

15
ANYS
2005 / 2020

#102

DossierTècnic

Innovación y transferencia de conocimiento

Marzo de 2020

La madera en la construcción

Generalitat de Catalunya
Departament d'Agricultura,
Ramaderia, Pesca i Alimentació



Rural
Cat

Pág. 02 Presentación Pág. 03 Madera: material del ayer y del futuro Pág. 07 Visión histórica de la evolución tecnológica de los sistemas constructivos de madera Pág. 14 Eficiencia energética en la construcción con madera Pág. 19 Mitos y realidades sobre la construcción con madera y su comportamiento ante el fuego Pág. 25 Hablamos con: Joan Sebastia



Oriol Anson Fradera

Director general de Desarrollo Rural
Departamento de Agricultura, Ganadería, Pesca y
Alimentación

El uso de madera de alto valor añadido incentiva la gestión forestal sostenible certificada

La madera es un material que nos rodea en nuestra vida cotidiana sin que prácticamente nos demos cuenta. Es un material transversal, con muchas posibilidades, y que presenta un abanico tan amplio de cualidades que lo podemos encontrar en usos tan dispares como el papel de un solo uso, elementos de decoración de lujo y material escultórico.

En la construcción, ha sido un material utilizado desde tiempos inmemoriales junto con la piedra, ya que era un material accesible y de proximidad, fácil de trabajar y más fácil de transportar que otros materiales más pesados. Si observamos las construcciones rurales y masías que todavía conservan los elementos originales, veremos que la madera siempre está presente, desde las cubiertas hasta los pavimentos, pasando por puertas, ventanas y muebles, y en muchos casos el tipo de madera nos habla de la riqueza de la casa en su momento de construcción.

Durante el último siglo, su uso en construcción ha menguado en detrimento de otros materiales como el hormigón o el acero, que adquirieron una ventaja competitiva al permitir soluciones constructivas que la madera maciza no podía alcanzar, aunque pudieran ser mucho más costosos en producción y con externalidades negativas para el medioambiente.

El siglo XXI, sin embargo, nos presenta unos paradigmas sociales y ambientales nuevos que obligan a repensar todas las ramas de la ingeniería, incluida la arquitectura. El cambio climático, el agotamiento de los recursos, el fin de la economía lineal y sus consecuencias han introducido la sostenibilidad ya no como una opción, sino como una obligación.

En este contexto, reaparece la madera como oportunidad y solución. La madera es un material renovable y sostenible que se produce a partir de la energía que nos proporciona el sol. La madera permite captar el CO₂ de la atmósfera y capturarlo en la madera durante tanto tiempo como vida útil seamos capaces de darle a sus usos. Asimismo, es un elemento que aporta gran confort y bienestar para los que puedan disfrutar de la vivienda o equipamiento construido con madera.

Ante este nuevo paradigma ambiental, los bosques también sufren los efectos del cambio global, y la gestión forestal sostenible es la herramienta para asegurar su adaptación y mantener y aumentar los servicios ecosistémicos que nos prestan, incluido el suministro regular de materias primas de forma sostenible. En Cataluña, se dispone ya de 260.000 hectáreas de superficie forestal certificadas con los sellos PEFC de gestión forestal sostenible, que aseguran la sostenibilidad en la gestión de los bosques y la obtención de la madera. El uso de productos de madera con alto valor añadido es un claro aliado para incentivar esta gestión. Los avances tecnológicos también han permitido dar un salto cualitativo en la madera dentro del sector de la construcción. De material usado directamente con un procesado simple consistente en el aserrado, ha pasado a formar parte de una amplia gama de materiales, desde paneles a vigas encoladas. La madera ha dejado de ser un mero material de construcción y se ha transformado en materia prima de nuevos elementos, lo que ha permitido que la imaginación del proyectista y la tecnología puedan propiciar un nuevo futuro para la madera dentro del sector de la construcción.

Dossier Tècnic. N.º 102

La madera en la construcción
Marzo de 2020

Edición

Dirección General de Alimentación,
Calidad e Industrias Agroalimentarias

Consejo de redacción

Carmel Mòdol Bresolí, Jaume Sió
Torres, Joan Gòdia Tresànceh, Maria
Glòria Cugat Pujol, Neus Ferrete Gracia,
Joaquim Xifra Triadú, Enric Vadell Guiral,
Jordi Ruiz Olmo, Rosario Allué Puyuelo,
Laura Dalmau Pol, Valentí Marco Sanz,
Antoni Enjuanes Puyol, Joan Barniol
Garriga, Isaac Salvatierra Pujol, Maria
Josep de Ribot Porta, Joan S. Minguet
Pla, Mireia Medina Sala y Rosa Cubel
Muñoz

Coordinación y producción

Maria Josep de Ribot Porta, Imma Malet
Prat, Annabel Teixidó Martínez, Ester
Blanco Casellas (CTFC/FBS) y Jordi
Gené Sera (INCAFUST)

Corrección y asesoramiento lingüístico

Joan Ignasi Elias Cruz y Lluís Piqueres Pla

Grafismo y maquetación

Carlos Guzmán Lorente

Impresión

Romanyà Valls, S. A.

Depósito legal

B-16786-05
ISSN: 1699-5465

El contenido de los artículos es responsabilidad de sus autores/as. *DOSSIER TÈCNIC* no se identifica con ellos necesariamente. Se autoriza la reproducción total o parcial de los artículos citando la fuente y la autoría.

Departamento de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación

Gran Via de les Corts Catalanes,
612-614 08007 - Barcelona

Más recursos, enlaces y versión electrónica en:

<https://ruralcat.gencat.cat>
<http://agricultura.gencat.cat/es/>
Correo electrónico: sia.daam@gencat.cat

Fotografía de la portada:

Autor: Carlos Guzmán Lorente



MADERA: material del ayer y del futuro



Masia Anfruns. Fotografía: Miquel Escobar, de Bioarkiteco (<http://bioarkiteco.com>).



Masia Can Fàbregas del Bosc. Fotografía: A. Álvarez (CC BY SA).

01. Introducción

Vivimos en un mundo en constante crecimiento, donde la sociedad necesita cada vez más nuevas construcciones. Las ciudades crecen sin freno y, del mismo modo, la conciencia por un mundo más sostenible.

Actualmente, la gran mayoría de edificaciones se construyen con los mismos materiales. Hormigón y acero predominan en las estructuras de los edificios, tanto a escala local y nacional como internacional. El uso de estos materiales, no obstante, comienza a ponerse en cuestión debido al gran

gasto energético y la contaminación que genera su fabricación, así como la huella ecológica que dejaremos dado que no son biodegradables.

La sociedad actual está cada vez más concienciada de los problemas que supone el cambio climático. Busca y demanda alternativas para paliar el efecto invernadero. Esto ha comportado que podamos observar cómo ha crecido actualmente el interés por las estructuras de madera; un material con el que se aprovechan los recursos materiales que nos ofrece la naturaleza.

El proceso de producción de la madera utiliza menos recursos que el resto de materiales, y produce menos gases de efecto invernadero (como el CO₂) que la fabricación de los materiales convencionales.

Por otra parte, las construcciones en madera permiten edificaciones ligeras, modulares y de fácil ejecución, como si se trataran de piezas de un puzle que hay que encajar.

02. Tradición de la madera en Cataluña

En Cataluña las construcciones de madera tienen una larga trayectoria, y no es una tipología estructural desconocida, sino un patrimonio cultural único de nuestro sistema constructivo. Encontramos por toda Cataluña estructuras de cubierta y forjados elaborados con vigas de madera que han sobrevivido al paso de los años, que han sido utilizados durante siglos y hasta bien entrado el siglo xx.

Sin ir más lejos, la tradicional masía catalana es la construcción por excelencia que cumple con este sistema tradicional. Se basa en muros de carga, bien de piedra seca, bien de tapial o mampostería, que se remataban con vigas de madera.

El proceso constructivo y la madera utilizada estaban muy ligados a la zona de construcción, a los tipos de bosques a los que se tuviera acceso y a un proceso de maduración en el tiempo.

Hoy día, el uso de la madera no ha desaparecido y se siguen ejecutando multitud de estructuras con este material.

03. Estructuras de madera a escala mundial

Mundialmente, las estructuras de madera de vanguardia y las más innovadoras de hoy son las que se plantean con estructuras en paneles CLT (*cross laminated timber*), que han cambiado el panorama de la propia construcción en madera.

El uso de la madera en este tipo de panel ha dado un salto a escala mundial; ha pasado de las construcciones de pequeñas dimensiones a utilizarse en edificios en altura, como una clara propuesta para dar respuesta a los requisitos de crecimiento y sostenibilidad del mundo actual.

Así pues, podemos encontrar edificios de más de 10 plantas construidos con este sistema, tanto en Europa como en América.



Escuela La Canaleta, Vilaseca. Proyecto de 2260mm Arquitectes. Fotografías: Lluís Bernat (4photos.cat).



IES Serra Noet, Berga. Fotografía: BIS structures.



Edificio Cavallers, Lleida. Fotografía: Trass arquitectura.

En Canadá, de la mano de Acton Ostry Architects Inc., encontramos la torre Brock Commons Tallwood House, de 53 metros de altura y destinada a residencia de estudiantes de la Universidad de Columbia. La estructura combina unos núcleos verticales de hormigón, con forjados de paneles CLT y pilares de madera laminada.

La madera conformada en paneles contralaminados presenta una alternativa estructural con mucho recorrido por explorar que ya ha dado el salto a las grandes construcciones.

En Noruega se destacan un par de proyectos donde la madera es la protagonista de la estructura, en los que se combinan los paneles CLT con tirantes de madera laminada para darle estabilidad frente a los empujes horizontales que se derivan de la acción del viento. Por un lado, la Torre Treet, en Bergen, diseñada por Geir Brekke, de Lund & partnere, de 49 metros de altura; y por otro, la torre Mjøs, cerca de Oslo, obra de Voll Arkitekter, hasta ahora la torre de madera más alta del mundo, de casi 85 metros de altura.

04. Estructuras de madera en Cataluña

Cataluña no se queda atrás en la carrera de las estructuras de madera, especialmente en CLT combinada con elementos de madera laminada.

Si bien es cierto que el sector está en los inicios de su expansión, ya se encuentran edificios pensados y ejecutados con esta tipología estructural.

Dejando de lado las estructuras más comunes con esta tipología, las viviendas unifamiliares aisladas, también la encontramos en sobreáticos (también conocidos como «remontas» en la zona), rehabilitaciones y pequeñas construcciones auxiliares.

Sin embargo, en los últimos años se ha ampliado el repertorio y ya aparecen los primeros edificios de cierta entidad contruidos con paneles. Este sistema constructivo se va empleando en edificios cada vez de mayores dimensiones.

