructuras de Madera se presenta como una herramienta clave para fomentar intervenciones más sostenibles, orientadas a la preservación del patrimonio construido y al respeto por el medio ambiente.

Referencias

(1) Argüelles, R. y Arriaga F. Estructuras de madera. Diseño y cálculo. Ed. AITIM. Madrid, España, 2000.
(2) Argüelles, R., Arriaga F., Esteban M., Íñiguez-González G., y Argüelles, R.: Estructuras de madera. Bases de cálculo. Ed. AITIM. Madrid, España, 2013.
(3) Arriaga F., Peraza F., Esteban M., Íñiguez-González G., Bobadilla I. y García F.: Intervención en estructuras de madera. Ed. AITIM. Madrid, España, 2002.
(4) Barreal, K.A.R.: Patología de la madera. Ed. D.A. MUNDI-PRENSA LIBROS. Madrid, España, 1998.
(5) Cabeza, P. y Nuere, E.: Rehabilitación madera en edificación. Madrid, España, 2021.
(6) López, A.: Patología y protección de la madera. La madera en la conservación y restauración del patrimonio cultural. Ministerio de Cultura. Madrid, España, 1985.
(7) Medina, G.: Reacción al fuego de los materiales de construcción. Ed. AITIM, Madrid, España, 2001.
(8) Peraza, F.: Protección preventiva de la madera. Ed. AITIM, Madrid, España, 2001.
(9) Herzong T., Natterer J., Schweitzer R., Volz M., y Winter W.: Construire en bois. Tradition française d'une publication de EDITION DETAIL. Lausanne, Suiza, 2003.
(10) Lozano Apolo L. y Lozano Marínez Luengas A.: Curso: técnicas de intervención en el patrimonio arquitectónico. Tomo 1. Reestructuración en madera. Consultores técnicos de construcción, C.B. Gijón, España, 1995.
(11) Barberot E.: Tratado práctico de edificación. Editorial Gustavo Gili S.A. Barcelona, España, 1921.
(12) Rodríguez Barreal J.A. and Arriaga F.: Patología, tratamiento y consolidación de la madera puesta en obra. Grupo de trabajo nº2. "Estructuras existentes" del Comité Técnico nº250 "Eurocódigos" del Comité Europeo de Normalización. Madrid, España, 2000.
(13) Arriaga, F.: Estructura mixta de madera y hormigón (Sistema HBS). Ed. AITIM, Madrid, España, 2000.
(14) Ceccotti, A.: Timber concrete composite structures. Timber Engineering. Ed. Centrum Hout, Holanda, 1995.
(15) Cigni, G. y otros.: Nuove tecniche di consolidamento di travi in legno. Ed. Kappa. Roma, Italia, 1981.
(16) Landa Esparza, M.: Nuevas técnicas de reparación de estructuras de madera. Elementos flexionados. Aporte de madera -Unión encolada. Ed. Revista de Edificación, Pamplona, España, 1999.
(17) Monfort, J. y Pardo, J.L.: Reparaciones de forjados mediante hormigón. Seminario "La conservación de la madera en los edificios antiguos. Publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España, 1998.
(18) Sistema Beta. Manual técnico del sistema Beta de la empresa ROMAX, Protección de Maderas, S.A, Madrid, España, 1982.
(19) Normativa: CTE-DB-SE | CTE-DB-SE-AE | CTE-DB-SE-M | CTE-DB-SI | UNE-EN-1995-1:2016-1 y 2 | UNE-EN 338:2010 | UNE-EN 335:2013 | UNE-EN 351:2008 | UNE-EN 301:2018 | UNE-EN 12436:2002 | UNE-EN 302:1994

10. Análisis experimental y modelación de uniones estructurales de madera

Nicol López Rodríguez^{a,d*}, José Manuel Cabrero^a, Ignacio Arteaga^a, Borja Iraola^a, Peter Tanner^b, Carlos Lara^b, Pablo Guindos^{c,d}
^a Cátedra Madera ONESTA, Universidad de Navarra, Pamplona, España. ^b Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETCC), Madrid, España. ^c Facultad de Arquitectura y Centro de Innovación Tecnológica en Edificación e Enxeñería Civil (CITEEC), Universidade da Coruña, A Coruña, España. ^d Centro Nacional de Excelencia para la Industria de la Madera (CENAMAD), Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.
*nlopezrodri@unav.es

Palabras clave: Conexiones estructurales de madera, campaña experimental, modelos de elementos finitos.

El proyecto “*Towards a Reliable and Efficient Analysis of Connections in Timber (REACT)*” busca desarrollar un marco fiable para el diseño de uniones estructurales en madera, basado en cuatro objetivos clave: observar mediante ensayos, modelar el comportamiento del material, evaluar la fiabilidad y aplicar los resultados al diseño. Para ello, se han realizado ensayos a nivel de material a pequeña escala, para caracterizar su comportamiento con y sin refuerzo, y bajo distintos tipos de carga. Está previsto realizar ensayos a escala real de uniones estructurales en configuraciones geométricas variadas y cargas multidireccionales. Mientras, se desarrolla un modelo constitutivo que representa comportamiento anisótropo de la madera, para predecir la respuesta no lineal de las uniones y reducir incertidumbres en el diseño. El proyecto colabora con los grupos de trabajo del Eurocódigo 5 (CEN/TC250/SC5/WG5 y WG11), aportando mejoras normativas basadas en los avances experimentales y de modelización.

Introducción

Los modelos normativos vigentes para el cálculo de uniones estructurales de madera no siempre representan con fidelidad las combinaciones reales de carga y direcciones a las que están sometidas en la práctica. Con el objetivo de superar estas limitaciones, el proyecto REACT [1] propone un enfoque integral que combina ensayos experimentales, modelización numérica y validación a diferentes escalas.

El proyecto, en curso desde noviembre de 2021 y con finalización prevista en febrero de 2027, se estructura en cuatro objetivos, como se muestra en la Figura 1. El primero busca observar el comportamiento de la madera en distintas configuraciones, considerando orientación de la fibra, presencia de singularidades y refuerzos. El segundo se centra en modelar, desarrollando un modelo constitutivo avanzado implementado en ABAQUS [2]. El tercero aborda la evaluación de la fiabilidad e incertidumbre del modelo, mientras que el cuarto busca aplicar el conocimiento generado a la mejora de los criterios normativos en uniones.

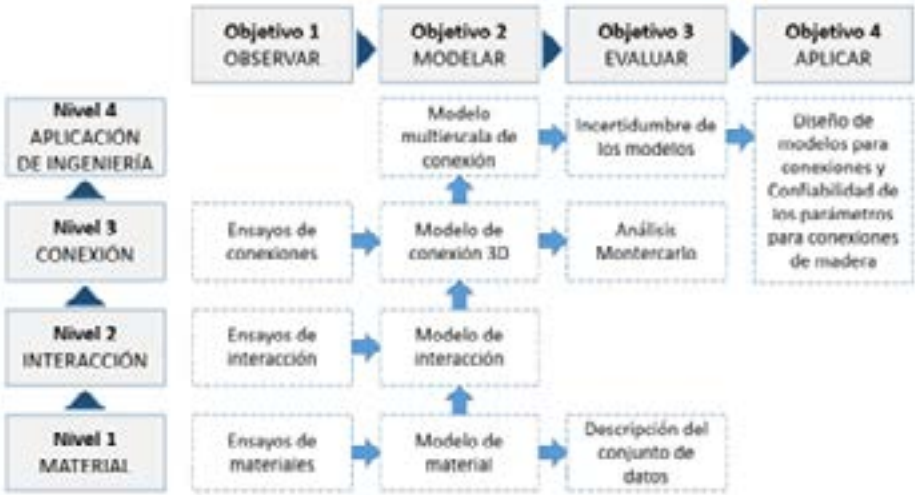


Figura 1. Esquema conceptual del Proyecto REACT.

Objetivo 1: Observar

Para alcanzar este objetivo se necesita contar con una base de datos que registre la respuesta de la madera según su orientación, tipo de carga, presencia de singularidades (como nudos, desviación de la fibra, plano encolado), y uso de técnicas de refuerzo con tirafondos. Para ello, se realizan campañas experimentales, según la norma EN

408 [3], en madera maciza y laminada encolada (MLE, con un plano de encolado), con y sin refuerzo, bajo distintas configuraciones en compresión, corte. Próximamente en tracción y aplastamiento. En todos los ensayos se emplea Correlación Digital de Imágenes (DIC), para una medición precisa del campo de deformaciones.

Las probetas de compresión se organizaron en 12 grupos, variando la inclinación de la fibra (0°, 30°, 60° y 90°) y la dirección del refuerzo (30°, 45°, 60° y 90°). Las de corte se distribuyeron en 14 grupos con configuraciones similares. Cada grupo incluyó al menos 30 muestras, asegurando validez estadística [4]. Los ensayos se ejecutaron en el Laboratorio de Arquitectura de la Universidad de Navarra, y se prevé completar los ensayos de tracción y aplastamiento durante la segunda mitad de 2025.

En los ensayos de compresión se observó que los modos de fallo dependen de la dirección de la fibra [5-6], y que el refuerzo, aunque incrementa la rigidez en un 20%, no mejora resistencia ni ductilidad. La resistencia disminuye al aumentar la inclinación de la fibra, sin diferencias significativas entre madera maciza y MLE. Los ensayos off-axis permiten definir un criterio de interacción en compresión entre direcciones paralela y perpendicular a la fibra (Figura 2, izquierda). En corte, se observó que la resistencia también decrece al aumentar la inclinación de la fibra (Figura 2, derecha) [7]. Sin embargo, la ductilidad aumentó significativamente con el refuerzo a 60°.

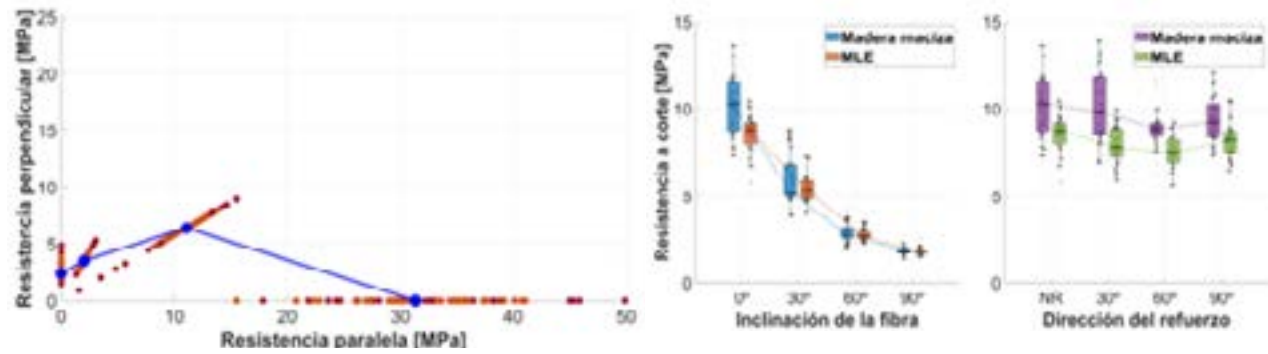


Figura 2. Interacción de resistencia a compresión (izquierda), y resistencia de corte (derecha).

Para observar el comportamiento de las uniones estructurales de madera con geometrías y patrones de carga complejos y realistas, el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETcc-CSIC) realizará ensayos a escala real [8-9], como se muestra en la Figura 3. Los ensayos se realizarán entre septiembre y noviembre de 2025 en el IETcc-CSIC, y permitirán validar los modelos desarrollados y estimar sus incertidumbres. Se incluirá una caracterización detallada de las muestras y sus defectos naturales, para analizar su impacto en el comportamiento estructural. A la luz de los resultados, se ajustará el diseño y se realizará una segunda fase de ensayos, entre junio y

septiembre de 2026, para complementar y afinar las conclusiones del proyecto.

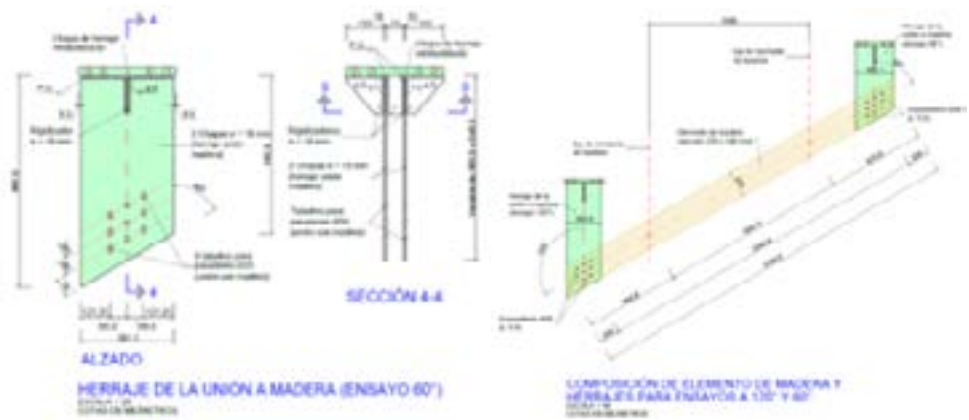


Figura 3. Configuración tipo de los ensayos de unión a 60° y 120°.

Objetivo 2 y 3: Modelar y Evaluar

En el objetivo 2, se desarrolló e implementó en una UMAT de ABAQUS, un modelo constitutivo para la madera que integra los criterios de Tsai-Hill y Hoffman. Para agilizar la resolución numérica se implementó una conexión explícita entre el tensor deformación y el Jacobiano, con un multiplicador plástico común, que permite optimizar el costo computacional [10-11]. Para mejorar la estabilidad numérica, se desarrolló una formulación híbrida explícito-implícita que permite resolver analíticamente el multiplicador plástico en las fases iniciales y aplicar correcciones cuando es necesario. Las verificaciones preliminares del modelo muestran su capacidad para reproducir adecuadamente tanto el contacto como el comportamiento no lineal en el contacto (Figura 4).

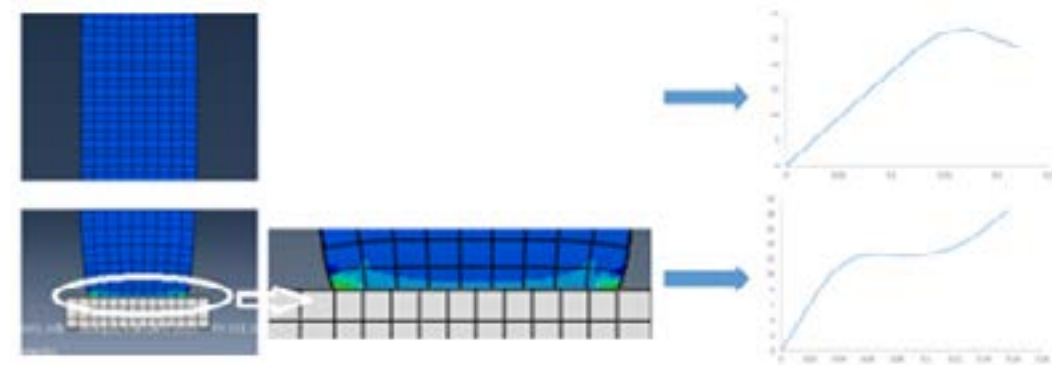


Figura 4. Bandas de densificación en la zona de contacto en el modelo numérico simulado en ABAQUS.

Resta modelar los ensayos experimentales, conforme vayan culminando los distintos niveles del objetivo 1, y validar el modelo planteado en todas sus escalas. A partir de ahí, queda evaluar la fiabilidad y la incertidumbre del modelo, en sus respectivos niveles de acuerdo al objetivo 3 planteado.

Objetivo 4: Aplicar

Se busca aplicar el conocimiento generado a los actuales modelos de rotura de uniones, que hasta ahora se han desarrollado únicamente para tracción paralela, mediante el desarrollo de un modelo independiente para la rotura en tracción perpendicular. Una vez establecidos ambos modelos direccionales, se propondrá un modelo unificado para cargas oblicuas, validado a partir de los resultados experimentales. Se ha participado en el grupo de trabajo de Uniones del Eurocódigo 5 (CEN/TC250/SC5/WG5), colaborando en la redacción final de la futura normativa, proponiendo modificaciones relevantes en los modelos de falla frágil [12]. Asimismo, se colabora en el Grupo de Trabajo de Diseño basado en Elementos Finitos (CEN/TC250/SC5/WG11).

Conclusiones

El proyecto REACT tiene como objetivo desarrollar un marco confiable para el diseño de uniones estructurales de madera, integrando ensayos experimentales con modelos de elementos finitos. El conocimiento generado abarca desde el comportamiento del material hasta la interacción con los conectores. Entre los primeros resultados destacan la caracterización mecánica bajo esfuerzos oblicuos de compresión y corte en probetas con singularidades anatómicas, y el desarrollo de un modelo constitutivo del material que responde adecuadamente a las condiciones de contorno. Estos avances sientan las bases para la validación de modelos a mayor escala. A futuro, los ensayos de uniones permitirán profundizar en la comprensión de la interacción madera-conectores ante cargas multidireccionales

y configuraciones geométricas complejas. Los resultados obtenidos contribuirán al desarrollo de modelos de diseño más precisos y seguros para estructuras de madera.

Agradecimientos

Se agradece el financiamiento del Ministerio de Ciencia e Innovación de España y del Fondo Europeo de Desarrollo Regional, a través del contrato PID2020-118569GB-C21 MINECO/FEDER UE.

Referencias

- (1) Proyecto Towards a Reliable and Efficient Analysis of Connections in Timber. *Sitio web*. Disponible en: <https://portalcientifico.unav.edu/proyectos/748484/detalle>. [Accedido: 3 de septiembre de 2025].
- (2) Dassault Systèmes. (2023). *Abaqus 2023 documentation*. Dassault Systèmes Simulia Corp. <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus>.
- (3) European Committee for Standardization. (2003). EN 408: *Timber structures – Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties*. European Committee for Standardization.
- (4) N López Rodríguez, J M Cabrero, I Arteaga Jordá, P Guindos (2025) “Experimental study on timber compression and shear: effects of fiber deviation and reinforcement” Paper 58-6-3. Meeting 2025. International Network on Timber Engineering and Research (INTER 2025).
- (5) Reiterer, A., & Stanzl-Tschegg, S. E. (2001). *Compressive behaviour of softwood under uniaxial loading at different orientations to the grain*. *Mechanics of Materials*, 33(12), 705–715. [https://doi.org/10.1016/S0167-6636\(01\)00086-2](https://doi.org/10.1016/S0167-6636(01)00086-2).
- (6) Oudjene, M., & Khelifa, M. (2009). Elasto-plastic constitutive law for wood behaviour under compressive loadings. *Construction and Building Materials*, 23(11), 3359-3366.
- (7) Gupta, R., & Sinha, A. (2012). Effect of grain angle on shear strength of Douglas-fir wood. *Holzforschung*, 66(5), 655–658. <https://doi.org/10.1515/hf-2011-0031>.
- (8) CEN, EN ISO 8970:2020. Timber structures - Testing of joints made with mechanical fasteners - Requirements for timber density, 2020.
- (9) CEN, EN 26891:1991. Timber structures – Joints made with mechanical fasteners General principles for the determination of strength and deformation characteristics, 1991.
- (10) R. Quinteros Mayne, I. de Arteaga Jorda; J.M.Cabrero; B. Iraola (2024) “Simplificación en la modelización de uniones en madera” III Congreso Ibero-Latinoamericano de la Madera en la Construcción (CIMAD 2024).
- (11) R. Quinteros-Mayne, I. de Arteaga, J.M. Cabrero (2025) “Approximation to the explicit formulation of the Tsai-Hill criterion” ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Wood Mechanics - from Material Properties to Timber Structures (CompWood 2025).
- (12) J M Cabrero, N L Rodriguez, T Tannert, A Salenikovich, Y H Chui (2024) “Brittle Failure Modes of Connections with Dowel Type Fasteners Loaded Parallel to the Grain: A Comparison Between Eurocode 5 and CSA O86” Paper 57-7-8. Meeting 2024. International Network on Timber Engineering and Research (INTER 2024).

11. **Análisis inverso y diseño computacional para caracterizar madera de pino mediante vibraciones**

Mario Requena^a, Roberto Palma^a, Carlos Cruz^a, Yaiza Fuentes-García^a, Francisco J. Rescalvo^a, Antolino Gallego^a
^aUIMA-UGR, Calle Dr. Severo Ochoa, s/n, Beiro, 18001 Granada.
ma01@correo.ugr.es

Palabras clave: Elementos Finitos, Problema inverso, Evaluación No Destructiva, Vibraciones, Madera de Pino.

Este trabajo presenta una estrategia computacional para la caracterización no destructiva de las propiedades ortótropas de la madera de Pinus nigra mediante análisis vibratorio. La metodología combina análisis de sensibilidad, diseño óptimo de experimentos y simulaciones numéricas mediante elementos finitos. En una primera etapa, se realiza un análisis de sensibilidad para identificar la influencia de cada propiedad ortótropa en las frecuencias de vibración de listones de pino laricio. A partir de estos resultados, se diseña un experimento computacional que optimiza la ubicación de los sensores, maximizando la capacidad de identificación de los parámetros materiales. Una vez definida la configuración experimental óptima, se plantea un problema inverso para ajustar las propiedades ortótropas del modelo numérico comparando las frecuencias experimentales con las obtenidas por simulación. Este ajuste se lleva a cabo mediante un proceso iterativo que minimiza las diferencias relativas entre ambas, permitiendo identificar con precisión los parámetros elásticos del material. La estrategia desarrollada constituye una herramienta eficaz para la caracterización no destructiva de materiales ortótropos, con posibles aplicaciones en restauración de patrimonio, control de calidad y diseño estructural.

1. Introducción

En los últimos años, la madera ha resurgido como un material de gran interés en la industria de la construcción, tanto por su sostenibilidad como por su excelente relación entre peso, resistencia y facilidad de mecanizado (1,2). Avances como la madera laminada cruzada (CLT) han ampliado sus aplicaciones estructurales, incluso en edificaciones de gran altura, manteniendo adecuadas prestaciones mecánicas y de durabilidad (3). No obstante, la madera presenta importantes retos para su caracterización precisa debido a su naturaleza ortótropa (4): sus propiedades mecánicas varían significativamente a lo largo de tres direcciones principales —longitudinal (L), radial (R) y tangencial (T). Además, la caracterización mecánica de la madera se ve agravada por su elevada heterogeneidad, la variabilidad intraespecífica y su alta sensibilidad a factores externos como humedad, temperatura y duración de las cargas.

Estas particularidades hacen necesaria la utilización de técnicas de ensayo avanzadas y métodos numéricos que permitan caracterizar sus propiedades de manera no destructiva. En este contexto, el análisis vibratorio, combinado con métodos de análisis inverso y simulación numérica mediante elementos finitos (FE, por sus siglas en inglés), constituye una herramienta prometedora para la identificación precisa de las constantes elásticas de la madera. Este trabajo se centra en el desarrollo y validación de una estrategia computacional orientada a la caracterización ortótropa de listones de Pinus nigra a partir de mediciones dinámicas y su correlación con modelos numéricos.

2. Diseño de experimentos

Para llevar a cabo la caracterización dinámica de la madera de Pinus nigra, se ha desarrollado un procedimiento experimental y computacional que integra la preparación de muestras, el modelado mediante FE y el análisis de sensibilidad (SA, por sus siglas en inglés). A continuación, se describen las muestras ensayadas y los métodos empleados en el diseño de los experimentos.

2.1. Descripción de las muestras

Para el presente estudio se han utilizado tres muestras, preparadas en forma de listones prismáticos. En la Tabla 1 se detallan sus dimensiones, masa, contenido de humedad y orientación de las fibras.

Tabla 1. Descripción de las muestras ensayadas

Identificador	Longitud [m]	Ancho [m]	Alto [m]	Dirección de crecimiento de las fibras [°]	Masa [kg]	Humedad [%]
1	1.00	0.05	0.025	-25	0.753	5.4
2	1.00	0.05	0.025	45	0.714	5.6
3	1.00	0.05	0.025	0	0.581	7.1

2.2. Modelo de Elementos Finitos y diseño de experimentos

Antes del ensayo experimental, se desarrolló un modelo numérico de una viga en voladizo mediante COMSOL Multiphysics, con el objetivo de estudiar la influencia de las propiedades elásticas ortótropas de la madera sobre las frecuencias naturales de vibración. Para el SA, se realizó una simulación Monte Carlo (MC) con 500 ejecuciones, variando aleatoriamente los seis parámetros ortótropos independientes E_L , E_R , E_T , G_{LR} , G_{LT} , G_{RT} , L_R , L_T alrededor de valores medios obtenidos de la literatura, ver Tabla 2, y considerando una desviación del 15 %. Posteriormente, se aplicó una regresión múltiple no lineal sobre los resultados obtenidos, lo que permitió estimar los coeficientes de correlación estandarizados (SRC, por sus siglas en inglés) asociados a cada parámetro. Estos SRC cuantifican la sensibilidad de cada modo de vibración a las propiedades elásticas del material, tal como se resume en la Tabla 3.

Tabla 2. Valores nominales de propiedades elásticas (5-9)

Propiedad	E_L	E_R	E_T	G_{LR}	G_{LT}	G_{RT}
Valor nominal [GPa]	12.000	0.650	0.450	0.750	0.650	0.075

Tabla 3. Modos de vibración asociados a las propiedades elásticas más influyentes según el SA.

Propiedad elástica	Modos de vibración implicados
E_L	1, 2, 3, 7, 8 y 10
E_R	5, 8 y 9
E_T	4, 5, 8 y 9
G_{LR}	4, 5, 6, 8 y 9
G_{LT}	4, 5 y 6
G_{RT}	4 y 8

2.3. Posición óptima de la galga

Para el análisis modal experimental se emplearon galgas extensométricas modelo CLY4-120-3 precableadas de la marca HBM con una longitud de rejilla de 10 mm, cuya ubicación se optimizó a partir del modelo de FE. Los mapas de deformación longitudinal (Fig. 1) mostraron que los modos 1, 2, 3, 4 y 5 son los más sensibles a las propiedades elásticas, indicando las zonas idóneas para colocar las galgas: para el modo 2 se situaron cerca del empotramiento, en la cara transversal, mientras que para los modos 3 y 5 se colocaron en la cara superior, tanto cerca del empotramiento como en posiciones intermedias.

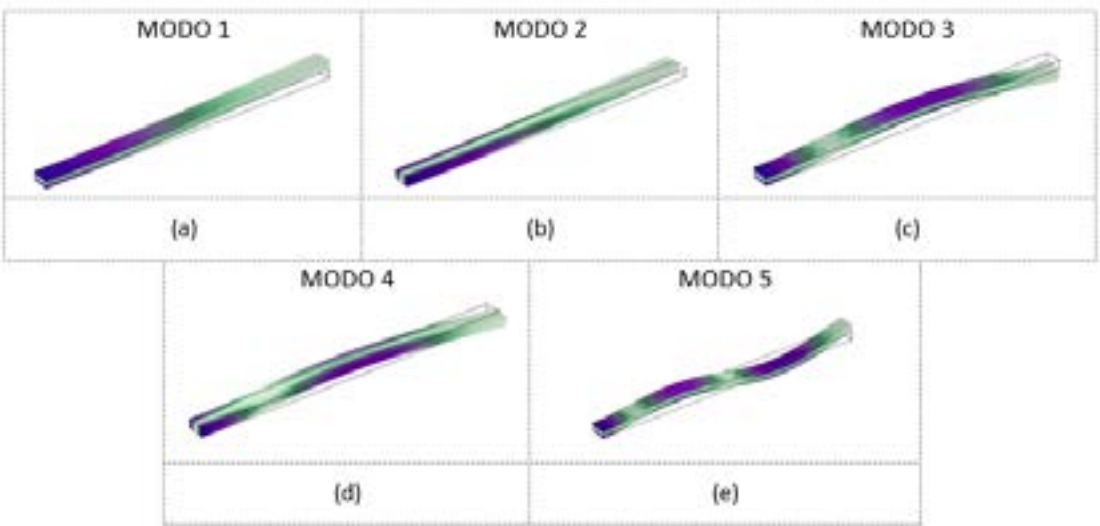


Figura 1. Representación de la deformación longitudinal en el eje X (en valor absoluto) de los modos calculados como representativos. (a) Modo 1; (b) Modo 2; (c) Modo 3; (d) Modo 4; (e) Modo 5. Las zonas de color morado representan mayor deformación longitudinal.

3. Resultados experimentales

Los ensayos experimentales se realizaron excitando las vigas mediante impactos puntuales con un martillo de madera, registrándose las respuestas dinámicas mediante galgas extensométricas. Se ensayaron dos configuraciones distintas de galgas en la viga 3, con el objetivo de evaluar su influencia en la detección de modos de vibración.

En la primera configuración, se instalaron cuatro galgas alineadas longitudinalmente sobre la cara superior, separadas 20 cm entre sí. En la segunda configuración, dos galgas se colocaron en la cara superior y otras dos en la cara transversal, manteniendo la misma distancia al empotramiento.

El análisis mediante FFT permitió identificar un mayor número de modos en comparación con configuraciones más simples, observándose que la segunda disposición, con galgas también en la cara transversal, ofreció una mejor sensibilidad para la detección de modos superiores. Las frecuencias naturales registradas en ambas configuraciones se resumen en la Tabla 4 y Fig. 2.

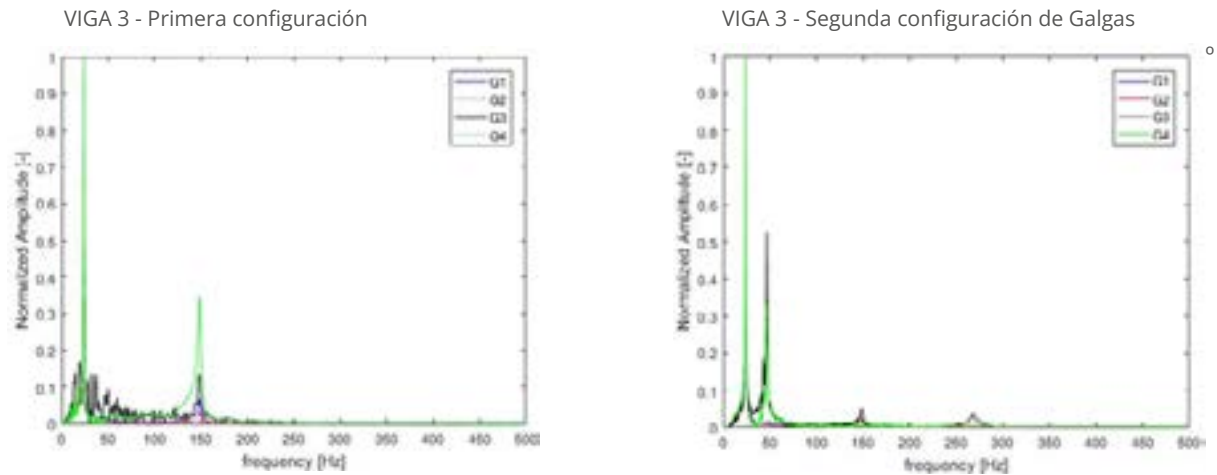


Figura 2. Espectros de frecuencia de las vigas con la colocación de cuatro galgas. (a) Viga 3 con las galgas en la primera configuración; (b) Viga 2 con las galgas en la segunda configuración.

Tabla 4. Frecuencias modales registradas.

Modo	Primera configuración	Segunda configuración
1	23.93	23.97
2	48.21	47.51
3	148.40	148.70
4	174.73	173.10
5	-	268.00

4. Problema inverso y ajuste de propiedades

Para identificar las propiedades ortótropas de la madera de Pinus nigra, se planteó un problema inverso cuyo objetivo es ajustar las constantes elásticas del modelo FE a las frecuencias experimentales obtenidas en los ensayos.

Para ello, se define la siguiente función objetivo (Eq. 1).

$$F_c = \sum_{i=1}^5 \left(\frac{f_i^{FEM} - f_i^{EXP}}{f_i^{EXP}} \right)^2 \tag{1}$$

donde f_i^{FEM} , f_i^{EXP} denotan las frecuencias simuladas y medidas, respectivamente. El problema inverso se resolvió mediante un algoritmo iterativo en MATLAB, que ajusta las propiedades elásticas recalculando las frecuencias modales en COMSOL hasta minimizar la función objetivo. Como resultado, se obtuvieron los valores optimizados de las constantes elásticas que se muestran en la Tabla 5, alcanzando un error mínimo del 15 %.

Tabla 5. Resultados finales

Propiedad	E _L	E _R	E _T	G _{LR}	G _{LT}	G _{RT}
Valor nominal [GPa]	12.039	0.633	0.344	0.700	0.600	0.060

5. Conclusiones

Se ha desarrollado una estrategia computacional para caracterizar de forma no destructiva las propiedades ortótropas del Pinus nigra mediante ensayos vibratorios y análisis inverso. El uso combinado de simulaciones FE y optimización ha permitido identificar seis parámetros elásticos, alcanzando un error mínimo del 15 %. Además, se ha comprobado que la posición de las galgas extensométricas influye de forma significativa en la identificación de modos sensibles, especialmente los modos 2, 3 y 5. La metodología propuesta se perfila como una herramienta eficaz para aplicaciones en la industria maderera, restauración patrimonial y diseño estructural.

Referencias

(1) Forest Stewardship Council (FSC). (2020). *Benefits of FSC-Certified Wood in Sustainable Construction*.
(2) Programme for the Endorsement of Forest Certification (PEFC). (2021). *Sustainable Forest Managment and Climate Change*.
(3) CLT Handbook. (2020). *Cross-Laminated Timber: Applications and Structural Performance*.
(4) Bodig, J., & Jayne, B. A. (1993). *Mechanics of Wood and Wood Composites*. Malabar, FL: Krieger Publishing Company

(5) Keunecke, D., Hering, S., & Niemz, P. (2007). Three-dimensional elastic behaviour of common yew and Norway spruce. *Wood Science and Technology*, 41(8), 561–577. <https://doi.org/10.1007/s00226-007-0148-7>

(6) Rautkari, L., Hill, C. A. S., Lahtela, V., & Hughes, M. (2010). The effects of various forms of heat treatment on the properties of Scots pine (*Pinus sylvestris*) wood. *International Wood Products Journal*, 1(1), 1–9. <https://doi.org/10.1179/2042645310Y.0000000001>

(7) Kubojima, Y., Yoshihara, H., & Ohta, M. (2000). Vibrational properties of wood along the grain. *Journal of Wood Science*, 46(4), 293–298. <https://doi.org/10.1007/BF00776475>

(8) Brémaud, I., Passard, J., & Dlouhá, J. (2012). Elastic and damping properties of tropical woods in relation to structure and extractives. *Wood Science and Technology*, 46(5), 989–1009. <https://doi.org/10.1007/s00226-011-0455-4>

(9) Bucur, V. (2006). *Acoustics of Wood* (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/3-540-28594-8>

12. Problema inverso bayesiano para la calibración de vigas huecas tipo cajón mediante ensayos experimentales

Roberto Palma^a, Carlos Cruz^a, Yaiza Fuentes-García^a, Francisco J. Rescalvo^a, Antolino Gallego^a
^aUIMA-UGR, Calle Dr. Severo Ochoa, s/n, Beiro, 18001 Granada.
rpalgue@ugr.es

Palabras clave: Problema inverso bayesiano, Elementos finitos, Vibraciones, Vigas huecas mixtas.

Este trabajo presenta un problema inverso bayesiano para estimar las propiedades de flexión efectivas de vigas huecas tipo cajón construidas con maderas laminadas de dos especies abundantes en Andalucía: el chopo, empleado en las capas interiores de las alas por su baja densidad y módulo de elasticidad, y el pino laricio, utilizado en las capas exteriores por sus altas prestaciones mecánicas. El conjunto se completa con un tablero estructural de eucalipto de la empresa Betanzos HB, que cierra el cajón y proporciona rigidez adicional. La parte experimental combina técnicas acústicas para medir el módulo de Young dinámico de la sección, mediante ensayos de vibración libre, con ensayos de flexión en los que se registra el desplazamiento en el centro de vano bajo cargas aplicadas de forma controlada. A partir de los datos experimentales de flexión y del módulo de Young determinado dinámicamente, se emplea un modelo simplificado de viga de Bernoulli con rigidez flexional equivalente, que permite estimar las propiedades de flexión efectivas mediante un enfoque bayesiano. Este enfoque permite incorporar las incertidumbres tanto de las mediciones experimentales como de las hipótesis geométricas y materiales del modelo. Los resultados muestran que esta estrategia permite una caracterización eficiente del comportamiento a flexión de las vigas huecas tipo cajón, y que los modelos obtenidos pueden aplicarse en futuros diseños estructurales.

1. Introducción

En los últimos años, la madera ha resurgido como un material de gran interés en la industria de la construcción, tanto por su sostenibilidad como por su excelente relación entre peso, resistencia y facilidad de mecanizado (1-2). Avances como la madera contralaminada (CLT) han ampliado sus aplicaciones estructurales, incluso en edificaciones de gran altura, manteniendo adecuadas prestaciones mecánicas y de durabilidad (3).

Entre los elementos estructurales de madera, las vigas huecas tipo cajón (4) han despertado un notable interés por su ligereza, eficiencia mecánica y potencial estético. Estas vigas suelen combinar distintas especies de madera para optimizar propiedades, y presentan configuraciones complejas en su sección, a menudo incluyendo rigidizadores o tableros estructurales que cierran el cajón. Sin embargo, la caracterización de su comportamiento a flexión resulta especialmente compleja, ya que no basta con conocer el módulo de elasticidad del material, sino que resulta igualmente crucial determinar el momento de inercia efectivo de la sección, parámetro que define la rigidez flexional global de la viga. En estas estructuras compuestas, el cálculo de la inercia puede verse alterado por efectos como uniones imperfectas, rigidizadores o fenómenos de interacción entre capas, lo que genera incertidumbre y dificulta obtener valores fiables mediante simples cálculos geométricos. Para solventar estas limitaciones, los enfoques de identificación inversa, y en particular los métodos bayesianos (5), han surgido como herramientas potentes para estimar propiedades mecánicas efectivas a partir de datos experimentales. Estos métodos permiten integrar tanto la información procedente de ensayos como el conocimiento previo sobre el sistema, cuantificando además la incertidumbre de las propiedades estimadas.

En este contexto, el presente trabajo desarrolla un problema inverso bayesiano orientado a estimar el momento de inercia efectivo de vigas huecas tipo cajón construidas con maderas laminadas de chopo, pino laricio y un tablero estructural de eucalipto. La metodología propuesta combina la medición experimental del módulo de Young dinámico mediante ensayos de vibración libre, con ensayos de flexión en los que se registra el desplazamiento en el centro de vano bajo cargas controladas, utilizando un modelo simplificado de viga de Bernoulli como base para la identificación de parámetros.

2. Campaña experimental

Se ha ensayado una viga hueca tipo cajón de madera mixta, de longitud 2,40 m y con 8 rigidizadores transversales distribuidos a lo largo de su directriz. La sección externa mide 150 mm × 75 mm, con espesores de 40 mm en las alas superior e inferior y 6 mm en los laterales. Está fabricada con madera laminada de chopo del clon Luisa Avanzo (capas internas) y pino laricio o Pinus Nigra (capas externas), y se cierra mediante un tablero estructural de eucalipto.

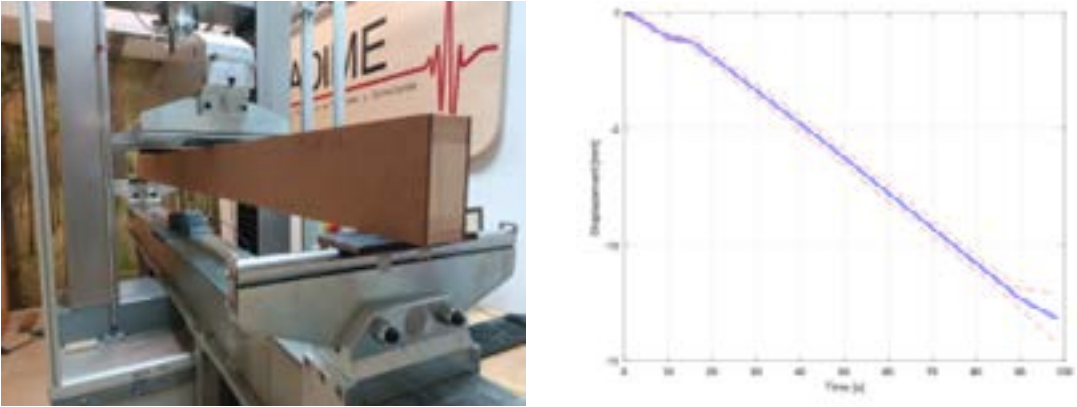


Figura 1. Configuración experimental (izquierda) y valor medio (en azul) y desviación típica (en rojo) del desplazamiento en centro de vano medido (derecha).

El módulo de Young transversal se ha determinado mediante un ensayo de vibración libre con técnicas vibroacústicas, resultando un valor medio de 9,256 GPa con una desviación estándar de 1,009 GPa. En el ensayo de flexión, la viga se apoyó sobre dos apoyos simples dejando voladizos de 15 cm en cada extremo, aplicándose dos cargas puntuales simétricas situadas a 45 cm del centro de vano, ver Fig. 1 izquierda. Se midió el desplazamiento vertical en el centro en tres muestras y se obtuvo la media y desviación típica mostrada a la derecha de la Fig. 1.

3. Problema inverso bayesiano

La estimación del momento de inercia efectivo se ha abordado mediante un enfoque inverso bayesiano, combinando la información obtenida en los ensayos experimentales con un modelo teórico basado en la teoría de vigas de Bernoulli.

3.1. Modelo teórico de flexión

El comportamiento de la viga bajo flexión se modela asumiendo la hipótesis de la teoría de vigas de Euler-Bernoulli. Para una viga simplemente apoyada con longitud L , sometida a dos cargas puntuales P simétricas aplicadas a una distancia a a cada lado del centro de vano, la flecha w en el centro de vano se expresa como:

$$w = \frac{Pa(3L^2 - 4a^2)}{24EI} \tag{1}$$

donde E , I denotan el módulo de Young y el momento de inercia efectivo, respectivamente.

3.2. Formulación del problema inverso

Según el teorema de Bayes, la probabilidad posterior de obtener I dado w_{exp} se expresa como:

$$p(I|w_{exp}) \propto L(w_{exp}|I) \cdot P(I) \tag{2}$$

donde $p(I|w_{exp})$, $L(w_{exp} |I)$ y $P(I)$ denotan la probabilidad a posteriori, la función de verosimilitud y la probabilidad a priori, respectivamente. Bajo la hipótesis de errores normales independientes en la medición, la verosimilitud se expresa como:

$$L(w_{exp}|I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_w^2}} e^{-\frac{(w_{exp}-w)^2}{2\sigma_w^2}} \tag{3}$$

donde σ_w denota la desviación típica de medición y las variables P , a , L y E se han modelado como variables aleatorias con distribuciones normales alrededor de sus valores medios, incorporando así sus incertidumbres en el proceso de inferencia.

Esta formulación se ha implementado en MATLAB mediante muestreo directo, utilizando distribuciones de tipo lognormal para modelar la incertidumbre y estimar la I .

4. Resultados

La estimación bayesiana se ha llevado a cabo utilizando un tamaño de muestra de 500 simulaciones, lo que ha permitido determinar el momento de inercia efectivo de la viga hueca tipo cajón ensayada, a partir de las curvas fuerza-desplazamiento medidas experimentalmente y del módulo de Young obtenido mediante ensayo dinámico. El valor medio estimado del momento de inercia efectivo ha sido $3,222 \times 10^{-5} \text{ m}^4$ con una desviación estándar de $2,964 \times 10^{-6} \text{ m}^4$. La Fig. 2 muestra la distribución de probabilidad posterior obtenida tras el ajuste, confirmando la consistencia del modelo simplificado de viga de Bernoulli empleado.

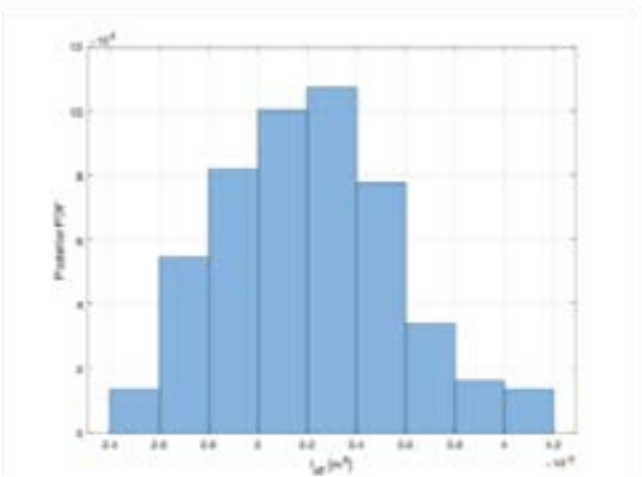


Figura 2. Distribución de probabilidad posterior estimada para el momento de inercia efectivo mediante el enfoque bayesiano.

5. Conclusiones

Se ha demostrado que el enfoque inverso bayesiano permite estimar de forma eficaz el momento de inercia efectivo de vigas huecas tipo cajón, integrando datos experimentales de vibraciones y ensayos de flexión. Los resultados obtenidos muestran una buena coherencia entre el modelo teórico simplificado y el comportamiento experimental, con una incertidumbre razonable en la estimación de la inercia efectiva. Esta metodología se presenta como una herramienta robusta para la caracterización mecánica de estructuras de madera laminada, facilitando su uso en futuros diseños estructurales.

Referencias

(1) Forest Stewardship Council (FSC). (2020). *Benefits of FSC-Certified Wood in Sustainable Construction*.
(2) Programme for the Endorsement of Forest Certification (PEFC). (2021). *Sustainable Forest Management and Climate Change*.
(3) CLT Handbook. (2020). *Cross-Laminated Timber: Applications and Structural Performance*.
(4) Fortissimo Project. (2023). Cloud-based simulation of box framed timber beams. <https://www.fortissimo-project.eu/en/success-stories/709/cloudbased-simulation-of-box-framed-timber-beams>
(5) Tarantola, A. (2005). *Inverse Problem Theory and Methods for Model Parameter Estimation*. Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM).

13. Evaluación de tableros de partículas de *Ulmus pumila* fabricados con resinas de urea/formaldehído modificadas con celulosa microfibrilar y lignosulfonatos

Eduardo Bordallo López^a, Tamara Coello García^a
^a Fundación Centro de Servicios y Promoción Forestal y de su Industria de Castilla y León (cesefor). Pol. Ind. Las Casas, Calle C, 42005, Soria.
eduardo.bordallo@cesefor.com

Palabras clave: tablero, celulosa microfibrilar, lignosulfonato, Urea/Formaldehído.

La industria del tablero aglomerado se enfrenta a dos grandes desafíos: la creciente competencia con otros productos de madera técnica de mayor valor añadido por las fuentes de biomasa lignocelulósica; y la dependencia de adhesivos sintéticos y potencialmente tóxicos, como las resinas de urea-formaldehído (UF), en un contexto normativo que promueve la economía circular y de base biológica desvinculada de materias primas no renovables. Una posible solución consiste en aprovechar especies arbóreas infrautilizadas cultivadas en tierras marginales y explorar la sustitución parcial o total de los adhesivos convencionales por alternativas de origen biológico. En este estudio se evaluó la viabilidad técnica de sustituir parcialmente la resina UF por polímeros biobasados, específicamente celulosa microfibrilada (CMF) y lignosulfonatos (LS), en la fabricación de tableros aglomerados producidos con biomasa de *Ulmus pumila* (UP) cultivada en tierras marginales. Se ensayaron cinco formulaciones: 100 % resina UF (control), UF + 0,085 % MFC, UF + 0,17 % MFC, UF + 10 % lignosulfonatos y UF + 20 % lignosulfonatos. Los tableros fueron fabricados con una densidad objetivo de 675 kg/m³ y un espesor de 15 mm, y evaluados según la norma UNE-EN 312. Los ensayos mecánicos mostraron una resistencia a tracción perpendicular (IB) entre 0,44 y 0,70 N/mm², una resistencia a la flexión entre 1070 y 1300 N, y un módulo de rotura (MOR) entre 4,9 y 7,3 N/mm². No se observaron diferencias significativas en las propiedades mecánica entre el tablero control y las formulaciones con CMF, así como con 10 % de lignosulfonatos. Sin embargo, se detectó una disminución de propiedades con un contenido del 20 % de lignosulfonatos. Estos resultados sugieren que la sustitución parcial de la resina UF por CMF y lignosulfonatos es técnicamente viable sin comprometer la integridad estructural del tablero aglomerado.

Introducción

Los adhesivos termoendurecibles, en particular los base UF son los más utilizados (1) para la fabricación de tablero aglomerado debido a su versatilidad, color, rápido fraguado, estabilidad a pH básico y bajo costo (2). Sin embargo, presentan el inconveniente de que emiten formaldehído durante su uso (3), un compuesto orgánico volátil, considerado cancerígeno en humanos, lo que ha llevado a un cambio en la legislación que regula sus

emisiones. Esto ha provocado la búsqueda de alternativas que reduzcan el uso y consumo de colas en la fabricación de tablero, así como el desarrollo de adhesivos de base biológica, a partir de productos como la celulosa microfibrilar y los derivados de la lignina (5), ambos obtenidos a partir de biomasa lignocelulósica.

En este trabajo se evaluó la sustitución parcial de resina UF por CMF y LS en la mezcla adhesiva utilizada para la fabricación de tableros aglomerados a partir de biomasa de UP y se evaluó su efecto en sus propiedades mecánicas y de estabilidad dimensional. Además, se reporta la influencia de estos aditivos en el pH, punto de gel y viscosidad de las fórmulas adhesivas utilizadas.

Materiales y métodos

Los tableros monocapa se fabricaron con biomasa de UP procedente de Almazán, España , que se astilló y molinó utilizando una criba de 20 mm primero, y luego una de 8 mm. Las partículas producidas se fraccionaron por tamaño, utilizando un equipo vertical de tamizado, descartando las de gran tamaño (>5 mm) y los finos (<0,5 mm). La mezcla de partículas utilizada consistió en un 70 % 1-2 mm y un 30 % 0,5-1 mm, [Figura 1]. Para la mezcla adhesiva se utilizó una resina del tipo UF como aglutinante (densidad: 1290 Kg·m⁻³, viscosidad 431 cP, y tiempo de gel de 57 segundos), NH₄NO₃ como catalizador y una suspensión de parafina como hidrofugante. CMF y dos tipos de LS, A y B, se utilizaron como sustitutos parciales de la cola UF. La fórmula adhesiva consistió en un 10% de UF sobre peso seco de astilla, 5% de NH₄NO₃, 10% de parafina y 12% H₂O sobre peso de UF, así como diferentes niveles de CMF y lignosulfonatos [Tabla 1]. El objetivo al modificar la formulación adhesiva fue mantener constante su contenido de sólidos, aunque se varió su composición. Así, la masa de CMF o LS añadida corresponde a una cantidad igual de masa de UF a sustituir. Cuando se añadieron lignosulfonatos, se adicionó un 2% de ácido cítrico para ajustar el pH.



Figura 1. Apariencia de las partículas utilizadas

Para fabricar los tableros se secó la astilla hasta una humedad del 3-4% y se encoló en una mezcladora de palas durante 15 min. Cada tablero (3 réplicas por ensayo) se formó manualmente a partir de 1,5 kg de partículas resinadas y se consolidó en una prensa JOOS LAP 80. La densidad objetivo de los tableros fue de 675 kg·m⁻³, con un espesor de 15 mm y un tamaño de 383X383 mm. El prensado se realizó en dos pasos: 1) 200°C, presión de 2,5 N·mm⁻², 4 minutos, y 2) 200°C a 1,5 N·mm⁻², 1 minuto. Los tableros se acondicionaron a 20°C y 65% de humedad relativa durante 7 días antes del corte de probetas para ensayo. La densidad, hinchamiento, absorción de agua, contenido de humedad, módulo elástico (MOE) y de rotura (MOR), y tracción perpendicular, se determinaron según UNE-EN-13986. Los valores estimados representan el promedio de al menos 9 medidas. La viscosidad de las mezclas adhesivas se midió en una copa Ford, número 4, a 20°C. Las lecturas de pH de la astilla encolada y de la mezcla adhesiva se realizó de forma similar, empleando un medidor de pH, Hanna instruments, equipado con un electrodo de vidrio combinado Flushtrode, Hamilton. El tiempo de gel se determinó transfiriendo 2 g de mezcla adhesiva a un tubo de ensayo, que se sumergió en un baño de agua a ebullición con agitación. El contenido de sólidos de las colas y humedad de las partículas se estimó en una termobalanza PCA-100. Todas las medidas fueron realizadas por triplicado.

Resultados y discusión

La formulación de la mezcla adhesiva es clave en la fase de prensado de un tablero aglomerado. El contenido en agua ha de ser el suficiente para funcionar como agente de transferencia de calor en la consolidación del tablero, pero no muy alto que limite el curado de la cola (2). Así mismo, el pH de la mezcla es crítico cuando se trabaja con adhesivos aminoplásticos como la UF que son pH dependientes. En este tipo de adhesivos, una disminución en una unidad de pH en la mezcla, se traduce en un incremento de 10 unidades en la velocidad de crecimiento y entrecruzamiento de la cadenas poliméricas (2), lo que se traduce en una reducción del tiempo disponible, previo a la consolidación de las astillas encoladas.

Tabla 1. Análisis de la mezcla adhesiva modificada de Urea/Formaldehído

Fórmula adhesiva	Tableros	Propiedades mezcla adhesiva					
		pH mezcla adhesiva	pH astilla encolada	Tiempo de gel, [s]	Vis., cSt	Contenido sólido cola, % (p/p)	humedad astilla, % encolada, %
UF 100%	L1	8,21±0,026	5,63±0,038	81,7±6,8	158,3	61,0±0,75	*
UF/CMF 0,085%	L2	8,17±0,029	5,61±0,07	80,5±2,1	215,2	62,3±1,18	8,29±0,2
UF/CMF 0,17%	L3	8,13±0,006	5,52±0,07	82±1	228,9	62,0±0,41	8,66±0,13
UF/LSA 10%	L4	4,36±0,064	4,82±0,09	71,3±2,3	*	63,7±1,13	8,23±0,23
UF/LSA 20%	L5	4,59±0,006	5,09±0,03	95±3,61	*	62,3±0,66	8,08±0,41
UF/LSB 10%	L6	7,24±0,05	5,90±0,23	171	*	61,9±0,3	7,66±0,14

*valores no estimados

En las fórmulas adhesivas estudiadas, el pH, se mantuvo casi constante al adicionar la CMF (8,2), probablemente debido a las pequeñas dosis empleadas 0,085% y 0,17% en relación a la masa de UF. En las mezclas con lignosulfonatos el pH se mantuvo ácido con LSA (4,36-4,59) pero neutro con LSB (7,2), incluso añadiendo un 2% de ácido cítrico, lo que está asociado a su pH básico (11,8) y su alta CAA (8,3), en relación al LSA [Tabla 1].

El tiempo de gel de las mezclas adhesivas formuladas con CMF fue similar (80 segundos), lo que era de esperar porque su pH y contenido de sólidos es del mismo orden (8,17 y 62%). El aumento de viscosidad observado con la dosis de CMF del 35% al 44%, corresponde al aumento del contenido en fibras de celulosa. El efecto del pH del medio de reacción en el tiempo de curado de la resina se manifiesta en la formulación con 10% LSA: al tener la mezcla un menor pH, se reduce el tiempo de curado en relación a la formulación 100% UF. La mezcla adhesiva con LSB, con mayor pH, fue la que presentó el mayor tiempo de gel, por su menor contenido de sólidos, valor de pH y CAA. Los valores promedios de la densidad, hinchamiento, absorción de agua, módulo elástico, módulo de rotura y la resistencia a la tracción perpendicular de los tableros fabricados se presentan en la tabla 3. En general, se observó que el tipo de agente modificante de la fórmula adhesiva y su contenido tuvieron un marcado efecto en las propiedades físicas y mecánicas de los tableros aglomerados. El rango de la densidad promedio de los tableros fue de 653-700 kg·m⁻³, valores próximos a la densidad objetivo propuesta de 675 kg·m⁻³. Las diferencias probablemente se encuentran asociadas a variaciones en la formación manual de la manta encolada de partículas, en la densidad de las formulas adhesivas empleadas en cada tablero, y a pérdidas de manipulación.

Tabla 3. Propiedades físicas y mecánicas de los tableros fabricados con las diferentes mezclas adhesivas

Propiedades de los tableros						
Tableros	Densidad, [kg/m³]	Hinch., %	Abs., %	MOE, [N/mm²]	MOR, [N/mm²]	Tracc. per. [N/mm²]
L1	653,2±39,3	12,0±1,6	21,6±7,0	1293,1±280,8	7,3±1,4	0,79±0,13
L2	691,5±22,3	14,2±2,8	22,0±2,8	1207,0±218,9	6,7±1,1	0,66±0,25
L3	698,2±20,4	12,6±1,3	20,6±2,6	1317,2±118,7	7,0±0,7	0,72±0,06
L4	700,7±22,1	15,8±1,2	27,4±3,1	1190,4±155,4	5,9±0,4	0,66±0,05
L5	663,3±22,7	40,9±5,4	65,4±5,2	1075±144,3	4,9±0,6	0,44±0,05
L6	681,4±40,4	25,8±6,6	45,8±6,5	1285,1±193,9	6,5±1,2	0,53±0,09

Hinch.: Hinchamiento, Abs.: Absorción de agua, MOE: Módulo elástico, MOR: Módulo de rotura, Tracc. per.: Tracción perpendicular

La incorporación de CMF y LS en las formulaciones adhesivas base UF influyó en las propiedades de resistencia a la tracción perpendicular de los tableros fabricados, aunque todos presentan un valor promedio por encima de 0,4 N·mm⁻² [Figura 2], valor mínimo exigido para ser considerados tableros tipo P2. Esto indica una buena formación y encolado de las partículas, así como un buen contacto durante la consolidación. El valor promedio más elevado se encontró en los tableros fabricados con una mezcla de UF 100 % (0.79 N·mm⁻²) y el menor en los tableros con un 20 % LSA (0,44 N·mm⁻²), lo que puede estar asociado al menor contenido de UF en la mezcla. En general, al aumentar el contenido de CMF se incrementa el valor de la resistencia a la tracción perpendicular, mientras que lo opuesto se observó con el LSA. Los tableros fabricados con lignosulfonatos presentaron una reducción de la resistencia a la tracción perpendicular de entre el 16 % y el 44 % en relación a los de UF 100 %. Esto sugiere que los LS ensayados presentan una baja reactividad hacía el formaldehído, debilitando la red de adhesión [Figura 2]. Los valores promedios de módulo elástico y rotura de los tableros fabricados, son inferiores al mínimo recomendado para que puedan ser considerados tableros del tipo P2, independientemente de la formulación adhesiva utilizada en su fabricación [Figura 3]. Esto está seguramente influenciado por el uso de partículas no optimizadas en lo que respecta a su tamaño y geometría y que no favorecen el entrelazamiento mecánico, debilitando los tableros aglomerados cuando trabajan a flexión.

La estabilidad dimensional de los tableros fabricados, después de inmersión en agua a 20 °C, durante 2 horas fue estimada a través del porcentaje de hinchamiento y absorción de agua [Figura 3]. La mezcla adhesiva con CMF permitió fabricar tableros con un 12-14% de hinchamiento y un 20-22% de absorción de agua, lo que sugiere que la CMF, aun en bajas dosis, contribuye a la formación de enlace y la cohesión del adhesivo. Los tableros con un 10% de LSA proporcionaron resultados relativamente comparables a la CMF, 15% y 27% respectivamente. Sin

embargo, al aumentar la dosis de LSA hasta un 20% se redujo notablemente la estabilidad dimensional, 40% y 60 % respectivamente, lo que sugiere que aumentar la proporción de LSA no favorece la reticulación del adhesivo base UF. Un resultado similar se observó con el LSB al 10 %. Esto concuerda con los resultados de resistencia a la tracción perpendicular [Figura 2], donde los tableros que mostraron menor valor promedio fueron los que más altos valores de hinchamiento y absorción de agua presentaron.

Conclusiones

La sustitución parcial de UF por CMF y LS en las formulaciones adhesivas, modifica sus propiedades de pH, punto de gel y viscosidad. En las mezclas con CMF el pH fue alcalino, con una viscosidad entre 21-228 cSt y un tiempo de gel sobre 80 s. Sin embargo, el pH de las mezclas con la adición de LSA fueron ácidas, y con LSB neutras, su tiempo de gel fue variable en función de la dosis, con una viscosidad que no se pudo estimar, lo que evidenció una marcada influencia de los LS en el comportamiento de la cola de UF. En los tableros fabricados con hasta un 0,17 % de CMF y 10 % de LSA se observó que sus propiedades mecánicas y estabilidad dimensional fueron similares a las del control, UF 100 %. Sin embargo, la inclusión de un 20 % de LSA o de un 10 % de LSB reveló un incremento en el hinchamiento y la absorción de agua, y un menor valor promedio de MOE y MOR, en aquellos tableros producidos con 20 % de LSA, lo que indica que el entrecruzamiento de la formulación adhesiva se afectó, cuando se incrementa la dosis de LSA o se utiliza LSB. Los resultados alcanzados muestran que la incorporación de pequeñas dosis de aditivos de origen biológico pueden ser utilizados para modificar colas del tipo UF, sin comprometer sus propiedades adhesivas en la fabricación de tableros aglomerados.

Refererecias

(1) Gao Z., Wang X.M., et.al. DSC characterization of urea-formaldehyde (UF) resin curing. Pigment & Resin Technology. 2009, 38, 3.

(2) Gadhave R.V., Mahanwar O.A. & Gadekar P.T. Factor Affecting Gel Time/Process-Ability of Urea Formaldehyde Resin Based Wood Adhesives. Open Journal of Polymer Chemistry. 2017, 7, 33.

(3) Pizzi A. Lipschitz L & Valenzuela. Theory and Practice of the Preparation of Low Formaldehyde Emission UF Adhesives. Holzforschung. 1994, 48, 254.

(4) Ayrilmis N., Kwon J.H., et al. Microfibrillated-cellulose-modified ureaformaldehyde adhesives with different F/U molar ratios for wood-based composites. Journal of Adhesion Science and Technology. 2016, 30, 2032.

(5) Bekhta P., Noshchenko G., et al. Properties of Eco-Friendly Particleboards Bonded with Lignosulfonate-Urea-Formaldehyde Adhesives and pMDI as a Crosslinker. Materials. 2021, 14, 4875.

14. De la teoría a la práctica: la arquitectura temporal en madera como herramienta pedagógica

Holger Patricio Cuadrado Torres^a
^aUniversidad Técnica Particular de Loja, Loja Ecuador.
hpcuadrado@utpl.edu.ec

Palabras clave: Arquitectura temporal, madera, aprender haciendo, prototipo.

En la enseñanza de la arquitectura, es fundamental que los estudiantes no solo adquieran conocimientos teóricos, sino que también los apliquen en escenarios reales que promueven la vinculación con la comunidad mediante proyectos participativos. Este taller surge como una estrategia de practica constructiva en madera, que busca cerrar la brecha entre la conceptualización y la construcción de proyectos en escala 1:1.

Esta práctica docente propone una metodología de enseñanza basada en el aprendizaje experiencial, donde los estudiantes de arquitectura desarrollan proyectos de arquitectura temporal en madera como material base, para aplicar de manera tangible los conocimientos adquiridos en el aula. A través de la construcción de estructuras como pabellones de usos flexibles e indeterminados, los alumnos exploran conceptos como el diseño, la materialidad, la funcionalidad y el impacto en el entorno, permitiéndoles conectar la teoría con la práctica de manera efectiva.

El enfoque se basa en la resolución de problemas reales mediante la experimentación con materiales, técnicas constructivas y enfoques innovadores en el diseño de espacios temporales sobre el espacio público. La práctica fomenta la colaboración, el pensamiento crítico y la creatividad, aspectos fundamentales en la formación de un arquitecto.



En este taller se materializa el prototipo denominado, Sombrario Escolar, desarrollado como parte del taller práctico de vinculación con la comunidad en una escuela primaria de régimen público de Ecuador, y la Facultad de Arquitectura de la UTPL.

Introducción

En el ámbito contemporáneo de la enseñanza de la arquitectura, es fundamental una formación complementaria desde la teoría hasta la práctica. Este taller, desarrollado desde la asignatura de Taller de Proyectos Arquitectónicos V, ha permitido una primera aproximación al diseño y ejecución de una obra de pequeña escala, involucrando procesos desde el análisis del lugar, reuniones de trabajo con la comunidad educativa usuaria, procesos de proyecto, hasta la construcción de la obra a escala 1:1

El taller práctico de arquitectura temporal en madera, se convierte en una herramienta pedagógica que permite a los estudiantes una primera experiencia real de contacto con los materiales y los procesos constructivos, promoviendo una comprensión más objetiva del proceso de diseño arquitectónico, es decir, desde una visión constructiva de la arquitectura. Por otro lado, se valora el impacto urbano del prototipo sobre el espacio, y el impacto social que provoca en los usuarios, fortaleciendo la vinculación entre la comunidad y academia.

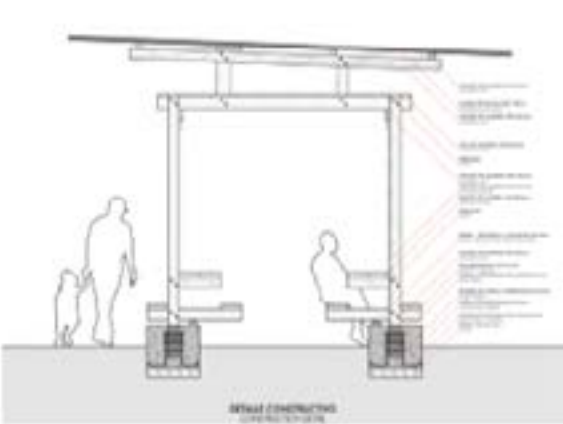


Figura 3. Pórticos prefabricados



Figura 4. Proceso constructivo

Las condiciones autoimpuestas para el diseño se basan, por un lado, en la optimización y modulación de las piezas de madera con el objetivo de no generar desperdicios, construir un lugar versátil para el encuentro que fomente la

apropiación y el uso activo de los niños, docentes y padres de familia, y por último, que la intervención se plantee como un complemento del lugar sin afectar las actividades del entorno.

Objetivos

El objetivo principal de este proyecto, es poner en práctica los conocimientos teóricos adquiridos en el aula, a través de experiencias prácticas en escala 1:1. Se busca promover el pensamiento crítico y objetivo del proceso de proyecto, que valore los materiales y las técnicas constructivas como instrumento para concebir la arquitectura. Además, fomenta el trabajo colaborativo mediante la participación de la academia en escenarios de contextos y usuarios reales.

Metodología

La metodología se enfoca en promover un aprendizaje experiencial, o “aprender haciendo”, mediante talleres intensivos que vinculen el diseño del proyecto hasta su construcción. El proceso de diseño inicia con la fase de investigación, el estudio del lugar, la definición del programa arquitectónico, la selección de los materiales, diseño y definición del proyecto arquitectónico, hasta su construcción sobre el espacio abierto de la escuela. La madera se establece como material principal para el desarrollo del ejercicio. El taller se organizó mediante grupos colaborativos de trabajo direccionados a la toma de decisiones compartidas.

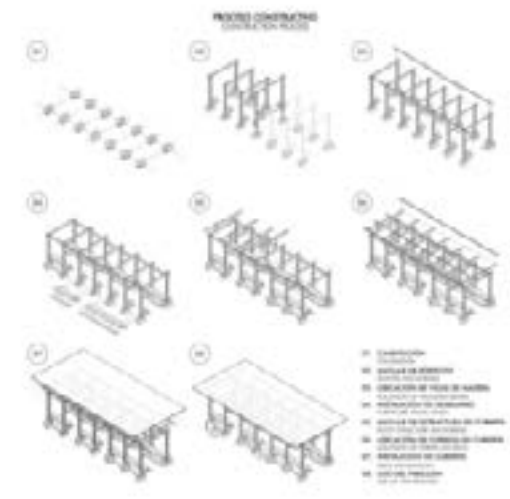


Figura 5. Axonometría constructiva



Figura 6. Maqueta constructiva

Los pasos desarrollados son:

- 2) Charlas sobre “madera y sostenibilidad”
- 1) Exponerse a “la materia” (madera)
- 3) Maquetas de estudio de proyectos referentes
- 4) Proceso de proyecto, crítica, clases teóricas de apoyo
- 5) Maqueta del proyecto ejecutivo
- 6) Construcción del prototipo, incluso dados cimentación

Resultados

La construcción del prototipo de madera ha permitido materializar en escala real un proyecto desarrollado como ejercicio proyectual desde la academia, evidenciándose un marcado interés y motivación estudiantil al consolidar una primera experiencia constructiva, teniendo como recurso la madera.



Figura 7. Anclaje de pórticos



Figura 8. Anclaje de mobiliario

El sistema constructivo se basa en la repetición sistemática de pórticos de madera de copal, los cuales integran alternadamente el mobiliario conformado por mesas y bancas dispuestas entre los pilares. Esta estrategia permitió valorar de manera integral la estructura como soporte y elemento expresivo protagonista de la arquitectura.

Funcionalmente, a más de construir un lugar de encuentro bajo la sombra y resguardo de la lluvia, el pabellón soporta diversos usos como comedor escolar, aula abierta al aire libre para clases o talleres prácticos escolares,

mobiliario de espera para los padres de familia, hasta stand para exposiciones temporales si fuera necesario. Su diseño abierto y permeable, sin uso definido, permite la apropiación libre y espontánea del pabellón, adaptándose a las necesidades cambiantes de la comunidad académica.



Figura 9. Flexibilidad de usos

De esta manera, el Sombrario escolar se convierte en un catalizador social mediante una solución simple, participativa y sensible al lugar. Es un ejemplo de cómo la academia puede vincularse con la comunidad desde una perspectiva social, ecológica y educativa, aportando no solo infraestructura, sino también procesos de aprendizaje mutuo y construcción colectiva.

Conclusiones

La arquitectura como ciencia aplicada, debe incorporar experiencias prácticas en la formación de los nuevos arquitectos. Entre los puntos más significativos del ejercicio se resaltan los siguientes:

- 1. La madera se valora como recurso y material constructivo, a partir del cual se conciben y dimensionan todos los componentes del pabellón mediante el criterio cero desperdicios, lo que permitió comprender de manera precisa el enfoque constructivo que debe considerar cualquier obra arquitectónica, independientemente de su escala.

- 2. El componente funcional, se plantea desde la flexibilidad de usos y variedad de usuarios, es decir desde el enfoque de contenedor programático abierto capaz de albergar un sin número de actividades bajo la sombra para la comunidad académica y padres de familia. El pabellón puede ser un comedor escolar, aula abierta, espacio de exposiciones, hasta mobiliario de descanso y espera.

El taller práctico experiencial, se valida como una herramienta necesaria y eficaz para comprender de manera integral el proceso de diseño arquitectónico desde su concepción hasta la ejecución de la obra.

Referencias

(1) Rodríguez, A.; Ramirez L. Aprender haciendo-Investigar reflexionando: Caso de estudio paralelo en Colombia y Chile. *Revista Academia y Virtualidad*. 2014, 53, 63.
(2) Armillas, I. R. Buckminster Fuller. Un innovador del diseño del siglo XX. *Diseño y Sociedad*. 2008, 32, 41.
(3) Campo, A. Pensar con las manos. Nobuko. 2009. 62, 67.

15. Impulso de la bioeconomía local en la construcción: vivienda-demostrador en Ogíjares (Granada)

Luis Llopis García^a, Eva Chacón Linares^a
^a Bonsai Arquitectos, Granada.
hola@bonsaiarquitectos.es

Palabras clave: construcción industrializada de madera, transición ecológica, bioeconomía local, Passivhaus Plus, LIFE Wood For Future.

Se presenta la experiencia de colaboración entre los promotores y el equipo técnico de una vivienda unifamiliar de autopromoción en Ogíjares (Granada) y los investigadores del proyecto europeo LIFE Wood for Future. Esta vivienda ha funcionado como demostrador para el prototipado de una viga laminada híbrida (MCLam Mixta), desarrollada por la spin-off IberoLAM con dos especies cultivadas en Andalucía: chopo de la Vega de Santa Fe (Granada) y pino laricio de la Sierra de Cazorla (Jaén). Su uso en obra fue clave para avanzar hacia la homologación y marcado CE, consolidando su viabilidad industrial. Finalizada en 2024, la obra es un caso ejemplar de transferencia entre diseño, I+D, emprendimiento industrial y autopromoción, que impulsa una bioeconomía local basada en la transformación de recursos forestales regionales. Se concluye aportando una discusión sobre la urgencia de activar mecanismos que aceleren la conexión entre innovación tecnológica en madera, práctica proyectual y dinámicas de mercado, tanto privadas como públicas. Estas sinergias son fundamentales para fortalecer la bioeconomía local y avanzar hacia un entorno construido más sostenible, saludable y regenerativo en Andalucía.

1. La industrialización de la madera: una tendencia tractora

Desde principios de la década de 2010, la construcción con madera industrializada ha crecido de forma sostenida a escala internacional, consolidándose como una estrategia clave para la edificación sostenible. El informe CTBUH 2022 registra 139 edificios altos de madera en el mundo, con Europa concentrando en torno al 71 % [4]. La combinación de avances tecnológicos y normativos, junto con la ligereza estructural de estos sistemas (entre el 40 y el 60 % menos de peso que los convencionales), y la consiguiente reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, ha acelerado su adopción en vivienda, equipamientos y obra pública.

Europa destaca por el progresivo surgimiento de políticas que promueven el uso de materiales reciclados y biomateriales, impulsando el sector hacia una economía circular alineada con la lucha contra el cambio climático. Francia exige desde 2020 que todos los edificios públicos nuevos incorporen madera u otros materiales biogénicos; ciudades como Amsterdam implementan normativas que obligan a que al menos un 20% de los nuevos edificios utilicen materiales sostenibles; y, fuera de Europa, el International Building Code (IBC) ha ampliado el marco para la madera masiva, favoreciendo su expansión a mayor escala [4].

En este contexto, se observa la transferencia al mercado de estas innovaciones y la superación de barreras técnicas y normativas. Tras el residencial Murray Grove en Londres (2009), se sucedieron ejemplos en Reino Unido, Austria y países escandinavos; en el entorno más próximo destacaron Adoma (Toulouse, 2015), la escuela Redbridge (Lisboa, 2018), Perspective e Hyperion (Burdeos, 2018) y Wood’Art La Canopée (Toulouse, 2022), consolidando referentes aplicables al espacio SUDOE [1].

2. La brecha española: contexto y oportunidades

Aunque el contexto español presenta hoy cierto desacompasamiento respecto a la evolución europea de la construcción en madera, conviene matizar esta percepción. España se sumó tempranamente a la ola innovadora con proyectos pioneros desde la primera mitad de la década pasada: edificios residenciales en Cavallers (Lleida, 2013) y Calle Cuenca (Granada, 2015, coetánea de Adoma), La Borda (Barcelona, 2018), viviendas públicas en Hondarribia (2018), Entrepatis (Madrid, 2018) e Impulso Verde (Lugo, 2022), evidenciando disposición pese a barreras normativas y de mercado [1,3].

Este impulso se ha sostenido gracias a una red creciente de agentes que trabajan por consolidar un ecosistema maduro en torno a la construcción con madera: AITIM; el Clúster da Madeira e o Deseño de Galicia; PEMADE (Universidad de Santiago de Compostela); Fundación CETEMAS; CESEFOR; IFAPA (Junta de Andalucía); la Unidad de Investigación de la Madera Estructural de la Universidad de Granada (UIMA); y la Cátedra Madera Onesta

(Universidad de Navarra).

No obstante, a diferencia de países con políticas integradas para la madera industrializada, en España ese impulso no ha encontrado todavía un marco institucional suficientemente coordinado que permita su consolidación. Con todo, comienzan a aflorar apoyos públicos regionales: en Galicia se han activado convocatorias de subvenciones específicas para proyectos y obras que empleen productos de madera estructural; en Cataluña, la Estratègia de la Bioeconomia de Catalunya 2030 y la promoción de vivienda pública industrializada por parte del IMHAB incorporan criterios de descarbonización compatibles con el uso de madera; en Euskadi se ha presentado una estrategia de bioeconomía forestal circular con foco en nuevos materiales y aplicaciones en construcción; y en Navarra se han lanzado ayudas para inversiones y productos de mayor valor añadido en el sector maderero. Aun así, la fragmentación de la cadena de valor, la débil articulación entre el sector forestal y la industria transformadora y las inercias del sector de la construcción siguen ralentizando la adopción a escala estatal, mientras que en Andalucía existen marcos en preparación cuya definición concreta está aún pendiente; en este sentido, los anuncios recientes en torno al Plan Forestal Andaluz Horizonte 2030 y la futura Ley de Montes apuntan a un impulso de la bioeconomía forestal que podría escalar experiencias como LIFE Wood for Future [5].

El caso andaluz ilustra esta complejidad. Andalucía cuenta con una de las mayores superficies forestales de España, un capital natural de alto valor que debe ponerse en valor y preservarse. Aun así, su valorización se ha visto limitada por el menor desarrollo industrial local y un reconocimiento institucional insuficiente, a lo que se suman retos sociales y ecológicos como el despoblamiento rural y la necesidad de modelos habitacionales más accesibles y sostenibles. En este contexto, la bioeconomía basada en madera cultivada permite alinear producción forestal, transformación de proximidad y regeneración arquitectónica [2].

Sobre esta base, en 2019 la Universidad de Granada impulsó la Mesa del Chopo, foro interdisciplinar e interinstitucional promovido por el Consejo Social de la UGR, que trazó una hoja de ruta para conectar recurso forestal, industria local y arquitectura sostenible en la Vega de Granada. De ese proceso surge en 2021 LIFE Wood for Future (UGR y PEMADE-USC, con la Diputación de Granada y COSE), que reactiva la cadena de valor del chopo estructural integrando investigación, innovación, formación y obra demostradora; acciones como MARJAL y la spin-off IberoLAM refuerzan el tejido industrial provincial y contribuyen a la conservación y crecimiento de las masas forestales andaluzas [2].

