

APLICACIÓN Y DIFUSIÓN DE LA INNOVACIÓN PARA LA PROMOCIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN EN ALTURA CON MADERA EN EL ESPACIO SUDOE

Proyecto financiado por el Programa *Interreg Sudoe* a través de Fondo Europeo de
Desarrollo Regional (FEDER)

Entregable E.1.4.1. Estado del arte y limitaciones normativas de la edificación en altura con madera en la región SUDOE

Vanesa Baño, Gonzalo Moltini y
Gonzalo Cabrera



Luis-Alfonso Basterra, Gamaliel López,
Patricia Vallelado e Isabel García



ETSAVA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

APPLICATION AND DISSEMINATION OF INNOVATIVE SOLUTIONS FOR THE PROMOTION OF MID-RISE TIMBER CONSTRUCTION IN THE SUDOE AREA

The project is co-financed by FEDER funds within the framework of the Interreg SUDOE program

Deliverable E.1.4.1. State of the art and regulation limits in the SUDOE area

Vanesa Baño, Gonzalo Moltini y
Gonzalo Cabrera



Luis-Alfonso Basterra, Gamaliel López,
Patricia Vallelado e Isabel García



PROYECTO EGURALT

EGURALT: “Aplicación y difusión de la innovación para la promoción de la construcción en altura con madera en el espacio SUDOE”, es un proyecto europeo que se integra dentro del programa Interreg Sudoe. El proyecto está cofinanciado mediante Fondos FEDER con una subvención de 1.011.562,20 euros y su periodo de ejecución se extiende desde el 02/11/2020 hasta el 30/04/2023.

El **objetivo general** del proyecto es permitir la aplicación y difusión de soluciones innovadoras para la promoción de la construcción de media altura con madera en el espacio Sudoe, contribuyendo al reto global de lucha contra el cambio climático a través de la promoción del uso de materiales naturales provenientes de fuentes sostenibles y renovables.

El consorcio EGURALT está liderado por NASUVINSA -Navarra de Suelo y Vivienda- como Jefe de Filas, y en él participan otras 7 entidades: SerQ – Centro de Inovação e Competências da Floresta en Centro Portugal; XERA – Axencia Galega da Industria Forestal en Galicia; CESEFOR de Castilla y León; BASKEGUR – Asociación de la Madera de Euskadi del País Vasco, ADEMAN – Asociación de Empresarios de la Madera de Navarra, y XYLOFUTUR – Produits et Matériaux des Forêts Cultivées y ENSAPBX – La École nationale supérieure d’architecture et de paysage de Bordeaux – ambas, en Francia.



Los beneficiarios del proyecto combinan una **naturaleza multidisciplinaria** (asociaciones para la promoción de la construcción en madera; centros de investigación avanzada; asociaciones de emprendedores; instituciones educativas, entre otras) que, en conjunto, mejorarán el logro de resultados y su difusión en el espacio SUDOE.

Las principales aportaciones serán:

- Intercambio de conocimiento entre centros tecnológicos, autoridades públicas e industria a través de mesas de actores, visitas de estudio...
- Experimentación de aplicación de nuevos productos/procesos y difusión a través de talleres con la industria (particularmente en las PYME) para mejorar la implementación de nuevas soluciones con mayor valor agregado en su cartera.
- Capitalización de conocimiento mediante formación dedicada a los prescriptores de madera en la construcción, sensibilización a la población y autoridades públicas y posicionamiento a nivel internacional a través de redes.

EGURALT PROJECT

EGURALT: “Aplicación y difusión de la innovación para la promoción de la construcción en altura con madera en el espacio SUDOE”, is a European project within the Interreg Sudoe programme. The project is co-financed by ERDF funds with a grant of 1,011,562.20 euros and its implementation period runs from 02/11/2020 to 30/04/2023.

The **general objective** of the project is to enable the application and dissemination of innovative solutions for the promotion of mid-rise timber construction in the SUDOE area, thus contributing to the global fight against climate change by promoting the use of natural materials from sustainable and renewable sources.

There are 8 entities participating in the project: NASUVINSA – Navarra de Suelo y Vivienda S.A. – as Lead Partner ; SerQ – Centro de Inovação e Competências da Floresta in Central Portugal; XERA – Axencia Galega da Industria Forestal in Galicia; CESEFOR from Castilla y León; BASKEGUR – Asociación de la Madera de Euskadi in the Basque country, ADEMAN – Asociación de Empresarios de la Madera de Navarra, and XYLOFUTUR – Produits et Matériaux des Forêts Cultivées and ENSAPBX – École nationale supérieure d’architecture et de paysage de Bordeaux – both in France.



The beneficiaries of the project combine a **multidisciplinary nature** (associations for the promotion of wood construction; advanced research centres; associations of entrepreneurs; educational institutions, among others) that, together, will improve the achievement of results and their dissemination in the SUDOE area.:

- Exchange of knowledge between technological poles, public authorities and industry through stakeholder tables, study visits...
- Application testing of new products / processes and dissemination through workshops with industry (especially in SMEs) to improve the implementation of new solutions with higher added value in their portfolio.
- Capitalization of knowledge through training courses for wood advisors in the construction industry, awareness among the public and public authorities and international positioning through networks.

ÍNDICE

ANTECEDENTES	11
1. EVOLUCIÓN DE LAS TÉCNICAS CONSTRUCTIVAS	13
1.1. ENTRAMADO PESADO	16
1.1.1. Sistema de barras apiladas.....	16
1.1.2. Sistema de pórticos: pilares y vigas.....	17
1.1.3. Sistemas cuajados: rellenos	18
1.2. ENTRAMADO LIGERO	19
1.2.1. Sistema de globo	20
1.2.2. Sistema de plataformas	21
1.3. ARMADURAS DE CUBIERTA	21
1.3.1. Cerchas.....	22
1.3.2. Bóvedas.....	24
1.3.3. Soluciones híbridas	26
1.3.4. Chapiteles	27
2. CONSTRUCCIONES DE MADERA EN ALTURA	29
2.1. ORIENTE	30
2.1.1. Monasterio colgante de Datong	30
2.1.2. La pagoda	30
2.1.3. Castillo de Himeji	31
2.2. OCCIDENTE	32
2.2.1. Casas medievales con entramado.....	32
2.2.2. La iglesia de Heddal.....	33
2.2.3. Iglesias de Rumanía.....	33
2.2.4. The House Mill	34
3. LOS NUEVOS MATERIALES	35
3.1. DEBILIDADES DE LA MADERA	35
3.2. LOS NUEVOS MATERIALES.....	37
3.2.1. Acero.....	38
3.2.2. Hormigón armado.....	39
3.3. PRIMEROS RASCACIELOS.....	41

MADERA ESTRUCTURAL45

1. INDUSTRIA DE LA MADERA	47
1.1. MADERA LAMINADA ENCOLADA.....	47
1.1.1. Madera laminada	47
1.1.2. Madera laminada encolada	49
1.2. ADHESIVOS Y UNIONES	51
1.2.1. Adhesivo de caseína.....	52
1.2.2. Adhesivo de formaldehído.....	52
1.2.3. Adhesivo epoxi y otros.....	52
1.2.4. Uniones dentadas	53
2. TIPOLOGÍAS ESTRUCTURALES PARA EDIFICIOS EN ALTURA.....	55
2.1. ENTRAMADO PESADO (POSTE Y VIGA).....	56
2.2. ENTRAMADO LIGERO	57
2.3. MADERA EN MASA (CLT).....	57
2.4. SISTEMAS COMBINADOS.....	58
2.5. SISTEMAS MIXTOS.....	59
3. PRODUCTOS DE MADERA ESTRUCTURAL.....	61
3.1. MADERA LAMINADA ENCOLADA (GLT)	63
3.2. MADERA CONTRALAMINADA (CLT).....	66
3.3. MADERA MICROLAMINADA (LVL)	68
3.4. TABLEROS CONTRACHAPADOS (PLY).....	70
3.5. MADERA LAMINADA DE VIRUTAS (LSL) Y MADERA DE CHAPAS PARALELAS (PSL).....	71
3.6. OTROS EWPs	73
3.6.1. Madera laminada clavada (NLT)	73
3.6.2. Madera laminada con pasadores (DLT).....	74
3.6.3. Compuestos madera hormigón (TCC)	74
3.7. NUEVOS DESARROLLOS DE EWPs.....	74
3.7.1. Paneles celulares ecológicos (ETC).....	74
3.7.2. Paneles de madera madera (TTP)	75
3.7.3. Forjados autotesados de madera.....	77

LIMITACIONES79

1. DISEÑO ESTRUCTURAL.....	81
1.1. DISEÑO ESTRUCTURAL EN MADERA.....	83
1.1.1. Clasificación estructural de la madera	83
1.1.2. Diseño estructural en ELU.....	89
1.1.3. Diseño estructural en ELS.....	91
1.1.4. Estado Limite de Durabilidad (ELD).....	96
1.2. Diseño estructural en madera en situaciones accidentales	98



CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

PÁGINA INTENCIONADAMENTE EN BLANCO

1. EVOLUCIÓN DE LAS TÉCNICAS CONSTRUCTIVAS

Desde sus orígenes en la Prehistoria, la madera ya era uno de los primeros materiales empleados en construcción que, sin necesidad de una técnica sofisticada de manipulación, ofrecía cobijo y protección.

“La madera es uno de los materiales que el hombre usó más pronto, dada su abundancia, ligereza, sus excelentes cualidades y facilidad de transformación o talla, su resistencia y sus propiedades aislantes térmicas y acústicas. Además de su intrínseca belleza natural” (Basterra, L.A., 2012, p. 13).

Efectivamente, es uno de los materiales más antiguos utilizados y a su llegada se debe el abandono de las cuevas naturales y el paso a las chozas al aire libre, surgiendo así las primeras aldeas. Éstas nacientes arquitecturas evolucionarán durante los primeros años con el fin de crear espacios de mayores dimensiones. Dada su configuración formal, la obtención de una mayor superficie en planta se consigue como resultado del incremento de su altura. Tanto es así que se tiene constancia de la existencia de grandes casas prehistóricas de hasta seis metros de altura (Fig. 01).

La aparición de los metales mejora las técnicas de elaboración de las construcciones de madera al facilitar su labra y la ejecución de ensamblajes complejos. Por primera vez y gracias al empleo de ramas y troncos de los árboles de mayor dimensión, se podría hablar de un sistema estructural



Fig. 01. Reconstrucción de choza prehistórica en Japón. Fuente: <https://www.historiando.org/edad-de-piedra/>



Fig. 02. Reconstrucción de la cabaña prehistórica tras la aparición de los metales. Fuente: <http://paleorama.es/blog/como-construir-una-cabana-prehistorica/>

de vigas y soportes de madera en el que cerramiento y cubrición aparecen como sistemas independientes (Fig. 02).

A pesar de la habitual identificación de las civilizaciones griegas, romanas, egipcias y persas con suntuosos edificios de ladrillo, piedra o mármol, en realidad en las grandes ciudades de la antigüedad abundaban, sobre todo, viviendas familiares construidas con madera. Concretamente, en Grecia destaca la labor de los carpinteros que se dedicaban al diseño y construcción de estructuras de madera prestando especial atención a las uniones, ensambles y sus resistencias, es decir, al sistema de entramado. Las soluciones constructivas de la carpintería de armar griega permitieron configurar sistemas complejos de entramados de vigas y pilares, forjados y, sobre todo, armaduras de cubierta que permitieron alcanzar distancias considerables entre apoyos. Desde entonces, y hasta la actualidad, la historia de la madera como material de construcción ha vivido grandes periodos en los que su técnica se ha desarrollado significativamente.

Los tratados son una fuente de información de primer orden para conocer las soluciones constructivas empleadas a lo largo de la historia, especialmente en el caso de la carpintería de armar, cuya obra construida se ha perdido en buena parte. El tratado más antiguo sobre construcción que ha llegado hasta nuestros días, escrito por Marco Vitruvio, data del 25 a.C.

“Marco Vitruvio, arquitecto e ingeniero romano, escribió un extenso tratado sobre arquitectura y técnicas de construcción en Roma. Su título *De architectura* se lo dedicó a Augusto. Este libro además de contener comentarios sobre astronomía, relojes de sol, técnicas de construcción y materiales, recoge las primeras descripciones sobre la composición, cualidades y usos de la madera” (García, 1999, p. 69).

La documentación sobre los sistemas constructivos utilizados durante la Edad Media es prácticamente inexistente. Según afirma Gómez, en su libro “Las estructuras de madera en los Tratados de Arquitectura (1500-1810)”, se asocia la falta de tratados anteriores al siglo XVI “al carácter gremial de la construcción medieval y al secretismo profesional: los conocimientos se transmitían oralmente entre los miembros de cada gremio” (Gómez, 2006, p. 19). De acuerdo con su labor de investigación, los

primeros tratados “intentaban ser lo más amplios posible, abarcando todos los aspectos de la arquitectura, pero pronto pasaron a especializarse, encontrando así manuales sobre albañilería o construcciones en madera” (Gómez, 2006, p. 19). En base a estos documentos se pueden clasificar las estructuras de edificación en tres grandes grupos: forjados, entramados verticales y armaduras de cubierta. En ocasiones, los tratados incluyen también estructuras auxiliares (como cimbras, apuntalamientos y apeos o andamios), obras civiles (generalmente puentes), herramienta y maquinaria.

En el “Manual de construcción de madera” elaborado por Herzog, Naterer, Schwitzer, Volz y Winter en 2004 se encuentra la descripción de un mástil transmisor de radio (Fig. 03), inaugurado en torno a 1932 en Baviera, Alemania. La estructura de madera, cuya imagen evoca a la parisina torre Eiffel, alcanzó en un primer momento los 115 m de altura. Posteriormente esta se vio incrementada “agregando una subestructura de 39 m de altura y extendiendo la punta para alcanzar una altura total de 165 m” (Herzog, et al., 2004, p. 269). Otra estructura de madera, esta vez de una altura inferior pero aun así de interés, es la plataforma de observación construida en 1976 (Fig. 04); una torre de base “cuadrada de 18 m de altura, configurada mediante cuatro columnas con arriostramiento en K” (Herzog, et al., 2004, p. 268).

A pesar de las múltiples aplicaciones del material, en los apartados siguientes se procede al estudio exclusivo de la madera como material estructural en edificación, abordando los primeros sistemas de entramado y las armaduras de cubierta. Cabe destacar que, además, se enfoca en la evolución referida, geográfica y culturalmente, al ámbito occidental, dejando en segundo plano las culturas orientales cuyo evidente dominio de la técnica carpintera a lo largo de los tiempos fue en ocasiones por delante de aquella.

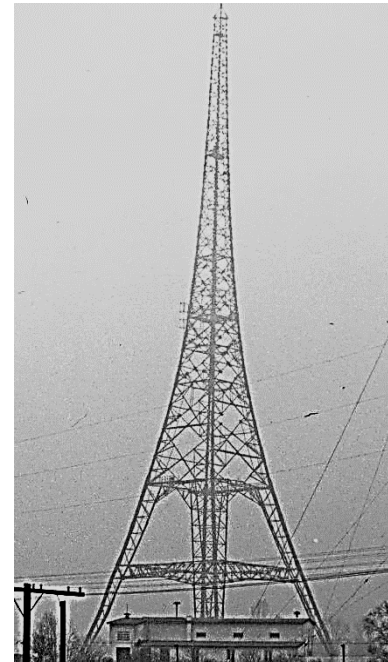


Fig. 03. Mástil transmisor de radio a mitad del siglo XX en Baviera, Alemania. Fuente: <https://cutt.ly/tmzdUBs>

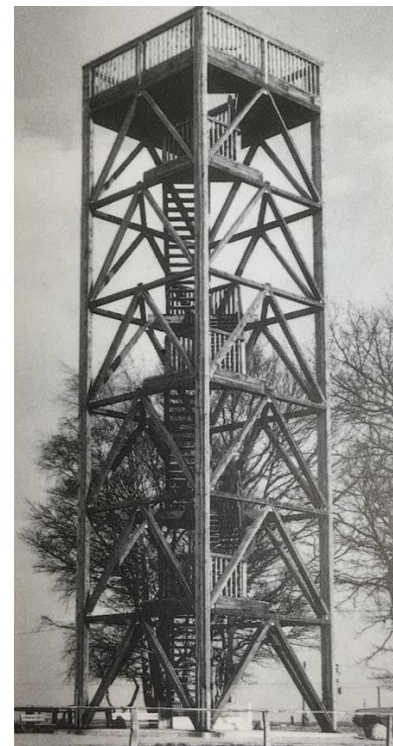


Fig. 04. Plataforma de observación construida en 1976. Fuente: (Herzog, et al., 2004, p. 268).

1.1. ENTRAMADO PESADO

El entramado pesado, traducido en inglés como *timber frame*, representa el sistema de construcción de madera más antiguo empleado en la historia de la humanidad. A él pertenecen todas las estructuras basadas en elementos lineales tales como pies derechos, jácenas, jabalcones y tornapuntas, de grandes escuadrías, con separaciones de cierta dimensión que, en determinadas situaciones requieren de paredes rígidas o triangulaciones para su estabilización. Este tipo de construcciones tuvieron su apogeo durante la época medieval, a partir de sistemas denominados *post and truss* (pie derecho y armazón) originario de la Europa central y Gran Bretaña, pero extendido por todo el continente. Entre sus principales variantes se encuentran los sistemas de barras apiladas, los sistemas de pórticos (pilares y vigas) y los sistemas cuajados (reellenos) descritos a continuación.

1.1.1. Sistema de barras apiladas

La cabaña de troncos de madera tiene su origen en el norte de Europa y Rusia, aunque es cierto que el sistema se conocía ya en la Edad de Bronce, según se muestra en la evolución de la cabaña prehistórica de la imagen (Fig. 05). El sistema de barras apiladas fue especialmente adecuado para Escandinavia y el norte de Europa dada la disponibilidad de árboles rectos y altos (pinos y abetos), lugar en el que era frecuente que, con las herramientas adecuadas, una familia levantase su propia cabaña de barras apiladas desde cero, haciendo frecuente su empleo en viviendas residenciales. A pesar de ser una tipología nacida en Europa, a principios del siglo XVIII el sistema era también conocido en Norteamérica. Probablemente, una de las casas de troncos más antiguas que se mantiene en pie es la *Nothnagle Log House* (Fig. 06), de 1640, levantada en dos alturas en el estado de Nueva Jersey.

En lo que se refiere a la ejecución del sistema, los troncos de madera, ensamblados en sus esquinas, se disponen en dirección horizontal y actúan como muro de carga y cerramiento de la vivienda. Inicialmente lograban el ensamblado mediante el tallado de concavidades (Fig. 07) en los troncos, algo que evolucionaría con la llegada de los

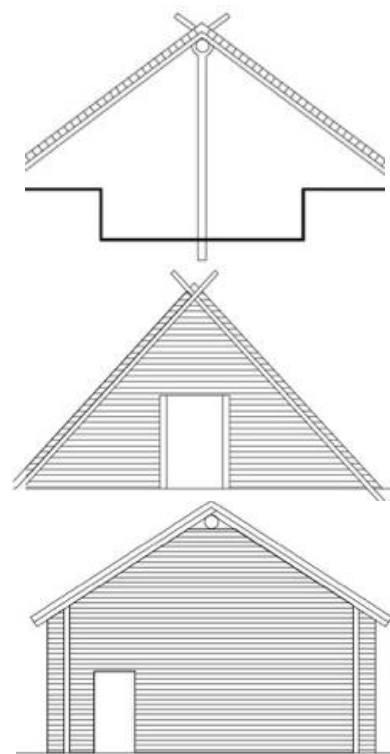


Fig. 05. Evolución de la cabaña prehistórica. Fuente: empresa Impregnaciones y Montajes S.L.



Fig. 06. Cabaña de troncos de 1640 de Nueva Jersey. Fuente: fotografía actualizada de Wikipedia.



Fig. 07. Detalle de la junta de la cabaña de troncos. Fuente: <https://cutt.ly/vmlIA3z>

primeros aserraderos de madera hacia formas escuadradas que, al lograr mayor superficie de apoyo, mejoraban su estabilidad.

Este sistema adquiriría la estabilidad necesaria gracias al trabado de sus esquinas, así como al arriostramiento aportado por la disposición de muros transversos, en su caso. No obstante, la madera trabajaba deficientemente desde varios puntos de vista. Por una parte, los efectos de secado de la madera son capaces de originar grandes deformaciones que hacen difícil la unión entre piezas. Por otra, la colocación de los troncos apilados en horizontal implica una compresión perpendicular a la fibra cuando entra en carga. Quizá es por ello por lo que, con el paso de los años, a pesar de que el sistema no ha desaparecido, su uso está relegado a pequeñas construcciones en baja altura, debiéndose en gran parte al gran consumo de madera y masividad del sistema. Al tratarse de un modelo de entramado muy elemental, el crecimiento de sus luces y dimensiones está muy limitado. A pesar de todo, es posible encontrar su aplicación en grades edificaciones como es el caso del hotel canadiense Fairmont Le Château Montebello (Fig. 08), el alojamiento de barras apiladas más grande del mundo, de hasta cuatro plantas en algunos espacios.

1.1.2. Sistema de pórticos: pilares y vigas

Con origen en Europa Central y Gran Bretaña, el sistema de entramado de pórticos es probablemente uno de los más antiguos modelos estructurales de la historia. Tan simple como formar pórticos a través de postes y vigas de madera que disocian la estructura portante y el cerramiento. Para garantizar su estabilidad, el sistema se rigidiza con elementos diagonales (tornapuntas y jabalcones) y transversales (estribos), o bien con paredes ciegas de mampostería. A su vez, el empleo del cerramiento con este material garantizaba la durabilidad de la fachada, algo que con la madera no podían conseguir al ser propenso a la degradación por acción de la humedad. Algunos indicios se encuentran en la cabaña primitiva utilizada como



Fig. 08. Hotel Fairmont Le Château Montebello en Canadá. Fuente: <https://www.fairmont.mx/17oints17ogi/>



Fig. 09. Frontispicio del "Essai sur l'architecture", segunda edición, (1755) grabado por Charles-Dominique-Joseph Eisen (1720–1778). Fuente: Grabado DOME / MIT Library collections.

frontispicio del *Essai sur l'architecture* en el famoso grabado de Charles-Dominique-Joseph Eisen (Fig. 09).

La aplicación del sistema de pórticos en construcciones de varias plantas encuentra su auge en la ciudad romana del siglo III a.C. A pesar de la imagen que evoca una Roma pétrea, de ladrillo o de mármol, la madera configuraba la mayoría de los edificios que respondían a un tipo de viviendas populares denominadas ínsulas (Fig. 10) -en latín *insulae*-. Las ínsulas eran un equivalente, en disposición, a los bloques de viviendas que ocupan las manzanas actuales, pero dispuestas de manera más irregular. Como solución al problema de la sobrepoblación de la ciudad romana, las ínsulas crecen en altura con el fin de albergar un mayor número de personas y ocupar menor superficie en planta.

1.1.3. Sistemas cuajados: rellenos

La construcción entramada cuajada se encuentra a lo largo de la historia en gran cantidad de países. A pesar de su aparente similitud, los sistemas de pórticos expuestos anteriormente no se forman por pies derechos de madera tan próximos como lo hacen los entramados cuajados, siendo por ello aquí las secciones más modestas. Las estructuras de entramado cuajado de madera se caracterizan por la integración de tres materiales: “la madera en lo que se denomina armadura, la fábrica de materiales pesados, que se denomina cuajado, y el revestimiento de los entramados denominados guarnecidos” (García, 2006, p. 10). La madera asume la función resistente en muros al igual que en forjados y cubierta, mientras que la fábrica le confiere la estabilidad requerida y asume la función de cerramiento. De manera tradicional, los vanos entre los elementos de madera se solían rellenar de mampostería de piedra, material cerámico, adobes, cascotes, arcilla o yeso. Respecto a los revestimientos exteriores, estos protegen a la estructura leñosa y la fábrica de los efectos de la intemperie.

La necesaria existencia de guarnecidos de protección hace que, en la mayoría de las construcciones urbanas, la armadura se presente a la vista solamente en los entramados colindantes con edificios derribados. No obstante, en la arquitectura popular es fácil encontrar



Fig. 10. Dibujo de las Ínsulas romanas vistas desde la calle. Fuente: Ilustración realizada por Italo Gismondi.



Fig. 11. Muro entramado en Madrid. Fuente: (García, 2006, p. 17).

abundantes ejemplos de muros entramados que dejan a la intemperie las armaduras de madera. Esta desnudez puede atribuirse a la falta de voluntad o de medios de quien lo construyó para rematar su obra o, incluso, a una falsa interpretación de los sistemas originales que ha fomentado la rehabilitación de edificaciones dejando vista su estructura (García, 2006, p. 14). En la imagen que acompaña este apartado (Fig. 11), se puede apreciar los diferentes niveles de la edificación de forma que se demuestra su aptitud y frecuente empleo en las construcciones de media altura de la época.

1.2. ENTRAMADO LIGERO

Frente al descrito sistema de entramado pesado, el entramado ligero se introduce como una construcción de mayor ligereza lograda mediante el empleo de listones más finos y numerosos, además de manejables. Lo fundamental de este sistema es la posibilidad de proceder al montaje sin necesidad de acarreo o elevaciones de elementos muy pesados, pudiendo así construirse fácilmente con herramientas convencionales y entre pocas personas.

El sistema *light frame* tiene sus orígenes en las construcciones de las tribus nómadas que requerían E ligeras para ser transportadas en sus caravanas. Algunos ejemplos de estas primeras arquitecturas son las cabañas tuareg (Fig. 12) y los tipis indios (Fig. 13).¹

Como consecuencia de los procesos de industrialización del siglo XIX, las uniones de una estructura de madera se realizan con el clavo fabricado en serie, que aparece en esa época, “reemplazando la tradicional espiga de madera al clavo forjado a mano, simplificando notablemente el proceso constructivo tradicional, ya que, por sus propiedades mecánicas, costos y disponibilidad, desplaza ventajosamente a los otros sistemas de unión en uso,



Fig. 12. Cabaña tuareg.
Fuente: <https://cutt.ly/mmzslgx>



Fig. 13. Tipi indio.
Fuente: <https://cutt.ly/tmzsDPL>

¹ El término tipi (del inglés *teepee*) se puede definir como “para vivir” y representa la vivienda nómada de las primeras tribus indias que habitaron Norteamérica.

posibilitando estructuras más livianas y rápidas” (Leser, 2000, p. 18).

Como resultado del desarrollo histórico-constructivo de la madera, y en respuesta a los requerimientos de la época, surge en Estados Unidos el primer sistema de entramado ligero reconocido: el sistema de globo (*balloon frame*), posteriormente reemplazado por el sistema de plataformas (*platform frame*).