Recientemente, podemos encontrar equipamientos públicos destinados a la educación, como el Instituto de Educación Secundaria Serra i Noet, en Berga, diseñado por Fabregat & Fabregat Arquitectes y ejecutado por Velima Systems de la mano de KLH (VIAS+Romero Polo). Este edificio cuenta con una su-

perficie de unos 3500 m² y una altura de PB+2. También es destacable la Escuela de Educación Primaria la Canaleta, en Vilaseca, obra de 2260mm Arquitectes y ejecutada por Egoín. La escuela cuenta con una superficie de 3480 m² y una altura de PB+1.

Aparecen también los primeros edificios destinados a uso residencial, en los que se ha optado por invertir en estructuras de madera laminada y paneles de madera tipo CLT.

Los dos ejemplos más importantes del panorama actual catalán son el edificio La Borda, en Barcelona, proyecto de Lacol Arquitectura Cooperativa y ejecutado por Egoín. En este caso, el edificio tiene una altura de PB+6 y unos 3000 m² de superficie. Por su parte, el edificio Cavallers, en Lleida, concebido por Trass arquitectura y ejecutado por Altermatèria (Construccions Pallás, SL) tiene una altura de PB+5 y 941 m² de superficie.

05. ¿Qué aportan las estructuras de madera a la construcción?

El hecho de tratarse de un sistema ligero e industrializado permite plazos de ejecución reducidos, que minimizan el impacto que toda obra conlleva. Asimismo, se reducen los residuos generados en la obra, ya que todo el material llega directamente del taller.



Edificio La Borda, Barcelona. Fotografías: Lacol arquitectura cooperativa (izquierda) y Lluç Miralles (derecha).

Un punto no menos importante es el hecho de que, como material natural, su huella ecológica es baja, disminuye de manera importante la generación de CO₂ y contribuye a tener edificios más sostenibles y respetuosos con el medioambiente.

Desgraciadamente, existen falsas creencias sobre el material que lo relegan a últimas alternativas a la hora de elegir la tipología estructural, sin que se sea consciente de que es un material con gran potencial hoy día. Fuego y humedad son los dos tópicos más comunes que generan incertidumbre y que son totalmente falsos. Una estructura bien dimensionada y bien tratada conferirá las mismas prestaciones que cualquier otro material y tiene garantizadas en todo momento la estabilidad y la integridad.

La madera con el formato de paneles CLT que aflora hoy día aporta una nueva visión tanto de la estructura como de la arquitectura, disciplinas muy relacionadas entre sí.

En Cataluña, es una opción todavía poco convencional por dos motivos principa-

les: en primer lugar, la envergadura cada vez mayor de las edificaciones que se construyen hace del todo necesaria la presencia de consultores de estructuras especializados que redacten el proyecto y lleven a cabo el control de la obra. Estos acaban aportando objetividad, al no estar ligados a ninguna empresa concreta, y pueden ofrecer un asesoramiento global y una visión integral del conjunto, no solo sobre la madera en sí. En segundo lugar, aunque en Cataluña se dispone de recursos naturales, en general están poco aprovechados. Este sistema no se convierte en un producto de proximidad, sino que la mayoría de construcciones emplean madera proveniente del norte de España y del extranjero.

Por otra parte, hay que tener presente que actualmente hay pocos profesionales bien cualificados para la ejecución de este sistema estructural y constructivo. Hay que ser cuidadosos con aspectos constructivos claves en este sistema, como son las uniones, que en otras tipologías estructurales damos por sabidos. Así pues, es un sector en el que todavía queda mucho por aprender y en el que la inno-

vación debe ir un paso por delante en todo momento.

Asimismo, es necesario estar atentos para no caer en un uso abusivo del material en función de los recursos de cada localización, con el fin de prever que no se produzca una excesiva deforestación en un futuro.

Las estructuras de madera han recorrido un largo camino, pero tienen mucho más por delante.

Autoría



Ariadna Grau Llinares
Responsable de proyectos
BIS structures
agrau@bisstructures.com



Esther Muñoz Gavilán
Jefa de equipo
BIS structures
estherm@bisstructures.com



David García Carrera
Socio fundador y director técnico
BIS structures
davidg@bisstructures.com

VISIÓN HISTÓRICA

de la evolución tecnológica de los sistemas constructivos de madera



Casa de troncos (Norsk Folkemuseum, Oslo). Fotografía: Eduard Correal Mòdol. INCAFUST.

Los sistemas constructivos con madera han evolucionado a lo largo de la historia paralelamente al conocimiento técnico, a la aparición de nuevos materiales, a las herramientas disponibles y a los diversos cambios sociales y legislativos. Cada uno de ellos presenta las ventajas y las limitaciones propias del estadio de desarrollo tecnológico del momento histórico en que aparecieron. No en vano, los

sistemas más antiguos y sencillos tienen como virtud requerir muy pocos medios auxiliares, mientras que los más modernos y sofisticados, a pesar de estar más optimizados, requieren una industria potente detrás que los haga factibles. A grandes rasgos, existen ocho tipos constructivos de edificaciones de madera: cabañas primitivas, casas de troncos, edificaciones de entramado pesado,

La madera tiene una capacidad tan grande de resistencia que incluso soporta el enorme salto tecnológico existente entre las cabañas de madera y los rascacielos de CLT.

edificios con estructura de madera armada, edificaciones de entramado ligero tipo globo, edificaciones de entramado ligero tipo plataforma, edificaciones de paneles de madera laminada cruzada y, por último, una tipología bastante amplia de construcciones complejas que incorporan elementos de gran entidad, como cúpulas o grandes estructuras.

01. Cronología de los sistemas constructivos

El sistema constructivo más primitivo es el de las cabañas, que emplea materiales naturales casi sin procesar, que provienen del entorno inmediato, y que requiere una bajísima cantidad de energía y, en consecuencia, es el sistema que tiene un menor impacto en el medio. Se puede decir que es una construcción totalmente circular y auténticamente de kilómetro cero, aunque solo es capaz de cubrir las necesidades más básicas de cobijo y seguridad de sus habitantes. Por el contrario, las construcciones son efímeras si no disponen de un mantenimiento continuado, el confort y las prestaciones son muy elementales, son construcciones de planta baja y su tamaño es muy reducido. Los elementos constructivos que se emplean son los que proporciona la naturaleza y, por ejemplo, la luz de las vigas vendrá condicionada por la longitud de los troncos o ramas.

Los materiales y soluciones que adoptan los diversos sistemas constructivos son reflejo del grado de desarrollo tecnológico y de los recursos disponibles en cada época y lugar.

Algo que debe tenerse muy en cuenta en la evolución de los sistemas constructivos es la cantidad de esfuerzo que se necesita invertir en el levantamiento de una casa. Cuando los recursos son muy limitados no es posible recurrir a

materiales lejanos ni pesados. De hecho, este patrón queda muy bien reflejado en la arquitectura tradicional. La geología del territorio condiciona el tipo de piedra que se emplea en las paredes, y donde no hay piedra, pero hay arcilla, las casas suelen ser de adobe. Lo mismo sucede en los tejados: si hay arcilla encontraremos tejas de tipo árabe, en cambio, en otros terrenos estos elementos de los tejados son de pizarra o madera.

Las casas de troncos, también conocidas como casas canadienses, son las cabañas de madera más evolucionadas. Este sistema ancestral fue muy usado

hasta los años veinte del siglo pasado en zonas remotas y en general en aquellas donde no había disponibilidad de madera aserrada. Las dimensiones de las edificaciones quedan totalmente condicionadas por la longitud y el diámetro de los troncos. En los acabados más rústicos los troncos no se mecanizan, pero actualmente es habitual ver como en este tipo de casas los rollos se cilindran mecánicamente porque facilita el montaje y aporta unos acabados de mayor calidad. Del mismo modo, las ensambladuras tradicionalmente se hacían con hacha, pero hoy día también se pueden hacer gracias a los tornos numéricos. Este es



Casa tradicional de entramado pesado (Norsk Folkemuseum, Oslo). Fotografía: Eduard Correal Mòdol. INCAFUST.

un sistema de construcción tosco y relativamente pesado con el que habitualmente se levantan casas de planta baja o planta baja más una. En raras ocasiones se llega a planta baja más dos.

El entramado pesado fue el primer sistema constructivo de madera basado en elementos aserrados de sección rectangular. Tanta era su importancia que hasta 1830 era el sistema constructivo predominante en viviendas y edificaciones civiles. No en vano, los cascos antiguos medievales originales que todavía quedan en pie están repletos de este tipo de construcciones, fácilmente identificables por

los elementos de madera que quedan expuestos en la fachada. En su concepción más pura, el aserrado se adapta a las medidas de los troncos para optimizar el material y, en consecuencia, las vigas y los pilares no tienen medidas estandarizadas. Tanto es así que algunas variantes de este sistema incluso emplean troncos curvos de grandes dimensiones para que cumplan la doble función de pilar y cercha de bajocubierta. Los elementos se unen mediante ensambladuras, algunas de ellas, auténticas obras de artesanía. En principio, nunca se emplean herrajes, y los clavos son muy escasos. Se pueden emplear clavijas de madera

para fijar las piezas entre sí y los pórticos se rigidizan con mampostería de relleno. Las limitaciones dimensionales de los troncos, la rigidez de las uniones y la concepción del propio sistema imponen que la altura máxima habitual de los edificios sea de planta baja más dos, aunque no es raro encontrar de planta baja más cuatro o cinco. Este sistema revivió en el siglo xx con el desarrollo de la madera laminada encolada (fotos en págs. 8 y 9).

A partir de 1830, el entramado pesado se fue abandonando en favor del entramado ligero tipo globo, un sistema que predominó en la construcción de viviendas de madera hasta en torno a 1930. Este tipo de construcción, común en América del Norte, se caracteriza porque su ligereza se sitúa en las antípodas de las casas de piedra o de estructura de hormigón y cerramientos cerámicos. Basado también en madera aserrada de sección rectangular, las principales diferencias con el entramado pesado son la utilización de secciones mucho más pequeñas de medida estándar que se estabilizan con barras de madera aserrada dispuestas en diagonal en las esquinas, además del uso masivo de tornillos, clavos y herrajes en lugar de uniones. De esta forma, se optimiza mucho la utilización del material y se elimina la dependencia de los artesanos carpinteros. En consecuencia, con este sistema prácticamente cualquiera podía levantar con sus manos su propia casa de forma económica. Su principal limitación es la altura de las edificaciones, condicionada totalmente por la longitud de los montantes. A pesar de que los paneles se emplean como cerramientos, también tienen la función de dar rigidez a las edificaciones. La vivienda típica más alta que podemos encontrar con entramado ligero es de planta baja más dos (foto en la parte inferior izquierda).