3. La vivienda-demostrador de Ogíjares: un ensayo de transferencia local

El proyecto de vivienda unifamiliar en Ogíjares, en la Vega de Granada, representa una experiencia singular en la que convergen innovación técnica, investigación académica, desarrollo industrial y realidad social. El avance tecnológico central del caso de estudio es su uso como demostrador para la viga laminada híbrida MCLam, prototipo desarrollado

por IberoLAM, compuesto por madera de chopo estructural y madera de pino de alta calidad. Ambos materiales son de origen local: pino laricio del Monte de Navahondona (Parque Natural de Cazorla, Segura y Las Villas) y chopo de la Vega de Santa Fe [6].

El emplazamiento en la Vega de Granada condiciona fuertemente el proyecto. La parcela se sitúa en un entorno rural periurbano con características paisajísticas y climáticas que llevan a una determinada volumetría e integración con el paisaje agrícola. La arquitectura ecopasiva se entiende como un sistema en el que el espacio se construye como un refugio de vida en armonía con su entorno natural y cultural, maximizando el uso de recursos locales, minimizando el impacto ambiental y promoviendo el bienestar de sus ocupantes. Este enfoque implica un compromiso explícito con la bioeconomía y la economía circular, priorizando materiales renovables, procesos de construcción con baja huella ecológica y la reversibilidad de las soluciones adoptadas.

En el tramo demostrador, la viga MCLam trabaja sobre una luz aproximada de 6 m, con desempeño equivalente a una clase resistente GL26c en la terminología habitual de madera laminada. La clase de servicio prevista es 1 (uso interior calefactado). La pieza actúa como vigueta secundaria que apoya por gravedad en entalladuras mecanizadas por CNC en las vigas principales del forjado, sin herrajes vistos. La configuración híbrida combina lamelas de pino laricio en las zonas de mayor esfuerzo a flexión, con uniones tipo finger-joint y encolado estructural conforme a normativa europea. Este diseño busca optimizar las prestaciones de cada tipo de madera donde más se requieren [6].

La disposición vista en un tramo del forjado del estar-comedor responde a la necesidad de funcionar como edificio demostrador, facilitando la lectura pedagógica del nuevo producto. La solución valida en condiciones reales su compatibilidad con sistemas de madera prefabricados estándar de mercado y la coordinación con la industria local (fabricación, logística y montaje especializado). Frente a alternativas tradicionales, reduce masa (cargas permanentes y demanda de cimentación) y huella de carbono; frente a glulam monoespecie, optimiza el aprovechamiento de especies locales; y frente a un uso de CLT como solución de forjado, ofrece ahorro de material madera.

Para garantizar la calidad ambiental y la eficiencia, el proyecto se basa en estándares internacionales de confort, salud y diseño sostenible. Además, la vivienda cumple con las exigencias del estándar Passivhaus adaptado al clima mediterráneo, habiendo alcanzado la clasificación Passivhaus Plus, lo que garantiza un desempeño energético elevado y una calidad del aire interior óptima. Estos marcos proporcionan referencias sólidas para la selección de materiales, la gestión del ciclo de vida del edificio y la optimización del confort interior, adecuándolos a los condicionantes técnicos, económicos y culturales del contexto granadino.

4. Hacia una bioeconomía local: proyecciones y aprendizajes

La experiencia de Ogjares forma parte de una serie de casos de estudio que desde 2020 venimos desarrollando en Andalucía (Sotogrande, Albolote, Monachil y Valle de Lecrín). Estos proyectos comparten denominadores: sistemas estructurales de madera industrializada en entramado ligero y paneles CLT, diseño bioclimático integrado, criterios de sostenibilidad y salud ambiental, y promotores cada vez más conscientes del impacto del hábitat en su salud y en la del planeta. Esta constelación permite analizar de manera realista la respuesta del mercado frente a una construcción innovadora que, aunque en consolidación, muestra capacidad de adaptación a nuevas demandas y normativas.

Uno de los desafíos más relevantes es la escalabilidad y replicabilidad de los modelos. La comparación entre vivienda unifamiliar y colectiva evidencia limitaciones y oportunidades: la unifamiliar facilita flexibilidad y aprendizaje; la colectiva exige mayor coordinación logística y estandarización, pero ofrece mayor impacto urbano (densidad y eficiencia territorial). La adecuación de cadenas de suministro y la coordinación entre industria y construcción resultan esenciales para superar barreras logísticas que hoy frenan la expansión de estos sistemas de prefabricación. Mirando al futuro, se observa un marco normativo cada vez más propicio, con criterios Do No Significant Harm (DNSH) y el Documento Básico de Sostenibilidad Ambiental (DBSA) que próximamente entra en vigor, alineando la construcción con objetivos de sostenibilidad global. La arquitectura se revela así como un puente decisivo entre conocimiento y práctica, entre experimentación y replicabilidad: hoy lo impulsan unos pocos por convicción; mañana lo exigirá la necesidad.

Agradecimientos

Desde Bonsai Arquitectos, agradecemos especialmente a los promotores de la vivienda de Ogjares Miguel Ángel García y Yolanda Requena por su compromiso con la bioeconomía de su tierra desde una forma de habitar más consciente, al equipo técnico de MADERGIA por su implicación esencial en la materialización del proyecto, y al equipo científico de LIFE Wood for Future por su impulso decidido a la transferencia de conocimiento y la integración de este caso como demostrador piloto.

Referencias

[1] Basterra, L.-A., et al. Aplicación y difusión de la innovación para la promoción de la construcción en altura con madera en el espacio SUDOE, Fundación CESEFOR, 2022.
[2] Castillo Martín, A., et al. Beneficios de la bioeconomía del chopo en Granada. Diálogos con la Sociedad, Editorial Universidad de Granada, 2019.

[3] Chacón Linares, E.; Llopis García, L.; Nevado, M. R. Edificio de seis apartamentos y locales en calle Cuenca 6-8 de Granada con madera contralaminada. Boletín de Información Técnica, AITIM, 2015 (297), 4-14.
[4] Safarik, D.; Elbrecht, J.; Miranda, W. State of Tall Timber 2022. CTBUH, 2022.
[5] Junta de Andalucía. Consejería de Sostenibilidad y Medio Ambiente. Adecuación del Plan Forestal de Andalucía. Horizonte 2030, aprobación 21 de noviembre de 2023
[6] IberoLAM. Oficina técnica: productos y desarrollo MCLam Mixta.



Figura 1. Visita a la obra del comité científico del Proyecto LIFE Wood For Future e IberoLAM, junto con familia propietaria, los montadores de MADERGIA, y el equipo técnico. Fuente: Bonsai Arquitectos. Figura 2. Tramo de forjado demostrador con vigas MCLam vistas en el estar-comedor de la vivienda de Ogjares. Fuente: Bonsai Arquitectos.

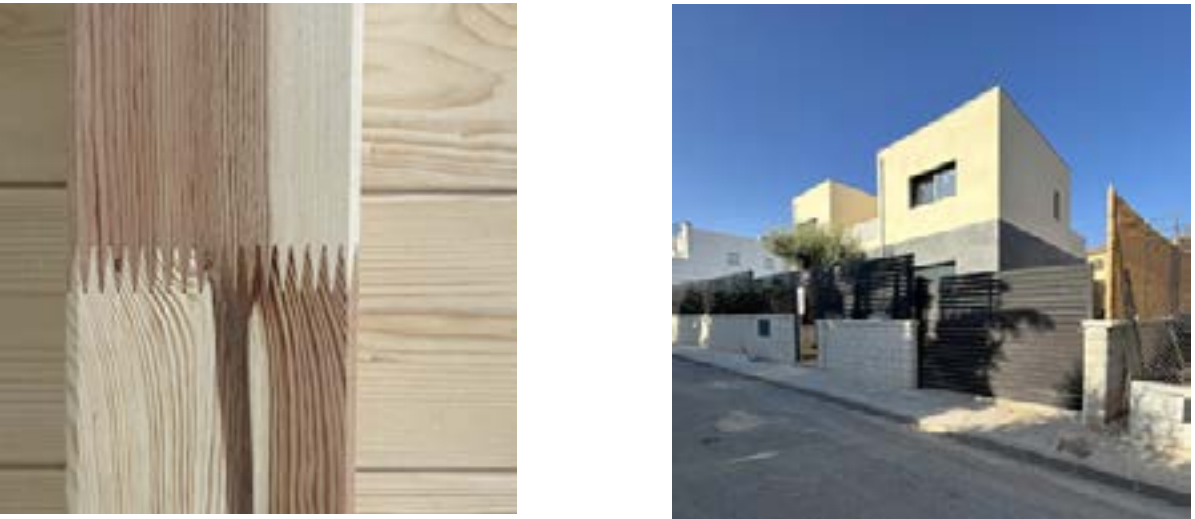


Figura 3. Imagen de detalle de los finger joint en las vigas MCLam. Fuente: Bonsai Arquitectos. Figura 4. Imagen final de la vivienda de Ogjares en su contexto. Fuente: Bonsai Arquitectos.

16. Durabilidad de la madera en construcción. Aproximación española de la norma UNE-EN 460:2023

David Lorenzo^a, Juan Fernández-Golfín^b, Manuel Touza^c, Fernando Peraza^d
^{a, d} AITIM - Asociación de Investigación Técnica de Industrias de la Madera. C/Flora, 2ºD, 28013, Madrid.
^b Instituto de Ciencias Forestales (ICIFOR-INIA), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Ctra. de La Coruña, km 7, 5, Moncloa - Aravaca, 28040, Madrid. ^c XERA-CIS-Madeira, Parque Tecnológico de Galicia, 32901, San Cibrao das Viñas, Ourense.
d.lorenzo@aitim.es

Palabras clave: Durabilidad, vida servicio, productos madera, construcción, normas.

La durabilidad es un factor básico a ser considerado en la construcción con madera, en la durabilidad hay una serie de aspectos clave en la aparición de procesos patológicos biológicos: Clima, clases de uso, durabilidad natural, tratamientos protectores, diseño constructivo, calidad de ejecución de la obra y uso y mantenimiento, que todos ellos y en su conjunto deben ser tenidos en cuenta en la durabilidad final de las construcciones en madera. La norma europea EN 460:2023 se ocupa de la vida de servicio de los productos de madera, especialmente en la construcción, indicando los factores que afectan a la durabilidad biológica y vida de servicio de los elementos de madera; pero no cuantifica la vida de servicio de un producto, que debe considerarse en documentos nacionales. En España se está desarrollando un documento “Durabilidad de la madera y productos de madera en construcción” que establece las clases de uso reales en base a la localización, condiciones climáticas y diseño de una construcción con madera en España, proporcionando una estimación de la vida de servicio de los elementos de madera en función de la clase de uso y adaptada a las condiciones de España.

1. INTRODUCCIÓN

La durabilidad es un factor básico a ser considerado en la construcción con madera. La durabilidad de producto de madera es el período en la que se mantiene en condiciones adecuadas para su uso durante su vida de servicio. Esto depende principalmente de los posibles daños de tipo biológico que puedan aparecer. En la durabilidad hay una serie de aspectos clave en la aparición de procesos patológicos biológicos, principalmente pudriciones causadas por hongos xilófagos, pero también degradaciones causadas por insectos xilófagos. Esos aspectos clave a considerar son: Clima, clases de uso, durabilidad natural, tratamientos protectores, diseño constructivo, calidad de ejecución de la obra y uso y mantenimiento, que todos ellos y en su conjunto deben ser tenidos en cuenta en la durabilidad final de las construcciones en madera. Algunos de estos aspectos están regulados por normas con valores asociados (durabilidad natural y clases de uso) pero otros no (clima o diseño constructivo). La norma europea EN 460:2023 (3) se ocupa de la vida de servicio de los productos de madera, especialmente en la construcción. Indica los factores que afectan a la durabilidad biológica y vida de servicio de los elementos de madera, basada en la información sobre el entorno de uso final y la vida de servicio prevista, en situaciones en las que pueden estar sometidos al ataque de organismos xilófagos La durabilidad de un elemento de madera dependerá del clima, clase de uso, durabilidad, calidad de construcción, uso y mantenimiento. Esta norma es un primer paso para la evaluación de la vida de servicio de un producto en construcción, pero no cuantifica la vida de servicio de un producto, que debe considerarse en documentos nacionales. En España, al amparo de la EN 460:2023 (3) y de la norma francesa FD P 20-651 (4), se está desarrollando un documento “Durabilidad de la madera y productos de madera en construcción” que es una guía para establecer las clases de uso reales en base a la localización, condiciones climáticas y diseño de una construcción con madera, proporcionando una estimación de la vida de servicio de los elementos de madera en función de la clase de uso y adaptada a las condiciones de España.

2. DURABILIDAD DE LAS CONSTRUCCIONES EN MADERA EN ESPAÑA

Clima

El clima es un aspecto fundamental en la durabilidad de las construcciones en madera influyendo especialmente en las de pudriciones causadas por hongos xilófagos, pero también en degradaciones de insectos xilófagos como las termitas subterráneas. Los datos climáticos como la precipitación, temperatura o radiación solar, se relacionan con el riesgo de pudrición de la madera y se utilizan como herramientas de predicción de riesgo de ataques de hongos xilófagos a través de diferentes indicadores como el Índice de Scheffer (8) o el número de días al año con precipitación > 1 mm (4). En España hay una gran variación climática entre el norte y el resto de España. El norte es un clima húmedo y cálido con Índice de Scheffer >65 y P>1 mm más de 125-150 días, y en el resto de España el clima es seco y calor/frío con el Índice de Scheffer 0-30 P>1 mm menos de 20-75 días. De esta forma, en el norte de España

se dan las condiciones climáticas mas favorables para el desarrollo y ataque de los hongos xilófagos de la madera, siendo la zona con mayor riesgo de pudriciones que afectan de forma muy importante a la durabilidad de los elementos de madera en construcción.



Mapa 1 y 2: Índice Scheffer (izquierda) y número de días con precipitación > 1mm (derecha), en España.

Clima local y microclima

Es importante remarcar la importancia del clima local y microclima en la durabilidad de los elementos de madera en construcción (6). Aspectos como humedades relativas elevadas (costas, ríos, embalses, zonas de nieblas, ...), fachadas expuestas a vientos dominantes o la radiación solar, tienen una gran influencia en la durabilidad final del elemento de madera en la construcción.

Localización geográfica

La presencia de organismos xilófagos de la madera depende de la localización geográfica. En España todos los organismos xilófagos (hongos e insectos) están presentes. Mapas 3 y 4 (6) muestran la distribución geográfica de insectos xilófagos en Europa.



Mapas 3 y 4: Distribución de insectos de ciclo larvario y termitas en Europa (ClickDesign Project).

Durabilidad natural y durabilidad conferida

La madera por naturaleza orgánica puede ser degradada por agentes biológicos (hongos xilófagos, insectos xilófagos y xilófagos marinos). La durabilidad natural de la madera es la resistencia natural a ser atacada por agentes biológicos. La norma europea EN 350:2016 (1) proporciona los datos de durabilidad natural de las especies comerciales de madera. La durabilidad se puede implementar a través de tratamientos adecuados con productos protectores, modificación de la madera u otros. La selección de productos de madera clasificados como durables o con durabilidades conferidas adecuadas para la clase de uso donde se va a instalar, es un aspecto fundamental para lograr una buena durabilidad en el tiempo en las construcciones con madera.

Clases de uso

El concepto de clase de uso está relacionado con la exposición y el riesgo de que un elemento de madera sea atacado por agentes biológicos y depende básicamente de la humedad. La norma europea EN 335:2013 (2) define 5 clases de uso que representan las diferentes situaciones en que puede estar expuesto un elemento de madera. La correcta identificación de la clase de uso donde se va a instalar un elemento de madera es un aspecto fundamental en la durabilidad final de la construcción en madera.

Use class	General use situation	Occurrence of biological agents				
		Discolouring Fungi	Wood destroying fungi	Beetles	Termites	Marine borers
1	Interior, dry	-	-	U	L	-
2	Interior, or under cover, not exposed to the weather. Risk of condensation	U			L	-
3	Exterior, above ground, exposed to the weather. 3.1 Limited wetting conditions 3.2 Prolonged wetting conditions	U	U	U	L	-
4	Exterior in ground contact and/or fresh water	U	U	U	L	-
5	permanently or regularly submerged in salt water	U	U	U	L	U

U = ubiquitous in Europe and EU territories
L = locally present in Europe and EU territories

Tabla 1: Clases de uso norma europea EN 335:2013.

Protección por diseño

Los detalles de diseño constructivo tienen un significativo impacto en la durabilidad del elemento de madera en la construcción (6), principalmente frente a las degradaciones causadas por los hongos, pero también frente a las termitas subterráneas. Un buen diseño constructivo debe limitar el tiempo de humectación de la madera, evitando la humectación o facilitando el rápido secado (7 y 8). La protección por diseño incluye detalles constructivos como la separación de la madera de suelos y muros, protección física de los elementos de madera, etc., que siempre deben estar adaptados a las condiciones particulares de cada construcción.

Calidad de la construcción

Las buenas prácticas de construcción son un factor importante en la durabilidad de las construcciones en madera (3). Aspectos como un adecuado almacenamiento y manejo de los elementos de madera en la obra y una protección provisional durante la construcción, protegen a los elementos de madera de la humectación de la aparición de procesos patológicos.

Uso y mantenimiento

Un adecuado uso y mantenimiento de las construcciones en madera, evitan o retrasan la aparición de procesos patológicos, favoreciendo una mayor durabilidad en el tiempo de los elementos de madera (3). Un adecuado uso (evitando condensación o problemas de humedad) y mantenimiento de la vivienda es básico para lograr una mayor durabilidad en el tiempo de las construcciones en madera.

3. CONCLUSIONES

En la durabilidad y vida de servicio esperada de las construcciones en madera hay una serie de aspectos clave en la aparición de procesos patológicos biológicos, principalmente pudriciones causadas por hongos xilófagos, pero también degradaciones causadas por insectos xilófagos. Esos aspectos clave a considerar son: Clima, clases de uso, durabilidad natural, tratamientos protectores, diseño constructivo, calidad de ejecución de la obra y uso y mantenimiento, que todos ellos y en su conjunto deben ser tenidos en cuenta en la durabilidad final de las construcciones en madera. Algunos de estos aspectos están regulados por normas con valores asociados (durabilidad natural y clases de uso) pero otros no (clima o diseño constructivo). La norma europea EN 460:2023 (3) es una guía en relación a los factores que afectan a la durabilidad y vida de servicio de los elementos de madera en construcción en aquellas situaciones que pueden estar sujetos a degradaciones de hongos e insectos. La durabilidad de cada elemento de madera tendrá un ratio que dependerá del clima, clase de uso, durabilidad, calidad de construcción, uso y mantenimiento. Esta norma es un primer paso para la evaluación de la vida de servicio de un producto en construcción, pero no cuantifica la vida de servicio de un producto, que debe hacerse en documentos nacionales. En España, al amparo de la EN 460 (3) y de la norma francesa FD P 20-651 (4), se está desarrollando un documento “Durabilidad de la madera y productos de madera en construcción” que es una guía para establecer las clases de uso reales en base a la localización, condiciones climáticas y diseño de una construcción con madera en España, proporcionando una estimación de la vida de servicio de los elementos de madera en función de la clase de uso.

Referencias

- (1) EN 350: 2016 “Durability of wood and wood-based products - Testing and classification of the durability to biological agents of wood and wood-based materials”.
- (2) EN 335: 2013 “Durability of wood and wood-based products. Use classes: definitions, application to solid wood and wood-based products”.
- (3) EN 460:2023 “Durability of wood and wood-based products- Guide to the durability requirements for wood”.
- (4) Norm FD P 20-651 2011: “Durability of wood products and works”.
- (5) CTE: 2009. Spanish Technical Code of Building.

(6) Suttie, E. European Project. Performance Based Specification of Wood – Project CLICKdesign.
(7) Fernández-Golfín, J. Project MadExter. Evaluation of functional behaviour of wood in outdoor above ground applications. BIA-2013-42434R.
(8) Fernández-Golfín, J, Larrumbide, E, Ruano, A, Galván, J, Conde, M (2016): Wood decay hazard in Spain using the Scheffer index: Proposal for an improvement. Eur. J. Wood Prod, 74(4), 591-599. DOI: 10.1007/s00107-016-1036-z.

17. Sistema estructural mixto integral madera-hormigón con conexión a rasante mediante tableros perforados

Dolores Otero-Chans^a, Javier Estévez-Cimadevila^a, Emilio Martín-Gutiérrez^a, Félix Suárez-Riestra^a, José A. Vázquez-Rodríguez^a
^a Universidade da Coruña, GEA-GEM, ETSAC, Centro de Innovación Tecnolóxica en Edificación e Enxeñaría Civil (CITEEC). Campus de Elviña, 15071. A Coruña, Spain/España.
dolores.otero.chasn@udc.es

Palabras clave: sistemas mixtos madera-hormigón, conexión a rasante, CLT-hormigón, ensayos destructivos.

Los sistemas mixtos madera-hormigón constituyen una solución de gran interés debido al uso sinérgico de los materiales, que posibilita limitar el consumo de hormigón y potenciar el rendimiento estructural de la madera. La base del comportamiento de estos sistemas radica en el diseño de la conexión a rasante entre los materiales, para la que se han diseñado múltiples soluciones. Esta investigación se ha centrado en la caracterización de una conexión a rasante basada en la realización de perforaciones en los tableros de madera que conforman los elementos estructurales del sistema y que son atravesados por el hormigón vertido en fresco. Con esta solución no son necesarios conectores metálicos adicionales o adhesivos estructurales para resolver la transferencia de esfuerzos rasantes, o para evitar la posible separación de materiales que podría producirse en una solución con entalladuras. El sistema ofrece una solución integral para toda la estructura, incluyendo soportes, vigas y elementos de forjado. Los ensayos realizados con tableros de madera contrachapada perforados y hormigón reforzado con fibras han constatado la enorme resistencia y rigidez de la conexión a rasante, validando la base del sistema. Se han realizado adicionalmente ensayos en piezas flectadas tipo forjado con sección en I y luces entre 6.0 y 8.4 metros, realizadas con alas inferiores de madera laminada encolada, alas superiores de hormigón y almas de tableros contrachapados con perforaciones para posibilitar la conexión a rasante con el hormigón. Parte de estas piezas se ensayaron posteriormente en voladizo, invirtiendo la ley de tensiones en la madera y el hormigón. La investigación de este sistema mixto se extendió a la comparación entre una viga biapoyada y una porticada en solución de continuidad con soportes mixtos. El conjunto de los resultados ha permitido validar la propuesta para sistemas estructurales íntegramente conformados por soluciones mixtas madera-hormigón. En la actualidad, se están estudiando alternativas materiales con otro tipo de paneles estructurales y hormigones con áridos reciclados que permitan incrementar la sostenibilidad de la solución.

Descripción del sistema

El sistema posibilita el diseño integral de estructuras de edificación. Por una parte, el uso de componentes de madera posibilita un elevado nivel de prefabricación con un rápido y sencillo montaje en obra. Por otra parte, el vertido en fresco del hormigón garantiza la continuidad entre todos los elementos estructurales y la estabilidad lateral del conjunto.

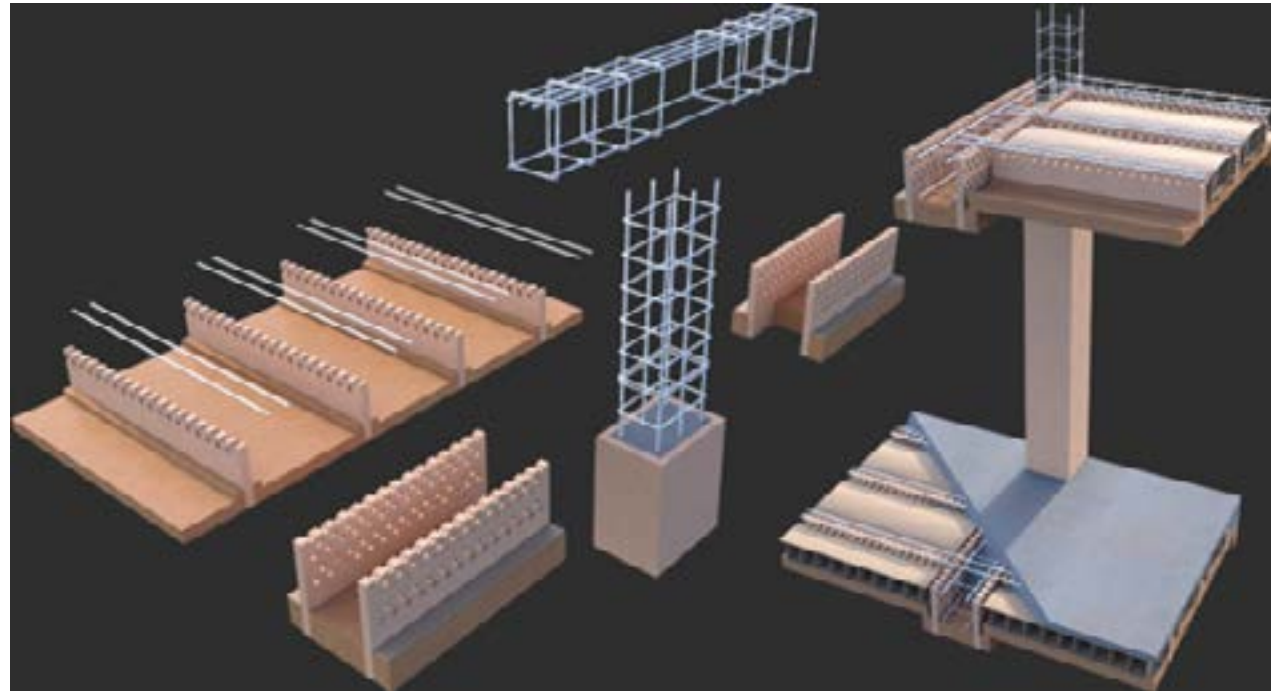


Figura 1. Elementos constitutivos del sistema estructural y proceso de montaje.

El proceso de montaje y los elementos que componen el sistema se describen en la Fig.1. Los soportes se conforman a partir de secciones en cajón de madera que incorporan entalladuras o rebajes en su interior. Los cajones actúan como encofrado colaborante para los soportes mixtos, y las entalladuras posibilitan la transmisión de esfuerzos entre la madera y el hormigón que posteriormente se verterá en el interior de los cajones. Asimismo, estas secciones en cajón cuentan con la capacidad portante necesaria para soportar las cargas correspondientes a la fase de montaje y vertido del hormigón de la planta que soportan. Los elementos tipo viga se conforman a partir de secciones prefabricadas de madera en forma de pi, es decir, con un ala inferior de madera y dos almas verticales. En las almas se realizan perforaciones pasantes que serán atravesadas por el hormigón fresco que, una vez endurecido,

actuará como elemento de transmisión de esfuerzos rasantes de la sección mixta. En el espacio entre almas se alojan armaduras para conformar una sección de hormigón armado que trabaja en continuidad con los soportes y confiere un elevado grado de estabilidad lateral a la estructura. El ala inferior sobresale de las almas para posibilitar el apoyo de las piezas de madera que conforman los forjados. Estas piezas de madera que sirven de base a los forjados se prefabrican también en forma de pi invertida, incorporando en las alas las perforaciones para generar la conexión de rasante con la losa superior de hormigón. De este modo, los elementos de madera que componen el sistema, totalmente prefabricados y autoportantes en fase de construcción, posibilitan un montaje muy rápido, con limitados medios auxiliares debido a su ligereza, y constituyen al mismo tiempo un encofrado colaborante con el sistema mixto final. Sobre los forjados se añaden piezas de aligeramiento y, una vez dispuestos los armados de soportes, vigas y negativos de forjados, se realiza el vertido del hormigón. Sobre los forjados se dispone una capa mínima de 50 mm de hormigón, lo que permite limitar el peso propio de la solución, que ronda los 2.0 kN/m² para luces de forjado habituales. El proceso se repite para conformar de forma sencilla edificios en altura (Fig.1).

El sistema estructural en su conjunto ofrece enormes ventajas, entre otras: permite resolver con la misma solución todos los elementos estructurales; posibilita un elevado grado de prefabricación de todos los componentes de madera, con módulos ligeros que se montan de forma sencilla en obra sin necesidad de medios auxiliares complejos; el peso propio de los forjados es reducido, debido a la gran inercia aportada por las secciones en cajón, que también permite incorporar aislamiento; el progreso en altura de una edificación de varias plantas no está condicionado por el vertido y endurecimiento del hormigón; las piezas de madera permiten la aplicación sencilla de una contraflecha en obra; la continuidad del hormigón en vigas, soportes y forjado da lugar a conexiones semirrígidas que dotan de estabilidad lateral a la estructura y conforman un diafragma rígido en los planos de forjado; la conexión de rasante se resuelve con los rebajes realizados en la madera y no precisa de elementos metálicos adicionales para evitar la separación madera-hormigón, ofreciendo una acción compuesta casi total de la sección mixta.

Resultados experimentales

Una extensa campaña experimental ha posibilitado la validación de las propiedades del sistema (Fig.2). Inicialmente se realizaron ensayos para verificar el comportamiento de la conexión a rasante entre tableros de madera perforados y hormigón. Se ensayaron diferentes tableros de madera, con diferentes disposiciones y patrones de taladros (1). Se optó finalmente por el uso de tableros de contrachapado de abedul de 40 mm, que proporcionaron elevados valores de resistencia y rigidez, con módulos de deslizamiento que indicaban un comportamiento rígido de la conexión a rasante madera-hormigón. Posteriormente, se ensayaron elementos biapoyados tipo forjado con luces entre 6 y 8.4 metros (2). Las piezas ensayadas tenían secciones en doble T, para simplificar la ejecución de los ensayos, aunque en una construcción real podrían fabricarse en módulos con múltiples nervios para acelerar el montaje, como se ha indicado. Los forjados se fabricaron con una relación luz/canto de 24, demostrando holgadamente

su rigidez a flexión para cargas de uso público. Porciones de estos forjados fueron ensayadas posteriormente en una configuración de voladizo con una relación vuelo/canto de 6 (3). El objetivo era evaluar el comportamiento de los forjados en zonas de continuidad que dan lugar a momentos negativos, generando una inversión de los esfuerzos habituales en soluciones biapoyadas. Los ensayos confirmaron una rigidez elevada, cumpliendo con los niveles de confort exigidos en términos de vibraciones. Los elementos en voladizo fallaron por fisuración del hormigón y tracción en el tablero de alma, al contrario de los elementos biapoyados que fallaron por tracción en el ala inferior de madera. Estos resultados refuerzan la necesidad de incrementar el análisis de las soluciones mixtas madera-hormigón trabajando en continuidad y/o frente a momentos negativos.

Con este objetivo en mente, se realizó un ensayo comparativo del comportamiento a flexión de una viga biapoyada y una viga unida en continuidad con soportes mixtos, simulando la vinculación real en el sistema integral diseñado. La viga tenía una luz de 5,9 metros y se demostró que la vinculación con los soportes extremos permitía reducir las deformaciones a la mitad frente a cargas gravitatorias (4). El comportamiento frente a acciones laterales está pendiente de estudio, pero se espera prometedor debido a la continuidad del hormigón en soportes y vigas y al diafragma rígido generado por la losa continua de hormigón sobre los forjados. En la actualidad, están en fase de realización los ensayos de compresión de los soportes mixtos. Los ensayos preliminares han demostrado un eficaz efecto de confinamiento del hormigón generado por los cajones exteriores de madera que permite incrementar significativamente la carga de los soportes mixtos en relación con los soportes aislados de hormigón.

Los elementos tipo forjado y tipo viga están siendo sometidos en la actualidad a ensayos de larga duración bajo cargas mantenidas, con el objetivo de evaluar el efecto de la fluencia sobre las secciones mixtas.



Figura 2. Estudio experimental de la solución mixta con tableros contrachapados de alma.

Perspectivas de futuro

El sistema mixto descrito constituye una solución que posibilita el diseño de estructuras con un elevado grado de prefabricación y que reduce el volumen de hormigón necesario, ofreciendo una solución con un elevado grado de estabilidad y rigidez. Con el objetivo de incrementar aún más la sostenibilidad y replicabilidad de la solución, se ha planteado la evaluación del sistema utilizando para su fabricación madera de proximidad y/o fácil disponibilidad y hormigón con áridos reciclados. Tras valorar la limitada disponibilidad de tableros estructurales de producción local, se optó por evaluar la posibilidad de utilizar paneles de madera contralaminada (CLT) realizados con madera de pino nacional fabricados en nuestra comunidad autónoma. Se realizaron inicialmente tres tipos de ensayos en piezas de tamaño reducido con el objetivo de modelar el comportamiento de los paneles en tres situaciones diferentes de cortante: ensayos de cortante por cizallamiento en el plano del panel, ensayos de rasante CLT-hormigón utilizando el sistema de perforaciones en los paneles para la conexión entre los materiales y ensayo de

vigas cortas con sección doble T conformadas con alas de paneles CLT (5). Estos últimos ensayos permitieron evaluar el comportamiento de los paneles trabajando a cortante por flexión y el comportamiento de la unión encolada ala-alma (Fig.3). En la actualidad se están realizando ensayos de elementos biapoyados tipo viga y tipo forjado de 6.0 metros de luz. Adicionalmente, se han diseñado nudos viga-forjado, para valorar la rigidez de la conexión extrema de los forjados cuando están sometidos a flexión negativa.



Figura 3. Estudio experimental del comportamiento de la solución mixta con tableros CLT.

Referencias

(1) Estévez-Cimadevila, J.; Martín-Gutiérrez, E.; Suárez-Riestra, F.; Otero-Chans, D.; Vázquez-Rodríguez, J.A. Timber-concrete composite structural flooring system. Journal of Building Engineering. 2022, 49, 104078.

(2) Martín-Gutiérrez, E.; Estévez-Cimadevila, J.; Suárez-Riestra, F.; Otero-Chans, D. Flexural behaviour of a new timber-concrete composite structural flooring system. Full scale testing. Journal of Building Engineering. 2023, 64, 105606.

(3) Estévez-Cimadevila, J.; Suárez-Riestra, F.; Martín-Gutiérrez, E.; Otero-Chans, D. Full scale testing of timber-concrete composite floors in an overhanging configuration. Engineering Structures. 2023, 291, 116460.

(4) Otero-Chans, D.; Suárez-Riestra, F.; Martín-Gutiérrez, E.; Estévez-Cimadevila, J. Experimental and numerical analysis of a full-scale timber-concrete-composite beam from simply supported to frame-connected. Engineering Structures. 2025, 327, 119624.

(5) Otero-Chans, D.; Suárez-Riestra, F.; Martín-Gutiérrez, E.; Estévez-Cimadevila, J. Behavior of cross-laminated timber panels under different shear loading scenarios. Journal of Building Engineering. 2025, 111, 113066.

18. Bioeconomía Circular en Territorios de Montaña: Avances del Proyecto PRISMA en Madera Contralaminada y Residuos de Aserraderos

Rayder Leonardo^{a*}, José Manuel Cabrero^a, Jordi Gené^b, Eduard Correal Mòdol^b, M. Pilar Giraldo^b
^a Cátedra Madera ONESTA, Universidad de Navarra (UNAV), Campus Universitario, 31009 Pamplona. ^b Institut Català de la Fusta (INCAFUST), Centre de Ciència i Tecnologia Forestal de Catalunya, Ctra. Sant Llorenç de Morunys, km 2. 25280, Solsona, Lleida.
* rleonardola@unav.es

Palabras clave: Madera contralaminada (CLT), residuos de aserraderos, bioeconomía circular, modelado numérico, sistemas constructivos de madera.

Esta presentación muestra los avances relacionados con productos para la construcción dentro del Proyecto PRISMA que tiene como objetivo dinamizar el uso de la madera local en contextos rurales de montaña, tomando como regiones de demostración Cataluña, Navarra y País Vasco. Aunque esta ponencia se centre en la parte relacionada como construcción, el proyecto tiene un enfoque más amplio y global, desde la gestión forestal hasta la producción de productos a partir de maderas locales y residuos del procesado. A través de una gestión forestal adaptativa y multifuncional, se busca valorizar especies autóctonas y residuos madereros, generando nuevos productos para la construcción y fomentando una bioeconomía circular.

En lo relacionado con la construcción, el proyecto se articula en torno a dos líneas principales. La primera se centra en el desarrollo de paneles CLT híbridos utilizando combinaciones de haya (*Fagus sylvatica*) y pino silvestre (*Pinus sylvestris*), dos especies locales en las regiones de estudio. La segunda línea se concreta en el desarrollo de Fustablock, un sistema modular de bloques de madera fabricados a partir de residuos de aserradero. Este producto busca ofrecer una solución constructiva sencilla, desmontable y de bajo impacto ambiental, alineada con los principios del “upcycling” y el diseño para desmontaje.

Ambas iniciativas abordan no solo evaluar el rendimiento técnico de los productos, sino también la generación de valor añadido territorial, la reducción de residuos y la sustitución de materiales convencionales con alta huella de carbono.

1.Introducción

En un escenario de transición ecológica, las soluciones constructivas deben evolucionar hacia modelos más sostenibles, reversibles y conectados con los recursos del territorio. En este sentido, la madera emerge como un material estratégico, tanto por su renovabilidad como por su capacidad de almacenar carbono.

El proyecto PRISMA se enmarca dentro de este cambio de paradigma. Su objetivo principal es fortalecer las cadenas de valor forestales de circuito corto y fomentar una bioeconomía circular sostenible en territorios de montaña. A través de una gestión forestal multifuncional adaptativa, PRISMA busca optimizar el uso de los recursos naturales, contribuir a la mitigación del cambio climático y generar nuevas oportunidades de desarrollo económico local.

El proyecto está coordinado por la Mancomunitat de Municipis Berguedans per a la Biomassa (MMBB), y en él colaboran el Centre de Ciència i Tecnologia Forestal de Catalunya (CTFC), Baskegur, Foresna Zurgaia y la Universidad de Navarra. PRISMA cuenta con el respaldo de la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia, financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU.

Navarra, Cataluña y el País Vasco (y esta reflexión podría extenderse al resto de España) comparten un importante recurso forestal que aún no ha sido completamente integrado en la industria de la construcción. Aunque disponen de especies con buenas prestaciones estructurales, gran parte de la madera se sigue destinando a productos de bajo valor o usos energéticos. En paralelo, los residuos de aserraderos —como recortes y virutas— continúan infrautilizados, a pesar de su potencial para nuevos desarrollos tecnológicos.

El proyecto PRISMA nace con la vocación de revertir esta situación, desarrollando productos constructivos innovadores que partan de recursos locales y que puedan ser utilizados en aplicaciones reales, desde viviendas hasta equipamientos comunitarios.

Por ello, en el ámbito constructivo, PRISMA persigue la valorización de especies de maderera locales mediante el desarrollo de productos constructivos innovadores. Entre las acciones se encuentran el diseño de paneles de CLT híbrido utilizando haya (*Fagus sylvatica*) y pino silvestre (*Pinus sylvestris*) locales, así como el desarrollo de Fustablock, un sistema de bloques modulares fabricados con residuos de aserraderos.

2.CLT híbrido: diseño y planificación experimental

Una de las acciones más destacadas del proyecto consiste en el diseño de paneles de madera contralaminada

(CLT) empleando configuraciones híbridas de haya y pino silvestre, ambas especies disponibles localmente. El planteamiento parte de una hipótesis: combinar una madera de frondosa con una de conífera puede equilibrar las prestaciones mecánicas y mejorar la eficiencia de recursos sin comprometer el rendimiento estructural. Estudios previos (1), (2) demuestran las mejores prestaciones mecánicas resultantes al mezclar diferentes especies en la fabricación del tablero CLT.

Se ha optado por paneles de tres capas, con una configuración de espesores 20–40-20 mm. Como se muestra en la Tabla 1, se analizan cuatro combinaciones distintas, incluidas configuraciones monoespecie de referencia, y las combinaciones de frondosa (D) y conífera (C).

Tabla 1. Resumen de configuraciones (C=conífera; D=frondosa)

ID	Configuración	Panel	Especies
1	DDD	Monoespecie	Haya
2	DCD	Hibrido	Haya/Pino/Haya
3	CDC	Hibrido	Pino /Haya/ Pino
4	CCC	Monoespecie	Pino

Actualmente, los tableros están en fase de fabricación. Una vez listos, se realizarán los ensayos mecánicos establecidos por la norma EN 16351:2021. Los resultados experimentales permitirán evaluar el comportamiento hasta el fallo y determinar las propiedades mecanicas.

En paralelo, se ha desarrollado un modelo numérico en RFEM6 (Dlubal), basado en elementos finitos, que se validará con los resultados experimentales. Esto permitirá generar herramientas de análisis y diseño para su futura aplicación estructural.

3.Fustablock: modularidad y reutilización de residuos

La segunda línea de trabajo se centra en el desarrollo de Fustablock, un sistema modular de bloques de madera concebido para facilitar construcciones sencillas, desmontables y de bajo impacto ambiental. Su singularidad radica en que se fabrica utilizando residuos de aserradero, como recortes, virutas y madera fuera de especificación, habitualmente considerados subproductos de bajo valor.

Según datos de Eurostat (3), el sector de la construcción y demolición es responsable de más del 35 % del total

de residuos generados en la Unión Europea. Dentro de este flujo, los residuos de madera alcanzan cerca de 50 millones de toneladas anuales, pero menos del 50 % se recicla como material; el resto se destina principalmente a valorización energética o a vertederos. Este contexto refuerza la necesidad de explorar soluciones que, como Fustablock, permitan revalorizar dichos residuos mediante la incorporación de sistemas constructivos.

Existen ya varios sistemas en Europa que comparten esta visión constructiva basada en bloques estructurales de madera reutilizables. El sistema belga Gablok (4), los bloques suizos-españoles Steko (5) y la propuesta francesa Brikawood (6) demuestran que la construcción modular, desmontable y sin adhesivos es una realidad técnica viable, alineada con los principios de circularidad, rapidez constructiva y bajo impacto ambiental.

Fustablock representa un ejemplo claro de upcycling estructural, al transformar material descartado en componentes constructivos estandarizados, reutilizables y con una nueva vida útil. El cual, se alinea con los principios del diseño para desmontaje (Design for Disassembly, DfD), facilitando su reutilización y desmontaje sin pérdida de valor estructural.

El sistema está concebido para la construcción de muros estructurales de baja carga, lo que permite emplear maderas sin clasificar ni laminar. El diseño permite el ensamblaje mediante encajes mecanizados, sin necesidad de colas ni tornillería. Este ha sido analizado mediante simulación por elementos finitos (FEM) para evaluar su capacidad portante. Como se muestra en las figuras 1 y 2, se ha estudiado el comportamiento del encaje en la dirección longitudinal de la fibra. Está previsto realizar ensayos de carga sobre piezas individuales y muros completos, evaluando su comportamiento frente a sollicitaciones verticales y horizontales.

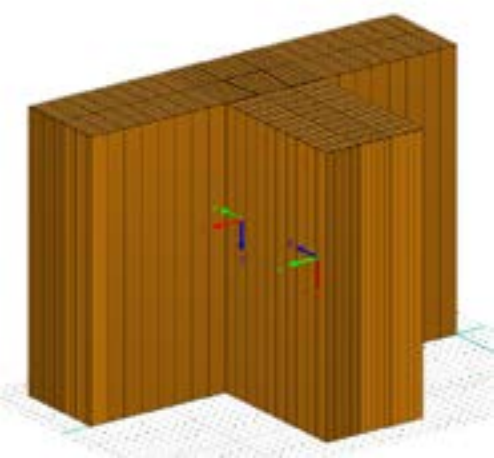


Figura 1. Visión del modelo digital del encaje entre dos tablas del sistema.

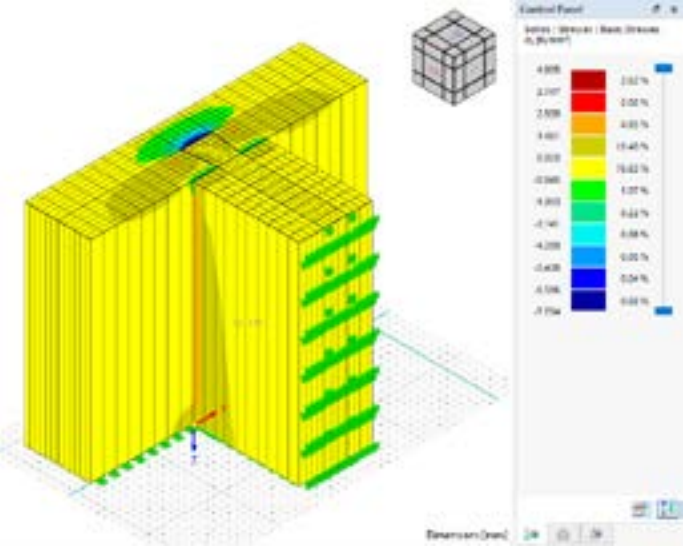


Figura 2. Resultados numéricos de las tensiones longitudinales del encaje entre dos tablas.

4.Conclusiones

Los desarrollos en CLT híbrido y Fustablock permiten avanzar hacia una construcción más sostenible, conectada con el territorio y centrada en el aprovechamiento inteligente de la madera local. Estas soluciones, aún en fase de validación, representan un camino tangible hacia una economía circular en zonas rurales, con beneficios estructurales, ambientales y sociales. PRISMA demuestra que la innovación en madera es clave para un futuro más resiliente.

Agradecimiento

El proyecto PRISMA cuenta con el apoyo de la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR) financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU.

Referencias

(1) Fabrizio, C., Sciomenta, M., Spera, L.,De Santis, Y., Pagliaro, S., Di Egidio, A., Fragiacomio, M. (2023) Experimental investigation and beam-theory-based analytical model of cross-laminated timber panels buckling behavior. Archives of Civil and Mechanical Engineering 23, 172 (2023). <https://doi.org/10.1007/s43452-023-00713-8>Fabrizio, C., Sciomenta, M., Spera, L., Santis, Y. D., & Pagliaro, S. (2023). Experimental investigation and beam theory based analytical model.

(2) Sciomenta, M., Spera, L., Bedon, C., Rinaldi, V., Fragiacomio, M., Romagnoli, M. (2021) Mechanical characterization of novel Homogeneous Beech and hybrid Beech-Corsican Pine thin Cross-Laminated timber panels, Construction and Building Materials, 271 (2021), 121589, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121589>.

(3) Eurostat (2025), https://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained/index.php?title=Waste_statistics Fecha de acceso: 3-julio-2025

(4) Gablok (2025), <https://gablok.be/en> Fecha de acceso: 3-julio-2025

(5) ISteko (2025), <https://iydvogel.com/servicios-y-actividades/steko-espana/> Fecha de acceso: 3-julio-2025

(6) Brikawood (2025). (s.f.). Obtenido de brikawood: <https://brikawood.com/> Fecha de acceso: 3-julio-2025

19. Ethris, elemento modular de construcción

Carlo Micheletti^a, Francesco Verzura^b
^aOpera Mista Srl, Via San Rochino 99/A 25123 Brescia (Italia); ^bOpera Mista Iberica SL, c/José del Toro 1-3, 3º1, 11001 Cádiz (España).
francesco.verzura@operamista.es

Palabras clave: construcción, madera, modular, gestión forestal.

En respuesta a las políticas actuales de la Unión Europea, el sector de la construcción debe actualizarse rápidamente para cumplir con los objetivos establecidos en cuanto a sostenibilidad, eficiencia energética y transformación digital. Fruto del trabajo conjunto de empresas y profesionales de múltiples sectores, cuyo objetivo es aunar la buena gestión forestal a la innovación en el ámbito de la construcción, ha resultado en la creación de un sistema estructural patentado como Ethris.

Ethris está diseñado para adaptarse a cualquier tipo de arquitectura. De acuerdo con análisis estructurales preliminares, el sistema es capaz de absorber las cargas sísmicas de una estructura de hasta tres plantas, redistribuyéndolas de forma prácticamente uniforme hacia la base.

Ethris favorece la creación de viviendas naturales de alto rendimiento energético y sísmico. Este procedimiento revitaliza la cadena productiva forestal, revaloriza el patrimonio ambiental y permite una auténtica recuperación de la gestión forestal.

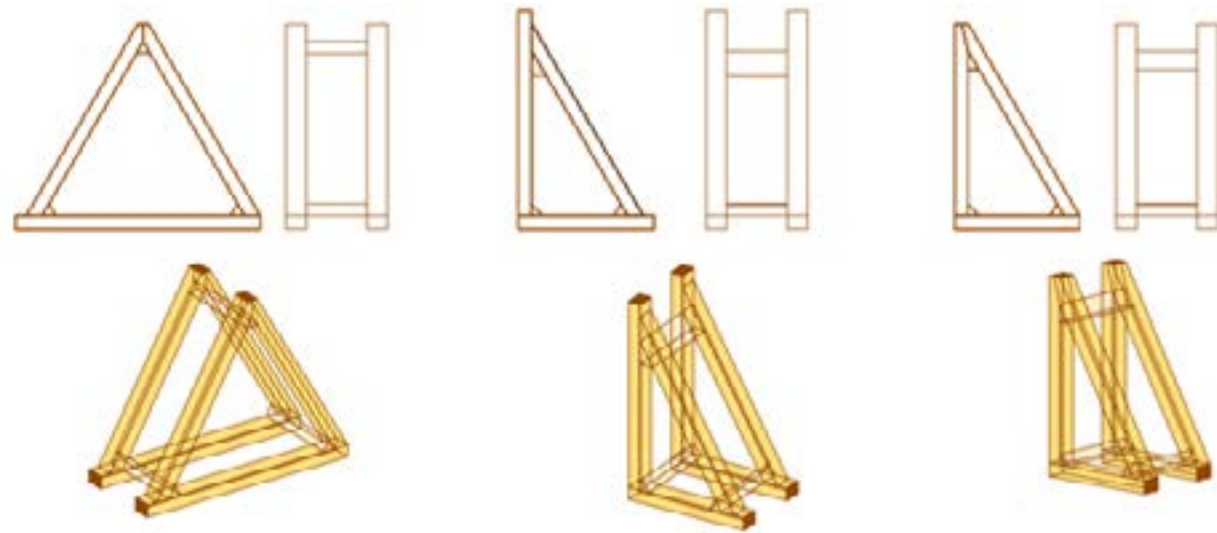


Figura 1. Marco estructural triangular Ethris en sus tres diferentes módulos

Recuperación del patrimonio forestal y gestión de los bosques

El objetivo principal de Ethris es el compromiso con una buena gestión forestal, poniendo en el centro las intervenciones de silvicultura natural y las relaciones entre las personas.

Aunque Ethris nace con el objetivo de maximizar el aprovechamiento de la madera de castaño, su estructura puede ser realizada con cualquier tipo de madera apta a la construcción.

Los castaños italianos, abandonados desde hace años, presentan un alto porcentaje de troncos con defectos de acebolladura (una abertura a lo largo de las fibras del tronco, presente en aproximadamente el 90% de los troncos talados).

Antes de Ethris, estos troncos no se podían utilizar en la construcción y se destinaban a mercados secundarios, empobreciendo la cadena de valor forestal.

Ethris emplea elementos de secciones y longitudes reducidas, que provienen de la recuperación del 70% de partes del tronco no afectadas por la acebolladura que, durante el procesamiento del castaño para la construcción, son descartadas para mercados secundarios.



Figura 2. Edificio de tres plantas en fase de construcción en Padenghe sul Garda, Brescia.

Con este procedimiento se puede revitalizar la cadena de valor forestal y revalorizar el patrimonio ambiental, permitiendo una recuperación real de la gestión forestal del bosque.

En Italia, a través de la red de empresas Si Parte Dal Bosco, se han impulsado encuentros en el bosque entre leñadores, constructores y proyectistas: esta experiencia ha hecho comprender que una buena gestión forestal comienza en el bosque, continúa con una planificación capaz de trabajar con lo que la naturaleza nos ofrece y se desarrolla con constructores apasionados en la edificación de viviendas naturales con altas prestaciones energéticas y sísmicas.

Estas construcciones ayudan a afrontar el cambio climático, a revalorizar los territorios y el trabajo del ser humano en el bosque.

Un elemento estructural

Ethris está formado por una estructura modular de forma triangular, compuesta por elementos de madera maciza. Estos elementos triangulares conforman su esqueleto y le confieren tridimensionalidad a través de travesaños en sus vértices, los cuales definen el espesor de la pared.

La geometría triangular constituye el sistema de arriostramiento y proporciona una alta rigidez frente a cargas horizontales, mientras que las cargas de compresión se transmiten por contacto directo entre los triángulos.

Las cargas de tracción, en cambio, se distribuyen eficazmente desde cada nodo hacia los cinco elementos estructurales adyacentes mediante el innovador conector Asterisk, asegurando una redistribución uniforme de los esfuerzos hacia la base de la estructura.

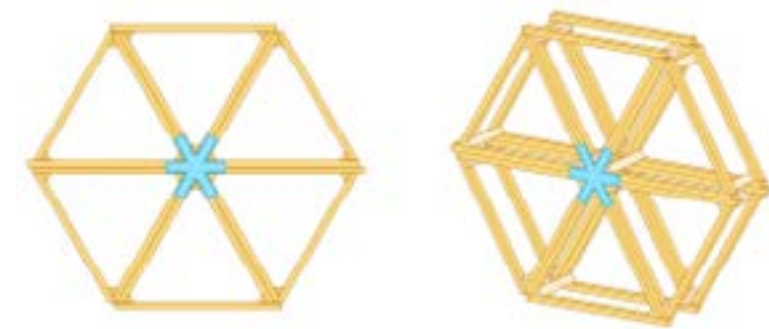


Figura 4. Alzado y vista tridimensional de elementos modulares ensamblados con conector "Asterisk"

Asterisk puede ser realizado en acero y conectado a Ethris con clavos o con materiales FRP (polímeros reforzados con fibras) y encolado a la madera con resinas apósit.

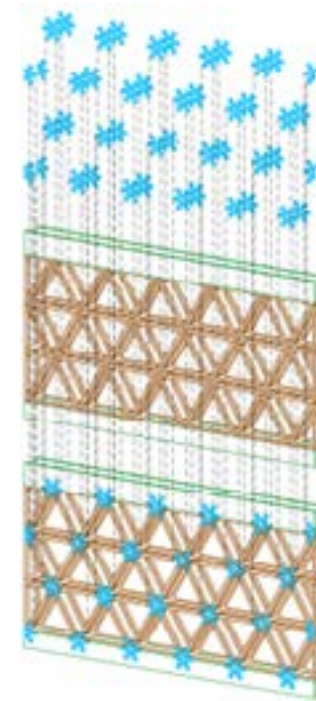


Figura 5. Esquema de construcción de una pared con elementos modulares.

Los análisis estructurales ejecutados indican que el sistema Ethris, en su configuración base y con las dimensiones estructurales correspondientes, es capaz de soportar acciones sísmicas equivalentes a las previstas para edificaciones de hasta tres plantas sobre rasante ubicadas en zona sísmica 1 (la de mayor peligrosidad sísmica en la normativa italiana, con aceleración $ag/g > 0,35$ con probabilidad de ocurrencia del 10% en 50 años, que corresponde a un periodo de retorno de 475 años).

Un elemento modular

La versión inicial del sistema es ideal para alcanzar una altura de entrepiso de 270 cm mediante tan solo tres niveles superpuestos de elementos.

Cualquier pequeña desviación respecto a esta medida puede ser compensada mediante el dimensionamiento de los dinteles o elementos de unión entre niveles.

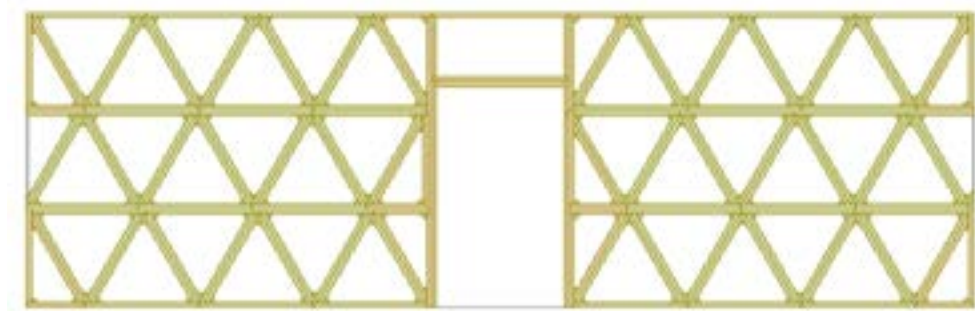


Figura 6. Ejemplo de pared estructural con inserción de puerta.

Las ventanas y puertas se integran en la estructura modular de triángulos equiláteros mediante una pieza especial, ETHRIS-R, diseñada específicamente para generar una geometría rectangular que permita alojar la futura abertura.

Los espacios auxiliares o residuales se completan con elementos de entramado ligero de relleno, que serán modelados y adaptados según el diseño arquitectónico del proyecto.

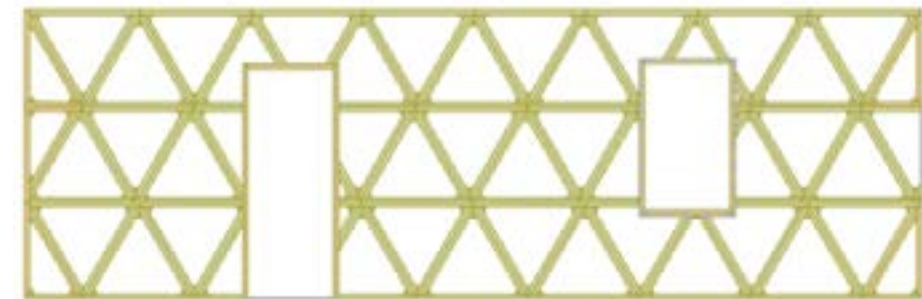


Figura 7. Ejemplo de trasdosado no estructural con inserción de puerta y ventana.

Un sistema liviano y de fácil transporte

El peso del sistema Ethris, tanto en su versión estructural (esqueleto) como en la versión con aislamiento, es inferior a 25 kg por elemento.

Cada módulo está equipado con travesaños que actúan como asas para facilitar su manipulación, ya sea manual o mediante medios mecánicos.



Figura 8. Ejemplo de sistema de pared estructural con SATE en fibra de madera y vidrio celular en la base

Es posible preensamblar tramos de muro en el suelo y luego elevarlos ya unidos para su colocación en obra.

Aislamiento térmico y acústico

Ethris constituye la estructura de pared portante y aislante térmico del edificio.

También puede utilizarse como sistema de revestimiento térmico (SATE) para edificaciones existentes, ayudando a mejorar la resistencia del edificio a los esfuerzos horizontales, como el sismo. En ambos casos, la forma del elemento y el tipo de unión permiten la construcción de estructuras de varios niveles, con sistemas portantes capaces de redistribuir uniformemente las cargas hacia la cimentación.

El grosor de la pared puede variar según la necesidad del diseño arquitectónico. En la estratigrafía propuesta, de grosor 30 cm y compuesta por fibra de madera, presenta una transmitancia térmica media inferior a 0,115 W/m²K y un desfase térmico garantizado superior a 17,6 horas.

Además, los materiales aislantes intercalados contribuyen de forma significativa al rendimiento acústico global del cerramiento.

La pared, una vez terminada, puede ser enlucida y pintada, como cualquier otra pared según el acabado deseado.

Referencias

- (1) Díez, R. Informe sobre la Agencia de la Unión Europea para la edificación sostenible. Green Building Council España. 2020.
- (2) Ministero delle Imprese del Made in Italy, Dipartimento Mercato e Tutela. Attestato di brevetto per invenzione industriale N. 102022000014989
- (3) Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti; Norme Tecniche per le Costruzioni – NTC 2018. 14-01-2018

20. Una Atmósfera en Madera

Iñaki del Prim Gracia^a
^a UPV-EHU – Master de Construcción, Diseño y Estructuras de Madera, San Sebastián, España.
bdp@coavn.org

Palabras clave: Construcción, Diseño, Eficiencia Energética, ODS, Sostenibilidad.

La Casa Bat resuelve una vivienda unifamiliar exenta, certificada Passivhaus Classic, con una decidida apuesta por materiales naturales en base madera. La edificación se compone de tres volúmenes principales de cubierta a dos aguas que simulan la vivienda tradicional del lugar, con un criterio estético actual de volúmenes sencillos sin ornamentos. La madera vertebra la propuesta arquitectónica, al interior y al exterior, poniendo en valor la estructura y el espacio. Los acabados y revestimientos, potenciando la condición táctil del material, ponen en valor sus características de difusividad y emisividad térmica para una mayor temperatura radiante de las superficies que magnifique el confort que aporta el material. Todo ello, unido a las propiedades acústicas y olfativas de la madera, generan una atmosfera interior sensorial y sensual, que magnifica e intensifica la experiencia del espacio y del habitar.

INTRODUCCIÓN

La propuesta resuelve una vivienda unifamiliar exenta, certificada Passivhaus Classic, con una decidida apuesta por materiales naturales en base madera. El Proyecto y la Dirección de obra han sido realizados por amaia.arana. arkitektura y blancodelprim.arquitectos, contando con Daniel Barroso Peña como Arquitecto Técnico. El edificio se ubica en una parcela residencial en Zubieta, Usurbil, a escasos 10 kms. de San Sebastián.



Figura 1: Vistas exteriores del Edificio.

La edificación se compone de tres volúmenes principales de cubierta a dos aguas que simulan la vivienda tradicional del lugar, con un criterio estético actual de volúmenes sencillos sin ornamentos. La SRE es de 257,10 m² para una envolvente térmica de 1.080,76m², resultando un factor de forma muy penalizador. La materialidad lígnea de la envolvente es continua entre fachadas y cubiertas, evitando la formación de aleros (Fig. 1). En contraste, la planta semisótano tiene una materialidad pétreo y masiva. Esta dicotomía tectónico-estereotómico convierte el edificio en un zócalo masivo que sostiene un volumen más ligero y delicado; un espacio áspero y vinculado al terreno del que nace, frente a una vivienda acogedora y sensual.

Los tres volúmenes separados acogen los diferentes usos principales y se unen a través de dos espacios intersticiales transparentes, enfatizando la estructura espacial del proyecto, consiguiendo una sucesión de espacios conectados física y visualmente, mediante un eje central longitudinal que atraviesa toda la planta de la casa.

PROYECTAR PASSIVHAUS EN MADERA

La madera vertebra la propuesta arquitectónica, al interior y al exterior, poniendo en valor la estructura y el espacio,

así como proponiendo en contraste un revestimiento continuo de blanca materialidad en paredes que integra los elementos correderos y de comunicación entre estancias (Fig. 2), así como las instalaciones que se ocultan en su totalidad.



Figura 2: Vistas interiores del Edificio.

La presencia de la madera, así como de los productos derivados de ésta, es masiva en todos los sistemas constructivos de la vivienda, realizándose una apuesta decidida para que la gran mayoría de estos productos sean de proximidad. La estructura principal del edificio es de paneles de madera contralaminada de Pícea Abies. Los aislamientos, tanto en cubiertas como en fachadas, de fibra de madera fabricada en el sur de Francia a unos 200km de la obra con extracción de Pino Landas de la zona. La carpintería exterior es de castaño laminado, de procedencia nacional (Asturias).

Las altas prestaciones de la envolvente (valor U promedio de 0,271 W/(m²K)) consiguen disminuir su demanda energética en fase de uso, disminuyendo el carbono embebido de la intervención y potenciando la economía local mediante los recursos de empresas ubicadas a menos de 200km de distancia respecto a la obra se disminuye la huella de carbono en la fase de construcción. La envolvente es continua en cuanto aislamiento, con grandes espesores de fibra de madera en fachadas y cubiertas, así como revestimientos interiores con fibra de madera en todas las fachadas (Fig. 3).



Figura 3: construcción, planta y sección.

Los acabados interiores se han confiado genéricamente al panel de CLT visto en paramentos verticales y a una tarima flotante multicapa de roble como pavimento. Con todo ello se ha pretendido que la madera sea la absoluta protagonista de la atmosfera interior de la vivienda, potenciando la condición táctil del material, y poniendo en valor sus características de difusividad y efusividad térmica para una mayor temperatura radiante de las superficies que magnifique el confort que aporta el material. Todo ello, unido a las propiedades acústicas y olfativas de la madera, confieren al espacio de una atmosfera interior sensorial y, por qué no sensual, que magnifica e intensifica la experiencia del espacio y del habitar.

DISEÑO CONSTRUCTIVO Y CONFORT EN MADERA

El aspecto de mayor interés de la propuesta es sin duda el aspecto constructivo de la misma, resolviendo con madera o materiales derivados de la madera toda la envolvente sobre rasante, tanto interior como exteriormente. Se pretende que la monomaterialidad “madera” sea capaz de resolver todas las prestaciones de la envolvente, tanto en fachadas como en cubiertas, también acabadas en madera al exterior.

El diseño constructivo de las soluciones ha primado la eliminación de los puentes térmicos, habida cuenta que al tratarse de una intervención de obra nueva la continuidad de los aislamientos es relativamente sencilla de conseguir con el sistema constructivo empleado. Para aquellos casos en los que el puente térmico no se puede evitar, se ha estudiado y calculado la incidencia en cuanto a pérdida de energía y posibles patologías de dichos puentes térmicos, de forma que se minimice y pueda asumirse en el balance energético de la propuesta (Fig. 4).

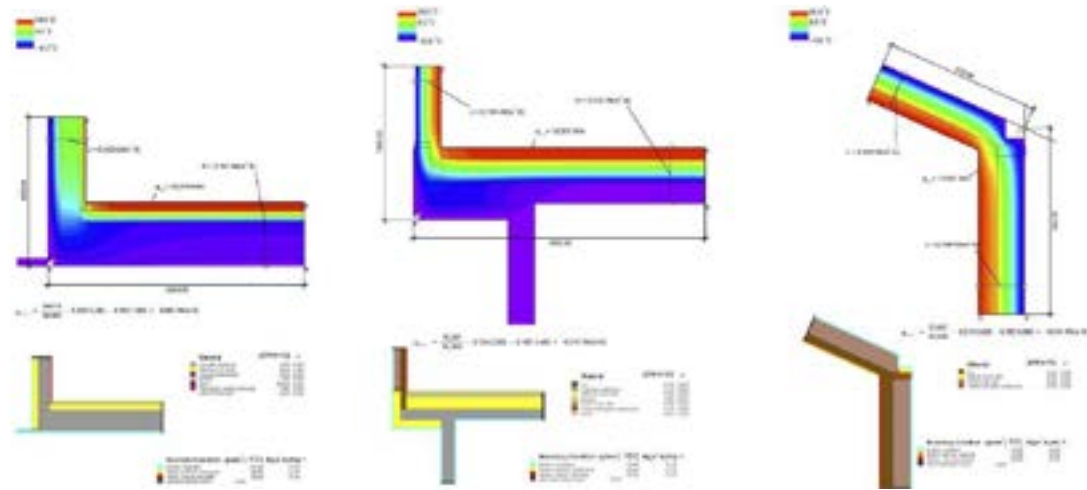


Figura 4: puentes térmicos.

La hermeticidad se ha trabajado mediante las prestaciones específicas del propio panel de CLT de 9 cms y tres capas, con los correspondientes encintados entre paneles y resto de elementos estructurales o de instalaciones pasantes. En los cerramientos en contacto con el exterior, los paneles de CLT funcionan también como reguladores de la difusión de vapor, con un valor Sd de 3,1m, el cual permite prescindir de otros frenos o barreras de vapor en las soluciones constructivas empleadas en este caso de estudio.

Las carpinterías exteriores van de acuerdo con las prestaciones energéticas del resto de la envolvente, proponiéndose una carpintería exterior de Castaño laminado, de procedencia local, con perfil de 92mm certificado por el Passivhaus Institut, con valor Uf: 1,14 W/(m²K). Acristalamientos de vidrio triple con cámaras rellenas de gas argón, con valor Ug de 0,60 W/(m²K) y factor solar del 52%, e intercalarios de pvc con psi de 0,038 W/(mK).

De extrema importancia es el control solar en los edificios pasivos, para lo que se han proyectado persianas de lamas móviles exteriores, graduables y orientables, en las estancias que dan a sur, este y oeste. Dichas persianas cuentan con una domotización básica, con el objetivo de que el usuario pueda programar diferentes escenarios de protección. En favor de una mayor seguridad en los cálculos, buscando siempre la opción más conservadora, para la simulación energética en PHPP no se ha tenido en cuenta dicha domotización, como tampoco se han tenido en cuenta posibles ventilaciones cruzadas y nocturnas, ni un aumento de caudal en el sistema de ventilación en la temporada estival, estrategias las cuales lógicamente el usuario puede implementar, mejorando el confort de manera adaptativa.

En base a este escenario conservador, teniendo en cuenta el impacto del factor de uso humano sobre las protecciones solares que aplica el PHPP, la frecuencia de sobrecalentamiento de la vivienda estaría en el 19,07%. La instalación de refrigeración planteada, mediante suelo refrescante, cubre con creces tanto la demanda de refrigeración de 9,7 kWh/(m2a), como la carga de refrigeración de 15,9 W/m², gracias al funcionamiento del deshumidificador isotérmico incorporado en la instalación de ventilación.

Por último, se instala una ventilación mecánica con recuperación de calor que, además de garantizar una permanente calidad del aire interior durante todo el año, minimiza ruidos procedentes del exterior y permite una recuperación del calor interior de la vivienda con una eficiencia del sistema del 82,1%. Dicha ventilación mecánica dispone de bypass y se combina con ventilación natural cruzada y deshumidificación isotérmica específica para los meses de verano. La instalación de climatización de la vivienda está formada por una aerotermia de 11 kW, que alimenta tanto la generación de ACS como el suelo radiante-refrescante existente en todas las plantas del edificio. Con todo ello, se consiguió garantizar una demanda de calefacción de 13 kWh/m²año, y un consumo de energía primaria no renovable de 12,93 kWh/m²año.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La intervención por tanto da respuesta a las necesidades programáticas planteadas por el promotor, con especial incidencia en aspectos medioambientales, energéticos y de sostenibilidad, con un sistema constructivo en el que predomina la utilización de la madera, tanto en la estructura, como en aislamientos, revestimientos y carpinterías. Para ello se utilizan diferentes estrategias que tienen que ver con el estudio de una envolvente altamente eficiente, cumpliendo estrictamente los requisitos y estrategias de diseño del estándar PASSIVHAUS, complementados con aspectos bioclimáticos, tanto de funcionamiento solar como de CONSTRUCCIÓN SANA.

El edificio responde a los ODS y los Valores de Sostenibilidad y Salud de la Nueva Bauhaus Europea mediante un triple escenario de descarbonización. En fase de fabricación y montaje mediante la utilización de madera para estructura, subestructuras y cerramientos, y fibra de madera como aislante. Por otra parte, descarbonización en fase de uso, siendo una construcción basada en estrategias pasivas, certificada Passivhaus, uso de energías renovables, y un rendimiento energético óptimo con baja carga de sistemas activos. Por último, una construcción en seco y reversible, de forma que en el desensamblaje del edificio se pueda reutilizar la totalidad de los elementos de madera, disminuyendo de forma drástica la generación de residuos al final de la vida útil del edificio, y descarbonizando esta última fase.



Figura 5: Casa BAT, una atmósfera en madera

Se pretende por tanto garantizar unas adecuadas Salud y Bienestar de los usuarios del edificio, con unas bajas demandas energéticas que propician una Producción y Consumo de Energía Responsables, derivando la intervención en una pequeña pero valiente Acción por el Clima en sí misma, cuya vocación es servir de ejemplo para generar Ciudades y Comunidades más Sostenibles. Todo ello a través de la belleza que aporta la madera como estructura configuradora de espacio (Fig. 5), absoluta protagonista de la atmosfera interior de la vivienda y su habitar, de manera armoniosa en el entorno.

Bibliografía

- (1) UNE-EN ISO 10211:2022. Puentes térmicos en edificación. Flujos de calor y temperaturas superficiales. Cálculos detallados. (ISO 10211:2017).
- (2) U. Knaak; et al.: *Building Physics of the Envelope: Principles of Construction*. Basilea: Birkhäuser, 2018.

21. Estudio numérico y experimental de uniones dentadas a flexión de madera de *Pinus Nigra*

Rafael Bravo^a, Carlos Cruza, Yaiza Fuentes-García^a, Francisco J. Rescalvoa, Antolino Gallego^a

^a UIMA-UGR, Calle Dr. Severo Ochoa, s/n, Beiro, 18001 Granada.
rbravo@ugr.es

Palabras clave: Pinus nigra, Digital Image Correlation (DIC), Elementos Finitos (FEM), Adhesión, Uniones Dentadas

1. Resumen

Debido a la creciente demanda de madera y a la necesidad de obtener productos estructurales de alto desempeño —conocidos como EWP, por sus siglas en inglés—, las uniones dentadas constituyen una tecnología clave para la fabricación de elementos de gran longitud. Por lo tanto, resulta fundamental evaluar las propiedades mecánicas de dichas uniones en el proceso de diseño.

En este trabajo se presentan los resultados del comportamiento mecánico a flexión de madera de *Pinus nigra* en probetas con uniones dentadas, mediante ensayos monitorizados por correlación digital de imagen (DIC) y simulaciones numéricas mediante el método de elementos finitos (FEM). La presencia de las uniones provocó un ligero aumento del módulo de elasticidad a flexión E_m , que osciló entre un 2 y un 3%; además, se observó un incremento de hasta el 8% en la resistencia a flexión f_m . Aunque las uniones dentadas son puntos potenciales de debilidad mecánica, en el caso del *Pinus nigra* se observó un incremento en las propiedades gracias a la eliminación de defectos naturales presentes en la madera maciza. Se obtuvo una buena concordancia entre los resultados de DIC y FEM, lo que demuestra el potencial de ambas metodologías.

2. Introducción

La demanda de conexiones complejas es cada vez más común. Las uniones dentadas se emplean actualmente para la producción de productos de madera estructural, ya que una de sus principales ventajas es la posibilidad de evitar defectos.

Diversos estudios han analizado qué parámetros de las uniones influyen más en su resistencia. Numerosos trabajos [1-2] han evaluado diferentes longitudes y separación de las uniones dentadas. Los resultados han demostrado que la longitud de la unión es un parámetro clave que afecta a su resistencia [3]. Además de la longitud de la unión, la presión de prensado ejercida durante el encolado es un factor fundamental para la resistencia [4]. Es importante destacar que una presión elevada proporciona la mayor resistencia en la unión; sin embargo, [3] observó que, a partir de 12 MPa, la resistencia no aumenta significativamente. Además de estos parámetros, la rigidez y el espesor del adhesivo son factores altamente relevantes para la resistencia. Las simulaciones numéricas mediante el método de elementos finitos se han desarrollado sobre la base de la mecánica de fractura no lineal para predecir el comportamiento de las uniones dentadas y evaluar la influencia de defectos ubicados en la línea de unión. La técnica de correlación digital de imágenes (DIC) ofrece grandes posibilidades para explorar el campo completo de desplazamientos y mediciones de deformaciones para el estudio del comportamiento de materiales en una amplia gama de productos.

El presente estudio se centra en la investigación experimental y numérica del comportamiento a flexión de uniones dentadas de madera de *Pinus nigra*. El análisis se enfoca en la parte elástica lineal, ya que el módulo de elasticidad es la variable principal de interés para la caracterización de las probetas. No obstante, para considerar la influencia del contacto y la cohesión en las uniones dentadas, se utilizaron modelos de contacto y cohesivos no lineales que presentan un comportamiento casi lineal hasta el fallo. La campaña experimental incluyó la evaluación óptica de las probetas durante los ensayos mediante DIC.

3. Materiales y métodos

3.1. Madera de Pinus nigra y adhesivo

La madera utilizada en este trabajo fue extraída de una plantación de Pinus nigra de 35 años de edad en el parque natural de Segura y las Villas de la provincia de Jaén, España. Los troncos se aserraron para obtener tablas, que posteriormente se secaron durante 6 meses en condiciones naturales evitando la exposición directa al sol o a la lluvia. El contenido final de humedad (MC) de la madera fue de 10±2%. Para la fabricación de las muestras con uniones dentadas se empleó un adhesivo de poliuretano monocomponente.

3.2. Descripción y fabricación de las probetas

Se prepararon 7 probetas de Pinus nigra. Todas ellas fueron aserradas con una longitud de 600 mm y una sección transversal general de 25 x 75 mm. La unión dentada se ubicó en el centro geométrico. La Fig. 1 muestra la disposición de los dientes y su geometría. La unión tiene una longitud de 16 mm, su punta y base una anchura de 1 mm y 4.3 mm respectivamente, y la apertura del diente de la unión es de 6°, valores dentro del rango indicado en el anexo I de la normativa EN 14080:2013 [5].

El adhesivo para la unión dentada se aplicó a una temperatura de 20±2° C, con un contenido de humedad de la madera (MC) de 9.8±1.5%, cumpliendo con los requisitos del fabricante para su aplicación. La cantidad de adhesivo aplicada fue de 250 g/m². Posteriormente, las probetas fueron preparadas e introducidas en una cámara climática a 20°C y 65% de humedad relativa, conforme a la norma EN 408:2010 + A1:2012 (2012) [6].

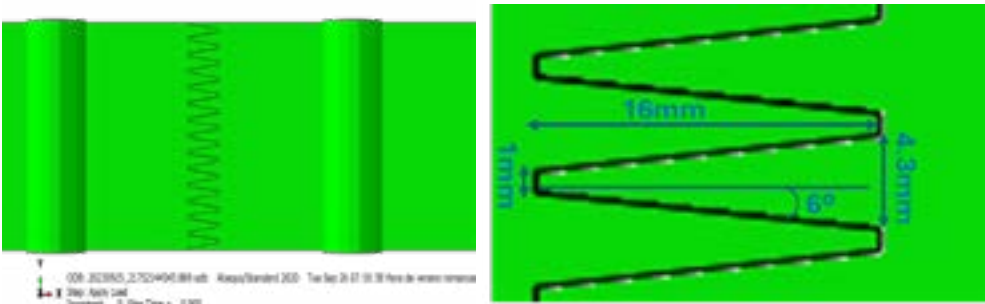


Figura 1. Geometría de la unión dentada.