1.2.1. Sistema de globo

La estructura de globo (Fig. 14) fue descrita por primera vez en la publicación de Gervase Wheeler en 1855 “*Homes for people*” [hogares para personas]. No obstante, el modelo de globo se había aplicado ya en 1833 en la Iglesia de Santa María de Chicago (Fig. 15), construida por Agustine Taylor y considerada la primera construcción en emplear el armazón en globo.

Como resultado, el sistema estructural, supuestamente creado por George Washington Snow (1797-1870), consiste en una serie de piezas de madera ligeras, próximas y equidistantes, que forman paredes, forjados y cubiertas (Fig. 16) estructura posteriormente revestida por ambos lados con tablas que buscan limitar las deformaciones y arriostrar el conjunto en su plano. Una de las particularidades del armazón, además de su delgada esquadría, es la “reducida distancia existente entre las piezas, que suele variar entre los 0,40 y 0,60 m” (Leser, 2000, p. 18).

Frente a las estructuras tradicionales de madera, el sistema *balloon* descrito presenta ventajas especiales y posibilita el uso masivo y proyección de este material, más allá de los beneficios y cualidades propias del mismo. Además, “marca el inicio de los procesos de industrialización en madera: precorte, recionalización, prefabricación e industrialización y montaje en serie a pie de obra” (Leser, 2000, p. 19), en la actualidad se encuentra en desuso por sus limitaciones frente al sistema de plataforma con entramado ligero de madera, sobre todo en cuanto a las restricciones del número de plantas.

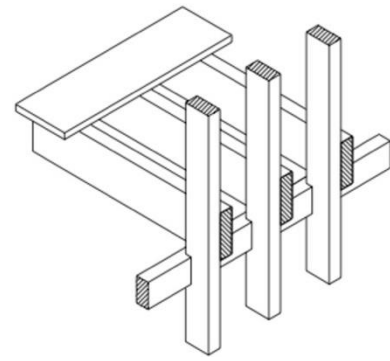


Fig. 14. Detalle del encuentro del muro con el forjado en el sistema globo. Fuente: (García, 2006, p. 15).

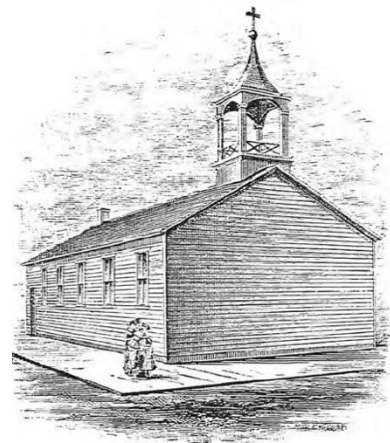


Fig. 15. Iglesia de Santa María, Chicago, 1833. Fuente: (Turan, 2009, p. 179).



Fig. 16. Montaje de la estructura ligera según el sistema de globo en Estados Unidos. Fuente: <https://cutt.ly/BmzdVlv>

1.2.2. Sistema de plataformas

El sistema de plataformas –*platform frame*– (Fig. 17) con entramado ligero de madera es posterior al sistema de globo, con la diferencia fundamental en su empleo de montantes discontinuos y construcción de la estructura planta por planta. El motivo principal de este cambio se debe a la dificultad que suponía encontrar listones de madera suficientemente largos como para abarcar las dos primeras plantas. Al introducir la plataforma, la independización de las plantas aporta beneficios especiales que le hacen más competitivo frente al *balloon frame*. Por un lado, presenta un mejor diseño frente a la propagación de incendios ya que el forjado intermedio interrumpe el paso de la llama a los pisos superiores y, por otro, es de más fácil ejecución además de que no se encuentra limitado a las dos alturas. El sistema incluso se presta más a la prefabricación como consecuencia de la menor altura de los montantes, que no encuentra limitaciones en el transporte desde la fábrica hasta la obra.

Mientras en Europa la tradición del sistema de entramado pesado perdía terreno como consecuencia de la llegada del acero y, posteriormente, el hormigón armado, en EEUU el entramado ligero de madera cogía cada vez más fuerza hasta convertirse en el siglo XX en un negocio de grandes empresas. Se empezaron a construir entonces miles de viviendas prefabricadas de Norte América, e incluso pueblos enteros como Carlinville (Fig. 18), en Illinois. Tras la Segunda Guerra Mundial se introdujo el sistema de casas prefabricadas de madera en Europa y, desde entonces, su empleo ha evolucionado en altura y se ha extendido por todo el mundo.

1.3. ARMADURAS DE CUBIERTA

Enrique Nuere, arquitecto, académico y carpintero español, referencia internacional en la materia, en su libro “La carpintería de armar española”, distingue dos tipologías

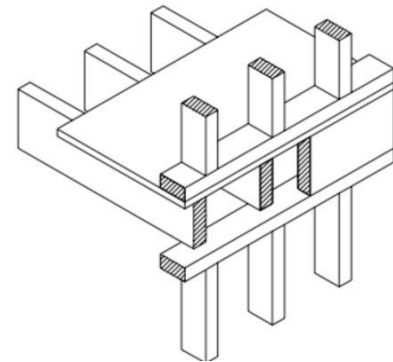


Fig. 17. Detalle del encuentro del muro con el forjado en el sistema de plataforma. Fuente: (García, 2006, p. 15).



Fig. 18. Casa prefabricada con estructura ligera en Carlinville, Illinois. Fuente: <https://cutt.ly/emzd7Kl>

básicas de armaduras de cubierta: “las que colocan sus elementos sustentantes inclinados y concurrentes en la cumbrera, y las que, mediante unos elementos auxiliares generalmente triangulados, como cerchas, permiten la colocación de otros grupos de elementos horizontalmente, es decir, paralelos a los muros de edificio” (Nuere, 2000, p. 93).

La primera de ellas se denomina armadura de pares, por la disposición de los elementos inclinados que concurren en la cumbrera enfrentados dos a dos, colocados en paralelo a la línea de máxima pendiente y relativamente próximos; también se caracteriza por la necesidad de organizar una estructura horizontal auxiliar en la base de los muros de los que arrancan para garantizar su equilibrio: los estribos. La segunda utiliza cerchas trianguladas, perpendiculares a los muros o apoyadas en soportes puntuales, a distancias considerablemente mayores que los anteriores y que sirven de apoyo a las correas horizontales, paralelas al alero. Volveremos sobre ellas más adelante por su protagonismo en la evolución de las estructuras de madera para la cubrición de grandes luces por sus ventajas evidentes:

“Desde el punto de vista estructural, el empleo de cerchas trianguladas ofrece ventajas frente a la de pares. La triangulación hace que las maderas trabajen sobre todo a tracción y compresión. Al mismo tiempo, el empleo de piezas intermedias tales como pendolones y tornapuntas permite acortar la luz de las piezas principales, disminuye su trabajo a flexión, facilita el empleo de escuadrías menores y posibilita cubrir mayores luces. Otra gran ventaja es la no transmisión de esfuerzos horizontales a los muros sobre los que apoyan” (Estepa, 2015, p. 17).

Además de estos dos grupos de armaduras, existen otras soluciones híbridas que parcialmente responden a los esquemas descritos, presentándose muchas veces ocultas sobre bóvedas o diferentes soluciones de techos interiores.

1.3.1. Cerchas

Desde la cubrición de la primera choza prehistórica, la luz de los espacios estaba limitada por la longitud efectiva obtenida directamente del árbol. El desarrollo de los sistemas de cubierta responde a la aspiración por salvar luces de mayor distancia, así como al interés por optimizar el aprovechamiento de árboles de mucho menor porte que

las distancias a salvar. Como consecuencia se creó la cercha: una ingeniosa solución constructiva basada en la triangulación, y que aportó desde el momento de su origen grandes prestaciones a la construcción y el diseño de los edificios más importantes.

Las primeras cerchas, caso particular de celosía reticulada de envolvente triangular, estaban formadas por piezas de madera maciza aserrada unidas entre sí, alcanzando grandes luces con piezas de madera de longitud mucho más moderada. Como expone García (2009), estas cubiertas “se organizan por triangulación y nudos articulados, lo que impide el funcionamiento de las barras a flexión, asumiendo, por lo tanto, únicamente esfuerzos axiales de tracción o compresión”. Y sigue: “Al evitar la flexión, la sección de madera necesaria es mucho menor” (García, 2009, p. 28), es decir, era posible no solo un ahorro del material, sino también el aprovechamiento de los árboles más jóvenes y abundantes. Además, este mismo autor plantea la siguiente reflexión sobre el origen de las cerchas:

“La cercha es la culminación de un proceso histórico, responsabilidad de maestros y carpinteros a lo largo de cientos de años que, en un momento difícil de datar con exactitud, permite su aparición. Este proceso está apoyado en sucesivos intentos, sus correspondientes errores y la solución aportada en cada caso, es decir, en la evolución de los tipos de estructura de cubierta históricamente construidos” (García, 2009, p. 9).

No obstante, a pesar de no poder datarse con exactitud su creación, está comúnmente aceptado que el gran impulso a su desarrollo fue la cubrición de las basílicas romanas, si bien es clara la influencia de la construcción y carpintería de armar griega, época en la que se desarrollaron las herramientas precisas para ello. La “Basílica Porcia” puede ser considerada como una de las primeras basílicas de la cultura romana, construida en el año 184 a.C. (Pedreño, F.J., 2007, p. 143). La tipología de la basílica surge del interés en configurar un modelo de edificio destinado a la actividad pública que fuese capaz de albergar a un gran número de personas en espacios diáfanos, bien ventilados e iluminados,

algo que se logra materializar gracias al empleo de las armaduras trianguladas.

Posteriormente, tras el edicto de Milán (313 d.C.), el Imperio Romano acepta oficialmente la religión cristiana, momento a partir del cual las autoridades eclesiásticas escogieron la tipología arquitectónica basilical para la construcción de los nuevos templos. Una de las más universales es la Basílica de San Pedro (Fig. 19), con sus 30 m de altura.

Es cierto que, frente a las pequeñas construcciones residenciales, las basílicas crecen en altura, y el mérito de este salto de escala hacia la verticalidad es atribuible a la piedra y el ladrillo. Pero no lo es menos que los 13 m salvados por la cercha de madera en la nave central consiguen generar el gran espacio interior diáfano que se observa en la imagen (Fig. 20).

1.3.2. Bóvedas

Continuando con el estudio de la madera como material para cubrir grandes luces se puede observar cómo, desde la antigüedad, también la ejecución de bóvedas de madera fue una preocupación constante de los constructores. La primera referencia escrita sobre bóvedas de madera se encuentra en “Los Diez Libros de Arquitectura” de Marco Vitrubio, arquitecto e ingeniero romano:

“Cuando las circunstancias exijan formar techos abovedados, procédase del siguiente modo: se colocarán unos listones -o pequeñas vigas- rectos que guarden entre sí una distancia no mayor de dos pies; preferiblemente serán de ciprés, pues si son de abeto rápidamente se corrompen por la carcoma y por el paso de los años” (Vitrubio, 1995, p. 267).

El texto de Vitrubio plantea también su reflexión sobre el futuro de la construcción de bóvedas con madera: “una técnica conocida desde épocas antiguas y que continuará durante la Edad Media” (Hurtado, 2009, p. 2). Y, efectivamente, se tiene constancia de la existencia de cúpulas de madera en la arquitectura medieval, por ejemplo, la cúpula de la Iglesia de San Marcos en Venecia, de 1231 (Fig. 21), construida sobre una estructura de fábrica. En 1590 Rusconi interpreta gráficamente el sistema constructivo descrito por Vitruvio (Fig. 22), “siendo

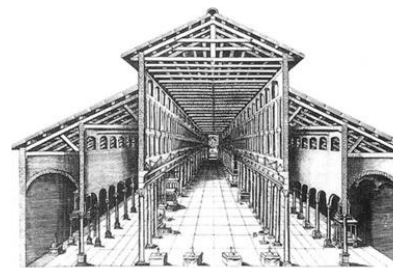


Fig. 19. Sección de la Basílica de San Pedro, Roma. Fuente: <https://cutt.ly/9meXKQE>



Fig. 20. Ilustración del interior de la Basílica de San Pedro, Roma. Fuente: <https://cutt.ly/9meXKQE>

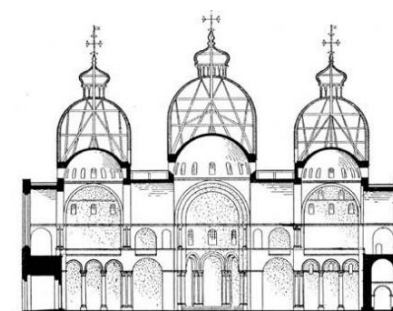


Fig. 21. Sección longitudinal de la Basílica de San Marcos de Venecia. Fuente: <https://n9.cl/p0t3d>

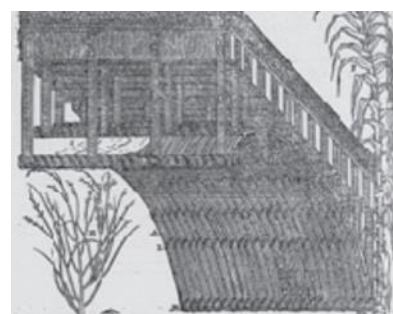


Fig. 22. Interpretación de Rusconi de la bóveda de madera descrita por Vitruvio. Fuente: (Hurtado, 2009, p. 2).

compartido aún en tiempos actuales por Howe” (Fig. 23) (Hurtado, 2009, p. 2).

A lo largo del siglo XVI se agrava el problema de la escasez de madera de grandes longitudes, situación que impulsará el desarrollo de sistemas constructivos formados por piezas de menor longitud que la luz a salvar, igual que se ha referido con las cerchas. Dentro de esta corriente predominante, dos tratadistas abordarán por primera vez en un documento escrito no solo el método de construir sino el de poder ejecutarlos a partir de piezas más pequeñas: Serlio en Italia y Philbert de l’Orme en Francia. Mientras Serlio planteaba soluciones teóricas representadas de forma gráfica, pero sin los detalles constructivos necesarios para comprender y conocer la forma de ejecutarlos, De l’Orme se dedicó a realizar un modelo totalmente innovador. Este último aplica a la madera las técnicas constructivas empleadas en las construcciones de piedra: “la forma en arco, que permite tener en todo punto de la pieza secciones casi totalmente comprimidas, salvando grandes luces, con la ayuda de estructuras de piedra constituidas por elementos cortos” (Somoza, 1986, p. 41). Con ello traslada a la carpintería de madera la misma forma de trabajo del arco, a través de piedras de menor tamaño dispuestas con la forma adecuada con el fin de salvar mayores luces. El modelo propuesto (Fig. 24) por De l’Orme se conoce como método de “bóvedas encamonadas”, y es descrito por Hurtado (2009) de la siguiente forma:

“Las bóvedas encamonadas se realizaban con tablas de madera (camones) que se solapaban entre sí para formar arcos (cerchas), los cuales definían la forma que tendrían las bóvedas, y eran estabilizados lateralmente mediante correas. Sobre los arcos y correas se colocaba un cerramiento que podía ser un entablado, unos listones de madera o simplemente un tendido a base de cañas” (Hurtado, 2009, p. 3).

El sistema era de gran sencillez conceptual, consistiendo “en la construcción de arcos a base de tablas recortadas en forma de camones” (Sevilla, 2018, p. 12). Estas tablas se clavaban contrapeándose hasta alcanzar una sección lo

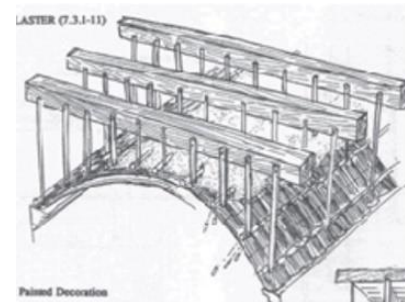


Fig. 23. Interpretación moderna de Howe de la bóveda de madera descrita por Vitruvio. Fuente: (Vitruvio, 1995, p. 271).

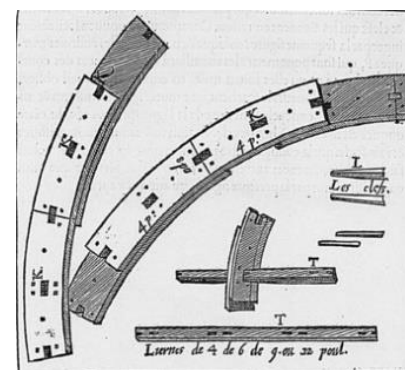


Fig. 24. Dibujo del modelo de Philbert De l’Orme, formado por camones y contracamones atravesados por espigas pasantes que hacen la función de riostras. Fuente: (Sevilla, 2018, p. 25).

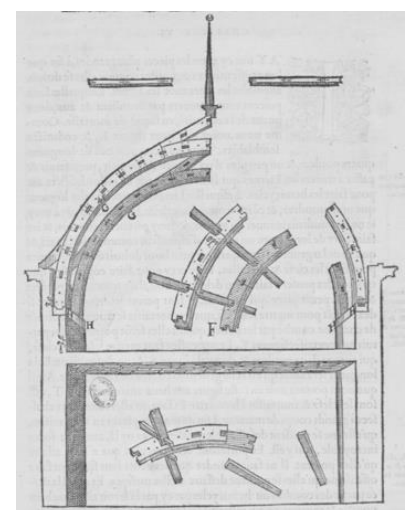


Fig. 25. Dibujo del modelo de arco de Philbert De l’Orme representado en su libro “Nouvelles Inventiones pour bien bâtir et a petits frais”. Fuente: <https://cutt.ly/GmWL94g>

suficientemente rígida como para salvar la luz necesaria. Con ello generaban arcos de gran luz (Fig. 25) dirigidos a la formación de cubiertas y bóvedas que, por lo general, no debiesen soportar grandes cargas. Tal y como afirma Sevilla (2018), “este tipo de diseño permitía solucionar cerchas de intradós curvo y trasdós apuntado, o bien definir auténticas bóvedas de madera” (Sevilla, 2018, p. 12). La técnica planteada por de L’Orme tenía como objetivo la obtención de piezas de gran longitud, pero de bajo coste, y así las empleará en el palacio de las Tullerías, “donde por medio de bridas, consiguió crear arcos de hasta 15 metros de luz” (Sevilla, 2018, p. 12).

En el recorrido de la historia de los tratados, las razones de su uso han sido muy variadas: “no solamente vistas desde la economía de su construcción como factor determinante, sino también por la facilidad de su ejecución, principalmente en zonas con problemas de asentamientos del suelo” (Hurtado, 2009, p. 12).

1.3.3. Soluciones híbridas

La triangulación de las estructuras de cubrición ha participado del esplendor de la arquitectura gótica; un momento de la historia de la arquitectura caracterizado por la verticalidad, la ligereza de sus sistemas estructurales y la masiva introducción de la luz en los espacios interiores. Es cierto que la imagen de las catedrales góticas evoca una grandiosa construcción erigida en sillería de piedra; no obstante, y a pesar de su discreción, la madera juega un papel fundamental en la recreación de esa imagen exterior. A diferencia de las cerchas de las antiguas basílicas romanas, la cubrición de las construcciones góticas emplea un modelo tridimensional también basado en la triangulación, pero esta vez de una mayor complejidad geométrica, a veces en tres dimensiones, consiguiendo ampliar las luces entre apoyos con el consecuente incremento de su altura máxima. Es posible apreciar esa complejidad en la antigua cubierta (1483) de la Catedral de Notre-Dame de Reims.

Cabe destacar, en la misma línea, la cubierta construida en el siglo XV para la Catedral de San Esteban de Viena (Fig. 27): “una cubierta de 110 m de largo y una luz de 35 m, alcanzando los 37,85 m en su punto más alto y respecto la

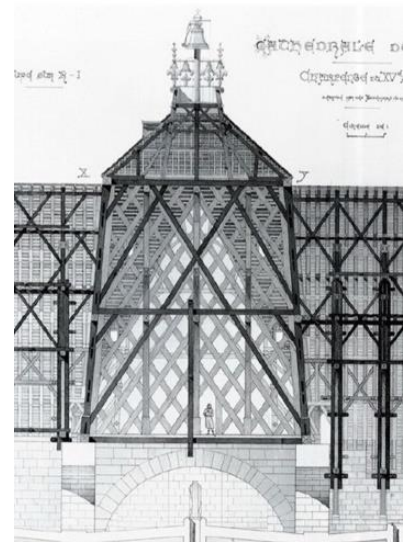


Fig. 26. Catedral de Reims, estructura de madera en el transepto elaborada en el “Hommage à Henri Deneux: les charpentiers de la cathédrale de Reims”
Fuente: <https://cutt.ly/NmzfM5r>

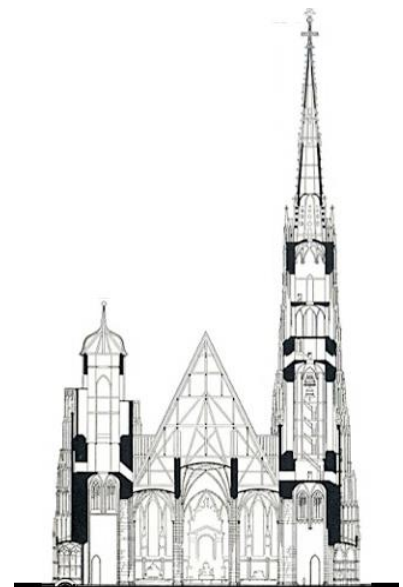


Fig. 27. Catedral de Viena. Fuente: (Arroyo, 2020., p. 37).

cota del suelo” (Arroyo, 2020., p. 35). Como era habitual, tal altura no puede ser apreciada desde el interior, pues este se cubría, salvo excepciones², con las características bóvedas nervadas, genuina particularidad de la época gótica. Sin embargo, a pesar del papel aparentemente secundario de esta cubrición, no puede pasar desapercibida la luz entre apoyos, que contribuye a la magnitud del espacio creado.

1.3.4. Chapiteles

Para los chapiteles (Fig. 28), característica solución de remate de elementos de cubierta de gran esbeltez, Nuere encuentra dos tipos de soluciones: “el modelo que resuelve el problema de realizar una importante cúpula, generalmente con linterna, y el empleado como cubierta y coronación de una torre, solución introducida en España por Felipe II, y que corresponde a las estructuras que hoy conocemos precisamente como chapiteles” (Nuere, 2000, p. 173). En España, los primeros chapiteles se levantaron en el palacio de Valsaín y, poco después, se construyeron de nuevo en el Alcázar de Segovia.

La evolución formal y estructural de estos particulares sistemas de cubrición dan como resultado chapiteles con características propias diferenciadas, pero siempre manteniendo la forma piramidal que le caracteriza. El doctor arquitecto Estepa Gómez, en su tesis “Chapiteles del siglo XVI al XVIII en Madrid y su entorno” (2015), analiza en detalle diferentes estructuras de esta tipología. A modo de ejemplo, se incorpora aquí un chapitel de dos cuerpos de altura, cuya estructura representada en la imagen (Fig. 29) recrea el chapitel de la iglesia de Daganzo erguido en el siglo XVIII: una torre esbelta con armazón de madera en la que “la altura total alcanzada desde la cornisa hasta la cara inferior de la bola, es de diez metros con cuarenta y cinco



Fig. 28. Chapitel sobre la capilla mayor de la iglesia del convento de las Dominicas de Loeches. F.A. Fuente: (Estepa, 2015).



Fig. 29. Armadura del chapitel de Daganzo. Fuente: Pilar y Luia Meyer (1989).

² Nos referimos a los casos en los que el techo interior se hacía también de madera, probablemente por falta de fondos para la construcción de las más difíciles y costosas bóvedas de piedra. Desgraciadamente, muchos de ellos no han llegado hasta nosotros debido, no tanto a la degradación propia de la madera por ataques de origen biótico o abiótico, sino a los múltiples episodios violentos de los que han sido objeto los templos religiosos a lo largo de la historia.

centímetros, que en pies castellanos son treinta y siete pies y medio” (Estepa, 2015, p. 348). “Todas estas armaduras generalmente se resolvían a base de acumular madera de forma más o menos organizada” (Nuere, 2000, p. 173) y tenían el peligro de deterioro o derrumbe, principalmente si se tiene en cuenta que, en la construcción europea, el chapitel era la parte más sobresaliente, incluso a veces llegando a igualar la altura de la torre sobre la que se construían.

Además de esta particular y distintiva armadura de cubierta, relacionada con la arquitectura importada a España por los Austrias, existen infinidad de coronaciones de torres de iglesias con armazón de madera que, más que a una tipología determinada, responden a costumbres locales o modos de hacer que van variando con el paso de los años.

2. CONSTRUCCIONES DE MADERA EN ALTURA

En principio, la imagen de un árbol esbelto puede evocar a una construcción esbelta y de gran altura. En efecto, su modelo estructural es el de una ménsula empotrada en el terreno, sometida a la acción predominante del viento, aproximadamente horizontal, cuya resultante se sitúa a varios metros de distancia del empotramiento. El momento flector solicitante puede así ser muy importante y para resistirlo el material tiene que movilizar internamente un par de fuerzas de tracción y compresión, de la misma magnitud y sentido contrario, cuyo brazo de palanca no puede ser mayor que el diámetro del propio tronco. Esto explica la capacidad de sus estructuras anatómicas y celulares de resistir indistintamente tensiones de tracción y compresión y, por consiguiente, trabajar eficazmente a flexión. Cuestión que el hombre empíricamente descubrió bien pronto, aplicándolo a todo tipo de construcciones de baja altura y a todas aquellas en las que era necesario la cubrición de grandes luces. A pesar del predominio de su empleo en horizontal, a lo largo de la historia se tiene constancia de algunas edificaciones que, en diferentes épocas y lugares, han alcanzado notables alturas.

El recorrido por la historia de las construcciones en madera, a pesar de no ser habitual su uso en edificios en altura, deja ver algunas sorprendentes construcciones de este tipo. Son muchos los intereses seguidos por la humanidad a lo largo de la historia que le han llevado a construir en altura. Tocar

el cielo, halagar a una divinidad, demostrar grandeza, elevarse para observar, controlar y comunicarse, son algunos de ellos.

2.1. ORIENTE

Desde la antigüedad, las lejanas culturas orientales se han caracterizado por el empleo de la madera para la resolución de sus sistemas constructivos. Y no es casualidad que el material predominante en sus arquitecturas tradicionales sea la madera ya que su territorio es montañoso y está en gran medida cubierto de bosques. Concretamente, los modelos de templos y pagodas budistas con estructura de madera de China llegaron a Japón en el siglo VI; y es especialmente en ambos territorios donde se encuentran las edificaciones de madera más altas construidas en la antigüedad, algunas de las cuales se conservan intactas.