Paralelamente a la aparición de las casas de entramado ligero, aparecieron las estructuras construidas con madera de armar, en las que se combinaban láminas de madera aserrada de sección rectangular y tornillos metálicos. Esta solución constructiva, que fue competitiva entre



Puente de madera de estructura de entramado pesado (Lincoln, New Hampshire, EE. UU.). Fotografía: Eduard Correal Mòdol. INCAFUST.



Casa tradicional noruega de entramado ligero (Norsk Folkemuseum, Oslo). Fotografía: Eduard Correal Mòdol. INCAFUST.

1830 y la década de los cuarenta del siglo xx, permitía ir más allá en la construcción con madera básica combinando elementos estructurales sencillos. En Cataluña, la antigua nave de blanqueo de la Cooperativa Obrera Mataronense, de Gaudí (1883), y la sede del Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña en Barcelona (1929) son dos excelentes ejemplos.

A partir de 1930, el entramado de tipo globo evolucionó rápidamente hacia el de tipo plataforma por los evidentes problemas de la falta de sectorización en caso de incendio. Al no haber discontinuidad vertical entre plantas en los cerramientos de fachada, el fuego se podía propagar con mucha facilidad a través de los aislamientos. La solución fue extender el forjado por toda la planta hasta la fachada. De esta forma, los montantes dejan de ser tan largos como el alto de la casa y quedan limitados a una longitud igual a la altura de una planta. Por lo tanto, mientras en el tipo

Los edificios más altos de madera construidos o en construcción tienen entre 18 y 24 plantas. Los proyectos actuales más ambiciosos aspiran a 80.

globo los forjados se fijan a los montantes, en el tipo plataforma se apoyan en ellos. Otro factor que juega a favor del entramado tipo plataforma frente al tipo globo es el coste más asequible de los montantes cortos en comparación con los largos. Además, puede parecer que este sistema elimina las limitaciones en altura del entramado ligero tipo globo, pero la baja capacidad portante de los montantes de sección pequeña y la limitada rigidez del sistema tampoco ayudan a levantar edificaciones de más de planta baja más dos.

La máxima expresión de los sistemas constructivos basados en elementos

estructurales lineales son las grandes estructuras que se realizan para construir pabellones, grandes edificios públicos, puentes y, sobre todo, las grandes cúpulas. De hecho, las construcciones con madera son las que tienen el récord mundial de luz libre entre pilares; llegan a más de 100 metros. Estas cotas no se pudieron alcanzar hasta que la madera laminada encolada llegó a un estadio de desarrollo y adquirió unas prestaciones homologables a las que dispone hoy día. En la década de los cuarenta del siglo xx los nuevos adhesivos de resorcinol formaldehído —capaces de soportar con-

diciones más severas de humedad y con un poder de adhesión superior al de las colas tradicionales— hicieron posible la producción en masa de este material. En 1963 se publicó en América la primera norma de estandarización.

Ahora bien, a partir de principios de los años noventa del siglo xx se inició el desarrollo de la madera laminada cruzada. Este material se fabrica encolando un número impar de capas de láminas de madera maciza dispuestas entre ellas en dirección cruzada. De esta forma se obtienen paneles con



Casa unifamiliar moderna de entramado ligero y paneles OSB (Torrefarrera). Fotografía: Eduard Correal Mòdol. INCAFUST.



Estructura compleja libre de pilares construida con materiales madereros modernos. Fotografía: Eduard Correal Mòdol. INCAFUST.

La edificación con madera está hoy totalmente planificada, informatizada y mecanizada, y ha superado la construcción convencional evolucionando hasta la fabricación moderna.

mucha capacidad portante, en los que la influencia de las singularidades de la madera queda bastante diluida. El

uso intensivo de la madera favorece el aislamiento acústico, mejora la inercia térmica respecto a otros sistemas, aporta una gran sensación de solidez y, sobre todo, permite erigir construcciones en altura. En estos momentos estamos inmersos en una competición no declarada por construir el edificio más alto con madera. Se ha pasado de la torre de madera de Waugh Thistleton en Londres, con nueve plantas, en 2010, a los 85,4 metros de la torre Mjøen en Brumunddal (Noruega) y a proyectos de futuro que sobrepasan los 300 metros.

Hasta el momento, las estructuras típicas, independientemente del material, se construyen con elementos lineales (vigas y pilares) y, como mucho, como en el caso del entramado ligero, los paneles de los tabiques sirven para aportar rigidez al sistema. En cambio, las estructuras de CLT puras se levantan solo empleando paneles y se basan en el concepto de caja. Mientras una caja abierta presenta muchos grados de libertad, una vez se cierra, se vuelve un sistema enormemente rígido. Con todo, si las cargas previstas requieren reforzar la estructura, se pueden emplear vigas y pilares de acero, o incluso se pueden concebir estructuras mixtas (véanse las fotos).

02. Contexto tecnológico de la evolución de la construcción con madera

Así pues, a lo largo de la historia, la forma de construir con madera ha evolucionado de forma muy importante. Las razones que explican estos cambios son de toda índole y muchas de ellas no están relacionadas aparentemente ni con la construcción ni con la madera. La base de toda la evolución que ha tenido lugar se encuentra en los *Enclosure acts* que precedieron a la revolución industrial en el Reino Unido. La mejora de la productividad de las tierras, la consecuente expulsión de mano de obra del campo y el abaratamiento de los salarios por el exceso de oferta de esta clase social fueron el caldo de cultivo necesario para la revolución industrial. En la segunda mitad del siglo XIX, la creación de fábricas, la capacidad de obtener gran cantidad de recursos, la reducción de las distancias gracias al transporte motorizado y las nuevas formas de producción especializadas y en cadena basadas en el taylorismo desembocaron en la normalización de los productos. Los productos artesanales y los que no se producían en serie perdieron gran parte de su competitividad.

En este contexto, aparecieron muchos materiales, maquinarias y productos nuevos relacionados directa o indirectamente con la madera: tornillos y



Casa unifamiliar de CLT (Lleida). Fotografía: Eduard Correal Mòdol. INCAFUST.



Edificio entre medianeras de CLT. Planta baja más cinco pisos (Lleida). Fotografía: Eduard Correal Mòdol. INCAFUST.

clavos producidos a escala industrial, madera aserrada en aserraderos accionados con vapor (1830) o las colas fuertes. También se inventaron otros que eran competidores directos, como el cemento Portland o el acero laminado, y en consecuencia se desarrolló toda la construcción con hormigón y acero. La construcción en madera abandonó el entramado pesado y evolucionó hacia el entramado ligero tipo globo y la madera de armar. Los

El futuro de la construcción pasa por productos renovables, sostenibles, biodegradables, poco intensivos energéticamente, aislantes y transpirables. El futuro está en la madera.

artesanos de la madera perdieron terreno frente a la madera de medidas normalizada y a las uniones realizadas con clavos, tornillos y herrajes. A partir de ahí, la evolución posterior fue relativamente escasa, con la adopción, años más tarde, del entramado ligero tipo plataforma para mejorar la seguridad contra incendios y el confort acústico de los inquilinos. Además, la madera aserrada corta era más barata y fácil de manipular y transportar que la larga.

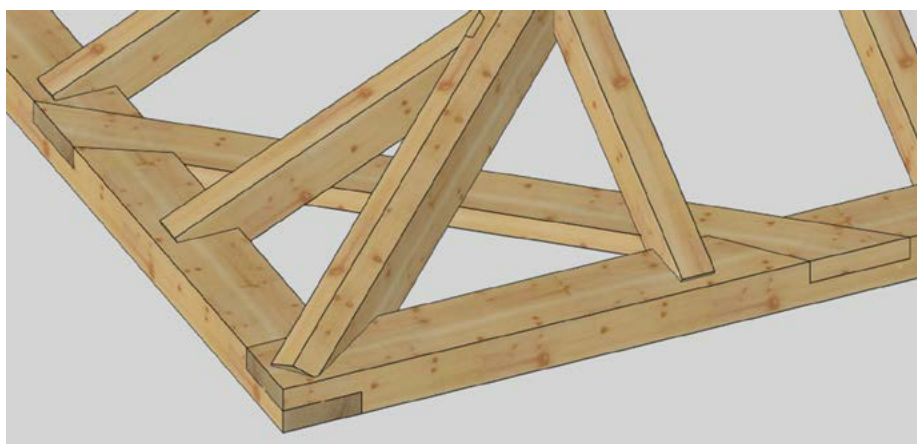
En términos generales, el siglo xx fue muy favorable a la construcción con hormigón y acero, sobre todo en los países del Mediterráneo. De forma abreviada, se puede concluir que, en aquellos países donde la madera es un recurso muy abundante, como los EE.UU., los países nórdicos o Canadá, estos sistemas son económicamente eficientes siempre que la energía se mantenga barata y se externalicen los costes ambientales que se generan al final de su vida útil. Esto se ve favorecido si, como sucedía en

los siglos xix y xx, se consideran como mejores *per se* todos los materiales nuevos diseñados y elaborados por el ser humano en un contexto histórico de gran evolución tecnológica, en el que no existía conciencia ecológica y la economía era de consumo y completamente lineal.

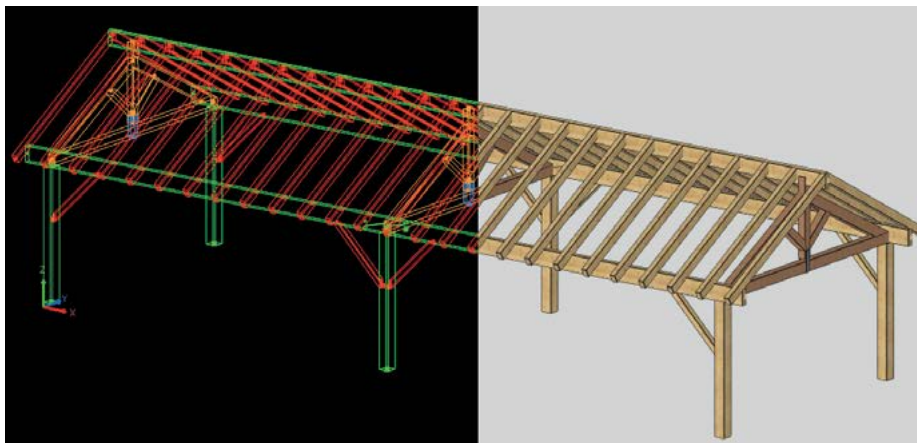
No obstante, con respecto al campo de la tecnología de la madera, el siglo xx es un periodo muy importante en el que se alcanzan grandes avances en materiales y herrajes. El desarrollo de los adhesivos de acetato de polivinilo, melamina-formaldehído, resorcinol-formaldehído y poliuretano abren las puertas a la fabricación de los paneles de partículas, los de densidad media, los OSB, los contrachapados, la madera laminada encolada más allá de la fabricada con cola de caseína o

la madera laminada cruzada, además de muchos otros productos madereros combinados. Por otro lado, los tornillos y los herrajes también experimentaron una gran evolución en el siglo pasado, un proceso de mejora que aún sigue generando nuevas soluciones estructurales.