3.3. Ensayos experimentales

Se realizaron pruebas de flexión a cuatro puntos en una máquina de ensayos múltiples. El módulo de elasticidad E_m y resistencia máxima a flexión f_m se calculó de acuerdo con la norma UNE-EN 408:2010 + A1:2012 [6] mediante las siguientes expresiones:

$E_m = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(\frac{w_2}{F_2} - \frac{w_1}{F_1} \right)}$	(1)
$f_m = \frac{3aF_{max}}{bh^2}$	(2)

Donde F_1 y F_2 son las cargas para las flechas verticales w_1 y w_2 respectivamente, F_{max} es la carga máxima. El resto de parámetros se muestran en la Fig. 2, donde $a=150$ mm es la distancia entre el punto de carga, $l=450$ mm es la distancia entre apoyos, $b=75$ mm es la anchura y $h=25$ mm es el canto.

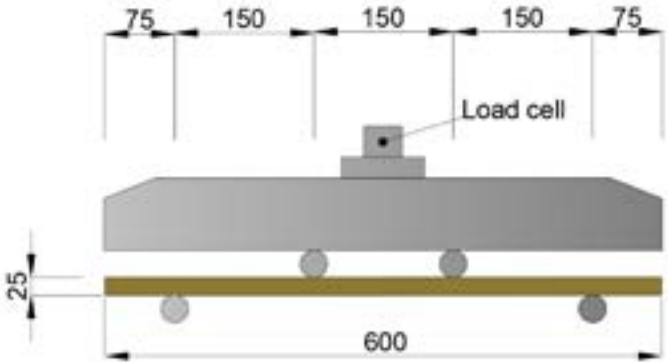


Figura 2. Configuración y geometría del ensayo a cuatro puntos.

3.4. Técnica de correlación digital de imagen

Para el monitoreo del campo de deformaciones y desplazamientos verticales en la zona central de las probetas, se utilizó un sistema de correlación de imágenes tridimensional, Aramis 3D®. Se aplicó un patrón aleatorio de moteado blanco y negro de forma lo más uniforme posible.

El sistema DIC fue calibrado siguiendo el protocolo específico de calibración de Aramis 3D. El módulo óptico de Aramis (compuesto por dos cámaras industriales de 12 megapíxeles) fue orientado hacia la superficie de la probeta. Mediante esta técnica y las capacidades del software GOM Correlate, desarrollado por GOM GmbH, el módulo de elasticidad E_m y la resistencia f_m se calcularon mediante las ecuaciones 1 y 2.

3.5. Método de los elementos finitos

Se desarrolló un modelo paramétrico tridimensional de elementos en el software de elementos finitos Abaqus. La Fig. 3 muestra el modelo de elementos finitos de la muestra con uniones dentadas. Este modelo sólido 3D, elástico lineal y está compuesto por dos partes encoladas que interactúan a lo largo de la interfaz de los dedos mediante contacto. El comportamiento mecánico de la interfaz está gobernado por leyes de contacto y tracción cohesiva con daño, según las implementaciones de Abaqus. Las condiciones de contorno se definieron de acuerdo con el montaje

experimental. Debido a la geometría aguda de las uniones, se utilizó un elemento tetraédrico de cuatro nodos (C3D4). El mallado se refinó en la zona circundante a los dedos, con un tamaño medio de elemento de 0.8 mm para los dedos. Para el resto de la longitud calibrada, el tamaño medio fue de 2.4 mm. Se ha insertado el módulo de elasticidad de madera 11500 N/mm² y se ha modelado el contacto con una resistencia a tracción de 12 N/mm² a partir de los datos del adhesivo.

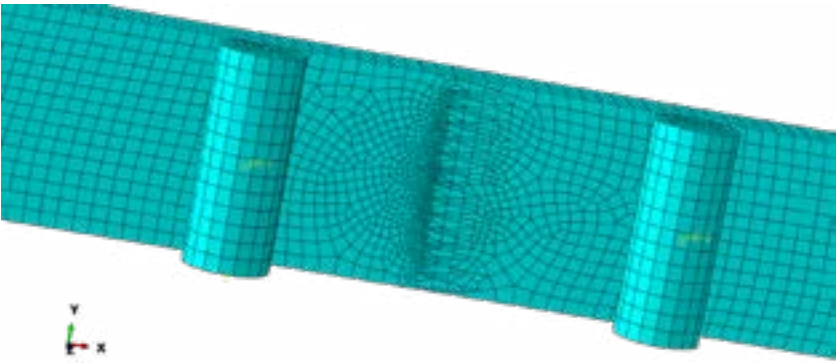


Figura 3. Modelo de elementos finitos de ensayo a cuatro puntos en Abaqus.

4. Resultados

Tras la aplicación del DIC a los 7 especímenes, se ha obtenido el campo de desplazamientos verticales para cada carga aplicada (ver Fig. 4 para una probeta).



Figura 4. Campo de desplazamientos verticales en una probeta mediante DIC.

Del mismo modo, se ha obtenido el campo de desplazamientos del modelo de elementos finitos (ver Fig. 5).

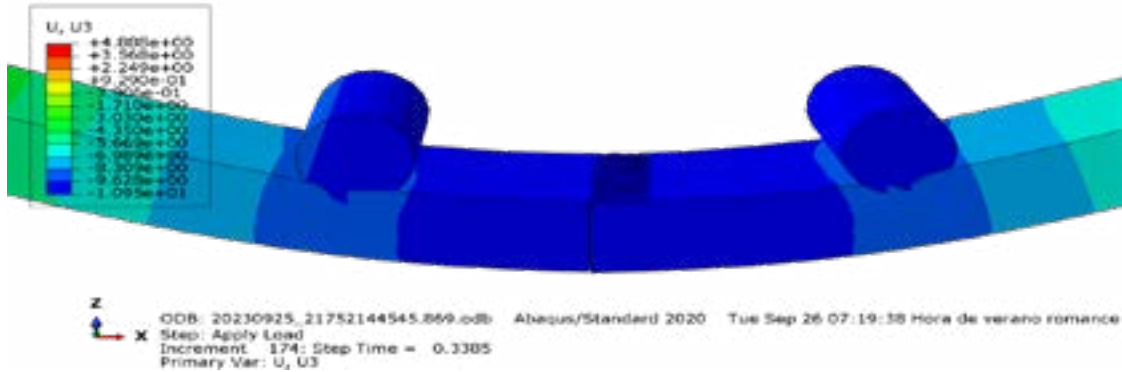


Figura 5. Campo de desplazamientos verticales del modelo de elementos finitos.

A partir de las cargas y desplazamientos en la sección central se obtuvieron los E_m y f_m , mostrados en la Tabla 1, obteniéndose un valor medio de 11299 N/mm² y 49 N/mm² para DIC, 12432 N/mm² y 53 N/mm² para FEM.

Tabla 1. Resultados del ensayo DIC y FEM

	EXP (DIC)			
	E_m	f_m		
	N/mm ²	N/mm ²		
1	11285	44		
2	12240	57		
3	11327	53		
4	11143	40		
5	11470	46	FEM	
6	11307	56	E_m	f_m
7	10324	47	N/mm ²	N/mm ²
Media	11299	49	11432	52

En comparación del valor medio de tablas de Pinus nigra sin uniones dentadas ensayadas en otros trabajos de E_m =11000 N/mm² y f_m =48 N/mm², se obtiene un incremento en E_m y f_m de 2.7% y 4% respectivamente para DIC y 2% y

8% para FEM. Pese a que la unión dentada es una debilidad en el material, las propiedades mecánicas han mejorado debido a la eliminación de defectos.

5. Conclusiones

Este estudio demuestra que las uniones dentadas de Pinus nigra mejoran las propiedades mecánicas a flexión al eliminar defectos naturales. Se observaron incrementos de hasta un 3% en el módulo de elasticidad y de un 8% en la resistencia a flexión. La buena concordancia entre los resultados experimentales (DIC) y las simulaciones numéricas (FEM) valida el modelo propuesto. Esta metodología puede aplicarse para analizar en detalle el comportamiento de uniones en madera y su influencia en las propiedades mecánicas de los elementos estructurales.

6. Referencias

[1] Yeh MC, Lin YL (2012) Finger joint performance of structural laminated bamboo member. J Wood Sci 58:120–127.
[2] Morin-Bernard A, Blanchet P, Dagenais C, et al (2021) Glued-laminated timber from northern hardwoods: Effect of finger-joint profile on lamellae tensile strength. Const Build Mat. 271:121591
[3] Ayarkwa J, Hirashima Y, Sasaki Y, Yamasaki M (2000) Influence of finger-joint geometry and end pressure on tensile properties of three finger-jointed Tropical African Hardwoods. South African For. J. 188:37–49.
[4] Bustos C, Hernández RE, Beauregard R, Mohammad M (2011) Effects of end-pressure on the finger-joint quality of black spruce lumber: a microscopic analysis. Maderas Cienc y Tecnol 13:319–328.
[5] EN 14080:2013 Timber structures. Glued laminated timber and glued solid timber. Requirements. European Committee for Standardization CEN.
[6] EN 408:2010 + A1:2012 Timber structures. Structural timber and glued laminated timber. Determination of some physical and mechanical properties. European Committee for Standardization (CEN).

22. Sello de Calidad AITIM para empresas de montaje y puesta en obra de estructuras y elementos constructivos de madera

Guillermo Gómez del Pozo^a, David Lorenzo Fouz^a, Fernando Peraza Sánchez^a, Jose Enrique Peraza Sánchez^a
^a AITIM – Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera Calle Flora 3, 28013 Madrid, España.
g.gomez@aitim.es

Palabras clave: Sello de Calidad, estructuras de madera, montaje en obra, trazabilidad, control de calidad.

El presente trabajo presenta el desarrollo del Sello de Calidad para el montaje y puesta en obra de estructuras y elementos constructivos de madera, en viviendas, rehabilitación, obra civil, entre otros usos. El objetivo del sello es controlar el proceso de montaje de las estructuras de madera con el fin de garantizar que tanto la clase de servicio, clase de uso, uniones y detalles constructivos para las cuales han sido prescritas, se mantengan durante todas las fases de la construcción con el fin de evitar patologías y defectos posteriores en las mismas. Con este objetivo, se han definido manuales en los que se recogen los criterios técnicos claves en el transporte, controles en la recepción de productos de madera y otros materiales además de su correcto acopio en obra, al montaje, así como al uso y mantenimiento específico para cada tipología estructural. Además, se establece la obligación de documentar todos los procedimientos en obra descritos en los manuales, asegurando la trazabilidad y conformidad con los requisitos definidos por el sello. El sello aporta un marco técnico y documental que contribuye a la profesionalización del montaje en obra de estructuras de madera, alineado con los requisitos normativos y de calidad exigidos en el sector, garantizando la vida útil prescrita para las mismas.

23. Empleo de fotogrametría rectificada para la obtención de características geométricas de elementos de madera de madera recuperada de edificios existentes

Pablo González-Serna^a; Josu Benito-Ayúcar^a; Daniel Luengas-Carreño^b
^a TECNALIA, Basque Research and Technology Alliance (BRTA). Construction Materials - Lab Services. Área Anardi 5, 20.230 Azpeitia. ^b University of the Basque Country UPV/EHU. Department of Architecture. Plaza Oñati, 2. 20018 Donostia/San Sebastián.
pablo.gonzalez@tecnalia.com

Palabras clave: estructuras existentes, madera recuperada, fotogrametría, patrimonio, clasificación estructural.

La inspección de estructuras de madera en edificios históricos es fundamental para su conservación y rehabilitación. Esta inspección implica verificar el estado de conservación y estabilidad de los elementos, y luego caracterizar su capacidad estructural a través de una clasificación visual precisa y la obtención de propiedades geométricas. En edificaciones históricas, los elementos de madera suelen presentar alta variabilidad morfológica y anatómica, lo que complica su análisis estructural y requiere una recogida de datos detallada, especialmente cuando se quiere realizar un levantamiento gráfico exhaustivo y a escala de las imperfecciones anatómicas. Esto es fundamental, por ejemplo, cuando se debe llevar a cabo un estudio pormenorizado del material a la hora generar nuevos criterios de clasificación.

Para agilizar este proceso, esta investigación propone un flujo de trabajo basado en la fotogrametría rectificada utilizando la aplicación KIRI Engine y el software Grasshopper 3D. Esta metodología permite realizar un levantamiento 3D y generar ortoimágenes precisas para el análisis y clasificación visual de un elemento estructural de madera.

Materiales y métodos

En este estudio se ha utilizado una pieza de madera de roble europeo (Quercus robur) obtenida de una partida de solivos recuperados en obra, con una longitud aproximada de 1,5m. La pieza de madera presentaba sección irregular y una ligera curvatura en su directriz.

Para la generación del modelo 3D de la pieza de madera se ha utilizado la aplicación KIRI Engine (1) para smartphone, en su versión gratuita, con su función Photo Scan Mode para generar un modelo 3D con textura a partir de una secuencia de fotos tomadas alrededor del elemento.

La pieza se colocó sobre dos puntos de apoyo y al aire libre con luz natural (Fig. 1), y se marcaron a rotulador dos secciones para su posterior corte con sierra y para establecer las secciones de referencia para validar la precisión del modelo 3D generado (Fig. 2). Se establecieron dos puntos de referencia en los extremos de la pieza para el posterior escalado del modelo 3d generado por el software de fotogrametría.



Figura 1. Pieza de madera utilizada en el estudio.

Figura 2. Marcado de secciones de referencia.

Se realizaron un total de 100 fotos, que se tomaron dando varias vueltas completas alrededor del elemento con distintos ángulos de inclinación y procurando registrar todo la superficie del elemento. Estas fotos se realizaron sin trípode y sin un control preciso ni de la distancia al elemento, ni del ángulo de inclinación de la cámara ni de la distancia de separación entre foto y foto a lo largo de las vueltas. Se aseguró que todas las fotos estuvieran bien enfocadas, borrando y repitiendo aquellas que no lo estaban.

Una vez realizado todo el barrido de fotos, se realizó el procesamiento con el motor de KIRI Engine para generación del modelo 3D texturizado. El modelo generado se revisó y se exportó a Rhinoceros 3D (2) para hacer el análisis geométrico (Fig. 3).



Figura 3. Modelo 3D exportado a Rhinoceros.

El modelo 3D se escaló tomando como referencia la longitud del elemento. Además, se limpió la malla 3D, eliminando componentes que no interesaban como puntos de apoyo u otros elementos que hubieran podido quedar recogidos en el modelo 3D. Una vez revisado el modelo 3D, se procedió a cortar con sierra las secciones de referencia marcadas a rotulador en la pieza original. La sección cortada con sierra se escaneó junto con una escala gráfica, y se importó en software CAD para dibujar el perímetro de la sección y obtener las propiedades geométricas (área, momento resistente y momento de inercia). Para validar el modelo 3D, se comparó el momento de inercia obtenido a partir del levantamiento en CAD de las rebanadas escaneadas con el obtenido a través de las secciones del modelo 3D (Fig. 4).

Una vez validada la precisión del modelo 3D generado y escalado en Rhinoceros, se desarrolló una herramienta automática para el análisis geométrico con el plugin de modelado algorítmico Grasshopper 3D (3) de Rhinoceros 3D CAD (Fig. 5). Esta herramienta permite medir el volumen completo de la pieza y generar planos de corte equidistantes para obtener múltiples secciones del elemento y sus propiedades geométricas (área, momento de inercia y módulo resistente), así como encontrar la sección más desfavorable (posible punto de rotura) y la sección promedio, tanto del elemento en toda su longitud como por zonas. Con esta herramienta también se automatiza la generación de las ortofotos de cada una de las caras longitudinales del elemento.

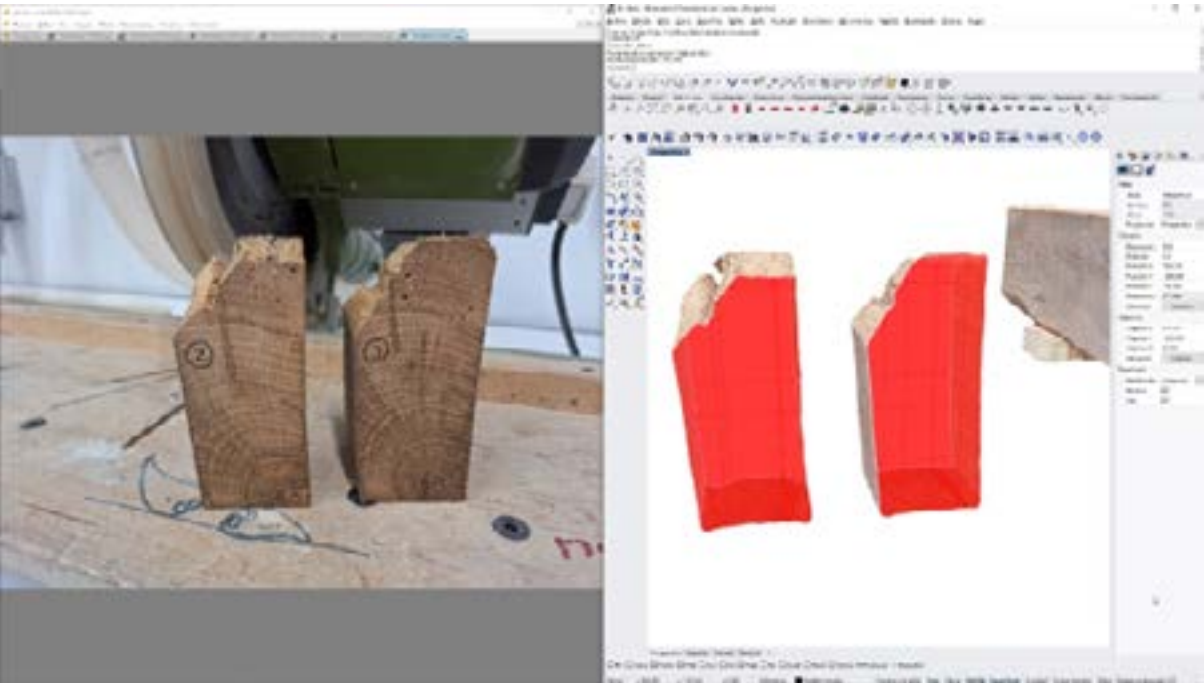


Figura 4. Comparativa de las rebanadas cortadas de la pieza y las secciones equivalentes obtenidas a través del modelo 3D.



Figura 5. Implementación de la herramienta de obtención de sección y análisis geométrico desarrollada en Grasshopper 3D.

Resultados y discusión

La medición del momento de inercia tras el corte y escaneo de las rebanadas y en las secciones obtenidas a partir del modelo 3D han arrojado una diferencia de resultados entre ambos métodos del 0,94%. Esta diferencia es considerada no significativa, por lo que se considera que el método de levantamiento 3D mediante el software de fotogrametría es válido para analizar las propiedades geométricas y mecánicas de una viga de madera o solivo de madera.

Este método ha permitido obtener un modelo 3D preciso sin necesidad de uso de trípode o de un barrido muy sistemático. Sin embargo, es importante destacar que la calidad del modelo 3D obtenido depende estrechamente de la calidad de la luz con la que se hacen las fotos y del nivel de visibilidad de la pieza. Es necesario que no haya reflejos deslumbrantes y que se establezcan de forma precisa los puntos de referencia para un correcto escalado del modelo 3D.

Además, aunque el escaneado fotogramétrico incluye en el modelo una textura fotográfica del elemento de la que se pueden obtener las ortofotos de las cuatro caras para la medición de imperfecciones y la clasificación visual de la pieza, estas ortofotografías pueden tener una resolución reducida. A día de la prueba, la resolución del texturizado obtenido en el modelo con esta herramienta es fija e independiente del tamaño del modelo, por lo que cuanto más grande es el elemento menor es la resolución por unidad de superficie de la textura fotográfica. Esto puede ser una limitación para la aplicación del método en elementos de grandes dimensiones.

Conclusiones

El uso de la aplicación Kiri Engine para la creación de modelos 3D con fotogrametría rectificada a través de un smartphone ha demostrado ser una técnica relativamente sencilla de usar y suficientemente precisa para hacer levantamientos 3D y obtener las propiedades geométricas y mecánicas de piezas estructurales de madera necesarias para su caracterización estructural.

El flujo de trabajo desarrollado agiliza el proceso de obtención de estas propiedades y la obtención de ortofotos para la clasificación visual respecto a otros métodos más manuales. La implementación de la herramienta Grasshopper 3D ha permitido obtener información geométrica precisa, secciones desfavorables y valores promedio tanto de la longitud completa como de zonas específicas de la pieza.

Es importante destacar que la validez del modelo 3D obtenido depende estrechamente de la calidad de la luz y la accesibilidad de la pieza a estudiar. Además, en caso de aplicarse esta técnica en obra, la capacidad de acceso y de

movimiento del técnico también pueden condicionar la calidad y precisión del modelo y las ortofotos. Aunque este flujo de trabajo puede agilizar significativamente el proceso de toma de datos, sigue requiriendo de un cierto nivel de preparación de la muestra y un trabajo de posprocesado del modelo obtenido.

Este método puede ser útil para elementos puntuales de gran valor que requieren un estudio pormenorizado o como flujo de trabajo enfocado a la investigación. Sin embargo, para la evaluación sistemática de paños o plantas de forjado completas en una obra de rehabilitación, sigue suponiendo un proceso relativamente lento de implementar.

También se ha observado que, en su estado actual, la resolución de las ortofotos obtenidas cuando la pieza es de gran tamaño es limitada, aunque sucesivas actualizaciones del software podrían mejorar esta limitación.

Finalmente, para mejorar la eficacia del proceso, se sugiere la posibilidad de implementación de algún sistema de aprendizaje automático orientado al análisis fotográfico para automatizar el proceso de clasificación visual a partir de las ortofotografías obtenidos a partir del modelo 3D generado.

Referencias

(1) Kiri Engine. Photo Scan Mode Explained. Kiri Engine Blog. <https://www.kiriengine.app/blog/explained/photo-scan-mode> (consultado el 10 de julio de 2025).
(2) McNeel. Guía del usuario de Rhino 7. McNeel Documentation. <https://docs.mcneel.com/rhino/7/usersguide/es-es/index.htm> (consultado el 10 de julio de 2025).
(3) Modelab. Grasshopper Primer. GitBook. <https://modelab.gitbooks.io/grasshopper-primer/content/> (consultado el 10 de julio de 2025).

24. Mapas de Termitas y metodología de inspección de cascos urbanos en base a la norma UNE-56418:2016. Caso práctico en el casco antiguo de Areatza, Bizkaia

Josu Benito-Ayúcar^a; Pablo González-Serna^a; Josu Arancón-Cuadrado^a; Daniel Luengas-Carreño^b
^a TECNALIA, Basque Research and Technology Alliance (BRTA). Construction Materials - Lab Services. Área Anardi 5, 20.230 Azpeitia. ^b University of the Basque Country UPV/EHU. Department of Architecture. Plaza Oñati, 2. 20018 Donostia/San Sebastián.
josu.benito@tecnalia.com

Palabras clave: Mapa de Termitas, UNE-56418:2016, Cascos históricos, Inspección de edificios, Estructuras de madera.

Las termitas subterráneas, aunque desempeñan un papel ecológico esencial, representan una amenaza significativa para las estructuras de madera en entornos urbanos, especialmente en cascos históricos por su valor patrimonial. Para abordar esta problemática, la norma UNE-56418:2016 establece un protocolo técnico dividido en cuatro fases: activación, inspección, tratamiento y mantenimiento.

Este trabajo presenta la metodología operativa aplicada por TECNALIA en la fase de inspección, ilustrada mediante el caso práctico del municipio de Areatza (Bizkaia). Tras definir el ámbito de actuación, se coordinaron visitas a 89 edificios, logrando acceso a 88. La inspección reveló presencia de termitas en más de la mitad de los inmuebles, y se elaboró un informe técnico que sirvió como base documental para la licitación del tratamiento.

Introducción

Las termitas subterráneas del género *Reticulitermes*, especialmente *R. grassei* y *R. banyulensis*, son insectos sociales que desempeñan un papel ecológico fundamental como agentes degradantes de la madera en el medio natural. Sin embargo, en entornos urbanos, donde las estructuras de madera forman parte esencial de las edificaciones, su presencia puede convertirse en una amenaza seria. En España, muchas construcciones tradicionales aún conservan elementos de madera, especialmente en los cascos históricos, lo que los convierte en zonas especialmente sensibles. La antigüedad de los edificios y el valor patrimonial de estas áreas hacen que los daños provocados por termitas subterráneas no solo sean estructurales, sino también culturales y económicos.

Para abordar esta problemática, España cuenta con una herramienta normativa que, aunque no es de obligado cumplimiento, proporciona una base sólida para actuar. Se trata de la norma UNE 56418:2016, “Protocolo de actuación en cascos urbanos afectados por ataques de termitas subterráneas”, publicada por AENOR (1). Esta norma representa un avance significativo, ya que ofrece una metodología clara y estructurada dividida en cuatro fases: activación, diagnóstico, tratamiento y mantenimiento. Su aplicación permite a administraciones públicas, empresas especializadas y propietarios coordinar esfuerzos bajo un marco técnico común, facilitando la planificación de intervenciones eficaces y sostenibles.

Metodología

La solución más eficaz y respetuosa con el entorno para eliminar colonias de termitas subterráneas es el uso de cebos con inhibidores de la síntesis de quitina. Este método destaca por su baja toxicidad, su capacidad para eliminar colonias completas en pocos meses y su reducido impacto ambiental. A diferencia de los termicidas líquidos, los cebos actúan de forma selectiva y requieren cantidades mínimas de ingrediente activo.

El enfoque más efectivo para aplicar esta solución es la gestión “area-wide” (AW), que consiste en intervenir de forma coordinada en toda la zona afectada, tanto en propiedades privadas como en espacios públicos. Este tipo de intervención permite eliminar todas las colonias presentes en un área determinada, reduciendo significativamente el riesgo de reinfestación. La eficacia de este enfoque ha sido demostrada en varios municipios españoles, donde se logró la eliminación completa de colonias de *Reticulitermes* en áreas urbanas de hasta 170.000 m², sin reinfestaciones durante más de una década (2).

Tras la activación del protocolo de actuación se acomete la fase de diagnóstico, cuyo objetivo es conocer el estado y alcance del ataque de termitas en el municipio y generar un informe técnico que sirva como documentación base para la licitación por parte del ayuntamiento de la tercera fase del protocolo (tratamiento).



Figura 1. Flujograma fase de diagnóstico

En la Fig. 1 se muestra el diagrama de flujo de la fase de diagnóstico (recuadros de color verde), cuyo objetivo es obtener la documentación necesaria para la licitación de la fase de tratamiento. Se recalca que la metodología se enfoca a lograr ese fin, quedando fuera del proceso básico de esta fase la inspección exhaustiva de las estructuras que presenten daños estructurales (recuadros naranjas) y la inspección exhaustiva en busca de puntos de contacto que se realiza en la fase de tratamiento (recuadros azules). Además, en la misma figura se resaltan tres recuadros mediante una línea roja gruesa discontinua que señalan los tres grandes grupos de inspecciones que se dan con motivo del protocolo de actuación, pero con objetivos distintos. Sólo el recuadro verde es parte fundamental de la fase de diagnóstico.

La fase de diagnóstico constituye un paso clave dentro del protocolo UNE 56418:2016, ya que permite delimitar el alcance del ataque, identificar los edificios comprometidos y establecer una base técnica para planificar el tratamiento. Esta fase se estructura en cuatro pasos operativos, comenzando por la definición del perímetro de actuación, que incluye la recopilación de antecedentes de ataque y factores ambientales favorables a la presencia de termitas (como humedad o vegetación). A partir de esta información, se seleccionan los inmuebles a inspeccionar, priorizando aquellos con elementos estructurales de madera o valor patrimonial. La metodología aplicada por TECNALIA en esta fase se ilustra mediante el caso práctico del municipio de Areatza (Bizkaia).



Figura 2. Municipio de Areatza: Ámbito de actuación y edificios con ataques previos detectados.

Una vez definido el ámbito de actuación, la coordinación de la agenda de visitas recae en el Ayuntamiento, cuya implicación es absolutamente clave para el éxito de la fase de diagnóstico. Aunque todos los pasos del protocolo son importantes, este resulta especialmente crítico, ya que sin acceso a los edificios no es posible realizar ninguna evaluación técnica. En muchos casos, los inmuebles están deshabitados, sus propietarios no residen en el municipio o se trata de edificios abandonados, lo que dificulta enormemente la inspección. Por ello, la labor del Ayuntamiento gestionando los contactos, facilitando la comunicación con los vecinos y organizando las visitas es esencial para garantizar que el equipo técnico pueda acceder a los espacios necesarios. Previamente al contacto con los vecinos para las visitas de inspección, se organizan charlas informativas públicas en el ayuntamiento para informar de la problemática y metodología global a la ciudadanía. Una vez en el lugar, se realiza una inspección visual de sótanos y plantas bajas —y, si se ha acordado previamente, también de plantas superiores—, así como de zonas exteriores como jardines, leñeras o acumulaciones de madera, donde también pueden detectarse indicios de actividad de termitas.



Figura 3. Areatza. Ejemplos de ataques de termitas en dintel, viga, pilar y tocón en zona verde.

El objetivo de la inspección es doble: por un lado, detectar la presencia de actividad o daños provocados por termitas; por otro, identificar posibles patologías estructurales visibles, sin necesidad de realizar catas. En caso de observar indicios de pérdida de capacidad portante o situaciones de riesgo, se emite un aviso urgente al Ayuntamiento para que los técnicos competentes valoren la necesidad de apuntalamientos, inspecciones estructurales o intervenciones inmediatas.

Resultados

Como resultado de esta fase, se elabora un plano detallado de situación de la plaga, en el que se representa la distribución de la infestación en el casco urbano y los edificios afectados. Este documento permite establecer el nivel de infestación y delimitar con precisión el ámbito de actuación para la siguiente fase del plan: el tratamiento.

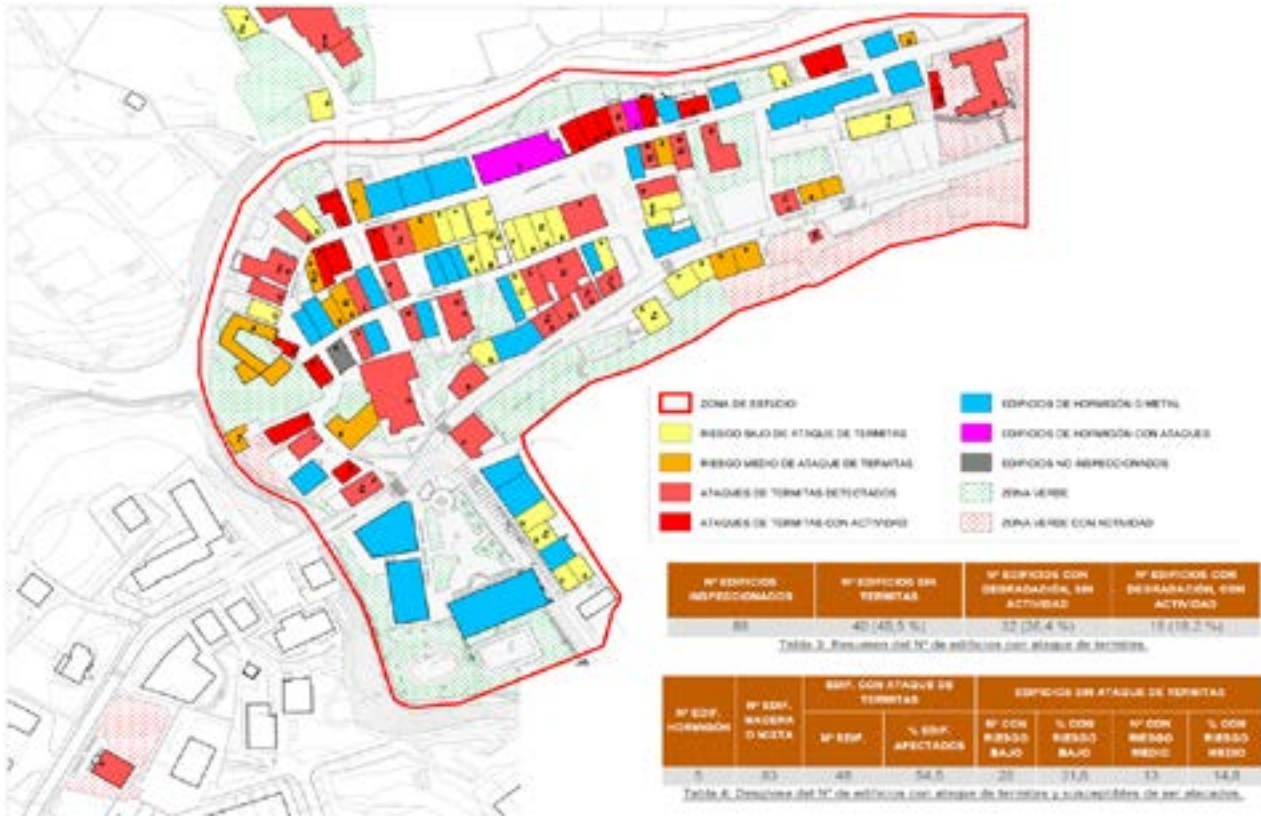


Figura 4. Municipio de Areatza. Plano resultante de la fase de diagnóstico.

En el municipio de Areatza se gestionó el acceso a una selección de 89 edificios dentro del ámbito de actuación (se consiguió acceder a 88 edificios). Durante las inspecciones, se constató la presencia de ataques de termitas en más de la mitad de los inmuebles revisados, lo que confirma la gravedad del problema en la zona. Como resultado, se elaboró un informe técnico que sirvió como base documental para la licitación del concurso público destinado al

tratamiento de la infestación. Una vez obtenidos los resultados de la fase de diagnóstico, igualmente se realizan charlas informativas a la ciudadanía con los resultados y explicación de los próximos pasos.

Conclusiones

La experiencia de Areatza no solo ilustra la aplicación práctica de la norma, sino que también pone de manifiesto la importancia de la colaboración institucional y ciudadana en este tipo de intervenciones. Con una planificación adecuada, el uso de tecnologías probadas y el respaldo de una normativa técnica, es posible mantener los cascos urbanos libres de termitas y proteger el patrimonio construido de forma eficaz y sostenible.

Referencias

(1) AENOR. UNE 56418:2016. Protocolo de actuación en cascos urbanos afectados por ataques de termitas subterráneas. Asociación Española de Normalización, 2016.

(2) Mora, D.; Hernández-Teixidor, D. Large-scale elimination of subterranean termite colonies of the genus Reticulitermes (Blattodea: Heterotermitidae) from town centers in Spain. Journal of Economic Entomology. 2025. <https://doi.org/10.1093/jee/toaf039>

25. **TIK Timber: un sistema portátil para la evaluación no destructiva de la madera. Desarrollo y validación**

Irene Gil-Martín^{a,b}, Elisabet Suarez^b, Andrés M. Roldán^a, Yaiza Fuentes-García^b y Antolino Gallego^b
^a Departamento de Electrónica y Tecnología de los Computadores, Universidad de Granada, 18071 Granada, España. ^b UIMA. Azucarera de San Isidro y Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación, Universidad de Granada, 18071 Granada, Españairenegm@ugr.es

Palabras clave: evaluación no destructiva, módulo de elasticidad dinámico, frecuencia de resonancia, inspección de madera, madera estructural.

Este trabajo presenta el desarrollo y validación de **TIK Timber**, un sistema portátil y autónomo para la evaluación no destructiva de madera estructural, basado en la determinación de su frecuencia de resonancia. El dispositivo opera mediante un procedimiento completamente automatizado que combina excitación controlada por solenoide y adquisición acústica con análisis espectral en tiempo real. La campaña de validación experimental incluyó más de 450 considerando múltiples variables: tipo de apoyo, ubicación del sensor, tipología de producto y especies de madera. Se compararon los resultados obtenidos con los sistemas comerciales de referencia (MTG, PLG y BING), demostrando alta concordancia, con desviaciones sistemáticamente inferiores al 2%. La versatilidad del sistema quedó reflejada en su capacidad para operar desde un único extremo, en configuraciones de tableros apilados y en la caracterización de elementos con discontinuidades estructurales como uniones dentadas. Estos resultados consolidan a **TIK Timber** como una herramienta robusta y precisa para la inspección de madera en contextos industriales y de investigación.

1. **Introducción**

El uso de madera estructural está experimentando un auge en el contexto actual de sostenibilidad y construcción [1], lo que conlleva la necesidad de técnicas fiables de clasificación y caracterización mecánica. Entre los métodos no destructivos (NDT), la determinación del módulo de elasticidad dinámico (MoEdin) a partir de la frecuencia de resonancia longitudinal ha demostrado ser especialmente eficaz para estimar la rigidez de piezas de madera [2-3].

La mayoría de los dispositivos comerciales para esta técnica, como Mechanical Timber Grader (MTG de Brookhuis) o Portable Lumber Grader (PLG de Fakopp), presentan algunas limitaciones: coste elevado, necesidad de operadores cualificados y baja portabilidad. Estas restricciones dificultan su implementación a escala industrial o en campo. En este contexto, se ha desarrollado TIK Timber, un sistema autónomo y de bajo coste diseñado para facilitar la inspección vibroacústica de madera estructural sin requerir intervención especializada ni condiciones controladas. El presente trabajo presenta su validación mediante una campaña experimental extensa centrada en distintas configuraciones de ensayo representativas de situaciones reales.

2. **Metodología**

2.1. **Principio de funcionamiento**

TIK Timber es un dispositivo portable que aplica una excitación mecánica mediante un solenoide controlado electrónicamente, registrando la respuesta acústica con un micrófono electret [4]. El análisis espectral de la señal se realiza a bordo del dispositivo mediante transformada rápida de Fourier (FFT), identificando la frecuencia fundamental de resonancia [3]. La Fig. 1 muestra un esquema de su funcionamiento autónomo. Este procedimiento permite una evaluación objetiva y repetible de la rigidez longitudinal de elementos de madera.

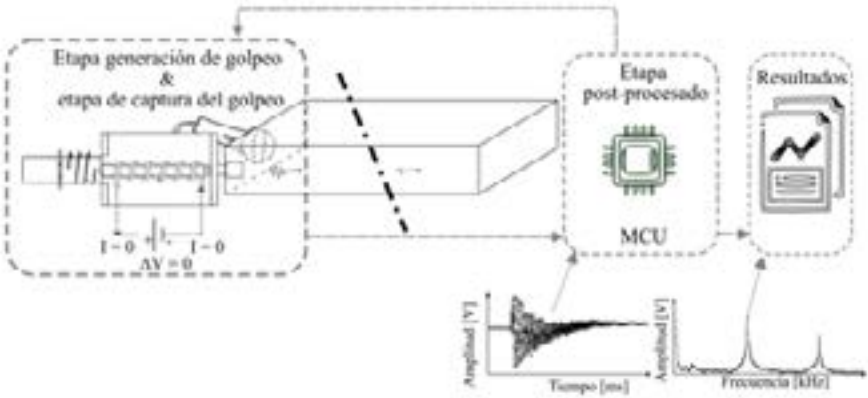


Figura 1. Diagrama de bloques del funcionamiento autónomo de TIK Timber.

A partir de esta frecuencia de resonancia (f), la longitud de la probeta (L) y su densidad (p), se calcula el MoEdin del elemento de madera según:

$$MoE_{din} = 4 \cdot f^2 \cdot L^2 \cdot \rho \qquad (1)$$

2.2. Diseño experimental

Se realizaron dos campañas de ensayos. La primera se diseñó para validar el equipo en distintas configuraciones experimentales (Fig. 2), entre las que se incluyeron golpeo y registro en testas contrarias (Fig. 2-b) o en la misma testa (Fig. 2-c), apoyo rígido de la tabla (Fig. 2-d), apoyo elástico de la tabla (Fig. 2-e), tablas apiladas (Fig. 2-f), vigas laminadas y tablas con finger joints. Se ensayaron probetas de madera de chopo y de *Pinus Nigra*, con longitudes entre 1500 y 3600 mm y con diferentes secciones. Los ensayos se hicieron con los 3 equipos (TIK Timber, MTG y BING), con 5 repeticiones de cada uno de ellos. La Fig. 3 muestra un ensayo realizado con **TIK Timber** en una tabla de chopo sobre apoyos elásticos. Las Fig. 4-a y 4-b muestran un ensayo realizado con MTG y BING, respectivamente.

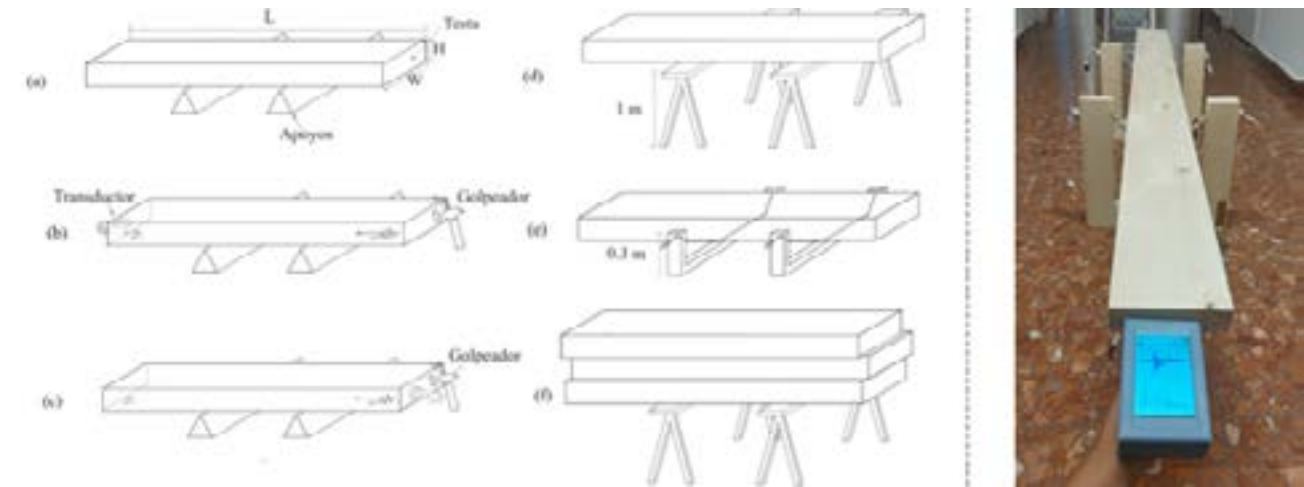


Figura 2. (a) Montaje general del ensayo; (b) Golpeo y registro es testas opuestas; (c) Golpeo y registro en la misma testa; (d) Tabla sobre apoyos rígidos; (e) Tabla sobre apoyos elásticos; (f) Tablas apiladas. L: longitud; H: canto; W: ancho. Figura 3. Ensayo realizado con TIK Timber en tabla sobre apoyos elásticos.



Figura 4. Dispositivos comerciales empleados para la clasificación de madera estructural. (a) MTG; (b) BING; (c) PLG.

Se realizó una segunda campaña experimental muy amplia, en la que se ensayaron 479 probetas de chopo del clon MC con secciones que varían entre 20x80 mm y 40x120 mm, con una longitud de 2500 mm y de 5 procedencias distintas seleccionadas en España. En cada probeta se realizó la determinación del MoEdin con los equipos **TIK Timber**, MTG y PLG, realizando 5 medidas por probeta. La Fig 4-c muestra un ensayo realizado con PLG. Todas las probetas fueron sometidas a un ensayo de tracción para determinar el módulo de elasticidad estático (MoEest), para posteriormente, realizar una comparación entre ambos valores.

3. Resultados y discusión

Los ensayos mostraron que la naturaleza del soporte (rígido o elástico) tuvo una influencia menor al 1% en la frecuencia medida, validando el uso de apoyos rígidos en entornos industriales. Tampoco se observaron diferencias significativas al registrar la señal en la misma o en la testa opuesta al impacto [5], lo que permite operar con fiabilidad desde un único extremo. La Fig. 5 ilustra estos resultados en una probeta de madera de chopo, analizando los 3 equipos utilizados (**TIK Timber**, BING y MTG), cuyas diferencias fueron inferiores al 1%, confirmando la fiabilidad del equipo **TIK Timber**.

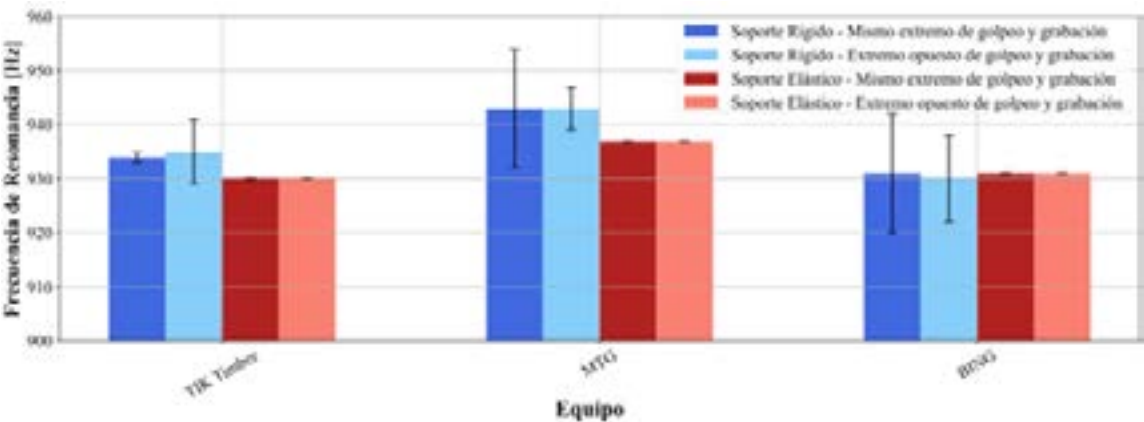


Figura 5. Frecuencias de resonancia obtenidas usando TIK Timber (izq.), MTG (centro) y BING (dcha.) comparando distintas configuraciones experimentales: apoyo rígido o elástico y golpeo y registro en la misma testa o en testas contrarias. Valores medios de 5 repeticiones y sus desviaciones estándar.

Las medidas realizadas en tablas aisladas y apiladas revelaron una diferencia inferior al 4% en las frecuencias de resonancia, obteniendo resultados más estables en el equipo **TIK Timber** que con los equipos comerciales. La aplicación de **TIK Timber** en aserrados con tablas apiladas es factible.

Respecto a las 14 probetas de madera de chopo con las mismas dimensiones y con *fingers joints* analizadas, se obtuvo una dispersión entre las frecuencias de resonancia de hasta el 16%, atribuible a la variabilidad inherente a la madera como material heterogéneo, como se refleja en las diferencias de densidades entre 466 y 723 kg/m³ [6].

La Fig. 6 muestra el MoE_{din} de las 479 probetas de chopo ensayadas con los dispositivos MTG, PLG y **TIK Timber**. Se puede ver que MTG y **TIK Timber** muestran resultados similares. El dispositivo PLG presenta valores ligeramente inferiores, siendo un 3.3% y un 2.5% menor a los dispositivos MTG y **TIK Timber**, respectivamente. En la Fig. 7 se representa la correlación lineal entre el MoE_{est} obtenido en los ensayos a tracción y el MoE_{din} obtenido con **TIK Timber** en las 479 probetas. Se observa una corrección alta, siendo el valor de R^2 más elevado de los 3 dispositivos analizados.

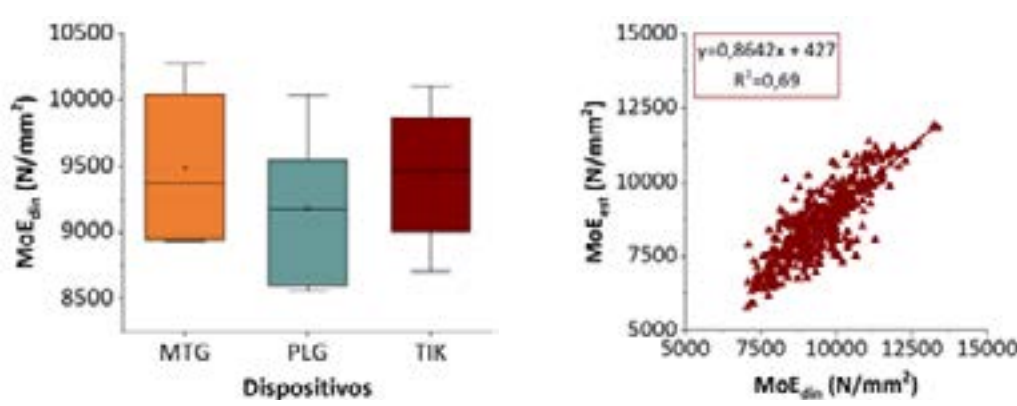


Figura 6. Módulos de elasticidad dinámicos (MoE_{din}) obtenidos en la campaña de 479 probetas con los dispositivos MTG, PLG y TIK). Figura 7. Relación entre los módulos de elasticidad estáticos y dinámicos obtenidos con TIK Timber de cada una de las 479 probetas.

4. Conclusiones

La validación experimental de **TIK Timber** demuestra su eficacia y precisión para la evaluación no destructiva de madera estructural. El sistema es capaz de operar en configuraciones reales: apoyos rígidos, mediciones desde un solo extremo, tablas apiladas y productos con uniones o vigas laminadas.

Los resultados obtenidos muestran una excelente concordancia con equipos comerciales, con menores desviaciones estándar en muchos casos, posicionando a **TIK Timber** como una herramienta idónea para su uso en entornos industriales. Su diseño portátil y automatizado permite reducir costes, mejorar la eficiencia de clasificación y avanzar hacia procesos más sostenibles y trazables en el sector forestal y de la construcción en madera.

Agradecimientos

Este trabajo se enmarca en el proyecto europeo LIFE Wood for Future (LIFE20 CCM/ES/001656), “Recuperación del chopo en la Vega de Granada para la mejora de la biodiversidad y la fijación de carbono a largo plazo en bioproductos estructurales”. Se agradece la colaboración del Grupo GranaSAT y de la Unidad de Investigación en Madera Estructural de Andalucía (UIMA).

Referencias

(1) Abed, J.; Rayburg, S.; Rodwell, J.; Neave, M. A Review of the Performance and Benefits of Mass Timber as an Alternative to Concrete and Steel for Improving the Sustainability of Structures. *Sustainability* 2022, 14(9), 5570.

(2) Brancheriau, L.; Bailleres, H. Natural vibration analysis of clear wooden beams: A theoretical review. *Wood Sci Technol.* 2002, 36(4), 347–365.

(3) Arriaga, F.; Íñiguez-González, G.; Esteban, M.; Divos, F. Vibration method for grading of large cross-section coniferous timber species. *Holzforschung* 2012, 66(3).

(4) Rojas, J. A. M.; Alpunte, J.; Postigo, D.; Rojas, I. M.; Vignote, S. Wood species identification using stress-wave analysis in the audible range. *Appl Acoust* 2011, 72(12), 934–942.

(5) Yu, Y.; Liu, Y.; Gong, M.; Xu, Z.; Fang, Y. R&R study of using a stress wave timer to measure the elastic modulus of structural dimension lumber. *Meas.* 2017, 95, 293-296.

(6) Íñiguez-González, G., Arriaga, F., Esteban, M., & Llana, D. F. Reference conditions and modification factors for the standardization of nondestructive variables used in the evaluation of existing timber structures. *Constr Build Mater*, 2015, 101, 1166-1171.

26. Casa Patio Tropical . Proyecto demostrativo de un sueño forestal

Alberto de la Torre Castellano^{a,b}; Antonio G. de la Torre Castellano^a
^a Delatorre_Castellano_Arquitectos. Ctra. de Sierra Nevada nº168, Huerta de San Gabriel, C.P. 18190, Granada. ^b Iberolam Timber & Technology S.L. C/ Gran Vía de Colón nº 48, Planta 5ª, Oficina D5-06, C.P. 18010, Granada.
delatorre_castellano@hotmail.com

Palabras clave: MCLamBS, chopo, pino, UIMA, PEMADE

La viabilidad del producto estructural MCLamBS, losas mixtas prefabricadas hechas de hormigón y de vigas laminadas de madera de chopo y pino, se demostrará en el forjado de una vivienda real hecha con estructura de madera y con alta eficiencia energética en los principios de arquitectura bioclimática y biopasiva, ubicada en Salobreña (Granada). Primera vivienda construida con este producto MCLamBS y además incorporando vigas de madera laminada de dos especies locales, certificadas forestalmente de forma sostenible.

La vivienda se gesta en el maridaje entre los condicionantes singulares de la posición de la parcela por sus medianeras existentes de diferentes lenguajes histórico/constructivos y la organización funcional en torno a un gran patio articulador, en su relación interior-exterior, como un árbol que crece en sus circunstancias. Diseño de alto confort térmico, orientación óptima, ventilación natural impulsada por flujos cruzados con alberca, transpiración, control tamizado de luz solar y vegetación trepadora. Materiales constructivos vistos, provenientes de la naturaleza, de baja huella de carbono, permitiendo un control de energía de consumo casi nulo optimizado con placas fotovoltaicas sobre lucernario.

Estructuralmente, las vigas de sección variable del perímetro de la vivienda ejecutadas in situ junto a la estructura vertical con hormigón, permiten ajustar la geometría quebrada de la parcela a borde de las medianerías, y a su vez, generan interiormente huecos de forjados de geometría regular que reciben las losas mixtas industrializadas de hormigón solidarias a vigas mixtas de chopo y pino. Una pérgola de madera de pino nacional como tamiz de luz, finalizará la vivienda en cubierta con el paisaje circundante. Un lucernario de píceas a modo de sombrero transpirará el respirar de la vivienda. Arquitectura industrializada con alma.

Ante una necesidad de gestión forestal sostenible de una amplia parte del territorio nacional menos habitado humanamente y que sin embargo alberga los recursos naturales para el desarrollo de la vida, y una demanda creciente de la sociedad por habitar las ciudades desde una perspectiva más conectada con la naturaleza en una gestión organizada y sostenible intergeneracionalmente, el sector de la arquitectura tiene la responsabilidad de ser un vínculo para esa reconciliación de las conexiones urbanas y rurales de nuestro territorio de proximidad. Por ello, surge este proyecto de vivienda unifamiliar demostrativa en el marco del proyecto Life Madera para el Futuro, como un demostrativo de un sueño forestal que une monte, vegas, investigación, industria y sociedad.

La viabilidad del producto estructural MCLamBS (1), losas mixtas prefabricadas hechas de hormigón y de vigas laminadas de madera de chopo y pino, se demostrará en el forjado de una vivienda real hecha con estructura de madera y con alta eficiencia energética en los principios de arquitectura bioclimática y biopasiva, ubicada en Salobreña (Granada). Primera vivienda construida con este producto MCLamBS y además incorporando vigas de madera laminada de dos especies locales en la totalidad de su estructura, certificadas forestalmente de forma sostenible con sello PEFC, junto a los proyectos demostrativos existentes en Ogíjares (Granada) y Ares (La Coruña) (2 y 3). Con ello, se siembran las semillas de una gestión forestal sostenible y conjunta con tracción en la demanda del sector de la construcción, uniendo tanto al sector del chopo (Agrupación de Productores de Chopo de Granada MARJAL), al sector del pino (Asociación de Propietarios Forestales de Andalucía Oriental FORET), a la universidad y su ingeniería tecnológica de investigación de nuevos materiales de construcción con recursos provenientes del medio natural (UGR-UIMA y USC-PEMADE), y a las empresas de construcción en madera y prefabricados mixtos (IBEROLAM T&T y RODIÑAS), para finalmente brotar el engraneje en nuestro territorio de una nueva manera de entender los orígenes desde la realidad del presente, vinculando indisolublemente bosque y ciudad a través de la arquitectura, y es para ello, este demostrativo.

La vivienda se gesta en el maridaje entre los condicionantes singulares de la posición de la parcela por sus medianeras existentes de diferentes lenguajes histórico/constructivos y la organización funcional en torno a un gran patio articulador, en su relación interior-exterior, como un árbol que crece en sus circunstancias (Fig.1 y 2). Diseño de alto confort térmico, orientación óptima, ventilación natural impulsada por flujos cruzados con alberca, transpiración, control tamizado de luz solar y vegetación trepadora. Materiales constructivos vistos, provenientes de la naturaleza, de baja huella de carbono, permitiendo un control de energía de consumo casi nulo optimizado con placas fotovoltaicas sobre lucernario.



Fig.1 y 2.: Izquierda: Concepto de árbol singular girado en su tronco para captura solar de su copa y vientos dominantes en adaptación a los condicionantes de su entorno y equilibrio natural de su sistema estructural integral. Derecha: Concepto de árbol cuyo desarrollo vital permite una copa donde la vida fluye en relación al cielo, además de cobertura y protección a la vida terrenal bajo él y su sombra. Concepto de gestión de Casa Patio Tropical en su entorno.

Al entrar al corazón del patio, tanto peatonalmente como a través del garaje, la vivienda se desarrolla en una sola planta y cota única para deslizamiento cómodo de los usuarios sobre el plano terrenal como premisa inicial en fluencia al exterior del Patio. Las trazas estructurales directrices de la vivienda se dirigen por los vacíos y llenos de patios vecinos, alturas variables de medianeras y materialidad. El Patio se posiciona en el vacío de la antigua casa que existió primitivamente y tras su derribo dejó su lenguaje armónico de muro medianero con faldones a dos aguas y textura de tapial bajo piedras del lugar. Las trazas de pórticos y crujiás se abren en ángulo transversal dirigidas por los “machones” de los antiguos muros perpendiculares del muro preexistente. Estirando la cadencia estructural de la casa sobre el patio, se refuerza el muro a integrar aportándole la estabilidad necesaria (Fig.3 y 4). La alberca a sus pies hace de zócalo de refuerzo aportando, además, frescor, sonoridad y movimiento de masas de aire, junto a la frondosidad trepadora de una colorida buganvilla y plantas aromáticas. El alma de la casa antigua vive en el nuevo Patio como una ruina integrada con vegetales pinceladas tropicales, como un cuadro de fondo de escena en el habitar. (Fig.3 y 4).



Fig.3 y 4.: Izquierda: Sección/Alzado 6-6'. Vista longitudinal desde la tercera crujía de la vivienda hacia medianera integrada 2. Derecha: Visualización desde el interior del salón-cocina-comedor. Cadencia del forjado de losa mixta madera-hormigón MCLamBS apoyado sobre vigas en "T invertida".

Un lucernario longitudinal en la dirección transversal en el fondo de la edificación actúa como tiro de ventilación en su doble altura, permitiendo la ventilación cruzada de las masas de aire caliente impulsadas por el flujo del agua y la fragancia de la vegetación, aportando confort climático en todas las estancias del hogar (Fig.3). La casa se compone de tres crujías y un cuerpo de altura en su relación al Patio.

Programa básico de la vivienda:

A 1) PLANTA BAJA “CASA PATIO TROPICAL”:

Es la planta principal de la vivienda (Fig.5). El acceso principal desde el exterior de la calle a través del patio de forma peatonal o garaje/almacén de acceso al patio. El patio acoge y recibe al usuario permitiendo su ingreso en la vivienda. En primera crujía el salón-estar-cocina-comedor es la estancia principal a la vivienda, junto a baño 1. En segunda crujía se conecta con Oficina/Dormitorio 2 y Distribuidor/Vestidor. En tercera crujía los usuarios desembarcan en la privacidad del Dormitorio principal en suit, además del Baño 2. Los dormitorios disponen de ventanales de salida/entradas secundarias hacia el patio.



Fig.5.: Planta baja de “CASA PATIO TROPICAL”

A 2) PLANTA ALTA Y CUBIERTA PÉRGOLA “CASA PATIO TROPICAL”:

Es la planta alta exterior de la vivienda a modo de cubierta transitable. Su acceso se articula a través del patio mediante escalera exterior en doble tramo alrededor de granado existente, desembarcando en la zona de terraza. Recibe al usuario una zona mirador con vistas dominantes de sur hacia la Vega de Salobreña y el mar. Una cadencia de cinco pórticos conforma la zona bajo Pérgola que conduce al Jardín del descanso. En el fondo de la vivienda, en zona de cubierta, se eleva un cuerpo lineal de lucernario que sobre zona distribuidor y baños alberga las placas fotovoltaicas (Fig.6 y 7).

Estructuralmente, las vigas de sección variable del perímetro de la vivienda ejecutadas en hormigón in situ en forma de “T invertida”, junto a la estructura vertical, permiten ajustar la geometría quebrada de la parcela a borde de las medianerías, y a su vez, generan interiormente huecos de forjados de geometría regular sin forjar que estarán destinados a recibir la singularidad del demostrativo estructural de la vivienda consistente en losas mixtas industrializadas de hormigón solidarias a vigas mixtas de chopo y pino, MCLamBS, calculadas, fabricadas en instaladas por la empresa spinnof de la UGR, Iberolam Timber & Technology SL, como un puzle en el sistema de

montaje en obra (Fig.8, 9 y 10).

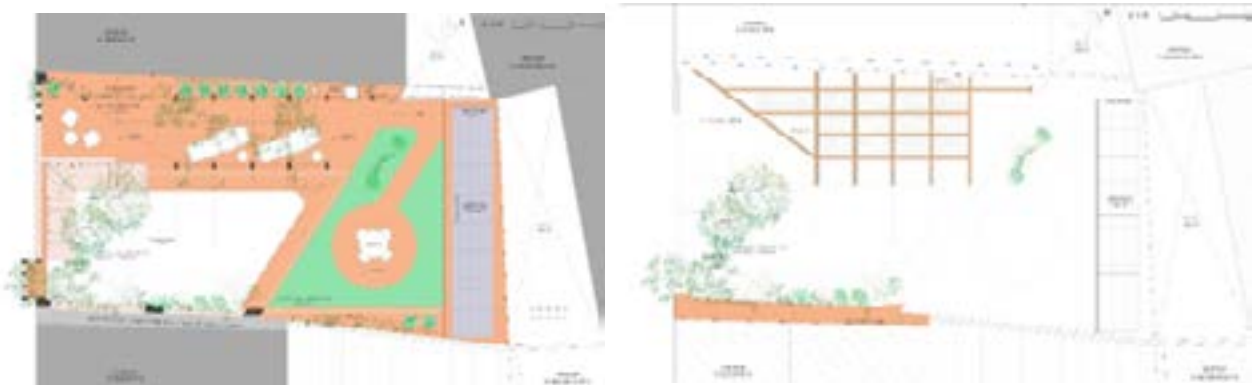


Fig.6 y 7.: Planta alta de" CASA PATIO TROPICAL" con PÉRGOLA, LUCERNARIO y MURO MEDIANERO



Fig.8.: Planta conjunta de estructura del sistema de unión de construcción in situ y construcción industrializada del forjado de cubierta de la casa, a modo de estructura horizontal de sistemas constructivos combinados.

Una pérgola de madera de abeto como tamiz de luz, finalizará la vivienda en cubierta con el paisaje circundante. Un lucernario de abeto a modo de sombrero transpirará el respirar de la vivienda y una linealidad de celosías prefabricadas blancas confugarán el cierre del patio a la calle y pretiles de cubierta en un lenguaje unificador interior-exterior favoreciendo la ventilación y el lenguaje arquitectónico mediterráneo del pueblo (Fig.11).

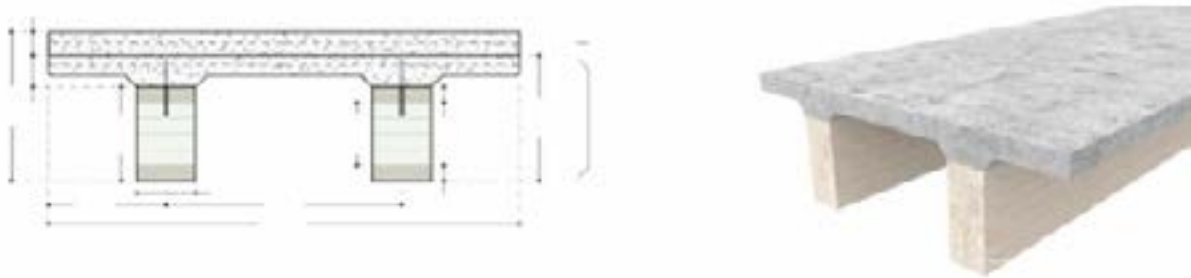


Fig.9 y 10.: Esquema de detalle constructivo de un forjado prefabricado mixto madera-hormigón MCLamBS mediante dos vigas laminadas encolados de dos tablas de pino laricio inferior y seis tablas de chopo superior en su tránsito y unión a la losa de hormigón



Fig.11.: Visualización desde el interior de la vivienda, en la zona abierta de salón-comedor-cocina y epacio flexible oficina-dormitorio hacia el exterior del patio y el fondo de escena del muro antiguo medianero integrado con la nueva cadencia estructural. Materialidades vistas con la expresividad del material.

Casa Patio Tropical: Demostrativo de arquitectura industrializada que posa sobre arquitectura in situ, en un ensamblaje estructural de modernidad y tradición, enraizando un sueño forestal que abraza la urbanidad en una relación indisoluble.

Referencias:

(1) Life Wood For Future. (2024, 4 de agosto). Prueba de carga exitosa del sistema MCLamBS fabricado por Iberolam. <https://life-woodforfuture.eu/en/exito-en-el-ensayo-de-carga-del-sistema-mclambs-fabricado-por-iberolam/>

(2) Madera sostenible. (2024, 16 de septiembre). Life Wood For Future, IBEROLAM exhibe el prototipo del forjado MCLamBS. <https://madera-sostenible.com/arquitectura/iberolam-exhibe-el-prototipo-del-forjado-mclambs/>

(3) Life Wood For Future. (2025, 19 de julio). La primera obra del mundo del producto mixto MCLamBS acoge la visita de profesionales en el municipio de Ares. <https://life-woodforfuture.eu/en/la-primera-obra-en-el-mundo-del-producto-mixto-mclambs-abre-sus-puertas-en-el-concello-de-ares/>

27. Análisis del uso de un modelo de intercambio (EM) para la estimación de costes inicial de proyectos en edificación industrializada de madera

Claudia Rojas^a, Claudio Mourgues^b, Pilar de la Rosa^c, Harrison Mesa^d, Francisco Ruz^c, Pablo Guindos^c
^a E2E, 10651, Maipú Santiago, Chile. ^b Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción, Pontificia Universidad Católica de Chile, 7820436, Santiago, Chile. ^c Escuela Técnica Superior de Arquitectura, 15008, Universidade da Coruña. ^d Centro Nacional de Excelencia para la Industria de la Madera (CENAMAD, ANID BASAL FB210015), Pontificia Universidad Católica de Chile, 7820436, Santiago, Chile. ^e Civil Construction School, Pontificia Universidad Católica de Chile, 7820436, Santiago, Chile. pilar.delarosa@udc.es

Palabras clave: entramado de madera, modelo de intercambio, BIM, estimación de costos, industrialización.

La construcción industrializada en madera, especialmente mediante sistemas de entramado ligero, ha experimentado un notable crecimiento a nivel global, impulsado por las múltiples ventajas que ofrece. No obstante, para que los proyectos y procesos constructivos sean eficaces, es esencial que en la fase de diseño se integren los requerimientos específicos relacionados con la fabricación y el montaje, de acuerdo con los principios del diseño (DFMA).

En este sentido, la implementación de la metodología BIM (Modelado de Información para la Construcción) ha contribuido a optimizar y facilitar las distintas actividades necesarias en el desarrollo de este tipo de proyectos, al mismo tiempo que refuerza la integración entre diseño, fabricación y ensamblaje. Sin embargo, para que BIM se utilice de forma eficaz, resulta fundamental contar con una definición clara de los requerimientos de información específicos de cada proceso.

En este trabajo se analiza la validez de un modelo de intercambio (EM-01) propuesto por Rojas et al. (8). Esta propuesta fue validada mediante la colaboración con empresas locales de prefabricación y contrastada con los conjuntos de propiedades recogidos en el estándar IFC.

Introducción y Estado del arte: BIM en la construcción industrializada

La construcción industrializada en madera, especialmente con sistemas de entramado ligero, ha crecido notablemente gracias a sus múltiples beneficios. Para garantizar su eficacia, es fundamental integrar desde el diseño los requerimientos de fabricación y montaje bajo principios DFMA (Design for Manufacture and Assembly). En este contexto, la metodología BIM resulta clave para optimizar procesos, siempre que se definan claramente los requerimientos informativos (8).

La estandarización de flujos de información, mediante el uso del Information Delivery Manual (IDM) y la norma ISO 29481, es esencial para lograr la interoperabilidad entre actores del proyecto y mejorar su coordinación, eficiencia y calidad (7). Uno de los desafíos críticos en proyectos industrializados de madera es la evaluación comercial temprana, ya que las decisiones iniciales impactan directamente en los costos (1).

Rojas et al. (8) propusieron un Modelo de Intercambio (EM-01) adaptado a sistemas de paneles de entramado ligero. Esta investigación busca validar su eficacia mediante el análisis de casos reales.

Aunque BIM ha mejorado el diseño, estimación de costos y seguimiento en obra (2,4), aún enfrenta desafíos relacionados con la integración de procesos industriales (3) y la interoperabilidad con sistemas CNC (7).

Metodología

La investigación evalúa el impacto del modelo de intercambio de datos EM_01, propuesto por Rojas et al. (8), en el proceso de evaluación temprana de proyectos prefabricados en madera con estructura de paneles de entramado ligero. Se estudiaron dos casos ilustrativos con proyectos de características similares, analizados a través de un experimento dividido en dos fases. El modelo EM_01, basado en el Information Delivery Manual (IDM), está diseñado para facilitar evaluaciones conceptuales mediante el uso de metodología BIM, incorporando parámetros geométricos y no geométricos que complementan el estándar IFC (ISO 16739-1:2018).

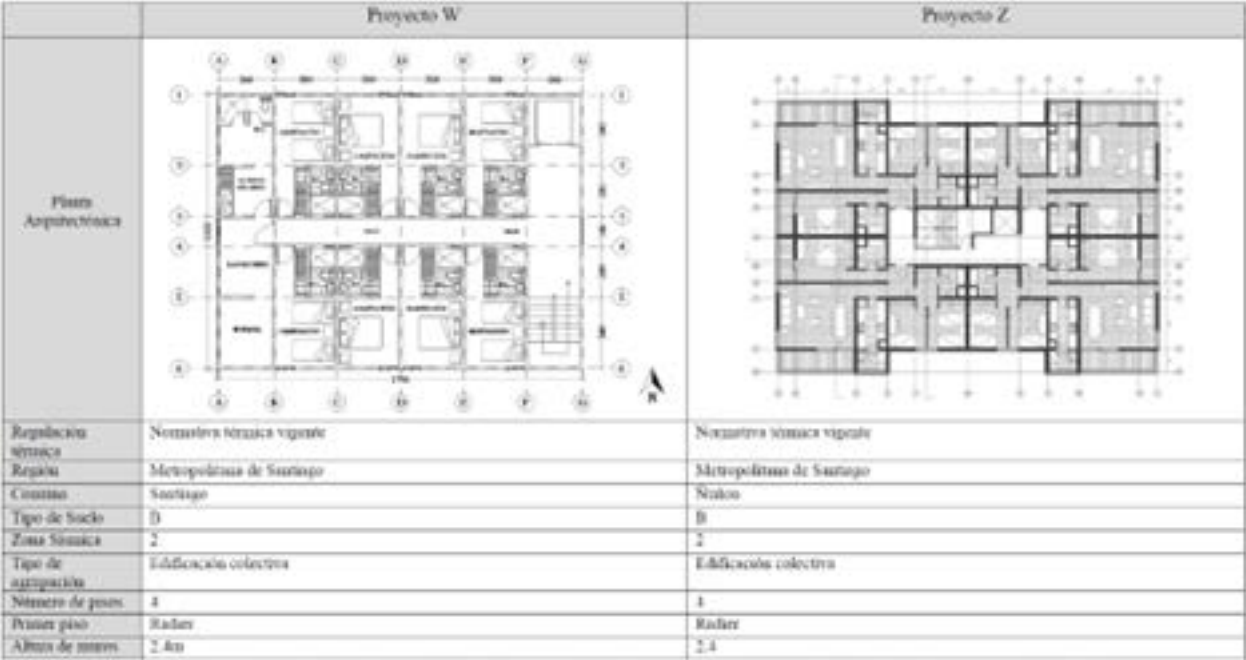


Figura 1. Antecedentes de los proyectos (casos ilustrativos)

En la fase 1, la empresa A evaluó el proyecto W usando el modelo EM_01, mientras que la empresa B aplicó el método tradicional. En la fase 2, se invirtieron los métodos: la empresa A usó el método tradicional y la empresa B el modelo EM_01 para el proyecto Z. Este diseño cruzado evita sesgos metodológicos.

Durante ambas fases, se utilizó la técnica de charrette, en la cual los evaluadores realizaban el proceso de cotización mientras completaban un cuestionario estructurado. Este cuestionario permitió medir cuatro variables dependientes: eficacia, evaluación general, eficiencia y nivel de incertidumbre, en función de los métodos aplicados. Las variables independientes del experimento fueron los proyectos evaluados y los métodos utilizados. El objetivo fue contrastar si el uso del modelo EM_01 ofrece mejoras significativas frente al método tradicional en la evaluación temprana de proyectos de construcción industrializada en madera.

En la figura 1 se muestra el detalle de los antecedentes de ambos proyectos.

Métodos de evaluación:

Método modelo de intercambio EM_01 (X): El modelo de intercambio EM_01 está diseñado para apoyar la evaluación temprana de proyectos prefabricados en madera, proporcionando información clave a través de una estructura de entidades y parámetros. Estos parámetros se dividen en geométricos y no geométricos. Los geométricos incluyen dimensiones como longitud, altura, espesor y nivel del edificio en el que se ubican los paneles de muros y suelos. Los no geométricos abarcan aspectos críticos que afectan el coste y la planificación del proyecto, como las soluciones constructivas, materiales utilizados, tipo de panel, tipo de tabla, tipología de anclaje, peso, coste por metro cuadrado, tiempos de producción y disponibilidad en el mercado.

Para implementar este modelo, se entregó a los evaluadores (empresas A y B) un conjunto de documentos: ficha resumen del proyecto, fichas técnicas de las soluciones constructivas, tablas con parámetros e información de costes unitarios. Todo el modelo se proporcionó en formato IFC, un estándar de código abierto promovido por BuildingSMART (2020), que garantiza la interoperabilidad entre diferentes softwares usados por empresas de construcción prefabricada.

La información en el modelo está organizada en Property Sets, que separan los parámetros de tipo (comunes a varios elementos) y de instancia (específicos de cada elemento), asegurando un flujo de información estandarizado para los proyectos W y Z. En la figura 2 se muestra un ejemplo del visor IFC referido al Proyecto W.



Figura 2. Modelo de intercambio Proyecto W en visor IFC.

Método tradicional: los insumos y entregables proporcionados en el método tradicional (Y) son los siguientes: 1.-Ficha resumen con antecedentes del proyecto, 2.-Planimetría 2D y 3.-Tabla con costos unitarios de materiales.

Resultados de la evaluación del uso del modelo de intercambio EM_01 en el proceso de evaluación temprana de proyectos industrializados en madera.

Eficacia y evaluación general

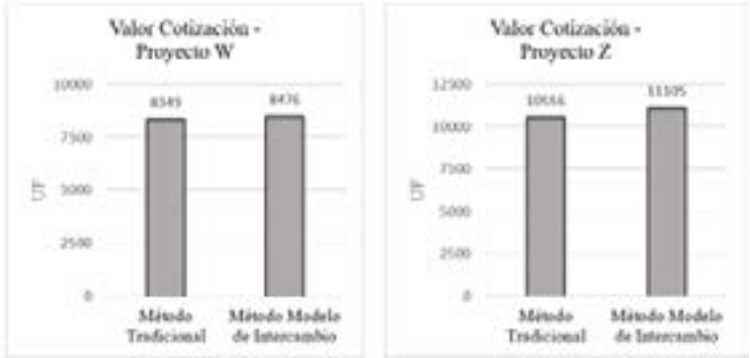


Figura 3. Resultados de los valores de cotización.

Eficiencia

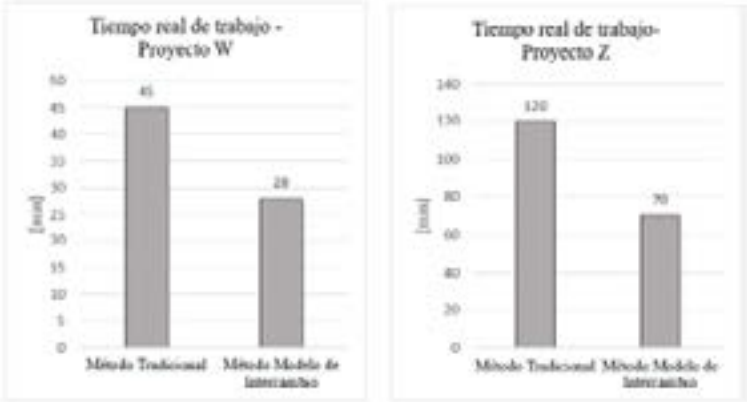


Figura 4. Resultado asociado al tiempo real de trabajo.

Nivel de certidumbre

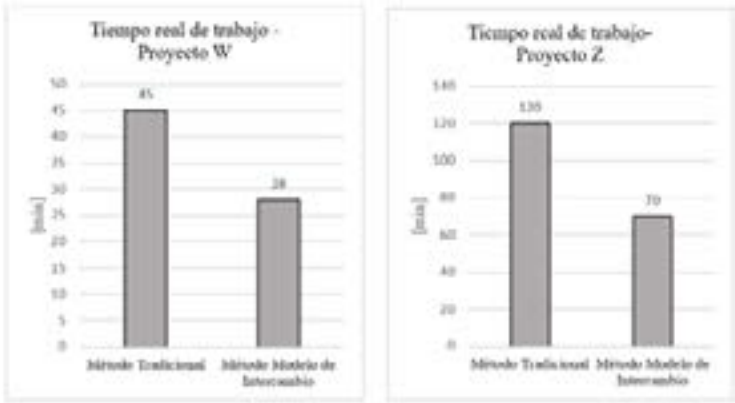


Figura 5. Cantidad de supuestos realizados.