2.1.1. Monasterio colgante de Datong

Uno de los templos chinos más espectaculares que han llegado hasta nosotros es el monasterio colgante de Datong, anclado al acantilado del monte Heng Shan, del año 491 (Fig. 30). Su construcción se realizó mediante el tallado de agujeros en la roca con la finalidad de empotrar tanto vertical como horizontalmente los elementos estructurales de madera. Con esta técnica de empotramiento, no muy habitual en los templos chinos de la época, logran levantar una construcción de hasta cuatro alturas que todavía hoy se mantiene en pie. El hecho de que sea posible visitar el monasterio en la actualidad se debe en gran parte a su localización ya que, por un lado, le protege de posibles inundaciones, así como de la lluvia y nieve por la montaña a sus espaldas; por otro, no le da tanto la luz directa evitando así el deterioro por el sol.

2.1.2. La pagoda

Originaria de China, la pagoda juega un papel esencial en el desarrollo de la arquitectura japonesa, impulsando la construcción de templos de madera de gran escala. Estas novedosas arquitecturas religiosas se consideran los más altos templos característicos de la religión budista que ha sobrevivido hasta nuestros días.

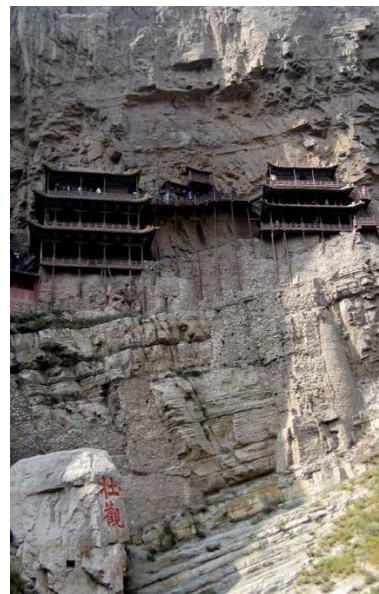


Fig. 30. Vista del monasterio colgante de Datong.
Fuente: <https://www.flickr.com/photos/108160396@N07/15853901003>

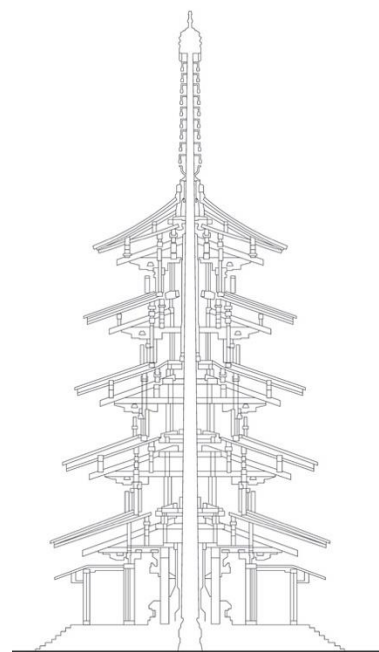


Fig. 31. Sección de la Pagoda Horyu-Ji.
Fuente: (Green, 2012, p. 28).

La pagoda japonesa del templo Horyu-Ji (Fig. 31), de una altura de “32,55 m” (Green, 2012, p. 28) , es considerada la más antigua del mundo y fue reconstruida en el año 711, después de que la original se perdiera en un incendio. Su estructura principal está configurada por dos partes sobre un basamento de piedra: una columna central de madera maciza (*Shin-Bashira*) que alcanza la altura total de la construcción enterrada en el suelo, y cinco pisos de entramados de madera (*toshin*), con sus cinco aleros. Es precisamente este particular sistema estructural el que explica que haya sobrevivido a tantos estragos de la naturaleza y durante tantos años:

“Mientras que el *Shin-Bashira* está aislado del resto de la estructura por espacios de 1 cm, la estructura de madera circundante está hecha de pisos individuales que descansan uno encima del otro. La combinación de ambas estrategias permite que la estructura disipe el movimiento oscilatorio producido por los terremotos” (Orta, et al., 2020).

Por último, cabe destacar la pagoda Sakyamuni (Fig. 32), la construcción de mayor altura que ha sobrevivido hasta nuestros días. Fue construida en el año 1056 en el Templo Fogong (China), con una altura de 67,31 m y un diámetro en base de 30,27 m. La pagoda toma la forma de un octágono con nueve plantas y seis aleros y, a diferencia de la pagoda Horyu-Ji, su construcción siguió una estrategia algo diferente debido a que los 4 m de la planta baja se mueven con el suelo mientras que la parte oscilante son los 63 m restantes.

2.1.3. Castillo de Himeji

Siguiendo la línea de templos y pagodas, que son los referentes por excelencia de la época, destaca el Castillo de Himeji (Fig. 33), el complejo de madera más grande de Japón, levantado en la cumbre del monte Himeyam. La estructura de madera que configura la torre principal, de 31,5 m de altura, se apoya sobre una base de piedra de 15,85 m. Además, cuenta con dos grandes columnas de madera que proporcionan un soporte estructural adicional a toda la torre. Esta ingeniosa construcción en altura no solo



Fig. 32. Fotografía de la Pagoda Sakyamuni. Fuente: <https://cutt.ly/Ymc8cw5>



Fig. 33. Exterior del Castillo de Himeji. Fuente: <https://cutt.ly/wmelow5>

destaca por su logro como fortaleza defensiva, sino que es su belleza exterior la que hoy nos deslumbra. Las relucientes paredes blancas que caracterizan la fachada del castillo tienen además una función protectora, lograda mediante la aplicación de una gran capa de yeso blanco que le proporciona una mayor resistencia al fuego.

2.2. OCCIDENTE

El mundo occidental recoge muchos de países, con una tradición histórico-cultural muy diversa que queda reflejada en sus sistemas y formas de construir. Los siguientes apartados recogen edificaciones con estructuras de madera que han sido seleccionadas por la altura adquirida, a pesar de ser, en la mayoría de los casos, muy inferiores a las tradicionales pagodas japonesas.

2.2.1. Casas medievales con entramado

En la actualidad, en el moderno barrio de Le Marais de París permanecen en pie dos casas medievales de entramado de madera, levantadas según el tradicional sistema estructural de cuajados. Se estima que su construcción data del siglo XIV, a pesar de que posteriormente hayan sido restauradas y modificada su apariencia exterior. En una de estas intervenciones se deja vista la estructura portante de la fachada que inicialmente había sido recubierta como medida de protección frente al fuego. Como se observa en la imagen (Fig. 34), la estructura se arriestra mediante triangulación, rellenando los huecos del entramado de piedras o ladrillos. A pesar de ser pocas las construcciones medievales que se mantienen hoy en pie, estas dos viviendas, de cinco y seis plantas respectivamente, son un claro ejemplo del alcance de las construcciones con estructura de madera del pasado.

Das Fachwerkhaus (Fig. 35) es el nombre con el que se denominan las casas de entramado de madera de Alemania y Suecia, las cuales utilizan esta misma técnica con algunas variaciones. La principal diferencia se encuentra en la gran cantidad de madera empleada en la construcción de las casas alemanas, hecho que se debe a la abundancia de bosques y tradición maderera del territorio. Por otro lado, en esta parte de Europa es común encontrar viviendas donde la estructura vista está tallada y pintada con múltiples



Fig. 34. Casas medievales de París con entramado de madera. Fuente: <https://bit.ly/3y0PtsV>



Fig. 35. Casas alemanas con entramado de madera. Fuente: <https://cutt.ly/HmeOafT>

ornamentos que, además de ser un motivo de identidad cultural, protege la madera de las inclemencias del tiempo. La elección del sistema de rellenos más ligeros para erigir viviendas de varias plantas pierde resistencia frente a las deformaciones y es quizá ese el motivo por el que la fachada muestra una mayor distribución de diagonales que en el típico esquema de cuajados estudiado en las viviendas medievales.

2.2.2. La iglesia de Heddal

En Noruega, con una larga tradición en madera, se levanta en el siglo XII el símbolo religioso más importante del país: la Iglesia de Heddal (Fig. 36). Las últimas investigaciones arqueológicas han hallado restos de madera más antiguos, lo que sugiere que la iglesia que hoy encontramos pudo haber sido levantada sobre las ruinas de templos pretéritos. Esta monumental construcción medieval de madera, de 26 m de altura, es la iglesia más grande conservada en Noruega, siendo hoy un importante centro turístico. La iglesia sigue la tipología de *Stavkirke*, nombre con el que se reconoce al modelo de templos cristianos medievales construidos en madera en Europa del Norte, pero hoy solamente encontrados en Noruega. El diseño de la estructura configura un armazón de gruesos postes circulares, conocidos como *Stav*, colocados sobre cimientos de piedra con el fin de solucionar el problema del contacto con el suelo, que humedece y daña la madera con el tiempo.

2.2.3. Iglesias de Rumanía

Las iglesias de madera de Rumanía fueron construidas entre los siglos XVII y XVIII en diferentes zonas de la región de Maramures. Si bien todas ellas alcanzan alturas sorprendentes, la iglesia de Surdesti (Fig. 37) parece ser la de mayor altitud alcanzada. A comienzos del siglo XVIII se levantaron sus 72 m de altura, convirtiéndose en uno de los templos de madera más altos del mundo occidental, acercándose e incluso alcanzando a las pagodas japonesas. Concretamente fue esta última una de las ocho iglesias



Fig. 36. Iglesia de Heddal, Noruega. Fuente: <https://cutt.ly/FmeArjX>



Fig. 37. Iglesia de Surdesti en la región de Maramures. Fuente: (Green, 2012, p. 33).

declaradas Patrimonio de la Humanidad por la Unesco en 1999.

2.2.4. The House Mill

En el distrito londinense de Newman, *The House Mill* es hoy un importante edificio de cinco plantas ubicado sobre el río Lea y parte del complejo *Three Mills*. Es considerado el molino de mareas más grande de Gran Bretaña, con una estructura de madera diseñada por Daniel Bisson en 1776, que ha sufrido diferentes rehabilitaciones como consecuencia del deterioro y pequeños incendios. Esta originaria estructura de entramado pesado configura un edificio más parecido a la tipología de bloque actual que a las esbeltas estructuras citadas anteriormente, con grandes pórticos de madera que generan un diáfano espacio interior completamente envuelto por este material (Fig. 38).



Fig. 38. The House Mill, fotografía interior.
Fuente: <https://cutt.ly/emeGpGh>

3. LOS NUEVOS MATERIALES

Desde la antigüedad, la madera ha sido uno de los principales materiales de construcción. Sin embargo, en algunos momentos históricos se ha cuestionado su uso en edificación. Poco a poco, se fue relegando su uso a favor del adobe, los ladrillos de arcilla cocida y, en construcciones de mayor entidad, la piedra y el mármol. Posteriormente, conscientes de las limitaciones de las estructuras de madera y tras diferentes acontecimientos históricos, el material queda en gran parte desacreditado y es sustituido por los nuevos materiales de construcción, el acero en el siglo XIX y, un siglo después, el hormigón armado. La llegada de los nuevos materiales junto con los avances de la tecnología da origen a las primeras construcciones en gran altura y el relego de la madera a las edificaciones de menor entidad. Es el nacimiento de los primeros rascacielos.

3.1. DEBILIDADES DE LA MADERA

La escasez en determinados territorios y la percepción sobre su comportamiento ante la humedad, algunos agentes bióticos y el fuego son algunas de las debilidades asociadas a la madera que contribuyen a generar una percepción negativa del material.

En el siglo XV, ya Alberti indicaba que en los edificios públicos debía evitarse la madera en estructuras vistas, atendiendo a razones de “dignidad de las obras”. De otro modo, en el XVII en Francia, D’Aviler aceptaba la

construcción de entramados de madera cuando fuera preciso reducir gasto, peso o aumentar espacio. Y “es en el siglo XVIII cuando autores como Jombert (1728) y Patte (1769) criticaban abiertamente el uso indiscriminado de madera en edificación, poniendo en duda el posible ahorro frente a los problemas de conservación” (Gómez, 2006, p. 323).

La preocupación por el comportamiento resistente prevalece sobre criterios económicos, y “el temor a los incendios lleva a algunos autores como el Conde de Espie (1754) incluso a proponer la sustitución de las estructuras de madera por soluciones de ladrillo” (Gómez, 2006, p. 323). La desconfianza de su empleo como material de construcción es asociada principalmente a su comportamiento ante el fuego; uno de los principales motivos por los que la madera llega al siglo XX como un material desacreditado.

En las Ínsulas de la antigua Roma era constante la preocupación frente a los incendios y derrumbes; sucesos que se habían convertido en una de las mayores causas de muerte entre la población. El poco espacio libre entre las construcciones, unido a su altura, hacía que el fuego se propagase entre ellas con facilidad (Fig. 39). De acuerdo con Peter Hall (1998) en su libro “*Cities in Civilization*”: “Julio César se vio obligado a promulgar leyes para limitar la altura de estos edificios a 21 m, por peligro de colapso de dichas estructuras ante la falta de controles”. Posteriormente, Trajano redujo la altura máxima a 18 m” (Martínez, 2018, p. 8), limitando las construcciones a seis plantas. Otra de las restricciones impuestas fue dirigida a evitar la propagación de incendios, al establecer la separación mínima entre cada edificio. Los factores de riesgo asociados a estas construcciones no solo motivaron la aplicación de nuevas leyes, sino que, con el fin de prever esas situaciones, el emperador Augusto creó un grupo de vigilantes que eran alertados en caso de producirse un incendio (Fig. 40).

Realmente, el abandono del material leñoso en la arquitectura de las ciudades vino de la mano de diferentes tragedias, que relegan su empleo a la arquitectura rural,

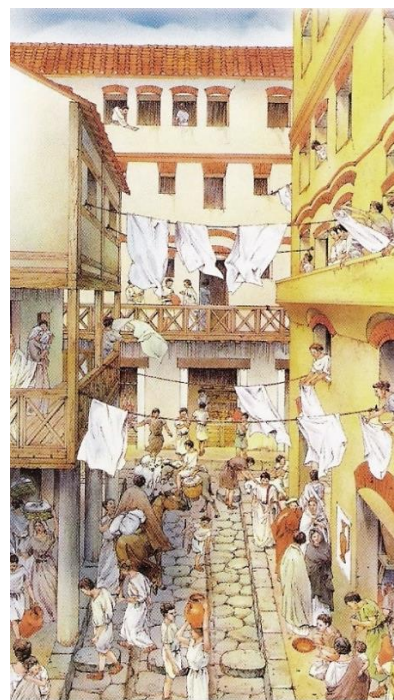


Fig. 39. Ilustración gráfica de las calles y viviendas romanas.
Fuente: <https://cutt.ly/Jmzg9Qx>



Fig. 40. Ilustración gráfica de un grupo de vigilantes apagando un incendio en la antigua Roma.
Fuente: <https://cutt.ly/pmzg3SB>

apostando en su lugar por el ladrillo y la piedra y, posteriormente, en el acero y el hormigón armado.

El gran incendio de Londres de 1666 se saldó con la destrucción de más de 13.000 hogares (Fig. 41). No solo las casas destruidas eran de madera, sino que también lo era gran parte de la infraestructura de suministro. Para levantar de nuevo la ciudad se firma en 1667 un Acta de Reconstrucción orientada, entre otras cosas, a eliminar aquellos riesgos que habían propiciado la propagación del fuego. Una de las regulaciones aplicadas prohíbe por primera vez las construcciones en madera, debiendo emplearse exclusivamente la piedra o el ladrillo como materiales de construcción. Además, después de la catástrofe surgieron nuevas reglas sobre equipamientos (Fig. 42) contra incendios y se creó la *Fire Office*, una compañía aseguradora contra incendios.

En 1871, otro gran incendio destruyó gran parte de la ciudad estadounidense de Chicago (Fig. 43). Allí también las viviendas eran generalmente de madera y mampostería, la mayoría de seis plantas. Y no solo las viviendas eran construidas íntegramente en este material, también las calles se habían adoquinado con madera, facilitando la propagación del fuego. Tras la catástrofe comenzó un proceso de reconstrucción en el que emerge la denominada Escuela de Chicago, una referencia de la arquitectura moderna que introdujo los nuevos materiales y técnicas para la construcción de los primeros rascacielos. Ahora bien, además de las debilidades mencionadas anteriormente, la sustitución de las grandes construcciones de madera llega con la producción masiva y consiguiente abaratamiento de los nuevos materiales metalúrgicos de la Revolución Industrial.



Fig. 41. Ilustración del incendio de Londres de 1666. Fuente: <https://cutt.ly/Vmr0cNo>



Fig. 42. Ilustración de una máquina contra incendios del siglo XVII. Fuente: <https://www.bbc.com/news/uk-england-london-36774166>



Fig. 43. Ilustración del gran incendio de Chicago en 1871. Fuente: <https://cutt.ly/lmzg4gp>

3.2. LOS NUEVOS MATERIALES

El proceso de transformación social, higiénica, económica y tecnológica iniciado en Gran Bretaña en la segunda mitad del siglo XVIII supuso un punto de inflexión en la historia de

la humanidad. La denominada Revolución Industrial modifica un modelo de vida que afecta también a la forma de construir, en el que el desarrollo del acero y, más tarde, del hormigón armado pronto protagonizarían la industria de la construcción. Mientras, la madera como material de construcción apenas evolucionó, en parte debido a la desconfianza generada en el material a lo largo de las últimas décadas. Además, a este hecho se suma su carácter natural e impredecible, algo que, frente al comportamiento uniforme del acero y el hormigón, no era compatible con los nuevos paradigmas industriales.

3.2.1. Acero

Como consecuencia directa del avance tecnológico de los altos hornos, se fabrican de forma industrializada, seriada y económica el acero y otros materiales metálicos que configuran las estructuras de las nuevas construcciones. Estos materiales posibilitan la cubrición de mayores luces, relegando las construcciones en madera a su empleo en aquellas de menor entidad. Una obra clave es el puente *Coalbrookdale* (Fig. 44), el primer puente metálico del mundo, construido en 1779 con una envergadura de 30,50 m y 60 m de longitud. De acuerdo con A. Bernabéu: “cuando aparece un nuevo material, las formas y tipologías estructurales que adopta reproducen los sistemas precedentes, característicos de los materiales existentes, sin aprovechar ni expresar las posibilidades que el nuevo material ofrece” (Bernabeu, 2007, p. 9). En este sentido, el modelo de puente adopta la tipología de arco como herencia de los antiguos puentes de piedra, mientras que sus detalles constructivos recuerdan a las estructuras en madera.

A partir del siglo XIX, el empleo del acero supuso una transformación radical del mundo de la construcción. El material ofrece una resistencia y unas posibilidades mucho mayores que las de los materiales estructurales conocidos hasta entonces (cerámica, piedra y madera) y permite superar rápidamente la escala de las edificaciones realizadas anteriormente y cambiar su planteamiento formal. Así, con motivo de la primera Exposición Universal, celebrada en 1851 en Londres, Joseph Paxton diseña el Palacio de Cristal

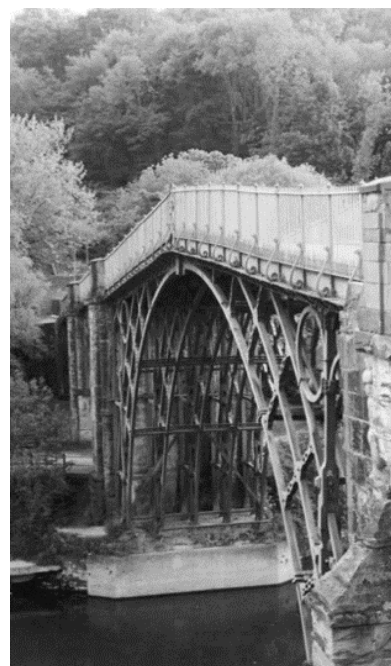


Fig. 44. Puente de Hierro de Coalbrookdale. Inglaterra, 1779. Obra de T. Pritchard, A. Darby III y J. Wilkinson. Fuente: <https://structurae.net/en/structures/iron-bridge>



Fig. 45. Interior del *Crystal Palace* de Joseph Paxton en Londres. Fuente: <https://cutt.ly/rmzhaVj>

(Fig. 45), una edificación de hierro fundido y cristal de 34 m de altura y 600 m de longitud. La construcción ofrece una aproximación verdaderamente distinta a las edificaciones de la época dado que “plantea un esquema estructural basado en la repetición de un mismo módulo e introduce sistemas de producción industrial y de prefabricación” (Bernabeu, 2007, p. 6). Su condición de referencia para la construcción y la ingeniería estructural de la época sufriría una severa fatalidad dado su trágico final en un incendio terminal, en 1936, después de ser trasladado de su ubicación original en Hyde Park a un emplazamiento distinto, al sur de Londres. Lo que aceleraría la irrupción del hormigón armado, como material más seguro en situaciones de incendio.

Este escenario alcanzaría su cumbre en la Exposición Universal de París de 1889, cuando el ingeniero Alexandre Gustave Eiffel levanta una estructura de hierro pudelado de 300 m de altitud, demostrando así el alcance de las estructuras metálicas. Su obra, denominada Torre Eiffel (Fig. 46), fue durante 41 años el edificio más alto del mundo.

3.2.2. Hormigón armado

Mientras la construcción del siglo XIX está asociada a las estructuras metálicas y a la industrialización, el siglo XX se caracteriza por la flamante aparición del hormigón, armado primeramente y pretensado más adelante, que revoluciona de nuevo el mundo de la ingeniería y la arquitectura. No obstante, ya en el siglo XIX se tiene constancia de las primeras patentes del empleo del hormigón con armadura. Joseph Lambot presenta en 1849 una barca de hormigón reforzado con hierro para la Exposición Industrial de París, considerada la primera invención con hormigón armado. Unos años después, en 1852, François Coignet incorpora refuerzos de hierro al hormigón. Ahora bien, la intervención del hormigón armado se suele atribuir a William Boutlan Wikinson, especialista en ornamentación y molduras de yeso y hormigón, quien, con el fin de dar respuesta al problema de los incendios “solicitó en 1854 la patente de un



Fig. 46. Fotografía de la torre de Gustave Eiffel de París (1889). Fuente: <https://cutt.ly/WmtOHDy>

sistema que incluía armaduras de hierro para la mejora de la construcción de viviendas, almacenes y otros edificios resistentes al fuego” (Valenzuela, 2015, p. 135). Finalmente, en 1867 Joseph Monier levanta en Francia las primeras edificaciones de hormigón armado. Si bien en la última década del siglo XIX en Europa y en Estados Unidos existían ya un número relevante de obras construidas en hormigón armado, en España “su introducción tiene lugar a finales del siglo XIX bajo influencia francesa. El primer caso conocido en cuanto a su empleo estructural es un depósito de agua en Puigverd (Lleida) construido en 1893 por Francesc Macià, según el sistema Monier” (Marcos, et al., 2014, p. 137).

Al igual que sucedía en el puente *Coalbrookdale*, los primeros puentes realizados en hormigón armado reproducen las tipologías estructurales y formales de los sistemas precedentes. En este caso adoptan la tipología de vigas en celosía propias de los puentes metálicos. A pesar de que éstas se sustituirán por vigas de alma llena, las vigas trianguladas de hormigón como cubrición de grandes luces se seguirán utilizando años después. En España, J.M. de Zafra, una figura clave de la ingeniería civil española, proyectó en 1907 un puente con vigas de hormigón armado en celosía sobre el río Vélez (Fig. 47).

Por otro lado, Bernabéu encuentra esta misma idea aplicada a las estructuras de edificación. Así, asegura que “a finales del siglo XVIII el procedimiento más habitual para la formación de forjados metálicos consiste en la disposición de bovedillas de ladrillo entre viguetas metálicas, herencia directa de la construcción tradicional con vigas de madera” (Bernabeu, 2007, p. 10). De la misma manera, los primeros forjados de hormigón armado adoptan sistemas de vigas y pilares, muy similares a los anteriores forjados de estructura de madera o metálicos. Este sistema de forjados de vigas y pilares de hormigón armado, patentado por François Hennebique (Fig. 48), surge en Francia hacia 1890. Se sabe que ya a principios del siglo XX tenía una fuerte presencia en todo el mundo, esta vez, y al igual que las estructuras metálicas, aplicado incluso en las construcciones en media y gran altura.



Fig. 47. Puente sobre el río Vélez en 1909. Fuente: <http://ingenieriacivil.cedex.es/index.php/ingenieria-civil/article/view/2402>

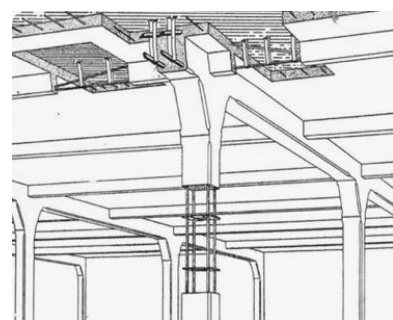


Fig. 48. Sistema François Hennebique. Sistema de forjados viga-pilar en hormigón armado. Fuente: (Bernabeu, 2007, p. 10).

3.3. PRIMEROS RASCACIELOS

Los protagonistas de la construcción de los primeros rascacielos podrían agruparse en torno a la frecuentemente denominada Escuela de Chicago. Si bien es cierto que desde la antigüedad se tiene constancia de la existencia de edificaciones en altura, no se comienza a hablar de los rascacielos hasta su nacimiento con este grupo de arquitectos e ingenieros surgido a finales del siglo XIX y principios del XX. Parece ser la esbeltez, la relación entre la sección y la longitud, aquella que lleve a considerar a un edificio como alto. A ello se suman las explicaciones que realiza M.Á. Cobreros en su libro “Tipologías estructurales de edificios en altura”:

“En los edificios en altura las cargas horizontales tienen primacía sobre las verticales. Los muros transmiten las cargas horizontales mediante el rozamiento entre hiladas de arriba hacia abajo y resisten el momento de vuelco descentrando la resultante vertical de peso propio como forma de establecer un par centrador que equilibre la torre” (Cobreros, M.Á., 1999, p. 8).

El origen de las construcciones en altura no solo se encuentra en la necesidad de reconstrucción de la ciudad de Chicago, tras las enormes pérdidas provocadas por el gran incendio de 1871, sino que son también otros factores los que impulsan y posibilitan esta nueva tendencia arquitectónica. Por un lado, con el crecimiento de la población junto con la industrialización del siglo XIX y el consecuente traslado de la población rural a las ciudades, se origina un interés por concentrar a un mayor número de personas en el menor espacio posible. Por otro lado, este desarrollo se da gracias a los nuevos avances de la tecnología relativa a los sistemas de transporte vertical y los nuevos materiales.

De acuerdo con Vitruvio ya en el año 236 a.C. Arquímedes introduce el primer mecanismo elevador mediante poleas y cuerdas, no obstante, no fue hasta 1853 cuando Elisha Graves Otis diseña el primer ascensor mecánico con freno de emergencia (Fig. 50). Décadas después, en 1887, Weren Von Siemens incorpora al sistema el motor eléctrico.