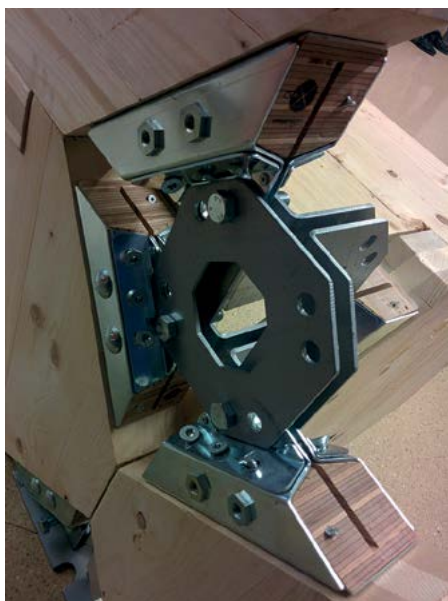
Otro de los avances extraordinariamente importantes que se produjeron, sobre todo en la segunda mitad del siglo xx, es el desarrollo de los sistemas informáticos y su aplicación en los sistemas CAD-CAM (*computer aided design* y *computer aided manufacturing*). El incremento progresivo de la capacidad de computación del *hardware*, la aparición de lenguajes de programación cada vez más versátiles y robustos y el abaratamiento de los equipos hicieron viable la extensión de los programas de CAD a



Detalle de las uniones de una estructura de entramado pesado. Actualmente no han caído en desuso gracias a los sistemas CAD-CAM. Fuente: Salomé Temiño Villota.



Estructura diseñada y calculada con CAD lista para ser enviada a un CAM. Fotografía: Eduard Correal Mòdol. INCAFUST.



Sistema X-RAD de Rothoblaas, un ejemplo de herrajes para uniones estructurales altamente complejas para soluciones constructivas de nueva generación con CLT. Fotografía: Eduard Correal Mòdol. INCAFUST.

gran cantidad de usuarios. Por otra parte, avances que parecen hoy tan obvios como los protocolos normalizados de comunicación entre equipos, las redes telemáticas o la introducción de la electrónica en todo tipo de maquinaria industrial permitieron llegar a los sistemas CAM. La aplicación del diseño mediante CAD y el uso de la CAM en la construcción con madera abrieron las puertas a la fabricación en taller de las edificaciones y a lograr una precisión milimétrica en la construcción de las edificaciones en los años noventa. La implantación de sistemas BIM (*building information modeling*) en construcciones realizadas con CAD-CAM resulta bastante más sencillo que en la construcción convencional.

En todo caso, para nosotros el edificio paradigmático de la segunda mitad del siglo xx es un bloque de pisos residencial construido con hormigón, acero y materiales cerámicos. Muchas son las razones que han llevado a que esto sea así, pero para que este modelo sea competitivo es necesario que se cumplan necesariamente una serie de condiciones: hay que disponer de gran cantidad de mano de obra asequible, no estar some-

tidos a una legislación estricta de seguridad y salud laboral, gestionar de manera laxa la gran cantidad de residuos que se generan al final de la vida útil del edificio y disponer de energía barata para climatizar las viviendas y para fabricar los materiales necesarios. Esto no significa que este tipo de edificios no se pueda construir de forma segura ni que no se puedan diseñar para que sean eficientes, sino que cumplir con estas nuevas metas los hace menos competitivos económicamente con respecto a otros sistemas constructivos alternativos. En consecuencia, formas de construir que quedaban descartadas, de golpe se convierten en muy interesantes.

03. Tendencias futuras

En estos momentos nos encontramos inmersos en un cambio rápido y muy profundo. En los últimos años estamos viendo como crece la preocupación respecto a los graves problemas que provoca el efecto invernadero combinado con un escenario de encarecimiento de la energía, entre otros, por el agotamiento de los recursos petrolíferos. En este sentido, el Código Técnico de la Edificación ya incorpora valores límite de demanda energética y obliga así a construir viviendas eficientes. La transición de la economía lineal de consumo a la circular ya ha comenzado, y cualquier producto, las construcciones incluidas, que no sea completamente recuperable e introduciendo de nuevo en el ciclo de materiales o que genere residuos no será admisible. El encarecimiento de la mano de obra, la eliminación de los puestos de trabajo poco cualificados y la mejora de las condiciones laborales en cuanto a seguridad y salud generan graves problemas en todos aquellos sectores intensivos en mano de obra, incluido el de la construcción. Además, la demanda de edificaciones saludables que incorporen productos naturales y que prescindan de productos nocivos cada vez es más importante. En cualquier caso, los productos madereros son renovables, sostenibles,

biodegradables, poco intensivos energéticamente, naturalmente aislantes y transpirables, tecnológicos, resistentes, optimizados y eficientes, y tienen un gran futuro en la construcción. Por todo ello, es plausible pensar que los diversos sistemas constructivos con madera ocuparán en nuestras casas un lugar mucho más destacado de lo que han venido haciéndolo hasta ahora.

Para saber más:

Asociación de la Madera Estructural:
<https://www.afe.cat/>

Forest Bioengineering Solutions:
<http://www.fbs.cat/?lang=es>

CORREAL MÒDOL, E. (2018). *Promoció de la construcció amb fusta en l'àmbit municipal*. Asociación de Entidades Locales de Propietarios Forestales de Cataluña. Asociación para la Gestión del Programa Leader Ripollès Ges Bisaura.

CORREAL MÒDOL, E. (2017). *Ús responsable dels productes fusters en elements urbans*. Ayuntamiento de Barcelona. Área de Ecología Urbana. Instituto Catalán de la Madera:
<http://www.incafust.cat/>

Universidad Politécnica de Barcelona. Laboratorio de Innovación y Tecnología en la Arquitectura: <https://lita.upc.edu/es>

Autoría



Eduard Correal Mòdol

Dr. ingeniero forestal
Instituto Catalán de la Madera.
CTFC
eduard.correal@incafust.cat



Jaume Avellaneda Diaz-Grande

Dr. arquitecto
Laboratorio de Innovación y Tecnología en la Arquitectura.
LiTA. UPC.
jaume.avellaneda@upc.edu

EFICIENCIA ENERGÉTICA en la construcción con madera



01. Introducción

Los edificios representan el 40 % del consumo total de energía y el 36 % de las emisiones de CO₂ en la Unión Europea (Annunziata, 2013). Por este motivo, con el objetivo de reducir la demanda energética, el año 2010 se presentó la Directiva Europea 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética de los edificios. Según esta directiva, todos los edificios

nuevos deben ser edificios de consumo de energía casi nulo (*nearly zero energy buildings* «nZEB») a partir del 31 de diciembre de 2020 (dos años antes en el caso de edificios públicos). La directiva fue modificada en algunos aspectos en 2013 y 2018 (directiva en vigor: (UE) 2018/844). Los distintos países están actualmente incorporando a sus códigos nacionales de edificación las correspondientes definiciones, indi-

cadore y métodos de evaluación energética. En el caso de España, se está elaborando el Documento de bases para la actualización del Documento Básico DB-HE, para actualizar el Código Técnico de la Edificación (CTE).

Por otro lado, los edificios consumen entre el 20 y el 50 % de los recursos naturales, en función del entorno donde estén ubicados (Ramírez, 2010). La ges-

ción responsable de los recursos es otro aspecto presente en la agenda europea, tal y como lo demuestra el reto social incluido en el programa de investigación e innovación Horizonte 2020 sobre cambio climático, medioambiente, eficiencia en los recursos y materias primas. Asimismo, uno de los objetivos de desarrollo sostenible aprobados por la ONU es la producción y el consumo responsable de recursos. Para conseguir los objetivos

mencionados se debe tener en cuenta la huella ecológica de los materiales y buscar la reducción del impacto ambiental de los materiales empleados durante la construcción de un edificio.

En este marco de altas exigencias energéticas y medioambientales, el uso de la madera y sus derivados puede ser clave. El uso de madera certificada garantiza una gestión responsable y sos-

La madera puede dar respuesta al doble reto de conseguir una alta eficiencia energética y un uso sostenible de los recursos naturales.

tenible de los recursos forestales, de este modo, se consigue que la madera sea un recurso renovable, tal y como lo demuestra el crecimiento de la masa forestal que experimenta Europa desde 1990 (Kauppi, 2018).

02. Comportamiento térmico de la madera y sus productos derivados

La madera tiene una conductividad térmica baja comparada con los otros materiales utilizados en la construcción y un calor específico muy elevado, de 1600 a 2900 kg°C, lo que significa que, con el mismo suministro de calor, se calienta menos que otros materiales.

02.01. Aislamiento térmico

Entre otras consideraciones, el actual DB HE del CTE establece los requisitos mínimos para la transmitancia térmica de los edificios. Estos requisitos varían según las diferentes zonas climáticas definidas en el documento. Para determinar la transmitancia térmica de un cerramiento concreto, hay que conocer la conductividad térmica de los materiales que lo componen. Para un mismo espesor de material, cuanto menor sea la conductividad térmica, mayor será la resistencia térmica y menores las pérdidas energéticas.

La conductividad térmica de la madera depende del tipo de madera y de su densidad, pero en todos los casos presenta valores bajos. La tabla 1 muestra los valores correspondientes para maderas de coníferas y frondosas. La conductividad térmica de la madera es, típicamente, 4 veces más baja que la del ladrillo hue-

Tipo de madera		ρ (kg/m ³)	λ (W/m·K)
Frondosa	Muy pesada	$\rho > 870$	0,29
	Pesada	$750 < \rho \leq 870$	0,23
	De peso medio	$565 < \rho \leq 750$	0,18
	Ligera	$435 < \rho \leq 565$	0,15
	Muy ligera	$200 < \rho \leq 435$	0,13
Conífera	Muy pesada	$\rho > 610$	0,23
	Pesada	$520 < \rho \leq 610$	0,18
	De peso medio	$435 < \rho \leq 520$	0,15
	Ligera	$\rho \leq 435$	0,13

Tabla 1. Valores de la conductividad térmica (λ) para maderas de dos tipos, en función de su densidad (ρ). Fuente: elaboración propia a partir de los datos de elementos constructivos del CTE.