Discusión

En términos de eficacia (Fig. 3), ambos métodos permitieron realizar cotizaciones, aunque el modelo EM_01 (método X) arrojó valores un 1,5% y 4,9% más altos en los proyectos W y Z, respectivamente. Esto se atribuye a que el modelo entrega información más detallada, lo que reduce la incertidumbre y permite estimaciones más precisas. Además, el modelo incluye verificaciones estructurales más conservadoras que el método tradicional, el cual tiende a subestimar componentes como pies derechos, vigas y muros estructurales.

En cuanto a eficiencia (Fig. 4), el método de intercambio permitió cotizar en menor tiempo, gracias a la disponibilidad directa de parámetros clave desde un modelo 3D, en contraste con la revisión manual de planimetría en el método tradicional. Los usuarios destacaron que desarrollar modelos 3D se vuelve casi imprescindible en etapas tempranas para obtener datos fiables y facilitar iteraciones con el cliente.

Respecto a la incertidumbre (Fig. 5), el modelo de intercambio

requirió menos supuestos debido a su mayor nivel de detalle. Los evaluadores señalaron que no fue necesario asumir aspectos como la cantidad de muros estructurales o el espaciamiento de vigas y pies derechos, lo cual aportó seguridad al proceso. Desde una perspectiva cualitativa, el modelo fue percibido como más confiable y adecuado para utilizarse como presupuesto base en etapas iniciales. En conclusión, EM_01 mejora la calidad del análisis comercial, agiliza el proceso y disminuye la incertidumbre en comparación con el método tradicional.

Conclusiones

Los resultados indican que el uso de un modelo de intercambio de información estandarizado mejora la eficiencia en la evaluación de proyectos, reduciendo tiempos de trabajo e incertidumbre al minimizar supuestos y facilitar iteraciones seguras. Los usuarios consideran que este modelo permite obtener cotizaciones más fiables, utilizables como presupuestos preliminares. El estudio se centró en la evaluación comercial de proyectos industrializados en madera, basado en el Information Delivery Manual (IDM) de Rojas et al. (8). Como futuro trabajo, se propone extender el análisis a otros subprocesos para optimizar la cadena de valor en estos proyectos.

Referencias

(1) Arafa M, Alqedra MA. Early stage cost estimation of buildings construction projects using artificial neural networks. J Artif Intell. 2011;10(1):63–75. <https://doi.org/10.3923/jai.2011.63.75>

(2) Azhar S. Building Information Modeling (BIM): Trends, benefits, risks, and challenges for the AEC industry. Leadership Manag Eng. 2011;11(3):241–52.

(3) Costa G, Madrazo L. Connecting building component catalogues with BIM models using semantic technologies: An application for precast concrete components. Autom Constr. 2015;57:239–48. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.05.007>

(4) Doumbouya L, Gao G, Guan C. Adoption of the Building Information Modeling (BIM) for construction project effectiveness: The review of BIM benefits. Am J Civil Eng Archit. 2016;4(3):74–9. <https://doi.org/10.12691/ajcea-4-3-1>

(5) ISO. ISO 29481-1:2016(E): Building information models — Information delivery manual — Part 1: Methodology and format. Geneva: International Organization for Standardization; 2016.

(6) Nawari NO. BIM standard in off-site construction. J Archit Eng. 2012;18(2):107–13. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AE.1943-5568.0000056](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000056)

(7) Patlakas P, Menendez J, Hairstans R. The potential, requirements, and limitations of BIM for offsite timber construction. Int J 3D Inf Model. 2015;4(1):54–70. <https://doi.org/10.4018/IJ3DIM.2015010104>

(8) Rojas O, Mourgues C, Guindos P. IDM for the conceptual evaluation process of industrialized timber projects [in revision]. 2023.

28. Modelización y análisis de la función estructural de la zapata en entramados de madera tradicionales

David Blanco^{a,b,c}, Andrés Lyond^{e,f}, Miguel Esteban^f
^a Grado en Ciencia y Tecnología de la Edificación, Universidad de Alcalá, Edificio Multidepartamental, c/ de Cifuentes, 28, 19001, Guadalajara, Guadalajara, Castilla-La Mancha, España. ^b Máster Universitario en Gestión Integral de Inmuebles y Servicios en el Patrimonio Arquitectónico, Universidad de Alcalá, Edificio Multidepartamental, c/de Cifuentes, 28, 19001, Guadalajara, Guadalajara, Castilla-La Mancha, España. ^c Máster en Construcción con Madera, Universidad Politécnica de Madrid, c/José Antonio Novais, 10, 28040, Madrid, Comunidad de Madrid, España. ^d Licenciatura en Ciencias de la Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile, avda. Vicuña Mackenna, 4860, Santiago, Chile. ^e Major en Ingeniería Matemática, Pontificia Universidad Católica de Chile, avda. Vicuña Mackenna, 4860, Santiago, Chile. ^f Departamento de Ingeniería y Gestión Forestal y Ambiental. ETSI Montes, Forestal y del Medio Natural. Universidad Politécnica de Madrid, c/José Antonio Novais, 10, 28040 Madrid, España.
david.blancot@alumnos.upm.es - andres.lyon@alumnos.upm.es

Palabras clave: Madera; Construcción tradicional; Entramados; Zapata; MEF.

Resumen

En la tradición constructiva española es común la presencia de zapatas (pieza de madera entre pilar y viga) en la construcción de muros de entramado y en corredores exteriores tipo “corrala”. Además de ser un elemento estético, una de sus funciones es sostener y calzar vigas articuladas por empalme. Por otro lado, pretende acortar la luz efectiva de la viga que sostiene, reducir la flecha y minimizar el fenómeno de punzado del pilar sobre la viga. Este trabajo tiene como objetivo estudiar cuantitativamente estos efectos.

La metodología incluye el desarrollo de un modelo experimental y EF en 3D de una viga simplemente apoyada sobre zapatas. Esta estructura es sometida a cargas variables y calculado el desplazamiento máximo en régimen elástico y no lineal. Para cuantificar la reducción de flecha otorgada por la zapata en un solo vano, se comparan los resultados con una viga apoyada directamente sobre pilares. La validación de los modelos computacionales es realizada mediante la comparación de resultados con ensayos de vigas de madera de pino silvestre.

Modelo

La configuración típica de un corredor consiste en un entramado de pies derechos de sección cuadrada, y una viga sobre la cual apoyan las viguetas de forjado. Entre la testa superior del pie derecho y la carrera se encuentra la zapata, usualmente conectada al pie derecho por una unión de botón y botonera y a la carrera por clavos bellote en cada extremo de la pieza (Santa Cruz, 2012).

Si bien un pórtico de esta naturaleza posee usualmente varias crujías, el modelo y análisis se realiza para una crujía, donde las condiciones de borde determinan el tipo de extensión de la estructura (si la carrera es continua o empalmada en el tramo). En dichas condiciones de borde y al cortar la estructura completa a nivel de su apoyo en el pilar, la zapata se transforma en un voladizo. Este voladizo se modeliza como una viga biapoyada con voladizo a un lado, siendo este último la zapata mientras que el doble apoyo consigue el efecto del empotramiento que supone el corte de la estructura (véase Figura 1).

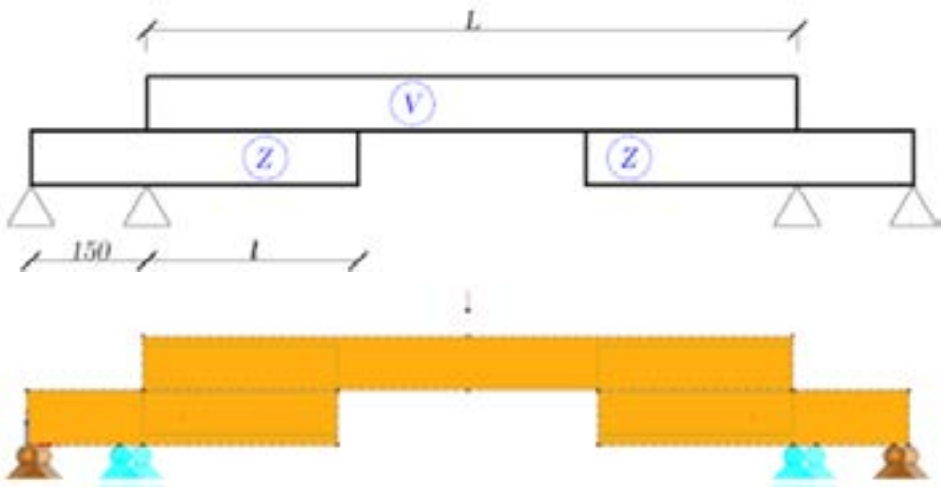


Figura 1. Esquema del modelo 3D y de la configuración general de los ensayos.

Se considera para el análisis la situación en que la carrera está empalmada articuladamente a ambos extremos de la crujía. De esta manera los elementos Z, que representan las zapatas, con una luz en voladizo de l, y una distancia entre apoyos de 0.150 [m], mientras que el elemento V representa la viga con dimensiones L (longitud) y una sección cuadrada de base b y canto h. Se define la relación entre la luz del vano L y longitud del vuelo de la zapata l como:

$$\beta = \frac{l}{L} \tag{1}$$

La geometría de las piezas (tanto vigas como zapatas) toma secciones de 0.070×0.070 [m²]. Esta sección se corresponde con el modelo experimental desarrollado a escala y se replica en los modelos computacionales.

A consecuencia de esta geometría, y según se determina en la norma UNE-EN 56544:2022, Tabla 2, p.16, para elementos de *Pinus Sylvestris L.* (Pino Silvestre con denominación comercial Pino Soria de Categoría Especial) de anchura b≤70 mm, es posible clasificar las probetas con Calidad de madera estructural ME-1 o ME-2. En nuestro caso concreto se optará por la calidad ME-1. Esta calidad aporta homogeneidad a la muestra y reduce la posible influencia local de algunos defectos.

Según la norma UNE-EN 1912:2025, Tabla 1, p.8, la clase visual ME-1 tiene asignada una clase resistente C27, que dispone las siguientes características de rigidez y densidad media:

$$\begin{aligned} E_x &= 11.500 \text{ [N/mm}^2\text{]} \\ E_y = E_z &= 380 \text{ [N/mm}^2\text{]} \\ G_{yz} &= 72 \text{ [N/mm}^2\text{]} \\ G_{xz} = G_{xy} &= 720 \text{ [N/mm}^2\text{]} \\ \rho_m &= 430 \text{ [kg/m}^3\text{]} \end{aligned}$$

Ensayos

Con el fin de validar los modelos EF planteados se han realizado ensayos con el mismo planteamiento, geometría y material definido anteriormente (véase Figura 2) para poder hacer lo siguiente:

Medición y cálculo analítico de los valores de rigidez principales (E_{x,m}).

$$E_{x,m} = \frac{\Delta P}{\Delta \delta} \cdot \frac{L^3}{48 \cdot I} \cdot \left(1 + 16 \cdot \frac{6}{5} \cdot \left(\frac{h}{L} \right)^2 \right) \tag{2}$$

Estudiar el comportamiento del sistema constructivo simplificado mediante la cuantificación de la rigidez aparente

$$(K_{ap} = \Delta F / \Delta \delta).$$

Deducción del resto de constantes según aproximación por la UNE-EN 384.

$$G_{xz,m} = \frac{E_{x,m}}{16} \tag{3}$$

$$E_{y,m} = E_{z,m} = \frac{E_{x,m}}{30} \tag{4}$$

En relación a los ensayos en sí se indica la siguiente información relevante:

- **Máquina de ensayos:** MEM 103.
- **Disposición de la fibra:** para asegurar que el efecto de la anisotropía de la madera es la menor posible se han dispuesto siempre las piezas con los anillos lo más **tendidos horizontalmente** (procurando que el corte tangencial se corresponda con el plano horizontal).
- **Representatividad:** se ha considerado ensayar 14 vigas para cada sistema (sin y con zapata), y para los casos con zapata considerar proporcionar entre β_mín=0,05 y β_máx=0,375 para un Δβ=0,025; esto da una muestra total de ensayos teórica de 14²=196 ensayos.
- **Carga máxima de ensayo:** la carga máxima calculada para los ensayos se ha basado en la carga de rotura teórica para la clase resistente indicada anteriormente tal y como sigue:

$$\begin{aligned} f_{m,k} \cdot \gamma_m &= \frac{M}{W} = \frac{\frac{P}{2} \cdot \frac{L}{2}}{\left(\frac{b \cdot h^2}{6} \right)} = \frac{6 \cdot P \cdot L}{4 \cdot b \cdot h^2} \rightarrow P = \frac{4 \cdot f_{m,k} \cdot k \cdot b \cdot h^2}{6 \cdot L} \rightarrow \\ P &= \frac{4 \cdot 27 \cdot 1,35 \cdot 70 \cdot 70^2}{6 \cdot 840} = 9.922,50 \text{ N} \approx 10.000 \text{ N} = \mathbf{10 \text{ kN}} \end{aligned}$$

- **Tiempo de ensayo:** se considera un tiempo de ensayo igual a 3 minutos en todos los casos, equivalente a un avance por fuerza de 55,56 N/s, con el fin de normalizar los resultados.

Resultados y Conclusiones

De cada uno de los ensayos señalados anteriormente se obtuvieron gráficas Fuerza de la célula de carga/ Desplazamiento de la célula de carga de forma tal que pretendiendo evitar valores atípicos y comportamientos no representativos del sistema se filtraron los datos de cada gráfica quedándonos sólo en el rango:

$$F:\{0.50 \cdot F_{máx} \leq F(\delta) \leq 0.80 \cdot F_{máx} \}$$

Con cada rango se realizó una regresión lineal en el formato $F(\delta)=m\cdot\delta+n$, donde m se define como la pendiente de recta de la regresión y es equivalente a la Rigidez aparente del sistema K_{ap} , determinándose que $K_{ap}=m$.

La variación de la Rigidez aparente se ha estudiado tanto en el conjunto de todos los sistemas utilizando promedios ($K_{ap,m}$) como para cada viga individualmente (K_{ap}), obteniendo las siguientes gráficas mixtas de los ensayos y el modelizado en RFEM 5:

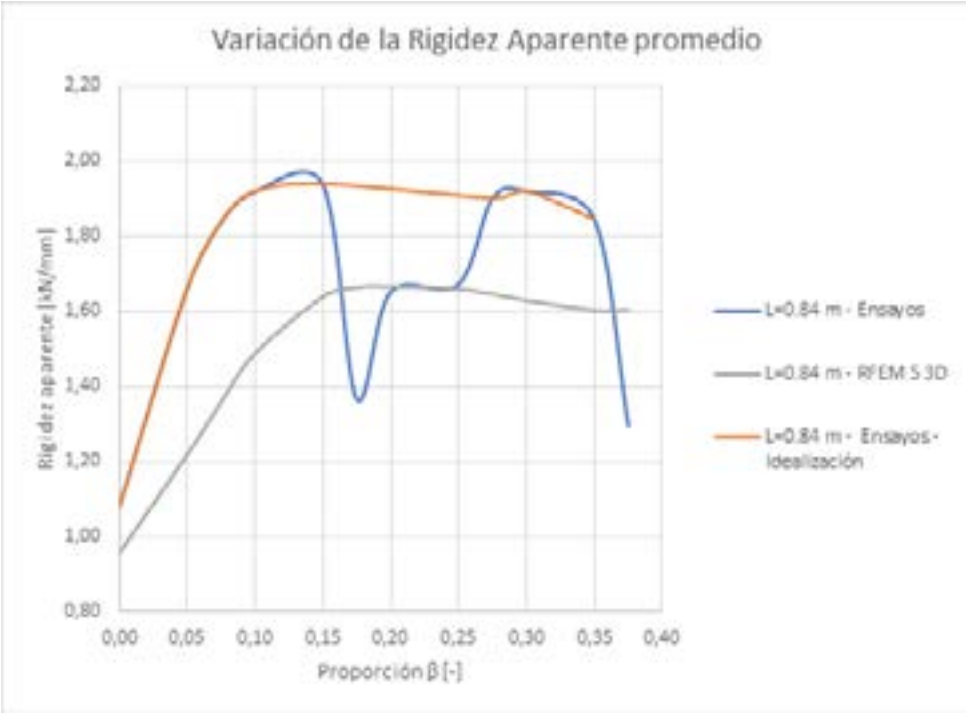


Figura 2. Gráfica de la variación de la Rigidez Aparente promedio ($K_{ap,m}$).

Se aprecian de los ensayos una caída de la rigidez aparente en el rango $\{0,150\leq\beta\leq0,275\}$, mientras que en el modelo computacional no. Una posible causa de esta diferencia es la variación de rigidez E_x de la zapata.

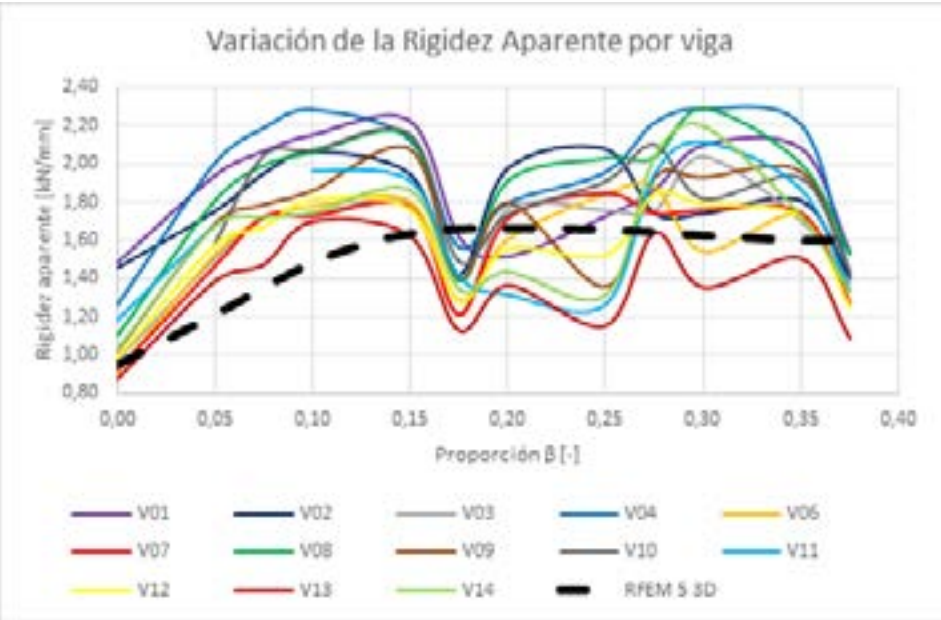


Figura 3. Gráfica de la variación de la Rigidez Aparente individual por viga (K_{ap}).

Por otro lado, y complementariamente se ha analizado la variación de la rigidez por viga y también se aprecian las mismas anomalías dadas en la gráfica anterior.

Comparada la gráfica negra discontinua (modelo computacional) con el resto de gráficas observamos la misma oscilación; se observa que la causa de dicha variación corresponde a la influencia de la rigidez de la zapata y no de la viga.

Por tanto respecto a la metodología se concluye que las zapatas también han de ser profusamente caracterizadas.

Por otro lado respecto a los resultados y de manera preliminar se observa que tanto en los ensayos como en los modelos computacionales existe un máximo global de la rigidez aparente en el rango de proporción $\{0,150\leq\beta\leq0,175\}$, sin aumentar para valores β más altos.

Finalmente constituimos con este trabajo un punto de partida para el análisis de este tipo de sistemas y que sirva de base para futuras investigaciones.

Referencias

(1) Santa Cruz Astorqui, Jaime (2012). *Estudio tipológico, constructivo y estructural de las casas de corredor en Madrid*. Tesis (Doctoral), E.U. de Arquitectura Técnica (UPM).

(2) AENOR. *Eurocódigo 5: Proyecto de estructuras de madera*. UNE-EN 1995-1-1. Madrid: AENOR, 2016.

(3) AENOR. *Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas*. UNE-EN 56544. Madrid: AENOR, 2022.

(4) AENOR. *Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de calidades visuales y especies*. UNE-EN 1912. Madrid: AENOR, 2025.

(5) AENOR. *Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad*. UNE-EN 384. Madrid: AENOR, 2017.

29. El corcho como material de construcción

Enrique Torres Álvarez^a
^a Departamento de Ciencias Agroforestales. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Universidad de Huelva. Campus Universitario del Carmen, 21007 Huelva. etorres@uhu.es

Palabras clave: aislamiento térmico, aislamiento acústico, aislamiento antivibrático, suberina, alcornoque, *Quercus suber L.*

El corcho es la corteza del alcornoque (*Quercus suber L.*), una especie forestal que se extiende de manera natural por la cuenca del Mediterráneo occidental, ocupando unas 2.000.000 ha. Se trata de un producto forestal no maderable cuya principal aplicación es el vedamiento de vinos. De modo complementario a la industria taponera surgen las aplicaciones del corcho como material de construcción. En esta comunicación se describe la estructura celular y la composición química de la pared celular de las células de corcho, en las que predomina la suberina. A partir de dicha estructura y composición deducen las propiedades físico-mecánicas del corcho, entre las que destaca su baja densidad (en torno a 200 kg/m3), su elasticidad (en concreto su alta resistencia a compresión) y su durabilidad, propiedades que encuentran diversas aplicaciones en el ámbito de la construcción.

Tras una ligera transformación, la industria corchera da lugar a diversos productos como corcho natural en plancha, aglomerado puro o negro, aglomerado compuesto (con colas naturales) y aglomerados mixtos con otros componentes. Cada uno de estos productos puede tener diferentes aplicaciones en la construcción, principalmente como material aislante, en el ámbito térmico, acústico y/o antivibrático. El corcho puede utilizarse en planchas de determinadas dimensiones o como corcho proyectado, para rehabilitación energética de edificios, como Sistema de Aislamiento Térmico Exterior SATE o en obra nueva. También puede utilizarse eficazmente en juntas de expansión de otros materiales como el hormigón. De su elevada resistencia a compresión se deduce su capacidad como aislante antivibrático, tanto en tapetes o bases que evitan que las vibraciones de la maquinaria afecten a la estructura de los edificios, como en apoyos simples de sistemas viga-pilar.

Los materiales de corcho no solo cumplen adecuadamente con su comportamiento esperado como material de construcción, sino que cabe añadirle numerosos valores económicos, ecológicos y sociales, a los que se suma la capacidad de regeneración de la materia prima en el medio natural, lo que asegura la sostenibilidad del recurso.

30. Madera de chopo aplicada al proyecto

Miguel Martínez Monedero^a, Ignacio de Teresa Fernández-Casas^a, Adelaida Martín Martín, Rocío López Berenguer^a, Mario Sánchez Samos^a, Jaime Vergara Muñoz^a
^a Universidad de Granada. Avda. del Hospicio, s/n, C.P. 18010 Granada, España.
mmartinezmonedero@go.ugr.es

Palabras clave: Chopo, estructura, proyecto, viga, MCLamBs, pilar.

Resumen

Se presentan varios proyectos en los que se utiliza la madera de chopo como elemento estructural, partiendo de la investigación llevada a cabo por la Universidad de Granada y el proyecto Life Wood For Future. La madera de chopo está actualmente en proceso de desarrollo en la provincia de Granada, con el objetivo de analizar su capacidad estructural formando parte integrante de elementos constructivos, como vigas laminadas, o forjados mixtos de madera y hormigón. Se quiere con ello sacar el máximo partido a la madera local, que actualmente es infrautilizada, fortaleciendo con ello el tejido agrícola e industrial de la provincia y favoreciendo el cultivo de choperas en el entorno de la vega de Granada.

Desde la UGR, y a través del grupo de investigación PAPAC (Proyecto Arquitectónico y Patrimonio Cultural: HUM-1056), se están aplicando estos avances en madera de chopo a varios proyectos, que tienen a su vez como objetivo detectar posibles nuevos usos, orientando la investigación y demandando nuevos estudios. Esto ha llevado a calcular los primeros pilares de chopo, a generar modelos de utilidad para detalles constructivos como el apoyo de vigas laminadas sobre pilares circulares, o a desarrollar sistemas industrializados para vivienda modular. Los proyectos reales forman por ello un importante complemento a la investigación en laboratorio, y suponen un último paso en el proceso de cultivo, producción y aplicación en arquitectura de la madera de chopo.

Madera de chopo aplicada al proyecto

Se presentan varios proyectos en los que se utiliza la madera de chopo como elemento estructural, partiendo de la investigación llevada a cabo por la Universidad de Granada y el proyecto Life Wood For Future. La madera de chopo está actualmente en proceso de desarrollo en la provincia de Granada, con el objetivo de analizar su capacidad estructural formando parte integrante de elementos constructivos, como vigas laminadas o forjados mixtos de madera y hormigón. Se quiere con ello sacar el máximo partido a la madera local, que actualmente es infrautilizada, fortaleciendo con ello el tejido agrícola e industrial de la provincia y favoreciendo el cultivo de choperas en el entorno de la vega de Granada.

Desde la UGR, y a través del grupo de investigación PAPAC (Proyecto Arquitectónico y Patrimonio Cultural: HUM-1056), se están aplicando estos avances en madera de chopo a varios proyectos, que tienen a su vez como objetivo detectar posibles nuevos usos, orientando la investigación y demandando nuevos estudios. Esto ha llevado a calcular los primeros pilares de chopo, a generar modelos de utilidad para detalles constructivos como el apoyo de vigas laminadas sobre pilares circulares, o a desarrollar sistemas industrializados para vivienda modular. Los proyectos reales forman por ello un importante complemento a la investigación en laboratorio, y suponen un último paso en el proceso de cultivo, producción y aplicación en arquitectura de la madera de chopo.

El artículo muestra varios proyectos que incorporan elementos estructurales en madera de chopo desarrollados desde la Universidad de Granada y el Proyecto Life Wood for Future. Se pretende con ello aplicar los últimos avances en este campo a proyectos reales, con el objetivo de difundir sus productos, testar su adecuación a los requerimientos del proyecto contemporáneo, y orientar la innovación hacia nuevos vectores de investigación. Se quiere por tanto aportar casos prácticos desde el campo de la arquitectura, que ensayen y reorienten la investigación, y que complementen las fases ya en producción agroforestal e industrial. El objetivo principal es contribuir, en su fase final, al proyecto actualmente en marcha a gran escala, asociado a la madera de chopo en la provincia de Granada, desde la aplicación de sus productos en diferentes ámbitos, escalas, periodos, iniciativas, y niveles de desarrollo. Los proyectos que se presentan a continuación tienen por tanto situaciones diversas, que pretenden acercarse a la construcción en madera de chopo desde diferentes perspectivas.

En este sentido, su financiación parte de los siguientes agentes:

- Promoción privada y autopromoción
- Subvención local: Universidad de Granada / Cátedra de Sostenibilidad / Proyecto Life Wood For Future (LWFF)
- Autonómica: Junta de Andalucía (proyecto de investigación VICHO).

- Internacional (Alianza Arqus, UNESCO, Universidad de Gratz, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil)

El formato y tiempo de dichos proyectos se desarrolla a su vez en varios ámbitos complementarios:

- Proyectos aislados (promotor + constructora)
- Proyectos experimentales (talleres UGR + talleres construcción)
- Concursos arquitectónicos
- Proyectos industrializados de fabricación en serie
- Proyectos docentes: cursos académicos internacionales y temas de master
- Proyectos de investigación (VICH0)

Los productos desarrollados se dividen en 3 elementos estructurales fundamentales: pilares, vigas y forjados. Cada proyecto incorpora al menos uno de estos elementos. Se dividen a continuación los proyectos en estos 3 grupos.

- Pilares: pilares de sección circular y pilares rectangulares alistonados (Fig. 1)
Proyectos: Chopidou, TAC, Monte Energético
- Vigas: vigas laminadas y vigas de rollizos de chopo (Fig. 2).
Proyectos: Chopidou, VICH0, UNO system, Chico, Aulario UGR.
- Forjados: forjado mixto de madera y hormigón (MCLamBs) (Fig.2).
Proyectos: Bastardo Granada, Chopidou, Aulario UGR

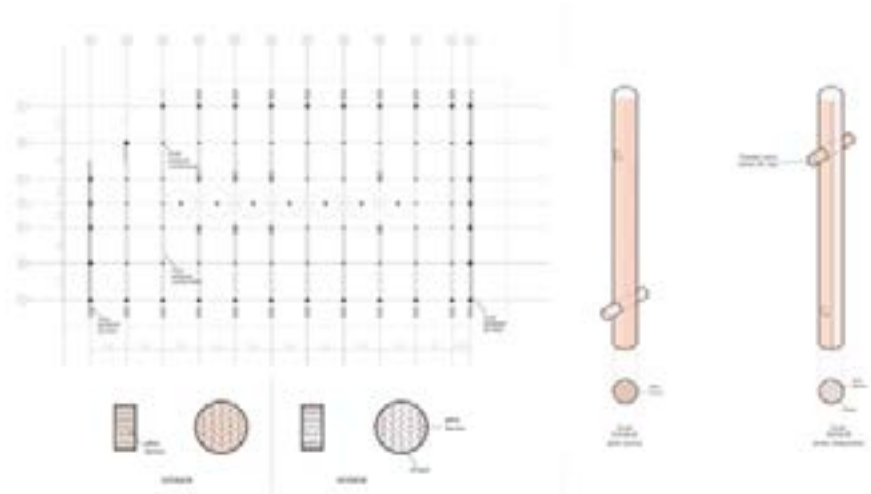


Figura 1. Propuesta de nudo en pilar de madera cilíndrico y planta estructural del concurso del Chopidou, para el Campus del PTS.

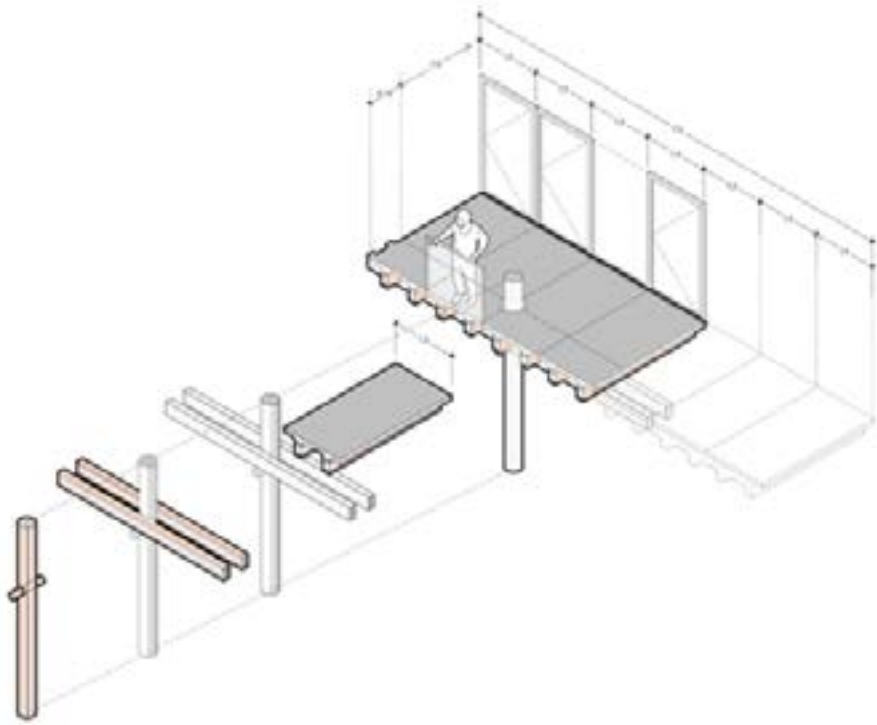


Figura 2. Axonometría del apoyo de los forjados MCLamBs sobre vigas laminadas y pilares cilíndricos

Los proyectos se encuentran actualmente en diferentes etapas de desarrollo, no habiendo sido concluidos ninguno por el momento. Algunos de ellos están sin embargo en proceso de construcción, otros en desarrollo del proyecto de ejecución, y algunos han recibido ya ayudas y subvenciones para su implementación.

Cada proyecto parte de alguna manera de las estructuras ya testadas, o en proceso de desarrollo, y propone un uso concreto de las mismas, que de alguna manera marque objetivos futuros. No se trata por tanto únicamente de analizar cómo la industria influye en los proyectos, sino también cómo los proyectos pueden influir en la industria. Los proyectos quieren a su vez incorporar otras disciplinas afines a la arquitectura, como la sociología, la construcción, o la economía, con el fin de abordar la temática de manera transversal.

Se muestran a continuación los diferentes proyectos separados en dos grupos. El primero de ellos está formado por proyectos puntuales asociados a encargos profesionales directos, a concursos, o a iniciativas de investigación

a través la colaboración con talleres de diseño y construcción. El segundo grupo está relacionado con proyectos a medio y largo plazo, que van más allá de una construcción aislada, como es el caso de proyectos de investigación, talleres de master, cursos de especialización y proyectos de construcción industrializada y en serie.

Los siguientes diagramas muestran el proceso de transformación de la madera de chopo desde su plantación, hasta su implementación en proyectos particulares, y en proyectos de vivienda industrializada (Fig. 3 y 4).

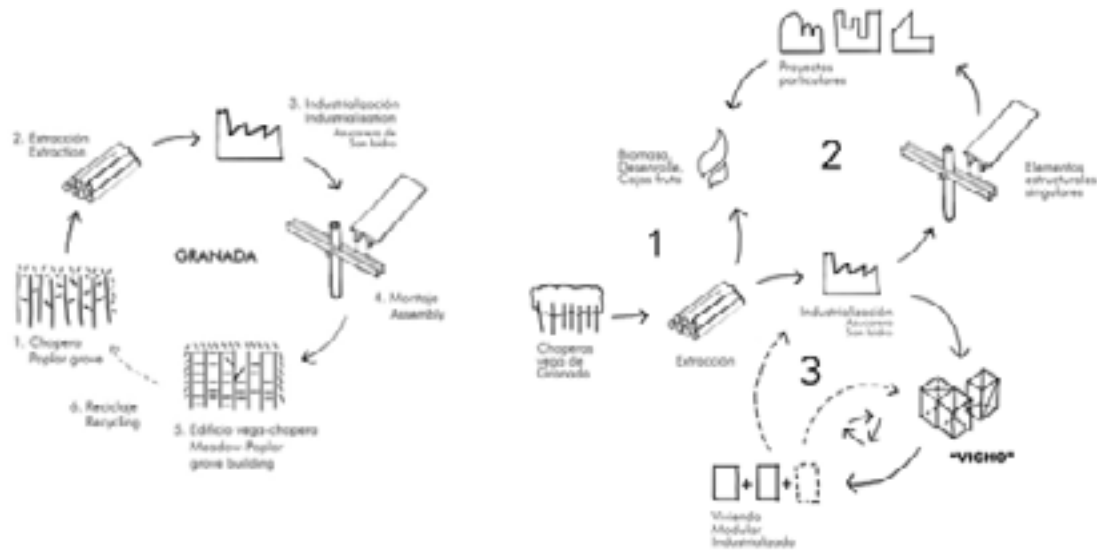


Figura 3. Diagrama para el proyecto “Chopidou”, en relación al proceso de fabricación industrial de estructuras de madera de chopo.
Figura 4. Diagrama de la Vivienda Modular en Madera de Chopo. Proyectos VICO y MODHO.

1. Proyectos aislados, experimentales y concursos

Hostel Bastardo Granada: se trata de la rehabilitación del antiguo edificio de la Compañía Granadina de Industria y Comercio, situado en la placeta de Alhóndiga, en el centro de Granada. El proyecto añade al edificio patrimonial existente dos nuevos volúmenes construidos, que incorporan los forjados mixtos de madera y hormigón MCLamBs, con luces entre apoyos de 8 metros. El proyecto plantea una estructura prefabricada que pueda ser insertada en poco tiempo en la parcela de difícil acceso y que se diferencie claramente del edificio preexistente (Fig. 5). Estado: en demolición y desarrollo del proyecto de ejecución.

Casa Chico: vivienda unifamiliar aislada situada en Playa Granada, en la que se introduce una estructura de vigas laminadas de madera de chopo que forman una retícula de 4,33 x 4,33 metros. Esta estructura queda descolgada mediante tirantes del techo de hormigón, salvando una luz entre apoyos de 13 m. Estado: en construcción.

Monte energético: vivienda experimental cuya estructura está compuesta por pilares y vigas de rollizos de madera de chopo de unos 20-25 cm de diámetro. Los pórticos de rollizos forman una retícula de 3,5x3,5 metros, con dos plantas de altura. Las características técnicas de la variedad de chopo (Luisa Avanto), así como el cálculo de la estructura, se ha realizado en colaboración con la UGR y su SPIN-OFF, Iberolam (Fig. 6). Estado: en construcción.

Chopidou: concurso por invitación para la construcción de un edificio híbrido en el Parque Tecnológico de la Salud (PTS) de Granada. El edificio quiere aprender de la lógica estructural y bioclimática de las choperas de la vega de Granada e incorporar dicho aprendizaje a un edificio cuya estructura está formada por pilares cilíndricos, vigas laminadas y forjados mixtos de madera y hormigón (Fig. 9). Estos elementos estructurales dan forma a una trama de 7,5x7,5 metros y 5 plantas de altura, ofreciendo espacios diáfanos para poder acoger cualquier actividad, así como un gran patio central y una envolvente de paneles fotovoltaicos (Fig. 7).2

Aulario UGR: concurso público para la construcción de un edificio de aulas universitarias del campus de Cartuja, en Granada. La estructura está formada a su vez por pilares cilíndricos, vigas laminadas y forjados mixtos de madera de chopo (Fig. 8). Estado: en proceso de valoración

TAC: concurso público para la construcción de un pabellón temporal en la plaza del humilladero, en Granada. El proyecto propone una reinterpretación de la estructura de rollizos de madera de chopo de los secaderos de la vega, mediante una retícula de 4x4 metros que ofrece un espacio abierto para celebración de eventos asociados al concurso (Fig. 10). Estado: mención de honor.



Figura 5. Hostel Bastardo Granada, placeta de Alhóndiga 3 y 4.. Ignacio de Teresa Arquitectos.



Figura 6. Vivienda "Monte Energético", El Fargue, Granada. Ignacio de Teresa Arquitectos.



Figura 7. Chopidou: concurso por invitación para nuevo edificio híbrido en el Campus del PTS, Figura 8. Nuevo Aulario para la UGR en el campus de Cartuja: concurso por invitación



Figura 9. UNO system. Sistema de vivienda modular industrializada. Figura 10. Propuesta para el festival TAC, de arquitectura efímera, promovido por la Fundación Arquia.



2. Proyectos docentes, de investigación y proyectos de industrialización.

VICHO (Vivienda de Chopo): proyecto de investigación de la Junta de Andalucía para el desarrollo de un sistema de vivienda industrializada en serie a partir de estructuras de madera de chopo. El proyecto propone una primera fase de desarrollo conceptual y arquitectónico del sistema de vivienda para responder a los requerimientos de la sociedad contemporánea, y una segunda fase de desarrollo constructivo, culminando con la construcción real de un prototipo escala 1:1 (Fig. 4).

Estado: proyecto aprobado y en fase inicial de desarrollo.

MODHO (Modular Housing): micro-credenciales acumulables para la formación de master, dentro de la Alianza Arqus, y en colaboración con la Universidad de Gratz, la Cátedra de Sostenibilidad de la UGR, y la UNESCO, orientados al trabajo en taller sobre la vivienda modular industrializada. Se han planteado dos cursos acumulables, con una primera etapa de desarrollo de proyectos en taller y una segunda fase de desarrollo constructivo y montaje real de un prototipo en las instalaciones de la UGR. Los cursos han sido orientados desde un enfoque multidisciplinar, en donde tanto los profesores, como los estudiantes serán de disciplinas complementarias a la arquitectónica, con estas las siguientes 4 ramas vertebrales: sociología, sistemas computacionales, economía, y construcción.

Línea de Master: se ha abierto a su vez una línea de master en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Granada, sobre la construcción en madera de chopo, con el objetivo de desarrollar temas de master que contribuyan a la investigación en proceso, y que pueden ampliarse a futuras tesis de doctorado.

UNO system: proyecto real para el desarrollo de un sistema de vivienda industrializada, modular y de fabricación en serie. El proyecto, actualmente en proceso de desarrollo y financiación, tiene como objetivo aplicar la madera de chopo a un sistema de vivienda promovido por fondos privados y públicos, que pueda ofrecer a la sociedad vivienda económica y de calidad, en la que tenga cabida la participación del usuario. El objetivo es ofrecer un mercado constante de construcción en chopo, que posibilite el afianzamiento y desarrollo estable de la industria local asociada. (Fig. 9).3

BEAU 2025: investigación por invitación, subvencionada por la Bienal Española de Arquitectura y Urbanismo, centrada en la vega de Granada y en el cultivo, industrialización e implementación en construcción de la madera de chopo. La investigación analiza varios proyectos reales en relación a los diferentes flujos que participan de alguna manera en el ciclo de la madera de chopo, llegando por último a construir una pieza expositiva para la Bienal.4

Conclusiones

Los diferentes proyectos no son únicamente una aplicación de la madera de chopo a casos reales, sino que contribuyen en su conjunto a la red de relaciones que está tejiendo el chopo en la provincia de Granada.5 Esta red, que implica diferentes agentes, escalas, sectores, tiempos, aplicaciones, etc. es lo que hace realmente integral el proyecto del chopo. No se trata de un proyecto aislado de producción, industrialización y construcción, sino que permea muchos otros sectores asociados de alguna manera a este proceso. Cada proyecto tiene por ello como objetivo aportar nuevas relaciones dentro de esta red.

Referencias

(1) De Teresa, I., González, A., Bamba, J.C. Diez proyectos en estructuras de rollizos de bambú y de madera. Textos Gráficos II. Expresiones, territorios y tecnologías. 2025, 278, 303.
(2) Martínez Monedero, M.; De Teresa, I., et al. Proyecto Vega-chopera: sistema constructivo estructural a partir de madera de chopo. VLC vol. 12. 2025, 203, 228.
(3) De Teresa, I. Aproximaciones familia-casa. La vivienda informal consolidad en Santa María de las Lomas, Guayaquil. Dearq 19. 2016, 30, 43.
(4) BEAU 2025. Flujos común.es. Hacia un territorio hiperconectado. Disponible en: <https://labienal.es/>
(5) Martín, A., et al. El chopo: un manantial de beneficios ambientales y culturales. Editorial UGR. 2023, Disponible en: <https://hdl.handle.net/10481/87160>.

31. Uso de rollizos de bambú y de madera en 10 proyectos

Ignacio de Teresa Fernández-Casas^a, Alejandro Jesús González Cruz^b, Juan Carlos Bamba Vicente^c
^aETSAG, UGR, Granada. ^bETSAM, UPM, Madrid. ^cFAD, UCSG, Guayaquil.
ignaciodeteresa@gmail.com

Palabras clave: Rollizo, bambú, madera, chopo, teca, estructura.

Resumen

El artículo presenta varios proyectos en los que se utilizan el tronco de madera y la caña de bambú como rollizos estructurales. Se hace con ello una defensa del uso del material sin transformar, frente a la tendencia a ultraprocesar los materiales naturales para convertirlos en sucedáneos que incorporen cada vez menos materia prima real y puedan así satisfacer la enorme demanda global. El objetivo es poner en valor el potencial estructural de estos materiales en bruto, para sacar el máximo partido a las propiedades inherentes a sus fibras y contrarrestar su uso como acabado superficial y estético.

Para ello, se traza un recorrido a lo largo de 10 proyectos elaborados por los autores, en dos contextos climáticos distintos, Ecuador (clima tropical) y España (clima templado), identificando semejanzas y diferencias entre la manera de construir en bambú y en madera. Se establece así un diálogo entre dos técnicas constructivas tradicionales, que ha generado influencias y soluciones particulares en los diferentes proyectos.

El presente texto hace una revisión crítica comparativa de los proyectos, definiendo líneas de investigación y relaciones de continuidad o parentesco entre ellos. Esta comparativa ha permitido reconocer territorios de interés e inquietudes proyectuales, que se concretan en 5 elementos fundamentales de la construcción con rollizos: la barra, el nudo, la diagonal, la cubierta y la base. Cada uno de estos elementos es abordado a través de una pareja de proyectos, dando lugar a lineamientos de investigación concretos. Finalmente se hace una revisión conjunta de los diferentes elementos, generando conclusiones exportables a nuevos proyectos.

Los proyectos se dividen en 5 parejas, centrada cada una de ellas en un elemento fundamental de la construcción con rollizos: barras, nudos, diagonales, cubiertas y podios.

1. Barras	P01 -	HAMACA	2013
	P02 -	MATAPALO	2014
2. Nudos	P03 -	CASA ECO	2015
	P04 -	LAS TEJEDORAS	2023
3. Diagonales	P05 -	WILD CHILD VILLAGE	2016
	P06 -	SECADERO	2022
4. Cubiertas	P07 -	CASA DE LA CERVEZA	2023
	P08 -	CABAÑÓN DLPM	2016
5. Podios	P09 -	CHOPIDOU	2024
	P10 -	MONTE ENERGÉTICO	2025

1. Barras

Proyectos: Estructuras de bambú construidas por los estudiantes de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil (UCSG) entorno a la facultad de Arquitectura y Diseño a modo de andamiajes ligeros para el descanso.



Figura 1. Bimbasi 1.0. Estructura de bambú y red. Taller 2, UCSG. Figura 2. Bimbasi 2.0. Estructura de sobrantes de bambú sobre cuerdas tensadas. Taller 2, UCSG.

Objetivo: los proyectos quieren preservar la mayor longitud posible de los rollizos, conservando así la máxima energía inherente al material y permitiendo futuros usos. Para ello, ambas estructurales son diseñadas a partir de las cañas reutilizadas de obras próximas a la facultad, en el primer caso, de unos 5 metros de longitud (Fig. 1), y en el segundo, de unos 2 metros (Fig. 2). Los anclajes evitan, en ambos casos, el corte de las cañas en sus extremos, conservando su dimensión original. Como segundo objetivo se plantea el aprovechamiento de la geometría cilíndrica de las cañas, para tensar unas redes en el primer caso, y para formar un asiento/columpio en el segundo.

2. Nudos

Proyectos: Los siguientes dos proyectos, son encargos privados que se llevan a cabo en colaboración con entidades públicas, como la universidad o la junta comunal, en los que hay un protagonismo del nudo entre pilares y vigas, y en donde se produce un cruzamiento de rollizos sin cortar, gracias al desdoblamiento de la estructura vertical, generando sistemas porticados con luces de entre 3 y 5 metros.



Figura 3. Casa Eco: construcción de vivienda incremental progresiva en bambú, dentro del taller de proyectos de la UCSG. Figura 4. Las tejedoras: centro comunitario, Guayaquil. Bamba, J.C. Premio MCHAP 2024.

Objetivo: permitir preservar la mayor longitud posible de los rollizos, mediante nudos sencillos y flexibles que permitan la prolongación de las barras sin cortarlas, así como futuras

transformaciones. Para ello los pilares forman una estructura vertical continua, sobre la que se apoyan las vigas a cualquier altura. Estos pilares se desdoblan, formando núcleos verticales de 3 a 9 rollizos, que son atravesados puntualmente por las vigas. En la estructura de bambú (Fig. 3), los pilares están formados por 4 rollizos principales, que permiten el paso de vigas en dos direcciones perpendiculares. En la estructura de madera (Fig. 4), sin embargo, los pilares tienen tan solo dos rollizos principales, encargados de soportar las jácenas. El desdoblamiento de los pilares simplifica los nudos, facilitando posibles cambios y reduciendo el coste y la tecnificación de la mano de obra, al evitar elementos metálicos de unión. Los rollizos de “Las Tejedoras”, son de madera de teca, cortada a mitad de crecimiento, para reducir su diámetro y facilitar así el montaje. Aunque la longitud de estos rollizos de madera es mayor que la de las cañas de la “Casa Eco”, las cañas permiten su empalme longitudinal, gracias a los entrenudos huecos que tienen en su interior, lo que permite albergar piezas metálicas de conexión y rellenarlo posteriormente con cemento. Para evitar fisuras por compresión paralelas a las fibras, se colocan rollizos intermedios entre pilares, que descargan y reparten el peso de los forjados.

3. Diagonales

Proyectos: El primer inconveniente de la construcción con rollizos, es que el encuentro entre pilares y vigas cilíndricas e irregulares da lugar a nudos especialmente flexibles, que requieren una rigidización complementaria. Se vuelve por ello imprescindible recurrir a sistemas de triangulación que arriostren la estructura en varias direcciones. Siguiendo la lógica económica de los proyectos anteriores, en los que se opta por multiplicar los rollizos para evitar el uso de elementos metálicos y encuentros complejos, en este caso, los elementos rigidizadores son las propias cañas y troncos. Los proyectos tienen como objetivo convertir estas diagonales en parte fundamental de la estructura, que, en lugar de estorbar, puedan aportar nuevas posibilidades.



Figura 5. Taller de construcción del Wild Child Village (WCV), Ayampe, Ecuador, con los estudiantes de la UCSG. En colaboración con PuertoBambú (Rafael López).
Figura 6. Pabellón en madera de chopo, para el festival TAC en Granada, 2022. De Teresa, I. Mención.

Objetivo: La utilización de los propios rollizos como elementos diagonales permite rigidizar la estructura, ofreciendo oportunidades espaciales ligadas a su trazado diagonal. Se trata de aprovechar este trazado oblicuo de los rollizos que triangulan la estructura para otros usos, como la compartimentación interior y gestión de recorridos (Fig. 6), o para apoyar los núcleos de escaleras y cerramientos (Fig. 5). De esta forma, en el pabellón TAC, las diagonales ofrecen zonas de paso dentro de una planta continua de pilares, zonificando su interior de manera indirecta. Aparecen así pasillos sugeridos por la propia estructura, y zonas más cerradas, en donde las diagonales no permiten el paso de personas. En el WCV, las diagonales definen estancias tetraédricas, y soportan las escaleras. Estos elementos diagonales, de mayor longitud, permiten aprovechar los rollizos más largos, que normalmente serían cortados, los cuales podrán a su vez ser reutilizados en un futuro con toda su dimensión.

4. Cubiertas

Proyectos: En los dos siguientes proyectos las diagonales dejan de ser elementos lineales, para formar planos inclinados que protegen la estructura de la lluvia y del sol. La cubierta se convierte así en elemento fundamental que no solo resguarda la estructura, sino que la rigidiza al prolongarse hacia el suelo, reclamando un papel protagonista en la organización funcional del proyecto.



Figura 7. Casa de la cerveza, Dos Mangas, Ruta Spondylus, Ecuador.
Figura 8. Cabañón DLPM. Vivienda en pendiente en Las Tunas, Manabí. Premio Arquia Próxima 2022, Finalista FAD internacional, BAQ 2016, BIAU 2017, Premio a la sostenibilidad del COAG 2018.

Objetivo: los rollizos tienen que protegerse tanto de la lluvia como del sol, por lo que necesitan una cubierta, inclinada casi siempre, que puede contribuir a la rigidización de la estructura, formando parte constituyente de la estructura, como sucede con los elementos diagonales. Esto abre posibilidades de proyecto, en donde la cubierta cumple un papel complementario al de protección frente a la intemperie.

5. Podios

Proyectos: Los siguientes proyectos no se centran en la cubierta, sino en el apoyo de la estructura sobre el terreno, engrosando la cimentación hasta convertirla en espacio habitable. Los proyectos diferencian de esta manera dos partes opuestas, el podio, incrustado en el terreno, que contiene el programa fijo, y la estructura ligera superpuesta, susceptible de ser ocupada con mayor libertad. Los pilares se vuelven a su vez protagonistas junto al podio, engrosando su diámetro y convirtiéndose en rollizos aislados, sobre los que se desdoblan en este caso las vigas para abrazarlos y permitir que se prolonguen en altura.

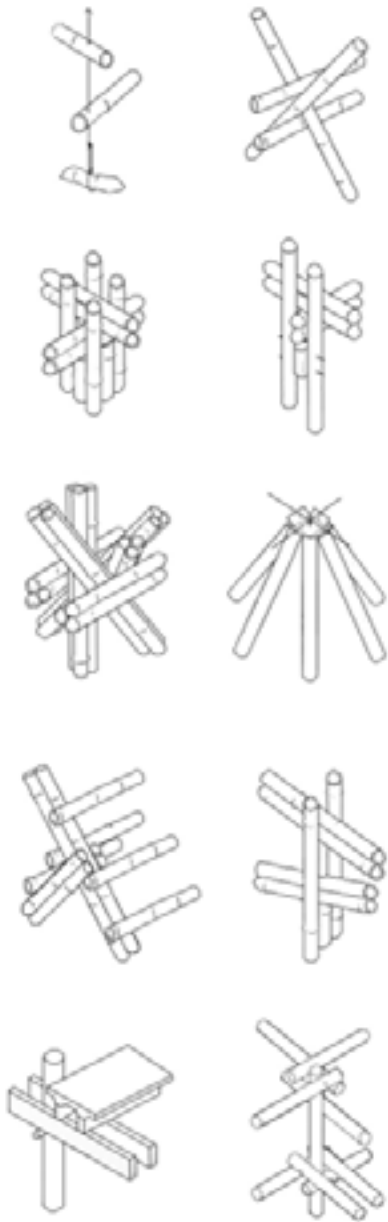


Figura 9. Chopidou: edificio híbrido en madera de chopo.



Figura 10. Monte energético: vivienda utilizando rollizos de madera de chopo en Granada (en construcción)

Objetivo: la separación de la estructura del terreno es una oportunidad para crear un espacio habitable que puede contener el programa más fijo y cerrado, y que puede a su vez actuar como elemento rigidizador de la estructura ligera. Esto permite no sólo proteger y sustentar la estructura superior, sino liberarla para permitirle tener una organización y una envolvente más flexibles.



Conclusión: el objetivo de todos los proyectos es poner en valor los rollizos como elementos estructurales en los que preservar la máxima energía inherente al material, permitiendo su posterior transformación sin reducir sus posibilidades. Para sacar el máximo partido a su potencial como material de construcción, las barras deben mantener la mayor longitud posible, por lo que los nudos deben evitar el corte de las mismas, prolongándolas en los cruces entre barras. Para contrarrestar la falta de rigidez de estos nudos, las propias barras pueden triangular la estructura. La triangulación más elemental es a través de la cubierta, como elemento de protección frente al clima. La estructura debe ser protegida a su vez en su apoyo en el terreno, cuyos elementos de separación pueden convertirse en podios que contribuyan al programa del proyecto.

Figura 11. Esquema estructural comparativo de los nudos principales de los proyectos. Ignacio de Teresa, 2025.



Figura 12. Esquema de las 5 partes fundamentales de la construcción con rollizos. 1. Barras. 2. Nudos, 3. Diagonales, 4. Cubiertas, 5. Podios. Ignacio de Teresa, 2025. Figura 13. Tabla comparativa de propiedades del bambú (caña guadua) y el chopo (populus alba). Ignacio de Teresa, 2025.1

Referencias

Propiedades mecánicas

Ghavami, K. (2005). Bamboo as reinforcement in structural concrete elements. Cement and Concrete Composites, 27(6), 637–649.

Liese, W., & Köhl, M. (2015). Bamboo: The Plant and its Uses. Springer.

Arce-Villalobos, O. A. (1993). Structural behavior of Guadua angustifolia. PhD Thesis, Eindhoven University of Technology.

Forest Products Laboratory. (2010). Wood Handbook: Wood as an Engineering Material. USDA Forest Service, General Technical Report FPL–GTR–190.

Panshin, A. J., & de Zeeuw, C. (1980). Textbook of Wood Technology. McGraw-Hill.

Propiedades hídricas

García Esteban, L. (2002). Propiedades físico-mecánicas de las maderas españolas. Fundación Conde del Valle de Salazar, ETSI Montes, Madrid.

Sharma, B., Gatóo, A., Bock, M., & Ramage, M. (2015). Engineered bamboo for structural applications. Construction and Building Materials, 81, 66–73.

Propiedades frente al fuego

Schaffer, E. L. (1973). Charring rate of selected woods–transverse to grain. Forest Products Laboratory Research Paper FPL–69.

Hughes, M., & Hill, C. (2003). The fire performance of wood. En Hill, C. (Ed.), Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes. Wiley.

Correal, J. F., & Arbeláez, C. (2010). Structural behavior of Guadua angustifolia under fire exposure. Proceedings of the World Conference on Timber Engineering (WCTE), Riva del Garda, Italy.

32. Soluciones de la ingeniería para el uso técnico de madera aserrada en sistemas estructurales eficientes alternativos a estructuras masivas

Miguel V. Broto Cartagena^a
^a Departamento Ingeniería Agrícola y Forestal, Universidad de Valladolid, Campus Duques de Soria, Soria.
miguelvictorian.broto@uva.es

Palabras clave: estructuras, madera aserrada, eficiencia, madera técnica.

Antecedentes: la madera, un excelente material estructural, tiene sus propias limitaciones. Una esencial es la dimensional, derivada del tamaño de los troncos, que condiciona el tamaño de piezas macizas. Existen opciones para superar esta limitación, con dos líneas principales. Soluciones que se basan en la masividad, productos construidos en fábrica por unión de elementos individuales, resultando en un problema de fabricación. Soluciones que se basan en el diseño estructural, usando madera aserrada, con al menos un proceso fundamental desarrollado en obra, resultando en un problema de diseño y planificación. Madera técnica o técnica madera. Ambas buscan además mejorar la estabilidad y durabilidad, colocando en obra madera con la humedad de consigna deseada. Evidentemente se aplica también diseño a las estructuras masivas, pero la diferencia radica en que exigen instalaciones específicas para la fabricación, y la limitación se supera esencialmente por la fabricación de los elementos. También importa poder añadir, modificar o desmontar estructuras y reutilizar los elementos en otras estructuras cualesquiera. La capacidad de influencia de grupos industriales es muy superior a la de los ingenieros y pequeños aserraderos.

Objetivos: 1) El objetivo del trabajo es comparar las dos familias de soluciones, a partir de resultados para el mismo problema, evaluando el grado de alcance de los objetivos constructivos, incluyendo la reutilización; 2) Evaluar, para los mismos casos, los efectos en la industria de la madera española; 3) Ofrecer una guía de soluciones alternativas a las estructuras masivas.

Conclusiones. Es posible ofrecer estructuras de madera competitivas, incluso de grandes dimensiones, no masivas en material y con madera aserrada. Estas soluciones superan además problemas de transporte y permiten la participación de aserraderos locales, potenciando la industria de la madera en España.

33. BUOs como proyecto demostrativo de la industria forestal

Cecilia López Muiños^a, Juan José Otero Vázquez^a, Luis Ángel López Gómez^a
^a Muiños Otero López Arquitectura, www.molarquitectura.com Rúa Liberdade 31_Ourense_32.005.
info@molarquitectura.com

Palabras clave: madera, sostenibilidad, lignocelulósico, trazabilidad forestal, kilómetro cero.

Resumen

Se ejecutan tres bases de unidades operativas forestales, BUOs, Muiños, Mondoñedo y Rianxo como espacios dedicados a la defensa del monte, pero también como muestra de la capacidad de la industria forestal gallega. Se trata de generar un contenedor de servicios de protección forestal, que funcionen como nodos interconectores de todos los agentes participantes en ésta labor, conciliando el descanso y el trabajo de los brigadistas, pero sin olvidar la integración en entornos tan sensibles.

Para minimizar el impacto de las edificaciones, se opta por fragmentar su volumen, en dos o tres cuerpos diferenciados, uno de ellos abierto.

Las estructuras se ejecutan en Pino de Galicia, bien con paneles CLT, bien con entramado ligero de madera laminada, complementándose con fachadas ventiladas exteriores en Pino de Galicia, termotratado en algunas zonas, y con tratamiento Shou Sugi Ban, y posterior aplicación de fijador transparente. Para los aislamientos, además de paneles de corcho aglomerado, se emplea aislamiento de fibra de madera insuflada, y paneles de espumas de taninos, procedentes de la corteza del pino, siendo los revestimientos interiores de tableros OSB, entablados de madera de pino termotratada, y tableros con acabado HPL, siendo los falsos techos, y pavimentos de entreplanta de pino gallego.

Además, se diseñó todo el mobiliario con estructura de madera de pino y tableros compactos HPL. El objetivo fundamental fue articular toda la ejecución con soluciones constructivas basadas en la madera local.



Figura 1. Cadena de valor forestal, trazabilidad y huella de carbono. © MOL Arquitectura

Sobre la estructura portante de muros de entramado ligero, o de paneles contralaminados de Pino de Galicia, hacia la cara interior disponemos un rastrelado de 80x40mm de madera de pino, un tablero OSB de 21 mm, y como acabado por la cara interior, un tablero compacto de alta densidad con acabado HPL de 12mm de espesor. El interior, mediante una máquina de insuflar, se colmata con aislamiento de fibra de madera antirroedores. Entre el tablero OSB, y el tablero compacto, disponemos de una membrana barrera de vapor. Todo el sistema se asienta sobre una membrana anti termitas, situada en la base del cerramiento.

En la cara exterior, sobre el tablero de CLT, o sobre el entramado ligero arriostrado por un tablero OSB, se dispone una membrana impermeable transpirable, aislamiento exterior, y doble orden de rastrelado de madera de Pino de Galicia tratada en autoclave con clase de uso 3.1. El rastrel colocado en horizontal, cuenta con una pendiente para facilitar la evacuación del agua. Del mismo modo, se realiza el sellado de testas de los rastreles verticales. Con tornillería vista, se coloca el entablado de piezas de madera de 90x30mm tratada en autoclave clase de usos 3.1 con acabado carbonizado, y sobre la que se aplica un fijador ecológico transparente mate.

Para evitar patologías por las salpicaduras en la parte inferior, se coloca un zócalo rehundido en tablero Tricoya, con acabado en lasur pigmentado.

En el remate superior, además del sellado de las testas del entablado, se dispone una albardilla de chapa plegada de acero corten con un goterón inferior, para evitar las escorrentías sobre la madera.



Figura 2. Esquema constructivo del BUO de Rianxo. © MOL Arquitectura

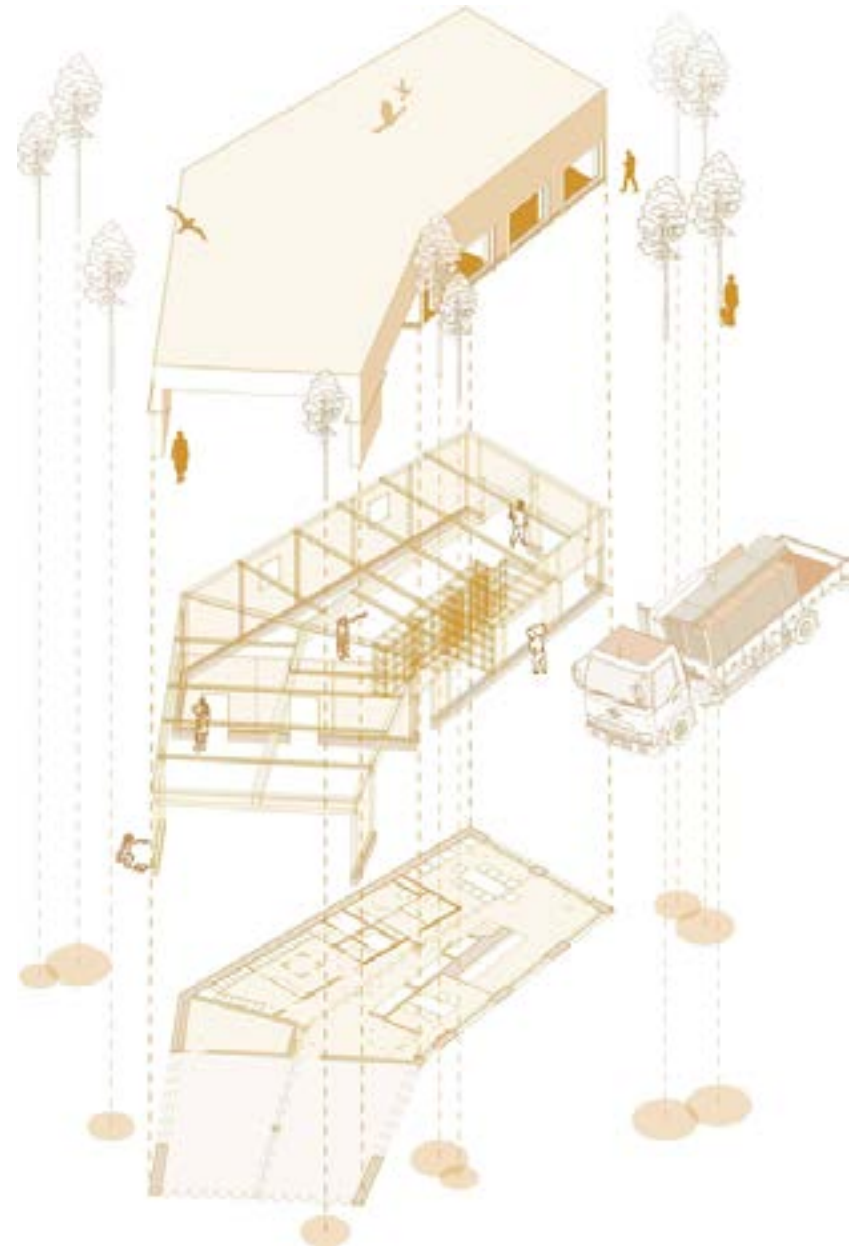


Figura 3. Sistema constructivo del BUO de Mondoñedo. © MOL Arquitectura

Para la definición constructiva de las bases, además del cálculo de la huella de carbono, fue fundamental un análisis de ciclo de vida. Tanto el sistema estructural, ejecutado en CLT o en entramado ligero de madera de Pino de Galicia laminado, como las fachadas ventiladas en madera, tabiquería interior, trasdosados interiores, nos permite su aprovechamiento, ya que es que es factible su desmontaje, y reutilización de todo el sistema completo, o de los diferentes elementos que conforman las construcciones como son los tableros, rastrelado, membranas transpirables, elementos estructurales, paneles de aislamiento y entablado de revestimiento exterior.

Una de las ventajas de construcción en madera, fue la económica, a través de la reducción de plazos de ejecución, por facilidad de prefabricación industrializada, el empleo de Modelado de Información de Construcción, y los sistemas constructivos.

Los elementos de Pino de Galicia, tanto la madera termotratada, falso techos, fachada carbonizada, los elementos de rastrelado, y todos los elementos estructurales, están incorporadas a FORTRA (Trazabilidad Forestal), una herramienta digital que da trazabilidad a los productos derivados de la madera, registrando las operaciones que realizan todas las empresas que forman parte del proceso de transformación, desde el bosque, hasta el producto incorporado en los edificios.

Esto permite construir una red para conectar digitalmente toda la cadena de valor del sector de la madera, de manera que informa a clientes y consumidores de las características de los productos elaborados a partir de la madera, incluida su huella de carbono, La información define, a través de referencias catastrales del bosque de donde proceden y las operaciones que fueron necesarias para su elaboración.



Figura 4. Esquema constructivo del BUO de Muiños. © MOL Arquitectura

Conclusiones

Una vez finalizada la ejecución de las tres bases forestales, podemos asegurar que la industria forestal local, permitió la ejecución de los sistemas constructivos lignocelulósicos completos, con una huella de carbono negativa, con un análisis del ciclo de vida, certificado a través de un sistema de trazabilidad forestal, y lo más importante, todo ello transmitiendo el valor a la cadena forestal local.

Del mismo modo, la ejecución de las edificaciones, permitió, con el soporte técnico del CIS Madeira, un proceso de investigación y desarrollo de sistemas constructivos específicos. Dichas edificaciones han sido el demostrativo del empleo de soluciones innovadoras, como las espumas aislantes de taninos, fachadas de Pino de Galicia con

tratamiento Shou Sugi Ban industrializado, estructura de entramado ligero en Pino de Galicia laminado con trazabilidad forestal, y sistemas de protección de la madera en tablero local Tricoya.

No se trata únicamente que la madera aporte calidez y confort a las edificaciones, se trata de fomentar la bioconstrucción kilómetro cero, y que, mediante tecnología de cadenas de bloques, certifique su huella de carbono y trazabilidad.

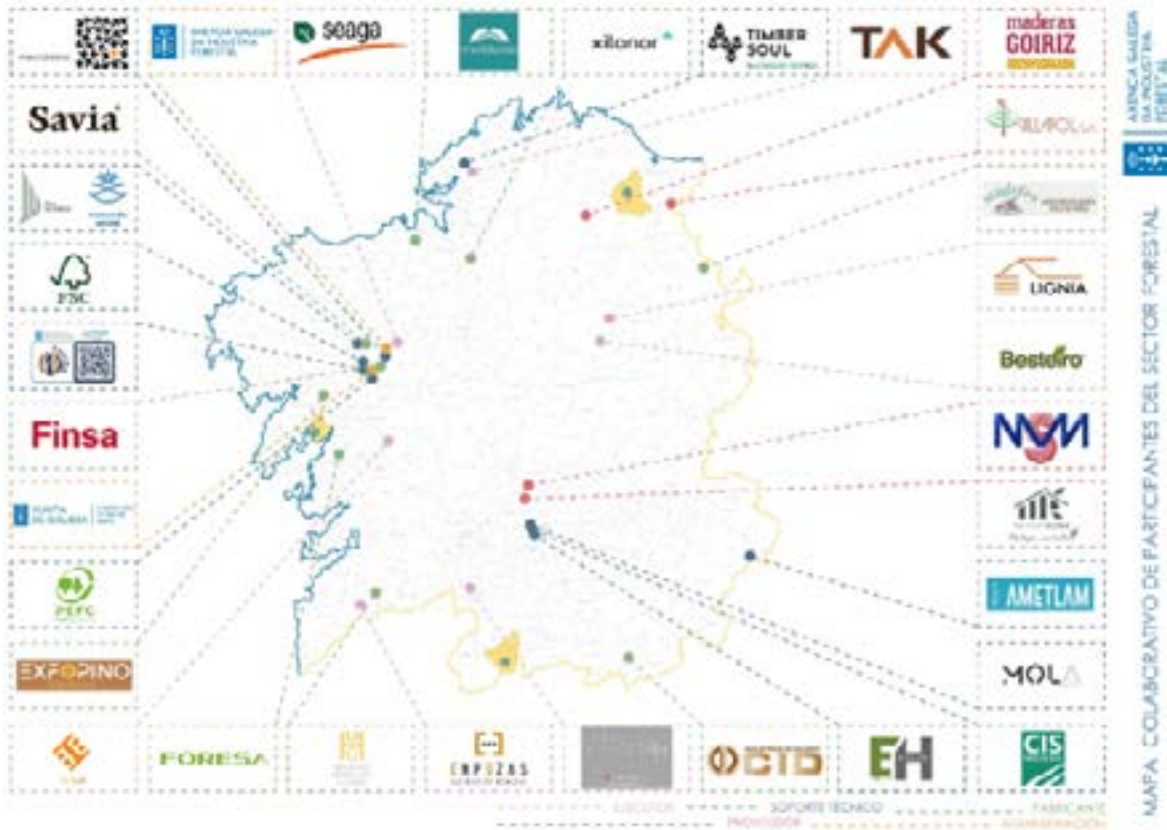


Figura 5. Mapa de intervinientes en ejecución de BUOs © MOL Arquitectura

Referencias.

Taller de Fundamentos de diseño de CLT ; Coordinación: Silvia Blanco Agüeira / Alberto Alonso Oro. ISSN 2659-9139 DL-LU 78-2019

34. **Diseño y prefabricación de infraestructura de protección de madera natural sin tratamientos**

Cristina Ouzande Lugo^a, Cristina Ezcurra de la Iglesia^a
^a Ezcurra e Ouzande arquitectura s.l.p. Rúa do Vilar nº 23-2º. 15705 Santiago de Compostela.
info@ezcurraouzande.com

Palabras clave: Infraestructura espacio público. Madera natural. Prefabricación.

Introducción

La corta durabilidad de las infraestructuras de madera en entornos naturales, costa, bosques etc. ha llevado a asumir la necesidad de su frecuente renovación parcial o completa. El objetivo de este trabajo ha sido conseguir mediante el diseño y la elección de la especie de madera adecuada, prolongar la vida útil de estos elementos y evitar la aplicación de tratamientos químicos.

En el caso que nos ocupa, se ha desarrollado un elemento de protección, modular, de madera de castaño. La solución emplea madera autóctona (Castanea sativa) cultivada localmente, con certificación de cadena de custodia FSC o PEFC, cuyas características técnicas y durabilidad la hacen adecuada para su instalación a la intemperie en cualquier ambiente (3).

Descripción general

El objetivo de este documento es detallar las características técnicas, físicas, mecánicas del módulo individual de la Varanda CASTAÑO. Un sistema modular prefabricado de protección colectiva anticaída (5) diseñado para su uso en espacios públicos exteriores (6)/(7)/(8). El módulo ha sido desarrollado priorizando la sostenibilidad, durabilidad (2)/(3), resistencia estructural y compatibilidad estética con el entorno patrimonial gallego.

Elementos que componen el módulo

El módulo está compuesto por una serie de piezas con funciones estructurales que sirven para dar forma y sustento al propio elemento al tiempo que soportan los esfuerzos tanto de los agentes atmosféricos como del uso (5) al que está destinado.

Los elementos que lo forman son: pasamanos, balaustre, larguero horizontal y elementos de soporte del pasamanos, todo ello de madera maciza de castaño.

Tipo de pieza	Cantidad	Dimensiones {mm}	Volumen unitario {m³}	Volumen total {m³}
Larguero inferior	1	1950 × 150 × 89.56	0.0262	0.0262
Balaustre	14	980.47 × 90 × 40	0.0035	0.0491
Pasamanos	1	1950 × 150 × 69.09	0.0202	0.0202
Soporte pasamanos	1	1950 × 90 × 20	0.0035	0.0035

Volumen total de madera: 0.0990 m³



Figura 1. Despiece barandilla



Figura 2. Alzado cara exterior

El diseño utiliza piezas de pequeña escuadría en elementos verticales (madera seca) y mayores secciones para los elementos horizontales como pasamanos y larguero inferior (suministrados verdes).

Se evitan planos horizontales incorporando pendientes para favorecer la escorrentía. Se eliminan también el contacto con el terreno y los encuentros madera-madera, que son trampas de agua, colocándo entre piezas arandelas de teflón.

Se prefabrica por módulos en taller y su concepción permite el reemplazo por elementos. Su robustez consigue la resistencia estructural necesaria y normativa.

Las condiciones climáticas de nuestra comunidad, Galicia, temperaturas suaves y humedad alta, favorecen una aclimatación progresiva reduciendo la aparición de fendas.



Figura 3. Trabajos de montaje. Cara interior



Figura 4. Trabajos de montaje. Cara Exterior



Figura 5. Módulos ya instalados

Los elementos de unión y fijación son herrajes de acero inoxidable AISI 316, material imprescindible cuando trabajamos en ambientes salinos.

Tabla 2. Herrajes y tornillería

Tipo de Herraje	Cantidad	Peso unitario {kg}	Peso total [kg]
Anclaje	2	3.29	6.58
Unión balaustre	1 2	0.54	6.48
Arandela/Tuerca Tornillería	60 por tipo		1.50 (estimado)
Varilla roscada	28	0.05	1.40 (estimado)

Peso total de herrajes especificados: 15.96 kg
Peso total del módulo completo (madera + herrajes): 80.31 kg

Características físicas del módulo (madera)

Masa total del módulo 64.35 kg
Volumen total de madera: 0.099 m³
Área de superficie expuesta: 4.73 m²
Dimensiones del módulo: 200 x 95 x 12 cm
Peso por metro lineal: 68 kg/ml
Peso por m²: 61 kg/m²

Propiedades físicas estimadas de la madera

Densidad considerada: 650 kg/m³
Madera clasificada como durable frente a hongos
Duramen no impregnable y albura medianamente impregnable
Poco nerviosa.Estabilidad dimensional alta

Propiedades mecánicas estimadas para la madera

Se consideraron para el cálculo las características de la madera D24 en piezas de pequeña escuadría y D18 para las piezas mayores. (4)

Características físico mecánicas de los herrajes. Acero AISI 316

Resistencia a la corrosión excelente en ambientes marinos

Control calidad madera barandilla

Elementos verticales, Balaustres: piezas de pequeña escuadría 4x9 cm.

Se realizará un muestreo aleatorio de 90 elementos en los que se comprobará visualmente que:

La madera es de duramen de castaño, sin presencia de albura

La madera no presenta pudriciones ni ataques de insectos xilófagos

La madera no presenta nudos muertos o saltadizos

La madera no presenta nudos de diámetro superior a 3 cm en la cara de 4 cm

La madera no presenta nudos de diámetro superior a 4 cm en la cara de 9 cm

Si existen fendas de secado pasantes en testa, su longitud deber ser inferior a 9 cm

En los 90 elementos seleccionados se comprobará que el contenido de humedad se encuentra entre un 14-16 %.

El contenido de humedad se medirá en el interior del elemento, aproximadamente a una profundidad de 1/3 del espesor.

Elementos horizontales: piezas de escuadría 16x22 cm y 8x16 cm.

En el total de elementos se comprobará visualmente que:

La madera es de duramen de castaño, sin presencia de albura

La madera no presenta pudriciones ni ataques de insectos xilófagos

La madera no presenta nudos muertos o saltadizos

La madera no presenta nudos que superen 1/3 de cualquiera de las dimensiones de la cara del elemento.

La desviación de la fibra es inferior al 16'7 %

Para la medición de las singularidades indicadas se tendrá en cuenta lo especificado en la norma (1).

Resultados

Se tardó una semana en el montaje de 90 módulos que suponen aproximadamente 180ml.

El tiempo de fabricación de los 90 módulos fue de 5 semanas.

Durante el periodo de garantía, un año, se revisó el apriete de los herrajes para ajustarlos a los cambios dimensionales de la madera.

Se reemplazaron aproximadamente un 5% de los pasamanos por presentar alguna fenda en la que se pudiera acumular el agua. En todos los casos eran piezas que ya de partida no cumplían con el control de calidad pero se montaron para testarlas.

El comportamiento ha sido muy bueno y más de un año después no se han apreciado nuevas patologías.