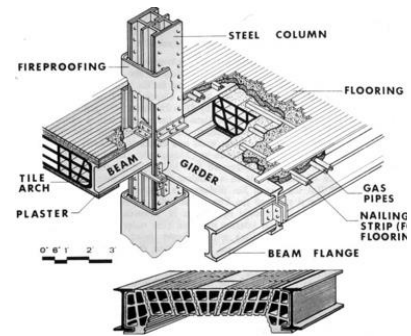


Fig. 49. Detalle del Fair Building de W. Le Baron Jenney de 1891. Fuente: <https://cutt.ly/Fmbrce2>



Fig. 50. Muestra del ascensor con freno de emergencia diseñado por Elisha Otis en 1853. Fuente: <https://cutt.ly/Pmr719c>

Entre los ingenieros y arquitectos que se encargan de reconstruir la ciudad de Chicago destaca William Le Baron Jenney, considerado el diseñador del primer edificio con esqueleto metálico, el *Home Insurance Building* (Fig. 51). Su construcción, datada entre 1884 y 1885, alcanza los 10 pisos y 55 m de altura bajo un interés en concentrar a un mayor número de personas en el menor espacio posible. Estos primeros edificios en altura sentaron las bases teóricas y estéticas para las construcciones más altas del siguiente siglo.



Fig. 51. El *Home Insurance Building* de William Le Baron Jenney. Fuente: <https://cutt.ly/Bmc4y2R>

PÁGINA INTENCIONADAMENTE EN BLANCO



CAPÍTULO 2

MADERA ESTRUCTURAL

PÁGINA INTENCIONADAMENTE EN BLANCO

1. INDUSTRIA DE LA MADERA

Las restricciones en el uso de acero y otros metales impuestas durante la Primera Guerra mundial y el desarrollo industrial de nuevos adhesivos sintéticos ponen fin al letargo de la industria de la madera. En Europa a comienzos del siglo XX se empiezan a aplicar colas y resinas sintéticas y se abre paso al desarrollo de la madera laminada encolada para la construcción de estructuras de grandes luces, tales como hangares, industrias o barracones, y de los tableros contrachapados para el desarrollo y fabricación de los primeros aviones de guerra.

1.1. MADERA LAMINADA ENCOLADA

Varios autores afirman que Philibert de l'Orme (1515-1577) comenzó a divulgar el uso de piezas de pequeño tamaño a partir de elementos más largos. Tres siglos después, Armand Émy (1771-1851), más conocido como coronel Émy, continúa la técnica iniciada por de l'Orme y es considerado el primero en utilizar madera laminada unida por clavos y collares (Orta, et al., 2020, p. 3).

1.1.1. Madera laminada

La principal incorporación del sistema de Émy a la propuesta de l'Orme es el empleo de la mayor longitud de las piezas posible. Con ello, facilita el curvado de las mismas sin que se alcance el límite del material y evita la rotura de

este, prestando especial atención a la hora de “evitar que las juntas coincidan, ya que daría lugar a un punto crítico y especialmente débil de la estructura” (Sevilla, 2018, p. 13).

Concretamente, fue en 1819 cuando el coronel Emy se planteó dar con una solución revolucionaria para la cubierta del picadero del cuartel de Libourne. Posteriormente, lo puso en práctica en 1825 en el cuartel de Marac (Fig. 52) para un hangar de 68 pies de luz y, un año después, en el de Libourne para el que se había concebido. La estructura del picadero de Libourne, es una muestra de la aplicación de sistemas mixtos que según la propuesta de Émy, asocia la triangulación y la laminación, con el fin de arriostrar el sistema adecuadamente de forma que se eviten los movimientos laterales. Gómez (2006) describe el sistema de Émy de la siguiente forma:

“Se trata de un sistema que sustituye las cerchas por una combinación de arcos de madera laminada formados por tablas de gran longitud y espesor reducido colocadas de plano y aseguradas con pernos metálicos, y armadura a dos aguas de cuchillos de puente con pendolón y pares jabalconados sobre postes laterales verticales. Ambas estructuras se encepnan con piezas normales a la directriz del arco, a fin de rigidizar el conjunto” (Gómez, 2006, p. 412).

En la propuesta del modelo de Emy, configurada por láminas de madera colocadas horizontalmente y ensambladas por bulones y bridas metálicas (Fig. 54), gracias a la flexibilidad de las láminas de madera, se logra obtener de forma sencilla la curvatura deseada para los arcos. No solo destaca por la sencillez de su montaje, sino que, dada la posibilidad de superponer el número de láminas necesario para el ancho requerido, también era posible aplicar la dimensión requerida, encontrando el mayor inconveniente en los empujes laterales que se generaban sobre los muros de apoyo, los cuales requerían un refuerzo adecuado. Fue el propio Émy quien llevó a cabo un análisis comparativo entre su propuesta y la de las estructuras del arquitecto francés Jean-Baptiste Rondelet, concluyendo que “su propio diseño era una evolución de las anteriores en cuanto a simplicidad de ejecución, así como en economía de medios (mano de obra y de material para los casos de grandes luces)” (Sevilla, 2018, p. 14). Finalmente, “la propuesta de Émy fue avalada en Francia

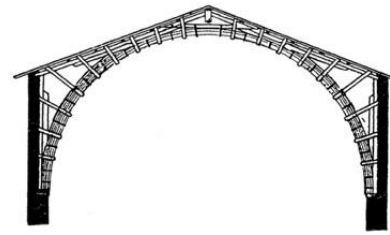


Fig. 52. Armadura. De Émy para el cuartel de Marac, Newlands, 1860. Fuente: (Somoza, 1986, p. 41).

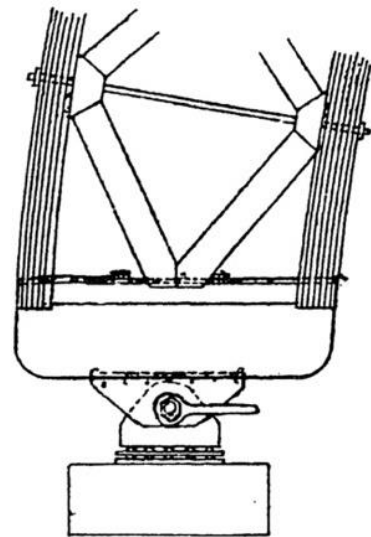


Fig. 53. Sistema mixto del coronel Émy empleado en el cuartel de Libourne. Fuente: (Somoza, 1986, p. 42).

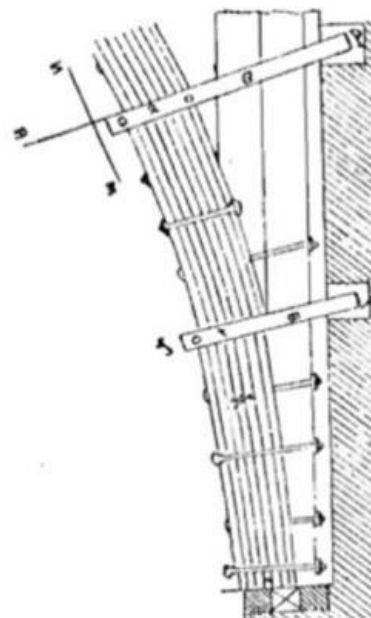


Fig. 54. Sistema Émy, arco laminado atornillado 1828. Fuente: (Martínez, 2018, p. 11).

por un informe de la Sociedad de Fomento de la Industria Nacional en 1831, adoptándose a partir de este momento para la construcción de distintos tipos de obras” (Sevilla, 2018, p. 14).

1.1.2. Madera laminada encolada

No será hasta el siglo XX cuando la ingeniería aplicada a la madera experimente unos avances considerables en lo que se refiere a los niveles de resistencia y creatividad como resultado del nacimiento de la madera laminada encolada. Somoza (1986), hace referencia al autor que introdujo por primera vez el equivalente a la madera laminada encolada:

“Un último paso quedaba por franquear, y este honor le corresponde a Otto Hetzer, maestro carpintero en Ewimar (Suiza) que tuvo la genial idea, hacia 1906, retomando el sistema Emy, y gracias a los progresos de la química moderna, de sustituir los bulones y bridas metálicas por colas tipo caseína, obteniendo así una sección prácticamente homogénea. La madera laminada encolada había nacido (Somoza, 1986, p. 42)”.

Karl Friederich Otto Hetzer (1846-1911), maestro de la carpintería de armar (Fig. 55), revoluciona radicalmente la forma de construir en el mundo gracias a sus descubrimientos y patentes. Es cierto que la madera laminada ya había aparecido como elemento estructural previamente, sin embargo, no era capaz de competir contra la madera maciza y menos contra el hormigón y el acero. El uso de conectores metálicos no permitía que las distintas láminas funcionasen como una unidad debido a la escasa superficie de contacto. Este hecho genera una acumulación de tensiones en torno a los elementos conectores, provocando así su rotura antes de que las láminas alcancen su capacidad máxima (Martínez, 2018, p. 11). En el libro “*Laminated Timber Construction*” [Construcción de Madera Laminada] Christian Müller narra los problemas que sufrían estas estructuras:

“Las capas separadas estaban conectadas con la ayuda de tornillos y collarines, que pretendían incrementar la fricción entre laminas y, por tanto, facilitar la transmisión de esfuerzos entre capas. Como la conexión no es una unión real, los esfuerzos flectores causaban

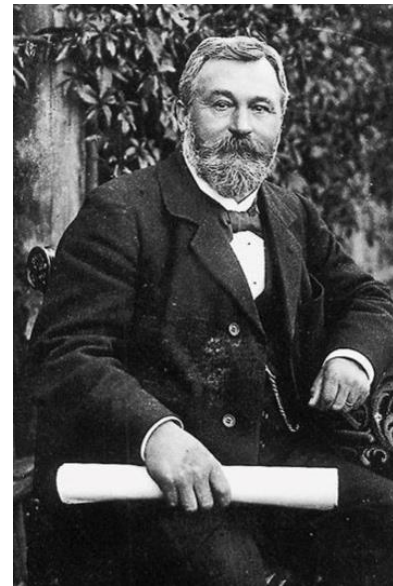


Fig. 55. Fotografía de Karl Friederich Otto Hetzer. Fuente: (Müller, 2000, p. 24).

el desplazamiento de las láminas entre ellas. Esto derivó en graves deformaciones llegando a cambiar los patrones de las cargas” (Müller, 2000, p. 25).

Según sus explicaciones, para que la unión encolada sea capaz de transmitir fuerzas de un miembro a otro la unión debe ser más resistente que la madera adyacente. En este sentido, la unión de láminas de madera mediante adhesivos aparece como una solución a los problemas encontrados en los conectores metálicos; el nuevo sistema de unión permite maximizar la superficie de contacto de forma que las tensiones queden repartidas uniformemente entre las láminas, logrando obtener una sección prácticamente homogénea.

La primera patente que definió la madera laminada encolada la obtuvo Hetzer en 1901, en Suiza, basándose en la superposición de láminas de madera unidas por un adhesivo para construir vigas rectas de grandes luces. Sin embargo, se cree que las primeras aplicaciones de este sistema “datan del año 1890 en la construcción del edificio del Reichstag en Berlín, donde se emplearon vigas de 10 metros de longitud” (Sevilla, 2018, p. 17). Continuando con su labor de investigación, en 1906 patenta en Alemania un sistema que permite salvar luces aún mayores: arcos de madera laminada encolada configurados a partir de piezas curvadas de madera (Fig. 56). Posteriormente, sus patentes se extendieron a varios países europeos como Alemania, Austria, Hungría, Bélgica, Checoslovaquia, Dinamarca, España, Inglaterra, Finlandia, Francia, Holanda, Italia, Noruega, Suecia y Suiza (Jordahl, 1999, p. 29), siendo este último el país en el que alcanzó un espectacular desarrollo. Entre sus primeras aplicaciones en Europa destaca su actuación en la Sala de exposiciones de ferrocarriles alemanes para la Exposición Internacional de Bruselas de 1910.

El salto a América llegó de la mano de Max Hanisch, autor que se asoció con Hetzer en la firma de Weimar en 1906, donde aprendió la tecnología (Jordahl, 1999, p. 30). La primera aplicación de la madera laminada encolada en Norteamérica data de 1934 para una escuela y un gimnasio (Fig. 57) para la ciudad de Peshtigio en Wisconsin, obra encargada al arquitecto por Max Hanisch.

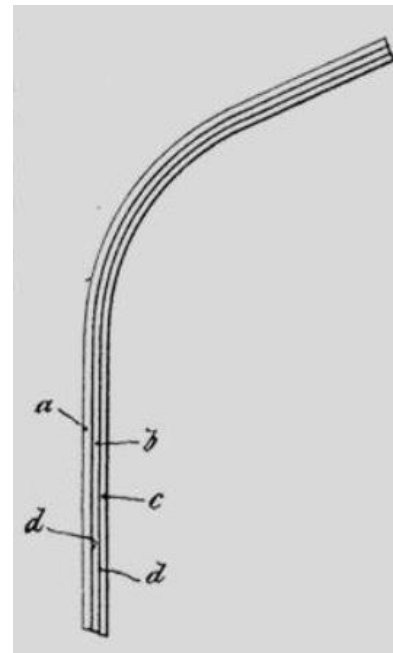


Fig. 56. Patente nº197773 de Otto Hetzer en 1906 en Weimar, Alemania. Fuente: (Müller, 2000, p. 25).



Fig. 57. Estructura con vigas en arcos lamiados encolados en el gimnasio de Peshtigio, Wisconsin Fuente: Forestal y Maderero (<https://cutt.ly/fmtPjiv>).

Unas décadas después de las primeras patentes de Hetzer, con la II Guerra Mundial se ve favorecido notablemente el desarrollo de la madera, en gran parte por las restricciones existentes para el empleo del acero al tener como prioridad el abastecimiento de la logística militar. Es cierto que al comienzo de la II Guerra Mundial la tecnología de la madera había alcanzado un nivel muy elevado, sin embargo, es durante el transcurso de aquella, cuando sufre un mayor impulso (Somoza, 1986, p. 42). De acuerdo con Jordahl “se estima que se ahorraron 800.000.000 libras (362.880 t) de acero estructural al construir con madera en 1942. Esto sin incluir el ahorro que suponía la construcción con madera laminada encolada” (Jordahl, 1999, p. 29).

Es por ello por lo que, a lo largo del siglo XX, la ingeniería aplicada a la madera laminada experimenta unos avances considerables. Dado la gran capacidad de resistir esfuerzos, esta tecnología se aplicó en la construcción de grandes estructuras que salvaban luces considerables. Desde entonces y hasta la actualidad, la madera laminada encolada ha seguido un gran desarrollo a nivel mundial sin apenas restricciones en su uso en construcciones de diferentes escalas, apareciendo con frecuencia en las estructuras de madera de construcciones en altura.

1.2. ADHESIVOS Y UNIONES

El recorrido por la historia de las colas para la madera tiene su origen hacia el año 3500 a.C. en Egipto. El conocido interés por mejorar las dimensiones, propiedades y capacidades existía ya en la antigüedad, siendo los egipcios (Fig. 58) los primeros en unir finas láminas de madera mediante colas naturales a base de cartílagos y/o de pescado. La Asociación de Investigación de las Industrias de la Madera (AITIM) en su publicación “Productos de madera para la arquitectura” hace referencia a las primeras aplicaciones de las colas para chapados de madera, encontrando “objetos preciosos como las sandalias de Tutankamón (Fig. 59) o elementos de mobiliario (camas,



Fig. 58. Ilustración de los materiales de construcción en el Antiguo Egipto. Fuente: <https://egiptologia.com/materiales-de-construccion-en-el-antiguo-egipto/>

butacas, etc.)” (Asociación de Investigación de las Industrias de la Madera, 2008, p. 24), utilizándose principalmente con fines decorativos. Desde entonces, las colas y las uniones de las finas láminas de madera han ido evolucionando en paralelo al perfeccionamiento de las sierras y cuchillas.

1.2.1. Adhesivo de caseína

A comienzos del siglo XX los adhesivos compuestos de caseína experimentan un desarrollo importante, primero por el uso en la carpintería y a continuación por su utilización en aviación. Se sabe que fue a partir de 1910 cuando la construcción en madera de aviones con fines civiles y más tarde militares desarrolló una tecnología basada en la mezcla de madera maciza para la estructura y tablero contrachapado para el fuselaje del avión (García, 1999, p. 71). Cabe destacar que estos primeros adhesivos no eran resistentes al agua dado que se disolvían al entrar en contacto con esta, quedando limitado su uso a ambientes interiores y secos.

1.2.2. Adhesivo de formaldehído

Frente a la falta de resistencia al agua de los compuestos de caseína, los adhesivos con base de formaldehído se introducen en 1936 adquiriendo esta propiedad. El desarrollo de este compuesto llevó a unas mayores prestaciones del adhesivo logrando alcanzar unas prestaciones idénticas a las de la madera maciza. Por ello, gracias a estos adhesivos con base de formaldehído la madera laminada encolada adquiere prestaciones equiparables a las de la madera maciza. Cabe destacar que hoy en día los compuestos de melanina-urea-formaldehídos son los más utilizados por su transparencia (Serrano, 2000).

1.2.3. Adhesivo epoxi y otros

De acuerdo con García en su publicación sobre Historia de la tecnología de la madera: “En 1949 se fabrican los primeros adhesivos epoxis. Los adhesivos vinílicos de un solo componente se formulan en 1950, y no es hasta 1964 cuando aparecen los primeros termofusibles” (García,



Fig. 59. Sandalias de Tutankamón, adornadas con chapas de madera (Fuente (Asociación de Investigación de las Industrias de la Madera, 2008, p. 24).

1999, p. 71). En las últimas décadas, según afirma Serrano en “*Adhesive Joints in timber Engineering. Modelling and testing of fracture properties*” [Juntas adhesivas en la ingeniería de la madera: modelado y ensayo de propiedades de fractura]: “los adhesivos para madera más comúnmente empleados en aplicaciones estructurales en la actualidad son los adhesivos a base de fenol-resorcinol (PR), urea formaldehído ((M) UF), poliuretanos (PUR) y epoxis (EPX)” y sigue, “Los adhesivos a base de epoxi son fiables y muy adecuados para fines estructurales, pero no se prefieren en algunos países por motivos del entorno de trabajo” (Serrano, 2000, p. 5). El desarrollo del formaldehído, y más recientemente de las resinas, no solo ha servido para mejorar la resistencia de la madera laminada encolada, si no que ha permitido el desarrollo de una gran variedad de productos durante la última mitad del siglo XX.

1.2.4. Uniones dentadas

En su aplicación para la carpintería de armar, son muchas las ventajas obtenidas al aserrar la madera para unirla posteriormente, siendo algunas de ellas la fiabilidad y deformabilidad adquiridas, además de la longitud indefinida. Esta última propiedad se adquiere mediante empalmes de la madera que permiten prolongarla en sentido longitudinal. De la gran variedad de posibilidades de empalme que hoy existen, en este documento se ha optado por exponer solamente una de ellas a modo de ejemplo. Es el caso de uno de los primeros sistemas, que llega en 1942 y es conocido como modelo de uniones dentadas (Fig. 60) o a peine (*finger joints*). A través de ellos es posible unir tantas láminas como se requiera en sentido longitudinal, encontrando la única limitación de tamaño en el transporte del taller a la obra. Además, aumenta considerablemente la superficie de contacto y crea una disposición oblicua entre las fibras y el corte. Son muchos los especialistas que clasifican esta unión como material de alta calidad dada su rigidez, estabilidad dimensional y



Fig. 60. Empalme mediante uniones dentadas o a peine (*finger joints*).
Fuente: <https://cutt.ly/Emc7qlp>

versatilidad. Esto hizo que en 1959 se normalizara este tipo de uniones según la DIN 68140 (Martínez, 2018, p. 12).

2. TIPOLOGÍAS ESTRUCTURALES PARA EDIFICIOS EN ALTURA

Los avances en el diseño y la fabricación de nuevos productos de madera sintética (EWP), han dado lugar a la evolución de los sistemas tradicionales de construcción de madera. Actualmente, los EWP se utilizan ampliamente en estructuras de madera modernas y permiten que la madera se utilice para construcciones de media y gran altura.

La madera, cuando se utiliza como material estructural en edificios de varias plantas, aparece con frecuencia en combinación con otros materiales, tales como acero u hormigón, “aunque es una alternativa viable y muy interesante, no es necesaria ya que hay diversos estudios que demuestran que, con materiales como el CLT, se pueden construir edificios utilizando únicamente la madera como material estructural de varios pisos” (Galván, 2017, p. 82). La tecnificación de los sistemas y productos de madera estructural ha crecido tanto que en la actualidad la madera es capaz de competir con cualquier otro material de construcción.

Las tipologías estructurales que se introducen a continuación han sido elaboradas atendiendo al estudio en profundidad de las construcciones o proyectos actuales de madera. En primer lugar, se presentan los sistemas de poste y viga (*post and beam*), el entramado ligero (*light frame*) y la

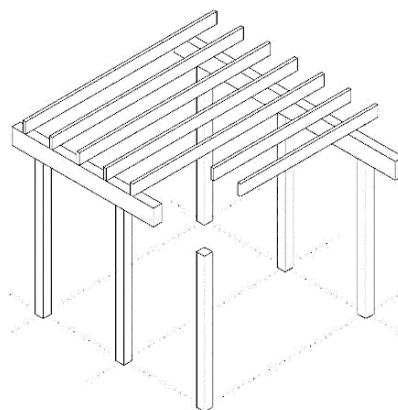


Fig. 61. Esquema del sistema de entramado pesado. Fuente: (Arriaga, et al., 2010, p. 12).

madera maciza (CLT) y, por último, sistemas particulares híbridos: estructuras mixtas y estructuras combinadas.

2.1. ENTRAMADO PESADO (POSTE Y VIGA)

El sistema de entramado de postes y vigas (Fig. 61), en inglés *post and beam*, es una de las tipologías estructurales empleadas en la actualidad para las construcciones en altura. Se caracteriza por la unión de elementos lineales de madera de gran escuadría que configuran un conjunto indeformable. Los pies derechos o postes transmiten al terreno los esfuerzos que reciben de la estructura a través de las vigas, sobre las cuales descansan las viguetas que configuran el forjado. La estructura adquiere la estabilidad necesaria a través de los ensambles en las uniones y/o la triangulación para el arriostramiento del sistema. Frente a las estructuras de entramado ligero, el sistema de pórticos únicamente conforma la estructura.

La unión de los elementos lineales requiere ensambles que, por lo general, se resuelve mediante herrajes metálicos o conectores especiales, cuya adecuada utilización determinará, en buena medida, la calidad de la construcción. La elección del sistema de unión más adecuado a emplear debe prestar especial atención a la relación de esfuerzos existentes entre los elementos de madera. Por otro lado, es también importante “que las dimensiones de los elementos de transmisión estén en relación con la sección de los elementos de madera” (Arriaga, et al., 2010, p. 12).

Este sistema se utilizaba ya en la antigüedad, y es hoy cuando, gracias a los nuevos productos de madera estructural y a los avances en las uniones, se convierte en un modelo estructural capaz de dar respuesta a la demanda de materiales sostenibles y edificaciones de varias plantas que conforman nuestras ciudades. En la actualidad, entre las construcciones de más altura destacan el *Tamedia Building* (Fig. 62) con 7 plantas y el *Office Perspective* (Fig. 63) con un total de 10 en Burdeos.



Fig. 62. Fase de estructura durante la construcción del edificio *Tamedia Building* en Zúrich. Fuente: <https://cutt.ly/QmuFfs5>



Fig. 63. Fase de estructura durante la construcción del edificio *Office Perspective* en Burdeos, Francia. Fuente: <https://cutt.ly/cmuGqBp>

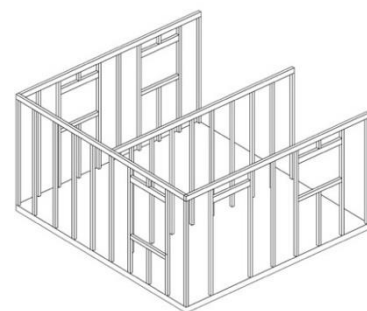


Fig. 64. Esquema del sistema de estructura ligera. Fuente: Elaboración propia.

2.2. ENTRAMADO LIGERO

Se denomina estructura ligera (*light frame*) al conjunto de elementos lineales de madera de pequeña escuadría (muy esbeltas y delgadas) separados a una escasa distancia (generalmente entre 40 y 60 mm) y, por lo general, arriostrados mediante plataformas. El sistema funciona como una estructura espacial formada por la unión de las estructuras de muro, forjado y cubierta. Por lo general, las uniones suelen ser sencillas, empleando, principalmente elementos de tipo clavija metálica.

El modelo es típico en Norteamérica, también abunda en Centroeuropa y los países nórdicos y desde la antigüedad, sus principales usos, primero del sistema de globo y posteriormente del de plataformas, han sido las viviendas unifamiliares de una o dos plantas. Sin embargo, hoy encontramos su aplicación en construcciones de varias plantas, como es el caso del campamento minero Pérez Caldera – Los Bronces (Fig. 65); un complejo de más de 40.000 m² construidos, formado por ocho edificios de seis alturas y emplazado en una zona sísmica, en Chile. A pesar de la ligereza y sencillez de construcción, que hace desconfiar de la estabilidad y confortabilidad aportada por el sistema, el entramado ligero ha demostrado su capacidad y aptitud para las estructuras en altura. Esto se explica por el funcionamiento tridimensional del entramado, donde elementos muy livianos soportan cargas elevadas a base de repartirlas y arriostrar adecuadamente los elementos. El funcionamiento de estas estructuras como bloque, pero con cierta flexibilidad a las deformaciones, la hace ser una estructura adecuada frente al sismo siempre que la cimentación (Fig. 66) permita una cierta independencia de la estructura.

2.3. MADERA EN MASA (CLT)

La construcción en masa de madera, *mass timber* en inglés, es uno de los sistemas constructivos de más reciente



Fig. 65. Construcción del Campamento minero Pérez Caldera – Los Bronces, en Chile (2018). Fuente: <https://asap.cl/soluciones/nuevo-campamentot-los-bronces/>



Fig. 66. Cimentación del Campamento minero Pérez Caldera, en Chile. Fuente: <https://asap.cl/soluciones/nuevo-campamentot-los-bronces/>

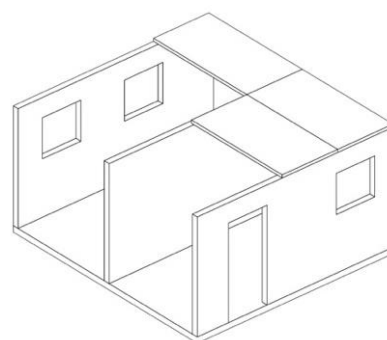


Fig. 67. Esquema del sistema estructural de paneles CLT. Fuente: elaboración propia.

desarrollo. Frente a los sistemas de entramados o estructuras lineales tradicionales, el sistema sólido o en masa configura modelos estructurales de tipo superficial. Perteneciente a este grupo, la madera laminada cruzada (CLT) es probablemente el material de referencia para las construcciones de la actualidad. Esto se debe a que aporta una resistencia equiparable a aquella de las estructuras de hormigón armado o de acero y permite la construcción de edificios de gran altura. Además, si este sistema está en auge en la actualidad, se debe en gran parte en las ventajas asociadas a su construcción en comparación con el resto de los materiales. Entre ellas, para las construcciones de más de cuatro plantas destaca su alto nivel de prefabricación, el menor tiempo de montaje, sus propiedades como aislante térmico y acústico, su excelente comportamiento al fuego y los beneficios asociados a una obra en seco además de evitar las molestias asociadas al ruido y polvo.