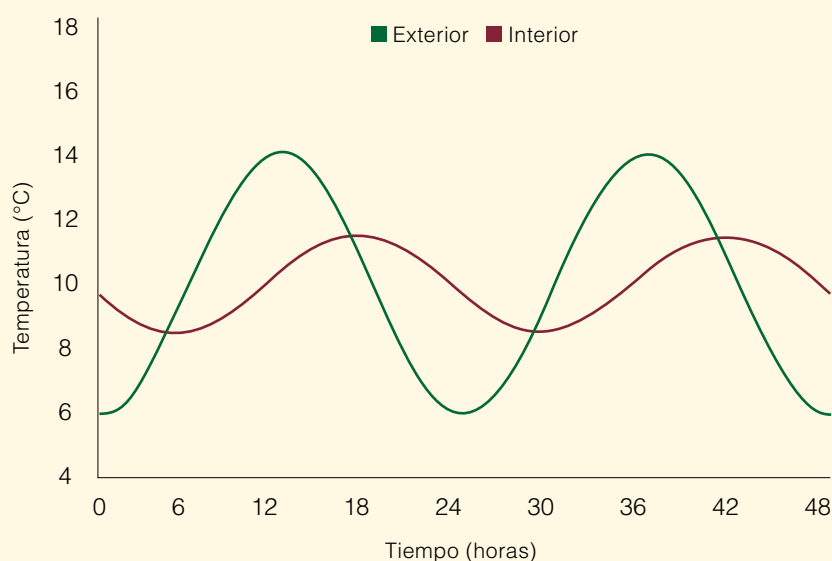


Figura 1. Esquema donde se representan las variaciones de la temperatura exterior e interior a lo largo de dos días, así como el retraso expresado en horas. Fuente: elaboración propia.

	Conductividad λ (W/mK)	Difusividad α (m ² /h)	Retraso φ (horas)
Aluminio	230	0,3485	0,2
Aire	0,026	0,0755	0,5
Aislante de EPS	0,035	0,0076	1,6
Aislante de fibra de madera	0,04	0,0025	2,8
Hormigón	1,35	0,0024	2,8
Vidrio	1	0,0019	3,2
Ladrillo hueco	0,49	0,0018	3,3
Corcho	0,049	0,0009	4,5
Madera	0,13	0,0004	7,3

Tabla 2. Valores de la conductividad y difusividad térmicas de diferentes materiales y del retraso correspondiente a 10 cm de espesor. Fuente: elaboración propia.

co, 10 veces más baja que la del hormigón y 2000 veces más baja que la del aluminio (tabla 2).

Las bajas conductividades también se mantienen en el caso de productos derivados de la madera, como son los tableros contrachapados o los tableros aglomerados de partículas y fibras, con conductividades que varían entre 0,24 y 0,07 W/mK en función de la densidad del tablero. El tablero de virutas orientadas (OSB), muy utilizado en la construcción de madera de entramado ligero, presenta una conductividad de 0,13 W/mK. Por otro lado, los tableros de corcho y los de fibra de madera tienen conductividades térmicas similares a las de otros aislantes térmicos como la lana mineral o las espumas de poliestireno.

02.02. Inercia térmica

Aunque la transmitancia U es el parámetro más empleado usualmente para evaluar el comportamiento térmico de un edificio y ajustarse a los requisitos normativos, para diseñar edificios eficientemente energéticamente es necesario tener en cuenta su comportamiento dinámico (inercia térmica). Hay numerosos estudios que muestran que el uso de paredes de elevada inercia térmica en edificios, además de mejorar el confort interior, puede dar lugar a una reducción muy significativa de las necesidades energéticas, tanto para la calefacción como para la refrigeración. De hecho, la mejor eficiencia energética viene dada por una combinación de los dos factores (transmitancia e inercia) adecuada a la situación y al tipo de uso del edificio.

La temperatura del ambiente exterior de un edificio varía con el tiempo, a lo largo de todo el ciclo diario. Si la variación de temperatura en el ambiente interior se produce con un gran retraso y una magnitud pequeña respecto a las variaciones del exterior, se dice que el edificio tiene una alta inercia térmica. La figura 1 muestra esquemáticamente el retraso (φ), medido como la diferencia, en horas, entre el momen-



Montaje de la estructura con entramado ligero de madera y del aislamiento térmico de fachada, respectivamente. Fotografías: House Habitat.

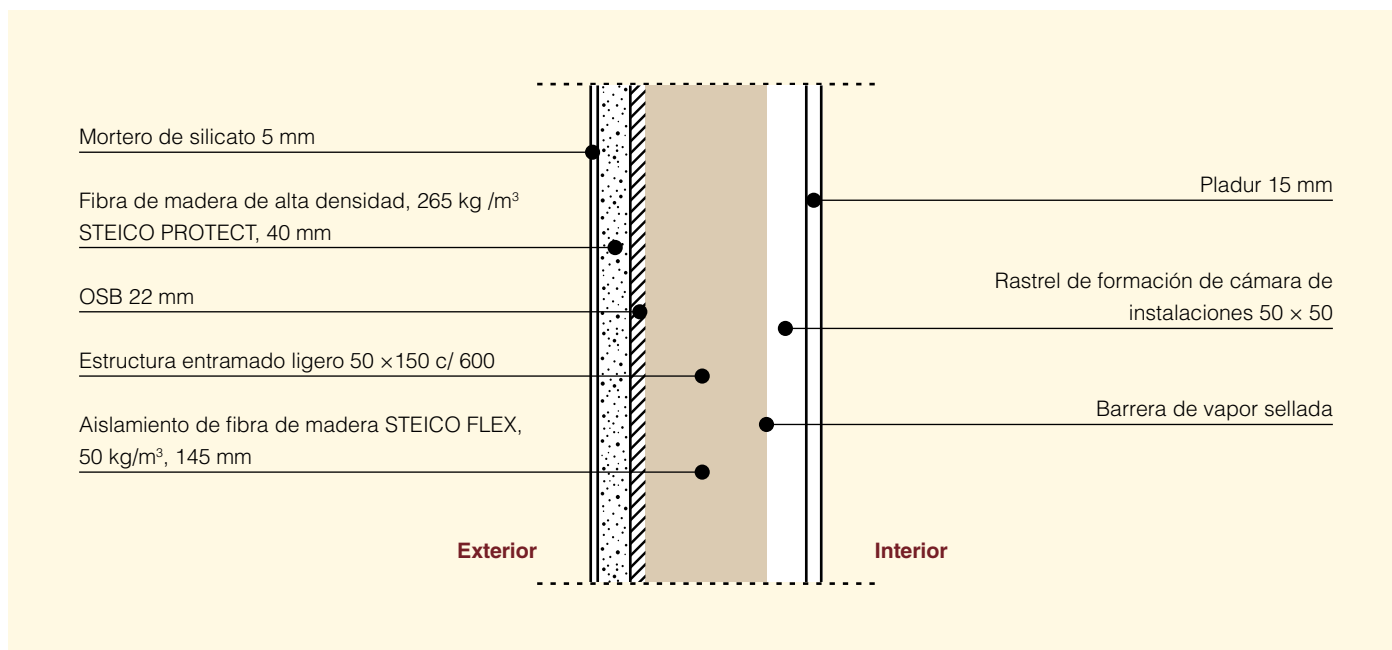


Figura 2. Sección en alzado de la fachada de la vivienda. Fuente: House Habitat.

to en que en el exterior se produce el máximo de temperatura y el momento en que este se presenta en el interior.

Para una pared de un determinado material, el retraso y el amortiguamiento son más importantes cuanto mayor es el espesor del muro y menor es la difusividad del material. Por otra parte, la difusividad de un material (α) depende de la conductividad térmica (λ), la densidad (ρ) y el calor específico (c): $\alpha = \lambda / \rho c$.

La combinación de las tres propiedades da, para la madera, un valor muy bajo en comparación con materiales como el hormigón o el vidrio.

La tabla 2 muestra una comparativa de los valores de la conductividad y la difusividad térmica de diferentes materiales, así como el retraso correspondiente a un mismo espesor de material de 10 cm. Es muy destacable el buen resultado de la madera, para la que típicamente se obtiene un retraso de 7 horas para un espesor de 10 cm. Es también muy interesante observar que los aislantes térmicos de fibra de madera muestran una conductividad térmica similar a la de otros aislantes, como la EPS, pero una difusividad bastante más baja y, por tanto, ofrecen un mayor retraso. Esto se

produce todavía en mayor medida en el caso de los aislantes de corcho, que producen un retraso casi tres veces superior al de la EPS.

03. Sistemas de construcción con madera

Existen diferentes tipos de sistemas de construcción con madera. De manera simplificada, los podemos clasificar en sistemas masivos y sistemas de entramado. Entre los sistemas masivos podemos encontrar casas de troncos y construcciones con paneles de madera contralaminada (CLT). Por otra parte, los sistemas de entramado se pueden clasificar en pesados y ligeros (*Guía de construir con madera*).

En nuestro entorno hay un interés creciente en la construcción de obra nueva con madera, y los sistemas constructivos más utilizados son los de entramado ligero y los paneles de CLT.

El entramado ligero es un sistema que surge en Estados Unidos en un momento en que la flexibilidad en el diseño y la posibilidad de construir sin herramientas especiales eran ventajas muy deseadas. A diferencia del sistema de entramado pesado, en este

caso se utilizan piezas de madera de pequeña longitud. Los cerramientos se pueden resolver de diferentes maneras, como, por ejemplo, con tableros contrachapados o tableros OSB. Es un sistema que se puede construir *in situ*, pero que también admite un alto grado de prefabricación.

La madera tiene unos valores relativamente bajos de conductividad térmica y una muy baja difusividad térmica. Esto quiere decir que la madera, comparada con otros materiales de construcción, presenta un buen aislamiento térmico y una elevada inercia térmica.

Los paneles de madera contralaminada están formados por un número impar de tableros (habitualmente 3, 5 o 7) de madera aserrada encolados perpendicularmente. Los adhesivos sin formaldehídos y basados en resinas de poliuretano son las colas más utilizadas en la producción de CLT. La disposición de los tableros permite

que la CLT se utilice tanto en elementos verticales como horizontales, y dota al panel de una elevada estabilidad dimensional.

La construcción con madera combinada con otras medidas propias de una casa pasiva permite alcanzar grandes niveles de eficiencia energética.