Tabla 3. Comparativa opciones comerciales (muestreo diez fabricantes) / Módulo madera castaño local

Criterio	Opciones Comerciales Madera tratada (oferta actual)	Opciones Comerciales Acero inoxidable (oferta actual)	Módulo propuesto (madera de castaño local)
Durabilidad	Limitada, diseños con trampas de agua/Herrajes galvanizados	AISI 304 (no apto en ambientes marinos); AISI 316 más durable pero caro	Alta durabilidad natural frente a hongos, sin necesidad de tratamientos químicos
CTE DB-SUA CTE DB-SE CTE DB-SEA TMA/851/2021 Ley 10/2014 (Galicia) D. 35/2000 (Galicia)	No cumplen / No aportan datos justificativos	No cumplen / No aportan datos justificativos	Diseñado para cumplir con CTE y normativa de accesibilidad
Mantenimiento	No permite reposición por piezas, difícil conservación	Sin información sobre durabilidad	Fácil sustitución de piezas / Revisión periódica sencilla
Materiales auxiliares	Acero galvanizado, sensible a la corrosión	Acero inoxidable (en general AISI 304)	Herrajes en acero inoxidable AISI 316 (resistentes en ambientes salinos)
Coste aprox.	~500 € / módulo 2m	~750 € / módulo 2m (AISI 316)	~795€ / módulo 2m
Sostenibilidad	Baja: madera tratada químicamente	Media: acero reciclable / huella de carbono elevada	Alta: madera local certificada FSC/PEFC, bajo impacto y sin tóxicos

Sostenibilidad y circularidad

Origen local: Madera certificada FSC o PEFC procedente de Galicia.

Diseño para desmontaje: Permite sustitución de partes sin desmontaje completo.

Sin tratamientos químicos tóxicos: Acabado con aceite hidrorrepelente libre de COV.

Baja huella de carbono: Fabricación con materiales locales y procesos de bajo impacto.

Referencias

- (1) UNE 56546: 2022
- (2) UNE-EN 350:2016
- (3) UNE-EN 335:2013
- (4) UNE-EN 338:2016
- (5) CTE DB-SUA, DB-SE, DB-SEA
- (6) Orden TMA/851/2021, de 23 de julio
- (7) Lei 10/2014, do 3 de decembro, de accesibilidade
- (8) Decreto 35/2000, do 28 de xaneiro

35. Construir con madera: seguridad, eficiencia y sostenibilidad

María Mora^a
^a Senior Associate, Arquitecta COAS. Michael Green Architecture.
maria@mg-architecture.ca

Palabras clave: madera técnica, diseño arquitectónico, durabilidad, resiliencia estructural, sostenibilidad.

Introducción

En los últimos años, la madera ha recuperado un papel protagonista en la arquitectura contemporánea en España. Su uso estructural genera interés por sus amplios beneficios ambientales, técnicos, sensoriales y estéticos; sin embargo, su implementación plantea desafíos que requieren conocimiento especializado y herramientas adecuadas para proyectar y construir con garantías.

La presentación pretende compartir experiencias y aprendizajes derivados de proyectos en madera desarrollados en Norteamérica y el norte de Europa, a través de un caso de estudio concreto: el *Ronald McDonald House Willow (RMH Willow)*, en Vancouver (Canadá), actualmente en proceso de diseño por Michael Green Architecture (MGA).

Metodología

Nuestro estudio trabaja casi exclusivamente con estructura de madera, convencidos de que es el material que mejor responde a los desafíos de nuestra época.

Para garantizar el éxito, aplicamos medidas específicas que varían según cada proyecto, entre las que destacan tres fundamentales:

- **Colaboración temprana** – Involucrar desde el inicio a arquitecto, ingeniero estructural y constructor (preferiblemente) permite integrar condicionantes técnicos, económicos y ambientales en el diseño. La selección temprana del proveedor de madera facilita además la optimización del material.
- **Definición de objetivos** - Establecer metas claras con el cliente desde las fases iniciales facilita la toma de decisiones y sirve de guía común para todos los agentes.
- **Cuantificación y control** – Incorporar herramientas de medición, especialmente el Análisis de Ciclo de Vida (LCA por sus siglas en inglés), que permite evaluar impactos ambientales y comparar con alternativas en hormigón o acero.

Caso práctico: Ronald Mc Donald House Willow

La fundación Ronald Mc Donald House es una entidad sin ánimo de lucro en la que una de sus principales misiones es proveer hogares para familias cuyos niños están siendo tratados en el Hospital, normalmente durante un tiempo extenso.

El proyecto RMH Willow, situado en Vancouver, Canada es el segundo edificio diseñado por MGA para la fundación, después de completar el primero en 2012.

Con más de 2,000 visitas familiares al año, la demanda supera la capacidad del actual centro de 73 habitaciones, lo que provoca que más de 500 familias sean rechazadas cada año. Proyecciones a diez años prevén la necesidad de 150 suites, casi el doble de la capacidad actual, 77 más de las disponibles actualmente. Asimismo, se identificó una necesidad de mejorar la atención a las familias de larga estancia ofreciendo más espacio, flexibilidad y privacidad mediante suites de 1 y 2 dormitorios con cocina.

El nuevo edificio alojará a 75 familias en una torre de 12 plantas, complementada con volúmenes bajos que acogen espacios comunes. Las cocinas y comedores compartidos se convierten en centros de interacción, junto con áreas de juego, descubrimiento y espacios al aire libre, diseñados para los niños como protagonistas.

El RMH Willow se ha proyectado con un enfoque integral en salud, bienestar y resiliencia. Entre sus objetivos destacan:

- Fomentar la conexión con la naturaleza mediante diseño biofílico.
- Reforzar la vida comunitaria a través de espacios compartidos.
- Incorporar estrategias pasivas de diseño climático.
- Garantizar la adaptabilidad y la eficiencia acústica y térmica.
- Responder con resiliencia a riesgos climáticos y sísmicos.

El uso de la madera como material fundamental contribuye a alcanzar todos estos objetivos del proyecto: fomenta una conexión profunda con la naturaleza y, al mismo tiempo, genera una atmósfera cálida y tranquilizadora, propicia para el bienestar de quienes lo habitan, y alcanzar los objetivos de bajas emisiones de carbono del proyecto.

El sistema estructural utiliza madera tanto para cargas gravitacionales como para la resistencia lateral (LFRS, por sus siglas en ingles), lo que la convertirá en el edificio completamente de madera más alto de Norteamérica y en el más alto del mundo construido en una zona de alta sismicidad.

La estructura gravitacional está formada por pilares de madera laminada encolada, con forjados de CLT que se apoyan directamente sobre las columnas. Los núcleos de comunicaciones se construyen en CLT y forman parte del sistema lateral. El sótano donde se sitúa el parking y la primera planta están contruidos en hormigón.

La parte más innovadora de la estructura es este sistema lateral de resistencia de fuerzas. Se trata de un sistema de muros de cortante tipo ballon: paneles de CLT que abarcan varias plantas, aumentando la rigidez del edificio. Estos muros no son independientes, sino que están acoplados entre sí mediante vigas de acero que actúan como ‘fusibles sísmicos’ (Fig. 1). En caso de terremoto, estas vigas metálicas absorben la energía, pueden deformarse y si es necesario, reemplazarse posteriormente, mientras que los muros de madera permanecen íntegros. (1) (2) (3)

Los muros de cortante están diseñados para desplazarse y recentrarse tras un sismo, incorporando unos cables postensados que les otorgan capacidad de autocentrado. El primer ejemplo de este sistema en Norte América fue el edificio de la Escuela de Silvicultura en Oregón. (Fig. 2)



Figura 1. Maqueta del Sistema lateral de clt acoplados. Figura 2. Rocking wall en la Escuela de Silvicultura de Oregón (OSU). MGA, Equilibrium y StructureCraft

Esto significa que, tras un evento sísmico severo, el edificio puede volver a su posición original, reduciendo drásticamente los daños permanentes.

Este enfoque responde a un objetivo de resiliencia mucho más ambicioso que el código estándar. Mientras que una estructura residencial típica está diseñada solo para evitar el colapso, asumiendo daños graves, en Willow House el diseño busca ocupación inmediata tras un sismo.

La colaboración temprana ha sido decisiva para optimizar la planta del edificio. Durante el desarrollo del diseño estructural se identificó la posibilidad de reducir las luces entre apoyos a aproximadamente 6 m, lo que generó una reorganización de la planta tipo y una disposición más eficiente de los apartamentos en la torre. (Fig. 3)

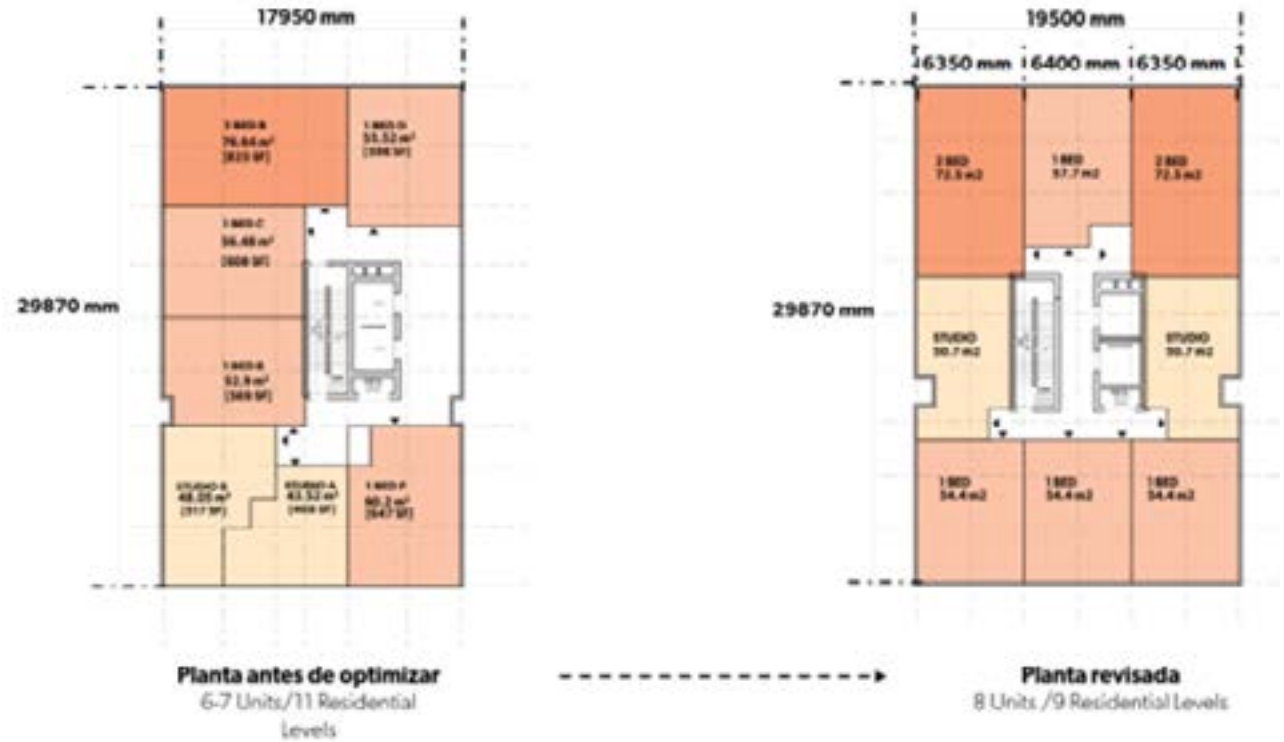


Figura 3. Planta de torre de viviendas optimizada

Por otro, por la actitud innovadora del proyecto, que ha requerido la colaboración de otros profesionales, académicos y universidades que están colaborando activamente en ensayos a escala real y revisiones externas ('peer review').

Medida – Alcanzar los objetivos de manera cuantificable

Las herramientas de cuantificación nos ayudan a la toma de decisiones y permiten diseñar con criterios objetivos. Entre ellas, el Análiss del Ciclo de Vida (LCA) es fundamental.

El carbono incorporado es uno de los principales responsables de las emisiones del sector de la construcción. Reducirlo exige realizar LCA desde las primeras fases, donde las decisiones tienen mayor impacto, como demuestran los resultados de varios estudios. (4)

En el caso de RMH Willow, se realizó un análisis completo de ciclo de vida (wbLCA) para evaluar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas a los materiales, considerando tanto el sistema gravitacional como el lateral (LFRS) en madera frente a una estructura tradicional de hormigón. Los resultados del LCA muestran que, al construir la estructura de madera, la intensidad de carbono incorporado del proyecto puede reducirse en un 24 %. (Fig. 4).

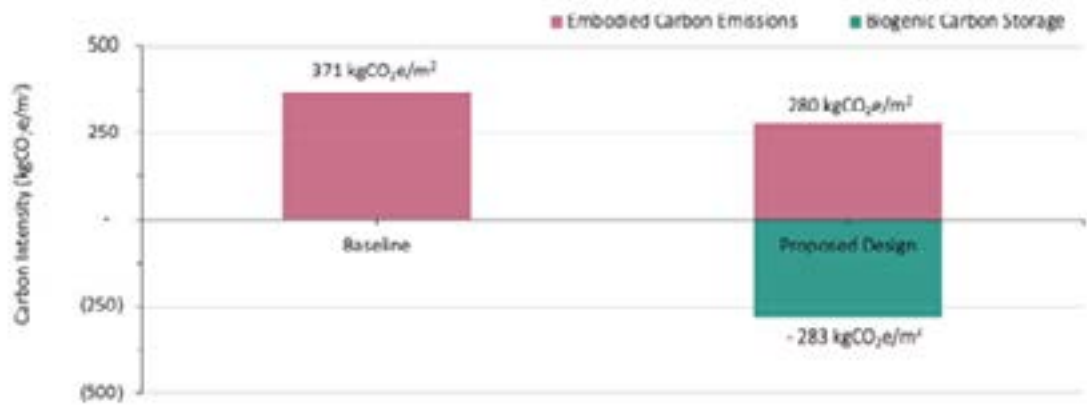


Figura 4. LCA comparado, a la izquierda el edificio base en hormigón, a la derecha el propuesto con estructura de madera. Tabla elaborada por Acorn Consulting.

Además, a diferencia del hormigón o el acero, la madera utilizada almacena carbono biogénico: en Willow House, la intensidad de carbono incorporado es de 280 kgCO₂e/m², mientras que el carbono almacenado alcanza 283 kgCO₂e/m².

Esto significa que el almacenamiento de carbono biogénico es mayor que las emisiones de carbono para el diseño en madera, por lo que Willow House tiene el potencial de ser un edificio que almacene carbono.

Conclusiones

Los casos reales analizados demuestran que la aplicación de experiencia y herramientas adecuadas permite garantizar la eficiencia y la resiliencia de los edificios. La sostenibilidad en madera no depende únicamente del material, sino de la forma en que se diseña, se construye y se gestiona a lo largo del tiempo. En un contexto de creciente demanda de edificaciones con baja huella de carbono, proyectos que validan soluciones constructivas se convierten en referentes capaces de orientar a la industria hacia un futuro más resiliente y descarbonizado.

Referencias:

(1) CLT Shear Walls & Parametric Design: Research & Development. StructureCraft. Disponible en: <https://structurecraft.com/blog/clt-shear-walls-parametric-design> [consultado el 5 de septiembre de 2025]

(2) Resilient Tall Timber. Disponible en: <https://uwaterloo.ca/scholar/s3tesfam/resilient-tall-timber>, [consultado el 5 de septiembre de 2025]

(3) Shake-Table Testing of a Full-Scale 10-Story Resilient Mass Timber Building Disponible en: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/JSENDH.STENG-13752> [consultado el 5 de septiembre de 2025]

(4) INDICATE-Spain. Development of the Whole Life Carbon baseline for buildings in Spain. Green Building Council España (GBCE) and University of Seville (V.0 December 2024). Disponible en: <https://gbce.es/proyectos/indicate-spain>

36. Análisis estructural de cajones de madera de pino y chopo

Esteban Hernández Salazar^a

^a Universidad de Granada, Granada.
ehernandezs@correo.ugr.es

En el presente trabajo se realizó una caracterización de las alternativas de cajones de madera para uso como cubierta en el mercado actual, esto con el objetivo de analizar y compararlas, para posteriormente diseñar un elemento que presente un comportamiento estructural correcto y pesos similares utilizando materiales locales.

Para ello se inició con un estudio que evaluó las características de la madera de chocho y pino y el gran potencial inexplorado que podría tener la primera al ser utilizada como madera estructural, presentando grandes extensiones de zonas potencialmente viables para su cultivo, rápido crecimiento y gran capacidad de reproducción. Seguidamente se realizó una investigación detallada de las empresas productoras de elementos viga cajón de madera que actualmente dominan el mercado, se analizó las luces máximas salvadas, cargas máximas y geometría de las distintas alternativas.

Posterior a esto se realiza el diseño de la alternativa propia y modela en un software de elementos finitos para comparar el rendimiento estructural de la alternativa propuesta con las existentes en el mercado. Se realizaron comparaciones de su comportamiento frente al estado límite último (ELU) como la carga máxima de fallo, el comportamiento estructural de los elementos frente a tensiones cortantes y normales, y a su vez del estado límite de servicio (ELS) se evaluaron los desplazamientos.

A partir de la evidencia recolectada se establece la tensión rasante como el parámetro crítico de resistencia de las vigas cajón, resaltando la importancia de las uniones eficientes entre elementos. Sumado a esto se considera que el diseño establecido cumple satisfactoriamente los parámetros estructurales de ELU y ELS y se aconseja continuar fomentando la utilización de madera local de chopo como material estructural en la construcción.

37. Comportamiento de productos derivados del bambú sometidos a ciclos de envejecimiento acelerado

Alina Avellaneda^a, Laia Haurie^a, María Pilar Giraldo^b, Ana M. Lacasta^a

^a Escuela Politécnica Superior de Edificación de Barcelona (EPSEB), Universitat Politècnica de Catalunya, Av. Doctor Marañón 44, Barcelona 08028. ^b Centre de Ciència i Tecnologia Forestal de Catalunya (CTFC), Crta. de St. Llorenç de Morunys, km 2, Solsona 25280.
alina.avellaneda@upc.edu

Palabras clave: bambú, colorimetría, durabilidad, envejecimiento acelerado.

Resumen

El uso del bambú como material de construcción ofrece beneficios tanto a nivel ambiental, estructural y económico, sobre todo en las regiones donde abunda. La fabricación de productos derivados del bambú ha supuesto mejoras significativas respecto al bambú natural en cuanto a durabilidad, resistencia, versatilidad en diseño y reducción del desperdicio de material.

Este trabajo tiene por objetivo mostrar los resultados obtenidos a partir de la realización de ensayos de envejecimiento acelerado realizados en cuatro muestras de productos de bambú de *dasso Group*, de la gama *dassoTECH*, dos de ellos con recubrimientos de protección.

Las muestras fueron sometidas a ciclos de envejecimiento acelerado durante cuatro semanas y se ha analizado la variación de color mediante el sistema CIELab, el aspecto visual y la pérdida de masa.

Los resultados evidencian una pérdida de masa en todas las muestras envejecidas, mayor conforme aumenta el tiempo de exposición en la cámara de envejecimiento, así como una disminución del valor L^* (oscurecimiento), lo que provoca un mayor contraste entre las fibras. En cuanto al aspecto visual, en las muestras envejecidas no se aprecian deformaciones ni fisuras significativas

1. Introducción

Según un estudio de la FAO (1), entre los años 1990 y 2020 se ha producido un aumento de casi un 50% de la superficie total de bambú, sobre todo en Asia. Este hecho y su rápido crecimiento (2) ha hecho que el bambú se haya convertido en un importante producto de la construcción, tanto en su forma natural como material industrializado. No obstante, el uso de la caña de bambú puede verse limitado por la variabilidad en cuanto a su geometría y propiedades mecánicas (3), algo que es más fácil controlar en los productos industrializados.

Actualmente se pueden encontrar en el mercado productos derivados del bambú con usos muy diversos; entre ellos, están los revestimientos de techos, pavimentos y fachadas. Este tipo de revestimientos, colocados en exteriores, se ven afectados por factores ambientales: radiación solar, cambios de humedad o lluvia, entre otros. Aunque todavía no hay suficientes estudios que demuestren la durabilidad de dichos productos ante ese grado de exposición, sea mediante procesos de envejecimiento natural o acelerados.

Algunos estudios (4) han evaluado el efecto de los procesos de envejecimiento acelerado en madera mediante colorimetría, analizando los cambios generados en las coordenadas del sistema CIELab. Así mismo, existen evidencias sobre la afectación a la luminosidad de la madera de los tratamientos térmicos (5). Por lo que el análisis colorimétrico puede utilizarse como indicador para evaluar el envejecimiento acelerado también en otros materiales lignocelulósicos, como el bambú.

2. Materiales

Se han estudiado cuatro muestras de productos de bambú de dasso Group, de la gama dassoCTECH, dos de ellos destinados a aplicaciones en revestimientos de fachadas, uno para tarimas y otro para revestimiento de techos. Además, las muestras de tarima y revestimiento de techos presentaban recubrimientos de protección mientras que los otros productos se han analizado en crudo (véase Tabla 1).

Tabla 1. Identificación, características y codificación de las muestras.

Tipo de producto	Tipos de acabado	Dimensiones [mm]	Densidad [g/cm3]	Codificación para el estudio
Tarima	Crudo	319 x 100 x 12	1,1-1,3	CRU
Revestimiento de techo	Crudo	320 x 137 x 18	1,2	CTECH
Revestimiento de fachada	Sikkens Savanna	317 x 137 x 18	1,2	SAV
	Aceite WOCA Scotch/ Sahara	317 x 137 x 18	1,2	SHA

Las muestras han sido acondicionadas en cámara climática durante un tiempo mínimo de 24 horas antes y después de iniciar la campaña de ensayos, a una temperatura de 20±2°C y una humedad relativa del 65±5%. De cada muestra, una probeta se ha mantenido en la cámara climática a modo de control y cinco probetas se han sometido a la exposición en cámara de envejecimiento acelerado.

3. Metodología y equipos utilizados

La campaña de ensayos ha consistido en la exposición de las muestras de bambú en cámara de envejecimiento acelerado y, tanto antes como después de dicha exposición, se han realizado mediciones del color para analizar los cambios ocasionados. Ambos procesos se describen a continuación.

3.1. Exposición en cámara de envejecimiento acelerado

La exposición en cámara de envejecimiento acelerado se ha realizado en un equipo QUV/Spray y ha permitido simular de forma acelerada los efectos de la condensación, la radiación solar y la lluvia.

Los ensayos se han realizado siguiendo el protocolo establecido en la norma UNE-EN 927-6:2019. Cada ciclo de exposición de una semana se inicia con un período de condensación de 24h, seguido por 48 ciclos de 3 horas, combinando un período de radiación ultravioleta de 2,5h y otro de rociado de agua de 0,5h.

El ensayo ha tenido una duración total de 4 ciclos semanales, lo que, según la biblografía (6) puede ser equivalente a 2 años de envejecimiento natural.

3.2. Medición del color

Para la medición del color se ha utilizado un colorímetro PCE-TCR 200 que permite determinar las coordenadas cromáticas L* (luminosidad), a* (de verde a rojo) y b* (de azul a amarillo), correspondientes al sistema CIELab.

4. Análisis y resultados

4.1. Análisis visual

La Fig. 1 muestra la evolución de una probeta de cada muestra antes y después de ser sometida al ensayo de envejecimiento acelerado durante 4 semanas. Se puede observar que los cambios de color son importantes desde la segunda semana de exposición y se incrementan a las 4 semanas.



Figura 1. Probeta de cada producto al inicio y después de cada ciclo semanal de exposición en la cámara de envejecimiento acelerado.

Visualmente se aprecia un oscurecimiento en las muestras envejecidas. Conforme aumenta el tiempo de exposición, también aumenta el contraste, identificándose mejor las fibras de bambú. Por otro lado, no se aprecian deformaciones

ni fendas de secado en las muestras ensayadas.

4.2. Análisis colorimétrico

La Fig. 3 muestra la luminosidad (L*) obtenida en cada muestra como el valor medio de 8 puntos medidos en la superficie expuesta de cada probeta. Se aprecia una disminución de L* para todas las muestras, lo que implica un oscurecimiento en general de todas ellas. No obstante, en las muestras SAV y SHA, que disponen de un recubrimiento superficial, el descenso es inferior que en las muestras CRU y CTECH, que se ensayaron sin recubrimiento.

Finalmente, la Fig. 5 muestra la diferencia de color (ΔE_{ab}^*) en la segunda y cuarta semana de exposición en la cámara de envejecimiento acelerado. Se observa que el valor de este parámetro aumenta en general con el paso del tiempo, pero la variación es más grande en las muestras CRU y CTECH, que no disponen de recubrimiento.

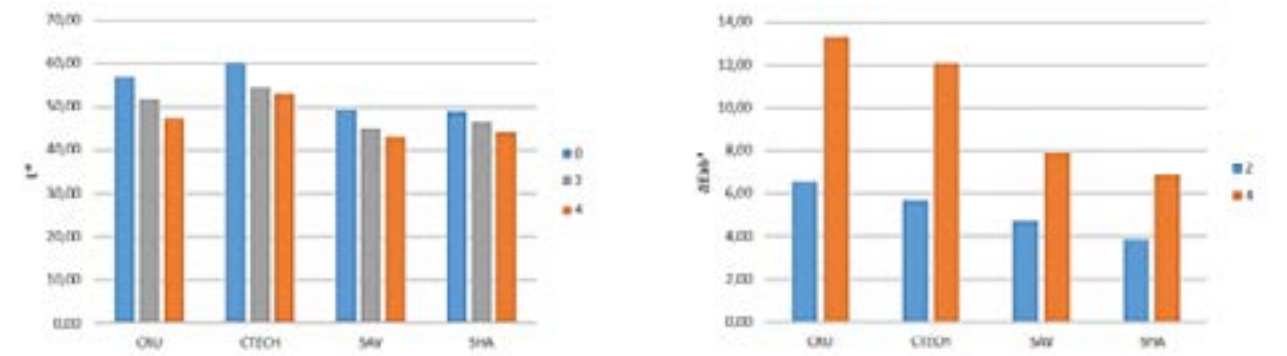


Figura 3. Luminosidad (L*) antes del ensayo y después de 2 y 4 semanas de exposición. Figura 4. Variación global de color (ΔE_{ab}^*) después de 2 y 4 semanas de exposición.

La oficina nacional de estandarización de los Estados Unidos (NBS) ha clasificado las variaciones de color en función de la percepción del ojo humano utilizando unidades NBS (7), aplicando la fórmula (1).

$$NBS = \Delta E_{ab}^* \times 0,92 \quad (1)$$

Considerando el criterio y las unidades NBS, la muestra CRU presenta una variación del color clasificada como “alta” (6,0) después de dos semanas de envejecimiento y las muestras CTECH, SAV y SHA una variación “apreciable” (5,2; 4,3 y 3,6 respectivamente). Después de cuatro semanas de envejecimiento, la variación es “muy alta” para la muestra CRU (12,2) y “alta” para el resto de muestras (11,1 CTECH; 7,2 SAV y 6,3 SHA).

4.3. Pérdida de masa

Las probetas se han pesado en báscula de precisión antes y después de la exposición en la cámara de envejecimiento acelerado. La Tabla 2 muestra el promedio de la pérdida de masa de cada producto tras finalizar el ensayo y después de acondicionarlas en cámara climática a 20±2°C de temperatura y 65±5% de humedad relativa durante un mínimo de 24h.

La mayor pérdida de masa se produce en la muestra CRU, que también es la de menor grosor. Las muestras SAV y SHA, que disponen de recubrimiento, tienen una pérdida de masa similar. La menor pérdida de masa se produce en la muestra CTECH.

Tabla 2. Pérdida de masa después de 4 semanas de exposición.

Ref. Muestra	Pérdida de masa (%)
CRU	2,74%
CTECH	0,99%
SAV	1,65%
SHA	1,82%

5. Conclusiones

Los productos de bambú ensayados mantienen la integridad después de 4 semanas de envejecimiento acelerado sin que se observen deformaciones o fendas. En cuanto al cambio de color, en todos los casos se observa una tendencia al oscurecimiento, con una variación pronunciada después de la primera semana de ensayo y una estabilización en las semanas posteriores. Las muestras SAV y SHA, que disponen de recubrimiento, muestran un oscurecimiento menos pronunciado y también una menor variación global del color. Esta tendencia se mantiene en la variación global de color (ΔE_{ab}^*), siendo las muestras SAV y SHA las que presentan menor variación durante todo el ensayo.

6. Agradecimientos

Las autoras quieren expresar su agradecimiento a la empresa UNIQ LARQ DEVELOPMENT, S.L. por facilitar las muestras y financiar la campaña de ensayos. Así como al MCIN/AEI/10.13039/ 501100011033 a través del proyecto de investigación BioSAFE (PID2020-117530RB-I00) y al programa Erasmus+ de la UE por el proyecto Bio-Fibre (2022-1-DK01-KA220-HED- 00086641).

Referencias

(1) FAO. Evaluación de los recursos forestales mundiales 2020 - Informe principal. FAO. 2021, 190.

(2) Liese, W.; Köhl, M. Bamboo. The Plant and its Uses. *Springer Cham*. 2016, 356.

(3) Sharma, B.; Gatoo, A.; Bock, M.; Mulligan, H.; Ramage, M. Engineered bamboo: state of the art. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. 2015, 168(2), 57–67.

(4) Tolvaj, L.; Faix, O. Artificial ageing of wood monitored by DRIFT spectroscopy and CIE Lab color measurements. 1: Effect of UV light. *Holzforschung*. 1995, 49(5), 397–404.

(5) Brischke, C.; Welzbacher, C. R.; Brandt, K.; Rapp, A. O. Quality control of thermally modified timber: Interrelationship between heat treatment intensities and CIE L*a*b* color data on homogenized wood samples. *Holzforschung*. 2007, 61(1), 19-22.

(6) Liu, R.; Zhu, H.; Li, K.; Yang, Z. Comparison on the Aging of Woods Exposed to Natural Sunlight and Artificial Xenon Light. *Polymers*. 2019, 11(4), 709.

(7) Mo, J., Tamboli, D., & Haviarova, E. (2023). Prediction of the color change of surface thermally treated wood by artificial neural network. *European Journal of Wood and Wood Products*, 81(5), 1135-1146.

38. Influencia de la exposición en cámara de envejecimiento acelerado sobre el color y la reacción al fuego en siete especies de madera

Alina Avellaneda^a, Laia Haurie^a, María Pilar Giraldo^b, Ana M. Lacasta^a
^a Escuela Politécnica Superior de Edificación de Barcelona (EPSEB), Universitat Politècnica de Catalunya, Av. Doctor Marañon 44, Barcelona 08028. ^b Centre de Ciència i Tecnologia Forestal de Catalunya (CTFC), Crta. de St. Llorenç de Morunys, km 2, Solsona 25280.
alina.avellaneda@upc.edu

Palabras clave: durabilidad de la madera, envejecimiento acelerado, reacción al fuego, ciclos de envejecimiento.

Resumen

El objetivo de este estudio es evaluar la degradación causada por la exposición a los agentes atmosféricos a lo largo del tiempo, así como su influencia en el comportamiento al fuego en siete especies de madera con diferentes clases de durabilidad, según la clasificación de la norma UNE-EN 350:2016.

Las muestras se sometieron a envejecimiento acelerado durante cuatro semanas siguiendo el protocolo de la norma UNE-EN 927-6 y se evaluó la variación del color y la aparición de deformaciones y fendas. También se realizaron ensayos de reacción al fuego en el radiador de goteo (UNE 23725-90) para analizar la influencia del envejecimiento en el comportamiento al fuego de las diferentes especies.

Los resultados indicaron que la exposición en la cámara de envejecimiento acelerado influye significativamente en la reacción al fuego de la superficie de la madera, especialmente en maderas blandas y las fendas superficiales dificultan la extinción de la llama. Por otro lado, el alerce y la acacia demostraron tener una buena resistencia a la degradación y un buen comportamiento al fuego.

1. Introducción

De forma general se considera que las maderas frondosas y tropicales son más durables que las coníferas, porque su mayor densidad y dureza, así como su contenido de extractivos orgánicos, las hacen muy resistentes a la degradación por ataque biótico (1) y agentes abióticos. No obstante, algunas coníferas resinosas, como el alerce (*Larix decidua*), demuestran un buen comportamiento a la intemperie, por lo que se suele utilizar como revestimiento de fachadas.

La exposición repetida a ciclos de humedad y secado, cambios de temperatura y radiación solar degrada la madera a nivel físico y químico con el paso del tiempo (2). Además, la degradación de la madera por agentes bióticos o abióticos modifica algunos de sus componentes orgánicos, principalmente polisacáridos (celulosa, hemicelulosa y polifenoles, como la lignina) (3).

Desde el punto de vista estético, se considera el color como uno de los principales atributos de la madera, por lo que resulta importante analizar su variabilidad frente a la intemperie (4). Por otro lado, la madera es un material combustible. Diversos autores concluyen que los factores con mayor influencia en su combustión son principalmente la densidad, la orientación respecto a la fuente de calor, el contenido de humedad y la calidad del tratamiento superficial de la madera (5). Pero, en algunas especies de madera, particularmente ricas en sustancias extractivas y exudados, la composición puede tener mayor influencia que la densidad (6).

Considerando que la humedad de la lluvia provoca lixiviación que degrada la lignina, las hemicelulosas y otras sustancias extractivas menos estables (7), así como lo expuesto anteriormente, este estudio se centra en la degradación a largo plazo de la madera y en cómo afecta a su comportamiento frente al fuego. Este aspecto, además, toma especial importancia en los revestimientos de fachadas, dado el creciente uso de este material en la construcción de edificios, tanto privados como públicos.

2. Materiales

Para este estudio se seleccionaron siete especies de madera. Tres frondosas: acacia (*Robinia pseudoacacia*) (A), castaño (*Castanea sativa*) (C) y paulownia (*Paulownia tomentosa*) (P). Y cuatro coníferas: alerce (*Larix decidua*) (L), pino negro (*Pinus uncinata*) (PN), pino radiata (*Pinus radiata*) (R) y pino rojo (*Pinus sylvestris*) (PR).

Las muestras han sido acondicionadas en cámara climática durante un tiempo mínimo de 24 horas antes y después de iniciar la campaña de ensayos, a una temperatura de 20±2°C y una humedad relativa del 65±5%. De cada muestra, una probeta se ha mantenido en la cámara climática a modo de control y cinco probetas se han sometido a la exposición en cámara de envejecimiento acelerado.

3. Metodología y equipos utilizados

3.1. Exposición en cámara de envejecimiento acelerado

Los procesos de envejecimiento acelerado se han realizado en un equipo QUV/Spray que simula los efectos de la condensación, la radiación solar y la lluvia, siguiendo el protocolo establecido en la norma UNE-EN 927-6:2019, aunque limitando la duración a 4 semanas.

Cada ciclo de exposición de una semana se inicia con un período de condensación de 24 h, seguido por 48 ciclos de 3 horas, combinando un período de radiación ultravioleta de 2,5 h y otro de rociado de agua de 0,5 h. El ensayo ha tenido una duración total de 4 ciclos semanales, lo que, según la bibliografía (8) puede ser equivalente a 2 años de envejecimiento natural.

3.2. Medición del color

La medición del color se ha llevado a cabo en cuatro puntos de cada probeta con un colorímetro PCE-TCR 200, mediante el cual se han obtenido las coordenadas cromáticas L* (luminosidad), a* (de verde a rojo) y b* (de azul a amarillo), correspondientes al sistema CIELab.

3.3. Reacción al fuego mediante radiador de goteo

Tras envejecer las muestras y medir el color, las probetas se han cortado para realizar el ensayo de reacción al fuego en el radiador de goteo, según el procedimiento descrito en la norma UNE 23725-90. Con la realización de este ensayo se persigue obtener resultados comparativos que permitan evaluar algunos aspectos relacionados con la reacción al fuego en muestras pequeñas, como son el tiempo de ignición o la persistencia de las llamas, siendo compatible con el tamaño de muestras utilizado en la cámara de envejecimiento acelerado.

Las probetas, de 100x100±10x15 mm, se colocaron sobre una rejilla a 3 cm de la fuente de calor, de 500 W. El ensayo tiene una duración de 5 minutos durante los cuales se desplaza la fuente de calor sobre la probeta para provocar la ignición, se mantiene 3 segundos y se retira esperando la extinción de la llama.

4. Análisis y resultados

4.1. Análisis visual

La Fig. 1 muestra una serie de fotografías que comparan las muestras no envejecidas (NA) con aquellas sometidas a procesos de envejecimiento acelerado, según el procedimiento resumido en el apartado 3.1.1, durante 1, 2, 3 y 4 semanas. La tendencia general es hacia el oscurecimiento, excepto en los casos de la acacia (A) y la paulownia (P), que se blanquean progresivamente.

Codigo / Nombre clasifica		A <i>Robinia pseudoacacia</i>	C <i>Castanea sativa</i>	L <i>Quercus decussata</i>	PN <i>Pinus uncinata</i>	PR <i>Pinus sylvestris</i>	P <i>Paulownia tomentosa</i>	R <i>Pinus radiata</i>
UNE-EN 927-6	NE							
	S1							
	S2							
	S3							
	S4							

Fig. 1. Se presentan fotografías de una muestra sin envejecimiento (NE) y otra de cada semana bajo el procedimiento de la norma.

En general, la degradación de todas las muestras durante las cuatro semanas es notable. Las muestras de pino rojo (PR), negro (PN) y radiata (R) presentaron la degradación más significativa, desarrollando fendas y fisuras de diferentes tamaños; algunas profundas, especialmente en PR que también presentó curvatura (Fig. 2). Sin embargo, no se observaron grietas ni cambios de textura en la superficie de las muestras de acacia (A) ni paulownia (P), mostrando una estabilidad dimensional excepcional y una superficie lisa, sin rugosidades ni fendas, incluso en las probetas de la semana 4. El alerce (L) también mostró un buen aspecto e integridad dimensional durante las 4 semanas, aunque con algunas pequeñas fendas.

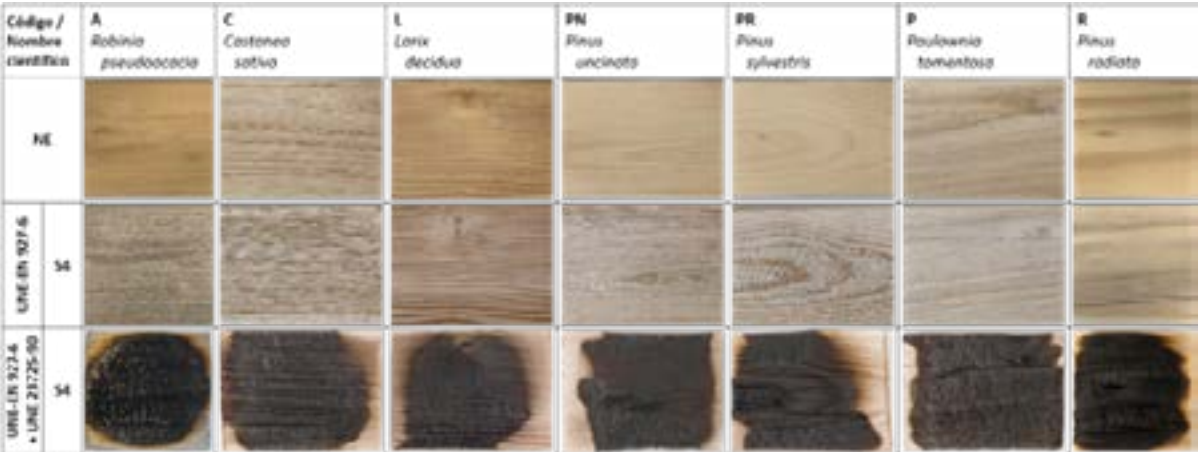


Figura 2. Vista de las muestras estudiadas antes de envejecer (superior), después de 4 semanas de envejecimiento (medio) y después de envejecer y del ensayo en el radiador de goteo (inferior).

4.2. Análisis colorimétrico

Los cambios de color discutidos en la sección anterior pueden cuantificarse mediante las coordenadas de color del sistema CIELab a partir de las Fig. 3 y 4. Se puede observar cómo las muestras se oscurecen ligeramente, aunque, en el caso de la acacia y la paulownia, se constata un aclaramiento.

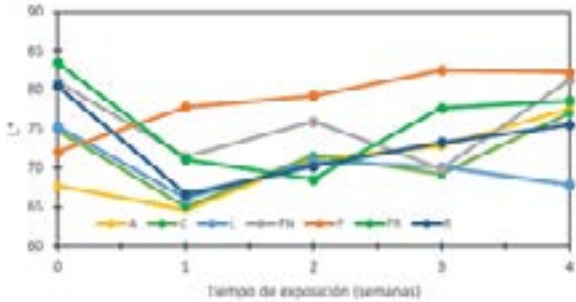


Fig. 3. Luminosidad L* en función de las semanas de envejecimiento y especie.

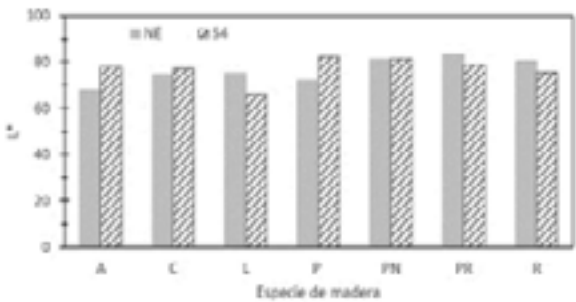


Fig. 4. Luminosidad L* de las muestras de control y de las envejecidas 4 semanas para cada especie.

4.3. Comportamiento al fuego

El comportamiento al fuego se evaluó mediante el ensayo en el radiador de goteo con las muestras de cada especie, sin envejecer y envejecidas 1, 2, 3 y 4 semanas. La Fig. 5 muestra el tiempo en el que se produce la primera ignición. Se observa como la paulownia presenta un tiempo de ignición inicial significativamente menor. Su baja densidad (266 kg/m3) y su estructura porosa facilitan la liberación de gases inflamables. El alerce y el pino rojo, con densidades de 584 y 516 kg/m3 respectivamente, presentan tiempos de ignición inicial mayores para las muestras sin envejecimiento. El tiempo de la primera ignición tiende a aumentar con el envejecimiento, lo que se explica por la lixiviación de componentes de la madera con baja estabilidad térmica, como los extractos y polisacáridos de bajo peso molecular de la hemicelulosa (7,9). Destacan especialmente la acacia, el alerce y el pino negro, que en la cuarta semana presentan un tiempo de ignición inicial similar, si bien en las semanas previas se aprecian matices diferentes. La capacidad de autoextinción de las muestras se evalúa mediante el valor promedio de la duración de la llama (Fig. 6). En este aspecto, la acacia muestra el mejor comportamiento, con duraciones en torno a los 10 segundos en las probetas de todas las semanas.

La acacia y el alerce presentan el mejor comportamiento, tanto en muestras envejecidas como sin envejecer. Su estabilidad ante el envejecimiento y la ausencia de fendas favorecen este hecho. Por otro lado, la porosidad de la paulownia contribuye al aumento de la duración de las combustiones y a la propagación de la llama.

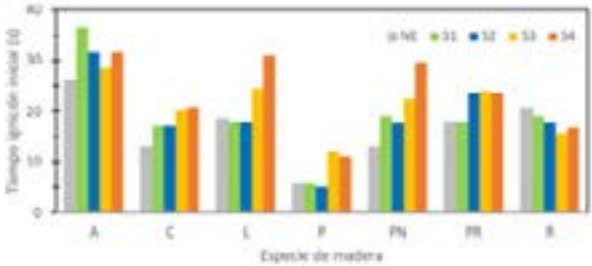


Fig. 5. Tiempo de la primera ignición, para cada especie y en función del tiempo de envejecimiento.

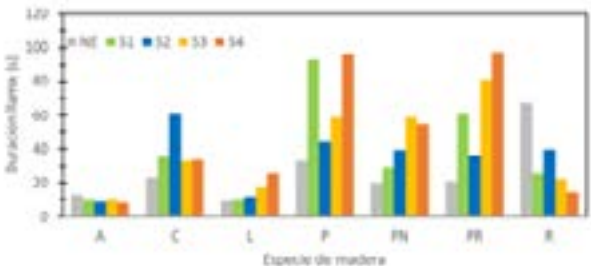


Fig. 6. Duración de la llama, para cada especie y en función del tiempo de envejecimiento.

5. Conclusiones

El proceso de envejecimiento acelerado produce un oscurecimiento progresivo de las muestras, excepto en la acacia y en la paulownia, donde se observa un incremento gradual de la luminosidad. Los resultados muestran correlación entre la degradación por envejecimiento acelerado y el empeoramiento gradual del comportamiento al fuego de las maderas seleccionadas. Aunque el tiempo de ignición inicial aumenta en las muestras envejecidas,

la capacidad de autoextinción empeora, lo que implica una mayor persistencia de la llama. Tanto la acacia como el alerce demuestran una buena durabilidad que, junto a la ausencia de fendas, contribuyen a mostrar una buena reacción al fuego. Por otro lado, la paulownia no presenta fendas ni deformaciones tras el envejecimiento, muestra un bajo tiempo de ignición inicial, pero experimenta una rápida propagación de la llama.

6. Agradecimientos

Las autoras expresan su agradecimiento al MCIN/AEI/10.13039/ 501100011033 a través del proyecto de investigación BioSAFE (PID2020-117530RB-I00) por el apoyo financiero recibido en el ámbito del “Programa Estatal de I+D+i Orientado a los Retos de la Sociedad”.

Referencias

(1) N’Guessan J.L.L.; Niamké B.F.; Yao N.J.C.; Amusant N. Wood Extractives: Main Families, Functional Properties, Fields of Application and Interest of Wood Waste. *Forest Products Journal*. 2024, 73(3), 194-208.

(2) Shupe, T.; Stan, L.; Ring, D. Causes and control of wood decay, degradation and stain. *Louisiana State University Agriculture Center*. 2008, 2703, 27.

(3) Feist, W. Outdoor Wood Weathering and Protection. *U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory*. 1990.

(4) Kržišnik, D.; Lesar, B.; Thaler, N.; Humar, M. Influence of natural and artificial weathering on the colour change of different wood and wood-based materials. *Forests*. 2018, 9(8), 488.

(5) Bartlett, A.I.; Hadden, R.M.; Bisby, L.A. A review of factors affecting the burning behaviour of wood for application to tall timber construction. *Fire Technology*. 2019, 55(1), 1–49.

(6) Haurie, L.; Giraldo, M.P.; Lacasta, A.M.; Montón, J.; Sonnier, R. Influence of different parameters in the fire behaviour of seven hardwood species. *Fire Safety Journal*. 2019, 107, 193–201.

(7) Panek, M.; Kubovský,I.; Oberhofnerov, E.; Sterbov, I.; Niemz , P.; Osvald, A.; Kacík, F. Influence of natural weathering on the ignition and relative burning rate of selected softwoods. *Construction and Building Materials*. 2021, 304.

(8) Liu, R.; Zhu, H.; Li, K.; Yang, Z. Comparison on the Aging of Woods Exposed to Natural Sunlight and Artificial Xenon Light. *Polymers*. 2019, 11(4), 709.

(9) Nuopponen, M.; Wikberg, H.; Vuorinen, T.; Maunu, S.L.; Jämsä, S.; Viitaniemi, P. Heat-treated softwood exposed to weathering. *Journal of Applied Polymer Science*. 2003, 91, 2128-2134.

39. El rol de los residuos vegetales y los bio-aglutiantes en las propiedades térmicas y acústicas de los bio-compuestos

Brenda Arias-Cárdenas^a, Ana M. Lacasta^a, Laia Haurie^a
^aD epartment of Architectural Technology, Barcelona School of Building Construction, Universitat Politècnica de Catalunya, Av. Doctor Marañon 44, Barcelona 08028, Spain.
Brenda.arias@upc.edu

Palabras clave: materiales sostenibles, aglutinantes naturales, rendimiento térmico, propiedades acústicas, residuos agrícolas.

Resumen

La creciente necesidad de materiales de construcción sostenibles ha generado un aumento del interés en los compuestos de origen biológico derivados de residuos vegetales. Este estudio explora la viabilidad de tres residuos agrícolas (cáscara de arroz, paja de arroz y tallos de girasol) y la planta marina Posidonia oceánica como materiales de construcción ligeros y sostenibles. Para mantener la consistencia ecológica, se emplearon dos aglutinantes naturales (goma arábiga y goma xantana) para desarrollar muestras de bio-compuestos. Las muestras se sometieron a ensayos de conductividad térmica, de resistencia al flujo de aire y de absorción acústica para caracterizar sus propiedades. La investigación se centra en comparar cómo el material y el tipo de aglutinante influyen en estas propiedades, examinando si existen variaciones significativas derivadas de alguno de estos factores.

1. Introducción

El sector de la construcción es uno de los principales responsables del consumo de recursos y de la emisión de gases de efecto invernadero a nivel global. En los últimos años, esto ha impulsado una búsqueda activa de soluciones que contribuyan a reducir su huella de carbono. Una de las estrategias más exploradas es la sustitución de materiales convencionales por compuestos de origen vegetal, especialmente aquellos derivados de residuos vegetales [1], [2]. Estos bio-materiales representan una alternativa renovable, biodegradable y de bajo impacto ambiental, con aplicaciones potenciales en diversos elementos constructivos. Gracias a su gran variabilidad, muchos de ellos presentan baja densidad y estructura porosa, lo que puede derivar a materiales con buenas propiedades térmicas y acústicas, lo que los hace especialmente adecuados para funciones de aislamiento en la edificación.

En este contexto, el presente estudio investiga el comportamiento térmico, acústico y de permeabilidad al aire de compuestos elaborados con residuos vegetales y aglutinantes naturales, con el objetivo de evaluar su viabilidad como materiales sostenibles para el sector de la construcción.

2. Materiales y metodología

2.1. Materiales

Los materiales del presente estudio son residuos vegetales de proximidad, disponibles en la región Mediterránea y de composición lignocelulosa. La selección de materiales a utilizar para la investigación se basó en un estudio previo de caracterización de doce residuos distintos [3], a partir del cual se eligieron cuatro, considerando su facilidad de obtención, su potencial y a sus diferencias estructurales.

Los materiales seleccionados (Fig. 1) fueron: la cáscara de arroz (RH) y la paja de arroz (RS), procedentes del sur de Catalunya, en el delta del Ebro; el tallo de girasol (SS), generado en la provincia de Lleida y ya estudiado previamente por este grupo de investigación [4]; y finalmente la Posidonia oceánica (PO) una planta marina esencial para el ecosistema mediterráneo que, una vez completado su ciclo vital, se deposita en grandes cantidades en las costas y debe ser retirada.



Figura 1. Imagen de los materiales de estudio, en orden, cáscara de arroz (RH), paja de arroz (RS), tallo de girasol (SS) y posidonia oceánica (PO).

Con el objetivo de mantener la coherencia con el enfoque sostenible del estudio, se seleccionaron aglutinantes de origen vegetal. En concreto, se utilizaron goma arábica (GA), un derivado de la resina de las acacias, y goma xantana (GX), producida por fermentación de la bacteria *Xanthomonas campestris*. Una vez seleccionados los aglutinantes, se realizaron diversas pruebas para determinar la ratio óptima de agua/aglutinante, y posteriormente de aglutinante/material, adaptado a cada caso particular. Para la goma arábica se estableció una proporción de 2:1 (dos partes de agua por una de aglutinante), mientras que en el caso de la goma xantana la ratio fue de 40:1, reflejando una utilización considerablemente menor del aglutinante. En la Tabla 1 se presentan las ratios utilizados para cada material, con el fin de facilitar su comprensión.

Tabla 1. Ratios de aglutinante material

Material	Aglutinante	
	Goma Arábica (GA)	Goma Xantana (GX)
Cáscara de Arroz (RH)	1:1.50	1:1.88
Paja de Arroz (RS)	1:1.50	1:3.33
Tallo de Girasol (SS)	1:1.50	1:2
Posidonia oceánica (PO)	1:1.25	1:1

2.1 Metodología

Con el fin de obtener una caracterización de las propiedades térmicas, acústicas y de permeabilidad al aire de los materiales compuestos, se prepararon dos tipos de muestras, en función del ensayo a realizar. El primer tipo consistió en muestras cilíndricas de 4 cm de grosor y 10 cm de diámetro, que se utilizarán para el ensayo térmico y de flujo de aire. El segundo tipo correspondió a muestras de 3 cm de grosor y 5 cm de diámetro, que serán destinadas a los ensayos de absorción acústica mediante tubo de impedancia. Para cada combinación de material y aglutinante, se fabricarán tres muestras, con el fin de garantizar la reproducibilidad de los resultados. Las muestras fueron acondicionadas en condiciones estable de 20 oC y 60% de humedad en cámara climática previo a cada ensayo.

El ensayo de conductividad térmica se realizó mediante el analizador portátil de transferencia de calor ISOMET 2114, equipado con la sonda superficial IPS 1105, que permite medir la conductividad térmica, entre otros factores [5]. Por otro lado, para el ensayo de resistencia al flujo del aire se utilizó el sistema de medición Nor1517A, que determina la resistencia al paso del aire en materiales porosos conforme a la norma ISO 9053-2:2020. Finalmente, la absorción acústica se midió mediante el método del tubo de impedancia, con dos micrófonos, según la norma ISO 10534-2. Las muestras fueron colocadas en el extremo del tubo y se registró el coeficiente de absorción en función de la frecuencia, comprimidas en el rango de 400-3150 Hz en este caso.

3. Resultados y discusión

3.1. Conductividad térmica

Los resultados de conductividad térmica están comprendidos en un rango entre 0.044-0.054, siendo el SS el que presenta los resultados más favorables y, por el contrario, la PO la conductividad más alta, no obstante, en todos los casos se encuentra en baremos aceptables de aislantes térmicos. En la Tabla 2 se muestran todos los resultados con sus desviaciones estándar y su densidad, donde se observa que las muestras aglutinadas con GX muestran una densidad menor y por tanto una menor conductividad térmica, relacionado directamente estas dos propiedades.

Tabla 2. Resultados Conductividad térmica y densidad

Espécimen	Densidad [g/cm³]			Conductividad [W/m·k]		
RH GX	0.1266	±	0.0018	0.0480	±	0.0008
RH GA	0.1782	±	0.0040	0.0514	±	0.0031
RS GX	0.0515	±	0.0007	0.0449	±	0.0010
RS GA	0.0681	±	0.0030	0.0462	±	0.0015
SS GX	0.0649	±	0.0008	0.0446	±	0.0007
SS GA	0.0883	±	0.0396	0.0463	±	0.0017
PO GX	0.0881	±	0.0100	0.0506	±	0.0022
PO GA	0.1303	±	0.0049	0.0542	±	0.0022

3.2. Resistencia al flujo de aire

En el ensayo de la resistencia especifica de flujo de aire, los resultados (Tabla 3) muestran diferencias claras entre materiales, a mayor valor, mayor resistencia al paso del aire. El RH presentó los valores más altos, con una media de 44.9 ± 1.3 Pa·s/m para las muestras de GA y de 39.3 ± 2.6 Pa·s/m para GX. Por el contrario, el RS mostró los valores más bajos, con medias 16.8 ± 3.6 Pa·s/m (GA) y 15.5 ± 2.6 Pa·s/m (GX), con una mayor permeabilidad al aire. Finalmente, las muestras de SS y PO, mostraron valores similares, 20.2 ± 1.6 Pa·s/m con GA y 24.7 ± 1.9 Pa·s/m con GX, para el primer caso, y 22.4 ± 2.2 Pa·s/m con GA y 23.2 ± 3.7 Pa·s/m GX para el segundo. En este caso, el efecto del aglutinante es diferente para cada material, y no muestra una tendencia uniforme.

Tabla 3. Resultados resistencia especifica al flujo del aire de los materiales según el algutinante

Resistencia especifica flujo de aire [Pa·s/m]	Muestra GA	Muestra GX
RH	44.9 ± 1.29	39.3 ± 2.63
RS	16.8 ± 3.64	15.5 ± 2.65
SS	20.2 ± 1.64	24.7 ± 1.64
PO	22.4 ± 2.20	23.2 ± 3.70

3.3. Absorción acústica

En el presente apartado se muestran los resultados del ensayo de absorción acústica, con el fin de comparar el comportamiento de las diferentes combinaciones entre materiales y aglutinantes. En la Fig. 2 se muestran los resultados de cada material dependiendo del aglutinante que se haya empleado para su composición, siendo en el primer caso, los bio-compuestos formados con GA y en el segundo por los formados de GX. En los especímenes formados con GA se observa como los coeficientes mas altos corresponden a los materiales de RS y SS, siendo de 0.88 y de 0.94 respectivamente.

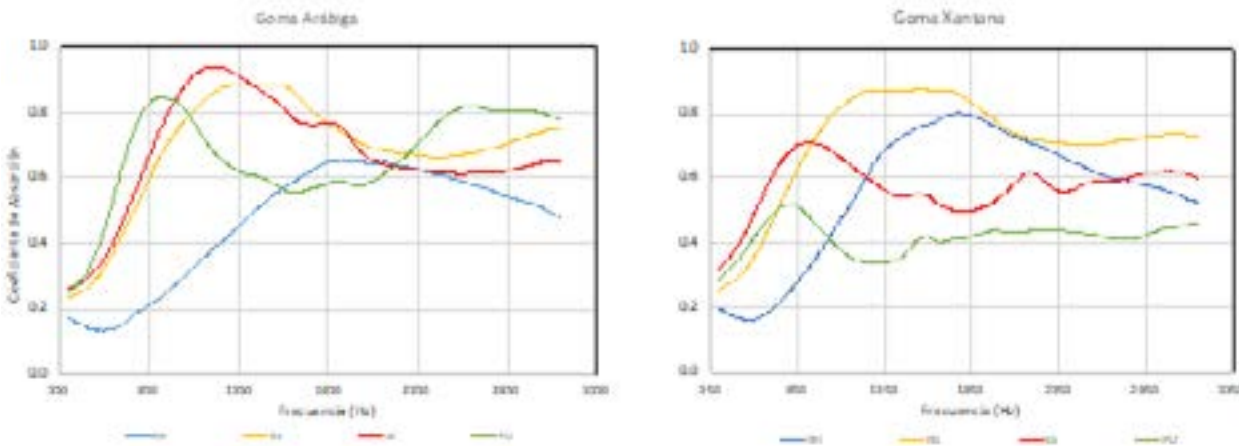


Figura 2. Gráficos de absorción acústica de los bio-compuestos. En la primera imagen se muestran los resultados para los aglutinados con goma arábica, y en el segundo con goma xantana.

La PO también muestra buenos resultados, manteniéndose por encima de 0.6 en casi todas las frecuencias a partir de 570 Hz. En los bio-compuestos de GX, los coeficientes mas elevados son alcanzados por los materiales de RH y RS, siendo este ultimo el único que rebasa la barrera de el 0.8. Realizando una comparativa entre aglutinantes, se puede observar claramente como para el RH presenta mejores resultados aglutinado con GX, mientras que por el contrario SS y PO incrementan sustancialmente los resultados con GA. Por otro lado, RS parece no verse afectado por el aglutinante, mostrando resultados similares en ambos casos.

El análisis del Coeficiente de Reducción de Ruido (NRC) mostrado en la Tabla 4, y calculado a partir de las bandas de 500, 1000 y 2000 Hz, confirmó las tendencias observadas en los gráficos. Para RH, la GX mostró mejor comportamiento (NRC 0.44) frente a la GA (0.36). En RS, ambos aglutinantes ofrecieron resultados similares, 0.61 para GX y 0.58 para GA, lo que sugiere que el tipo de aglutinante tiene menor impacto en este caso. En cambio, para SS y para PO, la GA

resultó más eficaz, 0.61 GA frente a 0.54 GX, y 0.58 GA frente a 0.40 con GX, respectivamente.

Tabla 4. Coeficiente de absorción acústica de las tres frecuencias representativas y el coeficiente de reducción de ruido (NRC) y su desviación estándar.

Frecuencia [Hz]		Muestras GA				Muestras GX			
		RH	RS	SS	PO	RH	RS	SS	PO
500Hz		0.15	0.27	0.30	0.32	0.17	0.30	0.39	0.35
1000Hz		0.28	0.74	0.84	0.82	0.40	0.76	0.69	0.43
2000Hz		0.65	0.72	0.70	0.59	0.75	0.77	0.55	0.43
NRC		0.36	0.58	0.61	0.58	0.44	0.61	0.54	0.40
	SD	0.07	0.09	0.06	0.12	0.05	0.11	0.06	0.13

No se observó una relación directa entre los valores de absorción y la densidad. En el caso de RH, la menor densidad coincidió con mejores resultados, pero para SS y PO ocurrió lo contrario, siendo las muestras más densas (aquellas con goma arábica) las que ofrecieron mejores prestaciones. En conjunto, los resultados indican que la eficacia acústica depende en gran medida de la combinación específica entre el material de base y el aglutinante empleado.

4. Conclusiones

Los resultados refuerzan la idea de que la compatibilidad entre el residuo vegetal y el aglutinante natural es un factor determinante. En la conductividad térmica se ratificó que los materiales vegetales (0.044-0.054 W/mK) son una potencial alternativa a los materiales convencionales, no obstante, se observó que mayor densidad aporte el aglutinante, mayor será esa conductividad, reduciendo su eficacia. La resistencia al flujo del aire se ve directamente relacionada con las propiedades de absorción acústica, materiales con mayor resistencia como RH, ~45 Pa·s/m presentan menor absorción, mientras que los más permeables como RS, ~15 Pa·s/m alcanzan valores NRC de hasta 0,61. Mientras que en la resistencia al flujo del aire, la utilización del aglutinante no ha sido determinante, parece indicar que en cuanto a la absorción acústica si que es relevante en cada caso, siendo la combinación de ambos elementos clave en cada caso.

5. Referencias

[1] F. Asdrubali, F. D’Alessandro, and S. Schiavoni, “A review of unconventional sustainable building insulation materials,” Sustainable Materials and Technologies, vol. 4, pp. 1–17, Jul. 2015, doi: 10.1016/j.susmat.2015.05.002.

[2] E. Cintura, L. Nunes, B. Esteves, and P. Faria, “Agro-industrial wastes as building insulation materials: A review and challenges for Euro-Mediterranean countries,” Nov. 01, 2021, Elsevier B.V. doi: 10.1016/j.indcrop.2021.113833.

[3] B. A. Cárdenas, A. M. Lacasta, L. Haurie, and A. Navarro, “Vegetable Raw Materials Characterization: Chemical Composition Analysis and Comparison Between Materials,” pp. 347–362, 2025, doi: 10.1007/978-3-031-92874-1_28.

[4] M. P. Fernández and M. P. Fernández, “Contribution to the development of new bio-based thermal insulation materials made from vegetal pith and natural binders : hygrothermal performance, fire reaction and mould growth resistance,” 2023, Vol. , Page: , Oct. 2023, doi: 10.5821/DISSERTATION-2117-95754.

[5] “ISOMET 2114 Portable system for measurement of heat transfer properties of materials”.

40. Hacia un nuevo concepto de estructuras laminares reticulares de madera

A.J. Lara-Bocanegra^a, C. Martínez-Criado^a, A. Roig a, A. Majano-Majano^a
^a Departamento de Estructuras y Física de Edificación, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid (UPM), Avda. Juan de Herrera, 4, 28040 Madrid, España.
antoniojose.larapm.es

Palabras clave: Eeucalipto, LVL, uniones carpinteras, CNC, flexión activa.

Resumen

En este trabajo se presenta un concepto innovador para el diseño y construcción de láminas reticulares de madera, que combina las ventajas de la flexión activa, las uniones carpinteras y la fabricación digital, utilizando un nuevo microlaminado (LVL) de *Eucalyptus globulus* L., el cual permite un proceso de curvado rápido y en seco. La investigación se centra en las propiedades mecánicas del material, el sistema de conexión y las estrategias de mallado, explorando y discutiendo cada uno de estos aspectos en relación con estructuras laminares reticulares de madera existentes. La capacidad de curvado del nuevo LVL se evalúa mediante ensayos de flexión de tabla. A continuación, se presenta un concepto de conexión innovador, que integra la unión nodal y el sistema multicapa, a través de un diseño de unión carpintera realizada mediante CNC, que unifica solución estructural, apariencia estética y posibilidad de montaje y desmontaje. Finalmente, se presentan algunos métodos para generar patrones ortogonales, compatibles con la solución de unión planteada, y se muestran varios prototipos realizados con el concepto propuesto. Los resultados evidencian que el LVL de *Eucalyptus globulus* posee propiedades mecánicas muy superiores a las de otros productos estructurales disponibles en el mercado europeo, permitiendo radios de curvado menores con un módulo de elasticidad notablemente superior. La realización exitosa de prototipos a varias escalas demuestra la viabilidad del concepto y pone de manifiesto el gran potencial de este novedoso enfoque para la construcción de estructuras laminares reticulares de madera.

Introducción

Las láminas reticulares de madera son estructuras muy eficientes que adquieren su capacidad portante principalmente por su forma. Atendiendo al tipo de elemento estructural utilizado en su diseño, pueden clasificarse en tres grandes grupos: 1) de miembros rectos, generalmente de madera laminada que, en el caso de grandes estructuras, requieren del uso de nodos de acero complejos, como en la cubierta del *Crossrail Place Canary Wharf* (Fig. 1a); 2) de elementos curvos de madera laminada (precurvados), habitualmente alabeados, como en *Swatch Headquarters* o en *Solemar Therme* (Fig. 1b); y 3) de piezas de pequeña sección curvadas en régimen elástico, generalmente de madera empalmada, como en el *Mannheim Multihalle* o el *Savill Building* (Fig. 1c).



Figura 1. Ejemplos de láminas reticulares de madera: (a) *Crossrail Place Canary Wharf*, Reino Unido; (b) *Solemar Therme*, Alemania; (c) *Savill Building*, Reino Unido.

Las estructuras de los dos primeros grupos han aprovechado plenamente el potencial de las tecnologías CNC para construir formas y uniones sofisticadas con extrema precisión, pero presentan altos costes asociados a la fabricación de numerosos componentes singulares. Las estructuras del tercer grupo destacan por su bajo coste material logrado por el uso de listones rectos y uniones simples. Sin embargo, la resistencia moderada de los productos utilizados suele obligar a un proceso de curvado en obra muy lento y en húmedo para facilitar la disipación de las tensiones de curvado, lo que supone una importante repercusión en el coste de puesta en obra (1).

Este trabajo presenta los principios de un nuevo concepto constructivo para estructuras laminares reticulares, que combina las ventajas del curvado en régimen elástico, de la fabricación CNC y del uso de uniones carpinteras, utilizando un novedoso LVL de *Eucalyptus globulus* de alta resistencia que permite un proceso de curvado rápido y en seco. El trabajo se centra en tres aspectos clave del concepto constructivo: material, sistema de conexión nodal y estrategia de mallado.

Nuevo LVL de eucalipto de altas prestaciones

La elección del producto de madera es un aspecto clave en el diseño de láminas reticulares deformadas elásticamente. Tradicionalmente se ha usado madera empalmada de resistencia moderada, como en el *Weald and Downland Living Museum* o en el *Savill Building*, realizadas en roble (D30) y alerce (C30), respectivametne. En la práctica, incluso utilizando láminas muy delgadas, las tensiones iniciales de curvado pueden superar la resistencia del material. Obviamente, la solución más simple consiste en reducir la curvatura de los listones, pero este enfoque contradice el principio de resistencia por la forma propio de las estructuras laminares. Una alternativa posible es realizar el curvado lentamente y en húmedo, pero implica altos costes de puesta en obra.

Una solución que elimina los inconvenientes mencionados reside en utilizar productos de muy altas prestaciones que permitan grandes curvaturas y un proceso de curvado rápido y en seco. En esta línea se está desarrollando un nuevo LVL de *Eucalyptus globulus* L. (Fig. 2). Para evaluar la capacidad de curvado del producto se fabricaron tableros LVL de 41 mm de espesor en dos configuraciones (S y Q), de los que se ensayaron probetas en flexión. El valor característico de la resistencia a flexión de tabla ($f_{m,flat,k}$) del LVL-S resultó en 98.9 N/mm² y el valor medio del módulo de elasticidad local ($E_{m,0,l,mean}$) en 25022 N/mm². Los detalles de la campaña experimental pueden consultarse en (2). La Fig. 3 muestra los radios mínimos de diseño instantáneos ($R_{min,d}$) calculados según el procedimiento detallado en (1) para algunas clases resistentes europeas así como para diferentes productos de madera, para el caso de carga de esfuerzos internos de flexión únicamente y clase de servicio 1. Como puede observarse, el LVL de eucalipto permite radios de curvatura significativamente menores en comparación con otras especies y productos, lo que resalta su gran potencial para este tipo de estructuras.

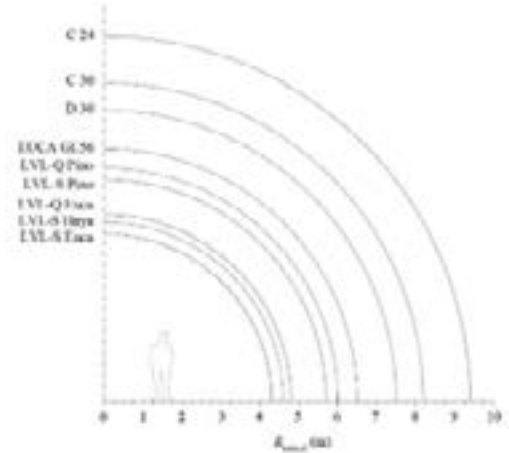


Figura 2. LVL de *Eucalyptus globulus* L. Figura 3. Radio mínimo de diseño instantáneo para láminas de 41 mm de espesor.

Hacia un nuevo sistema de conexión nodal ortogonal multicapa

En estructuras laminares reticulares deformadas elásticamente, cuando la sección de las piezas de madara no es suficiente para resistir la flexión perpendicular al plano de la estructura, aumentar el canto de la lámina no suele ser una solución viable ya que incrementa las tensiones iniciales de curvado. La solución habitual consiste en utilizar varias láminas y conectarlas mecánicamente tras el proceso de curvado, generando un perfil compuesto de mayor resistencia y rigidez que el de las láminas individuales. Las conexiones deben soportar el esfuerzo rasante entre capas y ser suficientemente rígidas para asegurar la eficiencia del perfil compuesto. Para este fin, tradicionalmente se han empleado conexiones mecánicas, como pernos en la conexión nodal en el *Mannheim Multihalle*, o tacos de bloqueo de rasante atornillados a las láminas en el *Savill Building* (Fig. 4a).

En las estructuras laminares precurvadas, en las que no hay flexión elástica, las barras pueden tener gran sección. En estas estructuras es habitual que las uniones nodales, resultantes de las intersecciones entre láminas, se resuelvan mediante uniones carpinteras a media madera realizadas por CNC, como en *Solemar Therme*, *Nine Bridges* o *Swatch Headquarters* (Fig. 4b). Estas uniones ofrecen gran precisión y rigidez, pero reducen significativamente la sección útil del elemento, lo que obliga a un sobredimensionado del mismo.

El concepto de conexión propuesto unifica la conexión nodal y el sistema multicapa (Fig. 4c), incorporando a las ventajas de la flexión elástica las ventajas de las uniones CNC a media madera utilizadas en las láminas precurvadas, pero evitando la reducción de la sección transversal. Para ello, se aumenta localmente la sección de la lámina en la conexión nodal generando un elemento que restringe el giro a la vez que proporciona la separación necesaria para el sistema multicapa. El sistema puede ser fácilmente mecanizado en tableros de LVL utilizando máquinas CNC de 3 ejes.



Figura 4. Sistemas de conexión en láminas reticulares de madera: (a) Savill Building; (b) Swatch Headquarters; (c) concepto propuesto.

Nuevo enfoque de mallado ortogonal mediante líneas de curvatura principal (LCP)

En estructuras laminares reticulares deformadas elásticamente, la definición precisa de la geometría de la malla estructural desde las primeras etapas del diseño resulta esencial para controlar las tensiones iniciales curvado. Según la red de curvas utilizada, las láminas de madera pueden tener flexión en los dos ejes de inercia, como en el caso de las mallas cuadrangulares desplegables (Fig. 5a) utilizadas por F. Otto, o en un solo eje de inercia como ocurre en las redes de geodésicas (Fig. 5b) empleadas por J. Natterer.

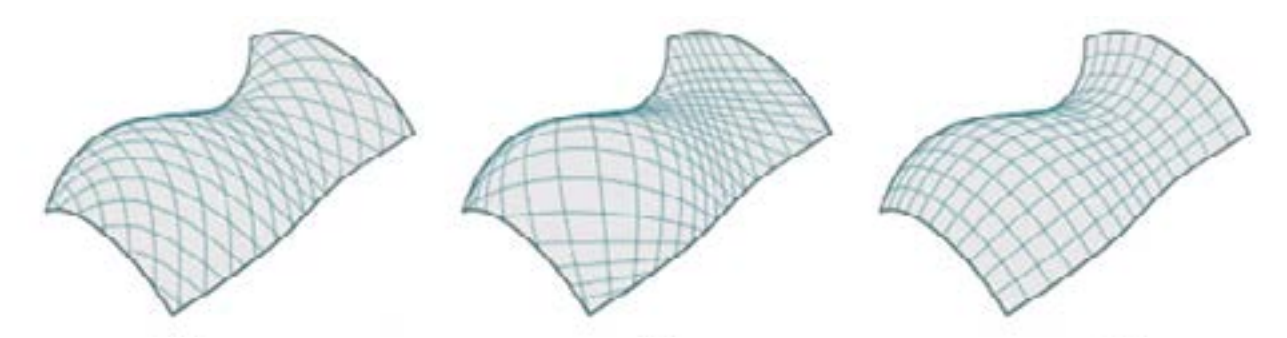


Figura 5. Posibles mallados de superficies: (a) cuadrangular; (b) geodésico; (c) LCP.

La estrategia de mallado que se propone en el presente trabajo explora el uso de redes de LCP (Fig. 5c). Se caracterizan por ser una red de curvas ortogonales, que resulta coherente con el sistema de conexión propuesto. Este tipo de mallado, aunque se ha usado previamente en estructuras precurvadas como *Solemar Therme* (Fig. 1b), aún no ha sido aplicado en láminas reticulares deformadas elásticamente. El desarrollo de una herramienta digital paramétrica ha permitido realizar el diseño de múltiples prototipos a diferentes escalas (3). En La Fig. 6a se presenta el modelo reducido de una estructura de superficie sinclástica y en la Fig. 6b un prototipo de gran tamaño de superficie anticlástica, en el que el diseño de la unión se resuelve completamente con elementos de madera y posibilita el montaje y desmontaje de la estructura.



Figura 6. Prototipos realizados con mallado de LCP: (a) modelo reducido con superficie sinclástica; (b) modelo de 7.5 m con superficie anticlástica.

Conclusiones

Este trabajo presenta un concepto constructivo innovador para láminas reticulares de madera deformadas elásticamente, que combina fabricación digital, uniones carpinteras y el uso de un novedoso LVL de *Eucalyptus globulus* de altas prestaciones. Los resultados obtenidos hasta el momento demuestran la viabilidad y versatilidad del sistema propuesto y ponen de manifiesto el gran potencial del LVL de eucalipto para este tipo de estructuras.

Agradecimientos

Estetrabajo es parte del proyecto de I+D+i PID2020-112954RA-I00 financiado por el MICIU/AEI/10.13039/501100011033.

Referencias

(1) Lara-Bocanegra A.J., Majano-Majano A., Arriaga F., Guaita M. (2020) Eucalyptus globulus finger jointed solid timber and glued laminated timber with superior mechanical properties: Characterisation and application in strained gridshells. *Construction and Building Materials* 265, 120355.

(2) Lara-Bocanegra A.J., Majano-Majano A. (2025) Mechanical properties of high-performance LVL made from Eucalyptus globulus L. *World Conference on Timber Engineering* (WCTE 2025), Brisbane, Australia.

(3) Martínez-Criado C., Lara-Bocanegra A.J., Roig A., González-Quintial F., Martín-Pastor A., Majano-Majano A. (2024) Parametric design and digital fabrication of disassemblable elastic timber gridshells with principal curvature lines network and carpentry joints. *IASS 2024 Symposium*, Zurich, Suiza.

41. La breve historia del puente de madera sobre el río Duratón, en Peñafiel

Alfonso Lozano^a, Julio Vivas^b, David Lorenzo^c, Felipe Álvarez^d, Mar Alonso^e, Marcos Braña^f
^a Universidad de Oviedo, EPI de Gijón. Edificio Oeste nº7. Campus de Gijón, 33203 Gijón (Asturias). ^b Media Madera Ingenieros Consultores, Polígono Industrial de Tabaza II, Parcela 16 (Asturias). ^c ALTIM, calle De la Flora, 3-2º derecha, 28013 Madrid. ^d Universidad de Oviedo, EPI de Gijón. Edificio Oeste nº7. Campus de Gijón, 33203 Gijón (Asturias). ^e Universidad de Oviedo, EPI de Gijón. Edificio Oeste nº7. Campus de Gijón, 33203 Gijón (Asturias). ^f Universidad de Oviedo, EPI de Gijón. Edificio Oeste nº7. Campus de Gijón, 33203 Gijón (Asturias).
alozano@uniovi.es

Palabras clave: puente, deformaciones, vibraciones, degradaciones, desmontaje.

Resumen

En el año 2012 finalizó el montaje de un puente peatonal de madera laminada sobre el río Duratón (Valladolid, España), que conectaba el centro urbano de Peñafiel con la colina donde se ubica su famoso castillo. Pero, desgraciadamente, poco después de su inauguración, se detectaron algunas deformaciones en sus arcos, además de otros defectos de menor entidad. Con el paso de los años, los fallos de estabilidad aumentaron, al igual que la degradación de los arcos y vigas. Además, bajo ciertas cargas, las vibraciones comenzaron a ser preocupantes. Dada esta situación de inseguridad, en 2018 el Ayuntamiento de Peñafiel ordenó el apeo de la estructura; y poco después se procedió a su desmontaje.