El panel macizo de CLT actúa como elemento estructural que configura la fachada, particiones interiores, forjados y cubiertas, haciendo del edificio una verdadera estructura de traba. El trabajo conjunto de todos los paneles o elementos que configuran el sistema ofrece el arriostramiento necesario para garantizar la estabilidad de la construcción, obteniendo como resultado una construcción monolítica (Fig. 68). De esta forma, hoy se encuentran múltiples construcciones con este sistema, como el icónico *Stadthaus* (Fig. 69), en Londres. En España y sus países vecinos, ya se localizan diversas construcciones de madera que optan por este sistema en masa, algunas de las cuales se explican con más detalle en el estudio de casos del capítulo correspondiente.

2.4. SISTEMAS COMBINADOS

El sistema combinado, como su propio nombre indica, engloba aquellos edificios en los que se combinan diferentes sistemas estructurales. Esto es, se puede encontrar en una misma construcción sistemas de poste y viga, paneles de madera maciza o incluso, aunque no se pueda aportar ningún ejemplo, es posible que se incluya en esta categoría también el entramado ligero. En los edificios analizados para



Fig. 68. Fotomontaje en 3D de la estructura del edificio The Stadthaus construido en Londres. Fuente: <https://cutt.ly/Hmu9Gf1>



Fig. 69. Estructura del edificio OSH (*Our Shelves House*), Madrid. Fuente: Jesús Granada en <https://n9.cl/getox>

este documento y clasificados como sistema combinado se localizan pilares, vigas y paneles de madera en masa que trabajan de forma solidaria. Dentro de esta clasificación se podría incorporar aquellos edificios no convencionales que no responden necesariamente a un modelo ya establecido, sino que tratan de aportar formas y composiciones novedosas, como por ejemplo el edificio OSH (*Our Shelves House*) que se muestra en la imagen (Fig. 69).

2.5. SISTEMAS MIXTOS

Por último, las estructuras mixtas se refieren a los sistemas híbridos de madera en combinación con otros materiales estructurales, como son el acero o el hormigón armado. Dadas las necesidades propias de cada proyecto y, para un mejor funcionamiento de la estructura, se aprovechan las propiedades intrínsecas de cada material. Con frecuencia, el empleo del acero y del hormigón armado se suele aplicar en la estructura general, como pilares, vigas (Fig. 70) o forjados, siendo los encargados de resistir esfuerzos tanto verticales como horizontales. De otro modo, estos elementos pueden ser a su vez combinaciones mixtas, como por ejemplo los forjados mixtos de madera y acero u hormigón armado. Como dato a resaltar, con frecuencia se presentan edificios con la planta baja y/o el núcleo de comunicación vertical de hormigón armado, como se aprecia en la fotografía de la estructura del edificio de 85 viviendas (Fig. 71) construido en 2020 en Cornellá, Barcelona.



Fig. 70. Interior de la torre Hoho en Viena. Fuente: <https://cutt.ly/JmzMLai>



Fig. 71. Fase de construcción del edificio de 85 viviendas en Cornellá, Barcelona. Fuente: <https://cutt.ly/gmoYcmU>

PÁGINA INTENCIONADAMENTE EN BLANCO

3. PRODUCTOS DE MADERA ESTRUCTURAL

La construcción en altura con estructuras de madera se produce como resultado de la capacidad de mecanizar e industrializar las piezas de madera, de la posibilidad de montar rápidamente los edificios y reducir drásticamente los tiempos de construcción, fiabilidad y control, además de la mejora de los adhesivos y elementos de unión, así como el desarrollo de nuevos productos de ingeniería de la madera.

Las ventajas asociadas al empleo de la madera como material de construcción son bien conocidas: tiene una apariencia y belleza natural atractiva, es un buen aislante térmico, si se trata correctamente tiene una larga vida útil, su relación resistencia/peso es alta, es fácil de trabajar, resiste al fuego durante un periodo de tiempo relativamente largo, es considerado un material con baja huella ecológica y finalmente, puede ser reutilizada o reciclada. No obstante, a pesar de todas sus virtudes también existen ciertas desventajas en el uso de este material “vivo”, entre las cuales cabe destacar su sensibilidad a la exposición a la humedad, la presencia de singularidades naturales tales como nudos, fibras en espiral o variaciones de densidad y su baja resistencia perpendicular a la dirección de las fibras, al tratarse de un material anisótropo.

Los productos estructurales de madera se definen como piezas de madera que han sido clasificadas estructuralmente, siguiendo normativas de clasificación visual o mecánica, y de las que se conocen sus propiedades mecánicas y su densidad.

Los productos estructurales se pueden clasificar en dos grandes grupos: productos de madera maciza y productos de ingeniería de la madera (*EWP*, del inglés *Engineered Wood Products*).

Los principales productos de madera maciza son: i) rollizos; ii) madera cilindrada, que son los rollizos cilindrados a un diámetro constante en toda su longitud; y iii) madera maciza o aserrada, que son piezas sección rectangular cortadas a partir del tronco del árbol.

Con el fin de evitar algunos de los problemas asociados a la madera maciza, como son las longitudes y secciones máximas que se pueden obtener en función del tamaño del tronco, y

que limitan su aplicación en las construcciones en altura de madera, a lo largo de los años se han desarrollado diferentes EWP. La mayoría de estos productos tienen en común el enfoque de su producción: cortar la madera maciza en piezas de menor dimensión como tablas, láminas, fibras o partículas para volver a unir las posteriormente mediante encolado y presión, a veces a temperaturas elevadas, o mediante conexiones mecánicas.

Los EWP se pueden clasificar en función del material de origen con que se componen, así se puede diferenciar entre EWP fabricados a partir de: i) tablas de madera maciza, ii) chapas de madera, iii) fibras y partículas, y iv) virutas. La Tabla 1 muestra los diferentes EWP según esta clasificación, así como la norma que regula la determinación de las propiedades de resistencia, rigidez y densidad a declarar en la DoP (Declaración del Rendimiento, del inglés *Declaration of Performance*).

Tabla 1. Productos de ingeniería de madera (EWP) y normas de referencia.

Categoría	Producto	Norma
Madera sólida	Madera aserrada de coníferas y frondosas (ST, <i>structural timber</i>)	EN 14081-2, EN 1912
	Madera estructural con uniones <i>dentadas</i> (FST, <i>structural finger jointed timber</i>)	EN 15497
	Madera sólida encolada (dúos o tríos) (GLT, <i>glued laminated timber</i>)	EN 14080
Productos laminados a partir de madera sólida o tablas de madera	Madera laminada encolada de coníferas (GLT-c, <i>Glued laminated timber-coniferous</i>)	EN 14080
	Madera laminada encolada de frondosas (GLT-d, <i>Glued laminated timber-deciduous</i>)	EAD 130320-00-0304 ²
	Madera contralaminada (CLT, <i>Cross-Laminated Timber</i>)	EN 16351 ¹ y EAD 130005-00-0304 ²
Productos laminados a partir de láminas de madera	Madera microlaminada (LVL, <i>Laminated Veneer Lumber</i>)	EN 14374
	Madera microlaminada encolada (GLVL, <i>Glued LVL</i>)	EAD 130337-00-0304 y EAD 130010-01-0304
	Paneles de contrachapado (PLY, <i>Plywood</i>)	EN 13986, EN 1072 y EN 636
Productos de madera a partir de virutas	Paneles de virutas orientadas (OSB, <i>Oriented Strand Board</i>)	EN 13986, EN 12369-1 y EN 300
	Productos de virutas paralelas (LSL, <i>Laminated strand lumber</i>)	EAD 130308-00-0304
Productos de madera a partir de fibras y partículas	Tableros de fibras de densidad alta (HB, <i>hard fiberboard</i>), media (MB, <i>medium fiberboard</i>) y baja (SB, <i>softboard</i>)	EN 622-2, EN 622-3, EN 622-4, EN 312 y EN 12369-1
	Tableros de partículas con adhesivos en base a resina (RPB, <i>Resinoid-bonded particle board</i>) y en base a cemento (CPB, <i>Cement-bonded particle board</i>).	EN 13986, EN 312 Y EN 634-2

¹ Norma relativa a los requisitos de fabricación.

² Norma relativa a la declaración de propiedades.

EAD: European Assessment Document.

Estos materiales reconstituidos son generalmente más homogéneos que la madera maciza, pues sus propiedades de rigidez y resistencia no varían tanto como en el material de partida debido a la clasificación previa de las tablas o láminas que los componen. Estos procesos han evolucionado mucho en los últimos tiempos y han logrado, gracias a la tecnología, llevar al mercado productos técnicamente competitivos con otros materiales como el acero y el hormigón, además de aportar grandes beneficios medioambientales. Los adhesivos utilizados tanto para unir las láminas como para las uniones dentadas de los productos de madera laminada deben cumplir con los requisitos estructurales de encolado de madera en cuanto a tipo de adhesivo y tiempo y presión del encolado. Los adhesivos estructurales permitidos por las normas de referencia normalmente pertenecen a una de las tres siguientes familias: i) fenólicos y aminoplásticos; ii) poliuretano monocomponente de curado en húmedo; o iii) isocianato o polímeros en emulsión.

Además de la variedad de productos de ingeniería de madera (Tabla 1), cada vez son más las propuestas innovadoras que desarrollan nuevos productos de madera con aplicación en estructuras, como por ejemplo los compuestos madera-hormigón (TCC, *Timber-Concrete Composites*), los paneles de madera-madera (TTP, *Timber-to-timber panels*) o los paneles celulares ecológicos (ETC, *EcoTimberCell*).

Debido a sus capacidades técnicas, rentabilidad y propiedades medioambientales, a lo largo de las últimas épocas ha crecido el interés en estos productos y sistemas de construcción. Sin duda, el producto que ha recibido mayor atención en los últimos años es el CLT.

3.1. MADERA LAMINADA ENCOLADA (GLT)

La aplicación de GLT es muy amplia y se puede incorporar a prácticamente todos los sistemas constructivos. A pesar de que se han mejorado las propiedades de los adhesivos que unen las láminas de madera, la esencia del sistema coincide con la propuesta planteada por Otto Hetzer a comienzos del siglo XX. Al igual que en sus primeras patentes, se compone de al menos tres capas de madera encoladas bajo presión en dirección de la fibra para crear elementos estructurales estables de grandes dimensiones.

La madera laminada encolada se fabrica a partir del encolado de tablas de madera maciza clasificadas estructuralmente en la que se ha eliminado parte de las singularidades intrínsecas al crecimiento de los árboles. La mejora de sus prestaciones hace de la madera laminada encolada un material estructural perfecto tanto para pilares y vigas de dimensiones convencionales como para grandes longitudes. Si bien la dimensión del tronco del árbol fue durante siglos un limitante importante en su aplicación como elemento estructural, gracias a la incorporación de este producto de ingeniería, apenas se encuentran restricciones en su empleo para salvar grandes luces. Además, la madera laminada encolada permite una mayor

variedad de formas, permitiendo la posibilidad de crear piezas curvas. En particular, es especialmente adecuado para las estructuras de grandes luces, formas curvilíneas personalizadas y combina bien con sistemas híbridos (WoodWorks & Wood, 2021, p. 19). Más allá de su competitivo uso para salvar grandes luces, el *GLT* se presenta como el primer producto de madera estructural utilizado para las construcciones en altura. El edificio *Tamedia Office Building*, construido en el corazón de Zúrich en 2013, aplica el *GLT* para levantar una estructura de 7 plantas y ofrecer una propuesta innovadora en el diseño de sus secciones y uniones (Fig. 73).



Fig. 72. Prensado vertical de GLT en las instalaciones de Cesefor. Fuente: Cesefor.



Fig. 73. Tamedia Office Building, Zurich. Fuente: Cesefor.



Fig. 74. Fotografía interior de la estructura de GLT de frondosa en el Museo de Arte Contemporáneo Americano. Fuente: equipo de ingenieros estructurales en madera de Oak Ingeniería.



Fig. 75. Fotografía exterior de la estructura de GLT de frondosa en el Museo de Arte Contemporáneo Americano. Fuente: equipo de ingenieros estructurales en madera de Oak Ingeniería.

La norma europea actual que define los requisitos de fabricación y determina los ensayos experimentales para determinar sus propiedades físicas y mecánicas es la EN 14080. Esta norma aplica a madera de coníferas y la certificación estructural de GLT de madera de frondosas debe realizarse a través de EADs. Las tablas o láminas de madera se clasifican en clases de resistencia mediante una clasificación visual o por máquina (ver capítulo 3. Limitaciones) y se cepillan previo al encolado. El espesor de las láminas varía entre 6 y 45 mm, consiguiendo grandes longitudes gracias a las uniones dentadas encoladas (*finger-joint*) entre las testas de las tablas. Se puede usar tanto madera natural como madera tratada o modificada químicamente frente al ataque de agentes bióticos (FSC, 2018, p. 134). Las clases resistentes de la GLT recogidas en la norma EN 14080 varían entre GL20 y GL32, pudiendo tratarse de elementos homogéneos (h) cuando se conforman por láminas de madera sólida de la misma clase resistente, o elementos combinados (c) cuando los elementos están

compuestos por madera de clases resistentes más altas en las láminas exteriores y clases resistentes menores en las láminas internas.

La Tabla 2 presenta algunos de los productos de GLT fabricados en Francia, España y Portugal.

Tabla 2. Empresas fabricantes de GLT.

PAÍS	EMPRESA	ESPECIE	Recto/ curvo	C.R.	Clase servicio	Long. max. (m)	Ancho máx. (mm)	Canto máx. (mm)	
ESPAÑA	EGOIN www.egoin.com	Pino Radiata (<i>Pinus radiata</i>)	Recto	GL24h	1, 2 y 3 ¹				
		Alerce (<i>Larix decidua</i>)	Recto	GL24h	1, 2 y 3				
		Picea (<i>Picea abies</i>)	Recto y curvo	GL28h y GL22h	1 y 2				
	GÁMIZ	Roble ¹ (<i>Quercus robur</i>)		² f _{m,g,k} =33 N/mm ²		12	50- 300	80-400	
	YOFRA		Pino silvestre (<i>Pinus sylvestris</i>)	Recto y curvo	GL28h GL24h	1 y 2	40	80- 240	120- 2400
			Abeto Douglas (<i>Douglas fir</i>)	Recto y curvo	GL24h	1 y 2			
			Abeto blanco (<i>Abies alba</i>)	Recto y curvo	GL28h GL24h	1 y 2			
			Pino Radiata (<i>Pinus Radiata</i>)	Recto y curvo	GL24h	1 y 2			
	SIEROLAM www.sierolam.com	Castaño (<i>Castanea sativa Mill.</i>)			³ f _{m,g,k} =30 N/mm ² f _{t,0,g,k} =20 N/mm ² f _{c,0,g,k} =45 N/mm ² f _{v,g,k} =5 N/mm ² E _{0,g,mean} =13.000 N/mm ² G _{g,mean} =810 N/mm ² ρ _{g,k} =540 kg/m ³	1 y 2	13.5	50- 220	80-400
	PORTUGAL	CARMO www.carmo.es	Pino Silvestre (<i>Pinus sylvestris</i>)		GL24h	1, 2 y 3	13.5	80- 200	160- 320
FRANCIA	SIMONIN www.simonin.com	Picea (<i>Picea abies</i>)		GL24h, GL28h	*		80- 240	100- 1280	
		Alerce (<i>Larix decidua</i>)		GL24h	*		115- 210	55- 1245	
		Pino Termotratado		GL24h	*		90- 210	55- 1240	
	COSYLVA		Picea (<i>Picea abies</i>)	Recto y curvo	GL28h GL24h	1, 2	50	60- 220	80- 2200
			Abeto Douglas (<i>Douglas fir</i>)	Recto y curvo	GL28h GL24h	1, 2 y 3	50	60- 220	80- 2200
	Arbonis		Picea (<i>Picea abies</i>)		GL28h GL24h	1, 2 y 3			
			Abeto Douglas (<i>Douglas fir</i>)		GL28h GL24h	1, 2 y 3			
			Alerce (<i>Larix decidua</i>)		GL28h GL24h	1, 2 y 3			
	Monnet-seve		Picea (<i>Picea abies</i>)		GL24h GL28h	1 y 2	40	180-	

	Abeto Douglas (<i>Douglas fir</i>)		GL20h GL24h GL28h	1 y 2	40		180-
Charpentres Fournier	Picea (<i>Picea abies</i>)	Recto y Curvo	GL28h				52- 210
	Pino silvestre (<i>Pinus sylvestris</i>)	Recto y Curvo	GL28h				52- 210
PIVETEAU	Abeto Douglas (<i>Douglas fir</i>)		GL24h y GL28h	1, 2 y 3	13		80- 200
	Pino		GL24h y GL28h	1, 2, 3 y 4	13		80- 200
	Picea (<i>Picea abies</i>)		GL24h	1, 2 y 3.1	13		38- 240
Dubot	Picea (<i>Picea abies</i>)	Recto	GL24h		16		100- 240
	Abeto Douglas (<i>Douglas fir</i>)	Recto	GL24h		16		280- 640

¹Declaración de producto estructural según ETA-13/0642 por parte del *Deutsches Institut für Bautechnik*, con control externo de calidad por el *Otto Graf Institute*.

²Declaración del valor característico de resistencia a flexión.

³Declaración de los valores característicos de la resistencia a flexión, tracción y compresión paralela a la fibra y cortante. Declaración de los valores medios del módulo de elasticidad y de corte paralelo a la fibra. Declaración del valor característico de la densidad. Las propiedades que aparecen en la tabla son las declaradas en las páginas web de los fabricantes.

3.2. MADERA CONTRALAMINADA (CLT)

La madera contralaminada es un producto relativamente reciente que ha revolucionado el mundo de la construcción con madera. Los orígenes de este producto se atribuyen a las actividades de investigación asociadas a una tesis doctoral realizada en la Universidad de Graz (Austria) en torno al año 1990. Sin embargo, existen referencias respecto al uso de la madera de chopo en la fabricación de este tipo de productos en España hacia los años 60 del siglo pasado (Galván, 2017, p. 95). Concretamente en 1959, el Ingeniero de Montes Don Fernando Nájera y Ángulo, cita en una conferencia la madera contralaminada de chopo. Ya incluso unos años antes, alrededor de 1947, el ingeniero francés Pierre Gauthier lanza su propia propuesta sobre el sistema; propuesta que cayó en el olvido hasta su recuperación en la década de los 90.

El CLT constituye un elemento estructural en forma de placa que se compone generalmente de un número impar de capas o láminas de madera (generalmente tres, cinco o siete) dispuestas de forma ortogonal entre sí (Fig. 76), confiriendo una excelente rigidez estructural en ambas direcciones. Las dimensiones habituales de los paneles CLT son de aproximadamente 3 m de anchura, espesores que varían entre los 90 y los 400 mm y longitudes de 12 m, pero que pueden ser mucho mayores dependiendo de la prensa del fabricante y de las limitantes de transporte. Las grandes dimensiones y versátil aplicabilidad abren nuevos mercados para la ingeniería de la madera que hoy se presentan como una alternativa de alto valor frente a otros materiales de construcción como son el acero y el hormigón armado y son usados habitualmente en sistemas estructurales denominados “*mass timber*”, o combinados con el sistema estructural en madera “*post and beam*” o en sistemas mixtos con otros materiales, como son el acero y el hormigón. Por lo general, en sistemas

mixtos de madera y hormigón, este último constituye la planta baja y los núcleos de comunicación verticales, como caja de ascensor o hueco de escaleras, aunque los paneles CLT pueden también conformar el núcleo de comunicación, como el ejemplo mostrado en la imagen (Fig. 77) del edificio de la Borda, España.



Fig. 76. Imagen de CLT. Fuente: (Van de Kulien, et al., 2011, p. 1623).



Fig. 77. Núcleo de escaleras del edificio La Borda, en Barcelona. Fuente: fotografía cedida por el equipo de arquitectos Lacol.



Fig. 78. Fotografía de la estructura del edificio Carbon 12, Portland. Fuente: <https://n9.cl/8p1nr>. (Ministerio de transportes, movilidad y agenda urbana. Gobierno de España, 2021).

Como material estructural, destaca por su capacidad de carga en dos direcciones, mayor capacidad de corte en el plano de los elementos y la disminución de los efectos de contracción e hinchazón en el plano como resultado de variaciones de humedad. El CLT tiene también la ventaja de su “alto nivel de prefabricación donde las aberturas para puertas y ventanas ya se pueden incluir en la fábrica, la fácil fijación de los elementos en el sitio y un bajo peso en comparación con el hormigón de uso tradicional” (WoodWorks & Wood, 2021, p. 16). Además, dada su naturaleza prefabricada, se permite una alta precisión, una terminación más rápida, una mayor seguridad y menos generación de residuos en obra.

La norma que define los requisitos de fabricación y los ensayos experimentales para la determinación de las propiedades físicas y mecánicas es la EN 16351. Al contrario que en el caso del GLT, no se definen clases resistentes específicas para estos productos, sino que, para el cálculo estructural, se utilizan las propiedades estructurales de las tablas de madera que conforman las láminas. El código de diseño estructural con madera actual, Eurocódigo 5, no incluye el dimensionado de estos paneles, aunque sí se contempla un capítulo específico en el nuevo borrador de norma (prEN 1995-1-1). La certificación estructural de CLT debe

realizarse a través de EADs. Los fabricantes normalmente utilizan tablas de clases resistentes mayores en las capas longitudinales (más comúnmente C24) y tablas de clases resistentes menores en las capas transversales (clases C16 o C14 normalmente) debido a que el método de cálculo más comúnmente empleado (método Gamma) considera las capas transversales como simples conectores entre las longitudinales cuando los paneles son usados como elementos horizontales. Así, mientras todas las propiedades de las capas longitudinales afectan al dimensionado estructural, en sólo las propiedades de resistencia a cortante por rodadura y módulo de corte de en el cálculo de las capas transversales afectan al dimensionado.

En la última década, su empleo en construcción, y más concretamente en las edificaciones en altura, el CLT ha alcanzado una aceptación cada vez mayor. Se asocia a este material el cambio en la mayor parte del uso de la madera estructural en la Europa del último siglo, en el cual se produce el salto de su empleo en la construcción de una y dos plantas a las edificaciones en altura.

Uno de los primeros edificios en emplear este sistema es el Carbon 12 (Estados Unidos), una construcción (Fig. 78) de 29 m de altura levantada en 2018. Actualmente son ya muchos los edificios que escogen este material estructural para las construcciones en altura, cuyo sistema aparece con frecuencia combinado con otros productos (generalmente GLT). Un ejemplo se encuentra en la estructura del edificio de 53 m de altura de *Brock Commons Student Hall*, en Vancouver.

La Tabla 3 presenta la relación de empresas fabricantes de CLT en España, Francia y Portugal.

Tabla 3. Empresas fabricantes de CLT.

PAÍS	EMPRESA	ESPECIE	C.R.	Long. max. (m)	Espesores (mm)	Nº capas
ESPAÑA	EGOIN www.egoin.com	Pino Radiata (<i>Pinus radiata</i>)	C24 y C18	12	75-400	3, 5, 7 y 9
		Picea (<i>Picea abies</i>)	C24 y C18	12	75-400	3, 5, 7 y 9
	XILONOR https://xilonor.es	Pino Radiata (<i>Pinus radiata</i>)	C24	12	60-320	3, 5, 7 y 8
	FUSTES SEBASTIÁ https://www.sebastia.eu/	Pino rojo (<i>Pinus sylvestris</i>) Abeto de los Pirineos (<i>Picea abies</i>)	C18	14	60-245	3, 5 y 7
FRANCIA	PIVETEAU www.piveteaubois.com	Douglas (<i>Douglas fir</i>)	C24 y C18	16	60-360	3, 5, 7, 8 y 9
		Pino	C24 y C18	16	60-360	3, 5, 7, 8 y 9
		Picea (<i>Picea Abies</i>)	C24 y C18	16	60-360	3, 5, 7, 8 y 9

Las propiedades que aparecen en la tabla son las declaradas en las páginas web de los fabricantes.

3.3. MADERA MICROLAMINADA (LVL)

La madera microlaminada o LVL (Fig. 79) se define como un producto fabricado a partir del encolado y prensado de chapas de madera de un espesor aproximado de 3 mm. Las chapas se obtienen de corte o del de bobinado de trozas de árboles, que se secan y clasifican

estructuralmente previo a la fabricación del producto final. Los elementos que se pueden obtener a partir de la madera microlaminada son principalmente vigas, pilares, y paneles, con espesores habituales que varían entre 27 y 90 mm y cantos entre 200 y 600 mm. Este material tiene su origen en el siglo XX y responde a la tendencia de la madera laminada encolada por homogeneizar las propiedades y conseguir mayores dimensiones en los productos de madera.

La norma que recoge los requisitos de fabricación y tipos de ensayos para la determinación de sus propiedades estructurales es la EN 14374, que no contempla unas clases resistentes específicas para estos productos, sino que indica que el fabricante debe declarar los valores característicos de sus propiedades físicas y mecánicas.

Su aplicación es muy variada, desde mobiliarios y puentes hasta su empleo en construcción en sistemas de refuerzo, cerramiento, tableros o vigas, entre otros. Es un producto sofisticado con unas características técnicas y propiedades mecánicas muy superiores a las de la madera aserrada, en calidad, estabilidad, precisión de dimensiones y rectitud. Un ejemplo con su aplicación en forjados se encuentra en el edificio Mjøstårnet (Fig. 80), actualmente la construcción de madera más alta del mundo (85,4 m). La estructura de la torre combina CLT, madera laminada, madera microlaminada y madera aserrada, concretamente estas tres últimas para la configuración de los forjados que llegan a la obra en tramos prefabricados en taller (Fig. 81).



Fig. 79. Madera microlaminada (LVL). Fuente: <https://cutt.ly/7muxSY2>



Fig. 80. Fotografía del forjado durante la construcción de la Torre Mjøstårnet, Noruega. Fuente: <https://cutt.ly/fmyKyuc>



Fig. 81. Fotografía del forjado en taller de la Torre Mjøstårnet, Noruega. Fuente: <https://cutt.ly/fmyKyuc>

3.4. TABLEROS CONTRACHAPADOS (PLY)

Los tableros contrachapados (*Plywood*), son un tipo de producto de ingeniería de madera, que al igual que el LVL, son fabricados a partir de chapas de madera. La principal diferencia con el LVL es que en el caso del contrachapado las chapas se encolan de forma alternada en un número impar, de modo que la orientación de la fibra de una chapa siempre sea perpendicular a la orientación de la fibra de la chapa contigua. Esto permite que el producto tenga un comportamiento adecuado en dos direcciones, siendo entonces su uso adecuado para elementos superficiales.