Aunque la madera es relativamente aislante comparada, por ejemplo, con el hormigón o los ladrillos, no lo es lo suficiente como para alcanzar los estándares de ahorro energético exigidos en la actualidad y necesita, como en el resto de sistemas constructivos convencionales, la incorporación de paneles aislantes térmicos. En los sistemas prefabricados de construcción con madera estos aislantes se pueden incorporar directamente en fábrica, lo que facilita el montaje y reduce los tiempos de ejecución. Por otra parte, a fin de disfrutar de las ventajas medioambientales de la madera y otros materiales lignocelulósicos, en el



Figura 3. Etiqueta con la calificación energética de la vivienda. Fuente: House Habitat.

mercado se encuentran aislantes de fibras de madera y también de celulosa.

Las viviendas construidas con madera incorporando un adecuado nivel de aislamiento térmico y otras medidas de eficiencia energética pueden llegar a alcanzar clasificaciones energéticas tan exigentes como es la certificación *Passivhaus*.

A modo de ejemplo, exponemos un proyecto de la empresa House Habitat situado en el municipio de Castelldefels (Barcelona) y certificado como casa pasiva. Se trata de una vivienda de estructura de entramado ligero de madera de pino nórdico procedente de bosques de gestión sostenible. Los cerramientos de fachada se componen de un aislamiento térmico de fibra de madera de baja densidad, intercalado entre el entramado ligero de madera (véanse las fotos en la pág. 16); paneles OSB 4 de 22 mm, y un acabado compuesto de un sistema SATE, mediante paneles de fibra de madera de alta densidad recubiertos con mortero de silicato, tal y como se ilustra en la figura 2.

La vivienda incorpora, entre otros, sistemas de ventilación forzada y de generación de energía a partir de fuentes renovables. La combinación de todos estos factores permite obtener unos consumos de energía anuales de 22 kWh/m² y unas bajas emisiones de CO₂ de 3 kgCO₂/m². Estos bajos valores hacen que la clasificación energética sea de A (fig. 3).

Para saber más:

RAMÍREZ, A. (2002). «La construcción sostenible», *Física y sociedad*, 13, 30-33. https://www.cofis.es/pdf/fys/fys13/fys13_30-33.pdf

ANNUNZIATA, E.; FREY, M.; RIZZI, F. (2013). «Towards nearly zero-energy buildings: The state-of-art of national regulations in Europe», *Energy*, 57, 125-133. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.11.049>

Directiva (UE) 2018/844 del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de mayo de 2018, *Diario Oficial de la Unión Europea* L 156, 75-91 <http://data.europa.eu/eli/dir/2018/844/oj>

Documento de bases para la actualización del Documento Básico DB-HE. Código Técnico de la Edificación. Ministerio de la Vivienda 2006. <https://www.codigotecnico.org/index.php/menu-documentos-complementarios/353-documento-de-bases-dbhe.html>

KAUPPI, P. E.; SANDSTRÖM, V.; LIPPONEN, A. (2018). «Forest resources of nations in relation to human well-being», *PLOS ONE*, 13 (5), 1-10. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0196248>

Guía de la madera I-II. Construcción y estructuras. AITIM, 2014. <http://infomadera.net/modulos/buscar.php?b=publicaciones>

Autoría



Alina Avellaneda
Profesora asociada
Departamento de Tecnología de la Arquitectura, UPC
alina.avellaneda@upc.edu



Laia Haurie
Profesora agregada
Departamento de Tecnología de la Arquitectura, UPC
laia.haurie@upc.edu



Ana María Lacasta
Catedrática
Departamento de Tecnología de la Arquitectura, UPC
ana.maria.lacasta@upc.edu

MITOS Y REALIDADES

sobre la construcción con madera y su comportamiento ante el fuego

Durante los últimos años la madera ha vuelto a ganar peso en el sector de la construcción. El desarrollo de nuevos productos madereros con excelentes prestaciones y la creciente sensibiliza-

ción en relación con el impacto medioambiental han contribuido a su progresiva implementación en todo tipo de edificaciones. Sin embargo, persisten algunas reticencias, como la percepción negati-

va de su comportamiento ante el fuego por tratarse de un material combustible. Son muchos los usuarios y profesionales que hacen llegar sus dudas sobre este tema a la oficina técnica del INCAFUST.



Incendio del edificio Saldos Arias (Madrid, 1987). Parte de la antigua estructura de madera del edificio se había sustituido por perfiles de acero en reformas anteriores. La parte que mantenía la estructura de madera quedó en pie. Víctimas: 10 bomberos. Fuente: Madera y fuego. Cátedra Madera. Universidad de Navarra.

La clasificación de reacción al fuego limita el uso de la madera y sus productos derivados en ciertas aplicaciones definidas en el DB-SI del CTE.

Si bien es cierto que la madera y sus productos derivados son materiales combustibles debido a su anatomía y composición química, también es verdad que en situación de incendio las estructuras de madera pueden conseguir tiempos de resistencia al fuego equivalentes e incluso superiores a las estructuras de hormigón o acero (fig.1). De hecho, a partir de la entrada en vigor del Código Técnico de la Edificación (CTE) los edificios con estructura de madera deben cumplir con la normativa y los reglamentos vigentes en materia de seguridad contra incendios de la misma manera que el resto de los materiales de construcción. Desde esta perspectiva, no deberían suponer un riesgo mayor para las personas en caso de incendio.

El comportamiento ante el fuego de materiales, productos y elementos de construcción se entiende a partir de los dos conceptos fundamentales que lo definen: la reacción al fuego de los materiales y productos y la resistencia al fuego de los elementos constructivos. La reacción al

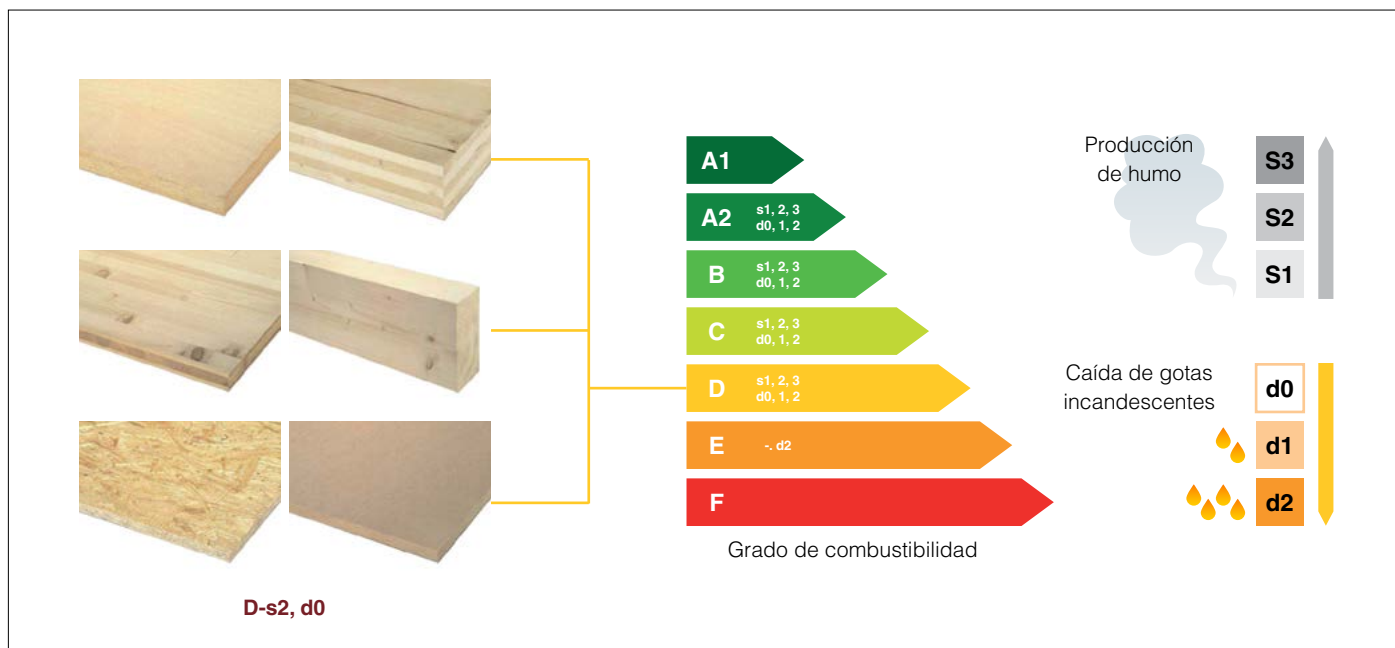


Figura 1. Clasificación de reacción al fuego de la madera y sus productos derivados. Fuente: elaboración propia.

fuego se refiere a la aptitud de un material para favorecer el desarrollo del incendio, mientras que la resistencia al fuego designa la capacidad de un elemento constructivo (pilar, viga, muro, etc.) para mantener durante un periodo de tiempo determinado la función portante (R), la integridad (E) o el aislamiento térmico (I) que le sean exigibles, en una escala de tiempo que va desde 15 hasta 240 minutos. De acuerdo con el marco común establecido por la Comisión Europea (euroclases), la clase de reacción al fuego de la madera y todos sus productos derivados es D-s2, d0 (fig.1), lo que indica que es un material combustible con una contribución media al fuego, que produce una cantidad moderada de humo y que no produce gotas o partículas incandescentes. Esta clasificación penaliza la implementación de la madera y sus productos derivados en ciertas aplicaciones definidas en el Documento Básico de seguridad en caso de incendios (DB-SI) del CTE.

La masa constituye un factor fundamental para definir la resistencia al fuego de un elemento estructural de madera.

La madera está constituida fundamentalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina. Estas, al estar compuestas por hidrógeno, oxígeno y un porcentaje cercano al 50 % de carbono, definen su naturaleza combustible e inflamable (que produce llama).

La madera se quema, pero no de la misma manera en todos los casos. En la superficie se quema con relativa facilidad, sin embargo, cuando la masa del material aumenta configurando un elemento con suficiente sección transversal, es más difícil que se inicie el proceso de ignición. Se requiere una temperatura en torno a los 270-300 °C durante un cierto periodo de tiempo antes de que el material comience a desprender vapores por la pérdida de humedad y posteriormente comience a quemarse (fig. 2).

El proceso de combustión de una pieza de madera con suficiente masa también ocurre de forma significativamente más lenta, fenómeno que se conoce técnicamente con el nombre de *smouldering*. Durante la combustión, que no es otra cosa que la degradación de la madera por la acción del fuego, tiene lugar un proceso químico llamado pirólisis. El frente de pirólisis avanza lentamente

a través de la masa del elemento y da lugar a una capa de carbón superficial que la protege del calor y las llamas, impidiendo la salida de gases y la entrada de oxígeno al interior. La carbonización de la superficie viene a ser una especie de «intumescencia» natural con una considerable capacidad aislante, dado que el carbón es hasta seis veces más aislante que la madera. La parte interna del elemento constructivo permanece prácticamente intacta, con sus propiedades físicas y mecánicas inalteradas (fig. 3). Por ello, la pérdida de capacidad portante que se da en una pieza de madera en estas condiciones se debe a una reducción de la sección, pero no a una merma de la resistencia del material. La madera maciza, por tanto, se quema de forma gradual y predecible. La velocidad de carbonización se estima que está en torno a los 0,7-0,55 milímetros por minuto, según la densidad y dureza de la especie, y este dato es fundamental para calcular la dimensión de las estructuras.