La ponencia describe el puente original, así como el progresivo deterioro que sufrió a lo largo de los cinco años siguientes a su montaje, se analiza el tipo de fallo y las posibles causas que obligaron a la sustitución de esta estructura.

Introducción

En 2010, se presentaron públicamente las obras previstas para ejecutar en una zona de la Ribera del río Duero, próxima a Peñafiel (Valladolid). El proyecto tenía como objetivos principales, la recuperación de un antiguo camino de 40 km de longitud, que unía varios pueblos de la zona, con el propósito de facilitar la conexión entre estas villas y, al mismo tiempo, promover el desarrollo sostenible y el turismo en esta región, famosa por la calidad de sus viñedos. Además, incluía la mejora ambiental de las riberas de los ríos de la zona, con la plantación de especies autóctonas y en especial, la construcción de cuatro puentes de madera laminada: uno se ubicaría en el centro de Peñafiel, principal pueblo de esta región vinícola; otro, muy cerca de esta localidad; y los dos últimos en Pesquera y Quintanilla, a pocos kilómetros del propio Peñafiel.

En 2012 finalizó la construcción de la primera de estas cuatro estructuras, la más visible de todas. Este puente peatonal de madera conectaba el casco urbano de Peñafiel con la colina del castillo (Fig. 1 y 2).



Figura 1. Puente de Peñafiel y su castillo.



Figura 2. Otra vista del mismo puente.

Los otros tres puentes, que, a diferencia del primero, fueron diseñados y calculados por el ingeniero Julio Vivas y fabricados íntegramente en Asturias por la empresa Media Madera Ingenieros Consultores S.L., se ensamblaron in situ unos meses después. Su diseño y tipología estructural eran muy diferentes al primero: con aproximadamente 100 m de largo y 3 m de ancho, la geometría de todos ellos se había basado en los “cuélebres”, famosos dragones de la mitología asturiana. Las figuras 3 y 4 muestran dos de estas infraestructuras.



Figura 3. Puente de Pesquera.



Figura 4. Puente de Quintanilla.

Descripción del puente de Peñafiel

La infraestructura se diseñó en dos tramos, ambos de 2,00 m de ancho: uno resuelto mediante un arco biarticulado de 50 m de luz y tablero suspendido (Fig. 5), y otro tramo recto, dispuesto a continuación del anterior, apoyado sobre pilas de hormigón (ver Fig 1 y 2 anteriores). En ambos casos, y en teoría, las laminas, de 35 mm de espesor, estarían fabricadas con pino silvestre (*Pinus sylvestris*, M.), clase resistente GL28c. Respecto al primer vano, se trataba de un diseño bastante tradicional, con vigas transversales colgadas de los arcos, soportando las vigas principales; sobre ellas se disponían las viguetas y las tablas del pavimento (Fig. 5, 6, 7 y 8).

El arriostramiento de los arcos se lograba mediante cerchas horizontales; en el caso del tablero se utilizaron codales y diagonales, dispuestas entre las vigas principales. Estos elementos se encargarían de absorber las cargas de viento e impedir el pandeo lateral.



Figura 5. Vigas transversales.



Figura 6. Unión rígida de los arcos.



Figura 7. Péndolas y arriostramientos



Figura 8. Vista inferior del tablero.

Cronología del proceso de colapso

Poco después de su inauguración, se detectaron los primeros procesos patológicos en la parte del puente correspondiente a los arcos. En concreto, en abril de 2013, se observaron deformaciones e inclinaciones evidentes en la clave, así como otros defectos menores, como delaminaciones y fendas en los elementos principales de la estructura.

Por el contrario, el tramo recto del puente, de la misma longitud, no presentó distorsiones ni pérdidas de planitud de ningún tipo.

Durante los meses siguientes, las deformaciones de los arcos (Fig. 9) y el número de piezas afectadas por las delaminaciones aumentaron significativamente, al igual que la anchura y la profundidad de las fendas (Fig. 10).



Figura 9. Deformación de los arcos.



Figura 10. Fendas y delaminaciones.

En agosto de 2013 se instalaron nuevos tirantes de acero entre la clave de cada arco y las vigas transversales del lado opuesto, además de reforzar el sistema de arriostramiento inicial de los arcos (Fig. 11).

Desgraciadamente, los fallos por pandeo no cesaron y dos años después, en mayo de 2017, se detectaron también deformaciones muy evidentes en las vigas principales, como consecuencia del desplome de los propios arcos (Fig. 12).



Figura 11. Aumento del pandeo lateral.



Figura 12. Deformaciones de las vigas del tablero.

Ante esta situación de inseguridad, a principios de 2018 el Ayuntamiento de Peñafiel ordenó el apuntalamiento del tablero; y pocos meses después se procedió al desmontaje de esta parte del puente.

Análisis estructural del proceso de fallo

Independientemente de la apertura de fendas y delaminaciones, la cuestión realmente importante era determinar el origen de las deformaciones y vuelco de los arcos.

Por otra parte, sin analizar si las secciones de madera hacían sido correctamente dimensionadas, o si la madera laminada alcanzaba realmente una clase resistente GL28c, no hay duda de que el tipo de fallo de los arcos corresponde a uno de los modos de pandeo. Además, existían diferencias entre el diseño inicial que apareció originalmente en el proyecto (Fig. 13), comparado con el que finalmente se construyó.

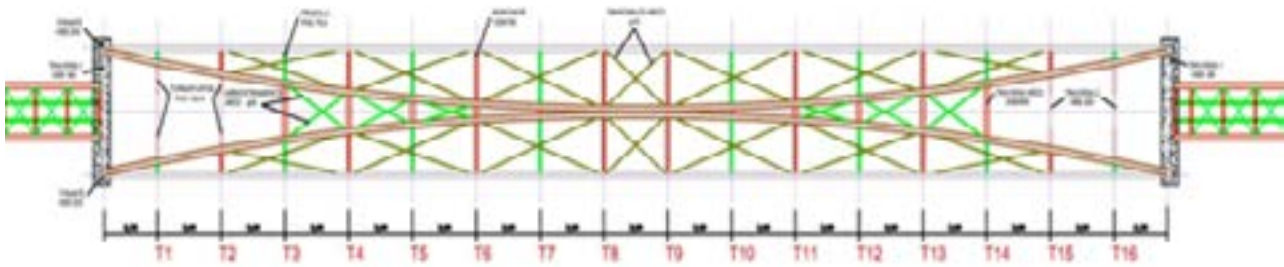


Figura 13: Diseño inicial del primer tramo del puente de Peñafiel.

Entre otras variaciones, las más importantes que aparentemente se observan, son las siguientes:

- 1. Sistema de arriostramiento de los arcos.
- 2. Diagonales del tablero.
- 3. Diámetro menor de los soportes de madera.

De acuerdo con los datos recabados en las visitas realizadas a lo largo de los más de cinco años transcurridos desde la construcción del puente, no cabe duda que el sistema de arriostramiento de los arcos no resultó eficaz, incluso después del refuerzo aplicado en la clave durante agosto de 2013.

Por otra parte, analizando la documentación asociada a este puente, parecía deducirse que la principal razón es que

algunas uniones, que se habían considerado como rígidas, en realidad no lo eran. Este es posiblemente el principal error cometido en este proyecto y la causa de su fallo estructural.

Por fortuna, en esta ocasión, las autoridades decidieron sustituir este tramo por otro puente, también construido en madera laminada, con características similares al antiguo, pero con un diseño y cálculo adecuados, capaz de soportar las cargas previstas en el proyecto. La nueva estructura, se montó en el año 2020. Su decisión se basó en el buen estado de los otros tres puentes construidos simultáneamente al afectado, y en la buena aceptación de las infraestructuras por parte de la población local y los turistas que frecuentan la zona.

Referencias

(1) Ritter, M.A. Timber Bridges: Design, Construction, Inspection, and Maintenance. 1990. Washington, DC: 944 p.

42. Evaluación del potencial de la madera de pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) termotratada para aplicaciones tecnológicas

Silvia Gómez Fernández^a, Mario Azaña Galán^a, Gonzalo Caballé^a, José Luis Villanueva Hernández^a
^a Fundación Centro de Servicios y Promoción Forestal y de su Industria de Castilla y León (cesefor). Pol. Ind. Las Casas, Calle C, 42005, Soria.
silvia.gomez@cesefor.com

Palabras clave: termotratamiento, *Pinus sylvestris*, EWP, propiedades mecánicas.

Resumen

El termotratamiento supone una alternativa interesante a los tratamientos químicos para el aumento de la durabilidad de la madera, pero es sabido que supone una reducción de sus propiedades mecánicas. Este trabajo tiene como objetivo evaluar si la madera de pino silvestre con clases resistentes elevadas (C30) puede mantener propiedades suficientes tras el termotratamiento convectivo a 190 °C y 212 °C para su posible incorporación en productos tecnológicos de madera (EWP), comparándola además con madera C18 tratada en idénticas condiciones. La metodología empleada se basa en la comparación de muestras procedentes de los mismos tablones de origen, a través de una amplia serie de ensayos físico-mecánicos (medición de frecuencia de vibración longitudinal, ensayo a flexión en tramo elástico, ensayo destructivo a flexión, rigidez, higroscopicidad, estabilidad dimensional y geométrica tras acondicionado en cámara climática) empleando equipos homologados de medición y siguiendo la normativa aplicable. Paralelamente, se estudia la absorción superficial y el ángulo de contacto como posibles indicadores de su capacidad de encolado. Los ensayos mecánicos mostraron una elevada relación lineal entre el módulo de elasticidad dinámico y el módulo de elasticidad a flexión en las probetas C18 sometidas a 190 °C (R²=0,77). El valor R² apunta a que el módulo de elasticidad dinámico tras el termotratamiento a 212 °C podría ser adecuado para estimar el valor de la resistencia a flexión de la madera termotratada en la clase resistentes C18. La densidad disminuye de media un 1,2% al termotratar a 190 °C y un 4,2% al termotratar a 212 °C. Respecto a la estabilidad dimensional, la madera termotratada mostró mejoras notables, especialmente la eficacia anti retracción en la dirección tangencial, con menor deformación de los grupos termotratados a 190 °C y a 212 °C frente al grupo control.

INTRODUCCIÓN

La madera es un material natural, renovable y sostenible con alto potencial en la construcción. Tradicionalmente se ha recurrido a tratamientos químicos para mejorar su durabilidad, aunque las preocupaciones ambientales han impulsado alternativas más ecológicas como el termotratamiento. Este proceso consiste en someter la madera a temperaturas entre 160 °C y 240 °C en atmósferas controladas como vapor sobrecalentado, nitrógeno, baño de aceite o gases de escape [1], lo que induce una modificación profunda en su química básica y estructura interna. La descomposición de la hemicelulosa y los cambios en la cristalinidad de la celulosa, así como en la lignina, resultan en una reducción significativa de la higroscopicidad y, consecuentemente, en una mejora sustancial de la estabilidad dimensional y una mayor resistencia a la biodegradación por hongos y xilófagos [2]. Estas mejoras hacen que la madera termotratada (TMT) sea apta para usos exteriores, compitiendo estéticamente con especies tropicales de mayor coste. Sin embargo, el termotratamiento también implica una merma en propiedades mecánicas, como la resistencia a flexión (f_m) y a tracción perpendicular ($f_{t,90}$) [7], lo que limita su aplicación estructural. En este contexto, el presente trabajo evalúa si la madera de pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) con alta clasificación resistente (C30) puede conservar características mecánicas suficientes tras tratamientos convectivos a 190 °C y 212 °C, en comparación con madera C18 tratada en las mismas condiciones.

METODOLOGÍA

Material y diseño experimental

Se utilizaron tablones de pino silvestre español con contenido de humedad inferior al 12 %, clasificados estructuralmente mediante el equipo manual MTG 960 de Brookhuis. De cada tablón se extrajeron muestras para los tres grupos evaluados: control (sin tratamiento), termotratadas a 190 °C y termotratadas a 212 °C. Los ensayos se realizaron con condiciones homogéneas de acondicionamiento y conforme a las normas aplicables.

Ensayos físico-mecánicos

Se evaluaron las propiedades mecánicas siguiendo la norma UNE-EN 408+A1 [3], sobre 126 probetas (63 con clase resistente C18 y 63 con clase resistente C30). A partir de estos ensayos destructivos, se determinó el módulo de elasticidad (E_o), resistencia a flexión (f_m), densidad (ρ_{12}) y contenido de humedad (H%). El módulo de elasticidad dinámico (E_{dyn}) fue calculado mediante mediciones de frecuencia de vibración longitudinal con el equipo manual MTG 960 de Brookhuis calculado mediante la fórmula (1). El ensayo para la obtención del E_{dyn} se realizó antes y después del TMT a 190 °C y 212 °C por lo que diferenciaremos entre $E_{dyn,AT}$ (Antes del TMT) y $E_{dyn,TT}$ (Tras el TMT).

$E_{dyn}=(2f_0 L)^2 \rho_{12} \times 10^{-6} \quad (1)$

Ecuación 1 donde: f₀ frecuencia del primer modo de vibración (Hz). L longitud de la pieza (m). ρ₁₂ es la densidad ajustada al 12% de humedad (kg/m³).

Estabilidad dimensional y geométrica

Se aplicaron las normas UNE-EN 1910 [4], UNE-EN 13647 [5] y UNE-CEN/TS 15679:2009 EX [6]. La estabilidad dimensional se ensayó sobre 30 muestras (10 por grupo). La estabilidad geométrica se evaluó mediante la medición del abarquillado, la flecha de canto, la flecha de cara y el alabeo en 18 muestras (6 por grupo).

Higroscopicidad

Se ensayaron 60 probetas (20 por grupo) para determinar la humedad de equilibrio higroscópico (HEH) (UNE-CEN/TS 15679 EX) [6] tanto a t=20°C y HR=65% como a t=20 °C y HR=85%, dado que la principal aplicación prevista para la madera modificada térmicamente es en condiciones de exterior y ambiente húmedo.

Capacidad de encolado

La capacidad de encolado se estimó mediante ensayos de absorción superficial (UNE-EN 382-1) [7] y ángulo de contacto (UNE-EN ISO 19403-2) [8] con dos adhesivos de tipo MUF y EPI y dos condiciones climáticas diferentes.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efectos sobre la densidad y propiedades mecánicas

El tratamiento a 190 °C redujo la densidad de media un 1,2%, mientras que a 212 °C la reducción fue del 4,2%.

Los resultados obtenidos para la correlación (R2) entre el E_dyn, f_m y E_0 para sus distintas combinaciones fue la siguiente:

Tabla 1. Propiedades mecánicas obtenidas

	n	Sin TMT			TMT 190			TMT 212		
		f _{m,k}	E ₀	ρ _{12,k}	f _{m,k}	E ₀	ρ _{12,k}	f _{m,k}	E ₀	ρ _{12,k}
C18	21	23	12,7	442	7,9	9,4	452	7,6	9,4	387
C30	21	30	12	476	6,8	8,9	426	7,6	11,6	344
Ambas	41	26	14,5	459	10	9,1	432	11	10,5	371

Tabla 2. E_dyn comparado con f_m

	Sin TMT	TMT 190		TMT 212	
		E _{dyn,AT}	E _{dyn,TT}	E _{dyn,AT}	E _{dyn,TT}
C18	0,58	0,12	0,21	0,08	0,32
C30	0,42	0,04	0,02	0,10	0,13
Ambas	0,47	0,04	0,13	0,09	0,23

Tabla 3. E_dyn comparado con E_0

	Sin TMT	TMT 190		TMT 212	
		E _{dyn,AT}	E _{dyn,TT}	E _{dyn,AT}	E _{dyn,TT}
C18	0,03	0,51	0,77	0,25	0,40
C30	0,21	0,07	0,04	0,001	0,003
Ambas	0,14	0,14	0,15	0,07	0,18

Estabilidad dimensional y geométrica

Los valores de ASE (Anti-Shrinkage Efficiency), que relacionan la variación dimensional acumulada de la madera natural frente a la de la madera modificada térmicamente, se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Valores de Anti-Shrinkage Efficiency

	Dirección radial	Dirección tangencial	Dirección longitudinal
Control vs. 190°C	3,63	3,80	1,65
Control vs. 212°C	4,25	8,81	2,09

Se observan mejoras notables tras el termotratamiento, especialmente en dirección tangencial. Este incremento confirma el efecto positivo del termotratamiento en la reducción de la retracción dimensional.

En términos de estabilidad geométrica, se encontraron diferencias significativas ($p<0,05$) entre las muestras control y las termotratadas en el abarquillado ($p<0,0001$) y la flecha de cara ($p<0,0001$). No se encontraron diferencias significativas en la flecha de canto ($p=0,0758$) ni en el alabeo ($p<0,0594$), ni entre los dos grupos termotratados. No obstante, analizando los valores medios obtenidos -que disminuyeron sensiblemente con respecto al grupo control-, y teniendo en cuenta el pequeño tamaño de la muestra, estos valores pueden indicar diferencias significativas en una muestra de mayor tamaño.

Higroscopicidad

La Tabla 5 recoge los valores de humedad de equilibrio higroscópico (HEH) promedio, el error estándar y si existen diferencias significativas (letra diferente) entre los valores de los tres grupos.

Tabla 5. Valores de HEH, determinados a $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $HR=65\%$

	T=20 °C y HR=65%			T=20 °C y HR=85%		
	Promedio	Error Estándar	Diferencias Significativas	Promedio	Error Estándar	Diferencias Significativas
Control	12,65	0,29	A	13,63	0,34	A
190 °C	5,11	0,29	B	5,38	0,34	B
212 °C	3,54	0,29	C	4,2	0,34	C

Capacidad de encolado

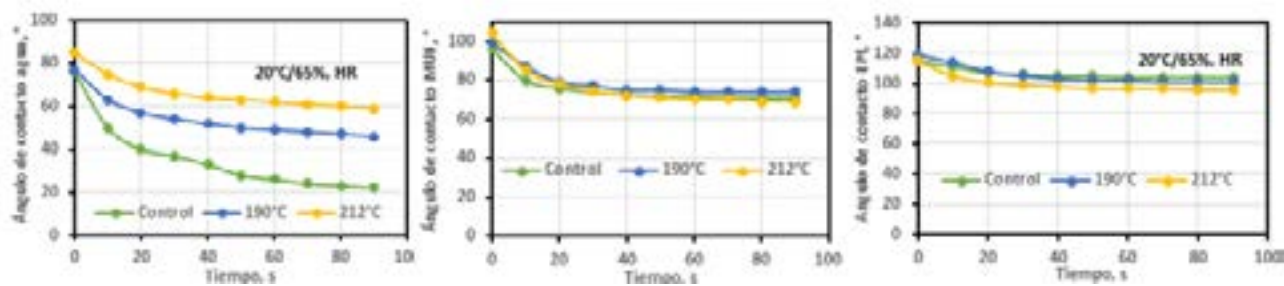


Figura 1. Variación del ángulo de contacto con la temperatura, con diferentes sondas y para diferentes líquidos de prueba. Izq.: agua destilada. Centro: MUF. Der.: EPI

Los datos de absorción superficial de tolueno y de ángulo de contacto sugieren que a mayor temperatura de termotratamiento, mayor fue el cambio observado en las propiedades físico/químicas del pino silvestre termotratado. La MUF, según los datos, mostró un menor ángulo de contacto que la EPI, lo que sugiere que interacciona mejor con la superficie de la madera de pino silvestre termotratada, siendo mejor cuando se acondiciona ésta a 65% de humedad relativa [Fig. 1].

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos permiten afirmar que el termotratamiento convectivo a 190 °C y 212 °C mejora sustancialmente la estabilidad dimensional y geométrica de la madera de pino silvestre, lo que refuerza la aplicabilidad de la madera tratada en componentes donde la precisión dimensional es crítica. Respecto a las propiedades mecánicas, se observa que de forma general, las piezas C18 presentar una menor pérdida de sus propiedades, siendo tras el termotratamiento similares a las C30. Y se observa mejor correlación del E_dyn para la submuestra C18 para ambos tratamientos térmicos frente a la C30, obteniendo esta última valores muy bajos y haciendo difícil la estimación de sus propiedades.

El MOE dinámico se posiciona como un buen estimador no destructivo del comportamiento mecánico post-termotratamiento, especialmente en tratamientos térmicos moderados. Futuras investigaciones profundizarán en la interacción madera-adhesivo y en la viabilidad del empleo de la madera modificada térmicamente en EWP a través de ensayos mecánicos y de delaminación sobre probetas de madera laminada.

Referencias

(1) Kozakiewicz, P.; Jankowska, A. Influence of thermal modification on selected properties of Scott pine wood (*Pinus sylvestris* L.). *Technická univerzita vo Zvolene*. Trieskové a Beztrieskové Obraábanie Dreva 2014, 9, 241.

(2) Majano, M.A. Madera termotratada de frondosas para uso estructural. *Universidad Politécnica de Madrid*. Escuela Técnica Superior de Arquitectura 2014, 400 págs.

(3) Norma Española UNE-EN 408:2011+A1:2012. Madera estructural aserrada y encolada. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. 2012.

(4) Norma Española UNE-EN 1910:2016. Suelos de madera y revestimientos de madera para paredes y techos. Determinación de la estabilidad dimensional. 2016.

(5) Norma Española UNE-EN 13647:2021. Suelos y revestimientos de muros interiores y exteriores de madera. Determinación de las características de geometría. 2021.

(6) Norma Española UNE-CEN/TS 15679:2009 EX [6]. Madera modificada térmicamente. Definiciones y características. 2018

(7) Norma Española UNE-EN 382-1:1994. Uniones encoladas estructurales de madera. Determinación de la absorción superficial. 1994.

(8) Norma Española UNE-EN ISO 19403-2:2020. Determinación del ángulo de contacto estático (método de la gota). 2020.

(7) Widmann, R; Fernández-Cabo, J.L.; Steiger, R. Mechanical properties of thermally modified beech timber for structural purposes. *European Journal of Wood and Wood Products* 2012, 70, 775.

43. Evaluación de sistemas de bloqueo de taninos en productos de madera para su uso en exterior

Isabel Fernández^a, Oliva Fernández^a, Soledad Rodríguez^a, Amelia González^a
^a Fundación CETEMAS, Pumarabule s/n, Carbayín, Asturias.
srodriguez@cetemas.es

Palabras clave: Madera de castaño, compuestos fenólicos, agente bloqueante, agente secuestrador.

Resumen

La madera de castaño es rica en taninos, compuestos de naturaleza fenólica presentes de forma natural en muchas especies [1], que le confieren una gran resistencia a la podredumbre en el exterior y a los xilófagos en el interior, proporcionándoles una elevada durabilidad natural, aunque al mismo tiempo puede ocasionar manchas en la superficie de la madera. Su aparición comienza después de una humidificación de la madera, generando la disolución de los taninos en el agua y su aflore a la superficie, donde se produce la oxidación de los llamados ácidos tánicos por la exposición de estos al aire, el ennegrecimiento y la formación de manchas. Por todo ello, los taninos son menos abundantes cuanto más seca está la madera y tienden a no aparecer en superficie cuanto menos expuesta a humedad e intemperie se encuentre esta.

El presente trabajo muestra los resultados de un screening de productos comerciales destinados a combatir los efectos de la exudación de taninos en maderas ricas en estos compuestos, que actúan bajo diversos mecanismos: productos bloqueadores, que impiden que los compuestos tánicos se solubilizen y exuden al exterior, o productos secuestradores de los compuestos tánicos mediante formación de complejos. A través de ensayos normalizados de envejecimiento natural y acelerado, en condiciones de humedad diversas, se ha establecido un ranking de comportamiento donde los productos en base acuosa han obtenido mejor posicionamiento, siendo necesario continuar el estudio en función de, no sólo del mecanismo de actuación, sino de las condiciones de aplicación sobre el sustrato y las condiciones finales de servicio.

1.Introducción

La principal causa de exudación de los taninos haciéndose visibles en piezas de madera de uso en exterior es la humedad y ésta puede producirse debido a que la madera se ha tratado cuando contenía un nivel de humedad superior al 15%, la madera no se ha lijado y sellado de forma adecuada o no se han protegido las zonas que están en contacto permanente con la humedad. Para evitarlo se emplean «bloqueadores» constituidos por diversas sales a base de fosfosilicatos y otros metales, que reaccionan con las soluciones ligeramente ácidas de los fenoles-ácidos, dando compuestos blanquecinos incoloros, que no alteran ni en la tonalidad de la madera ni del acabado, quedando las manchas inhibidas y bloqueadas en la madera [1].

El mecanismo primario de los bloqueadores es el de la ‘quelación’ o precipitación. Los pigmentos de los inhibidores tienen como función típica absorber los ácidos formando una barrera contra ellos: primeramente, reducen la permeabilidad de los sistemas de recubrimiento y luego ralentizan los niveles de difusión. Esta función de barrera se ha ampliado además a posibles interacciones químicas con las especies de tanino disuelto. Esta interacción forma compuestos blancos o ligeramente coloreados que apenas alteran el acabado sin degradar su aspecto decorativo [2-3-4]. Los bloqueadores están indicados para recubrimientos de fondo o acabado; tienen base agua o disolvente orgánico; las dosis de incorporación al recubrimiento son entre 2-6% del volumen total del recubrimiento; su campo de aplicación eventualmente puede ampliarse a la de inhibición del desarrollo de hongos xilófagos o cromógenos. Debido al factor pH, es conveniente mantener en las películas secas un valor de pH inferior a 8.0. Algunos pigmentos como el talco y carbonato cálcico son adecuados para esta aplicación [5-6].

Sin embargo, es necesario destacar que la aparición de manchas de taninos sobre la superficie de la madera no supone un problema físico-mecánico, ni una merma de las propiedades de madera en servicio, se trata pues de un efecto visual o estético del color de la madera que tiende a homogeneizar con el tiempo alcanzando tonalidades grises.

2.Estudio

2.1. Objetivo

El estudio planteó la evaluación de diferentes sistemas de bloqueo de taninos, consistentes en la aplicación de acabados superficiales en productos de madera previo a su puesta en servicio en exterior, mediante ensayos de envejecimiento natural y acelerado en cámaras de exposición que permiten simular diferentes condiciones climáticas. Este estudio ha abarcado las siguientes etapas:

- A) Análisis de mercado de productos para el tratamiento de los problemas derivados del contenido tánico en la madera de castaño y a análisis de fichas técnicas y fichas de seguridad y selección de productos a ensayar.
- B) Selección de muestras para ensayos y evaluación de propiedades de influencia en la efectividad de productos y preparación de las mismas.
- C) Ensayo de envejecimiento natural en paneles expositores a la intemperie
- D) Ensayo de envejecimiento artificial en cámara de envejecimiento acelerado

2.2. Materiales y Métodos

2.2.1. Productos

Un conjunto de 18 productos comerciales (nombrados A-R) fue testado con sus peculiaridades de aplicación, tipología y sustrato: ocho en base agua (B, C, H, I, J, N, Q, R), un bicomponente (P) y nueve emulsiones (A, E, F, G, K, L, M, Ñ, O). Se testaron sobre madera de castaño húmeda y seca como sustrato, mediante los ensayos de envejecimiento natural y acelerado artificial (Tabla 1).

Tabla 1. Productos seleccionados

Producto	Especificaciones
A	Producto natural, concentrado en polvo. Insolubilización taninos
B	Fondo imprimante en base acuosa. Evita la aparición de manchas
C	Recubrimiento hidrófugo. Producto formulado en base agua
E	Específico para decks de alto tránsito. Estabiliza y refuerza la lignina
F	Tratamiento preventivo. Bloqueante tánico y de crecimiento de agentes externos
G	Acción sellante
H	Revestimiento opaco a base de agua
I	Impregnante al agua para exterior indicado para frondosas y ricas en taninos
J	Intermedio al agua para exteriores Anti-Tanino. Contiene IPBC.
K	Bloqueador tánico. Sellante de la superficie de la madera
L	Reduce los taninos y aceites derivados del tipo de madera
M	Imprimación preventiva para madera sin tratar que contenga taninos
N	Imprimación incolora al agua. Bloqueante tánico

Producto	Especificaciones
Ñ	Emulsión flexible para imprimación industrial anti-sangrado
O	Imprimación bloqueadora de manchas para madera
P	Imprimación blanca de dos componentes PUR para interior y exterior
Q	Recubrimiento intermedio diluible con agua
R	Lasur blanco al agua, altamente hidrófugo. Bloquea exudados y taninos

2.2.2. Preparación de muestras

A partir de las fichas técnicas de los productos comerciales seleccionados, se realizó la preparación de las muestras, teniendo en cuenta: humedad de la madera de partida, sistema de aplicación (brocha, rodillo, pistola, inmersión), tiempos de secado y operaciones intermedias, número de manos (gramajes) y combinaciones de productos. La mayor parte de los productos comerciales testados, se aplicaron sobre muestras con alto contenido en humedad (aprox 40%), así como muestras “secas”, para estudiar el comportamiento de los productos aplicados bajo ambas condiciones. Uno de los problemas que se presentan en obra está motivado precisamente por el uso y la aplicación de estos productos en madera húmeda.

2.2.3. Metodología

Los procesos llevados cabo en el estudio, así como la evaluación de los resultados en las muestras a ensayo se basan en las normativas siguientes: UNE-EN 927-3:2013(“Pinturas y barnices. Materiales de recubrimiento y sistemas de recubrimiento para madera exterior. Parte 3: Ensayo de envejecimiento natural”), UNE-EN 927-6:2019 (“Pinturas y barnices. Materiales y sistemas de recubrimiento para madera exterior. Parte 6”), UNE-EN ISO 4628-1:2016 (“Pinturas y barnices. Evaluación de la degradación de los recubrimientos. Designación de la intensidad, cantidad y tamaño de los tipos más comunes de defectos (Parte 1-6)”), UNE-EN ISO 2813:2015 (“Pinturas y barnices. Determinación del índice de brillo especular a 20°, 60° y 85°”), UNE-EN ISO 2409:2013 (“Pinturas y barnices. Ensayo de corte por enrejado”) y UNE-EN 13183-1/AC:2004 (“Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 1: Determinación por el método de secado en estufa”).

La determinación de parámetros como humedad, pH, Color (espacio CieLab, determinando ΔE, ΔL), brillo (ΔGU), aspecto visual (ampollamiento, agrietamiento, descamación, grado de enyesado, aspecto general) y adherencia han permitido evaluar el comportamiento de los productos comerciales seleccionados.

2.3. Proceso

Previamente a la aplicación de los recubrimientos de las probetas, se llevó a cabo la determinación de la humedad de las piezas de castaño, en condiciones “seca” y “húmeda” promedio, así como la determinación del pH superficial. Una vez preparadas las muestras con los productos comerciales seleccionados, se llevó a cabo una exposición de muestras en condiciones “seca” y “húmeda” según el ensayo de envejecimiento natural, de forma que se pueda realizar un seguimiento en condiciones reales de la evolución de los productos ensayados. En función de la evolución de las probetas en este ensayo, se descartaron a los 90 días aquellos productos cuya evolución no se considera óptima, y se realiza el ensayo de envejecimiento acelerado con aquellos productos comerciales cuya evolución ha sido satisfactoria o aceptable, así como una prolongación del ensayo de envejecimiento natural.

3.Resultados

Del estudio llevado a cabo pueden resumirse los siguientes resultados:

- Respecto al comportamiento en el ensayo de envejecimiento natural
- Tras 90 días de ensayo y una evaluación global, se descartaron productos al considerar que ya no cumplían con los criterios de aceptación: A, B, F, K, M, Ñ (en condición “seca” y “húmeda”), L y G (condición “seca”) y H (condición “húmeda”). Los productos en base acuosa, se mantienen mayoritariamente en el estudio.
- Los productos E, R J, Q y H muestran los mejores comportamientos (evaluados como ΔE*) en condición “seca” y los productos J, G y R en condición “húmeda”.
- Los mejores resultados (evaluados como ΔGU(brillo) los muestran los productos I, H, R, Q y N en condición “seca”, y los productos R, N, L e I en condición “húmeda”

Respecto al comportamiento en el ensayo de envejecimiento artificial

- Los resultados que mostraron menor variación (evaluado como ΔE*) y por lo tanto mejor comportamiento son el producto H, seguido de los productos R, I, N, Q, E y P y finalmente los productos O y C.
- Los productos R, N e I presentan las menores variaciones de brillo (ΔGU).
- Aspecto visual (ampollamiento, agrietamiento, descamación y aspecto visual general) y adherencia: no hay casos de ampollamiento para ninguno de los productos y sólo el producto R ha presentado descamación. Sólo el producto P no ha mostrado agrietamiento en ninguna de las probetas ensayadas y los valores de adherencia se mantiene en las categorías 0-3, predominando la categoría 1. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en los ensayos, así como el aspecto visual que presentan las probetas ensayadas, puede concluirse que:

- Los resultados que muestran ambos ensayos difieren entre sí, ya que la naturaleza de los ensayos no puede ser equiparable.
- Ensayo de envejecimiento natural: los productos que presentaron mejores resultados en condición “seca” han sido R y H para productos con color blanco final y el producto E para productos incoloros.
- Ensayo de envejecimiento natural: los productos que presentaron mejores resultados en condición “húmeda” han sido G para productos con color blanco final y el producto E para productos incoloros.
- Ensayo de envejecimiento artificial: los productos que presentaron mejores resultados en condición “seca” han sido P y O para productos con color blanco final y el producto Q para productos incoloros.

4.Conclusiones

Los resultados obtenidos en este screening preliminar de productos comerciales muestran, dentro de la gama estudiada, que aquellos en base acuosa presentan un mejor comportamiento al envejecimiento natural y artificial. Sin embargo, es necesario continuar el análisis del comportamiento de los productos en función, no sólo de su naturaleza, aplicación y condiciones del sustrato sobre el que se aplica, sino de las condiciones finales de servicio, ya que pueden tener un gran impacto sobre los mismos. En este estudio, todos los productos se someten a las mismas condiciones, lo que permite compararlos proporcionando un ranking de comportamiento. A pesar de que los fabricantes de acabados de mayor prestigio han lanzado al mercado productos que mejoran el comportamiento de la madera frente a la exudación de taninos, es necesario seguir estudiando posibles mecanismos de solución de un problema, que, si bien es meramente estético, penaliza el valor de mercado de la madera de castaño.

5.Referencias

(1) Podgorski, L.; Reynaud, C.; Montibus, M. Etude Blocage des tannins du chêne et du châtaignier pour une utilisation extérieure. Rapport final. FCBA. 2017.

(2) Hsiao, NC.; Chang, TC.; Lin, HY. Reaction mechanisms inhibiting the release of aqueous extracts from merbau heartwood by iron(II) and copper(II). Wood Sci Tech. 2017, 51, 653–668.

(3) Bellotti, B.; Deyá, C.; del Amo, B.; Romagnoli, R. Antifouling Paints with Zinc “Tannate”. Industrial & Engineering Chemistry Research. 2010, 49(7), 3386-3390

(4) García, D.E.; Glasser, W.G.; Pizzi, A.; Paczkowskief , S.P.; Laboriee M.P. Modification of condensed tannins: from polyphenol chemistry to materials engineering. New J. Chem. 2016, 40, 36-49

(5) Hsiao, NC.; Chang, TC.; Hsu, FL. Environmentally benign treatments for inhibiting the release of aqueous extracts from merbau heartwood. Wood Sci Technol. 2016, 50, 333–348

(6) Sesia, R.; Spriano, S.; Sangermano, M.; Ferraris, S. Natural Polyphenols and the Corrosion Protection of Steel: Recent Advances and Future Perspectives for Green and Promising Strategies. Metals. 2023, 13(6),1070-1097.

44. Proyecto Pegollu- Almacén d’Horros del Principado de Asturias: conservación del patrimonio cultural y sostenibilidad

Elena Pérez^a, Estefanía Sánchez^b, Fernando Mora^c, Soledad Rodríguez^a
^a Fundación CETEMAS, Pumarabule s/n, Carbayín, Asturias. ^b Consejería de Cultura, Política Llingüística y Deporte del Principado de Asturias, Calle Eduardo Herrera “Herrerita”, s/n, 1ª planta – Edificio, Oviedo, Asturias. ^c Asociación del Hórreo Asturiano, C/ Bernardo Alfageme, 4, Centro La Baragaña, Planta 3, Asoc 1, Candás, Asturias.
eperez@cetemas.es

Palabras clave: hórreos y paneras, conservación, rehabilitación, patrimonio arquitectónico.

Resumen

El *Plan del Horru*, impulsado por la Consejería de Cultura, Política Llingüística y Deporte del Principado de Asturias y cuyo primer documento fue presentado en 2023, plantea una serie de medidas que tienen como objetivo proporcionar la información y los análisis necesarios que permitan la adopción de decisiones estratégicas con relación a la conservación y protección de los hórreos, paneras y cabazos de Asturias. Estas construcciones tradicionales, de gran valor arquitectónico, paisajísitico, histórico y cultural, se encuentran en una situación de vulnerabilidad debido a la compleja situación demográfica de la provincia y a los cambios sociales y productivos que ha atravesado el medio rural en las últimas décadas. El Eje 3 del Plan, correspondiente a Conservación y Restauración, destaca el proyecto *Pegoyu: almacén d’horros*, orientado al mantenimiento y rehabilitación de los hórreos y paneras asturianos mediante la caracterización, almacenamiento y gestión de piezas reutilizables, procedentes de bienes desmontados para su posterior recuperación, o respecto a los que ya no proceda realizar actuaciones de conservación. El proyecto se desarrolla conjuntamente a la Asociación del Hórreo Asturiano para la gestión del desmontaje y transporte de las estructuras y de la Fundación CETEMAS en recepción, caracterización, inventariación y almacenaje en las instalaciones destinadas al proyecto. Para garantizar la calidad del proceso de recuperación, las piezas son restauradas por carpinteros profesionales acreditados, lo que garantiza la trazabilidad de los elementos, y la máxima calidad y respeto a las técnicas tradicionales de la región.

El presente trabajo tiene como objetivo describir las labores realizadas para la puesta en marcha y gestión del almacén, así como detallar su evolución desde su inicio en febrero de 2023 hasta la actualidad, incluyendo la presentación de los trabajos ya concluidos.

Introducción

El hórreo es una construcción tradicional de carácter agrícola que se distribuye por diversas regiones del norte de la Península Ibérica: Asturias, Galicia, el norte de Portugal, León, Cantabria, el País Vasco y Navarra. Todos tienen en común que están levantados sobre pilares de piedra, habitualmente caliza o asenisca, para ventilar su interior y evitar el daño causado por la humedad, así como para impedir el acceso a roedores y otros animales. En este sentido aplicamos el concepto de hórreo asturiano a todas las variantes analizadas y reconocidas en los diversos estudios y análisis, integrando tanto al *hórreo*, la *panera* como el *cabazo*.

Los horreos y paneras, de planta cuadrada y rectangular respectivamente, estan contruidos integramente de madera de castaño y roble empleando técnicas tradicionales de carpintería, en su fabricación se utilizan ensambladuras y sistemas machihembrados, evitando el uso de elementos metálicos. Esta característica les confiere la propiedad de ser estructuras desmontables, permitiendo su traslado de un lugar a otro. Además de su evidente utilidad como granero, almacén o despensa, el hórreo posee un importante valor patrimonial, etnográfico y paisajístico.

En este contexto, abordar la restauración y rehabilitación de estas construcciones requiere una atención especial al mantenimiento estructural y a la conservación de los saberes tradicionales de la carpintería, entendidos no solo como técnicas constructivas, sino como parte del legado cultural vivo del territorio.

El *Plan del Horru*, documento de objetivos planteado por la Consejería de Cultura, Política Llingüística y Turismo del Principado de Asturias en el año 2023, busca proporcionar la información y los análisis necesarios que permitan la adopción de decisiones estratégicas y la definición de líneas de actuación en relación con estos elementos de tan importante valor, planteando para ello los siguientes grandes objetivos: valorización del hórreo como recurso patrimonial cultural útil, contribuir desde el patrimonio vernáculo local a la transformación del medio rural, la mejora regulatoria de la protección y gestión administrativa; y el fortalecimiento del papel de la sociedad civil, a través de sus asociaciones y entidades culturales como el principal agente e instrumento de mantenimiento y transmisión del patrimonio cultural inmaterial [1,2].

Para alcanzar estos objetivos, el plan se estructura en cuatro ejes principales que abarcan la regulación normativa y técnica; la protección patrimonial; la conservación y restauración —eje central de este artículo—; y, por último, la transmisión del conocimiento, la difusión patrimonial y el desarrollo rural. Cada uno de estos ejes incluye diversas medidas destinadas a salvaguardar y promover el patrimonio cultural representado por los horreos, paneras y cabazos de asturias.

2. Proyecto Pegoyu almacén d´horros

La primera de las medidas desarrolladas con carácter efectivo dentro del Plan fue el establecimiento del denominado proyecto *Pegoyu* (EJE 3, Medida 9), orientado al acopio, caracterización y mantenimiento de piezas de alto valor patrimonial procedentes de hórreos en ruina o desmantelados para su potencial uso en nuevas rehabilitaciones. El proyecto, promovido por la Consejería de Cultura, Política Llingüística y Turismo del Principado de Asturias, cuenta con la colaboración de la Asociación del Hórreo Asturiano (AHA) y la Fundación Centro Tecnológico Forestal y de la Madera (CETEMAS). La AHA se encarga del trabajo de campo, que incluye la recogida, desmontaje y transporte de elementos procedentes de hórreos colapsados o en estado de ruina irreversible, siempre con la debida autorización de la Dirección General de Patrimonio y Cultura y el consentimiento de las personas propietarias. Por su parte, CETEMAS, se ocupa de la recepción, análisis, tratamiento, inventario y almacenamiento de estas piezas en las instalaciones habilitadas en Carbayín, Siero. Para facilitar la gestión y garantizar la trazabilidad de las piezas, se ha desarrollado una plataforma web específica (<https://pegollu.horreosdeasturias.es/>), destinada a profesionales y maestros horreros, donde pueden realizar los trámites de forma agil y justificada.

2.1. Recogida, desmontaje y transporte

El trabajo se desarrolla a través de un proceso estructurado que comienza con una exhaustiva revisión documental del hórreo o panera en cuestión -informes, imágenes y otros materiales disponibles- para conocer el estado general e identificar de forma aproximada que tipo de piezas y en qué estado podrían encontrarse. Posteriormente se realiza una primera visita de reconocimiento sobre el terreno que permite evaluar in situ el número de elementos existentes y su estado real, con el fin de adaptar la recogida posterior de las piezas a las necesidades especificas en cada caso y una correcta organización logística con respecto al entorno en el que se encuentran.

Todo el proceso de recogida transporte y depósito se realiza por personal especializado en la materia y bajo control arqueológico (horrero especializado, arqueólogo especializado, peón de carpintería especializado y operario de carroceta con pluma especializado en estos trabajos). Para la recogida de piezas se sigue un criterio general, acordado por todos los participantes del proyecto, para la selección de las mismas que se aplica en todos los hórreos y paneras en los que se actúa:

- Piezas con decoración.
- Piezas de madera de gran sección difícil de conseguir en la actualidad.
- Piezas de madera de gran tamaño en buen estado o parcialmente aprovechables, como *trabes* y *liños*.
- Piezas características de la caja del hórreo que estén en buen estado o con posibilidad de reaprovechamiento como *colondras* y *engüelgos*.

- Elementos de apoyo de madera y piedra que estén en buen estado: pegollos, muelas, pilpayos y algunas piezas grandes pertenecientes a subidorías [3].

Paralelamente, se realiza la limpieza del espacio intervenido, gestionando adecuadamente los residuos y acopiando los restos no reutilizables, de manera que la parcela quede limpia y ordenada al finalizar los trabajos. Las piezas son transportadas en el propio camión pluma (Fig. 1) y depositadas en CETEMAS en una zona destinada a la recepción de piezas (Fig. 2), donde se limpian y se etiquetan para su posterior almacenado.



Figura 1. Desmontaje de uno de los hórreos



Figura 2. Depósito de las piezas en CETEMAS

2.2. Almacén de piezas e inventario

Una vez las piezas se han descargado en las instalaciones de la Fundación CETEMAS se lleva a cabo el protocolo de recepción e inventariado. En primer lugar, se limpian mediante agua a presión y se dejan secar en el exterior, posteriormente se etiquetan con un código de identificación que asegurará la trazabilidad de la pieza y se caracteriza cada una de las piezas, anotando el tipo, la especie, sus dimensiones y el estado en que se encuentra. Previamente a su colocación y flejado en el almacén (Fig. 3) se aplica mediante pulverización superficial Corpul, Permentrina 0,35% y Petrosol 92,07%, que proporciona un tratamiento preventivo y curativo de la madera maciza contra insectos xilófagos de la madera como carcoma, polilla y termitas.



Figura 3. Almacén interior y exterior para piezas de madera y piedra respectivamente.

3. Resultados

A fecha de redacción del presente artículo, el almacén había contado con el aporte de piezas procedentes de 15 hórreos y paneras desmantelados durante los años 2021 y 2025.

Tabla 1. Hórreos y paneras desmontados por año

	Año	Número horreos y paneras	Número piezas
Hórreos y paneras desmontados	2021	8	171
	2022	3	23
	2023	1	32
	2024	3	117

En total, fueron inventariadas 343 piezas, destacando un liño del siglo XVI perteneciente al Estilo Villaviciosa, cedido para su exposición al Centro de Interpretación del Hórreo de Bueño. Actualmente son 13 los profesionales carpinteros dados de alta para poder recoger piezas del *Almacén d'horros*. Por el momento, fueron reutilizadas 103 piezas en proyectos de rehabilitación o restauración (Fig.4), lo que supone el 30% de las piezas, es importante tener en cuenta que el sistema de registro y la plataforma web empezaron a estar plenamente operativos a principios del año 2023.

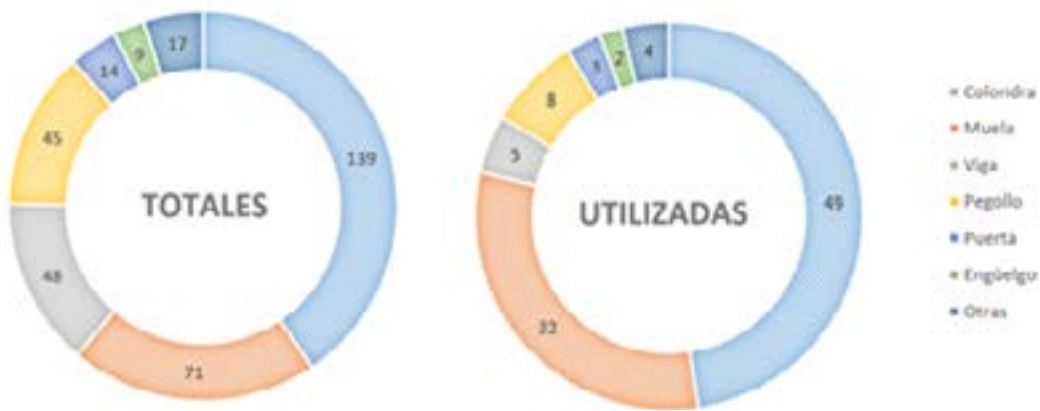


Figura 4. Piezas totales y utilizadas del Almacén d'horros según el tipo.

A día de hoy se ha finalizado la rehabilitación de 10 hórreos y paneras (Fig. 5) y otros 2 se encuentran en proceso de restauración con piezas procedentes del *Almacén d'horros*.

4. Referencias

(1) BOE. (2001). Ley 1/2001, de 6 de marzo, del Patrimonio Cultural de Asturias. Núm. 135, 19704-19729.

(2) BOPA (2015). Decreto 20/2015, de 25 de marzo, por el que se aprueba el Reglamento de desarrollo de la Ley del Principado de Asturias 1/2001, de 6 de marzo, de Patrimonio Cultural. Núm. 76 de 1 abril 2015.

(3) García Rodríguez, G., & Astuy Velasco, S. (2013). Registro de soluciones técnicas tradicionales para el montaje de hórreos y paneras. Consejería de Educación, Cultura y Deporte.

45. Caracterización de puentes peatonales de madera en España mediante análisis modal experimental

Soledad Rodríguez^a, Elena Pérez^a, Pelayo Madrazo^a, Julio Vivas^b, Juan Carlos Santos^b
^a Fundación CETEMAS, Pumarabule s/n, Carbayín, Asturias. ^b Media Madera Ingenieros Consultores, Polígono Industrial Tabaza II nº16, Asturias.
srodriguez@cetemas.es

Palabras clave: puentes y pasarelas, análisis modal experimental, frecuencia natural.

Resumen

Es una realidad que la construcción de puentes de madera cada vez más largos, complejos y esbeltos está condicionada por su comportamiento dinámico, en el que cada vez tienen mayor relevancia las vibraciones. Desde el año 2009, el Centro Tecnológico Forestal y de la Madera (CETEMAS) y la empresa Media Madera Ingenieros Consultores trabajan de forma conjunta en una línea de investigación sobre puentes y pasarelas peatonales de madera, con el objetivo de generar conocimiento sobre el comportamiento dinámico de distintas tipologías y verificar el cumplimiento de criterios de confort funcionales para vibraciones según diferentes normativas, códigos y recomendaciones técnicas. Así mismo, también se buscaba una alternativa a las tradicionales pruebas de carga estática, que permitiera conocer la capacidad portante de los puentes mediante la aplicación de tecnologías no destructivas. La metodología de ensayo implementada por CETEMAS para la estimación de las propiedades dinámicas se basa en un análisis modal experimental tradicional (AME) mediante martillo de impacto. Al comienzo de las investigaciones, la gran mayoría de los puentes analizados se correspondían con tipologías sencillas, de fácil simulación teórica y su análisis dinámico experimental podía considerarse de no muy alta complejidad. Así mismo, las luces máximas evaluadas no superaban los 20 metros en la mayoría de los casos. De forma paralela a la especialización y perfeccionamiento en los diseños que se empezaron a realizar, comenzó a cobrar mayor importancia la caracterización dinámica de las estructuras. Este trabajo tiene como objetivo analizar las ventajas y limitaciones del método de análisis utilizado, así como la evolución de los parámetros modales (frecuencias naturales, formas modales de vibración y amortiguamiento) en los puentes y pasarelas peatonales de madera entre los años 2010-2025, atendiendo factores como su tipología y a su longitud total.

1. Introducción

La utilización de madera como material de construcción de puentes y pasarelas destinados a uso peatonal en España se ha impuesto a materiales tradicionales como el hormigón o el acero debido a sus propiedades como material sostenible (reutilizable, recuperable y reciclable; reduce las emisiones de CO2) y su buen comportamiento estructural (relación resistencia-peso), entre otras. Existen ciertas circunstancias en las que la madera ofrece ventajas significativas frente a otros materiales como el acero o el hormigón armado para la construcción de este tipo de estructuras [1]. Entre estas ventajas se encuentran la rapidez y facilidad de montaje, la sencillez en los procesos de fabricación y la elevada resistencia del material en relación con su peso propio. Esta ligereza permite, además, reducir las limitaciones impuestas por suelos que no admiten grandes cargas, lo que conlleva una simplificación de las cimentaciones y una notable reducción de costes. La madera también destaca por su buena percepción estética, sus cualidades ecológicas inherentes, y un coste generalmente inferior al de otros materiales, especialmente en estructuras con geometrías curvas. En ciertas ubicaciones geográficas, presenta además una excelente resistencia frente a la sal empleada para fundir hielo y nieve, lo que la convierte en una solución particularmente adecuada en climas fríos.

Desde el año 2009, la empresa Media Madera Ingenieros Consultores, junto con el Centro Tecnológico Forestal y de la Madera de Asturias (CETEMAS), ha desarrollado diversos proyectos de I+D+i cuyos objetivos principales fueron la generación de conocimiento sobre el comportamiento dinámico de diferentes tipologías estructurales de puentes de madera. Si bien las tipologías más empleadas en los puentes de madera [2] no presentaban inicialmente complejidad en cuanto a su simulación teórica y su análisis dinámico, la búsqueda de esbeltez y ligereza que presentan las estructuras de grandes luces requiere de especialización en el material y un alto conocimiento para los análisis estático y dinámico.

La principal contrariedad que presentan los nuevos diseños y tipologías de puentes de madera de grandes luces es que permiten obtener buenos valores de rigidez para un bajo peso de la estructura. Si bien dentro del análisis estático este hecho se presenta como una ventaja, cuando es necesario considerar los efectos dinámicos, los fenómenos vibratorios producidos por el paso de peatones debidos a las cargas aplicadas a la estructura al caminar sí pueden ser considerados un problema [3]. En estas situaciones, la ausencia de masa debida al material implica importantes aceleraciones en la estructura. Si bien esto no es un impedimento para el cumplimiento de los Estados Límite Últimos, puesto que las fuerzas aplicadas no provocarían el colapso de la estructura aunque se den fenómenos de resonancia, sí implicaría incomodidad en el tránsito para los peatones. Es debido a esta problemática que diversas normativas, códigos y recomendaciones técnicas incorporan la posibilidad de realizar un análisis dinámico para puentes peatonales que verifique las cargas dinámicas, estableciéndose los rangos de frecuencias críticas y de valores límites para las aceleraciones, y destacándose la *“Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de*

puentes de carretera (IAP 11)”, y la guía francesa *“Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading”* publicada por el Sétra (Service d’études sur les transports, les routes et leurs aménagements).

2. Desarrollo y estado presente de la metodología

El análisis modal es una técnica teórica y experimental utilizada para determinar los llamados parámetros modales de una estructura, elemento o sistema dinámico. Estos parámetros propios del sistema son las frecuencias naturales, las formas modales de vibración y el amortiguamiento.

El método de ensayo aplicado por CETEMAS para la estimación de las propiedades dinámicas (en las que se incluyen los parámetros modales) se basa en un análisis modal experimental tradicional (AME) mediante martillo de impacto, teniendo como referencia los trabajos realizados en la Universidad Tecnológica de Sídney [4]. La principal ventaja de analizar una estructura experimentalmente frente a hacerlo teóricamente es que se obtienen los parámetros modales de la misma (frecuencias, amortiguamientos y formas modales) con todas las anomalías y singularidades reales que pueda presentar. Mediante esta técnica, se aplica una excitación conocida en frecuencia sobre el elemento o estructura a estudiar teniendo monitorizada la respuesta en diferentes puntos de esta. El resultado de esta técnica son las funciones de respuesta en frecuencia o FRF, cuyo estudio permite identificar las frecuencias a las que sucede una amplificación de la excitación o resonancia, es decir, las frecuencias naturales del elemento estudiado. Los análisis modales experimentales consisten en tres fases: preparación de la estructura, medida de las respuestas de frecuencia e identificación de los parámetros modales. El procedimiento de ensayo desarrollado supone el acople de acelerómetros en los elementos estructurales de primer orden de los puentes y el registro de las frecuencias y los modos de vibración de la estructura. La excitación se genera mediante el golpe con un martillo de impacto, y las respuestas dinámicas resultantes son medidas con acelerómetros. El registro, procesado y analisis de los datos de ensayo permite obtener los parámetros modales mencionados.



Figura 1. Realización de ensayos de AME sobre puentes de madera.

La aplicación de AME mediante martillo de impacto ofrece de forma consistente buenos resultados de frecuencia, amortiguamiento y modos de vibración en puentes de tipologías sencillas, permitiendo la creación y consolidación de una base de conocimiento para la caracterización dinámica de los puentes de Media Madera Ingenieros Consultores. Actualmente, su aplicación en las estructuras de tipologías más complejas puede mostrar limitaciones. En el caso de los puentes para uso peatonal, y más en los fabricados con madera, puede decirse que sus desventajas se relacionan fuertemente con las características del material (heterogeneidad y anisotropía de este) y valores altos de amortiguamiento en la estructura. Presentemente, los trabajos de innovación y desarrollo se centran en la necesidad de mejora de la metodología hasta entonces ejecutada y su adaptación a las nuevas tipologías estructurales.

3. Resultados iniciales

La empresa Media Madera Ingenieros Consultores cuenta en la actualidad con una amplia base de datos de ensayos dinámicos en sus puentes, correspondientes a más de quince años de estudio y análisis de forma conjunta a CETEMAS. Actualmente se desarrollan los trabajos de recopilación de datos respectivos a cada uno de los puentes ensayados y los resultados obtenidos. Así mismo, se ha comenzado un análisis de estadísticos básicos segregado por distintas características de las estructuras, con el objetivo de fijar una base de conocimiento y futura modelización acerca de los órdenes de magnitud de las frecuencias esperables en cada una de las tipologías. Si bien el número de ensayos realizados sobre tipologías rectas

biapoyadas permite en la actualidad la modelización y estimación de parámetros modales en estructuras similares, es necesario continuar con los trabajos de estudio y análisis de las tipologías con menor número de ensayos de caracterización.

Tabla 1. Número de puentes según tipología

Tipología	Número
Recto biapoyado – Taller	45
Recto biapoyado – In situ	14
Arco inercia variable – In situ	13
Arco tied-bow – In situ	7
Arco bow string – In situ	3
Celosía – Taller	9

Una de las valoraciones a destacar por su evidencia entre los distintos análisis iniciales realizados por tipologías, y que se muestra como ejemplo, son los datos de frecuencias naturales más bajas para las tipologías de puente recto biapoyado y puente de arco en inercia variable ensayados tras instalación. Su valoración evidencia de forma clara la disminución del valor de la primera frecuencia detectada acorde a la disminución del material y peso propio que presenta una tipología frente a la otra.



Figura 2. Comparativa tipología recto biapoyado e inercia variable >20m (In situ)

En el momento presente, también se incluyen entre los datos registrados y como resultados obtenidos los valores de las aceleraciones asociados a ensayos de tránsitos peatonales, de cara a la importancia de estas como parámetro de validación dentro del análisis de ELS de las estructuras.

4. Conclusiones

Las caracterizaciones dinámicas de los puentes de madera realizadas por Media Madera Ingenieros Consultores en colaboración con CETEMAS, han proporcionado un conocimiento valioso sobre los parámetros modales de estas estructuras de madera, lo que ha permitido avanzar en la modelización y la predicción de su comportamiento dinámico. A pesar de los avances, se sigue trabajando en la mejora y adaptación de la metodología para abordar las limitaciones actuales en las estructuras más complejas. La recopilación y análisis de datos continúan siendo fundamentales para consolidar una base de conocimiento que permita optimizar el diseño y la seguridad de los puentes de madera, asegurando su sostenibilidad y funcionalidad a largo plazo.

Referencias

(1) Crocetti, R. “Timber bridges: General issues, with particular emphasis on Swedish typologies”. 20 Internationales Holzbau-Forum IHF (Garmisch). 2014.

(2) Vivas Padilla, J.M. “Desarrollo y ajuste de modelos numéricos mediante análisis modal experimental y control de vibraciones en puentes de madera”. Departamento de Ingeniería de Construcción y Fabricación, Universidad Nacional de Educación a Distancia. 2016.

(3) Casado-Sánchez, C. M.; De Sebastián-Sanz, J.; Muñoz-Díaz, I.; Poncela-Méndez, A.; Lorenzana-Ibán, A. “Control de Vibraciones en Pasarelas Peatonales”. DYNA. 2011. 86(3), pp. 318-327.

(4) Crews, K., Bijan, S., Bakoss, S., Champion, C. “Overview of Assessing the Load Carrying Capacity of Timber Bridges Using Dynamic Methods”. IPWEA NSW. 2003.

46. Comparación de huella de carbono para un edificio de mediana altura en Madrid, homologación utilizando un diseño en CLT

Alberto Gonzalez^a, Víctor Rosales^{b,c} (ca), Miguel Esteban^d, Carmen Avilés^e
^a Máster en Ingeniería de Montes, Universidad Politécnica de Madrid, C/ José Antonio Novais, 10, 28040 Madrid. España. ^b Doctorando, Universidad Politécnica de Madrid, C/ José Antonio Novais, 10, 28040 Madrid, España. ^c National Excellence Center for Timber Industry (CENAMAD), Pontifical Catholic University of Chile, Avenida Vicuña Mackenna 4860, Santiago, 7820436, Chile. ^d Departamento de Ingeniería de Ingeniería y Gestión Forestal y Ambiental. ETSI Montes, Forestal y del Medio Natural – Universidad Politécnica de Madrid-UPM, C/ José Antonio Novais, 10, 28040 Madrid, España. ^e Departamento de Ingeniería de Organización, Administración de Empresas y Estadística. ETSI Montes, Forestal y del Medio Natural – Universidad Politécnica de Madrid-UPM, C/ José Antonio Novais, 10, 28040 Madrid, España.
E-mail victor.rosales@alumnos.upm.es

Palabras clave: CLT; huella de carbono.

El uso de la madera en la construcción, especialmente el CLT (Cross Laminated Timber), está en auge debido a la crisis climática actual y el reconocimiento ambiental del sistema constructivo. El presente trabajo ha sido desarrollado con el fin de obtener la huella de carbono de los elementos constructivos de un edificio de madera en CLT, con 5 plantas localizado en la ciudad de Madrid - España, considerando la comparativa con un diseño homólogo en hormigón armado. Las emisiones de carbono embebido han sido evaluadas en las etapas del ciclo de vida de la A1-A5, de acuerdo a norma EN15978.

El marco y enfoque de este trabajo fueron desarrollados sobre los elementos estructurales como muros, forjados y cubiertas. La mayor parte del consumo de recursos y energía durante las fases de construcción del edificio está ligado exclusivamente a los componentes estructurales mencionados anteriormente. Con los resultados obtenidos y, realizando una comparación simulada, el edificio en CLT supone una reducción del 80% de las emisiones totales de CO₂ equivalente a la atmósfera, respecto al edificio en hormigón armado.

El edificio en CLT resulta con mejor desempeño ambiental que su homólogo en hormigón armado en todas las etapas del ciclo de vida analizadas y, las fases de mayor ventaja en emisión de CO₂ eq. del edificio de CLT, corresponden a la A1-A3 y en el transporte de elementos (A4). Con esto se busca contribuir a incentivar las prácticas de construcción con CLT en el contexto de la sostenibilidad en edificaciones con madera, y conocer áreas de mejora en el carbono embebido que permitan optimizar aún más el sistema constructivo.

Introducción

En términos globales el sector de la edificación se asocia con alrededor de un 36% del total de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) del planeta (1). De este total, aproximadamente el 11% provienen de los procesos de extracción, producción y transporte de materiales (2). En aras de contribuir a las metas de descarbonización, se ha potenciado la innovación para sustituir la aplicación de materiales con una alta huella de carbono incorporado, como el caso del hormigón y el acero por madera contralaminada (CLT).

La cuestión de cómo cuantificar y mitigar con precisión el carbono incorporado desde el origen hasta el sitio de construcción de los edificios ha sido un tema en constante debate. Esto se debe a que el carbono incorporado en los edificios se genera en un período de tiempo relativamente corto en comparación con el carbono operativo (3). Los esfuerzos de investigación para mejorar la eficiencia energética y adoptar fuentes de energía más limpias han resultado en una disminución del carbono operativo en los edificios (4). En consecuencia, esto ha incrementado las emisiones de GEI asociadas con el carbono incorporado (CE), las emisiones generadas durante las fases de fabricación, transporte y construcción, así como la demolición o reutilización de los materiales de construcción al final de su ciclo de vida (4).

Los procesos de fabricación son una de las fases clave en el cálculo de la huella de carbono, ya que, es donde más emisiones se suelen generar. En cuanto al transporte, también afecta significativamente, ya que los movimientos de la materia prima o los productos finales entre los diferentes puntos de procesamiento, almacenamiento o venta también requieren de un consumo de energía en los medios de transporte, la que dependerá del tipo de material, por su peso y volumen a transportar.

Los factores que influyen la cuantificación del carbono incorporado se asocian con categorías como: características del edificio (tamaño, funcionalidad, tipo estructural, nivel de prefabricación), fuentes de emisiones (fases del ciclo de vida consideradas, categorías de emisiones, tipos de GHGs considerados), enfoque en la cuantificación (LCA, no LCA, herramientas utilizadas) y la calidad de los datos (con bases de datos, fuente de los datos) (3). Para el cálculo de la huella de carbono se pueden utilizar diferentes enfoques, aunque los principalmente utilizados son el corporativo y el de producto o servicio (LCA). En el primero se realiza una cuantificación de las emisiones directas, indirectas e involucradas de una empresa durante un periodo de tiempo establecido (por norma general un año). El segundo enfoque, determina las emisiones producidas con un análisis de ciclo de vida (ACV) del producto.

El trabajo tiene por objetivo determinar la mejora en sostenibilidad (huella de carbono) utilizando el enfoque corporativo al evaluar los elementos estructurales en una edificación existente de 5 pisos de concreto localizada en Madrid con otra homóloga que cuenta con un diseño en CLT, considerando el análisis en las etapas A1 - A5. En este

estudio, se ha considerado el efecto del carbono incorporado, que se refiere a las emisiones producidas durante las fases iniciales del ciclo de vida de un edificio, es decir, desde la extracción de las materias primas (A1) hasta la finalización de la construcción (A5). Estas etapas asociadas a las emisiones de carbono se han extraído de la Norma EN 15978 (5), sobre la sostenibilidad en la construcción.

Materiales y métodos

Para establecer la comparación, se consideraron los elementos constructivos de muros estructurales, forjados y cubiertas, utilizando el diseño de un edificio en CLT de 5 plantas como referencia (ver Fig. 1). El edificio se diseñó y calculó en el trabajo de fin de máster de construcción con madera de la Universidad Politécnica de Madrid, desarrollado por el equipo denominado “Somostrees”. Se consideró el cuadro normativo de España, para temas estructurales (Eurocódigo 5, UNE-EN 13501-2, CTE DB-SI), confort y habitabilidad (CTE DE-HR, CTE DEB-HE), considerando una superficie construida de 3.171 m², emplazado en la ciudad de Madrid.



Figura 1: Vistas en planta (izquierda) y Render edificio (derecha). Fuente: Somostrees.

En el diseño del edificio de CLT se ha considerado el uso de elementos de GLT de clase GL24 y paneles de CLT conforme a ETA 06/0138 o equivalente con uso de madera C18.

Como homólogo de comparación se utilizó un edificio encontrado en la Plataforma de Contratación del Sector Público que cumplía con la mayoría de las características utilizadas (emplazamiento, número de pisos, superficie

construida, cuadro normativo).

El edificio de referencia elegido es un proyecto de ejecución de 39 viviendas protegidas (VPPA), con garajes, trasteros y locales comerciales, ubicado Alcobendas Madrid (ver Fig. 2). Este proyecto comparte objetivos comunes con la propuesta en CLT, como sostenibilidad, eficiencia energética, entre otros, permitiendo una comparativa adecuada para los fines. La edificación posee una superficie construida total de 3.728,94 m², utilizándose el sistema constructivo de hormigón armado, el que utiliza los siguientes materiales: HA25/B/20/IIa y CEM I para la cimentación; HA-30/B/20/IIa y CEM I para Muros; HA-25/B/20/I, correspondiente a la estructura y CEM I; respecto a la estructura horizontal, se apoyan los pórticos mencionados, los forjados losa de hormigón de 25cm en plantas de viviendas y en plantas bajo rasante y acero de armaduras calidad B 500 S.



Figura N° 2: Vista en planta (Izquierda) y sección edificio hormigón. Fuente: Proyecto 39 Viviendas VPPA. Alcobendas, 2021.

Para el cálculo de la huella de carbono se ha utilizado la metodología señalada en PAS 2050:2008 (6), la que se caracteriza por establecer un método de evaluación de la huella de carbono de productos y servicios a lo largo de su ciclo de vida. Primero se realizó una cubicación de los materiales seleccionados. En segundo lugar, se identifican los factores de emisión de cada material, para ello se hace una medición adecuada de los valores asociados a estos, así como un análisis integral de las condiciones de producción de estos materiales. Tercero se contemplan los valores

asociados a la etapa de construcción con el uso de herramientas y maquinarias (7) y se utiliza la información de la base de datos proporcionada por la ICE Database (Inventory of Carbon and Energy). A continuación, se hace una conversión a toneladas de CO₂ equivalente, se calculan las toneladas de CO₂ producido, multiplicando la cantidad de cada material por los factores de emisión correspondientes.

Resultados

Los principales resultados se pueden visualizar en las tablas 1 y 2, con las cuales es posible realizar la comparativa en las distintas etapas de evaluación.

Elemento estructural	Emisiones de CO2 (ton CO2) edificio Hormigón						Total
	Producción (A1-A3)		Transporte (A4)		Montaje (A5)		
	Hormigón	Acero	Hormigón	Acero	Personal	Maquinaria	
Pilares	16.8	31.3	517.6	12.2	5.3	2.2	
Forjado	198.9	132.2					
Cubierta	50.1	25.9					
Total	265.7	189.5	517.6	12.2	5.3	2.2	992.5

Tabla 1: Emisiones de CO₂ para el edificio de Hormigón de 5 pisos.

Elemento estructural	Emisiones de CO2 (ton CO2) edificio CLT				
	Producción (A1-A3)	Transporte (A4)	Montaje (A5)		Total
			Personal	Maquinaria	
Muro	42.7	220.7	0.2	0.4	
Forjado	54.2				
Cubierta	25.1				
Conexiones	32.6				
Total	154.6	220.7	0.2	0.4	376.0

Tabla N°2: Emisiones de CO₂ para el edificio de CLT de 5 pisos.

Conclusiones

Para las condiciones establecidas en la comparación realizada, los resultados obtenidos en el proceso constructivo de un edificio de hormigón armado, genera aproximadamente 992,49 toneladas de CO₂, y la construcción del edificio de CLT 336,59 toneladas de CO₂; esto supone una reducción de aproximadamente el 62% de las emisiones totales de CO₂ a la atmósfera.

Consistente con Schenk & Amiri (8) una de las etapas que mayor impacto genera es la A1-A3, tanto para el edificio de CLT como para hormigón, siendo este último 3 veces mayor. Dada la simulación de distancias y la localización factible para proveedores para ambos proyectos, resulta un impacto mayor en la etapa A4 para ambos sistemas siendo en este caso, el de hormigón 2 veces mayor que el de CLT. Mientras la etapa A5 es la de menor impacto para ambos materiales.

Referencias

(1) Global Status Report for Buildings and Construction (2021). Recuperado de <https://globalabc.org/resources/publications/2021-global-status-report-buildings-and-construction>

(2) IEA (2021), Cement, IEA, Paris. Recuperado de <https://www.iea.org/reports/cement>

(3) Chen, Y., Zhou, Y., Feng, W., Fang, Y., & Feng, A. (2022). Factors That Influence the Quantification of the Embodied Carbon Emission of Prefabricated Buildings: A Systematic Review, Meta-Analysis and the Way Forward. Buildings, 12(8), 1265. <https://doi.org/10.3390/buildings12081265>

(4) Hemmati, M., Messadi, T., Gu, H., Seddelmeyer, J., & Hemmati, M. (2024). Comparison of Embodied Carbon Footprint of a Mass Timber Building Structure with a Steel Equivalent. Buildings, 14(5), 1276. <https://doi.org/10.3390/buildings14051276>

(5) European Standard Institution, EN 15978 Sustainability of Construction Works– Assessment of Environmental Performance of Buildings – Calculation Method,CEN -Eropean Committee for Standardization, 2011.

(6) PAS 2050 – Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services.

(7) Hasan S., Bouferguene A., Al-Hussein M., Gillis P., & Telyas A. (2013). Productivity and CO2 emission analysis for tower crane utilization on high-rise building projects, Automation in Construction, Volume 31, 2013, Pages 255-264, ISSN 0926-5805, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.11.044>.

(8) Schenk D. & Amiri A. (2022): Life cycle energy analysis of residential wooden buildings versus concrete and steel buildings: A review. Frontiers in Built Environment, Volume 8 – 2022, DOI 10.3389/fbuil.2022.975071

47. Aproximación en el desarrollo de un producto de recuperación para excedentes de placas de CLT: Prototipo de pasarela peatonal

Víctor Rosalesa^b (ca), Camila Arevalo^c, Claudio Montero^d, Gerardo Saelzer^a, Alan Jara-Cisterna^{e,b}
^a Departamento de Ciencias de la Construcción, Universidad del Bío-Bío, Av. Collao 1202, Concepción, 4081112, Chile. ^b Doctorando, Universidad Politécnica de Madrid, C/ José Antonio Novais, 10, 28040 Madrid, España. ^c Centro de Investigación en Tecnología de la Construcción (CITEC), Av. Collao 1202, Concepción, 4030000, Chile. ^d Wood Design & Technology Laboratory, Universidad del Bío-Bío, Concepción 4051381, Chile. ^e Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío, Av. Collao 1202, Concepción, 4081112, Chile.
^ovrosaleg@ubiobio.cl

Palabras clave: CLT; economía circular; puentes de madera; huella de carbono.

La producción de paneles de madera contralaminada CLT (Cross Laminated Timber), se encuentra en continuo crecimiento, debido a su amplia aplicación en obras constructivas. El presente trabajo ha sido realizado con la finalidad de desarrollar, a nivel de laboratorio, un producto de recuperación que aproveche los excedentes de paneles de CLT generados en las plantas de procesamiento. Específicamente, se busca utilizarlos en una tipología en arco para puentes o pasarelas de madera, promoviendo beneficios tanto económicos como ambientales, al reducir la huella de carbono.

Se ha diseñado una propuesta estructural en arco para pasarelas peatonales, que permiten el uso de secciones menores de paneles de CLT, para conformar una estructura resistente y factible de ser utilizado en luces de hasta 12 metros. Los ensayos mecánicos a pequeña escala, en una primera etapa, muestran una alta dependencia con la tolerancia de los cortes de las piezas para esta configuración, un aspecto ajustado en pruebas posteriores, nos permitió mejorar los resultados mecánicos obtenidos.

El producto desarrollado busca abordar dos problemáticas: 1. El reemplazo de madera aserrada de gran escuadría y 2. El aprovechamiento de paneles de CLT recuperados, promoviendo la reducción de desperdicios bajo los principios de una economía circular; además el empleo de pequeñas secciones facilita la preservación de los elementos con métodos tradicionales, especialmente para condiciones de servicio desfavorable para la este tipo de estructuras.

La presente iniciativa permitió configurar inicialmente un diseño que integra recuperación, resistencia estructural y facilidad de montaje. Los resultados sugieren que es posible seguir avanzando en su desarrollo, evaluar propiedades mecánicas bajo condiciones de servicio para este tipo de estructuras y aumentar el rendimiento económico y ambiental para plantas productoras de CLT.

Introducción

Las construcciones con madera han ido ganando espacio por razones de sustentabilidad, asociadas por el almacenamiento de carbono y por ser un material renovable (1). El uso de la madera en la construcción se ha incrementado por la aparición y producción de paneles contralaminados (CLT), y su análisis de ciclo de vida se puede mejorar aún más aumentando el reuso y la circularidad (2).

Para garantizar la circularidad de los materiales es importante mantener un registro de la utilización de estos, reconocer los volúmenes de desperdicio, su clasificación en las distintas fases y buscar alternativas para mejorar el reuso de componentes. La forma productiva y arreglo de los denominados “Master panel” que corresponde al plan de corte en paneles de CLT, generan recortes por vanos de puerta y ventanas, y secciones no utilizables para un proyecto constructivo. Esta situación genera alrededor del 5 -10 % de desperdicio, lo que normalmente es utilizado para la generación de energía (3), aumentando el impacto total (4). Por su parte, Vamza et al. (2) propusieron un valor de 0,128 m3 de residuos por cada m3 de CLT generado, existiendo elementos que por sus bajas dimensiones no poseen valor estructural.

Son variadas las iniciativas empleadas para mejorar la utilización de desperdicios y aumentar la reciclabilidad de paneles de CLT, tales como reuso en laminación de paneles de CLT, paneles de CLT integrado a la laminación de vigas laminadas como apoyo a cargas puntuales (3), formas hexagonales para uso de una cáscara segmentada (5), sistema de construcción modular en base a conexiones entrelazadas y entalladas (6).

Los puentes o pasarelas peatonales, son estructuras resistentes que son puestas en servicio por un largo periodo. Este tipo de estructuras al utilizar elementos de madera, permiten almacenar C02 y pueden lograrse distintas configuraciones con el uso de elementos repetitivos. Para la fabricación se han empleado paneles de CLT de grandes dimensiones los que trabajan en el plano y apoyados sobre elementos lineales como vigas rectas o curvas (7). Una forma de transferir cargas a puentes de madera formados por piezas que trabajan fuera del plano es la técnica de laminación con tensión (8), esta solución ha sido empleada como reemplazo en puentes con paneles clavados (9).

El objetivo principal del trabajo fue investigar el proceso de fabricación de un prototipo de puente peatonal con el uso residuos de madera contralaminada. Además, el estudio se centró en la etapa inicial de desarrollo de un producto que permite la recuperación de piezas de CLT de sección reducida, para ser empleadas en una estructura de puente o pasarela peatonal con el objetivo de evaluar el comportamiento mecánico de una configuración en arco.

Materiales y métodos

Para este estudio se utilizaron paneles de CLT de Pino radiata fabricados por la empresa Niuform Ltda., con un espesor de 99 mm. con ancho y largo variable, disponibles después de haber obtenido una serie de paneles de muro destinados para la construcción de prototipos y del edificio PymeLAB en la Universidad del Bío-Bío. El proceso de recuperación consistió en evaluar la humedad de los paneles, clasificar tamaños, formatear en una sierra circular escuadradora y disponer piezas para el proceso de fabricación de partes de una configuración de un prototipo de pasarela peatonal con tres variantes en una de las variables de armado.

La humedad de los elementos disponibles se fijó en el rango de 12 a 17 %, y las dimensiones de las piezas se encontraban en el ancho de 70 a 650 mm y largos en el rango 400 a 2300 mm.

El diseño arquitectónico del puente peatonal y la selección de la tecnología para su funcionamiento estructural se basó en experiencias anteriores asociadas con la construcción de una pasarela peatonal instalada en la ciudad de Concepción – Chile en el año 2006, la que cuenta con una carpeta de circulación con una placa tensada.

En base a las dimensiones disponibles la propuesta arquitectónica consistió en una configuración en arco (Fig. 1), en base a 57 piezas con dimensión de 99 x 200 x 600 mm (Fig. 2) y se conformó una estructura por tramos utilizando tensores metálicos.