El uso de estos paneles está generalmente asociado a la ejecución de muros de corte en entramados ligero, pero últimamente, de forma progresiva han perdido protagonismo frente al OSB, principalmente debido al menor precio que presenta este último. El uso del *plywood* en la actualidad suele estar asociado a aplicaciones donde se requiere una mejor calidad visual.

La clasificación más habitual de estos paneles refiere a su uso, y en función de este se definen tres tipos de paneles diferentes: Tipo 1, Tipo 2 y Tipo 3. El Tipo 1 está especialmente indicado para ser utilizado en ambientes interiores, que se correspondan con la clase de servicio 1; el Tipo 2 está especialmente indicado para ser utilizado en ambientes húmedos, que se correspondan con la clase de servicio 2; y el Tipo 3 está especialmente indicado para ser utilizado en ambientes exteriores, que se correspondan con la clase de servicio 3.

El proceso de fabricación consta una etapa de prensado en caliente en el que se utilizan adhesivos termoestables, que puedan resistir este tipo de prensado, y que dependen del tipo de tablero a fabricar. Para tableros Tipo 1 se utiliza una resina de urea-formaldehído, mientras que para el Tipo 2 y Tipo 3 se utilizan adhesivos fenólicos.

Las medidas estándar son de 1,22 x 2,44 m² de superficie y los espesores varían habitualmente entre 3 y 36 mm. En función del espesor del panel se define la cantidad de láminas necesarias para conformar el producto.

Los valores característicos de las propiedades mecánicas de los tableros contrachapados deben ser aportados por el fabricante de acuerdo con la normativa de ensayo UNE-EN 789:2006 y la UNE-EN 1058:2010.



Fig. 82. Tablero PLY. Fuente: <https://n9.cl/2tbvb>



Fig. 83. Aplicación del tablero PLY. Fuente: <https://n9.cl/a31n>

3.5. MADERA LAMINADA DE VIRUTAS (LSL) Y MADERA DE CHAPAS PARALELAS (PSL)

La denominación madera laminada reconstruida a base de virutas de madera (Fig. 84) o LSL (*Laminated Strand Lumber*) engloba los productos que se fabrican a partir de virutas secas y encoladas con una relación longitud/espesor de viruta de aproximadamente 150, dispuestas de forma ordenada y paralelas al eje longitudinal de la pieza. El origen del LSL se atribuye a su incorporación en la década de los 90 en Canadá, siendo empleado actualmente también en Europa. Al igual que la madera de fibras paralelas (PSL), formada por virutas de madera con una relación longitud/espesor aproximadamente igual a 70, y la madera de virutas orientadas (OSL, *Oriented Strand Lumber*), con una relación de longitud/espesor de viruta aproximadamente igual a 75, el LSL forma parte de la familia de productos de madera de ingeniería llamada “Madera compuesta estructural” o SCL (*Structural Composite Lumber*) y es uno de los más recientes productos derivados de la madera cuyo uso se ha generalizado, pudiendo emplearse allí donde admita la madera laminada encolada. No existe actualmente una norma europea armonizada de fabricación y ensayo del LSL y del PSL, sino que la certificación estructural se rige por la EAD 130308-00-0304.



Fig. 84. Madera de virutas (LSL) Fuente: <https://cutt.ly/7muxSY2>



Fig. 85. Montantes LSL como estructura de un sistema de entramado ligero. Fuente: <https://cutt.ly/wmug3z5>



Fig. 86. Fotografía de una obra durante la fase de estructura, empleando montantes del producto estructural LSL. Fuente: <https://woodify.es/producto/lignumstrand-lsl/>

LSL aporta una densidad homogénea que proporciona ventajas como alta resistencia, rigidez y en estabilidad. Estéticamente es un material atractivo, por lo que su empleo parece adecuado a requisitos de apariencia. Además de su posible empleo en carpintería y marcos de ventana, se utiliza como armazón estructural, generalmente como vigas de luces medias, en armaduras de cubierta, como columnas, como montantes (Fig. 85) o como elementos estructurales de dimensiones intermedias y grandes, tanto en edificaciones de uso comercial como en viviendas (Fig. 86). No obstante, su uso no se limita a solo estas aplicaciones, ya que puede formar parte como componente de cerchas, sustituir puntuales capas de madera en la

construcción de CLT, utilizarse como alas en las viguetas doble T o también incluso de alma en aquellas atribuidas a encofrados y andamios, o como barras en estructuras espaciales.

La madera de fibras paralelas (Fig. 87) o PSL (*Parallel Strand Lumber*) es una variante del LSL, diferenciándose de este en que las chapas utilizadas son más finas y estrechas y largas. Generalmente, el PSL se compone de fibras de unos 16 mm de anchura y 3,2 mm de espesor. Los filamentos largos de madera se alinean en paralelo al eje longitudinal de la pieza y posteriormente se encolan con adhesivos estructurales, generalmente resina de fenol-formaldehído impermeable. Después, se encolan entre ellas para formar tableros que se cortan en forma de vigas, con anchuras de hasta 180 mm y cantos de hasta 50 mm, aproximadamente.



Fig. 87. Madera de chapas paralelas PSL de abeto fabricada en Canadá. Fuente: <https://cutt.ly/ymuxCOT>



Fig. 88. Fotografía de PSL. Fuente: <https://www.naturallywood.com/products/parallel-strand-lumber/>



Fig. 89. Pilares PSL. Fuente: <https://www.naturallywood.com/products/parallel-strand-lumber/>

Las propiedades de la madera de chapas paralelas son muy similares a las de la madera laminada encolada, y es por ello por lo que se puede emplear allí donde se permita el uso del GLT, con la excepción de que se especifique lo contrario en la certificación. Presenta unas ventajas respecto a ella: su gran resistencia a flexión, a compresión y a los esfuerzos cortantes. Al igual que la mayoría de los productos de madera estructural, se presta a la prefabricación. Además, los beneficios ecológicos del uso eficiente de las fibras de madera para su fabricación lo convierten en una alternativa atractiva como material estructural.

El PSL se aplica como armazón estructural para construcciones comerciales, residenciales e industriales. Especialmente se aplica en vigas (Fig. 88) y soportes (Fig. 89) que requieren una elevada resistencia a flexión, dado su buen comportamiento para resistir este esfuerzo. Es un producto de reciente incorporación, motivo por el cual no aparece con frecuencia en las construcciones en altura. No obstante, es perfectamente adecuado para su empleo estructural, además de que tiene un comportamiento al fuego similar al de una madera aserrada sólida o una viga laminada encolada de tamaño comparable.

La Tabla 4 presenta los productos LSL/PSL fabricados en España, Francia y Portugal.

Tabla 4. Empresas fabricantes de LSL/PSL

PRODUCTO	PAÍS	EMPRESA	ESPECIE	TIPO	Propiedades mecánicas	Clase servicio	Long. max. (m)	Ancho máx. (mm)	Canto máx. (mm)
LSL	ESPAÑA	TABSAL https://tabsal.com/	Chopo (<i>Populus sp.</i>)	VIGA	² E 10,7 (f _{m,k} =35 MPa) y E 9,5 (f _{m,k} =27,3 MPa)	1 y 2	8,2	30-100	620
				PANEL	³ E 10,7 (f _{m,k} =39,6 MPa) y E 9,5F (f _{m,k} =34,4 MPa)			620	

¹Declaración de producto estructural según ETA 19/0456; EAD No 130308-00-0304 "composite lumber product: laminated strand lumber (LSL)", con control externo de calidad por parte de TECNALIA.

²Declaración del valor característico de resistencia a flexión para el producto "LIGNUMSTRAND" trabajando de canto como elemento viga.

³Declaración del valor característico de resistencia a flexión para el producto "LIGNUMSTRAND" trabajando como elemento tablero o panel.

Las propiedades que aparecen en la tabla son las declaradas en las páginas web de los fabricantes.

3.6. OTROS EWPs

3.6.1. Madera laminada clavada (NLT)

La madera laminada clavada o NLT (*Nail Laminated Timber*), se obtiene a partir de tablones acoplados por sus caras y apoyados en su canto, uniéndolos entre sí mediante clavos en obra o bien previamente en taller (Fig. 91).



Fig. 90. Madera laminada clavada (NLT). Fuente: Mass Timber Manual, 2021.



Fig. 91. Madera laminada con pasadores (DLT). Fuente: Mass Timber Manual, 2021.

3.6.2. Madera laminada con pasadores (DLT)

La madera laminada con pasadores o DLT (*Dowel Laminated Timber*) es un producto de madera en masa creado de forma similar al anterior, pero uniendo los tablonces con pasadores de madera dura. Es el único producto de madera maciza sin clavijas metálicas ni adhesivos (Fig. 91).

3.6.3. Compuestos madera hormigón (TCC)

El nuevo borrador de proyecto del Eurocódigo 5 incluye a los compuestos madera hormigón (TCC por sus siglas en inglés *Timber-concrete composites*), y que serán regulados por la especificación técnica CEN/TS 19103 (todavía en fase de proyecto). Estos elementos combinan la rigidez y resistencia del hormigón a compresión con la ductilidad, resistencia y ligereza de la madera.

Se utilizan elementos de madera trabajando en tracción y el hormigón en compresión. Estos elementos pueden ser vigas (GLT, LVL, etc.) en conjunto con un panel que sirve como encofrado perdido o CLT, que trabajan en forma solidaria con el hormigón mediante el uso de conectores de corte (pasadores metálicos, resinas epoxi, mecanizados en la madera). Estos compuestos pueden ser fabricados *in situ* (previo montaje de las vigas y luego colado el hormigón) o también existe la opción de la prefabricación y construcción en seco.

Su uso se aplica a forjados en general, con algunas aplicaciones en muros, el producto resultante es un forjado más ligero (respecto al hormigón), al tiempo que se reducen los efectos vibratorios respecto a los forjados típicos de madera. Con los TCC se reduce el consumo de hormigón y acero, llegando a una solución más sostenible.



Fig. 92. Compuesto de madera hormigón. Fuente: <https://n9.cl/zvj8z>



Fig. 93. Compuesto de madera hormigón prefabricado. Fuente: <https://n9.cl/etvkd>

3.7. NUEVOS DESARROLLOS DE EWPs

3.7.1. Paneles celulares ecológicos (ETC)

El proyecto europeo LIFE EcoTimberCell (ETC) estudia sistemas estructurales celulares ecológicos con el objetivo principal de “reducir el consumo energético en la construcción a través del desarrollo de productos constructivos de madera local procedente de gestión

forestal sostenible”. Para cumplir con su objetivo, procede al diseño e incorporación de sistemas innovadores basados en el empleo de tableros Tablex de Betanzos HB (*Hard Board*).

Las células EcoTimberCell (Fig. 94) se configuran a través de tableros Tablex con 6,4mm de espesor, separados por listones de madera aserrada local. El proceso de fabricación de los paneles se caracteriza por no utilizar adhesivos artificiales para enlazar las fibras de la madera; se fabrican a partir de madera y agua, aprovechando las propiedades termoplásticas de la lignina como adhesivo natural. Además de las ventajas ecológicas en su proceso de fabricación, es considerado un material de altas prestaciones debido a su resistencia mecánica, su estanquidad al aire, su alta resistencia a la difusión del vapor y su huella de carbono negativa.

Según las pruebas y los ensayos desarrollados como parte del proyecto LIFE, se ha comprobado que el tablero Tablex de Betanzos HB tiene potencial para su aplicación en el uso estructural (Fig. 95). Además, se pueden obtener mejoras con la selección de los tableros mediante métodos no destructivos, y con el aumento del espesor de estos, ya que al aumentar la sección éste transmite mayores esfuerzos y con la consecuente disminución de la deformación. El desarrollo de los sistemas ETC tendrá en sus cometidos su aplicación en viviendas unifamiliares pasivas, no obstante, a pesar de que aún no se ha proyectado, quizá en un futuro no muy lejano se introduzca también en las construcciones en altura.



Fig. 94. Célula individual ETC de madera aserrada local y tableros Tablex de Betanzos. Fuente: <https://n9.cl/0pf0c>



Fig. 95. Infografía de la aplicación del sistema completo ETC en forjado. Fuente: <https://www.3edata.es/portfolio/socio-life-ecotimbercell/>

3.7.2. Paneles de madera madera (TTP)

Los paneles TTP (*Timber-to-Timber Panels*) aparecen por primera vez en 2021 en el diseño y estudio realizado por Baño y Molti, publicado bajo el título “Análisis experimental y numérico de nuevos paneles de suelo estructural sin adhesivo (TTP) fabricados a partir de juntas de madera con madera”. La propuesta (Fig. 96) en él desarrollada tiene como finalidad evaluar el comportamiento estructural de los nuevos paneles madera-madera libres de adhesivos o conectores de acero, para su uso en forjados. Según especifican, se realizaron pruebas

experimentales de flexión (Fig. 97) y “se obtuvieron deflexiones y cargas de falla, mostrando una dependencia de la separación y altura de los conectores” (Baño & Moltini, 2021, p. 1).

La configuración del panel estructural se lleva a cabo mediante la unión de dos capas de tableros de madera aserrada orientadas en sentido longitudinal a través de listones en cola de milano orientados en sentido perpendicular (Fig. 98). Cabe destacar que la sección transversal de las capas y conectores se seleccionó en función de las dimensiones comerciales de madera disponibles en el aserradero de la localidad, Soria (España) en su caso. Dado que el espesor de las capas permanece constante, el grosor del panel varía en función de la altura de los conectores. A su vez, éstos últimos generan huecos entre la cara superior e inferior que facilitan el paso de conductos e instalaciones eléctricas; sin duda una ventaja frente al empleo de los paneles macizos de CLT en forjados.



Fig. 96. Modelo de paneles TTP. Fuente: fotografía cedida por el equipo CESEFOR.



Fig. 97. Prueba experimental del estudio de flexión de los paneles TTP. Fuente: (Baño & Moltini, 2021, p. 4).



Fig. 98. Fotografía del conector de cola de milano durante el proceso de fabricación del TTP. Fuente: (Baño & Moltini, 2021, p. 3).

3.7.3. Forjados autotesados de madera

Se trata de un efectivo sistema de autotesado de forjados de madera (Fig. 99) desarrollado por investigadores de la Universidad de La Coruña (Estévez, et al., 2016) (Otero, et al., 2017).

Mediante un dispositivo multiplicador de fuerza acoplado a los apoyos extremos del elemento estructural, la resultante vertical de las solicitaciones gravitatorias es convertida, mediante el movimiento inducido en un juego de bielas, en una acción de tesado de una serie de barras de acero incorporadas al sistema. En otras palabras, las deformaciones debidas a las acciones gravitatorias tienen un efecto beneficioso y proporcional a la fuerza de tesado, lo que permite diseñar forjados nervados de madera de altas prestaciones, con luces considerables y cantos reducidos.

La metodología de análisis, de cierta complejidad por la no linealidad de sistema, ha sido publicada por varios autores en 2017 (Suárez, et al., 2017).

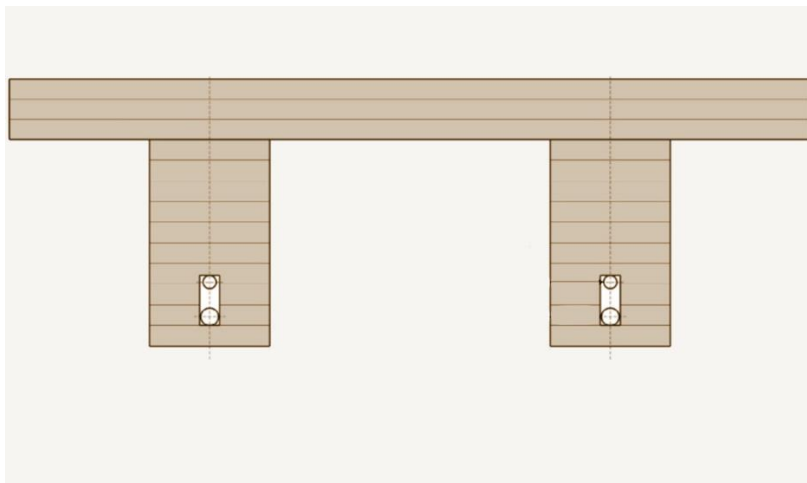


Fig. 99. Sección de forjado autotesado de madera Fuente: (Estévez, et al., 2016).



Fig. 100. Mecanismo de autotesado en diferentes configuraciones geométricas. Fuente: (Suárez, et al., 2017).



CAPÍTULO 3

LIMITACIONES

Introducción. El presente capítulo pone en relevancia las limitaciones y exigencias normativas a considerar en el diseño estructural y acústico de edificios de madera dentro de la región SUDOE, comprendida por territorios de Francia, España y Portugal.

El análisis se centra, principalmente, en las disposiciones expuestas en el cuerpo de los códigos europeos de diseño estructural: Eurocódigos (ECs) que aplican a todos los países de la Unión Europea; más concretamente en el EC 5: Proyecto de estructuras de madera, tanto en su parte 1-1 de reglas generales para la edificación como en su parte 1-2 de proyecto de estructuras sometidas a fuego. Asimismo, se analizan los Anexos Nacionales de Francia y España, que disponen de información complementaria no contradictoria a los ECs, y se analiza la existencia de normas nacionales en cada país que puedan prevalecer sobre los ECs; es decir, que presenten mayor jerarquía que estos.

Introduction. This chapter highlights the constraints and regulatory requirements to be considered in the structural and acoustic design of timber buildings within the SUDOE region, comprising France, Spain and Portugal. The analysis is mainly focused on the provisions set out in the body of the European structural design codes: Eurocodes (EC) that apply to all European Union countries; more specifically in EC 5: Design of timber structures, both in its part 1-1 of general rules for building and in its part 1-2 of structural fire design. Likewise, the National Annexes of France and Spain are analyzed, which have complementary information that is not in contradiction with the ECs, and the existence of national standards in each country that can prevail over the ECs is also analyzed. These national standards have a higher hierarchy than the latter.

1. DISEÑO ESTRUCTURAL

Inicialmente, la normativa que regula el diseño de las estructuras de madera, vigente en la región SUDOE, lleva a poder decir que no existen limitantes específicas para proyectar y construir una estructura con madera, prevaleciendo el requisito general de seguridad y funcionalidad estructural consistente en reducir a límites aceptables el riesgo de que la estructura tenga un comportamiento mecánico inadecuado frente a las acciones e influencias previsibles a las que pueda estar sometido durante su ejecución y uso previsto, considerando la totalidad de su vida útil.

Así, las exigencias básicas aplicables al diseño estructural con madera no difieren de las que son aplicables al uso de otros materiales; es decir, los edificios se proyectarán, fabricarán, construirán y mantendrán de forma que cumplan, con una fiabilidad adecuada, capacidad portante (resistencia y estabilidad), aptitud al servicio (deformaciones asumibles, vibraciones), durabilidad adecuada y resistencia al fuego. Para la comprobación de su cumplimiento la mayoría de las normativas y códigos internacionales han adoptado la estrategia de los Estados Límite.

En Europa, el conjunto de normas de referencia para el diseño estructural para cualquier material son los Eurocódigos. Son documentos redactados por el Comité Europeo de Normalización (CEN), que se publican con el código EN seguido del número de la norma. Son de carácter voluntario y proporcionan los métodos de cálculo de los elementos que tienen una función estructural en una construcción. Cada país de la Unión Europea tiene la obligación de publicar la correspondiente norma nacional, traducida del EC original, a través de los Organismos Nacionales de Normalización. En España, la Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR) publica las normas como UNE; en Francia la *Association Française de Normalisation* (AFNOR) las publica como NF y en Portugal es el *Instituto Português da Qualidade* (IPQ) el encargado de publicarlas como NP. Cuando están armonizadas a nivel europeo a dichas siglas se les añade EN.

En la actualidad los EC están compuestos de nueve documentos, tres que aplican a todos los materiales (EC -0, -1 y -8) y seis específicos para cada material (hormigón, acero, acero-hormigón, fábrica, madera y aluminio):

- Eurocódigo 0. Bases de diseño estructural (EN 1990). [7]
- Eurocódigo 1. Acciones sobre las estructuras (EN 1991). [8]
- Eurocódigo 2. Diseño de estructuras de hormigón (EN 1992). [29]
- Eurocódigo 3. Diseño de estructuras de acero (EN 1993). [30]
- Eurocódigo 4. Diseño de estructuras mixtas de acero y hormigón (EN 1994). [31]
- Eurocódigo 5. Diseño de estructuras de madera (EN 1995). [1, 2]
- Eurocódigo 6. Diseño de estructuras de fábrica (EN 1996). [32]
- Eurocódigo 7. Diseño geotécnico (EN 1997). [33]
- Eurocódigo 8. Diseño sísmico de estructuras (EN 1998). [34]
- Eurocódigo 9. Diseño de estructuras de aluminio (EN 1999). [35]

El actual EC 5 de diseño de estructuras de madera se divide en dos partes: La parte 1 aplica a edificios y obras de ingeniería civil en general, con exclusión de puentes, y la parte 2 se centra en el diseño de puentes. La parte 1, a su vez se subdivide en dos sub-partes: la Parte 1-1 especifica las reglas generales para la edificación y la parte 1-2 se centra en el diseño de estructuras de madera sometidas a fuego en caso de incendio.

Actualmente el EC 5 está en fase de revisión, y el nuevo documento incluirá el diseño estructural de nuevos productos de ingeniería de madera, así como apartados específicos para diseño sísmico, conexiones, refuerzos, etc. La siguiente figura (Fig. 101) desglosa los grupos de trabajo que están tratando los temas específicos en el Comité Técnico de Normalización 140, Subcomité 5 de diseño de estructuras de madera.

CTN 140/SC 5 - DESIGN OF TIMBER STRUCTURES

Secretary:	ETSI MONTES - ETSI MONTES
International Relations:	CEN/TC 250/SC 5 Eurocode 5: Design of timber structures
	CEN/TC 250/SC 5/WG 1 Cross laminated timber
	CEN/TC 250/SC 5/WG 2 Timber concrete composites
	CEN/TC 250/SC 5/WG 3 Cluster Eurocode 5
	CEN/TC 250/SC 5/WG 4 Structural fire design
	CEN/TC 250/SC 5/WG 5 Connections and fasteners
	CEN/TC 250/SC 5/WG 6 Timber bridges
	CEN/TC 250/SC 5/WG 7 Reinforcement
	CEN/TC 250/SC 5/WG 8 Seismic design
	CEN/TC 250/SC 5/WG 9 Execution

Fig. 101. Documentos que compondrán el nuevo EC 5 y grupos de trabajo de discusión. Fuente: (<https://www.en.une.org/encuentra-tu-norma/comites-tecnicos-de-normalizacion/comite?c=CTN%20140/SC%205>).

1.1. DISEÑO ESTRUCTURAL EN MADERA

1.1.1. Clasificación estructural de la madera

El uso de madera en estructuras depende del conocimiento de las propiedades físicas y mecánicas de la especie, que varían en función de su procedencia geográfica o del tipo de silvicultura, entre otros. A nivel normativo se utiliza el concepto de Clase Resistente, para agrupar a diferentes especies de distintas procedencias y calidades visuales que presentan propiedades resistentes, de rigidez y de densidad similares. Estas Clases Resistentes se recogen en la norma EN 338, que ofrece los valores característicos de cada una de las propiedades físicas y mecánicas involucradas en el diseño estructural (resistencias, módulos de elasticidad y densidad).

Las Clases resistentes de la madera aserrada de coníferas se identifican con las letras C o T, dependiendo de si los ensayos experimentales de determinación de sus propiedades se hacen a flexión o a tracción, respectivamente; y las Clases resistentes de la madera de frondosas se identifican con la letra D y actualmente se obtienen a partir de ensayos de flexión. Las siguientes tablas (Tabla 5, Tabla 6 y Tabla 7) presentan los valores característicos de las propiedades físicas y mecánicas para las diferentes clases resistentes.

Tabla 5. Clases resistentes de la madera de coníferas ensayada a flexión (EN 338:2016).

	Clase	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
Propiedades de resistencia (N/mm²)													
Flexión	$f_{m,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
Tracción fibra	$f_{t,0,k}$	7,2	8,5	10	11,5	13	14,5	16,5	19	22,5	26	30	33,5
Tracción ⊥ fibra	$f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Compresión fibra	$f_{c,0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	24	25	27	29	30
Compresión ⊥ fibra	$f_{c,90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,5	2,7	2,7	2,8	2,9	3,0
Cortante	$f_{v,k}$	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Propiedades de rigidez (kN/mm²)													
MOE medio en flexión fibra	$E_{m,0,mean}$	7,0	8,0	9,0	9,5	10,0	11,0	11,5	12,0	13,0	114,0	15,0	16,0
MOE caract. * en flexión fibra	$E_{m,0,k}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10,1	10,7
MOE transversal medio	$E_{m,90,mean}$	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53
Módulo de cortante medio	G_{mean}	0,44	0,50	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00
Densidad (Kg/m³)													
Densidad característica*	ρ_k	290	310	320	330	340	350	360	380	390	400	410	430
Densidad media	P_{mean}	350	370	380	400	410	420	430	460	470	480	490	520

*MOE: Módulo de Elasticidad.

Tabla 6. Clases resistentes de la madera de coníferas ensayada a tracción (EN 338:2016).

Clase	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T14,5	T15	T16	T18	T21	T22	T24	T26	T27	T28	T30	
Propiedades de resistencia (N/mm²)																			
Flexión	$f_{m,k}$	13,5	14,5	16	17	18	19,5	20,5	21	22	23	25,5	29	30,5	33	35	36,5	37,5	40
Tracción fibra	$f_{t,0,k}$	8	9	10	11	12	13	14	14,5	15	16	18	21	22	24	26	27	28	30
Tracción ⊥ fibra	$f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Compresión fibra	$f_{c,0,k}$	16	17	17	18	19	20	21	21	22	23	25	26	27	28	29	29	30	
Compresión ⊥ fibra	$f_{c,90,k}$	2,0	2,1	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,5	2,5	2,6	2,7	2,7	2,7	2,8	2,9	2,9	2,9	3,0
Cortante	$f_{v,k}$	2,8	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Propiedades de rigidez (kN/mm²)																			
MOE medio flexión fibra	$E_{m,0,mean}$	7,0	7,5	8,0	9,0	9,5	10,0	11,0	11,0	11,5	11,5	12,0	13,0	13,0	13,5	14,0	15,0	15,0	15,5
MOE caract.* flexión fibra	$E_{m,0,k}$	4,7	5,0	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,4	7,7	7,7	8,0	8,7	8,7	9,0	9,4	10,1	10,1	10,4
MOE transversal medio	$E_{m,90,mean}$	0,23	0,25	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,37	0,38	0,38	0,40	0,43	0,43	0,45	0,47	0,50	0,50	0,52
Módulo cortante medio	G_{mean}	0,44	0,47	0,50	0,56	0,59	0,63	0,69	0,69	0,72	0,72	0,75	0,81	0,81	0,84	0,88	0,94	0,94	0,97
Densidad (Kg/m³)																			
Dens. característica*	ρ_k	290	300	310	320	320	330	340	350	350	360	370	380	390	390	400	410	420	430
Densidad media	P_{mean}	350	360	370	380	400	410	420	420	430	440	460	470	470	480	490	490	500	520

*MOE: Módulo de Elasticidad.