Este buen comportamiento ante el fuego de los elementos macizos de madera se debe principalmente a las propiedades térmicas del material, especialmente a la baja emisividad y la baja conductividad térmicas. Por otra



Figura 2. La madera arde con más o menos facilidad en función de la masa del elemento.
Fotografías: Timber fire behaviour. Roberto Tomasi. Universidad de Lund.



Figura 3. Comparación de la reducción de sección de una pieza de madera laminada expuesta al fuego. Estratificación de la madera en situación de incendio. Fuente: Thinkwood. Ensayos realizados por Arup fire. Peraza, 2001.



Estación de bomberos 76. Oregón, EE. UU. Hennebery Eddy Architects. Estación de bomberos construida íntegramente en madera. Fotografía: Archdaily.

parte, las estructuras de madera presentan una dilatación térmica muy baja, por lo que no originan esfuerzos entre elementos ni empujes en los muros. Esto es muy importante en situación de incendio porque minimiza las probabilidades de colapso de la estructura.

Todo ello permite afirmar que las estructuras de madera son una excelente opción para construir estructuras resistentes al fuego (véase la foto a pie de página).

Protección contra incendios y normativas

El marco regulador en materia de seguridad contra incendios está conformado por un conjunto de normativas generales y reglamentos locales aplicables a la edificación y las normas de ensayo de productos y sistemas, algunas de ellas armonizadas en el ámbito europeo. El DB-SI del CTE es el documento que recoge la normativa general de seguridad contra incendios en edificios, y el RSCIEI (Reglamento de seguridad contra incendios en los establecimientos industriales) en recintos industriales. La normativa establece los valores límite y los requisitos mínimos que deben cumplir los edificios para conseguir los niveles de seguridad admisibles en función de la altura de evacuación y el uso.

La implementación de medidas de protección puede variar según las características del proyecto. Pueden estar orientadas a cumplir estrictamente con los requisitos de la normativa prescriptiva o a aplicar estrategias prestacionales de ingeniería de protección contra incendios en las que se combinen medidas de protección pasiva y activa. Algunos expertos señalan que estas últimas son más apropiadas para abordar la seguridad contra incendios en edificios con estructura de madera dadas las singularidades de su comportamiento ante el fuego. Los códigos y métodos prestacionales de seguridad contra incendios se basan en el concepto PBD (*performance-based design*) que des-

de hace años se emplea ampliamente en países del norte de Europa, Nueva Zelanda, EE. UU. o Canadá, entre otros. Todos ellos se distinguen por una importante presencia de la madera en el ámbito de la construcción.

Sea cual sea la estrategia de seguridad empleada, las medidas de prevención y control se basan en los aspectos que se indican en la tabla 1.

Actualmente es posible construir todo tipo de edificaciones con estructura de madera capaces de cumplir con los requisitos de seguridad contra incendios exigibles en cualquier marco regulador. Son numerosos los ejemplos de edificios construidos en los ámbitos nacional e internacional que así lo confirman.

La resistencia al fuego de las estructuras y de los elementos de compartimentación (con la función de separar sectores de incendio) se puede determinar mediante la base de cálculo contenida en el anejo SI E del CTE y el eurocódigo 5. Los elementos portantes se diseñan y dimensionan según la re-

sistencia requerida en cada caso. Los elementos de compartimentación pueden estar constituidos por varias capas de tableros que conforman un sistema. El número de capas depende del valor de resistencia requerido. En algunos casos, se utilizan tableros de materiales no combustibles que, además de la protección que aportan al sistema en su conjunto, permiten cumplir con exigencias de reacción al fuego de las superficies. Estos tableros suelen ser de cartón yeso, de fibrosilicatos o de cemento madera, cuya clasificación de reacción al fuego es A1 o A2. A este tipo de tableros con capacidad de protección se les denomina tableros clase k, y al sistema completo que protegen, encapsulado. La efectividad de las soluciones constructivas propuestas en cada caso suele estar respaldada por ensayos de laboratorio a gran escala.

Los productos de madera técnica como los elementos estructurales de madera laminada (Glulam) y los paneles de CLT (*cross laminated timber*) presentan un comportamiento equivalente al de la madera maciza en situa-

ción de incendio. Así, pueden alcanzar elevados tiempos de resistencia al fuego. En Canadá, en el marco de un proyecto de transformación tecnológica, se sometieron paneles estructurales de CLT (en situación de carga) a ensayos de resistencia al fuego, y alcanzaron valores de resistencia máximos de 113 minutos en paneles de pared (5 capas) sin tableros de protección y de 178 minutos en forjados (7 capas) sin tableros de protección. Datos como estos reflejan la fiabilidad estructural de la madera maciza en situación de incendio (fig. 4).

Retardantes de llama

La reglamentación actual limita el uso de revestimientos de madera en ciertas aplicaciones (paredes, techos o suelos en espacios ocupables, vías de evacuación, fachadas, etc.) por sus características de reacción al fuego. El efecto de la carbonización, que favorece de forma determinante a las estructuras de madera, no es significativo en elementos con poco espesor, tales como paneles de revestimiento, lamas, paneles, listones, etc.

Medida		Requisito	Tipo de protección
Diseño y dimensionado de elementos estructurales.		(R)	Pasiva
Diseño de elementos de compartimentación		(EI) (REI)	Pasiva
Horizontales: forjados y techos. Verticales: muros y fachadas.	Sistemas de entramados. Sistemas de tableros de madera maciza (CLT).		
Rociadores automáticos		Justificación de estrategias de protección alternativas a la norma.	Activa
Vías de evacuación y elementos de detección, alarma y extinción.		Evacuación, control de la propagación interior del fuego / justificación de estrategias de protección alternativas a la norma.	Pasiva/activa
Detalles constructivos, sellos y barreras cortafuegos.		Control de la propagación interior y exterior del fuego.	Pasiva

Tabla 1. Aspectos que considerar en las medidas de prevención y control contra incendios, requisitos y tipos de protección. Fuente: elaboración propia.



Brock Commons Tallwood House. UBC, campus de Vancouver. Acton Ostry Architects Inc. Actualmente, el edificio más alto del mundo con estructura de madera (18 plantas). Fotografías: maisons-bois.com



Figura 4. Ensayos de paneles de CLT, madera contralaminada. Fotografía: FP Innovations Canada.



Efecto de una pintura intumescente en contacto con el fuego. Fotografía: Teknos.

Los tratamientos retardantes de llama son una buena opción para obtener una mejor clasificación de reacción al fuego en elementos y productos de madera. La madera tratada con productos retardantes puede conseguir clasificaciones C o B e índices de producción de humo S2 y S1. Sin embargo, no hay que perder de vista que la madera es un material combustible, por ello, con la aplicación de retardantes es posible mejorar sus características de reacción al fuego, pero no cambiar la naturaleza del material. En este sentido, hablar de madera ignífuga puede ser un término poco preciso.

En el mercado encontramos varios productos retardantes que actúan de diferente manera sobre la superficie para retrasar los procesos de inflamación y combustión. Algunos retardantes actúan fomentando la carbonización (efecto catalítico), otros formando una película que evita el contacto de la superficie con el oxígeno y otros liberando gases no inflamables (vapor de agua, amoníaco y CO_2) que diluyen los gases combustibles. También están los que forman una capa que se hincha, aísla la superficie del oxígeno y evita el escape de gases combustibles, como es el caso de pinturas y barnices intumescentes (fotografía a pie de página).

De acuerdo a su composición se pueden dividir en: inorgánicos, halogenados, organofosforados y los basados en nitrógeno.

Los productos inorgánicos son los más utilizados en materiales lignocelulósicos como la madera, especialmente los compuestos basados en fósforo, como el ácido fosfórico, los fosfatos de melamina, el fosfato de amonio (que suele aplicarse en productos intumescentes o pinturas) y el fosfato de potasio. Algunos de estos compuestos podrían, eventualmente, reducir la resistencia mecánica de la madera cuando los elementos están sometidos a altas temperaturas de forma permanente, como, por ejemplo, en estructuras de cubierta con una elevada incidencia solar.



Pinturas para fachadas con retardantes de llamas. Fotografía: Teknos.

También son muy utilizadas las sales solubles en agua basadas en boro, como el ácido bórico o el tetraborato de sodio, comúnmente conocido como bórax. Estos productos, aunque son muy efectivos, solo son aptos para aplicaciones en el interior, ya que se pueden disgregar con facilidad con la lluvia. Actualmente, se encuentran productos basados en boratos no solubles en agua, como el borato de zinc. Sin embargo, la mejor opción para aplicaciones a la intemperie (fachadas, lamas, pérgolas, etc.) son las pinturas. Estos productos presentan una alta durabilidad en condiciones atmosféricas adversas, y a su vez suelen servir para evitar la proliferación de hongos. El principal inconveniente es que se trata de un acabado opaco que cubre la madera con un color uniforme, ocultando el vetado de la madera. Este tipo de pinturas en diferentes colores es muy utilizado en el norte de Europa.

Los compuestos con base de nitrógeno han ido ganando fuerza gracias a sus propiedades medioambientales. Su nivel de toxicidad y de emisión de humos es bajo en comparación con otras sustancias retardantes. Uno de los aspectos negativos que presenta es que se requieren grandes concentraciones del producto para que sea efectivo. Este aspecto podría llegar a influir en el comportamiento mecánico del material tratado.

Otro aspecto relevante con relación a los productos retardantes es el tipo de aplicación. De ello depende en buena parte el grado de eficacia y la durabilidad del tratamiento. Los procesos de aplicación pueden ser superficiales o profundos. Dentro de los superficiales encontramos:

-Pincelado: se trata de una aplicación superficial sobre la madera. Normalmente se emplean barnices o pinturas.

-Pulverización: es un tratamiento un poco más controlado en comparación con el pincelado. Se utiliza un pulverizador para conseguir una aplicación más uniforme. Al igual que en el pincelado, los productos que se aplican son barnices y pinturas.

-Inmersión: consiste en sumergir en una solución hidrosoluble el elemento que se va a tratar. El producto penetra en el material con la absorción del agua y remacha los huecos cuando esta se evapora. En algunos casos, la solución se calienta para mejorar la absorción.