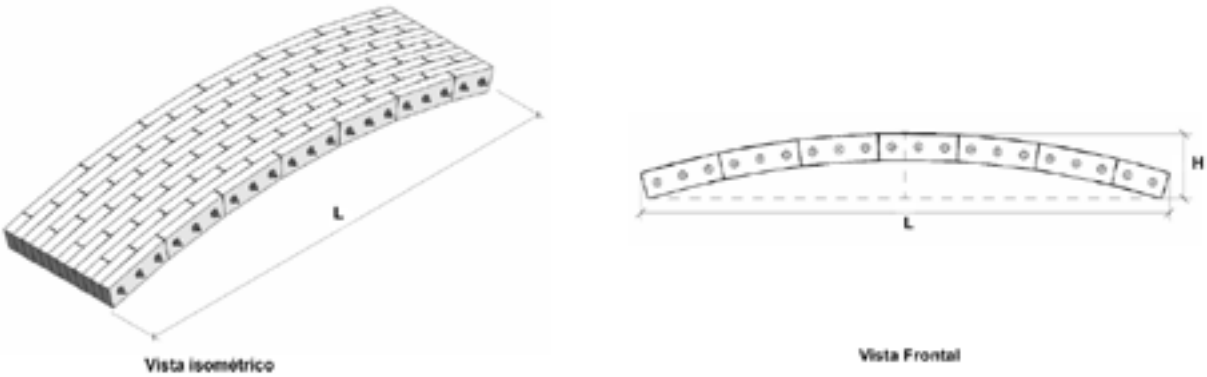


Figura 1: Isométrica (izquierda) y vista frontal (derecha).

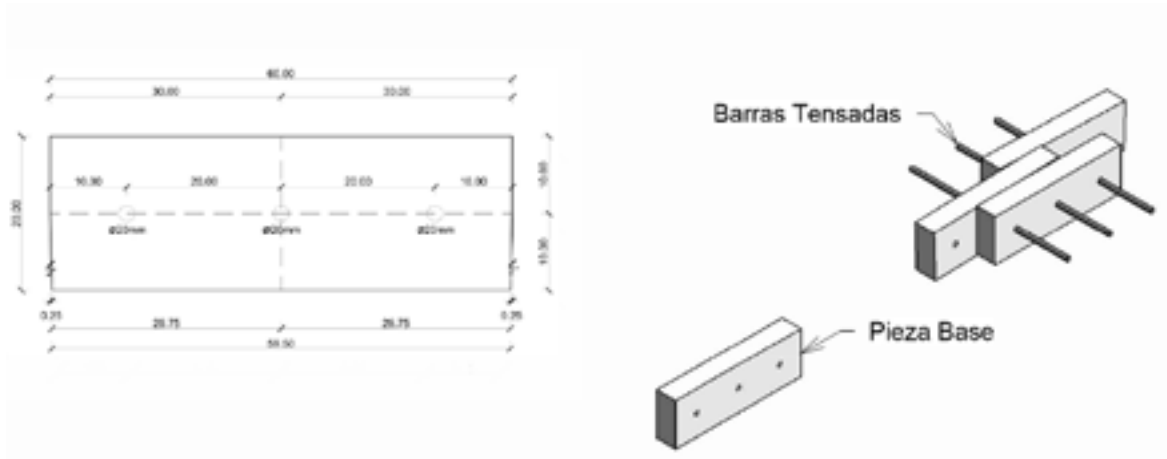


Figura 2: Detalle de pieza de madera contralaminada (izquierda) y posición de barras tensadas (derecha).

El prototipo fue armado utilizando piezas estándar diseñadas para el efecto, utilizando tensores metálicos cada 200 mm, ejerciendo una fuerza de tensión de 12 KN, lo que fue establecido en estudios previos de comportamiento en el tiempo, considerando diferencias de humedad ambiental.

El diseño experimental se centró en la confección de probetas representativas de un puente en arco de dimensiones 350 x 890 x 3600 mm. Con el objetivo de evaluar el comportamiento dentro del rango elástico del prototipo, se han planificado dos repeticiones del ensayo, realizando 3 variaciones en el armado del prototipo: A. Uso de tensores y tolerancia entre piezas (media de 6.9 mm), B. Uso de tensores con pieza metálica de conexión entre uniones y tolerancia entre piezas (media de 6.9 mm), C. Uso de tensores con pieza metálica entre uniones y aplicación de producto de relleno en el encuentro entre piezas (sin tolerancias). Se analizó la respuesta estructural bajo condiciones controladas y se validaron las propiedades mecánicas esperadas del sistema constructivo. Los ensayos consideraron la medición de los desplazamientos verticales. El ensayo se realizó con una configuración en 3 puntos, aplicando carga incremental de manera controlada. El ensayo se completa al alcanzar una de las siguientes condiciones: 1. Sobrecarga de 400 kgf /m², conforme a la normativa NCh 1537 (10) o, 2. Una deflexión en el límite de L/425 (8.47 mm), según lo establecido en la norma NCh 1198 (11).

Resultados

La humedad de las piezas empleadas en promedio cuentan con un contenido de humedad de 14.88% con

una desviación estándar de 3.09%. En la Fig. 3 se da a conocer la variabilidad de los datos de humedad de cada pieza utilizada para la fabricación del prototipo.

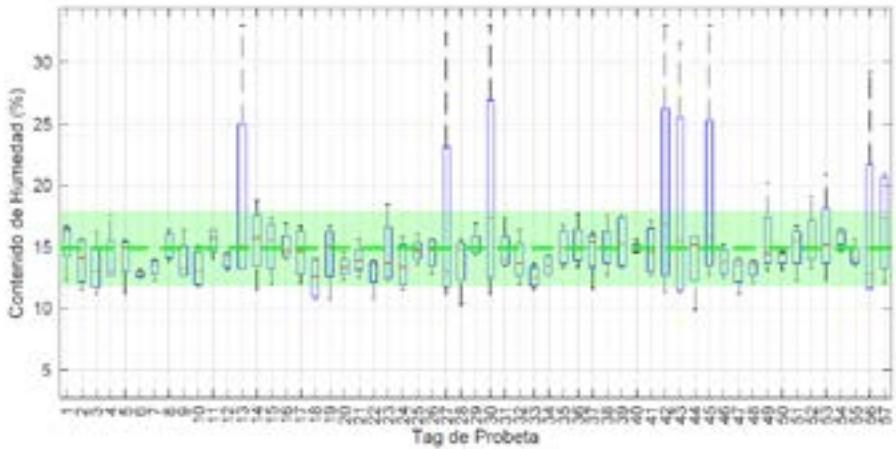


Figura 3: Contenido de humedad para cada pieza utilizada en la construcción del prototipo.

En la Fig. 4 se presentan las curvas fuerza vs. desplazamiento correspondientes a cada una de las repeticiones realizadas para cada variante en la fabricación.

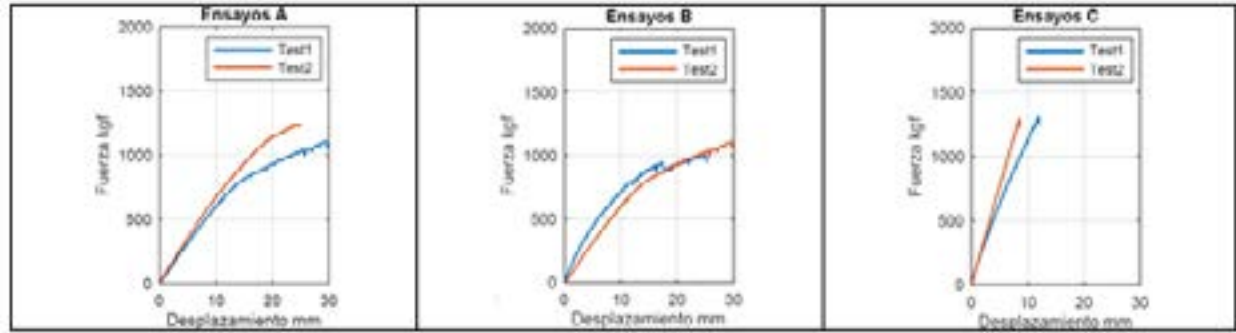


Figura 4: Curvas Fuerzas vs Desplazamiento para cada configuración ensayada.

En los ensayos mecánicos se observó que las configuraciones de ensayos tipo A y tipo B no alcanzaron los valores esperados de desplazamientos, principalmente debido a la presencia de tolerancias entre piezas. En contraste, la configuración tipo C presentó un desempeño óptimo, mostrando mayor rigidez, menores desplazamientos y un

comportamiento más estable dentro de los límites normativos. Estos resultados confirman que la precisión en los cortes y la eliminación de tolerancias son factores determinantes para garantizar la eficiencia estructural del sistema.

Conclusiones

El diseño del puente en arco con el uso de recortes de paneles de CLT recuperados logró aumentar la reciclabilidad de las piezas y aumentar la recuperación para piezas que fueron destinadas para prototipos como la torre PymeLAB – Universidad del Bío-Bío.

Los respectivos mejoramientos sobre el proceso de armado, relacionados con la disminución de las tolerancias entre piezas individuales, permite alcanzar mejores desempeños estructurales. Esto sugiere la necesidad de realizar cortes de alta precisión, lo que se mejora al utilizar maquinaria CNC o con la implementación de plantillas de corte.

Referencias

(1) Singh T., Arpanaei A., Elustondo D., Wang Y., Stocchero A., West T., & Fu Q. (2022). Emerging technologies for the development of wood products towards extended carbon storage and CO2 capture, Carbon Capture Sci. Technol. 4 (2022) 100057, <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2022.100057>.

(2) Vamza I., Valters K., Luksta I., Resnais P., & Blumberga D. (2021). Complete circularity in cross-laminated timber production, E.C.T. 25 (1) (2021) 1101–1113, doi.org/10.2478/rtuct-2021-0083

(3) Vessby J., Perstorper M., DeMonte F., & Eriksson J. (2023). Structural use of cut-offs from CLT production – Three examples that utilize the unique properties. 139-146. WCTE -Oslo 2023, DOI: 10.52202/069179-0019.

(4) Hudert, Markus. (2024). Enabling the circular use of Cross-Laminated Timber by upcycling production waste. Conference: IASS Annual Symposium 2024 - ETH Zurich.

(5) Robeller C. and Haaren N.V. (2020). “Recycleshell:Wood-only shell structures made from cross-laminated timber (clt) production waste,” Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, vol. 61, pp. 125–139, 2 Jun. 2020. DOI: 10.20898/J.IASS.2020.204.045.

(6) Mangliár L. and Hudert M. (2022). “Enabling circularity in building construction: Experiments with robotically assembled interlocking structures,” Structures and Architecture: A Viable Urban Perspective? pp. 585–592, Jul. 2022. DOI: 10.1201/9781003023555-70

(7) Dahlberg J., Wacker J.P., & Rammer D. (2023). Laboratory investigations of cross-laminated decks for bridge applications. In: Nyrud, A.Q.; Malo, K.A.; Nore, K., eds., Proceedings of the 13th World Conference on Timber Engineering. 19-22 June, 2023. Oslo, Norway. 244-250.

(8) Ritter M., Duwadi S. R., & Cesa E. (2000). Timber bridge initiatives in the United States. Progress in Structural Engineering and Materials. <https://doi.org/10.1002/1528-2716>

(9) Crocetti R., Ekholm K. & Kliger R. (2016). Stress-laminated-timber decks: state of the art and design based on Swedish practice. Eur. J. Wood Prod. 74, 453–461 (2016). <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0966-1>

(10) INN (2009): Instituto Nacional de Normalización, NCh1537:2009 Diseño estructural - Cargas permanentes y cargas de uso, 2009.

(11) INN (2024): Instituto Nacional de Normalización, NCh1198:2024 Madera — Construcciones en madera — Cálculo, 2024.

48. De lo vernáculo a lo contemporáneo: análisis estructural de sistemas mixtos de tapia y madera

A. Blanca-Hoyos^a, R.A. Castro^a, I. Arto^b, F. Ávila^c, R. Gallego^a, E. Puertas^a
^a Universidad de Granada, Departamento de Mecánica de Estructuras e Ingeniería Hidráulica, Campus de Fuentenueva, Laboratorio de Ingeniería Estructural Sostenible (SES-Lab). ^b Universidad de Granada, Departamento de Construcciones Arquitectónicas, ETSI de Edificación; ^cUniversidad Politécnica de Valencia. Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras.
epuertas@ugr.es

Palabras clave: Tapia, madera estructural, arquitectura vernácula, elementos finitos.

Los sistemas constructivos mixtos que combinan muros de tapia con elementos estructurales de madera forman parte del patrimonio vernáculo en numerosas regiones del mundo, incluyendo la península Ibérica, Francia, el Magreb, Asia Central y América Latina. A pesar de su uso histórico extendido, el comportamiento estructural conjunto de estos materiales ha sido escasamente estudiado, lo que limita tanto su conservación como su proyección hacia arquitecturas contemporáneas sostenibles.

Este trabajo presenta una aproximación metodológica para el análisis estructural de sistemas mixtos tapia-madera empleando elementos finitos. Se plantea una estrategia de modelización progresiva que parte de formulaciones constitutivas simplificadas para ambos materiales y avanza hacia modelos más complejos que incorporen anisotropía o condiciones de contacto. Se consideran tipologías documentadas en el sur peninsular, con especial atención a su respuesta estructural bajo cargas horizontales y combinadas.

Los primeros resultados apuntan la influencia de la rigidez relativa entre materiales, la relevancia del acoplamiento mecánico en juntas y la capacidad del sistema para disipar energía en escenarios sísmicos de baja intensidad. Se concluye que estas configuraciones estructurales presentan un potencial significativo para su reinterpretación actual y se subraya la necesidad de futuras validaciones experimentales y calibraciones con datos in situ.

49. Intervenciones en el Patrimonio Industrial con Madera en España

Daniel F. Llana^a, Guillermo Íñiguez-González^a, Miguel Esteban^a, Ignacio Bobadilla^a, Francisco Arriaga^a
^a Grupo de Investigación Construcción con Madera, Universidad Politécnica de Madrid. E.T.S.I. de Montes, Forestal y del Medio Natural, C/ José Antonio Nováis, 10, 28040, Madrid.
danielfllana@gmail.com

Palabras clave: Arqueología industrial, estructuras existentes de madera, protección patrimonial, reutilización de madera, técnicas no destructivas.

Resumen

La madera ha sido utilizada con fines industriales en mayor o menor medida, existiendo en la actualidad un patrimonio industrial con madera muy reseñable. La mayoría de este patrimonio que ha llegado hasta nuestros días ha sido intervenido con un cambio de uso hacia fines no industriales, implicando la pérdida de la maquinaria en la mayoría de casos. Existen principios y recomendaciones a nivel internacional aplicables a la conservación e intervención de dicho patrimonio. En este trabajo se presentan dos intervenciones de patrimonio industrial con madera en las que participó el Grupo de Investigación Construcción con Madera (UPM): el Muelle Cargadero de Mineral de Río Tinto en Huelva y el Real Taller de Aserrío de Valsaín en Segovia.

Introducción

A mediados del siglo XX, surgió en Reino Unido la inquietud de proteger el patrimonio procedente de la Revolución Industrial, cuyo origen se remonta a 1760 aproximadamente. Dicho movimiento se contagiaría en los siguientes 20 años al resto de Europa y parte del mundo, creándose en 1978 el Comité Internacional para la Conservación del Patrimonio Industrial conocido por sus siglas en inglés como TICCIH. En el caso de España, en 1986 se creó la Asociación Española de Patrimonio Industrial y la Obra Pública y en 2002 se publicó el primer Plan Nacional de Patrimonio Industrial (1). Además, existe una disciplina científica propia que estudia y pone en valor los vestigios materiales e inmateriales como testimonios históricos de los procesos productivos llamada Arqueología Industrial (2). En la actualidad, el patrimonio industrial se ha convertido en un recurso turístico y cultural, reseñable en cuanto a volumen de visitantes, especialmente tras la pandemia de 2020.

La madera estuvo muy presente en el patrimonio industrial, en época preindustrial (3, 4) y al principio de la revolución industrial (siglo XVIII). Sin embargo, en los siglos XIX y XX el acero y el hormigón desplazaron a la madera en la mayoría de las estructuras industriales, excepto en algunos casos donde la madera presentaba ventajas de durabilidad (salinas, fábricas de fosfatos, torres de apagado de COK...), o económica (clareos de chopo en los secaderos de tabaco de la Vega de Granada, cables de extracción forestal...).

El patrimonio industrial incluye tres aspectos a considerar:

- Continente (edificio)
- Contenido (maquinaria)
- Inmaterial o intangible (cultura industrial)

La mayoría del patrimonio industrial con madera que ha llegado hasta nuestros días ha sido intervenido, y el objetivo de esta comunicación es explicar varios aspectos sobre las intervenciones realizadas sobre dicho patrimonio.

Principios ICOMOS para la conservación del patrimonio construido en madera

Los principios para la conservación del patrimonio construido en madera publicados por ICOMOS en el año 2017 (5) son aplicables a todo el patrimonio construido con madera y, por lo tanto, engloban también el patrimonio industrial con madera. Algunos de los aspectos más relevantes son: 1 - La intervención a realizar deber ser la mínima necesaria para garantizar la estabilidad física y estructural, salvaguardando su autenticidad e integridad; 2 - La función original de la estructura debería ser mantenida o restaurada; 3 - Las intervenciones deben ser reversibles; 4 - Conservar la mayor cantidad de elementos existentes, sustitución con piezas de construcción envejecidas procedentes de otras

estructuras; y 5 - El patrimonio no debe intervenir simplemente para permitir que cumpla con los requisitos de los códigos de construcción modernos. Además, se resalta la importancia de la educación para sensibilizar a la sociedad de la importancia del patrimonio construido en madera.

Intervenciones en patrimonio industrial con madera

Casi la totalidad de las intervenciones realizadas sobre patrimonio industrial con madera ha implicado un cambio de uso. Según la Carta de Nizhny Tagil (6) publicada por TICCIH en 2003, “el valor y la autenticidad de un sitio industrial pueden verse enormemente reducidos si se extrae la maquinaria o los componentes, o si se destruyen los elementos secundarios que forman parte del conjunto de un sitio”. Por desgracia, esto ha sucedido en la mayoría de los casos, bien por la pérdida de la maquinaria en una etapa anterior, o bien por la pérdida durante la intervención para poder adaptar los espacios del edificio a su nuevo uso. Además, es recomendable habilitar un área donde se represente el uso anterior, dando cabida al patrimonio inmaterial, lo cual tampoco suele realizarse. Por lo tanto, en la mayoría de las intervenciones realizadas el único de los tres aspectos del patrimonio industrial que se ha tenido en cuenta para la intervención ha sido el continente (edificio). Entre los nuevos usos del patrimonio industrial intervenido encontramos: bibliotecas, centros de eventos y culturales, hoteles, instalaciones deportivas, museos, oficinas, paseos, restaurantes, salas de exposiciones, viviendas... (7).

Intervención del Muelle Cargadero de Mineral de Río Tinto (Huelva)

El muelle de la compañía minera de Río Tinto, es un cargadero de mineral situado en la ciudad de Huelva. Inaugurado en 1876 para la exportación de mineral de cobre extraído del norte de la provincia de Huelva, que era transportado en ferrocarril hasta el muelle para cargarlo en barcos. La actividad industrial del muelle cesó en 1975, y en 2003 fue declarado Bien de Interés Cultural (BIC). La estructura se divide en tres tramos elevados (actualmente no conectados entre sí). El primer tramo, de 93 m de longitud, se encuentra sobre tierra y es propiedad del Ayuntamiento de Huelva, fue construido en madera de pino amarillo del sur y aunque no ha sido intervenido, sí ha sido reforzado recientemente con madera de alerce. El segundo tramo, de 143 m de longitud, también sobre tierra y propiedad del Ayuntamiento, está compuesto por pilares de fundición, estructura metálica y suelo de madera, recientemente sustituido por madera de iroko. El tercer tramo, de 397 m de longitud, se encuentra sobre el agua de la ría y es propiedad de Puertos del Estado, está compuesto por plataformas de madera en el lecho de la ría (8), que sustentan pilares de fundición y estructura de madera. La estructura fue intervenida entre 2004 y 2006 para convertirla en un paseo marítimo para viandantes. Se construyó una estructura nueva de madera de elondo (*Erythrophleum* sp.) de procedencia Guinea Ecuatorial y Camerún, utilizando aproximadamente 380 m³ de vigas principales y 620 m³ de elementos secundarios (Fig. 1a). La Asociación de Investigación Técnica de la Madera (AITIM), junto con profesores de la E.T.S. de Ingenieros de Montes (actualmente integrantes del Grupo de Investigación Construcción con Madera)

proporcionó asistencia técnica y control de calidad de la madera, incluyendo la clasificación resistente de la misma basada en ensayos no destructivos (Fig. 1b) y parámetros visuales (9).



Figura 1. Intervención en el Muelle Cargadero de Mineral de Río Tinto (Huelva): a) estructura de madera nueva de elondo; b) evaluación de madera de elondo mediante técnicas no destructivas.

Intervención del Real Taller de Aserrío de Valsaín (Segovia)

El Real Taller de Aserrío Mecánico de Valsaín, en la provincia de Segovia, fue construido en 1884 y estuvo en funcionamiento hasta 1952, deshaciéndose a su cierre de la maquinaria de aserrío. El edificio con una planta de dimensiones 80 x 21 m, presenta una orientación longitudinal norte-sur y está compuesto por tres cuerpos diferenciados. Un cuerpo central de una sola altura, donde se encontraban las calderas, la maquinaria de aserrío y la fragua, y dos cuerpos laterales simétricos con dos alturas donde se alojaban la máquina de vapor en uno (norte) y oficinas en el otro (sur). Además, dispone de sótano por donde discurría el eje de transmisión con poleas. Los materiales son muros de piedra y fábrica de ladrillo, y cubierta de madera de pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.). El edificio fue intervenido entre 2007 y 2009 actuando en los muros de carga y en la estructura de cubierta. En el cuerpo norte se eliminó el forjado del segundo piso, se sustituyó el muro entre la máquina de vapor y las calderas por un nuevo muro de ladrillo apoyado sobre pilares metálicos, dejando un espacio diáfano, y se sustituyó la cubierta original por una de madera nueva de par e hilera. La zona de aserrío del cuerpo central es un espacio diáfano de 48 x 15,3 m con cubierta formada por 10 cerchas de madera apoyadas sobre pilares de ladrillo. Las cerchas presentaban grandes deformaciones en el tirante (debido al apoyo del pendolón sobre el tirante), rotura por rasante de la unión par tirante y pudrición en algunos de los apoyos. Mediante clasificación visual y técnicas no destructivas se le asignó

a la madera una clase resistente equivalente C22. Las cerchas fueron desmontadas (Fig. 2a), reparadas en el suelo mediante el uso de barras de acero y barras de resina de poliéster reforzada con fibra de vidrio, y encoladas con formulaciones epoxi (Fig. 2b). Además, fueron reforzadas con madera microlaminada (LVL). Las correas, parecillos y ripia fueron sustituidos por madera nueva debido al alto grado de pudrición que presentaban y a los requisitos normativos actuales de resistencia al fuego (10, 11). El aserradero, que pertenece al Organismo Autónomo de Parques Nacionales, fue declarado BIC el 5 de julio de 2022 y en la actualidad se está convirtiendo en un museo de la madera.



Figura 2. Intervención en el Real Taller de Aserrío de Valsaín (Segovia): a) desmontaje de cerchas de cubierta; b) reparación de pudriciones con barras de acero y poliéster con fibra de vidrio.

Conclusiones

La mayoría del patrimonio industrial con madera que ha llegado hasta nuestros días ha sido intervenido, lo que supone un cambio de uso sin fines industriales, focalizándose en el continente (edificio), obviando en la mayoría de casos el valor del contenido (maquinaria) y el patrimonio inmaterial.

Dos de las intervenciones realizadas en España en patrimonio industrial con madera son el Muelle Cargadero de Mineral de Río Tinto en Huelva donde se utilizó madera de frondosa tropical para hacer un paseo marítimo y el Real Taller de Aserrío de Valsaín en Segovia, donde se repararon y conservaron las cerchas originales de pino silvestre. En ambos casos participaron profesores de la E.T.S. de Ingenieros de Montes (actualmente pertenecientes al Grupo de Investigación Construcción con Madera UPM) colaborando con AITIM.

La educación a todos los niveles es fundamental para sensibilizar y valorar el patrimonio industrial en todos sus aspectos.

Referencias

(1) Humanes, A. Plan Nacional de Patrimonio Industrial. *Instituto de Patrimonio Histórico Español*. 2002, 6 p.

(2) Llana, D.F. Arqueología Industrial con Madera. *Revista MONTES*, 2023, 155, 65-69.

(3) Hermoso, E. Ingenios de madera. *Revista AITIM*, 1999, 197, 25-34.

(4) Peraza, J. E. Gigantes con entrañas de madera. *Revista AITIM*, 2005, 232, 32-37.

(5) ICOMOS Principios para la conservación del patrimonio construido en madera. *GA 2017 6-3-4 – Doctrinal Texts*. 2017, 6 p.

(6) TICCIH Carta de Nizhny Tagil sobre el patrimonio industrial. 2003, 6 p.

(7) Llana, D.F.; Íñiguez-González, G.; Esteban, M.; Arriaga, F. Patrimonio industrial con madera en España. *Actas del III Congreso Ibero-Latinoamericano de la Madera en la Construcción (CIMAD 2024)*. Madrid, junio 10-14, 2024, 510-514.

(8) González-García de Velasco, C.; González-Vílchez, M. Dos ejemplos británicos de cimentaciones de estructuras marítimas sobre plataformas de madera en el siglo XIX. *Actas del 7º Congreso Nacional de Historia de la Construcción. Santiago de Compostela*, octubre 26-29, 2011, 593-601.

(9) Íñiguez-González, G.; Arriaga, F.; Esteban, M.; Bobadilla, I. Non-destructive methods for the quality control of structural Tali timber. *Actas del 9º World Conference on Timber Engineering (WCTE 2006)*. Portland, agosto 6-10, 2006, 8 p.

(10) Esteban, M.; Arriaga, F.; Íñiguez-González, G. Modeling structural pathologies in king trusses. *Actas del 9º World Conference on Timber Engineering (WCTE 2006)*. Portland, agosto 6-10, 2006, 8 p.

(11) Llana, D.F.; Esteban, M.; Íñiguez-González, G.; Bobadilla, I.; Arriaga, F. Intervención en el Real Taller de Aserrío de Valsaín. *Actas del 25 International Conference on Industrial Heritage (INCUNA)*. Gijón, septiembre 27-30, 2023, 189-199.

50. Woodex+: La evolución económica y precisa en la estimación de la densidad y la evaluación de la madera de construcción

Ignacio Bobadilla Maldonado^a, Roberto Martínez López^b, Carlos Taboada de La Fuente^a, Daniel Fernández Llana^a, Miguel Esteban Herrero^a
^a ETSI de Montes, Forestal y del Medio Natural, UPM, Madrid; ^bEscuela Técnica Superior de Arquitectura. UVA. Valladolid.
i.bobadilla@upm.es

Palabras clave: Densidad, NDT, END, inspección, humedad.

Este trabajo desarrolla y valida la última evolución del dispositivo universal Woodex+, para la extracción de viruta y la estimación semi-destructiva de la densidad y la evaluación de calidad en madera de construcción. El estudio surge ante la necesidad de métodos económicos, precisos, fiables y poco invasivos para la caracterización estructural de la madera. Woodex+ representa una mejora significativa respecto a prototipos previos, siendo ahora compatible con cualquier tipo de taladradora comercial y permitiendo el uso de diferentes diámetros de broca, además, es más ligero y resistente gracias a su fabricación mediante sinterizado selectivo por láser con materiales como el nailon y el poliuretano termoplástico. El dispositivo fue probado sobre 60 probetas prismáticas de madera de seis especies comerciales (cuatro coníferas y dos frondosas), con un total de 360 extracciones de viruta con brocas de 8, 7 y 6 mm, a diferentes profundidades manteniendo constante el volumen extraído para garantizar la comparabilidad de resultados. La metodología incluyó el acondicionamiento, extracción y pesaje de virutas, y el análisis estadístico. Los resultados muestran que la densidad estimada a partir del peso de la viruta presenta una alta correlación con la densidad real, alcanzando coeficientes de determinación (R²) superiores al 70% en modelos simples y al 90% en modelos que incorporan la especie como factor, además, se comprobó que la dirección de corte (radial/tangencial) no afecta significativamente la estimación, pero sí el diámetro de la broca, debido a la mayor fragmentación y pérdida de material y de humedad en diámetros menores. En conclusión, Woodex+ se consolida como una herramienta eficaz, económica y precisa para la estimación de la densidad de la madera en obra, permitiendo la aplicación de modelos estadísticos robustos y transferibles a otras especies dentro del rango analizado.

1. Introducción

La madera, material estructural clave en edificaciones sostenibles, requiere metodologías precisas para la estimación de sus propiedades físicas como la densidad. Esta propiedad es fundamental, dado que se relaciona directamente con su resistencia mecánica y durabilidad (1). Tradicionalmente, su medición implicaba ensayos más o menos complejos y destructivos; sin embargo, la necesidad de preservar los elementos constructivos ha impulsado el desarrollo de ensayos no destructivos (END) y semi-destructivos como alternativa eficaz (2).

Entre los END aplicables a madera para la estimación de la densidad, destacan el resistógrafo, el penetrómetro, los ensayos de arranque de tornillos y la extracción de probetas testigo (3-5). En esta línea, el dispositivo Woodex fue diseñado para estimar la densidad mediante la extracción de la viruta generada durante el proceso de taladro de la misma con una broca, desarrollándose varios prototipos que en todos los casos permiten capturar y almacenar la viruta en una bolsa filtro (6-8). La versión actual Woodex+ se acopla a un sistema de aspiración portátil, es compatible con todo tipo de taladradoras y permite el uso de diferentes diámetros de broca.

2. Materiales y método

Se ensayaron 60 probetas de 150x90x65 mm de 6 especies de madera de importancia comercial (10 probetas por especie) de Thuja plicata, Pinus radiata, Pinus pinaster, Pinus nigra, Castanea sativa y Quercus robur. Las extracciones se realizaron en las direcciones radial y tangencial con tres brocas de diámetro 8, 7 y 6 mm, se hicieron en cada probeta dos extracciones por broca. En total, 6 extracciones por probeta. La masa de la viruta extraída se correlacionó con la densidad real de las probetas, obtenida por el método gravimétrico. El dispositivo de recogida de la viruta (Figura 1) fue fabricado mediante sinterizado selectivo por láser, empleando nailon como material principal (9).



Figura 1: A la izquierda,detalle del dispositivo universal Woodex 2.1. A la derecha dispositivo acoplado al aspirador y en posición previa al taladrado

Para el análisis estadístico, se utilizaron modelos de regresión simples y múltiples que incluyeron variables cuantitativas (peso de la viruta) y cualitativas (especie). Se aplicaron pruebas de normalidad, homocedasticidad y linealidad y se realizaron análisis de varianza.

3. Resultados y discusión

Los modelos simples mostraron una buena correlación entre el peso de viruta y la densidad ($R^2 > 70 \%$), con mejores ajustes para la broca de 7 mm. En la Tabla 1 y Figura 2 se presentan los modelos y coeficientes de determinación obtenidos.

Tabla 1. Modelos de estimación de la densidad y coeficientes de determinación para cada diámetro de broca. Dp es la densidad en kg/m³, PvmBNª el peso de la viruta extraída con la bolsa filtro incluida, N° es el diámetro de la broca utilizada en cada caso.

Diámetro broca [mm]	Ecuación ajustada	R²
8	$Dp=1022,23-(811,153/P_{vm}B8)$	0.702
7	$Dp= e^{(7,65867- 2,21523/P_{vm}B7)}$	0.842
	$Dp = 1/(-0,000223741+ (0,0029562/P_{vm}B6))$	0.771

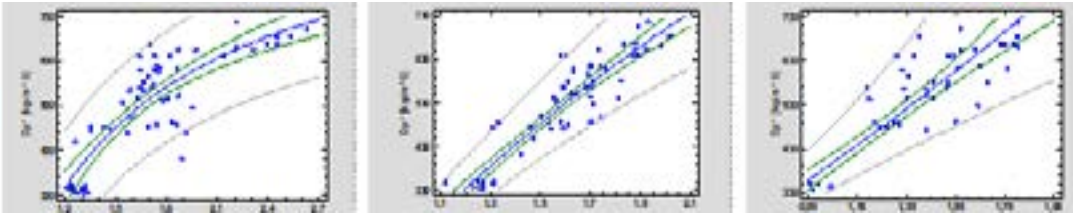


Figura 2: De izquierda a derecha modelos simples de estimación de la densidad con el peso de la viruta con las brocas de 8, 7 y 6 mm.

Dado que a menor diámetro de broca se ha incrementado la profundidad de taladro para mantener constante el volumen extraído, se han detectado mayores pérdidas de masa en los diámetros menores. Esto puede ser debido a un incremento del material fino producido, que puede perderse en el proceso y también al incremento del rozamiento (por la mayor profundidad) y por tanto una mayor pérdida de humedad. Por ello se ha decidido recortar el análisis posterior al diámetro de 8 mm.

Los modelos múltiples para la broca de 8 mm recogidos en la Tabla 2 y la Figura 3, permitieron incorporar el efecto de la especie. Con ello se logra un mejor ajuste, por contrapartida resultaría necesario conocer la especie y que coincida con una de las estudiadas.

Tabla 2. Modelos de estimación de la densidad y coeficientes de determinación por especie para broca de 8 mm. Dp es la densidad en kg/m3, PvmB8 el peso de la viruta extraída con la bolsa filtro incluida. Las ecuaciones individuales se han segregado del modelo común para facilitar su aplicación, por eso el coeficiente de determinación es el mismo en todas.

Diámetro broca 8 mm	Ecuación ajustada	R²
Thuja	$Dp = 403,5121 - 46,886 \cdot PvmB8$	0,927
P. radiata	$Dp = 472,635 + 7,068 \cdot PvmB8$	0,927
P. pinaster	$Dp = 16,945 + 336,248 \cdot PvmB8$	0,927
. nigra	$Dp = 514,444 + 32,1566 \cdot PvmB8$	0,927
Castanea	$Dp = 372,53 + 129,558 \cdot PvmB8$	0,927
Quercus	$Dp = 611,889 + 27,352 \cdot PvmB8$	0,927

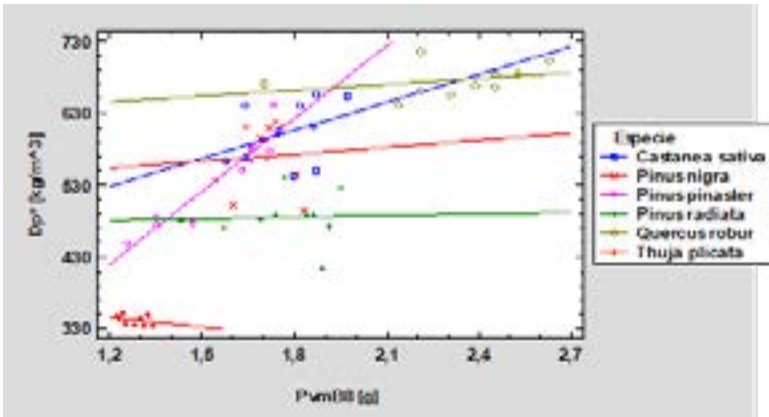


Figura 3: Modelos múlti especie de estimación de la densidad con el peso de la viruta con la broca de 8 mm

En lo que a ergonomía y durabilidad se refiere, el dispositivo resulta sencillo en su uso y cómodo en la aplicación, y no sufrió daños durante las 360 extracciones realizadas, lo que demuestra su resistencia mecánica. Los tiempos de extracción promedio fueron de 75 s por muestra, con desviaciones mínimas.

El rendimiento del Woodex+ confirma por tanto su utilidad como herramienta semi-destructiva para la estimación in situ de la densidad de la madera. La posibilidad de intercambiar brocas y adaptarse a distintas especies refuerza su versatilidad.

Los resultados de este trabajo indican que la broca de 8 mm proporciona mediciones más precisas de la masa extraída, aunque este hecho no es excesivamente importante dado que los modelos de regresión corrigen este problema optimizando el ajuste del modelo a cada tipo de broca.

Frente a métodos como el resistógrafo (peso ≥ 2500 g) o el Pilodyn (peso ≥ 1250 g), el sistema desarrollado ofrece estimaciones más sencillas y precisas de la densidad y, como estos, un impacto visual muy limitado y asumible en la mayoría de los casos. Además, la ligereza del dispositivo (470 g) y su ergonomía permiten su empleo en condiciones de obra y en campañas extensivas de inspección estructural.

Los altos coeficientes de determinación alcanzados validan el enfoque metodológico, y los valores obtenidos por especie coinciden con referencias bibliográficas previas, lo que refuerza la consistencia del método (10–14).

4. Conclusiones

Woodex+ permite estimar la densidad de la madera in situ de manera sencilla, con precisión y con bajo impacto visual.

La mejor respuesta se obtuvo con brocas de 8 mm, cuya extracción produjo virutas más representativas de la masa de la probeta.

Los modelos múltiples mostraron alta capacidad predictiva ($R^2 > 90 \%$), especialmente al incluir la variable especie. Sin embargo, presentan el inconveniente de tener que conocer la especie y que esta coincida con una de las estudiadas.

El diseño mejorado y la fabricación por sinterizado selectivo con láser confiere al dispositivo una mayor resistencia, ligereza y facilidad de uso.

Referencias

(1) García González, S. (2016). *Estimación de la densidad a distintos grados de humedad mediante extracción de virutas* [Proyecto Fin de Grado]. UPM.

(2) Martínez López, R. D. (2016). *Métodos no destructivos de estimación de la densidad de la madera* [Tesis doctoral, Universidad de Santiago de Compostela]. Repositorio Institucional Minerva.

(3) Acuña, L. Barranco, I. Casado, M. (2007). *La técnica resistográfica y la madera estructural*. Conference: Congreso Iberoamericano de productos forestales - Iberomadera Buenos Aires (Argentina)

(4) Bobadilla, I., Esteban, M., Íñiguez, G., Arriaga, F., Ballarín, D., & Palacios, J. (2007). *Estimación de la densidad de la madera aserrada de conífera mediante técnicas no destructivas de arranque de tornillos y penetrómetro y su aplicación en la estimación del módulo de elasticidad*. Informes De La Construcción, 59 (506), 107–116.

(5) Gis Ibérica. (2003). *Penetrómetro PILODYN: aparato de ensayo no destructivo para el control de dureza de la madera*.

(6) Martínez, R., Arriaga, F., Llana, D. F., Gallego, J., & Bobadilla, I. (2015). *NDT to identify biological damage in wood. 19th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium*.

(7) Calvo López, J. (2013). *Estimación de la densidad en maderas de coníferas empleando un taladro convencional* [Proyecto Fin de Carrera]. UPM.

(8) González Martín, A. (2021). *Desarrollo de un nuevo dispositivo universal de extracción de virutas para la estimación de la densidad de 10 especies de madera mediante el uso de taladradora convencional* [Proyecto Fin de Grado]. UPM.

(9) Protolabs. (2022). *Sinterizado Selectivo por Láser (SLS)*. Protolabs.

(10) Requejo Pisa, P. (2021). *Desarrollo y puesta a punto de un nuevo prototipo para la estimación de la densidad de la madera mediante el uso de taladradora convencional* [Proyecto Fin de Grado]. UPM.

51. Edificio de madera de dos plantas y dos vanos como demostrador practicable a escala para ensayos estáticos y dinámicos

Alberto Izquierdo^a, Alejandro Barrio^a, Juan-José Villacorta^a, Lara del Val^a, Antolín Lorenzana^b, Roberto D. Martínez^c
^a ETS Ing. Telecomunicaciones, Universidad de Valladolid. ^b ETS Ing. Industriales, Universidad de Valladolid. ^c ETS Ing. Agrarias, Universidad de Valladolid.
alberto.izquierdo@uva.es

Palabras clave: Sensorización, Monitorización, Pruebas de carga, Identificación modal.

Resumen

Con el fin de estudiar la respuesta estática, modal y dinámica ante distintos estados de carga y en condiciones controladas, se trabaja con el esqueleto estructural de un edificio de planta rectangular y dos alturas, compuesta por seis pilares y dos forjados de madera contralaminada CLT, con vigas y pilares de madera GL24h; y reforzada con cuatro cruces metálicas para mejorar la rigidez.

Al estar ubicada en un entorno controlado, se eliminan variables ambientales externas. La estructura permite simular diferentes condiciones de carga mediante la presencia de personas o la colocación de objetos de diferentes masas. Se utilizan sensores y equipos de registro para analizar su comportamiento ante diferentes tipos de excitaciones. A través del análisis modal experimental y operacional, se obtienen parámetros como frecuencias propias, formas modales y amortiguamientos, lo que permite detectar sobrecargas, daños o cambios estructurales.

introducción

El estudio de estructuras de madera supone un desafío en el campo de la monitorización estructural a causa de la alta variabilidad de sus condiciones; tanto por sus características inherentes (anisotropía que modifica sus propiedades según la dirección), como por las derivadas del entorno (variabilidad ante cambios de humedad, temperatura, etc.). Por ejemplo, dos vigas de madera del mismo tipo y material pueden presentar una dispersión del 20% en sus propiedades mecánicas. Por este motivo, resulta lícito plantear un análisis preliminar, junto a una metodología para la adquisición y procesamiento de datos sobre un modelo a escala, con vistas de poder ser replicado en contextos reales.

En el presente trabajo se muestra el demostrador experimental, consistente en la reproducción de una casa de madera a escala 1:2, que se ha creado como resultado de la colaboración multidisciplinar, en diferentes proyectos de investigación, de tres GIR (Grupos de Investigación Reconocidos) de la Universidad de Valladolid: el Grupo de Procesado en Array (de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación), el Grupo de Estructuras y Tecnología de la Madera (de la Escuela de Arquitectura) y el Grupo de Dinámica Estructural (de la Escuela de Ingenierías Industriales) (1,2).

El punto fuerte de este demostrador experimental es que permite elaborar un entorno de pruebas sobre el que obtener datos similares a los de una estructura real, con el fin de estudiar la respuesta estática, modal y dinámica ante distintos estados de carga y en condiciones controladas; considerando además el desafío subyacente al abordar el estudio de edificaciones de madera. Este tipo de infraestructuras presentan baja rigidez estructural, durabilidad y fiabilidad, debido a la variabilidad de las propiedades mecánicas inherentes a la madera y a su higroscopicidad (3).

Descripción del demostrador

El demostrador experimental construido corresponde a la estructura de un edificio de planta rectangular (5,42 × 3,28 m) y dos niveles, con una altura total de 3,20 m. Está constituido por seis pies derechos, dos forjados de paneles de madera contralaminada (CLT) con configuración 30-20-30 mm (espesor total 80 mm), y las vigas correspondientes. Tanto los pies derechos como las vigas se fabricaron en madera laminada encolada de clase resistente GL24h, con secciones de 140 × 140 mm y 140 × 200 mm, respectivamente. En los paneles de CLT se emplearon como especies *Pinus radiata* D. Don y *Pinus pinaster* Aiton, mientras que en la madera laminada encolada (glulam) se utilizó *Picea abies* (L.) H. Karst. Todos los componentes se unen entre sí mediante los correspondientes tornillos y herrajes. Se completa la estructura con 4 cruces metálicas que arriostran los cuatro recuadros de uno de los diedros en altura. Todas estas características pueden observarse en las Figuras 1, 2 y 3.

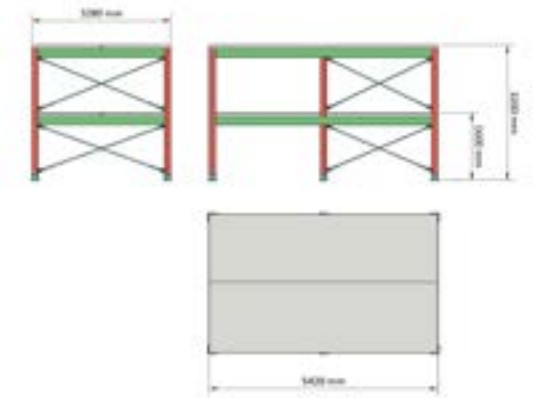


Figura 1: Vista, alzado y perfil del demostrador

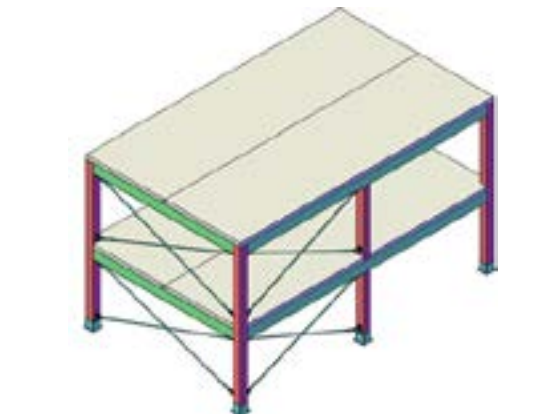


Figura 2: Vista isométrica del demostrador



Figura 3: Fotografía del demostrador. Esqueleto estructural,

Al estar construido el demostrador en el interior de un laboratorio (como puede observarse en la Figura 3), se reducen las indeterminaciones debidas a condiciones ambientales (temperatura, humedad, viento, tráfico...). A pesar de ser de dimensiones reducidas, la estructura puede albergar a varios usuarios, lo que permite estudiar la respuesta de la misma en diferentes condiciones de ocupación. Con el mismo fin, también se pueden disponer hasta 80 masas de 25 kg en distintas ubicaciones de cada forjado, definiendo diferentes escenarios de carga.

En estas condiciones, una vez instalados los sensores y el equipo de registro, se está en disposición de conocer la respuesta ante determinadas excitaciones para cada escenario. Aplicando los algoritmos de identificación basados en el análisis modal experimental y operacional, se pueden extraer estimaciones de los parámetros modales (frecuencias propias, formas modales y amortiguamientos) en cada escenario, habilitando la posibilidad de detectar sobrecargas, cambios estructurales y daños.

Ejemplo de uso/análisis del demostrador

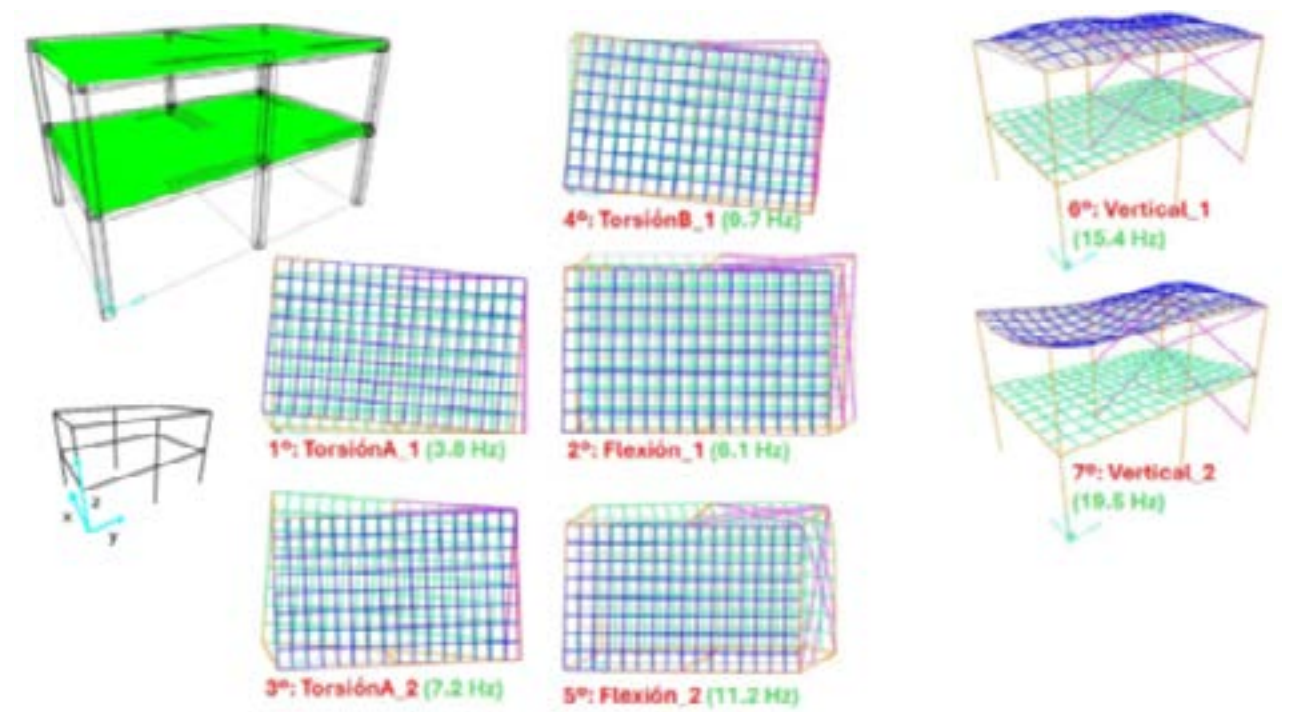


Figura 4: Estudio preliminar de modos de vibración realizado en el demostrador antes de la compactación de los paneles de CLT de los forjados

Dada la complejidad de la estructura considerada, se puede afirmar que su comportamiento es no lineal. Dicha dificultad se potencia por el hecho de que el forjado de cada planta esté formado por dos paneles CLT. Antes de la sensorización que se realizó al demostrador, se unificaron cada uno de los paneles de CLT que conforman cada forjado, para simplificar en cierta medida el comportamiento de la estructura. La Figura 4 muestra un estudio preliminar de los modos de vibración del demostrador antes de la compactación de los paneles de CLT, realizada a partir de tests de vibración forzada (Análisis Modal Experimental: EMA), y que pretendía servir de base a la hora de realizar el análisis modal de la estructura.

El demostrador se ha monitorizado a partir de 8 acelerómetros triaxiales distribuidos entre sus dos plantas, lo cual supone un total de 24 fuentes de información disponibles (vibración en cada uno de los 3 ejes). Junto a ellos, se ha ubicado en la estructura un *shaker* para simular la excitación ambiental que equivaldría a la actividad habitual del edificio (viento, tráfico o movimiento de personas), las cuales serían suficientes para realizar un Análisis Modal Operacional (OMA). Sin dicha excitación añadida, el análisis no sería posible por ubicarse el modelo en un laboratorio subterráneo, aislado de condiciones operacionales. La Figura 5 muestra un esquema de la disposición de los acelerómetros y el *shaker* colocados en la primera planta. La numeración indicada entre paréntesis hace referencia a la ubicación de acelerómetros en la segunda planta, en la que no hay ninguna fuente de excitación.

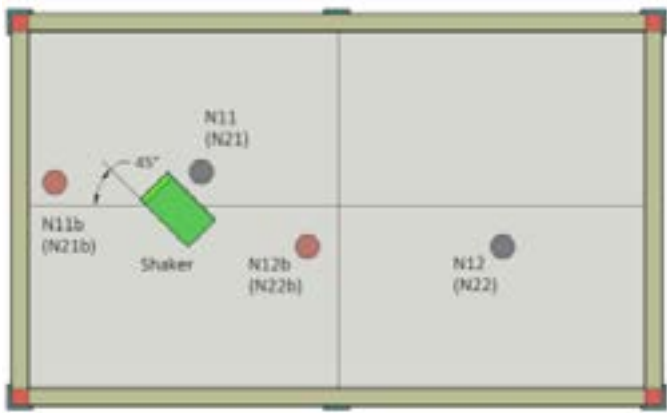


Figura 5: Distribución de sensores en 1º planta del demostrador

Conclusiones

La estructura descrita constituye un modelo experimental idóneo para el estudio del comportamiento estático, modal y dinámico en condiciones controladas. Su diseño permite reproducir distintos escenarios de carga y registrar con precisión la respuesta estructural. Los análisis realizados ofrecen parámetros clave —como frecuencias propias, formas modales y amortiguamientos— que facilitan la detección temprana de sobrecargas, daños o alteraciones, consolidando la utilidad de este prototipo como plataforma de investigación y validación de técnicas de monitorización estructural.

Agradecimientos

Este trabajo está parcialmente financiado por la Agencia Española de Investigación (MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y FEDER “ERDF A way of making Europe”) dentro del proyecto PID2022- 140117NB-I00 y por la Junta de Castilla y Leon con el Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación de la Junta de Castilla y León dentro del proyecto VA134P24.

Referencias

(1) Villacorta, J.J.; del-Val, L.; Martínez, R.D.; Balmori, J.-A.; Magdaleno, Á.; López, G.; Izquierdo, A.; Lorenzana, A.; Basterra, L.-A. Design and Validation of a Scalable, Reconfigurable and Low-Cost Structural Health Monitoring System. *Sensors*. 2021, 21.2.

(2) GIR en Estructuras y Tecnología de la Madera, GIR de Procesado en Array y Grupo de Dinámica Estructural. Structural Health Monitoring. Universidad de Valladolid. Accedido el 09/07/2025: <https://shm.uva.es>.

(3) Brito, Daniela; Santos, Luciano; Santos, Fábio; Scinocca, Francisco. Development of a low-cost structural health monitoring system applied to wooden bridges as a management tool. *Cuaderno Pedagógico*.2025. 22. e14076. 10.54033/cadpedv22n4-127.

52. Validación numérica de la respuesta estática y dinámica de un panel CLT

Patricia Vallelado-Cordobés^a, Jose-Antonio Balmori^a, Álvaro Magdaleno^b, Milagros Casado^c, Luis-Alfonso Basterra^a
^a ETS Arquitectura, Universidad de Valladolid. ^b ETS Ing. Industriales, Universidad de Valladolid. ^c ETS Ing. Agrarias, Universidad de Valladolid.
pvalledado@uva.es

Palabras clave: Madera contralaminada, caracterización de madera estructural, Modelo de Elementos Finitos, ensayos dinámicos, deformación diferida.

Resumen

Se presenta el Model Updating de un panel de madera contralaminada (CLT) a partir de una campaña experimental exhaustiva. El objetivo es ajustar un modelo numérico que reproduzca fielmente la respuesta estática y dinámica del panel para su uso en proyectos de edificación de madera. La estrategia combinada estático-dinámica permite caracterizar con precisión paneles CLT. El modelo digital obtenido muestra una alta correlación con los datos empíricos obtenidos de los ensayos.

Introducción

En las últimas décadas, la construcción con madera y sus productos derivados ha emergido como una estrategia clave en el desarrollo de estructuras sostenibles, debido a sus ventajas medioambientales, su elevada relación resistencia-peso y su potencial para la prefabricación. Entre estos sistemas, la madera contralaminada (CLT) destaca por su comportamiento bidireccional y su adaptabilidad en aplicaciones como forjados y muros portantes.

La caracterización precisa del comportamiento estático y dinámico de los paneles CLT es esencial para optimizar su diseño y garantizar un rendimiento estructural seguro. La naturaleza ortótropa del material, junto con las heterogeneidades derivadas de la disposición de las capas y las condiciones de contorno, exigen un enfoque integrado que combine ensayos experimentales y modelos numéricos avanzados.

El presente estudio propone una caracterización estática y dinámica de un panel CLT de tres capas mediante una campaña experimental complementada con la validación de un modelo numérico en SAP2000. El objetivo es establecer la concordancia entre los resultados experimentales y los obtenidos por modelización, considerando múltiples escenarios de apoyo y cargas.

Materiales y métodos

El panel CLT objeto de estudio consiste en un elemento de tres capas con configuración 0°/90°/0°, dimensiones nominales de 3,00 × 1,80 m y espesor total de 80 mm. Las capas exteriores, alineadas longitudinalmente, tienen un espesor de 30 mm cada una, mientras que la capa intermedia, orientada transversalmente, presenta un espesor de 20 mm. Las especies de madera empleadas son *Pinus radiata* y *Pinus pinaster*, ambas clasificadas mecánicamente como C16 conforme a la norma EN 338 [1].

Para la instrumentación, se dispusieron galgas extensométricas en la zona central del panel, con dos unidades en cada cara para evaluar la repetibilidad de las mediciones. Asimismo, cinco acelerómetros triaxiales se distribuyeron en posiciones estratégicas (véase Figura 1) y un sensor láser se colocó en el punto medio para registrar la deflexión vertical. La adquisición de datos se realizó de forma completamente sincronizada mediante el sistema DewesoftX, permitiendo la monitorización en tiempo real de la calidad de las señales.

Se definieron tres condiciones de contorno para analizar la influencia de los apoyos en la respuesta estructural: apoyo en lados cortos (SFSF), apoyo en lados largos (FSFS) y apoyo en cuatro puntos (4P). Estas configuraciones reproducen escenarios constructivos comunes y permiten evaluar la rigidez y el comportamiento global del panel.

En cada configuración se llevaron a cabo ensayos de carga estática mediante la aplicación escalonada de discos de acero en la zona central. En SFSF se aplicaron cargas de 200, 400 y 600 kg; en FSFS, 300 y 600 kg; y en 4P, 200, 400 y 600 kg en el centro del panel.

Durante cada fase de carga y tras la descarga, se efectuaron ensayos de análisis modal experimental (EMA), aplicando al menos tres impactos con un martillo instrumentado para excitar las vibraciones del panel.

Modelo de elementos finitos

El modelo numérico del panel CLT se desarrolló en SAP2000 con el propósito de reproducir las condiciones experimentales y analizar la respuesta estructural, tanto en régimen estático como dinámico. El panel se representó mediante elementos de placa (shell).

Se exploraron cuatro estrategias de modelización: (i) material isótropo con factores de corrección direccionales, (ii) material ortótropo, (iii) esquema multicapa con capas isótropas y (iv) esquema multicapa con capas ortótropas. La opción (ii) fue seleccionada por ofrecer un equilibrio óptimo entre la fidelidad de la simulación y la eficiencia computacional.

La estimación inicial de las propiedades del CLT se realizó aplicando distintos enfoques:

1. Un análisis estático basado en la deformación máxima (y_{max}), utilizando la teoría clásica de vigas para calcular los módulos de elasticidad E_0 y E_{90} , asumiendo un comportamiento de viga ancha en las configuraciones SFSF y FSFS.

$$y_{m\acute{a}x} = ((F \cdot a) / (24 EI)) (3L^2 - 4a^2)$$

(1)

Donde:

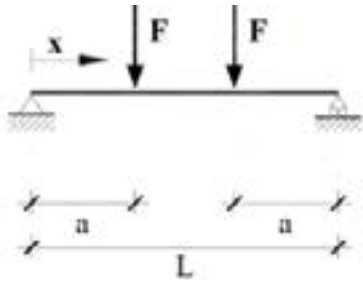


Figura 1. Viga biapoyada con dos cargas puntuales de igual magnitud.

2. La implementación de las formulaciones propuestas por Aranha [2] para la obtención de E_0 , E_{90} y el módulo de cortante G .

$E_{0,CLT} = (E_0 * t_1 + E_{90} * t_2 + E_0 * t_3) / t$	(2)
$E_{90,CLT} = (E_{90} * t + E_0 * t_2 + E_{90} * t_3) / t$	(3)
$G_{CLT} = G_0 / ((1 + 6 * \alpha_T * (t_{medio} / \alpha)^2))$	(4)
$\alpha_T = 0,32 * (t_{medio} / \alpha)^{0,77}$	(5)

Donde t_1 , t_2 y t_3 son los espesores de la primera segunda y tercera capa respectivamente, t es el espesor total del panel CLT, t_{medio} es el espesor medio de las capas y α es el ancho medio de las tablas.

3. Fórmula de la teoría de viga biapoyada con la que obtenemos el valor de E a partir de la frecuencia natural [3]. De nuevo se calculan los valores E_0 y E_{90} considerando que el panel actúa como una viga ancha en los casos SFSF y FSFS. Sólo se calcula con los datos obtenidos del primer modo ya que es el único en el que el panel tiene una forma modal asimilable a una viga biapoyada.

$$E_d = (f_n^2 * 4\pi^2 * w * L^4) / (kn^2 * I) \quad (6)$$

Donde E_d es el módulo de elasticidad dinámico, I es el momento de inercia, w es la masa por metro de viga, L es la luz, k_n es un factor relacionado con el número de modo y f_n es la frecuencia natural del modo n .

4. Fórmula propuesta en el nuevo Eurocódigo [4] con la que se obtiene E a partir de la frecuencia natural

$$f_1 = k_{e,1} * k_{e,2} * (\pi/2)^2 * \sqrt{((EI)_L / m)} \quad (7)$$

Donde $k_{e,1}$ y $k_{e,2}$ son 1 en este caso, I es la luz del panel, $(EI)_L$ es la rigidez del panel por metro de ancho y m es la masa por metro cuadrado del panel.

Se calcula el momento de inercia siguiendo el método gamma y de manera iterativa se obtienen el valor de E .

Se opta por usar de partida el dato de E_0 obtenido a partir de la fórmula del eurocódigo, ya que da un resultado similar a los cálculos estáticos, y los datos de E_{90} y G obtenidos de las fórmulas de Aranha.

Model updating

El proceso de model updating se desarrolló tomando como referencia los resultados experimentales extraídos mediante análisis modal con el software Artemis, para ajustar y calibrar el modelo numérico implementado en SAP2000. Este procedimiento permitió optimizar la representación numérica del comportamiento dinámico del panel CLT bajo diversas condiciones de contorno y niveles de carga.

En la etapa inicial, se introdujeron en el modelo los valores preliminares de E_0 , E_{90} y G obtenidos mediante las aproximaciones analíticas, comprobándose que el primer modo calculado presentaba una correlación notable con la frecuencia del primer modo experimental en la configuración SFSF sin masa añadida. Esta concordancia inicial se tomó como base para fijar E_0 y, a partir de ahí, se procedió a un ajuste iterativo de E_{90} , G y el coeficiente de Poisson. El objetivo fue mejorar la concordancia de las frecuencias naturales y las formas modales para los modos superiores, optimizando la respuesta global del modelo.

Este ajuste secuencial se realizó priorizando la minimización de las diferencias relativas entre las frecuencias experimentales y numéricas, estableciendo como criterio de convergencia una desviación máxima del 5 % en las cinco primeras frecuencias naturales.

Una vez completada la calibración, el modelo ajustado se validó frente a las configuraciones experimentales FSFS y 4P, así como para diferentes niveles de carga. Los resultados mostraron una capacidad predictiva robusta, tanto para la rigidez estática como para la caracterización dinámica del panel.

Conclusiones

El presente estudio ha contribuido a una mejor comprensión de la respuesta estática y dinámica de un panel CLT a través de una metodología combinada de ensayos experimentales y modelización numérica. La aplicación del proceso de model updating ha resultado eficaz para ajustar las propiedades ortótropas del material, logrando una correlación satisfactoria entre las frecuencias naturales observadas experimentalmente y las predicciones obtenidas mediante el modelo de elementos finitos.

Sin embargo, los resultados deben interpretarse dentro de las limitaciones del trabajo. Entre estas se incluyen la simplificación del modelo shell ortótropo en vez de Shell multilayer, la idealización de las condiciones de contorno

y la caracterización dinámica restringida a un único panel con escaso número de acelerómetros y a un número limitado de escenarios de carga y apoyo.

Como etapa futura, se subraya la necesidad de trasladar el análisis a una escala estructural completa, donde el panel CLT forme parte de un sistema constructivo real. Este enfoque permitirá validar la robustez de los métodos de calibración propuestos y comprender la interacción del panel con otros elementos estructurales,

Referencias

(1) UNE-EN 338, Madera estructural. Clases resistentes. 2016.
(2) Aranha C.A. Numerical Assessment of the Seismic Behaviour of Log and Cross-Laminated Timber Systems. *Doctoral Thesis*, Universidade do Minho. 2016.
(3) Meirovitch, L. Fundamentals of Vibrations. McGraw-Hill. 2002.
(4) EN 1995-1-1:2024, Eurocode 5. Design of timber structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings. 2025.

53. Reposición de la caseta de aperos del Parador de San Francisco en la Alhambra de Granada

Virginie Claude Brazille^a, Mikel Cervera Nagore^b, Carlos Benavides de la Fuente^c
^a Arquitecta y Paisajista, virginiabrazille@gmail.com.
^b Ingeniero de Edificación e Ingeniero Acústico, mcervera.1@alumni.unav.es.
^c Ingeniero de Edificación, Iberolam, c.benavides@iberolam.com.

Palabras clave: Arquitectura en madera, vigas laminadas de chopo, madera contralaminada (CLT), Parador de San Francisco, Alhambra, Granada.

Gracias al Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia financiado por la Unión Europea (NextGeneration EU) se elabora el proyecto de ejecución para la actuación de conservación, restauración y puesta en valor del Parador de San Francisco situado en la Alhambra, Granada. Dentro del ámbito de actuación es necesario la rehabilitación de los espacios ajardinados del parador.

Durante la redacción de este proyecto se propone la recuperación de la caseta de aperos situada en los jardines a través de la construcción de un espacio arquitectónico diseñado con madera, haciendo hincapié en la utilización y la promoción de productos de madera autóctona, especialmente el uso de vigas laminadas de chopo procedentes de la Vega de Granada. Se diseña y se calcula una estructura envolvente de madera a través del uso combinado de vigas laminadas de chopo y paneles de madera contralaminada (CLT) revestidos con un sistema de fachada de listones de madera termotratados.

Se consigue construir dentro de un espacio ajardinado histórico un edificio de madera acorde al lenguaje del jardín, en sintonía con él y que logra fusionarse con el paisaje del entorno, minimizando el impacto visual. Se logra la promoción y el uso de nuevos materiales de madera y de los recursos de la zona, junto con el uso de madera natural. Se crea un lugar pedagógico que hace visibles y ayuda en las labores de jardinería, asegurando con la construcción de la nueva caseta de aperos un correcto mantenimiento y participar del equilibrio ecológico de los jardines. Por último, logramos con estas actuaciones reforzar el papel del conjunto monumental de la Alhambra y el Generalife como pulmón del centro de la ciudad de Granada.

Introducción

El Parador de turismo de San Francisco de la Alhambra (Figura 1) se asienta sobre lo que fue el Palacio de los Infantes y que los Reyes Católicos cedieron a los Franciscanos para el establecimiento de su convento1. A lo largo del tiempo sufre numerosas ampliaciones y transformaciones, quedando arruinado a finales del siglo XIX. Es desamortizado y abandonado en 1835, siendo rescatado por Leopoldo Torres Balbás entre 1927 y 1936 para ser convertido en residencia de pintores paisajistas2. Con la declaración como Parador en 1942, adquiere la categoría de Parador Nacional en 1960. Las antiguas huertas del Palacio de los Infantes se convierten poco a poco en jardines que sufrirán a su vez numerosos cambios.



Figura 1. Localización del Parador de San Francisco, en la Alhambra de Granada.

En 2023 y 2024 se redacta un proyecto de restauración y consolidación de elementos puntuales del palacio como la qubba y los baños, la torre del convento y los jardines bajos que discurren desde la punta noroeste hasta la noreste del Parador de San Francisco, ocupando una de las antiguas terrazas de cultivo del Palacio de los infantes. Se trata de una colaboración con la UTE Isabel Aránzazu Bestué Cardiel, Carmen Cañones Gallardo, Rosario Carmona Campos, José Antonio Puertas Contreras.

El proyecto es financiado por el Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia financiado por la Unión Europea (NextGeneration EU). Contempla actuaciones de restauración patrimonial, conservación y puesta en valor de estos espacios con un enfoque medioambiental alineado sobre los ODS-Agenda 20303, y fundamentado sobre las instalaciones eléctricas e hidráulicas eficientes, el fomento de la economía circular, el uso de materiales naturales locales y mejora de los servicios ecosistémicos del lugar.



Figura 2. Vista panorámica desde los jardines bajos del Parador de San Francisco.

2. Objetivos

El primer objetivo de la actuación es la modernización de las infraestructuras del jardín que facilitarán su mantenimiento y conservación. Incluye la restauración de la red de riego por inundación, la instalación de estructuras para las topiarias y la integración de un espacio de triturado y compostaje. Parte de este proyecto se dedica a la reposición de una casa de aperos obsoleta, peligrosa y visualmente impactante en un jardín con carencia de mantenimiento debido a las dificultades de accesibilidad. La compatibilidad de la ejecución de la obra con la visita pública y el bienestar de los huéspedes del Parador implica una construcción rápida y silenciosa.



Figura 3. Jardines bajos del Parador de San Francisco, Proyecto de rehabilitación.

En el Monumento de la Alhambra y Generalife, Patrimonio Mundial de la UNESCO, son fundamentales las cuestiones

de control de impacto visual de la actuación, su inserción en un ámbito patrimonial conforme a la legislación vigente y las cartas de restauro, destacando la Carta de Florencia sobre restauración de jardines históricos⁵. Así, estas instalaciones de mantenimiento se insertan en la estructura del jardín histórico restituyendo el trazado perdido del jardín de los años 1950 diseñado por Francisco Prieto-Moreno Pardo.

El proyecto incluye medidas que minimizan el impacto medioambiental de la actuación a través de la elección de materiales locales, el reciclaje y la mejora de hábitat para la fauna y antomofauna. Se crea un lugar pedagógico, medioambiental y patrimonial, que hace visible el proceso de mantenimiento de un jardín histórico y el arte de la jardinería, ayuda en las labores, asegurando con la construcción de la nueva caseta de aperos un correcto mantenimiento y participación del equilibrio ecosistémico de los jardines. Con este enfoque se quiere reforzar el papel del Conjunto Monumental de la Alhambra y el Generalife como pulmón del centro de la ciudad de Granada.

3. Metodología

La nueva casa de aperos consiste en un módulo desmontable de 21 m² independiente de la tapia del Parador. Se trata de un pequeño elemento arquitectónico parcialmente prefabricado que se divide en diferentes estancias dando respuesta a las necesidades de los jardines:

- Almacén: Espacio para pequeña maquinaria y productos fitosanitarios con fachada de listones de madera que garantice una ventilación permanente.

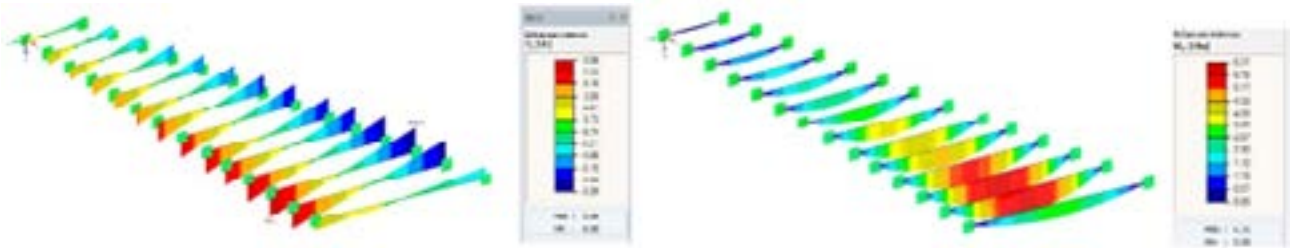


Figura 4. Esfuerzos máximos en situación accidental. Momento máximo Md: 30 min.

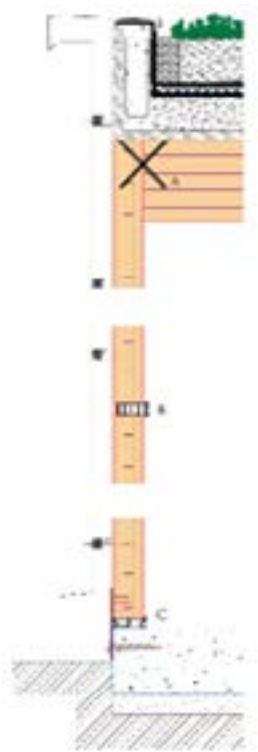
Figura 5. Esfuerzos máximos en situación accidental. Momento máximo Vd: 30 min.

- Local multiusos: Dedicado al personal de jardinería para que pueda comer, cambiarse o redactar partes de trabajo, con ventanales que permitan ventilación cruzada y luminosidad controlada.
- Zona de triturado y compostaje: Incluye tres contenedores dispuestos sobre zahorra natural compactada y

canaletas de evacuación.

En el diseño de esta caseta de aperos de madera de pino cultivado en España y de chopo de la vega de Granada ha colaborado el laboratorio IBEROLAM, spinoff de la Universidad de Granada, que promueve la investigación e innovación, la transferencia de tecnología en la economía con bajas emisiones de carbono, la resiliencia y la adaptación al cambio climático, en el proceso en el marco del Proyecto LIFE Wood for Future⁴.

El espacio arquitectónico se diseña con madera, haciendo hincapié en la utilización y la promoción de productos de madera autóctona, especialmente el uso de vigas laminadas de chopo procedentes de la Vega de Granada. La casa de aperos consta de una única planta, formada por muros de panel de madera contralaminada (CLT) tanto perimetrales como interiores, y una estructura de cubierta mediante vigas de madera laminada encolada de chopo de clase resistente GL20h según UNE-EN 14080. La fachada se soluciona con un sistema envolvente conformado por listones de madera termotratados.



La construcción se retranquea 25 cm respecto al muro perimetral del jardín, alineada con el pasillo central de la primera parata y envuelta por el seto de Buxus sempervirens L., rosales de copa y rosal trepador.

La madera se trabajará en taller mediante prefabricación, lo que garantiza precisión, eficiencia y menor impacto en obra. Los paneles CLT se ensamblarán in situ sobre una solera de hormigón de limpieza, con una excavación mínima de 15 cm que respete el posible estrato arqueológico. La uniones entre paneles longitudinales de CLT se resolverán mediante 3 conectores rígidos con resistencia a corte por cada junta vertical, para considerar el conjunto de paneles unidos como un único panel (Figura 6).

Conexiones:

- A. Unión viga-CLT: dobles parejas de tirafondos cruzados de rosca total, de diámetro 9x200mm de longitud, dispuestos a 45°.
 - B. Conexión junta paneles CLT.
 - C. Conexión a cimentación
- Herrajes a tracción: Herraje HWT PLACE C 440, Anclaje M16x190.
Herrajes de corte: Herraje TITAN PLATE C 200.

Figura 6. Sección constructiva trasversal.

Referencias

(1) Orihuela Uzal, A. Casas y Palacios Nazaríes. Siglos XIII-XV. Col. El Legado Andalusí-Lunwerg Editores, Barcelona. 1996.

(2) Tito Rojo, J. Los jardines de la Alhambra y el Generalife. I. Arte, historia, fantasía. Editorial Universidad de Granada. Junta de Andalucía, Consejería de Cultura y Deporte, Patronato de la Alhambra y Generalife. 2025

(3) “Agenda 2030” (<https://www.miteco.gob.es/es/ceneam/recursos/pag-web/agenda2030-transformadora.html>)

(4) “Candidatura LIFE 20 Wood for Future”, Universidad de Granada.

(5) “Carta de Florencia para la Salvaguardia de Jardines Históricos.” 1982 (https://icomos.es/wp-content/uploads/2020/01/gardens_sp.pdf)

54.

Evaluación de la capacidad termiticida del quitosano contra *Reticulitermes grassei* Clément

Sara M. Santos^a, María Teresa de Troya-Franco^a, Lee Robertson^a, Luis Acuña-Rello^b, Pablo Martín-Ramos^b, Milagros Casado-Sanz^b, Roberto D. Martínez-López^b, Eleana Spavento^c

^a Instituto de Ciencias Forestales (ICIFOR), Instituto Nacional de Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA) – Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Ctra. de La Coruña km 7.5, 28040 Madrid, Spain.

^b Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal, ETSIIAA, Universidad de Valladolid, Avda. Madrid 44, 34004 Palencia, Spain. ^c Laboratorio de Investigación en Madera, LIMAD, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata, Diag. 113 N° 469, La Plata B1904, Argentina.

santos@inia.csic.es

Palabras clave: termitas, nanoplata, quitosano, Reticulitermes grassei.

Resumen

Las termitas son insectos que causan graves daños al invadir cualquier elemento que contenga madera, ya sean edificios o productos agrícolas y forestales. Muchos de los productos utilizados para proteger la madera contienen cobre, cuyo efecto negativo sobre el ecosistema es conocido. Es fundamental encontrar alternativas más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente, teniendo en cuenta que la madera es un importante material de construcción biodegradable y biorrenovable y, como tal, requiere protección. Una de estas sustancias podría ser el quitosano, un polisacárido natural que presenta baja toxicidad para organismos no objetivo, reconocido por su biodegradabilidad y biocompatibilidad, además de por su actividad antimicrobiana. El objetivo de este trabajo fue evaluar la eficacia de oligómeros de quitosano (COS) en comparación con la eficacia ya conocida de nanopartículas de plata (AgNP) para eliminar termitas.

1.- Introducción

Las termitas subterráneas son, junto con los hongos xilófagos, los agentes más agresivos que dañan la madera en uso, contribuyendo a su debilitamiento estructural mediante un doble proceso de masticación mecánica y digestión enzimática de los componentes lignocelulósicos. La mayoría de los productos utilizados para proteger la madera contienen cobre, cuyo efecto negativo sobre el ecosistema es conocido. Es fundamental encontrar alternativas más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente, teniendo en cuenta que la madera es un importante material de construcción biodegradable y biorrenovable y, como tal, requiere protección. Una de estas sustancias podría ser el quitosano, un polisacárido natural que presenta baja toxicidad para organismos no objetivo, reconocido por su biodegradabilidad y biocompatibilidad, además de por su actividad antimicrobiana. Se utiliza en diversos campos, como la medicina, la farmacia, la cosmética, el textil, la nutrición y la agricultura. La capacidad antifúngica del quitosano es ampliamente conocida, empleado solo o en combinación con nanopartículas, consigue mejorar la resistencia de la madera frente a hongos xilófagos con resultados prometedores (1, 2). También existen estudios que indican que el quitosano es un insecticida eficaz, con una mortalidad del 15 al 100%, dependiendo de la especie. Esta actividad insecticida parece estar relacionada con el efecto antimicrobiano del quitosano, que afecta la función de la microbiota intestinal de los insectos (3, 4). En algunos estudios (5, 6) se observó que el quitosano causó una mortalidad entre distintas especies de *Reticulitermes* de entre el 90 y el 94%, concluyendo que las termitas del grupo control mostraron diez especies de protistos en el intestino grueso, mientras que en los especímenes tratados con quitosano la presencia de protistos se redujo a dos especies. En esta línea se ha observado que el quitosano interfiere con la alimentación de las termitas, modificando la capacidad de los protistos simbióticos en su tracto digestivo, observando un aumento en la mortalidad de las termitas en comparación con el grupo control si se alimentaron con papel molido impregnado con quitosano (45 y 80% de mortalidad, respectivamente). También influye el quitosano en la estructura de la comunidad bacteriana intestinal de las termitas (7).