Tabla 7. Clases resistentes de la madera de frondosas ensayada a flexión (EN 338:2016).

Clase	D18	D24	D27	D30	D35	D40	D45	D50	D55	D60	D65	D70	D75	D80
Propiedades de resistencia (N/mm²)														
Flexión	$f_{m,k}$	18	24	27	30	35	40	45	50	55	60	65	70	80
Tracción fibra	$f_{t,0,k}$	11	14	16	18	21	24	27	30	33	36	39	42	48
Tracción ⊥ fibra	$f_{t,90,k}$	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Compresión fibra	$f_{c,0,k}$	18	21	22	23	25	27	29	30	32	33	35	36	38
Compresión ⊥ fibra	$f_{c,90,k}$	4,8	4,9	5,1	5,3	5,4	5,5	5,8	6,2	6,6	10,5	11,3	12,0	12,8
Cortante	$f_{v,k}$	3,5	3,7	3,8	3,9	4,1	4,2	4,4	4,5	4,7	4,8	5,0	5,0	5,0
Propiedades de rigidez (kN/mm²)														
MOE medio en flexión fibra	$E_{m,0,mean}$	9,5	10,0	10,5	11,0	12,0	13,0	13,5	14,0	15,5	17,0	18,5	20,0	24,0
MOE caract.* flexión fibra	$E_{m,0,k}$	8,0	8,4	8,8	9,2	10,1	10,9	11,3	11,8	13,0	14,3	15,5	16,8	20,2
MOE transversal medio	$E_{m,90,mean}$	0,63	0,67	0,70	0,73	0,80	0,87	0,90	0,93	1,03	1,13	1,23	1,33	1,60
Módulo cortante medio	G_{mean}	0,59	0,63	0,66	0,69	0,75	0,81	0,84	0,88	0,97	1,06	1,16	1,25	1,50
Densidad (Kg/m³)														
Dens. Caract. *	ρ_k	475	485	510	530	540	550	580	620	660	700	750	800	900
Densidad media	P_{mean}	570	580	610	640	650	660	700	740	790	840	900	960	1080

*MOE: Módulo de Elasticidad.

Pero ¿cómo se puede clasificar la madera para saber a qué clase resistente corresponde?

El método para determinar estos valores es la realización de ensayos experimentales en laboratorio, que se relacionan con parámetros medibles en un proceso de clasificación visual o de clasificación mecánica.

La clasificación visual se realiza de acuerdo con normas propias de cada país, que asignan calidades visuales a las especies procedentes de plantaciones locales o de madera importada comercializada en el país en función de las singularidades que presenta, como son los nudos, fendas, desvío de fibra, etc. La norma NF B 52001-1:2018 define las calidades visuales de la madera de coníferas y frondosas clasificada en Francia; la norma UNE 56544:2011 y la UNE 56546:2013 definen las calidades visuales de la madera de coníferas y frondosas clasificadas en España y la norma NP 4305:1995 aplica a la madera de coníferas clasificada en Portugal.

La norma armonizada que relaciona las calidades visuales asignadas en cada país con las Clases Resistentes es la EN 1912. Las siguientes tablas (Tabla 8, Tabla 9 y Tabla 10) recogen la asignación de clases resistentes a las diferentes calidades por especie en Francia, Portugal y España, respectivamente, del proyecto de norma prEN 1912:2019.

Tabla 8. Relación entre clases resistentes y calidades visuales en Francia (prEN 1912:2019).

Clase resistente	Calidad visual	Especie	Procedencia
C30	ST-I	Picea (<i>Picea abies</i>)	CNE de Europa
		Abeto (<i>Abies alba</i>)	
C27	ST-I	Pino francés (<i>Pinus nigra ssp. laricio</i> ; <i>P. nigra ssp. nigra</i> , <i>P. sylvestris</i>)	Francia
		Alerce (<i>Larix decidua</i>)	Francia
C24	ST-II	Picea (<i>Picea abies</i>)	Francia
		Abeto (<i>Abies alba</i>)	
		Alerce (<i>Larix decidua</i>)	
		Chopo (<i>Populus x canadensis cv Robusta</i> , <i>Dorskamp</i> , I-214, I-4551)	
		Abeto Sitka (<i>Picea sitchensis</i>)	
C18	ST-III	Castaño (<i>Castanea sativa</i>)	Francia
		Pino Oregón (<i>Pseudotsuga menziesii</i>)	
		Pino negral (<i>Pinus nigra ssp. laricio</i> y <i>Pinus nigra ssp. nigra</i>)	
		Pino silvestre (<i>Pinus sylvestris</i>)	
		Alerce (<i>Larix decidua</i>)	
		Chopo (<i>Populus x canadensis cv Robusta</i> , <i>Dorskamp</i> , I-214, I-4551)	
		Abeto Sitka (<i>Picea sitchensis</i>)	
		Picea (<i>Picea abies</i>)	
		Abeto (<i>Abies alba</i>)	
		Castaño (<i>Castanea sativa</i>)	
C14	ST-IV	Cedro japonés o Sugi (<i>Cryptomeria japonica</i>)	Reunión
		Pino francés (<i>Pinus nigra ssp. laricio</i> ; <i>P. nigra ssp. nigra</i> , <i>P. sylvestris</i>)	Francia
		Cedro japonés o Sugi (<i>Cryptomeria japonica</i>)	Reunión
D70	HS ST1	Balata Franc (<i>Manilkara bidentata</i> , <i>Manilkara huberi</i>)	Guayana francesa
		Ipé (<i>Handroanthus</i> spp.)	
D55	HS ST1	Amarante (<i>Peltogyne</i> spp.)	Guayana francesa
D45	HS ST1	Cupiúá (<i>Goupia glabra</i>)	HS ST1
D40	HS ST1	Gonfolo (<i>Qualea Spp.</i>)	Guayana francesa
	HS ST1	Alimiao (<i>Pseudopiptadenia suaveolens</i>)	Guayana francesa
D35	H1	Haya (<i>Fagus sylvatica</i>)	Francia y Bélgica
	HS ST1	Jaboty (<i>Erisma uncinatum Warm</i>)	Guayana francesa
D30	H2	Haya (<i>Fagus sylvatica</i>)	Francia y Bélgica
	1	Roble (<i>Quercus robur</i> , <i>Quercus petraea</i>)	Francia y Bélgica
D24	2	Roble (<i>Quercus robur</i> , <i>Quercus petraea</i>)	Francia y Bélgica
	H3	Haya (<i>Fagus sylvatica</i>)	Francia y Bélgica
D18	3	Roble (<i>Quercus robur</i> , <i>Quercus petraea</i>)	Francia y Bélgica
	H4	Haya (<i>Fagus sylvatica</i>)	Francia y Bélgica

Tabla 9. Relación entre clases resistentes y calidades visuales en Portugal (prEN 1912:2019).

Clase resistente	Calidad visual	Especie	Procedencia
C18	E	Pino pinaster (<i>Pinus pinaster</i>)	Portugal

Tabla 10. Relación entre clases resistentes y calidades visuales en España (prEN 1912:2019).

Clase resistente	Calidad visual	Especie	Procedencia
C30	ME1	Pino laricio (<i>Pinus nigra Salzmanii</i>)	España
	ME1	Pino silvestre (<i>Pinus sylvestris</i>)	España
C27	ME1	Pino silvestre (<i>Pinus sylvestris</i>)	España
C24	ME1	Pino radiata (<i>Pinus radiata</i>)	España
		Pino marítimo <i>Pinus pinaster</i>	
C22	MEG	Pino silvestre (<i>Pinus sylvestris</i>)	España
		Pino laricio (<i>Pinus nigra Salzmanii</i>)	
C20	MEG	Pino radiata (<i>Pinus radiata</i>)	España
C18	ME2	Pino radiata (<i>Pinus radiata</i>)	España
		Pino pinaster (<i>Pinus pinaster</i>)	
		Pino laricio (<i>Pinus nigra</i>)	
		Pino silvestre (<i>Pinus sylvestris</i>)	
	E	Pino pinaster (<i>Pinus pinaster</i>)	
	MEF	Eucalipto blanco (<i>Eucalyptus globulus</i>)	España
D27	MEF	Castaño (<i>Castanea sativa</i>)	España
D24	MEF-G	Castaño (<i>Castanea sativa</i>)	España

El país que más avanzado tiene el sistema de clasificación visual de sus especies de madera es Francia, que cuenta con 20 especies clasificadas visualmente en un total de 13 clases resistentes. Le sigue España, con 6 especies clasificadas visualmente y 8 Clases Resistentes y, por último, Portugal, con una única especie clasificada (Fig. 102). De las especies clasificadas en Francia, el 55% corresponden a madera de frondosas, mientras que en España es el 33% y ninguna en Portugal (Fig. 102).

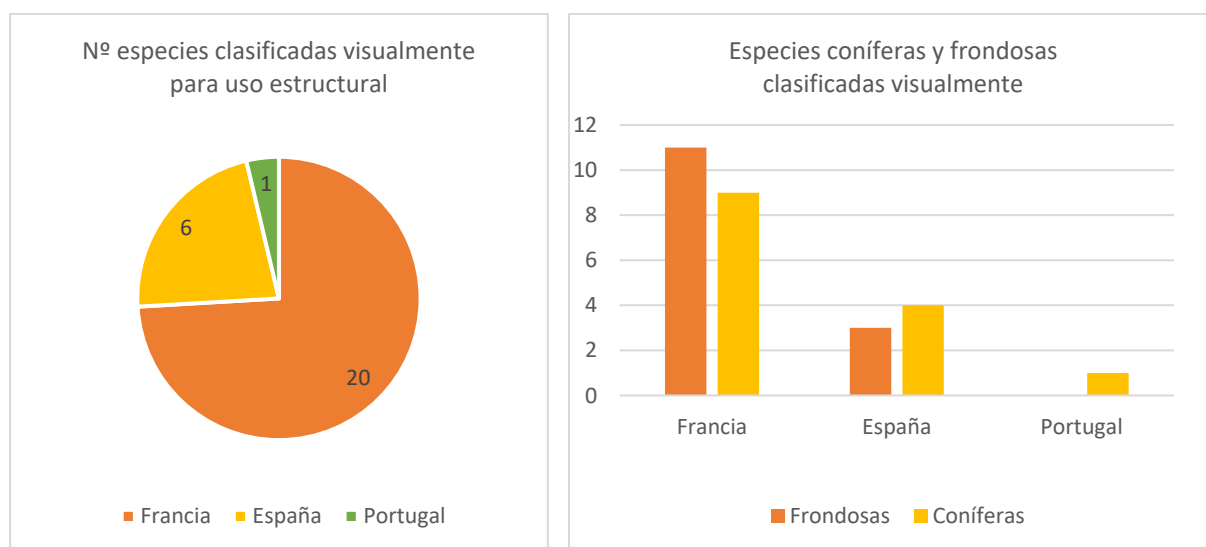


Fig. 102. Núm. de especies clasificadas visualmente para uso estructural (izq.) y distribución entre coníferas y frondosas por país (dch.). Fuente: elaboración propia.

La clasificación mecánica consiste en la asignación de Clases Resistentes a las piezas de madera a partir de la determinación de propiedades indicadoras, como pueden ser el Módulo de Elasticidad Dinámico o la densidad. La norma armonizada que define el procedimiento de clasificación mecánica es la EN 14081-2 y aplica a todos los países de procedencia de la madera. Las Tablas siguientes (Tabla 11, Tabla 12 y Tabla 13) resumen las especies actualmente clasificadas por máquina en los tres países de la región SUDOE, el tipo de Clases Resistentes obtenidas (C o T) en función de si los ensayos se han hecho a flexión o a tracción, los equipos con los que se han clasificado y el año en que los informes de clasificación fueron aprobados por el TG1 del Comité Europeo de Normalización, Comité Técnico 124 de madera estructural (*TC124: Timber Structures*), Grupo de Trabajo 2 de madera sólida (*WG2: Solid timber*) y Grupo de Tareas 1 de clasificación visual y por máquina (*TG1: Visual and machine grading*), (CEN TC124/WG2/TG1).

Tabla 11. Especies de España clasificadas por máquina y aprobadas por el CEN TC124/WG2/TG1.

País	Clases	Especie	Equipo	Informe	Año
España	C	Pino radiata (<i>Pinus radiata</i>)	MTG ² (Brookhuis)	TG1/2021/04/10	2021
	T	Pino silvestre (<i>Pinus sylvestris</i>)	MTG ² (Brookhuis)	TG1/2021/04/07	2021
			VISCAN ¹ (Microtec)	TG1/2021/04/05	2021
				TG1/2021/04/06	2021
	C	Pino marítimo (<i>Pinus pinaster</i>)	MTG ² (Brookhuis)	TG1/2021/11/04	2021
SP ⁵	Eucalipto (<i>Eucalyptus globulus</i>)	MTG ² (Brookhuis)	TG1/2021/11/03	2021	

¹ VISCAN puede englobar a todos o alguno de los equipos VISCAN Portable con o sin balanza, VISCAN Compact y VISCAN PLUS de la compañía Microtec.

² MTG puede englobar a todos o alguno de los equipos MTG 960, MTG920, mtgBATCH962, mtgBATCH922, mtgBATCH966 y mtgBATCH926 de la compañía Brookhuis.

⁵ SP (*Structural profile*): propuesta de clase resistente para madera de frondosas ensayada a tracción.

Tabla 12. Especies de Portugal clasificadas por máquina y aprobadas por el CEN TC124/WG2/TG1.

País	Clases	Especie	Equipo	Informe	Año
Portugal	C	Pino marítimo (<i>Pinus pinaster</i>)	MTG ² (Brookhuis)	RT-FCTUC-SERQ-1401	2014
	SP ⁵	Eucalipto (<i>Eucalyptus globulus</i>)	MTG ² (Brookhuis)	TG1/2021/11/03	2021

² MTG puede englobar a todos o alguno de los equipos MTG 960, MTG920, mtgBATCH962, mtgBATCH922, mtgBATCH966 y mtgBATCH926 de la compañía Brookhuis.

⁵ SP (*Structural profile*): propuesta de clase resistente para madera de frondosas ensayada a tracción.

Tabla 13. Especies de Francia clasificadas por máquina y aprobadas por el CEN TC124/WG2/TG1.

País	Clases	Especie	Equipo	Informe	Año		
Francia	C	Abeto (<i>Abies alba</i>) Picea (<i>Picea abies</i>)	Triomatic (CBS-CBT)	0308/19 0211/19rev	2008 2011		
			Precigrader (Dynalyse)	0308/21 0909/07 1011/19rev	2008 2009 2011		
			Xyloclass_v.T	0210/06rev2; 0210/10rev2	2010		
			VISCAN ¹ (Microtec)	1011/22rev 1011/23rev 201610/19rev; 201610/20rev; 201610/21rev	2011 2016		
			GoldenEye ⁴ (Microtec)	1011/20rev 1011/21rev 201610/17rev 201610/18rev	2011 2016		
			Noesys (SARL Esteves)	0210/08rev	2010		
			E-control (Innodura)	0312/02rev 0312/03rev 201302/02; 201302/03	2012 2013		
			C	Abeto Douglas ³ (<i>Pseudotsuga menziesii</i>)	VISCAN ¹ - (Microtec)	0508/13rev 0909/06 1011/24rev; 1011/25rev 201403/02rev 201703/08rev; 201703/09rev	2008 2009 2011 2014 2017
					GoldenEye ⁴ (Microtec)	0909/04; 0909/05 0210/20rev 201703/06rev; 201703/07rev; 201703/07rev2	2009 2010 2017
					NOESYS (SARL Esteves)	1011/10rev	2011
					Dynagrade-¿?	201210/03rev1	2012
					Precigrader (Dynalyse)	0312/08rev	2012
					Xyloclass_v.T	0211/03rev	2011
	E-control (Innodura)	201210/10; 201210/11 201309/01rev2; 201309/02rev2			2012 2013		
	C	Pino laricio (<i>Pinus nigra ssp. laricio</i>)			VISCAN ¹ (Microtec)	201306/01; 201306/02 201703/19rev; 201703/20; 201703/10rev	2013 2017
					MTG ² (Brookhuis)	201302/04rev2; 01302/05rev2; 201302/06rev	2013
	C	Alerce (<i>Larix decidua</i>)			Triomatic (CBS-CBT)	0312/04rev; 0312/05rev	2012
					VISCAN ¹ (Microtec)	0312/18rev; 0312/19rev; 0312/20rev 201403/09	2012 2014
					GoldenEye ⁴ (Microtec)	0312/21rev; 0312/22rev	2012
	C	Sitka (<i>Picea sitchensis</i>)			VISCAN ¹ (Microtec)	1011/12rev; 1011/13rev; 1011/28; 1011/31	2011
			GoldenEye ⁴ (Microtec)	1011/29; 1011/30	2011		
			Xyloclass_v.T (XYLOMECA)	1011/14rev; 1011/15rev	2011		
	C	Chopo (<i>Populus spp.</i>)	VISCAN ¹ (Microtec)	1011/16rev; 0312/06rev; 0312/07	2011		
			MTG ² (Brookhuis)	202005/01rev1; 202005/02rev	2020		
				MODULO (M. Manfred Hudel)	201910/32rev3	2019	

¹ VISCAN puede englobar a todos o alguno de los equipos VISCAN Portable con o sin balanza, VISCAN Compact y VISCAN PLUS de la compañía Microtec.

² MTG puede englobar a todos o alguno de los equipos MTG 960, MTG920, mtgBATCH962, mtgBATCH922, mtgBATCH966 y mtgBATCH926 de la compañía Brookhuis.

³ Incluye no sólo madera de Francia, son también de AT, BE, DE, FR, IT, LU.

⁴ GoldenEye puede englobar a todos o alguno de los equipos GoldenEye 702 y GoldenEye 706 de la compañía Microtec.

Aunque Francia sigue siendo también el país que más ha avanzado en el sistema de clasificación por máquina de sus especies, la diferencia entre países no es tan grande como en la clasificación visual. Francia cuenta con 6 especies clasificadas por máquina, España con 4 y Portugal con 2 (Fig. 104). Sin embargo, cabe destacar que España y Portugal han marcado un hito en el CEN al conseguir por primera vez la asignación de calidades estructurales (SP) a madera de frondosas ensayada a tracción, pues actualmente la norma EN 338 no incluye una tabla de clases resistentes en estas condiciones.

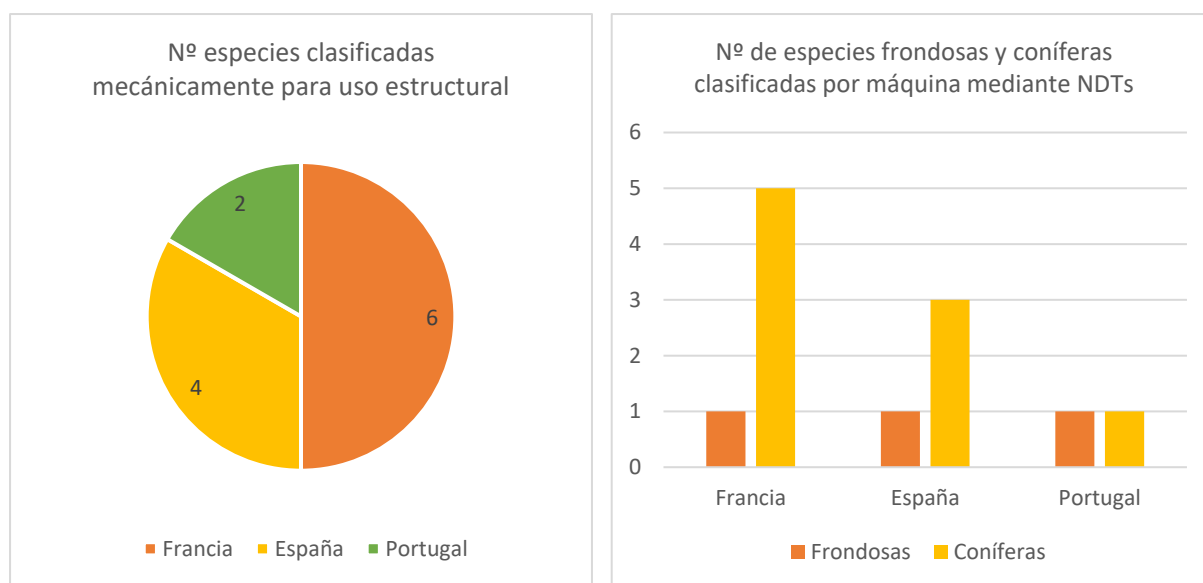


Fig. 104. Núm. de especies clasificadas por máquina (izqda.) y distribución entre coníferas y frondosas por país (dcha.). Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar en las Figuras 98 y 99, las especies clasificadas visual y mecánicamente son limitadas en los distintos países, por lo que, una de las limitantes normativas identificadas está relacionada con el número de especies locales aptas para ser utilizadas con fines estructurales. Esta limitante es principalmente importante en Portugal. Se ha detectado también que el hecho de contar con especies clasificadas estructuralmente de acuerdo con la normativa europea no implica que la clasificación esté implementada en la industria. A esto se une el problema de que la clasificación por máquina es relativamente reciente y aún no está muy extendido su uso, siendo el primer informe de la región SUDOE aprobado por el CEN del año 2008.

1.1.2. Diseño estructural en ELU

Se denominan Estados Límite (EL) a aquellas situaciones que, de ser superadas, puede considerarse que el edificio no cumple alguna de las funciones para las que ha sido proyectado. Como métodos de verificación del cumplimiento de los niveles de prestación establecidos, consistentes en comprobar, en cada caso, que el valor de las acciones y

solicitaciones actuantes es menor o igual que la capacidad de respuesta de la estructura, con unos determinados índices de seguridad.

La verificación en Estados Límite Últimos (ELU) se basa en utilizar una serie de factores parciales de mayoración de las acciones o cargas que actúan sobre la estructura y de otros de minoración de la resistencia del material. Los ELU que se verifican en estructuras de madera son los correspondientes a las solicitaciones normales (flexión, tracción paralela y perpendicular a la fibra y compresión paralela y perpendicular a la fibra), a las solicitaciones tangentes (cortante, cortante por deslizamiento, cortante por rodadura y torsión); inestabilidad y equilibrio (pandeo y vuelco lateral) y a las diferentes combinaciones entre ellas.

El valor de cálculo de la resistencia de la madera en ELU está determinado por la siguiente ecuación.

$$X_d = \frac{k_{mod} X_k k_h k_{sys}}{\gamma_M}$$

donde

X_d es el valor de cálculo de la propiedad resistente.

X_k es el valor característico de la propiedad resistente, que se extrae de las tablas de clases resistentes (Tablas 1, 2 y 3).

γ_M es el coeficiente parcial para la propiedad del material.

k_{mod} es el factor de modificación que tiene en cuenta el efecto de la duración de la carga y el contenido de humedad

k_h es el coeficiente de altura, que sólo aplica en la verificación del ELU de flexión y tracción paralela a la fibra.

k_{sys} es el coeficiente de carga compartida.

A nivel normativo, la verificación de los distintos ELU en situaciones normales en edificaciones está desarrollada en el cuerpo del EC 5 – Parte 1-1, no obstante, el cumplimiento de estas disposiciones es de carácter voluntario.

Francia

Francia utiliza el EC 5 para el dimensionado de estructuras de madera y cuenta con Anexos Nacionales que establecen los parámetros de cálculo específicos para el país e información complementaria no contradictoria al EC.

Portugal

En Portugal, el EC 5 es también la normativa de referencia para el dimensionado de sus estructuras de madera y no cuenta con un Anexo Nacional particular, por lo que se rige por los parámetros indicados en EC 5.

España

España cuenta con Anexos Nacionales al EC 5; y, además, está en vigor el Código Técnico de la Edificación (CTE), compendio de la normativa anterior, renovada y diseñada de forma prestacional, siguiendo el modelo de otras normativas europeas. Sus diferentes partes se

denominan Documentos Básicos, y están referidos a la Seguridad: a) estructural, b) en caso de incendio, y c) de utilización y accesibilidad; y a la Habitabilidad: a) salubridad, b) protección frente al ruido, y c) ahorro de energía.

Fue aprobado inicialmente por el Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo de 2006, y posteriormente parcialmente modificado por el Real Decreto 732/2019, de 20 de diciembre (BOE 27/12/2019). Desde entonces, es de aplicación general y obligado cumplimiento en todos los edificios de nueva construcción. En el caso de las obras de ampliación, modificación, reforma o rehabilitación que se realicen sobre edificios existentes, la obligatoriedad depende de la naturaleza de la intervención y, en su caso, del grado de protección que puedan tener los edificios afectados. Además, en España, su aplicación no exime del cumplimiento de otras normativas de edificación que, siendo vigentes no pertenecen al CTE, como es, en nuestro caso, la Norma de Construcción Sismorresistente (NCSE).

Por último, en cuanto a los productos a emplear, la Unión Europea define en su Reglamento 305/2011 de Productos de Construcción (RPC) los requisitos relativos al mercado CE. El cumplimiento de los cuales es obligatorio, incluyendo la necesidad de emitir una Declaración de prestaciones para los productos cubiertos.

Por lo tanto, EC5 no tiene aplicación directa para el diseño de edificios de madera en España.

1.1.3. Diseño estructural en ELS

La verificación de los Estados Límite de Servicio (ELS) se basa en asegurar que los efectos generados por las cargas actuantes que se obtengan de la combinación correspondiente son menores a los límites de la normativa con el fin de asegurar el correcto funcionamiento de la estructura en cuanto a integridad de los elementos constructivos, confort de los usuarios y apariencia. Los ELS se verifican para las deformaciones y las vibraciones.

a) ELS: Deformaciones

La madera es un material bastante flexible comparado con otros materiales estructurales alternativos, como son el hormigón o el acero. Esto conlleva a que las verificaciones de deformaciones sean usualmente restrictivas en las estructuras de madera. A esto hay que añadir que en la madera existen considerables deformaciones diferidas, es decir que la deformación se incrementa con el paso del tiempo, aunque no se produzca un incremento de la carga, y que puede haber una influencia no despreciable de las deformaciones por cortante debido al bajo valor del módulo de corte (G_{mean}) con relación al módulo de elasticidad longitudinal paralelo a la fibra $E_{m,0,mean}$.