Los tratamientos profundos o de impregnación son procesos especializados en los que se emplean técnicas de vacío y presión o doble vacío mediante autoclaves. Consisten en introducir el producto en el interior de la estructura porosa del material para conseguir la penetración y retención adecuada del producto. Este

tratamiento permite la aplicación posterior de otros recubrimientos superficiales de acabado.

Para saber más:

ÖSTMAN, B. et ál. (2010). *Fire safety in timber buildings. Technical guideline for Europe*. Estocolmo, SP Technical Research Institute de Suecia.

VEGA, L. et ál. (2010). «Guía de construir con madera. Comportamiento frente al fuego». *Construir con madera (CcM)*, CONFEMADERA.

ARNEDO, A. et ál. (2004). *Guía para la comprobación de la resistencia al fuego de estructuras*. Barcelona, ASCEM.

GARCIA, F. J. (2015). *Estudio de nuevos retardantes de llama para ignifugación de madera maciza*. Trabajo final de máster. Barcelona, EPSEB, Universidad Politécnica de Cataluña.

Autoría



María Pilar Giraldo Forero

Dra. arquitecta
Instituto Catalán de la Madera.
CTFC
pilar.giraldo@incafust.cat

Hablamos con JOAN SEBASTIA

Gerente de Fustes Sebastia, SL, Rialp (Pallars Sobirà).
Presidente de la Asociación de la Madera Estructural de Catalunya (AFE).

Asociación de la Madera Estructural

<https://www.afe.cat/>

Fustes Sebastia

<http://www.sebastia.eu/>



«En pocos años, la construcción con madera ha pasado de ser una rareza a una alternativa real a la técnica y a los materiales convencionales.»

Joan Sebastia Colomé creó la empresa Fustes Sebastia, SL, junto con su hermano y su padre en 1990. Ha asistido a cursos de formación específica del sector de la madera y, desde 2017, preside la Asociación catalana de la Madera Estructural, una entidad que agrupa a empresas y profesionales que se dedican a la mecanización industrial y el montaje de estructuras de madera, así como a sus actividades complementarias, como la comercialización de productos y servicios de ingeniería, entre otros.

La madera ha sabido hacerse un lugar en el mundo de la construcción y se ha convertido en los últimos años en una alternativa rápida, limpia y sostenible a los materiales convencionales. A pesar de las reticencias del mercado, el cambio de paradigma energético y ambiental, la reducción de la mano de obra, la mejora de las condiciones laborales y el mayor control en la obra hacen que la madera esté ganando terreno a grandes pasos. Hablamos sobre el presente y el futuro de este material en el sector de la construcción con Joan Sebastia, que lleva más de 30 años al frente de Fustes Sebastia, SL, una empresa especializada en soluciones estructurales de madera y edificación prefabricada de bajo consumo energético, y que preside la Asociación catalana de la Madera Estructural (AFE), entidad que trabaja para la promoción de la madera en la construcción y para mejorar la cualificación y competitividad de las empresas del sector.

La AFE es una entidad que agrupa a empresas y profesionales que se dedican a la mecanización industrial y el montaje de estructuras de madera, así como también a sus actividades complementarias, como la comercialización de productos y servicios de ingeniería, entre otros. ¿Qué objetivos persigue? ¿Cuántos miembros están asociados actualmente?

La AFE (www.afe.cat) se constituyó en 2005 para agrupar a las empresas industriales del sector de la construcción con madera y ahora ya somos una treintena de asociados. En el momento de su formación, la edificación con madera en Cataluña era testimonial respecto a todo el sector de la construcción y casi no se construían casas enteramente con madera, con problemas importantes sobre todo en cuanto a los seguros. En ese momento era necesario preparar el terreno para la revolución en la construcción que está teniendo lugar.

La asociación integra empresas que se dedican a la mecanización industrial de las estructuras de madera, la fabricación de elementos y componentes de sistemas constructivos de madera, el montaje de estructuras de madera y la instalación de elementos prefabricados de madera para la construcción, así como las que tienen actividades complementarias o afines a la construcción con madera.

«De cara al futuro, nos planteamos continuar colaborando en la promoción de la madera en la construcción, mejorar la cualificación y competitividad de las empresas y trabajar en la defensa de los intereses asociativos en general.»

Los objetivos de la asociación son la defensa de los intereses asociativos, contribuir a incrementar el prestigio y la colaboración de sus miembros y, en general, los de tipo comercial, económico y técnico.

¿Podría poner algunos ejemplos de las acciones que han llevado a cabo o de proyectos de cara al futuro?

Las acciones de la entidad son, entre otras, las de defender, representar y promover los intereses de carácter comercial, económico, social y técnico de sus asociados; participar en ferias, congresos y foros nacionales e internacionales; organizar e impulsar seminarios, jornadas técnicas, congresos y otras actividades similares que ayuden a la difusión y discusión tecnológica del uso estructural del ámbito de la madera.

Así, por ejemplo, se han organizado varias participaciones agrupadas de los socios en ferias sectoriales como Construmat, viajes empresariales para conocer otros entornos sectoriales, cursos y actividades de formación, edición de material divulgativo, etc.

De cara al futuro, nos planteamos continuar colaborando en la promoción de la madera en la construcción, mejorar la cualificación y competitividad de las empresas y trabajar en la defensa de los intereses asociativos en general.

¿Qué peso tiene la madera dentro del mercado catalán y nacional de la construcción?

Se hace difícil decir cuál es la proporción de edificios que se construyen en madera respecto al total, pero lo que es evidente es que en pocos años la construcción con madera ha pasado de ser una rareza a una alternativa real a la técnica y a los materiales convencionales. A modo de ejemplo, en estos momentos hay promotoras públicas en las que cerca del 50 % de los concursos públicos adjudicados los han ganado

construcciones con madera. Por otra parte, el mercado de las casas unifamiliares y el de las plurifamiliares está ya arrancando con fuerza. Otros ejemplos los encontramos en Barcelona, donde hay un edificio de ocho plantas, y en Cornellà de Llobregat, donde se está levantando en estos momentos un edificio de 85 pisos destinados a alquiler social.

¿Cuáles son las aplicaciones con mayor salida comercial?

Principalmente, hay dos tipologías constructivas atractivas por sus prestaciones y versatilidad: el entramado ligero y las edificaciones de madera laminada cruzada (CLT). Las casas de entramado son muy eficientes en el uso del material, pero su tecnología las limita en altura. Esta es una técnica constructiva ideal para casas unifamiliares o hasta dos plantas. Por el contrario, los edificios de CLT tienen un uso mucho más intensivo de material, a cambio de obtener unas posibilidades estructurales muy superiores. Edificios de más de 30 plantas ya son una realidad, y existen propuestas de hasta 80.

¿Qué especies o variedades de madera se producen más en Cataluña y cuáles son más aptas para la construcción estructural?

Cataluña es un país forestal en el que las coníferas son predominantes desde un punto de vista industrial. Cuantitativamente, las más importantes son el pino silvestre (*Pinus sylvestris*) y el pino salgareño (*Pinus nigra*), pero también se aprovechan el pino negro (*Pinus uncinata*), el abeto (*Abies alba*), el abeto de Douglas (*Pseudotsuga menziesii*) y frondosas como el castaño (*Castanea sativa*). De todas formas, hay que decir que tradicionalmente se han empleado muchas especies, y en construcciones antiguas se encuentran vigas de especies muy variadas.

¿Considera que la madera es lo suficientemente conocida como material de construcción, dentro y fuera del sector?

Los grandes sectores económicos son, por definición, resistentes al cambio, y la construcción no es una excepción. La tradición constructiva de aquí se ha basado en las últimas décadas en materiales pétreos y en los metales. Cambiar esta tendencia es un proceso lento, ya que existe una gran inercia e incluso resistencia, pero el cambio de paradigma energético y ambiental, la reducción de la cantidad de mano de obra, la

«Principalmente, hay dos tipologías constructivas atractivas por sus prestaciones y versatilidad: el entramado ligero y las edificaciones de madera laminada cruzada (CLT).»

necesaria mejora de las condiciones laborales y la exigencia cada vez más estricta de control de materiales y procesos de obra hace que la madera gane terreno a grandes pasos.

La madera es un material que está en auge; ¿cuáles son sus principales ventajas como material de construcción?

La madera es un material muy resistente a la vez que ligero, no conductor del calor, sostenible y reutilizable. Si combinamos estas propiedades con la tecnología de fabricación industrial en taller, las estructuras y los edificios se producen con precisión milimétrica, la calidad de ejecución es excepcional y se consiguen soluciones energéticamente eficientes sin dificultad. Además, al ser la madera un material natural que se regenera en los bosques, a diferencia de los materiales pétreos y metálicos, su impacto ambiental es mucho menor.

«Cataluña es un país forestal en el que las coníferas son predominantes desde un punto de vista industrial.»

Los productos derivados de la madera permiten alcanzar soluciones tecnológicamente avanzadas. ¿Cuáles son las principales?

Desde un punto de vista arquitectónico la madera es un material extraordinariamente plástico con infinitas posibilidades de diseño. Los récords mundiales de distancia entre pilares se han alcanzado mediante cúpulas de madera, y la altura ya no es ningún impedimento si se quieren levantar rascacielos. La ejecución de las obras es extraordinariamente rápida. Al ser una construcción en seco, no hay que esperar al endurecimiento de los morteros y se pueden levantar estructuras de madera de varias plantas en días. Construir con madera es rápido, limpio y no genera residuos en la obra.

«La madera es un material muy resistente a la vez que ligero, no conductor del calor, sostenible y reutilizable.»

La madera es también una materia prima de origen renovable y respetuosa con el medioambiente. ¿Cuáles son los principales beneficios ambientales que se derivan de su uso?

La madera es un material forestal renovable y reutilizable que retira CO₂ de la atmósfera mientras está en uso, por lo que ayuda a luchar contra el cambio climático. Durante su transformación se necesita emplear menos energía que en los materiales convencionales. Al ser ligera, es energéticamente barata de transportar. Su capacidad aislante optimiza el uso de los aislamientos y minimiza los puentes térmicos, por tanto, el gasto de climatización durante la vida del edificio se minimiza. La fabricación de los diversos elementos de los edificios en taller optimiza el uso del material casi eliminando los residuos, por tanto, no se desperdician materias primas.

¿Cuáles considera que son los principales retos de futuro del sector?

Teniendo en cuenta que los materiales madereros tecnológicamente avanzados cada vez están más disponibles y que hay empresas muy profesionales, como las asociadas a la AFE, capacitadas para llevar a cabo soluciones de primer nivel, el principal reto es dar a conocer las posibilidades del material y llegar a un público más extenso.

«Construir con madera es rápido, limpio y no genera residuos en la obra.»