El objetivo de este trabajo fue evaluar la eficacia de oligómeros de quitosano en comparación con la eficacia ya conocida de nanopartículas de plata para eliminar termitas.

2.- Materiales y Métodos

2.1.- Material Biológico

La evaluación de la capacidad biocida de los productos ensayados se realizó utilizando *Reticulitermes grassei* Clément como material biológico. Esta es la especie de termita subterránea más común en España y los especímenes se obtuvieron del criadero del laboratorio de Protección de Maderas del ICIFOR-CSIC.

2.2.- Oligómeros de Quitosano (COS) y Nanopartículas de Plata (AgNP)

Los COS se produjeron mediante degradación enzimática (8) con ajustes (9, 10), disolviendo 100 g de polvo de quitosano de alto peso molecular (310 000–375 000 Da) en 5000 ml de agua Milli-Q incorporando 100 g de ácido cítrico con agitación continua a 60 °C. Tras la disolución completa, se añadieron 1,67 g·L⁻¹ de Neutrase® para iniciar la degradación de las cadenas poliméricas, agitando a 40-60 °C durante 12 h. ultrasonizando 5 min en periodos de 1 min. Se obtuvo una disolución final con un pH de 4,5-5 y un peso molecular inferior a 2000 Da. Las AgNPs se sintetizaron mediante ultrasonidos. El proceso consistió en mezclar 0,08 g de nitrato de plata con 200 ml de solución de *Chamaemelum nobile* (5 % v/v) como agente reductor. La mezcla se agitó y calentó a 40-60 °C bajo luz ultravioleta hasta que la solución pasó de incolora a amarilla (pH = 4,5-5), momento en que se sometió a ultrasonidos durante 3-5 minutos y se dejó reposar 24 horas en un refrigerador a 5 °C. Siguiendo la normativa correspondiente, se preparó una cantidad suficiente de la solución de mayor concentración para COS y para AgNP, con el objetivo de generar, mediante dilución, una serie de cinco concentraciones distribuidas en torno al valor tóxico previsto. Las concentraciones para AgNP, siguiendo el método de referencia de EUCAST (11), se seleccionaron en base a estudios previos (2, 12).

2.3 Método

Se evaluaron cinco concentraciones de COS (1,25; 2,5; 5,0; 10 y 20 g.L⁻¹) y cinco de AgNP (0,25; 0,5; 1,0; 2,0 y 4,0 ppm). Para determinar el efecto de los productos sobre las termitas, se impregnaron discos de papel de filtro de 5 mm de diámetro (Whatmann grado 4) con 200 µl de cada producto a las concentraciones preparadas y se dejaron secar a temperatura ambiente. Posteriormente, se seleccionaron 3 obreros de la colonia de termitas *Reticulitermis grassei* Clément del ICIFOR-CSIC y se añadieron a placas de Petri de 6 cm de diámetro que contenían arena de mar humedecida y los discos impregnados. Se realizaron 3 repeticiones por concentración. Los controles fueron discos de celulosa con 200 µl de agua destilada estéril. Todas las placas se introdujeron en el criadero acondicionado a 28 °C y 80 % de humedad relativa durante el ensayo, contando el número de termitas supervivientes cada tres días durante un mes, para observar el efecto letal de cada producto. Se calculó la tasa de supervivencia de las termitas en cada caso.

3.- Resultados y Discusión

El número de termitas vivas según el producto utilizado se muestra en las figuras 1 (AgNP), 2 (COS) y 3 (control).

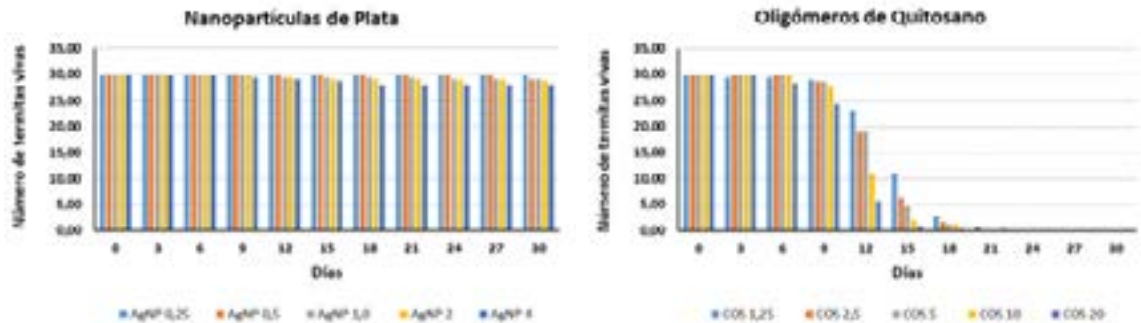


Figura 1. Número de termitas vivas en función del tiempo y de la concentración de las nanopartículas de plata (0,25; 0,5; 1,0; 2,0 y 4,0 ppm).
Figura 2. Número de termitas vivas en función del tiempo y de la concentración de los oligómeros de quitosano (1,25; 2,5; 5,0; 10,0 y 20,0 g.L⁻¹).

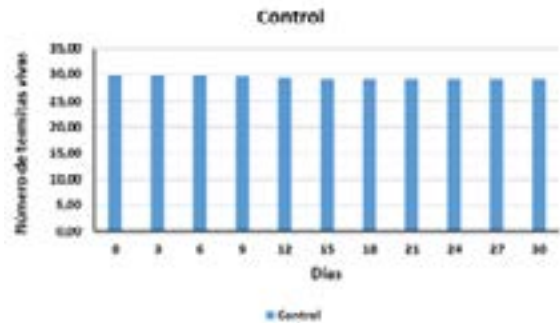


Figura 3. Número de termitas vivas en función del tiempo en ensayo control.

En cada caso la tasa de supervivencia de las termitas fue calculada con la ecuación (1):

Tasa de supervivencia= (Número de Termitas Vivas)/30 x 100 (1)

Siendo los resultados de las tasas de supervivencia los siguientes (tabla 1):

Tabla 1. Tasa de supervivencia

Producto	Tiempo (días)										
	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
AgNP 0,25	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
AgNP 0,50	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	96,7
AgNP 1,00	100,0	100,0	98,9	98,9	97,8	97,8	97,8	97,8	96,7	96,7	96,7
AgNP 2,00	100,0	100,0	100,0	100,0	97,8	96,7	96,7	96,7	96,7	96,7	95,6
AgNP 4,00	100,0	98,9	98,9	97,8	96,7	95,6	93,3	93,3	93,3	93,3	93,3
COS 1,25	100,0	97,8	97,8	96,7	76,7	36,7	8,9	2,2	0,0	0,0	0,0
COS 2,50	100,0	100,0	100,0	95,6	63,3	21,1	5,6	0,0	0,0	0,0	0,0
COS 5,00	100,0	100,0	100,0	95,6	63,3	15,6	4,4	0,0	0,0	0,0	0,0
COS 10,00	100,0	100,0	100,0	92,2	36,7	6,7	4,4	0,0	0,0	0,0	0,0
COS 20,00	100,0	100,0	94,4	81,1	18,9	3,3	1,1	1,1	0,0	0,0	0,0
Control	100,0	100,0	100,0	98,5	97,8	97,0	97,0	97,0	97,0	97,0	97,0

4.- Conclusiones

La tasa de supervivencia de las termitas a las tres semanas alcanzó prácticamente el 0% cuando los discos de papel se impregnaron con quitosano, mientras que, en el caso del control, la supervivencia superó el 97% en ese momento. Estos hallazgos amplían las posibles aplicaciones del quitosano como termiticida ecológico.

Referencias

(1) Casado, S.; Silva, C.; Ponce, H.; Martín, R.; Martín, G.; Acuña, R. White-rot fungi control on populus spp. Wood by pressure treatments with silver nanoparticles, chitosan oligomers and propolis. *Forests* 2019, 10, 885.
(2) Silva-Castro, I.; Casados-Sanz, M.; Alonso-Cortés, A.; Martín-Ramos, P.; Martín-Gil, J.; Acuña-Rello, L. Chitosan-based coatings to prevent the decay of Populus spp. wood caused by *Trametes versicolor*. *Coatings* 2018, 8, 415.
(3) Zhang, Linkun., et al. Synthesis of AzPhkitosan-bifenthrin-PVC to protect cables against termites. *Carbohydrate Polymers*, 2016, 139, 50-60.
(4) Raji, O.; Tang, J.D.; Telmadarrehei, T.; Jeremic, D. Termiticidal activity of chitosan against the subterranean termites *Reticulitermes flavipes* and *Reticulitermes virginicus*. *Pest. Manag. Sci.* 2018, 74, 1704–1710.

(5) Telmadarrehei, T.; Tang, D.J.; Raji, O.; Rezazadeh, A.; Jeremic, D. Effect of chitosan on diversity and number of protists in subterranean termites. In Proceedings of the 114th Annual Meeting of the American Wood Protection, Seattle,WA, USA, 2018; Volume 114, pp. 49–59.

(6) Muryeti, M.; Faraqh, E.P.; Risqi, T.Y.; Estuti, B.M. Termiticidal activity of chitosan on paper. *Progress on Chemistry and Application of Chitin and its Derivatives*, Volume XXV, 2020.

(7) Telmadarrehei, T.; Tang, J.D.; Raji, O.; Rezazadeh, A.; Narayanan, L.; Shmulsky, R.; Jeremic, D. A Study of the Gut Bacterial Community of Reticulitermes virginicus Exposed to Chitosan Treatment. *Insects* 2020, 11, 681.

(8) Buzón-Durán, L.; et al. Antifungal agents based on chitosan oligomers, E-polylysine and *Streptomyces* spp. secondary metabolites against three *Botryosphaeriaceae* species. *Antibiotics* 2019, 8, 99.

(9) Ho, K.W.; Ooi, C.W.; Mwangi, W.W.; Leong, W.F.; Tey, B.T.; Chan, E.-S. Comparison of self-aggregated chitosan particles prepared with and without ultrasonication pretreatment as Pickering emulsifier. *Food Hydrocoll.* 2016, 52, 827–837.

(10) Santos-Moriano, P.; Fernandez-Arrojo, L.; Mengibar, M.; Belmonte-Reche, E.; Peñalver, P.; Acosta, F.N.; Ballesteros, A.O.; Morales, J.C.; Kidibule, P.; Fernandez-Lobato, M.; et al. Enzymatic production of fully deacetylated chitooligosaccharides and their neuroprotective and anti-inflammatory properties. *Biocatal. Biotransform.* 2018, 36, 57–67.

(11) Gokce, Y.; Cengiz, B.; Yildiz, N.; Calimli, A.; Aktas, Z. Ultrasonication of chitosan nanoparticle suspension: Influence on particle size. *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.* 2014, 462, 75–81.

(12) Silva-Castro, I.; Martín-García, J.; Diez, J.J.; Flores-Pacheco, J.A.; Martín-Gil, J.; Martín-Ramos, P. Potential control of forest diseases by solutions of chitosan oligomers, propolis and nanosilver. *Eur. J. Plant Pathol.* 2017, 150, 401–411.

55. Lilu’s House: vivienda, empresa y living lab

Pere Linares^a, Laia Haurie^b, Antonio Ortiz^b, Inma Rodriguez Cantalapiedra^b
^a House Habitat Biopasiva, C/ Sant Miquel 28, Abrera 08630. ^b Escuela Politécnica Superior de Edificación de Barcelona (EPSEB), Universitat Politècnica de Catalunya, Av. Doctor Marañon 44, Barcelona 08028.
laia.haurie@upc.edu

Palabras clave: entramado ligero, CLT, passivhaus, monitorización.

Resumen

Lilu’s House es un edificio de madera certificado Passivhaus Plus situado en la provincia de Barcelona a los pies del macizo de Montserrat. Además de ser el primer edificio de madera de Cataluña con esta certificación, lo que hace especial el proyecto Lilu’s House es su triple función como vivienda, sede de la empresa House Habitat Biopasiva y un banco de datos y espacio para la experimentación abierto a los colaboradores del proyecto, entre los cuales se encuentran investigadores de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).

1. Introducción

La filosofía de Lilu’s House se fundamenta en los principios de la bioconstrucción y la biohabitabilidad, entendidas como herramientas para crear espacios eficientes, de bajo impacto ambiental y, sobre todo, saludables para sus ocupantes. El proyecto aplica criterios de arquitectura biofílica, promoviendo la conexión visual y sensorial con el entorno natural, e integrando soluciones constructivas que minimizan la presencia de contaminantes químicos. Asimismo, la selección de los materiales se ha realizado conforme a los estándares de bioconstrucción, priorizando productos naturales, renovables, locales, no tóxicos y de alta durabilidad, que contribuyen tanto al confort higrotérmico como a la economía circular [1].

El impulso de la construcción industrializada en madera representa una de las vías más eficaces para afrontar los retos de sostenibilidad, descarbonización y eficiencia en el sector de la edificación [2]. Lilu’s House, ubicada en Abrera (Barcelona), constituye un ejemplo pionero en Cataluña que integra la industrialización en madera, los estándares Passivhaus Plus y criterios avanzados de salud interior.

Además de funcionar como vivienda y sede de empresa, Lilu’s House actúa como un living lab, facilitando la experimentación y el análisis de su desempeño en condiciones reales, en colaboración con la Escuela Politécnica Superior de Edificación de Barcelona de la Universitat Politècnica de Catalunya (EPSEB-UPC) y otros agentes.

2. Proceso Constructivo Industrializado

Lilu’s House fue diseñada por el arquitecto Oriol Martínez con un estudiado diseño bioclimático. Combina entramado ligero y paneles de madera contralaminada (CLT) provenientes de bosques gestionados de forma sostenible en los Pirineos. Este sistema mixto se prefabricó parcialmente en taller, permitiendo un control de calidad exhaustivo, reducción de residuos y optimización de los tiempos de ejecución [3]. La Fig. 1 muestra una imagen del proyecto finalizado.



Fig. 1: Lilu’s House. Abrera (Barcelona), España. (Fuente: [3])

El proceso de fabricación y construcción industrializada, llevado a cabo por la empresa Egoín, permitió completar el montaje de la estructura y la cubierta de Lilu’s House en tan solo 5 días, un plazo excepcionalmente corto que demuestra la eficacia y viabilidad de este modelo constructivo en el ámbito residencial. La obra en su conjunto se finalizó en un periodo aproximado de 4 a 5 meses, significativamente inferior a los plazos tradicionales en edificaciones de características similares.

Este sistema constructivo aporta ventajas notables en varias dimensiones. La reducción de los plazos de ejecución implica no solo un ahorro económico, sino también una menor exposición de la obra a las inclemencias meteorológicas, lo que mejora la seguridad y facilita la logística en el entorno de trabajo. Además, la optimización de los recursos y la planificación previa permiten minimizar la generación de residuos y reducir el impacto ambiental inmediato sobre el entorno.

Por otra parte, el uso predominante de materiales de origen local, naturales y renovables, contribuye al fomento de la economía circular y a la valorización de los recursos forestales del territorio, cerrando el ciclo productivo y reduciendo la huella ecológica asociada al transporte de materiales.

3. Salud Interior y Calidad Ambiental

El enfoque de Lilu’s House responde a los estándares más exigentes de biohabitabilidad y bioconstrucción, asegurando que el ambiente interior no solo sea confortable, sino también seguro para la salud de los ocupantes. La elección de los materiales ha sido un factor clave, donde se ha priorizado el uso de productos naturales, renovables, locales, inocuos y duraderos, coherentes con los criterios promovidos por House Habitat. Esta selección permite reducir significativamente las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COVs), formaldehídos y otros contaminantes, al tiempo que contribuye a la regulación natural de la humedad y la temperatura.

El edificio incorpora un sistema de monitorización ambiental que registra de forma continua variables clave para la salud y el confort interior, tales como la temperatura y la humedad relativa, la concentración de CO₂, la presencia de formaldehídos y COVs, así como los consumos energéticos y la generación fotovoltaica.

Los datos de monitorización en condiciones de verano extremo, con temperaturas exteriores de hasta 38 °C y humedades del 37 %, muestran que el interior se mantiene dentro de los rangos de confort: aproximadamente 24 °C en planta primera y 23 °C en planta baja con humedades entre el 45 % y el 60 %.

En cuanto a los valores de contaminación interior, éstos se sitúan muy por debajo de los límites establecidos, con concentraciones de CO₂ entre 431 y 556 ppm, lo que garantiza niveles muy inferiores a los 900 ppm que marca el Código Técnico de la Edificación [4] y los 600 ppm recomendados por los estándares de bioconstrucción y la Baubiologie [5]. En cuanto a los compuestos orgánicos volátiles (COVs), las mediciones muestran valores máximos de 290 µg/m³, dentro del umbral de 300 µg/m³ sugerido por los criterios internacionales de espacios saludables y los principios de bioconstrucción. Finalmente, los niveles de formaldehídos en las estancias oscilan entre 17 y 20 µg/m³, lo que no sólo cumple con los requisitos de la bioconstrucción según el estándar Baubiologie, que establece un límite óptimo de 20 µg/m³, sino que también queda ampliamente por debajo del valor límite recomendado por la Organización Mundial de la Salud (62 µg/m³ para interiores) [6].

Los sensores de ventilación reflejan también el control térmico y de humedad en el sistema de climatización. A modo de ejemplo, en una jornada de verano del mes de julio, se registraron valores de humedad en el aire de entrada a la batería del 72 %, aumentando al 100 % tras su paso por la batería de intercambio térmico. La temperatura del aire exterior en ese momento era de 26,5 °C y se redujo a 18 °C tras el acondicionamiento en el sistema. Asimismo,

la humedad interior del aire impulsado alcanzó el 66 %, y la temperatura media del aire impulsado a las distintas estancias se situó entre los 19 °C y los 21 °C.

Estos datos evidencian la capacidad del sistema de mantener el confort interior incluso en condiciones climáticas exteriores adversas, gracias a la sinergia entre la envolvente de madera, la ventilación mecánica eficiente y los materiales saludables.

4. Sistema de Climatización, Ventilación y Energía

Lilu’s House está equipada con un sistema Siber de ventilación mecánica de doble flujo con recuperación de calor (HRS), una bomba de calor aerotérmica y generación fotovoltaica integrada en cubierta mediante teja fotovoltaica. Los datos de monitorización reflejan que, a pesar de las marcadas oscilaciones de temperatura exterior entre verano e invierno (con inviernos fríos y veranos cálidos propios del clima mediterráneo), el consumo energético del sistema se mantiene constante y bajo a lo largo del año.

Durante el periodo monitorizado, las temperaturas exteriores oscilaron entre valores mínimos inferiores a 0 °C en invierno y máximas superiores a 35 °C en verano. A pesar de ello, la temperatura interior se ha mantenido dentro de los rangos de confort establecidos (20-25 °C), gracias al alto nivel de hermeticidad (n50 ≈ 0,6 ACH a 50 Pa) y la eficiencia del sistema de climatización.

El sistema de ventilación, con un caudal de 288 m³/h y un consumo eléctrico bajo de 0,188 kW, consigue reducir la temperatura del aire exterior (34 °C) a valores de confort antes de su impulsión, garantizando un ambiente interior estable.

Los datos energéticos muestran un consumo promedio anual para calefacción y refrigeración inferior a 15 kWh/m²·año, con una producción fotovoltaica anual estimada superior a 60 kWh/m²·año. Durante el año 2024, Lilu’s House alcanzó un consumo energético total de 8,62 MWh, de los cuales el 41 % se cubrió mediante autoproducción y el 59 % restante se importó de la red (Fig. 2A). La instalación fotovoltaica generó un total de 8,45 MWh, de los cuales el 41 % se destinó a autoconsumo y el 59 % se exportó a la red, mostrando un equilibrio casi neutro entre lo importado y lo exportado (Fig. 2B). La distribución mensual muestra una generación solar superior al consumo en los meses de primavera y principios de verano y un mayor consumo importado en invierno (Fig. 2C). Este comportamiento energético permitió un ahorro económico anual de 1.690,86 €, equivalente al 41 % de la factura eléctrica, y una reducción de emisiones de CO₂ de 3.550,82 kg, equivalente a plantar más de 59 árboles.

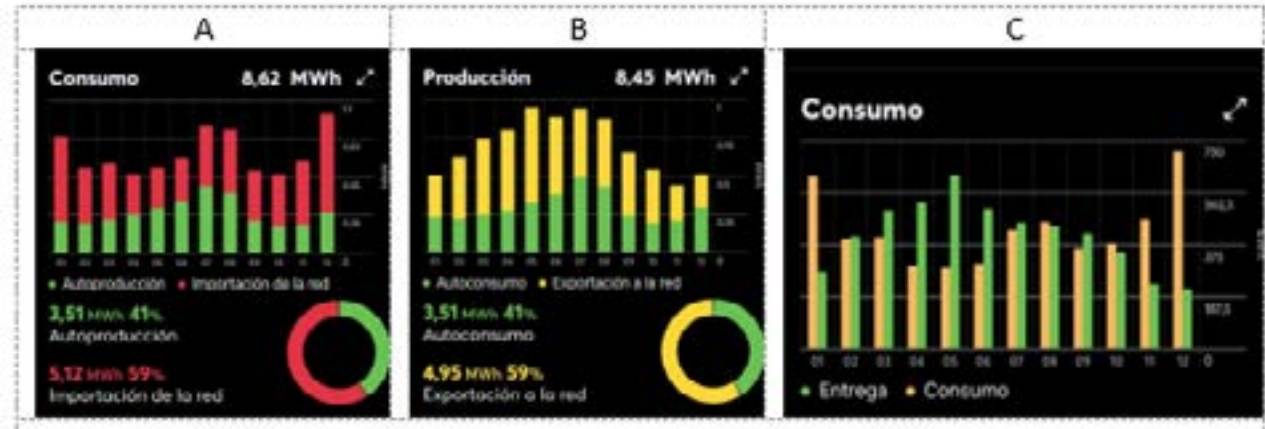


Fig. 2: Balance energético anual de Lilo's House durante los meses del año 2024. (A): Consumo total indicando la proporción cubierta por autoproducción (verde) e importación desde la red (rojo). (B): Producción fotovoltaica con distinción entre la energía autoconsumida (verde) y exportada a la red (amarillo). (C): Comparación mensual entre consumo total e importación a la red.

La monitorización continua Loxone diseñada por el ingeniero John Kregel, permite comprobar cómo la temperatura interior y los parámetros de confort se estabilizan, mientras que el consumo energético permanece reducido y constante, validando así la eficacia del diseño Passivhaus Plus y la combinación de soluciones activas y pasivas.

5. Resultados Preliminares y Perspectivas

El living lab que representa Lilo's House permite recopilar datos valiosos sobre los beneficios de la industrialización en madera y su impacto en la salud interior. Los primeros resultados de monitorización evidencian condiciones de confort y salubridad alineadas con los estándares más exigentes, así como la estabilidad del consumo energético anual gracias al sistema de climatización y ventilación de alta eficiencia.

Este caso refuerza la viabilidad técnica, ambiental y social de la combinación madera-industrialización-salud, abriendo la puerta a su replicabilidad en otros contextos. La colaboración entre la empresa constructora, la universidad y los proveedores tecnológicos resulta esencial para consolidar este modelo.

Referencias

(1) V. Echarri-Iribarren, J. Roviras-Miñana y R. Gómez-Val, «Heat recovery units in Passivhaus housing on the Spanish Mediterranean coast: Energy efficiency and return on investment,» Buildings, vol. 14, nº 3975, 2024.

(2) Comisión Europea, «EPBD. Energy Performance of Buildings Directive 2024 EU/2024/1275,» Acceso online: https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/?uri=OJ:L_202401275&pk_keyword=Energy&pk_content=Directive, (18 de septiembre de 2024).

(3) B. House Habitat, Lilo's House, <https://www.househabitat.es/hogar-saludable/los-materiales/>, 2025.

(4) Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (España), «Código Técnico de la Edificación. Documento Básico HS3: Calidad del aire interior,» Acceso online: <https://www.codigotecnico.org/index.php/menu-documentos-basicos/hs-salubridad.html>, (7 de julio de 2025).

(5) Institut für Baubiologie + Nachhaltigkeit IBN, «Standard der Baubiologischen Messtechnik (SBM-2015). Richtwerte für Schlafbereiche,» Acceso online: <https://www.baubiologie.de/>, Rosenheim, Alemania, 2015.

(6) Organización Mundial de la Salud (OMS), «Guidelines for Indoor Air Quality: Selected Pollutants,» Regional Office for Europe. Acceso online: https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0009/128169/e94535.pdf, Copenhagen, 2010.

(7) Organización Mundial de la Salud (OMS), «WHO Guidelines for Indoor Air Quality: Selected Pollutants,» WHO Regional Office for Europe. Acceso online: https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0009/128169/e94535.pdf, Copenhagen, 2010.

56. Actuación integral de reparación de la estructura de madera del Centro de Visitantes El Dornajo del Parque Nacional de Sierra Nevada

Carlos Benavides^a, Alfonso Bermejo^b, Carlos Cruz^c, Luís I. Durán^d, Miguel Fernández^a, Antolino Gallego^c, Francisco Rescalvo^c
^a Iberolam Timber&Technology, Granada. ^b Abba Arquitectura, Granada. ^c UIMA-Universidad de Granada. d Limoral Ebanistería y Carpintería, Granada.
c.benavides@iberolam.com

Palabras clave: Madera contralaminada, chopo, pino, flexión, delaminación.

Actualmente, los paneles de madera contralaminada (CLT) se elaboran con pino de diferentes especies (radiata, pinaster) y píceas. Este producto ha impulsado la construcción en altura en las estructuras de madera. El CLT es llamado un producto de madera masiva, que junto con la tendencia actual de crecimiento del mercado al 300%, ejerce una presión sobre el recurso maderero. Este estudio evalúa la viabilidad estructural de especies locales de España como el chopo (Populus x euramericana) de rápido crecimiento y su combinación en sección con el pino laricio (Pinus nigra), de altas propiedades mecánicas.

A través de una colaboración entre UIMA (Unidad de Investigación de la Madera Estructural de Andalucía, Granada, España) y LaBoMap (Paristech, Campus de Cluny, Francia) se ha realizado una evaluación mediante métodos no destructivos (END) y destructivos (ED) a flexión de diferentes configuraciones monoespecie y combinadas en paneles de 3 capas (20/20/20). En el caso de los paneles multiespecie, se ha evaluado el uso del pino bien en las capas externas (máxima tracción y compresión), así como únicamente en la parte traccionada o comprimida. Los END por resonancia longitudinal indicaron una disminución del módulo de elasticidad dinámico en los paneles del 30% con respecto de las tablas de origen, debido al carácter ortogonal de este producto. A flexión a 4 puntos, los paneles monoespecie de pino y mixtos pino-chopo-pino mostraron incrementos de resistencia del 15,4% y 23,1%, respectivamente, en comparación con los de chopo. Las configuraciones mixtas combinaron una mayor rigidez con una reducción de peso, optimizando el aprovechamiento de ambas especies. Los ensayos de delaminación verificaron el cumplimiento normativo de los planos de encolado, así como la excelente impregnabilidad del chopo.

57. 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, Juan Franquelo Soler^b
^a Departamento de Física Aplicada, Universidad de Granada.
^b Departamento de Ingeniería Gráfica, Diseño y Proyectos, Universidad de Málaga.
lazuli@uma.es

Palabras clave: Construcción industrializada en madera, sostenibilidad, huella de carbono, comportamiento acústico, edificación en altura.

Resumen

Se presenta un sistema de forjado en seco con capa de masa granular encapsulada, destinado a edificaciones residenciales plurifamiliares con luces de hasta cinco metros. La propuesta combina viguetas de madera laminada, panel tricapa colaborante y masa seca encapsulada, partiendo de desarrollos recientes en Andalucía con especies locales como el chopo y el pino laricio. El sistema busca ofrecer una alternativa estructural, acústica y ambientalmente eficiente frente al hormigón, cumpliendo los requisitos del CTE. Los cálculos verifican su resistencia, rigidez y aislamiento acústico, demostrando que una ejecución completamente en seco puede igualar o superar el rendimiento de soluciones más pesadas. Se concluye que el sistema es una solución viable y de altas prestaciones para estructuras ligeras de madera en edificación colectiva.

Introducción

El sector de la edificación genera una parte significativa de las emisiones de gases de efecto invernadero en Europa y consume grandes cantidades de energía. En este contexto, la madera ha resurgido como material estructural por su capacidad de almacenar carbono, su origen renovable y su idoneidad para procesos industrializados. En Andalucía, el proyecto Life Wood for Future ha promovido sistemas constructivos con madera local, como el chopo y el pino laricio, junto con tecnologías prefabricadas [1].

Uno de sus avances ha sido un sistema híbrido madera-hormigón, eficiente estructuralmente, pero con una huella de carbono aún relevante (Díaz, 2020) [2]. Como alternativa, se han explorado forjados completamente en madera con viguetas y paneles tricapa, más limpios y compatibles con la industrialización, aunque con limitaciones acústicas.

Este trabajo plantea una mejora mediante la incorporación de una capa de masa granular encapsulada sobre el tablero colaborante, que aumenta la masa superficial y mejora el aislamiento acústico y el control de vibraciones, sin recurrir a soluciones húmedas. Los forjados ligeros enfrentan dificultades para cumplir el DB-HR del CTE, especialmente en aislamiento entre unidades residenciales, lo que justifica soluciones secas basadas en materiales pesados desacoplados. El sistema propuesto se valida técnica y normativamente para luces de 5,00 m.

Revisión bibliográfica

En la última década, España ha avanzado significativamente en el uso de madera estructural. Regiones como Galicia, País Vasco, Navarra y Cataluña han liderado este desarrollo, impulsado por políticas públicas, fondos europeos y una industria forestal consolidada. Guindos (2015) [1] destacó la expansión del CLT, Glulam y LVL en proyectos residenciales y terciarios, consolidando soluciones estructurales en altura íntegramente en madera. XERA (2022) [3] vincula este avance con políticas europeas de descarbonización. En Andalucía, el progreso ha sido más reciente, destacando el proyecto Life Wood for Future, que validó el uso estructural del chopo y el pino laricio. Uno de sus logros fue un sistema híbrido de forjado con viguetas de madera y losas de hormigón pretensado. No obstante, Fernández (2022) [4] advierte que el hormigón limita la prefabricación total, conserva una alta huella de carbono y requiere maquinaria pesada.

Como alternativa, se han propuesto forjados completamente secos en madera, con viguetas laminadas y paneles tricapa Solid Wood Panel (SWP). Aunque simplifican el montaje, su baja masa y rigidez reducen el aislamiento acústico. Este trabajo plantea un sistema optimizado con panel tricapa colaborante y capa de masa granular encapsulada, que mejora notablemente el aislamiento acústico y las vibraciones, manteniendo ligereza y ejecución en seco.

Metodología

El análisis se estructuró en dos fases: una primera de revisión normativa y caracterización técnica de forjados ligeros en edificación residencial, y una segunda dedicada al diseño y validación de una solución optimizada con masa granular encapsulada.

En la fase inicial se estudiaron los sistemas más comunes compuestos por viguetas laminadas, tableros OSB o tricapa y capas superiores de uso. Se identificaron los factores clave que afectan a la resistencia, rigidez, deformación y aislamiento acústico, según el CTE (DB-SE y DB-HR), así como normas europeas como el Eurocódigo 5, EN ISO 10140 y UNE-EN 12354. Se incluyeron también criterios energéticos y ambientales basados en los estándares Passive House y nZEB.

La segunda fase definió un sistema compuesto por viguetas GL24h a 1,00 m, tablero tricapa de 30 mm, capa de árido encapsulado, solera seca, lámina acústica desacoplante y falso techo absorbente. Se validó para una luz de 5,00 m y sobrecarga de 2,00 kN/m², comprobando estados límite últimos y de servicio, con atención especial a flecha y frecuencia natural. Se estimaron los niveles de aislamiento acústico aéreo (DnT,A) y de impacto (LnT,w) mediante software CYPECAD MEP, integrando el efecto de desacoplos, techos suspendidos y materiales absorbentes. La solución mejoró el comportamiento acústico y vibratorio sin comprometer la ligereza ni la ejecución en seco.

Resultados

Desde un punto de vista estructural, los cálculos realizados en un edificio plurifamiliar en altura en Linares (Figura 1), confirmaron que el sistema prefabricado GL24h, mediante tablero tricapa K1 Multiplan (Figura 2) o similar como capa colaborante, actúa como diafragma rígido, transmite eficazmente cargas verticales y horizontales, y cumple los criterios del Eurocódigo 5 para estructuras ligeras de una o varias plantas.

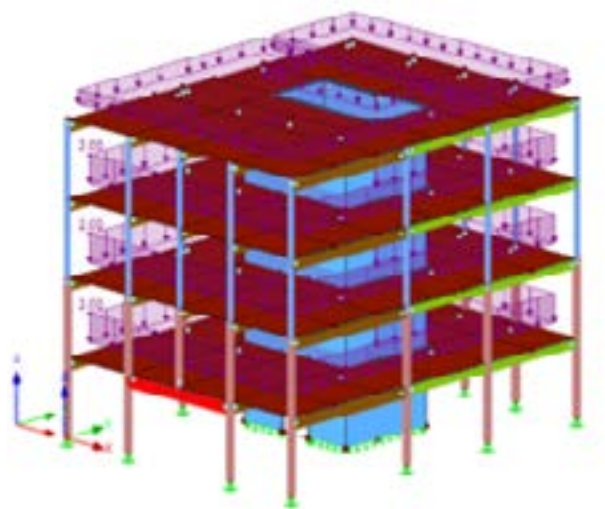


Figura 1. Modelo 3D (Software: Dlubal)



Figura 2. Tablero K1 Multiplan

Sin embargo, ensayos mostraron resultados insuficientes en aislamiento acústico. Tal como muestra la Tabla 1, el nivel de presión sonora de impacto ($L_{n,w}$) superó los 65 dB permitidos, evidenciando una transmisión excesiva de vibraciones por pisadas o movimientos mecánicos. Para analizar estas deficiencias, se aplicó la ley de la masa, que describe el comportamiento teórico de elementos ligeros ante aislamiento acústico.

$$R_w = 20 \cdot \log_{10} (f \cdot m') - K$$

(1)

Donde:

- f = frecuencia de incidencia (Hz),
- m' = masa superficial (kg/m^2),
- K = constante relacionada con las pérdidas debidas a la transmisión no ideal.

En el sistema analizado, la masa superficial del panel tricapa de 20–30 mm, con una densidad típica de 500 kg/m^3 , es:

$$m' = 0,02 \text{ m} \times 500 \text{ kg/m}^3 = 10 \text{ kg/m}^2$$

(2)

$$m' = 0,03 \text{ m} \times 500 \text{ kg/m}^3 = 15 \text{ kg/m}^2$$

(3)

Como se muestra en la Tabla 1, este rango de masa superficial (10–15 kg/m^2) es insuficiente para alcanzar un valor $R_w \geq 50$ dB. Teóricamente, para duplicar la masa y mejorar el aislamiento en 6 dB (según la regla de oro de la masa), sería necesaria una m' superior a 30 kg/m^2 , un valor muy por encima del que proporciona el panel tricapa utilizado.

Tabla 1. Resultados calculados y derivados del ensayo respecto a normativa

Concepto	Valor calculado [dB]	Valor medio [dB]	Exigencia CTE [dB]
Masa superficial m'	10–15 kg/m^2	-	>30 kg/m^2 deseable
Aislamiento aéreo (R_w)	45–47 dB (estimado)	45–47 dB (ensayado)	≥ 50 dB
Aislamiento a impacto ($L_{n,w}$)	>68 dB (estimado)	68–72 dB (ensayado)	≤ 65 dB

Estas deficiencias no se deben a la ausencia de capas intermedias ni a errores de ejecución, sino a la propia naturaleza del sistema. Díaz, J. M. (2020) [2] determinó que la falta de elementos masivos —como el hormigón— impide alcanzar los niveles de inercia y disipación necesarios para bloquear eficazmente la transmisión acústica.

Las soluciones en madera se agrupan en sistemas híbridos, CLT y forjados secos con viguetas, panel tricapa y masa encapsulada de áridos con cal hidráulica. Este último alcanza luces de hasta 10 m, mejora el aislamiento acústico gracias a una masa superficial m' cercana a 210 kg/m^2 ; cumple las exigencias del CTE y permite montaje en seco, con bajo impacto ambiental (50–80 $\text{kg CO}_2 \text{ eq/m}^2$) y coste estimado de 300–450 €/m². Los híbridos madera-hormigón ofrecen buena rigidez, pero mayor huella de carbono (90–180 $\text{kg CO}_2 \text{ eq/m}^2$). El CLT, aunque estructuralmente eficaz, presenta menor flexibilidad, costes superiores a 500 €/m² y necesita soluciones adicionales para cumplir el CTE en aislamiento acústico. El sistema de viguetas con panel tricapa tipo K1 Multiplan y masa encapsulada de áridos y cal hidráulica (Figura 3) combina eficiencia técnica, sostenibilidad e industrialización. La cal actúa como ligante natural, permitiendo un relleno seco, estable y sin humedad, que mejora el aislamiento acústico sin aumentar el espesor ni la huella ambiental. Prefabricado en taller, reduce tiempos y residuos. La capa granular se ajusta en espesor y granulometría según las exigencias térmicas y acústicas del proyecto, optimizando el rendimiento del sistema.

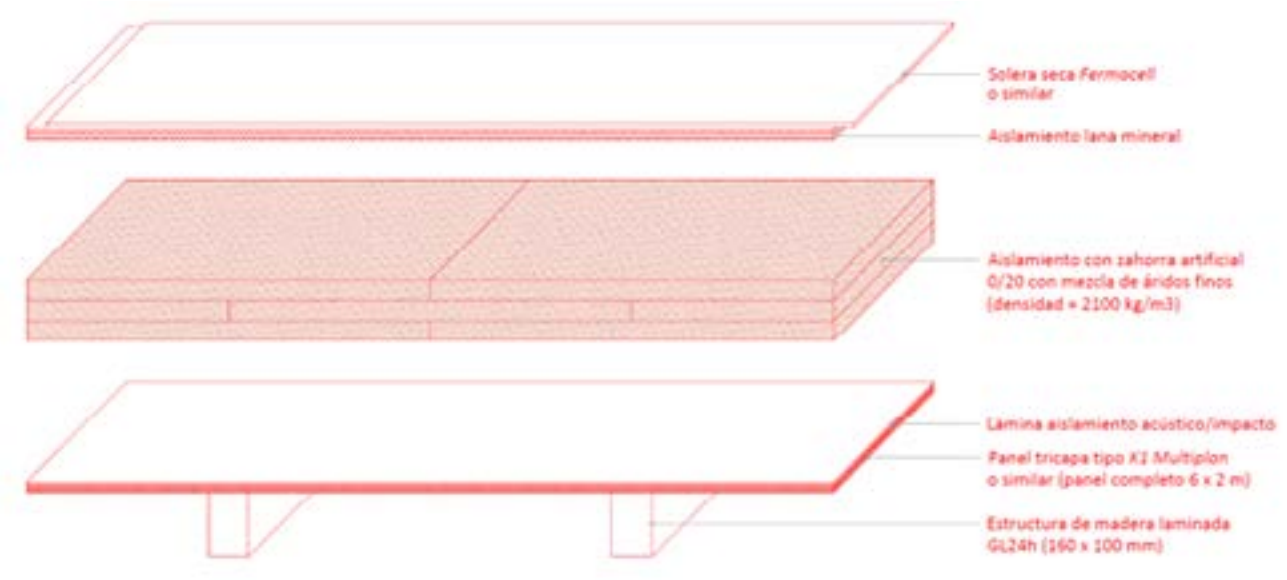


Figura 3. Sección constructiva 3D. Sistema de forjado con tablero tricapa y áridos encapsulados

Discusión

Mejorar el comportamiento acústico de forjados ligeros en altura requiere soluciones integradas. El sistema propuesto combina viguetas de madera laminada GL24h, panel tricapa tipo K1 Multiplan (27-30 mm) y una capa de masa granular encapsulada con árido fino (≤ 4 mm) y cal hidráulica natural. Esta última aporta masa superficial y desacoplo estructural, mejorando significativamente el aislamiento acústico (DnT,A y LnT,w). La cal hidráulica actúa como ligante facilitando el transporte del material y reduciendo residuos. El sistema alcanza luces de hasta 10 m, mejora el aislamiento acústico cumpliendo las exigencias del CTE, con bajo impacto ambiental (50–80 kg CO₂ eq/m²) y coste estimado de 300–450 €/m².

Es un proceso completamente en seco, industrializable y alineado con los objetivos europeos de descarbonización y circularidad. Además, busca emplear especies locales como chopo (*Populus x euramericana*) y pino laricio (*Pinus nigra*), cuya transformación estructural en Andalucía permite sustituir maderas importadas, reducir la huella de carbono y dinamizar la economía forestal regional. Se trata de una solución viable para forjados de luces medias en edificación residencial colectiva.

Conclusiones

El sistema de forjado con viguetas de madera y paneles tricapa, aunque eficiente estructuralmente, presenta limitaciones acústicas debido a su baja masa superficial y ausencia de desacoplos, lo que dificulta su aplicación en edificación residencial plurifamiliar sin soluciones complementarias. Para superar estas deficiencias, se propone una alternativa completamente en seco que incorpora una capa de masa granular encapsulada sobre el panel tricapa colaborante. Esta capa, compuesta por áridos secos confinados, incrementa la masa superficial del forjado sin comprometer su ligereza ni la prefabricación del sistema. Su integración mejora significativamente el aislamiento frente al ruido aéreo y de impacto, cumpliendo con los requisitos del CTE en entornos exigentes. Además, este sistema favorece la trazabilidad ambiental, reduce los tiempos de ejecución y se adapta a procesos constructivos industrializados. Representa así una solución viable y sostenible para estructuras ligeras en altura, que equilibra rendimiento técnico, habitabilidad y eficiencia ambiental.

Referencias

(1) López, M., & Rubio, C. Building with timber in Spain: Barriers and opportunities. Sustainability, 13(9), 2021, 4982.
(2) Díaz, J. M., & Ramírez, A. Madera estructural y sistemas híbridos en edificación. Informes de la Construcción, 72(559), 2020, e348.
(3) XERA – Axencia Galega da Industria Forestal. Plan Estratéxico da Madeira Estrutural de Galicia. Xunta de Galicia, 2022.
(4) Fernández, L., & Molina, J. Sistemas prefabricados en madera: innovación constructiva. Arquitectura Industrializada, 8(1), 2022, 23–39.

58. **Revisión preliminar de sistemas híbridos madera-hormigón enfocados a la mejora de soluciones modulares**

Emilio Luengo^a, Sandra Monteiro^b, Eva Hermoso^c, Alfredo Dias^b
^a Escuela de Ingeniería de Fuenlabrada, Universidad Rey Juan Carlos, Camino del Molino nº5, 28942, Fuenlabrada, Madrid. ^b Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, ISEC, ARISE, R. Luís Reis Santos, 3030-788 Coimbra. ^c ICIFOR-INIA CSIC, Avenida Padre Huidobro 7, 28040, Madrid. emilio.luengo@urjc.es

Palabras clave: Hormigón armado, madera, sistemas híbridos prefabricados, aligeramiento, prestaciones ambientales.

Resumen

Esta aportación investiga en soluciones alternativas aplicables a la construcción prefabricada en madera-hormigón, que combinen eficiencia estructural, mejora en el peso y estén enfocadas al montaje modular. Se presenta una búsqueda preliminar de información sistemática sobre avances en este ámbito, sin descuidar el análisis de información comercial sobre sistemas disponibles en el mercado. Se evita la evaluación de propuestas en relación con forjados mixtos realizados in situ, ya estudiados por muchos autores. Destacan sistemas de panel prefabricados nervados que combinan elementos lineales de entramado pesado de madera laminada, o bien tipo placa, utilizando madera laminada o CLT, conectados a elementos planos de hormigón prefabricado. También son interesantes algunos sistemas multicapa que combinan CLT con capas de aislamiento y revestimiento de hormigón. Otras posibilidades que podrían ser valiosas como elementos sándwich con dos capas exteriores y núcleo colaborante de madera u hormigón, o bien sistemas en combinación de entramado ligero con hormigón, han sido poco estudiados, aunque existen soluciones de fachada que combinan entramados ligeros con revestimientos delgados que pueden incluir hormigón o cemento.

1. Introducción

El término híbrido aplicado a productos y sistemas estructurales tiene un significado muy amplio, con distintos enfoques en los que se pretende una mejora basada en la combinación de diferentes conceptos. El mayor interés en este momento está en la combinación de materiales, tanto en productos estructurales (paneles, forjados mixtos), como muy especialmente en sistemas estructurales completos [1], en los que la novedad consiste en el uso más eficiente de estructuras diversas en un mismo edificio [2-3]. Entre las soluciones mixtas o híbridas destacan las que combinan hormigón y madera, en las que la madera aporta mejoras en relación con las prestaciones ambientales y técnicas, como son su renovabilidad, baja huella de carbono y facilidad de trabajo; mientras que el hormigón puede aportar otras cualidades, como mejoras acústicas o de durabilidad en elementos expuestos. En este contexto el uso de la madera con hormigón presenta además de los mencionados beneficios ambientales una ventaja en la búsqueda de soluciones aligeradas, que favorezcan el montaje y transporte de elementos prefabricados que empleen hormigón en su composición, suponiendo por otro lado una oportunidad para una mayor introducción del uso de la madera en los sistemas constructivos.

En este trabajo se investiga realizando una búsqueda de soluciones alternativas, incluyendo sistemas comerciales, que pudieran ser aplicables a construcción modular o prefabricada en madera-hormigón. Esta información servirá como base para nuevos desarrollos en el futuro. No se incluyen los forjados mixtos colaborantes realizados in situ, por ser una solución ampliamente tratada y estudiada por otros autores, véase por ejemplo al respecto [4-5].

2. Metodología

La metodología aplicada ha sido la búsqueda en bases de datos especializadas, fundamentalmente WOS y Google Scholar, utilizando las palabras clave de esta comunicación para la obtención de referencias de investigación de los últimos 15 años. Esta se ha combinado con la búsqueda libre de sistemas comerciales a partir de la información disponible en los canales públicos habituales como son web de empresas, publicaciones divulgativas (asociaciones, proyectos colaborativos, etc.) o técnicas, por ejemplo en webs de organismos oficiales de evaluación de productos no normalizados. En algunos casos se incluyen en el análisis, como un punto de partida para futuras investigaciones, sistemas ligeros que han sido usados con éxito en el ámbito de la madera o del hormigón exclusivamente, pero que podrían ser modificados para combinar ambos.

3. Resultados y discusión

3.1 Sistemas basados en el uso combinado de entramado ligero y hormigón

En la exploración de la información disponible sobre este tipo de sistemas no se han encontrado en esta fase de trabajo preliminar propuestas prefabricadas que incorporen de forma colaborante madera y hormigón. Así mismo no se ha hallado investigación

científica al respecto. Existen en cambio algunos sistemas con entramado ligero de madera que incorporan como revestimiento caras exteriores muy delgadas basadas en hormigón, como el sistema WoodWall [6] que consiste en un muro de entramado con aislamiento de fibra de madera revestido con una placa exterior de hormigón con fibras de 20 mm de grosor. También hay sistemas innovadores de muro cortina de fachada que incluyen entramado ligero y una composición multicapa, entre las que cabe algún tipo de tablero o revestimiento que pudiera estar basado en cemento [7].

3.2 Uso de paneles nervados con entramado pesado de madera y hormigón

En este tipo de sistemas las soluciones disponibles implican el uso de una losa prefabricada delgada unida a elementos lineales de madera, generalmente laminada encolada, para su uso en forjados o muros. Si bien no hay mucha bibliografía al respecto [1], estos sistemas han sido estudiados como elemento a flexión a nivel científico [8-10] empleando diversos conectores. Así mismo, en su uso como muro se pueden citar los trabajos de Boscato et al. [11], que estudia un sistema de marco de madera unido a una losa delgada de hormigón, y Pozza et al. [12], que analizan el comportamiento frente a carga cíclica lateral de elementos formados por una losa prefabricada unida mecánicamente a un entramado de madera.

Existen productos comerciales modulares que incorporan este tipo de soluciones como los del sistema denominado CREE en el que se combina el uso de paneles específicos, paneles RSP, formados por elementos lineales de madera laminada conectados con losas delgadas de hormigón, junto con la aplicación adicional de diversos sistemas estructurales prefabricados y herrajes específicos [13-14]. En una línea similar otro sistema prefabricado y modular es el sistema Hybrid BeamsSlab en el que una losa en torno a 10-14 cm se une a vigas de madera laminada de entramado pesado, con anchuras de 240 mm y separaciones moderadas, mediante un sistema propio de conectores [15]. Este último sistema se ha aplicado, según la información proporcionada por la empresa que lo comercializa, en varios edificios de mediana altura en el ámbito europeo, con estructura principal de madera o de otros materiales [16].

3.3 Uso de paneles prefabricados con sistema placa colaborante madera y hormigón

También de forma lógica el esquema examinado en el apartado anterior de producto prefabricado híbrido se traslada a elementos que combinan CLT, o incluso elementos de madera laminada funcionando como placa, con losas de hormigón. A este respecto se encuentran soluciones comerciales como los paneles FSP [13] o los paneles Flatslab que emplean CLT con gruesos a partir de 160 mm y 5 capas junto con conectores mecánicos o entalladuras en el CLT [17], en este caso la losa se hormigona en fábrica. La novedad en ellos radica en su modularidad y prefabricación. A

nivel científico, por otro lado, se pueden citar los trabajos de Woschitz et al. [18] que evaluaron un sistema de losa prefabricada con entalladuras instalada sobre paneles CLT, así como Besaure-Fuentes et al [19] que han investigado en el encolado del hormigón prefabricado a CLT.

3.4 Sistemas multicapa y sistemas sándwich madera-hormigón

Existen en el mercado sistemas multicapa prefabricados para muros que incluyen una capa de CLT estructural, una de aislante (lana de roca) y una capa de hormigón más delgada y con buen acabado visual, como el sistema de paneles Hybrid Wall [20]. Este tipo de paneles confían principalmente en el funcionamiento del CLT (de al menos 100 mm de espesor) como material estructural, y utilizan el hormigón como elemento relativamente delgado de acabado exterior y protección, presentando un peso menor que otros elementos similares realizados completamente en hormigón.

Por otro lado, con respecto a los posibles sistemas híbridos madera-hormigón con estructura sándwich, que estrictamente hablando serían aquellos con uso colaborante e interconectado de dos caras y un núcleo, se han encontrado algunas experiencias preliminares en la bibliografía científica [21], pero no aparecen elementos de este tipo entre los estudios que evalúan las innovaciones realizadas en paneles sandwich de hormigón [22] o revisan sus tipos [23]. Es posible que no se haya encontrado una ventaja que justifique este tipo de sándwich colaborante tricapa, ya que el sistema habitual, compuesto solamente por una capa de hormigón conectado a una de madera es una idea eficiente que aporta valor, mientras que es más discutible la utilidad del uso de los sándwich completos madera-hormigón. No obstante, este tipo de panel sándwich tricapa híbrido podría ser un producto interesante a analizar para su uso en determinadas circunstancias, en las que, por ejemplo, se requiera una protección en el producto frente a situación de incendio al tiempo que se obtiene un peso más contenido que el que proporcionan otras soluciones tradicionales de hormigón.

En cambio, cabe mencionar que como es conocido se encuentran soluciones tipo sándwich con dos caras y núcleo colaborante en productos únicamente elaborados con tableros de madera y almas aislantes de cierta rigidez, cuyo sistema más desarrollado se conoce internacionalmente como sistema SIP (Structural Insulated Panels) [24]. Así mismo existen productos comerciales en los que se combinan caras de hormigón, armado o reforzado con fibras, interconectadas, generalmente con conectores o armaduras ligeras, entre las que se incluye un núcleo aislante que no colabora mecánicamente [22]. Se encuentra bibliografía técnica asociada a este tipo de productos de hormigón que sistematiza aspectos constructivos y de cálculo, por ejemplo [25], que puede ser un interesante punto de partida para evaluar sistemas sándwich híbridos.

4. Conclusiones

El análisis preliminar de soluciones modulares o prefabricadas innovadoras disponibles en el mercado, así como de la bibliografía científica, muestra la existencia de importantes avances en nuevos sistemas, algunos de los cuales se encuentran plenamente aplicados en edificios de reciente construcción. Destacan especialmente los que combinan entramado pesado de madera y placas o losas de hormigón, así como los sistemas multicapa basados en CLT y hormigón, tanto colaborantes como no colaborantes.

Agradecimientos

Esta comunicación se ha desarrollado en el marco de la colaboración en investigación sobre sistemas híbridos madera-hormigón resultado de una estancia breve de investigación realizada por el primer autor en el Departamento de Engenharia Civil de la Universidad de Coimbra, en el área de Estructuras y Mecánica estructural.

Referencias

[1] Pastori, S.; Mazzucchelli, E.S.; Wallhagen, M. Hybrid timber-based structures: A state of the art review. 2022 Construction and building materials, Vol. 359.

[2] Van de Kuilen, J.; Ceccotti, A.; Zhouyan, X.; Minjuan, H. Very tall wooden buildings with Cross Laminated Timber. 2011. 12th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Procedia engineering 14, 1621-1628.

[3] Kiliñ G.A. Structural design of tall timber buildings. 2024. Athens Journal of Technology & Engineering, 11: 1-20.

[4] Yeoh, D., Fragiaco, M., De Franceschi, M., & Heng Boon, K. 2011. State of the Art on Timber-Concrete Composite Structures: Literature Review. Journal of Structural Engineering, 137(10), 1085–1095.

[5] Lecours, S. Optimisation multicritère des planchers préfabriqués en bois-béton pour les bâtiments multiétages en considérant la méthode constructive. 2022. Mémoire maître ès sciences. Université Laval.

[6] Ductal – sistema WoodWall: <https://www.ductal.com/fr/woodwall#>

[7] Lignum Tech: https://lignumtech.es/wp-content/uploads/2023/03/DossierLignumTech_v01.pdf

[8] Fragiaco, M., & Lukaszewska, E. Development of prefabricated timber–concrete composite floor systems. 2011. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings, 164(SB2), 117–129.

[9] Frangiaco, M. & Lukaszewska, E. Time-dependent behaviour of timber–concrete composite floors with prefabricated concrete slabs. 2013. Engineering Structures, Vol. 52, 687-696.

[10] Crocetti, R.; Sartori, T.; Toma, R. Innovative Timber-Concrete Composite Structures with Prefabricated FRC Slabs. 2014. Journal of Structural Engineering Vol. 141, Issue 9.

[11] Boscato, G.; Mora, T.D.; Peron, F; Russo, S., Romagnoni, P. A new concrete-glulam prefabricated composite wall system: Thermal behavior, life cycle assessment and structural response. 2018. Journal of Building Engineering 19, 384–401.

[12] Pozza, L.; Scotta, R.; Trutalli, D.; Polastri, A.; Ceccoti, A. Concrete-Plated Wooden Shear Walls: Structural Details, Testing, and Seismic Characterization. 2015. Journal of Structural Engineering, Vol. 142, Issue 4.

[13] Cree Buildings – System: <https://www.creebuildings.com/system/>

[14] Cree Buildings – Projects: <https://www.creebuildings.com/bb-tres-cantos/>

[15] Oberndorfer Beamslab: <https://www.oberndorfer-hybrid.com/en/products/hybrid-beamslab>

[16] Oberndorfer Hybrid – References: <https://www.oberndorfer-hybrid.com/en/references>

[17] Oberndorfer Flatslab: <https://www.oberndorfer-hybrid.com/en/products/hybrid-flatslab-screw-connection>

[18] Woschitz, R.; Deix, K.; Huber, C.; Kampitsch, T. Entwicklung neuartiger Holz-Betonverbunddecken in Fertigteilbauweise. 2020. Bautechnik, Vol. 98, 12-22.

[19] Besaure-Fuentes, J.; Guindos, P.; Araya-Letelier, G. Micro-meso characterization of prefabricated concrete-CLT adhesive joints. 2024. Case Studies in Construction Materials, 21.

[20] Hormipresa sistema Hybrid Wall: <https://www.hormipresa.com/vivienda/hybridwall/>

[21] Fadai, A.; Winter, W.; Gruber M. Wood-based construction for multi-storey buildings. The potential of cement bonded wood composites as structural sandwich panels. 2012. Proceedings World Conference on Timber Engineering (WCTE).

[22] O'Hegarty, R. ; Kinnane, O. Review of precast concrete sandwich panels and their innovations. 2020. Construction and building materials. Vol. 233.

[23] Saha, T.P.; Lacey, A.W.; Haob, H.; Chena, W. Prefabricated concrete sandwich and other lightweight wall panels for sustainable building construction: State-of-the-art review. 2024. Journal of Building Engineering, Vol. 89.

[24] Kermani, A. Performance of structural insulated panels available to Purchase. 2006. Proc. of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings 159 (1).

[25] PCI Committee on Precast Sandwich Wall Panels. State of the Art of Precast/Prestressed Concrete Sandwich Wall Panels. Second edition.

4. PONENCIAS PRINCIPALES

1. Durabilidad de las estructuras de madera

Francisco Arriaga. Dr. por la UPM. Catedrático de Universidad en la ETS de Ingeniería de Montes, Forestal y del Medio Natural de la UPM

En la actualidad se está terminando una segunda generación de los Eurocódigos que será publicada en 2027. El Eurocódigo 5 (madera) tiene una parte dedicada a la durabilidad que representa un avance relevante comparada con la versión vigente. Crece su extensión en la parte dedicada a la madera y en mayor grado la de protección de los herrajes.

El planteamiento de la durabilidad de la madera sin contacto con el suelo o el agua establece unas medidas de carácter constructivo básicas que deberían cumplirse siempre para reducir el riesgo de ataques de hongos e insectos xilófagos, admitiendo también la posibilidad de tratamiento. Además, plantea otras medidas especiales con el fin de evitar la necesidad de tratamiento.

Se hace referencia al tratamiento químico de la madera, pero no se entra en detalles. Los Eurocódigos son normas principalmente enfocadas al proyecto y cálculo de las estructuras, y es relativamente fácil unificar los criterios de seguridad que les afectan. Sin embargo, es más complicado unificar criterios para la protección de la madera mediante tratamientos añadidos, debido a que las regulaciones legales varían según el país, así como los condicionantes sociales.

El caso de riesgo de ataque de termitas no se trata en la norma, aunque menciona algunas recomendaciones de actuación. Para las estructuras expuestas al exterior se pueden utilizar las recomendaciones constructivas de la parte dedicada a puentes de madera del Eurocódigo 5.

La parte dedicada a la durabilidad de los herrajes incorpora la influencia de las clases de exposición al ambiente atmosférico y las clases de exposición a la madera, incluyendo la influencia de la acidez de algunas especies y la presencia de tratamientos químicos. Da reglas para establecer el grado de protección de los herrajes de acero al carbono y las clases de resistencia a la corrosión del acero inoxidable.

2. La madera frente al fuego: el arte de arder con previsibilidad

Pilar Giraldo. Dra. por la UPC. Investigadora del INCAFUST-CTFC. Profesora del Departamento de Tecnología en la Arquitectura ETSAB-UPC.

Durante la última década, la presencia creciente de la madera en el sector de la construcción, tanto a nivel nacional como internacional —en especial en los países del centro y norte de Europa—, ha permitido avanzar de forma significativa en el conocimiento técnico y en el reconocimiento de sus propiedades y ventajas. No obstante, persisten ciertas reticencias en torno a su comportamiento frente al fuego, derivadas de su naturaleza combustible. A pesar de ello, los estudios y la práctica demuestran que una estructura de madera correctamente diseñada y dimensionada puede alcanzar tiempos de resistencia al fuego equivalentes, e incluso superiores, a los de estructuras de hormigón o acero. Un valor diferencial destacado de los elementos constructivos de madera en situación de incendio es su comportamiento previsible: la tasa de carbonización está bien definida y permite realizar un cálculo preciso de la sección residual y de la capacidad portante durante la exposición al fuego.

La próxima generación del Eurocódigo 5, cuya publicación está prevista para 2027, introducirá importantes novedades, entre ellas, destaca la incorporación por primera vez de criterios de cálculo específicos para el CLT (Cross Laminated Timber). Asimismo, incluirá nuevas consideraciones sobre la carga de fuego asociada a las superficies vistas de madera, con el fin de mejorar la precisión y la coherencia del cálculo en este tipo de escenarios. Estas actualizaciones supondrán un desafío técnico y requerirán una mayor formación y actualización de los profesionales, además de una reflexión profunda sobre la adecuación de los marcos normativos vigentes a nivel nacional.

En España, el Código Técnico de la Edificación (CTE) no está plenamente alineado con las necesidades específicas de la construcción con madera, presentando ciertos vacíos e interpretaciones que pueden derivar en riesgos no deseados. En cambio, en países con mayor tradición en el uso estructural de la madera, como Suecia, Suiza, Finlandia, Noruega, Canadá o Estados Unidos, el auge del material en los últimos años ha ido acompañado de adaptaciones normativas significativas orientadas a garantizar su aplicación segura en todo tipo de edificaciones. En todos ellos, la protección activa mediante rociadores automáticos se considera un componente esencial, especialmente en edificios de más de tres plantas o con amplias superficies de madera vista, asegurando niveles elevados de seguridad y fiabilidad en todas sus aplicaciones constructivas.

3. Prevenir sin proteger

Luis Alfonso Basterra. Dr. Arquitecto. Catedrático de Universidad en la ETS de Arquitectura de Valladolid

El concepto de **Patrimonio** ha cambiado profundamente a lo largo del tiempo. De ser entendido como un conjunto de obras maestras heredadas —símbolos de una grandeza pasada— ha pasado a concebirse como un **patrimonio cultural** amplio y vivo, que integra objetos, técnicas, expresiones y modos de vida que dan identidad y cohesión a las comunidades y los pueblos.

En España, y singularmente en Castilla y León, por ejemplo, el reto es grandioso: más de 2.500 bienes protegidos repartidos en miles de pequeños municipios con población menguante. Demasiado patrimonio ... y muy poca gente para cuidarlo. Esta fragilidad demográfica y económica obliga a mirar hacia los modelos europeos que ya han hecho de la **conservación preventiva** una política pública, no solo una aspiración técnica o académica. Se trata de actuar antes de que los daños aparezcan, evitando restauraciones costosas y, muchas veces, traumáticas, que pueden comprometer la autenticidad del bien.

Los ejemplos del norte de Europa son reveladores. En Noruega, las iglesias medievales de madera siguen en pie —algunas con más de 800 años— gracias a planes sistemáticos de mantenimiento y formación local. En los Países Bajos, programas como MonumentenwachtNL han profesionalizado la inspección ligera y la diagnosis preventiva. El Reino Unido lleva más de un siglo aplicando la cultura del “stitch in time”, actuar a tiempo para evitar el deterioro. Incluso Italia, patria de la restauración monumental, avanza hacia estrategias de control ambiental y monitoreo continuo.

La **prevención** implica evaluar, diagnosticar, monitorear, mantener, formar y controlar. Exige conocimiento técnico, pero también compromiso social. Porque conservar el patrimonio no es solo reparar el pasado: es **cuidar el presente para que el futuro siga teniendo memoria**.

En ese camino —más humilde, pero más inteligente— esta vía parece la única viable.

5. PROGRAMA

PROGRAMA

Miércoles 24 de septiembre

8:00 - 8:45
REGISTRO DE ASISTENTES

8:45
BIENVENIDA
Dña. Roser Martínez Ramos e Iruela. Directora de la ETS Arquitectura. Universidad de Granada
APERTURA
D. Enrique Herrera Viedma. Vicerrector de Investigación y Transferencia. Universidad de Granada
D. Iñaqúi Carnicero Alonso-Colmenares. Secretario General de Agenda Urbana, Vivienda y Arquitectura. Gobierno de España
D. Juan Ramón Pérez Valenzuela. Director General de Política Forestal y Biodiversidad. Junta de Andalucía
Dña. Ana María Lacasta. Responsable de la Red Lignomad. Universitat Politècnica de Catalunya

9:15 – Sesión 1
Moderadora: Ana M. Lacasta (GICITED-UPC)

9:15 - 9:45
Charla Principal 1 – “Durabilidad de las estructuras de madera”
Francisco Arriaga. Dr. por la UPM. Catedrático de Universidad en la ETS de Ingeniería de Montes, Forestal y del Medio Natural de la UPM
9:45 - 10:00
Optimización de vigas laminadas mixtas aplicando la simulación numérica
Carlos Cruz. UIMA-Universidad de Granada
10:00 - 10:15
Análisis experimental y modelación de uniones estructurales de madera
Nicol López. Cátedra Madera Onesta

10:15 - 10:30
Sistema estructural mixto integral madera-hormigón con conexión a rasante mediante tableros perforados
Dolores Otero. GEA-GEM-Universidade da Coruña
10:30 - 10:45
Bioeconomía Circular en Territorios de Montaña: Avances del Proyecto PRISMA en Madera Contralaminada y Residuos de Aserraderos
Rayder Leonardo. Cátedra Madera Onesta
10:45 - 11:00
Proyecto LIFE Wood for Future: Nuevos sistemas estructurales con base madera
José A. Lorenzana. PEMADE-Universidad de Santiago de Compostela

11:00 - 11:30
PAUSA CAFÉ

11:30 – Sesión 2
Moderadora: Eva Hermoso (ICIFOR-INIA, CSIC)

11:30 - 11:45
Ethris, elemento modular de construcción
Francesco Verzura. Opera Mista Srl
11:45 - 12:00
Modelización y análisis de la función estructural de la zapata en entramados de madera tradicionales
David Blanco. Universidad de Alcalá
12:00 - 12:15
Hacia un nuevo concepto de estructuras laminares reticulares de madera
Antonio J. Lara. ETSA-Universidad Politécnica de Madrid
12:15 - 12:30
Caracterización de puentes peatonales de madera en España mediante análisis modal experimental
Soledad Rodríguez. Fundación CETEMAS
12:30 - 12:45
Aproximación en el desarrollo de un producto de recuperación para excedentes de placas de CLT: Prototipo de pasarela peatonal
Víctor Rosales. Departamento de Ciencias de la Construcción, Universidad del Bío-Bío

12:45 - 13:15 - Sesión de empresas patrocinadoras

Moderador: **Antolino Gallego** (UIMA-UGR)

- Iberolam Timber&Technology
- Arquima
- Egoín Wood Group

13:15 - 13:55 - Sesión de posters 1 (presentaciones de 3 minutos)

Moderadora: **Adelaida Martín** (UIMA-UGR)

- Centro de visitantes del Parque Nacional Sierra de las Nieves: Análisis comparativo de materiales
Santiago Matute. Agencia de Medio Ambiente y Agua de Andalucía
- Comunicar con madera. Toca Madera · Sounds Wood
Irene Jimeno. Toca Madera-Sounds Wood
- Mapa Colaborativo-Interactivo Construcción con Madera
Irene Jimeno. Toca Madera-Sounds Wood
- Análisis inverso y diseño computacional para caracterizar madera de pino mediante vibraciones
Mario Requena. UIMA-Universidad de Granada
- Problema inverso bayesiano para la calibración de vigas huecas tipo cajón mediante análisis modal
Roberto Palma. UIMA-Universidad de Granada
- Revisión preliminar de sistemas híbridos madera-hormigón enfocados a la mejora de soluciones modulares
Emilio Luengo. Universidad Rey Juan Carlos
- Estudio numérico y experimental de uniones dentadas a flexión de madera de Pinus Nigra –
Rafael Bravo. UIMA-Universidad de Granada
- Sello de Calidad AITIM para empresas de montaje y puesta en obra de estructuras y elementos constructivos de madera
Guillermo Gómez del Pozo. AITIM
- El corcho como material de construcción
Enrique Torres. Universidad de Huelva
- Madera de chopo aplicada al proyecto
Miguel Martínez. Universidad de Granada
- Soluciones de la ingeniería para el uso técnico de madera aserrada en sistemas estructurales eficientes alternativos a estructuras masivas
Miguel V. Broto. Departamento Ingeniería Agrícola y Forestal, Universidad de Valladolid

14:30 - 15:30

COMIDA - NETWORKING EN ZONA DE STANDS

15:30 – Sesión 3

Moderadora: **Azahara Solilán** (CIS-Madeira)

15:30 - 16:00

Charla principal 2 – “La importancia del detalle independiente del tamaño”

Jorge Blasco. Arquitecto, consultor de estructuras (ACE). Estudi m103, SLP. Profesor del Departamento de Estructuras de la ETSAB-UPC

16:00 - 16:15

Edificio de madera de dos plantas y dos vanos como demostrador practicable a escala para ensayos estáticos y dinámicos

Alberto Izquierdo. ETS Ing. Telecomunicaciones-Universidad de Valladolid

16:15 - 16:30

Validación numérica de la respuesta estática y dinámica de un panel CLT

Patricia Vallelado. ETS Arquitectura-Universidad de Valladolid

16:30 - 16:45

Análisis del uso de un modelo de intercambio (EM) para la estimación de costes inicial de proyectos en edificación industrializada de madera

Pilar de la Rosa. ETSA-Universidade da Coruña

16:45 - 17:00

Comparación de huella de carbono para un edificio de mediana altura en Madrid, homologación utilizando un diseño

Alberto Gonzalez. ETS de Ingeniería de Montes, Forestal y del Medio Natural de la UPM

17:00 - 17:15

Lilu’s House: vivienda, empresa y living lab

Laia Haurie. Grupo GICITED, EPSEB-Universidad Politécnica de Cataluña

17:15 - 17:45

PAUSA CAFÉ - NETWORKING EN ZONA DE STANDS

17:45 – Sesión 4

Moderadora: **Sara Santos** (ICIFOR-INIA, CSIC)

17:45 - 18:00

Una Atmósfera en Madera

Iñaki del Prim. blancodelprim arquitectos; prof. del Máster de Construcción, Diseño y Estructuras de Madera, UPV-EHU

18:00 - 18:15

Casa Patio Tropical. Proyecto demostrativo de un sueño forestal

Alberto de la Torre. Delatorre Castellano arquitectos

18:15 - 18:30

Construir con madera: seguridad, eficiencia y sostenibilidad

María Mora. Michael Green Architecture

18:30 - 18:45

Uso de rollizos de bambú y de madera en 10 proyectos

Ignacio de Teresa Fernández. ETSAG, Universidad de Granada

18:45 - 19:00

Impulso de la bioeconomía local en la construcción: vivienda-demostrador en Ogíjares (Granada)

Eva Chacón. Bonsai Arquitectos

Jueves 25 de septiembre

9:15 – Sesión 5

Moderadora: **Dolores Otero** (GEA-UDC)

9:15 – 9:45

Charla Principal 3 – “La madera frente al fuego: el arte de arder con previsibilidad”

Pilar Giraldo. Dra. por la UPC. Investigadora del INCAFUST-CTFC. Profesora del Departamento de Tecnología en la Arquitectura ETSAB-UPC.

9:45 – 10:00

Influencia de la exposición en cámara de envejecimiento acelerado sobre el color y la reacción al fuego en siete especies de madera

Alina Avellaneda. Grupo GICITED, EPSEB-Universidad Politécnica de Cataluña

10:00 – 10:15

Durabilidad de la madera en construcción. Aproximación española de la norma UNE-EN 460:2023

David Lorenzo. AITIM

10:15 – 10:30

Evaluación del potencial de la madera de pino silvestre (Pinus sylvestris L.) termotratada para aplicaciones tecnológicas

Silvia Gómez. CESEFOR

10:30 – 10:45

Efecto del contenido de humedad en la resistencia mecánica de la especie de bambú Guadua Angustifolia Kunth

Carlos Osuna. ICIFOR-INIA, CSIC

10:45 – 11:00

El rol de los residuos vegetales y los bio-aglutinantes en las propiedades térmicas y acústicas de los bio-compuestos

Brenda Arias. Grupo GICITED, EPSEB-Universidad Politécnica de Cataluña

11:00 - 11:30 - PAUSA CAFÉ

11:30 – Sesión 6

Moderadora: **Soledad Rodríguez** (CETEMAS)

11:30 – 12:00

Debate - “Presente y futuro de la construcción con madera. Oportunidades y retos”

Sandra Llorente. Lignum Tech, **Jorge Blasco.** Estudi m103, SLP

12:00 – 12:15

Empleo de bioadhesivo para la elaboración de madera microlaminada de chopo: cortante en línea de cola y flexión

Francisco J. Rescalvo. UIMA-Universidad de Granada

12:15 – 12:30

Evaluación de tableros de partículas de Ulmus pumila fabricados con resinas de urea/formaldehído modificadas con celulosa microfibrilar y lignosulfonatos

Eduardo Bordallo. CESEFOR

12:30 – 12:45

Mapas de Termitas y metodología de inspección de cascos urbanos en base a la norma UNE-56418:2016. Caso práctico en el casco antiguo de Areatza, Bizkaia

Josu Benito. TECNALIA

12:45 – 13:15 - Sesión de empresas patrocinadoras
Moderador: Ana Cruz (UIMA-UGR)

- PEFC España
- Hundegger
- Cadwork

13:15 – 13:55 – Sesión de posters 2 (presentaciones de 3 minutos)
Moderador: Francisco Rescalvo (UIMA-UGR)

- BUOs como proyecto demostrativo de la industria forestal
Cecilia López. Muiños Otero López Arquitectura
- Diseño y prefabricación de infraestructura de protección de madera natural sin tratamientos
Cristina Ouzande. Ezcurra e Ouzande arquitectura s.l.p.
- Análisis estructural de cajones de madera de pino y chopo
Esteban Hernández. Universidad de Granada
- Comportamiento de productos derivados del bambú sometidos a ciclos de envejecimiento acelerado
Alina Avellaneda. Grupo GICITED, EPSEB-Universidad Politécnica de Cataluña
- Evaluación de sistemas de bloqueo de taninos en productos de madera para su uso en exterior
Isabel Fernández. Fundación Cetemas
- De lo vernáculo a lo contemporáneo: análisis estructural de sistemas mixtos de tapia y madera
Álvaro Blanca. Universidad de Granada
- Woodex+: La evolución económica y precisa en la estimación de la densidad y la evaluación de la madera de construcción
Ignacio Bobadilla. ETSI Montes, Forestal y del Medio Natural-UPM
- Reposición de la caseta de aperos del Parador de San Francisco en la Alhambra de Granada
Virginie Claude. IBEROLAM Timber&Technology
- Evaluación de la capacidad termiticida del quitosano contra Reticulitermes grassei Clément
Sara Santos. ICIFOR-INIA, CSIC
- Actuación integral de reparación de la estructura de madera del Centro de Visitantes El Dornajo del Parque Nacional de Sierra Nevada
Carlos Benavides. IBEROLAM Timber&Technology
- Sistemas de forjados sostenibles de madera para la edificación en altura en Andalucía
Antonio J. Rodríguez. Departamento de Física Aplicada, Universidad de Granada

14:30 - 15:30 COMIDA - NETWORKING EN ZONA DE STANDS

15:30 – Sesión 7
Moderadora: Laia Haurie (GICITED-UPC)

15:30 – 16:00
Charla Principal 4 – “Prevenir sin proteger”
Luis Alfonso Basterra. Dr. Arquitecto. Catedrático de Universidad en la ETS de Arquitectura de Valladolid

16:00 – 16:15
Madexter II: una nueva herramienta para la asignación paramétrica de las clases de uso de la norma UNE-EN 335
Marta Conde. ICIFOR-INIA, CSIC

16:15 – 16:30
Empleo de fotogrametría rectificada para la obtención de características geométricas de elementos de madera recuperada de edificios existentes
Pablo González. TECNALIA

16:30 – 16:45
TIK Timber: un sistema portátil para la evaluación no destructiva de la madera. Desarrollo y validación
Irene Gil. ETSIE-Universidad de Granada

16:45 – 17:00
Intervenciones en el Patrimonio Industrial con Madera en España
Daniel F. Llana. Grupo Construcción con Madera, Universidad Politécnica de Madrid

17:00 – 17:15
La breve historia del puente de madera sobre el río Duratón, en Peñafiel
Alfonso Lozano. Grupo GICONSIMÉ, Universidad de Oviedo

17:15 - 17:45 - PAUSA CAFÉ

17:45 – Sesión 8

Moderador: **Miguel Esteban** (ETSI Montes, Forestal y del Medio Natural-UPM)

17:45 – 18:00

Guía de Rehabilitación de Estructuras de Madera

Irene Jimeno. Toca Madera·Sounds Wood

18:00 – 18:15

Proyecto Pegollu - Almacén d’Horros del Principado de Asturias: conservación del patrimonio cultural y sostenibilidad

Elena Pérez. Fundación CETEMAS

18:15 – 18:30

Viabilidad del uso del chopo en paneles de CLT: paneles monoespecie y multiespecie pino-chopo

Yaiza Fuentes. UIMA-Universidad de Granada

20:30 Clausura y Cena de Gala – Restaurante La Chumbera (Sacromonte)

Viernes 26 de septiembre – Visitas técnicas

8:15 Punto de encuentro. Entrada del Campus Fuentenueva. Granada

8:45 – 10:15 Laboratorio UIMA en la Azucarera de San Isidro. Café

12:30 – 14:30 Centro de visitantes del PN Sierra de las Nieves. **Santiago Matute** y **Rafael Ángel Haro**
El bosque como aliado: arquitectura para un futuro sostenible. **Gonzalo Anguita** (FSC)

15:00 – 16:30 Almuerzo

18:00 – 19:00 Promoción OCEANIKA. Torremolinos. Málaga

ENLACE A LAS ACTAS DEL CONGRESO





Rehabilitación del Pazo Piñeiro, Concello de Ares (A Coruña)
Arquitecto: Jorge Salgado. Fabricación y montaje: Prefabricados Rodiñas
Losa mixta madera-hormigón MCLamBS. Proyecto LIFE Wood For Future

LIGNOMAD 25