El EC 5 establece las combinaciones de acciones a considerar en el caso de diseño en ELS y establece tres valores límite de flecha en vigas (Tabla 14): flecha instantánea, flecha final y flecha neta final.

Tabla 14. Valores límite de flecha en vigas según el EC 5.

Tipo de viga	w_{inst}	$w_{net,fin}$	w_{fin}
Simplemente apoyada	$\frac{l}{300}$ a $\frac{l}{500}$	$\frac{l}{250}$ a $\frac{l}{350}$	$\frac{l}{250}$ a $\frac{l}{350}$
En ménsula	$\frac{l}{150}$ a $\frac{l}{250}$	$\frac{l}{125}$ a $\frac{l}{175}$	$\frac{l}{75}$ a $\frac{l}{150}$

donde,

w_{inst} es la flecha instantánea calculada según las ecuaciones de resistencia de materiales de Timoshenko.

w_{fin} es la flecha final producida por todas las acciones que se obtiene de considerar los efectos instantáneos y diferidos.

$w_{net,fin}$ es la flecha neta final que se obtiene de restar la contraflecha de ejecución a la flecha final w_{fin} .

Los valores límites presentados en la Tabla 14 se aplican en los tres países de la región SUDOE al ser requerimientos del EC; no obstante, cada país puede modificar estos valores de acuerdo con lo establecido en su Anexo Nacional, o tener valores más restrictivos en normativa local que presente mayor jerarquía, como es el caso de España con el CTE.

España

En el caso de España, los límites de flecha son modificados tanto en su Anexo Nacional como en el Documento Básico de Seguridad Estructural del Código Técnico de la Edificación (CTE DB SE), de obligado cumplimiento en edificaciones, donde además se establecen nuevas definiciones de flecha y nuevos criterios a verificar.

La Tabla 15 presenta los valores límite de flechas de los elementos estructurales y la Tabla 16 los valores límite de desplome en cuanto a deformaciones horizontales de los edificios contemplados en el Anexo Nacional al EC 5 y en el Documento Básico de Seguridad.

Tabla 15. Valores límite de flechas (Anexo Nacional de España al EC 5 y CTE-DB-SE).

Criterio		Limitación	
Integridad de elementos constructivos	Elementos frágiles	$w_{act} \leq l/500$	
	Elementos ordinarios	$w_{act} \leq l/400$	
	Resto de los casos	Con cielo raso o falso techo de yeso o escayola	$w_{act} \leq l/300$
		Sin cielo raso o falso techo de yeso o escayola	$w_{act} \leq l/200$
Confort de los usuarios	Forjados y vigas de piso	$w_{inst} \leq l/350$	
Apariencia de la obra		$w_{net,fin} \leq l/300$	

donde,

w_G es la flecha instantánea de las cargas permanentes.

w_Q es la flecha instantánea de las cargas variables.

w_C es la contraflecha de ejecución.

w_{act} es la flecha activa, igual a la suma de la flecha instantánea de las cargas variables más la diferida de las permanentes y variables.

w_{inst} es la flecha instantánea de las cargas variables.

$w_{net,fin}$ es la flecha neta final o flecha a largo plazo, igual a la flecha instantánea y diferida de las cargas permanentes y de las variables, descontando en su caso la contraflecha.

Tabla 16. Valores límite de desplazamientos horizontales (AN de España al EC 5 y CTE-DB-SE).

Critério	Limitación
Integridad de los elementos constructivos	$u_{act} \leq h_t/500$ $u_{act} \leq h_p/250$
Apariencia de la obra	$u_{t,fin} \leq h_t/250$ $u_{p,fin} \leq h_p/250$

donde,

u_{act} es el desplome activo, igual al desplazamiento instantáneo debido a las cargas variables más la diferida de las permanentes y variables.

$u_{t,fin}$ es el desplome final o a largo plazo de la altura total del edificio debido al desplazamiento instantáneo y diferido de las cargas permanentes y las cargas variables.

$u_{p,fin}$ es el desplome final o a largo plazo de una planta del edificio debido al desplazamiento instantáneo y diferido de las cargas permanentes y las cargas variables.

h_t altura total del edificio.

h_p altura de la planta considerada.

Francia

Francia también realiza modificaciones a los límites de flecha y desplome propuestos por el EC 5 en su Anexo Nacional, aunque no realiza nuevas definiciones de flechas ni incorpora nuevas verificaciones como en el caso de España. La Tabla 17 presenta los valores límites de flecha recogidos en el Anexo Nacional de Francia al EC 5.

Tabla 17. Valores límite de flecha del Anexo Nacional francés al EC 5 (NF EN 1995-1-1 / NA).

	Edificios ordinarios			Edificios Agrícolas y similares		
	w_{inst} (Q)	$w_{net,fin}$	w_{fin}	w_{inst} (Q)	$w_{net,fin}$	w_{fin}
Vigas	—	$\frac{\ell}{150}$	$\frac{\ell}{125}$	—	$\frac{\ell}{150}$	$\frac{\ell}{100}$
Elementos estructurales	$\frac{\ell}{300}$	$\frac{\ell}{200}$	$\frac{\ell}{125}$	$\frac{\ell}{200}$	$\frac{\ell}{150}$	$\frac{\ell}{100}$

NOTAS:

¹ Para paneles de forjado o de cubiertas $w_{net,fin}$ será inferior a $l/250$.

² Para elementos en voladizo, los valores límite se pueden duplicar y serán mayores a 5 mm.

³ Los valores límite de la Tabla 13 también aplican como limitación a los desplazamientos horizontales, incluidos aquellos elementos individuales sujetos a la acción del viento para los cuales se tomará el valor límite $l/200$.

Portugal

Portugal no dispone de un Anexo Nacional que modifique las consideraciones propuestas en el EC 5.

b) ELS: vibraciones

La madera es un material con una relación resistencia/peso muy elevado, factor de importancia que la hace un material competitivo para proyectar y diseñar estructuras con él. No obstante, el bajo peso de la estructura conlleva a que se puedan generar problemas de vibraciones si este aspecto no es tenido en cuenta en el diseño y no se consideran soluciones apropiadas para evitarlo.

Por lo anterior, la verificación de vibraciones en ELS puede llegar a ser la más restrictiva en ocasiones, principalmente en aquellos forjados de luces elevadas o cuando se diseña con paneles de madera contralaminada (CLT), por contar con reducido espesor.



Fig. 105. Forjado de CLT en el edificio de 62 VPO de Cornellá. Fuente: José Evia.

El EC 5, en su apartado 7.3.3., establece un método simplificado de verificación del Estado Límite de vibraciones en forjados de uso residencial en función de la rigidez y la velocidad de vibración, siempre que se cumpla con que presenta una frecuencia fundamental de vibración mayor que 8 Hz. El método establece verificaciones relacionadas con la velocidad y la rigidez del forjado. Para los casos en que la frecuencia fundamental sea menor de 8 Hz, el EC 5 establece que se deberá realizar un estudio especial, sin entrar en especificaciones de cómo hacerlo.

La actual versión del EC 5 no recoge el dimensionado de paneles de madera contralaminada (CLT), aunque ya se encuentra contemplado en la nueva versión actualmente en fase de borrador (CEN/TC 250/SC 5_N 1371:2021). Sin embargo, es común utilizar estos paneles CLT en los forjados de edificios en altura y es la verificación de la vibración una de las principales limitantes de dimensionado. Por este motivo, existen manuales que indican las verificaciones específicas de vibración para el caso de paneles CLT en entrepisos, como puede ser el Manual

de ProHolz, que identifica la necesidad de cumplimiento de los tres criterios siguientes: i) rigidez, verificada como la flecha (mm) consecuencia de una carga puntual de 1kN aplicada en el punto más desfavorable (w_{1kN}); ii) primera frecuencia natural (Hz); y iii) valor efectivo de la aceleración por vibración (m/s^2). La Tabla 18 muestra la luz máxima de forjados que se podría salvar con paneles CLT en forjados en función de la sobrecarga de uso, clases resistentes y el número de capas, obtenido del trabajo de investigación de (Baño, et al., 2018). En dicha tabla se identifica cuál es la verificación limitante en el dimensionado del panel, observando que la limitante por vibración, tanto debido a la frecuencia natural como a la debida a la carga puntual estática, es la que dimensiona los paneles en forjados de edificios residenciales (sobrecarga de uso de 2 kN/m²) y de oficinas (sobrecarga de uso de 3 kN/m²) para las clases resistentes C14 y C24 definidas en la norma EN 338. Para sobrecargas de uso mayores, 4 kN/m² en pública concurrencia y 5 kN/m² en áreas comerciales, las limitantes siguen siendo los Estados Límite de Servicio, combinando los límites de flecha y de vibración, dependiendo del caso.

Tabla 18. Luz máxima (m) de paneles CLT en forjados de edificios en función de la sobrecarga de uso, la clase resistente y el número de capas (extraído de Baño et al. 2018).

Sobrecarga de uso	7 capas		5 capas		3 capas	
	C14	C24	C14	C24	C14	C24
2 kN/m ²	6.5 ^V	7.5 ^V	5.0 ^V	5.5 ^V	3.0 ^V	3.5 ^V
3	6.5 ^V	7.5 ^V	5.0 ^V	5.5 ^V	3.0 ^V	3.5 ^V
4	6.5 D ^V	7.5 D ^V	5.5 D ^V	5.5 D ^V	3.0 ^V	3.5 ^V
5	6.0 ^D	7.0 ^D	4.5 ^D	5.5 ^D	3.0 ^{DV}	3.5 ^{DV}

NOTAS:

^D limitado por la verificación de flecha en ELS.

^V limitado por la verificación de vibración en ELS.

Al igual que para las verificaciones anteriores, cada país puede modificar y/o hacer modificaciones con respecto a lo propuesto en el EC 5 en su Anexo Nacional, o tener otras consideraciones en normativa local que presente mayor jerarquía.

España

Actualmente, el Anexo Nacional español no realiza modificaciones al método propuesto en el EC 5, sólo añade definiciones detalladas para algunos de los parámetros involucrados en la verificación.

Por otro lado, el CTE DB SE se refiere brevemente al Estado Límite de vibraciones, pero no proporciona un método de cálculo de verificación en ningún caso.

Francia

Por su parte, el Anexo Nacional francés, vigente también, establece que puede ser utilizado el método propuesto por el EC 5, aunque establece una pequeña modificación. Impone que el valor del coeficiente α que está involucrado en la verificación de la rigidez del forjado sea menor a 3 mm/kN, siendo esto más restrictivo que lo propuesto por el EC, que lo limita a 4 mm/kN. A su vez, indica que, para forjados residenciales de uso común, para un confort normal es deseable que el valor α se ubique en el rango $(1,3 \pm 0,3)$ mm/kN.

Portugal

Portugal no dispone de un Anexo Nacional que modifique las consideraciones del EC 5.

1.1.4. Estado Limite de Durabilidad (ELD)

Se entiende por Estado Límite de Durabilidad (ELD) el producido por acciones físicas y químicas, diferentes a las cargas y acciones del análisis estructural, que pueden degradar las características de los materiales hasta límites inaceptables. Esta limitación puede ser considerable cuando se trata de un material orgánico, de origen natural, como la madera, susceptible de sufrir degradaciones de origen biótico.

De acuerdo con EC5, la madera y los productos derivados de la madera deben tener una durabilidad natural adecuada de acuerdo con la Norma Europea EN 350 para la clase de uso correspondiente (definidas en la Norma Europea EN 335), o aplicarse un tratamiento protector seleccionado de acuerdo con las Normas Europeas EN 351-1 y EN 460.

En términos genéricos, EC5 prevé que antes de comenzar el proyecto se debe identificar el tipo de ambiente que defina la agresividad a la que va a estar sometido cada elemento estructural. El tipo de ambiente viene determinado por el conjunto de condiciones físicas y químicas a las que estará expuesto el elemento y que puede llegar a provocar su degradación. Para su concreción, EN 335:2013 establece unas Clases de uso, relacionadas con la probabilidad de que un elemento estructural sufra ataques de origen biótico, y principalmente es función del grado de humedad que llegue a alcanzar durante su vida de servicio. Se definen las siguientes:

Tabla 19. Clases de uso (EN 335).

				Riesgo de aparición de agentes biológicos			
	Clase de uso	Situación	Permanencia en exposición	Hongos	Coleópteros	Termitas	Xilófagos marinos
Sin contacto con el suelo	1	Bajo cubierta (ambiente seco)	Ninguna				
	2	Bajo cubierta (riesgo de humedad)	Ocasional				
	3.1	Exterior protegido					
	3.2	Exterior no protegido	Frecuente				
	4	En contacto con el suelo o agua dulce	Permanente				
	5	En agua salada					

En concordancia, EN 351-1 propone el siguiente diagrama de flujo para la elección del tratamiento protector:

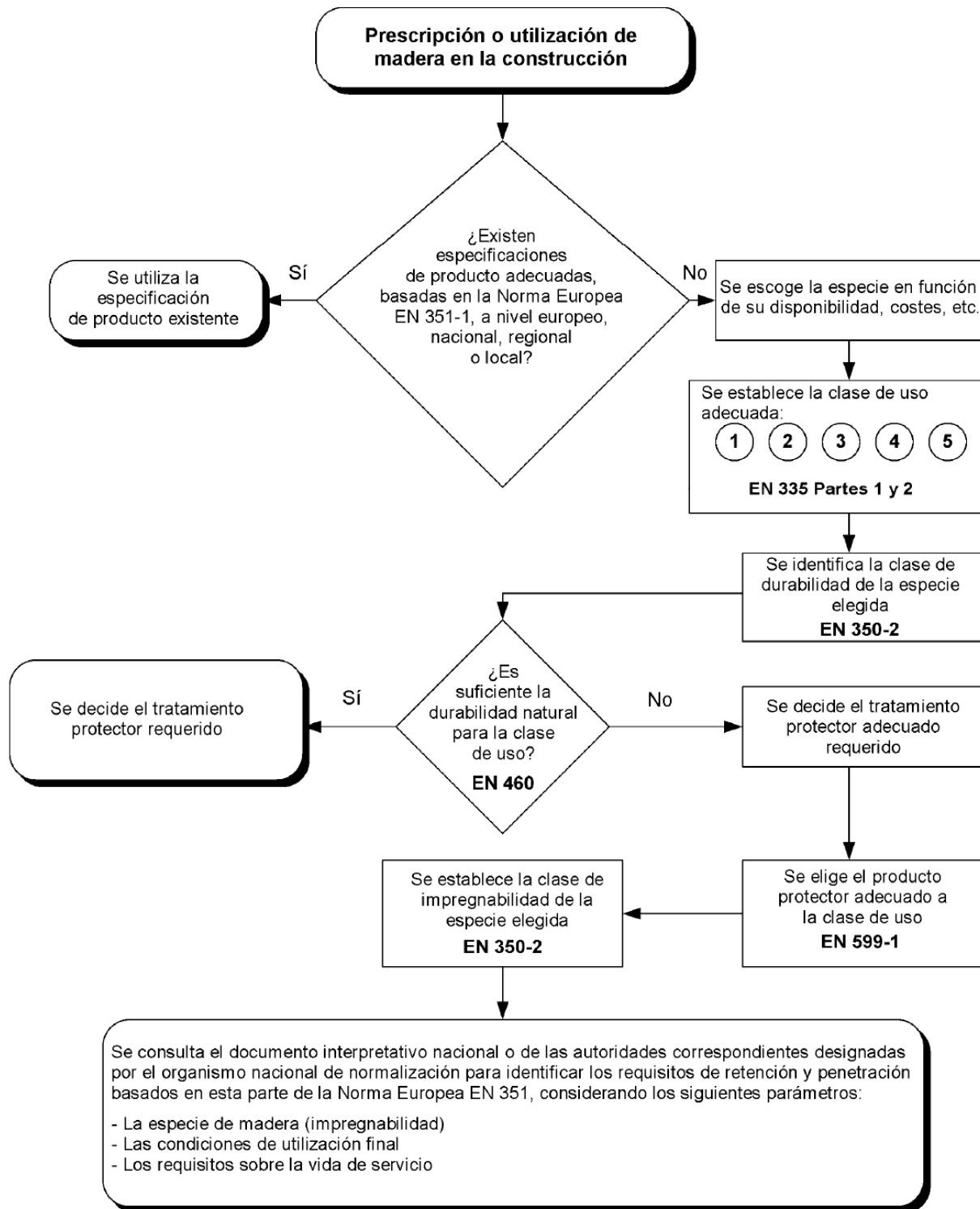
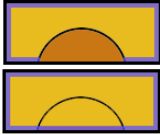


Fig. 106. Diagrama de flujo para la elección del tratamiento protector. Fuente: EN 351-1.

Y, al respecto, la norma EN 351-1 concreta los niveles de penetración:

Tabla 20. Niveles de penetración s. EN 351-1.

Clase de penetración	Especificación	
NP1	Ninguna especificación.	 <p>Si no es posible la distinción entre la albura y el duramen</p>
NP2	Al menos 3 mm en caras laterales en la albura.	
NP3	Al menos 6 mm en caras laterales en la albura.	
NP4	Al menos 25 mm en caras laterales (sólo rollizos).	
NP5	Penetración total en la albura.	
NP6	Penetración total en la albura y 6 mm en duramen expuesto.	

1.2. Diseño estructural en madera en situaciones accidentales

1.2.1. Diseño en situación de incendio

La seguridad en caso de incendio es una de las exigencias básicas más importantes para el desarrollo de la construcción con madera a nivel mundial, razón por la cual las diferentes normas internacionales de edificación establecen unas concienzudas prestaciones de seguridad que los edificios deben satisfacer.

La existencia de carbono en la celulosa hace que la madera sea un material combustible pero, frente a lo que normalmente se considera, cuando se encuentra expuesta a un incendio en pleno desarrollo tiene un comportamiento favorable como material estructural, muy distinto del que se puede predecir desde una aproximación inmediata. En efecto, en este material la combustión no es rápida; comienza lentamente y por la superficie. Paulatinamente se produce una pérdida gradual de sección, que avanza a velocidades bien conocidas experimentalmente. Pero el coeficiente de transmisión térmica del material es muy bajo y, por consiguiente, la propagación del calor en el interior de las piezas es muy difícil y lenta. Tal coeficiente es aún más bajo en las capas carbonizadas externas que se forman en cuanto comienza la combustión superficial. De esta forma el interior de la pieza mantiene su temperatura y sus propiedades iniciales durante un período de tiempo conocido, y la pérdida de capacidad resistente se debe casi exclusivamente a la reducción de la sección. Lógicamente, se exceptúan de esta regla general los elementos que tienen espesores muy pequeños.

El objetivo es mantener la seguridad estructural en una situación accidental en la que el valor de cálculo de las cargas no es el mismo que en situación de servicio, por una lógica de compatibilidad. Por consiguiente, siguiendo la estrategia de los Estados Límite, hay que poner en relación unas sollicitaciones menores con la capacidad de respuesta de una estructura con menor sección pero cuya resistencia puede considerarse algo mayor al excluirse coeficientes de modificación que tienen que ver con el comportamiento a largo plazo y la humedad, que en esta situación accidental y transitoria, obviamente, no entran en juego. Cabe destacar, además, el mantenimiento de la rigidez frente al conocido comportamiento del acero, que la pierde de forma radical a temperaturas perfectamente alcanzables en un incendio

convencional. Así pues, aunque en algunas partes del mundo, supersticiosamente se considera que las edificaciones en madera son más inseguras que aquellas construidas con mampostería, hormigón o acero, y esta premisa, como se ha visto, no siempre es técnicamente correcta.

Por otro lado, es importante tener en cuenta que en el pasado las uniones tradicionales o carpinteras transmitían los esfuerzos directamente de madera a madera, y la finalidad de las piezas metálicas que en su caso existían era mantener las cosas siempre en su posición inicial. En la actualidad, las uniones emplean masivamente placas de transición, clavijas, pasadores, etc. que sí tienen una responsabilidad en la transmisión del esfuerzo. Por ello, es extremadamente importante que se cuide su protección en caso de incendio; por ejemplo, insertándolas en ranuras o taladros que permita a la madera actuar de aislante térmico.

Para identificar las exigencias en cuanto a resistencia, aislamiento e integridad de los elementos constructivos que gobiernan la región de estudio, procede realizar una breve introducción a la terminología y al comportamiento de los materiales y estructuras frente al fuego. Lo primero es diferenciar entre los términos “reacción al fuego”, término que refiere al material, y “resistencia al fuego”, término que refiere a su comportamiento estructural en edificación, y que suelen emplearse indistintamente en muchos casos.

a) Reacción al fuego

La reacción al fuego es la respuesta de un material al exponerse al fuego, medida en términos de su contribución al desarrollo de este con su propia combustión, bajo condiciones específicas de ensayos (CTE-DB-SI); es decir, la reacción depende de la combustibilidad del material.

Se trata una clasificación, y no una magnitud medible en minutos como lo es la resistencia al fuego.

Como ya se ha mencionado es sobradamente sabido, la madera es un material combustible que, de acuerdo con la decisión 2003/43/CE, de la Comisión, de 17 de enero de 2003, modificada por la Decisión 2003/593/CE, de 7 de agosto de 2003, y por la Decisión 2006/673/CE, de 5 de octubre de 2006, por la que se establecen las clases de reacción al fuego para determinados productos de construcción (Tabla 1 del Anexo), queda clasificada tal y como se muestra en la Tabla 21.

Tabla 21. Clasificación de reacción al fuego de paneles de madera (2003/43/CE) ⁽¹⁾

Tipos de paneles de madera ⁽²⁾	Norma referenciada	Densidad mínima (kg/m ³)	Espesor mínimo (mm)	Clase ⁽³⁾ (excluyendo pavimentos)	Clase ⁽⁴⁾ de pavimentos
Tablero de partículas	EN 312	600	9		
Tablero de fibras	EN 622-2	900	6	D-s2, d0	D _{FL} -s1
Tablero de fibras	EN 622-3	600	9	E, pass	E _{FL}
		400			
Tablero de fibras	EN 622-4	250			E _{FL}
Tablero de fibras	EN 622-5	600		D-s2, d0	D _{FL} -s1
Tablero de partícula aglomerado con cemento ⁽⁵⁾	EN 634-2	1000	10	B-s1, d0	B _{FL} -s1
Tablero de virutas orientadas	EN 300	600	9	D-s2, d0	D _{FL} -s1
Tablero contrachapado	EN 636	400			
Tablero de madera maciza	EN 13353		12		

NOTAS:

⁽¹⁾ EN 13986.

⁽²⁾ Paneles de madera montados sin cámara de aire directamente sobre productos de clase A1 o A2-s1, d0 con una densidad mínima de 10 kg/m³ o al menos productos de clase D-s2, d0 con una densidad mínima de 400 kg/m³.

⁽³⁾ Clase según lo dispuesto en la Tabla 1 del Anexo de la Decisión 2000/147/EC.

⁽⁴⁾ Clase proporcionada en la Tabla 1 de del Anexo de la Decisión 2000/147/EC.

⁽⁵⁾ Contenido de cemento al menos del 75% de la masa.

El índice de inflamabilidad del material y su contribución al fuego está indicado por la primera letra, y varía desde A1 a F, siendo A1 la identificación que indica el mejor comportamiento, y F la que indica el peor. El término “s” refiere a la producción de humo y el término “d” a la producción de gases o partículas. Así, el indicador D-s2, d0 de reacción al fuego de la madera aserrada, de madera laminada encolada o CLT, a indicar en el marcado CE del producto, implica una contribución al fuego relativamente alta (D), que produce una cantidad moderada de humo cuando arde (s2) y que no desprende gotas o partículas inflamadas en una fase inicial del incendio (d0).

A nivel normativo, el EC 5 no expone exigencias respecto a la reacción al fuego. Sin embargo, sí pueden existir limitaciones a nivel local.

España

En España, las clases de reacción al fuego para los diferentes materiales se indican en el Real Decreto 842/2013, de 31 de octubre, por el que se aprueba la clasificación de los productos de construcción y de los elementos constructivos en función de sus propiedades de reacción y de resistencia frente al fuego, en concordancia con las decisiones de la Comisión UE. Para el caso de madera sólida y laminada encolada estructural, la clasificación coincide con la europea (D-s2, d0).

El Código Técnico de la Edificación, en su Documento Básico de Seguridad en caso de Incendio (CTE DB SI) establece requerimientos relacionados con la reacción al fuego de los elementos constructivos, decorativos y de mobiliario. En la Tabla 22 se presentan las limitantes existentes en España.

Tabla 22. Exigencias de reacción al fuego de revestimientos interiores (extraído de Tabla 4.1 CTE DB SI).

Situación del elemento		Exigencia de reacción al fuego
Revestimientos de techos y paredes	Zonas ocupables ⁽⁴⁾	C-s2,d0
	Pasillos y escaleras protegidos	B-s1,d0
	Aparcamientos y recintos de riesgo especial ⁽⁵⁾	B-s1,d0
	Espacios ocultos no estancos, tales como patinillos, falsos techos y suelos elevados (excepto los existentes dentro de las viviendas) etc. o que, siendo estancos, contengan instalaciones susceptibles de iniciar o de propagar un incendio.	B-s3,d0

Además, el CTE DB SI también impone limitantes relacionadas a los elementos exteriores para evitar la propagación exterior del fuego, Tabla 23.

Tabla 23. Exigencias de reacción al fuego de los elementos exteriores (CTE DB SI).

Situación del elemento		Exigencia de reacción al fuego
Sistemas constructivos de fachada que ocupen más del 10% de su superficie	Fachadas de altura ≤ 10 m	D-s3,d0
	Fachadas de altura ≤ 18 m	C-s3,d0
	Fachadas de altura > 18 m	B-s3,d0
Sistemas de aislamiento situados en el interior de cámaras ventiladas	Fachadas de altura ≤ 10 m	D-s3,d0
	Fachadas de altura ≤ 28 m	B-s3,d0
	Fachadas de altura > 28 m	A2-s3,d0

En aquellas fachadas de altura igual o inferior a 18 m cuyo arranque inferior sea accesible al público desde la rasante exterior o desde una cubierta, la clase de reacción al fuego, de los sistemas constructivos mencionados en los puntos anteriores, deben ser al menos B-s3,d0 hasta una altura de 3,5 m como mínimo.

Francia

Francia define las tipologías de edificación en lo que denomina familias, que se dividen a su vez en casos, tal y como se recoge en la Tabla 24 (Gaillard, et al., 2018), basado en la Instrucción Técnica Nº 249 (2010), y que aplica tanto a las exigencias de reacción como de resistencia a fuego.

Tabla 24. Definición de las tipologías de edificios para las asignaciones de reacción y resistencia a fuego (Gaillard, et al., 2018)

Familias/casos	1	2	3	4
1	Viviendas aisladas o adosadas con R+1 máximo	Viviendas individuales en planta baja agrupadas en franjas	Viviendas individuales con R+1 en franjas, pero con estructura independiente entre ellas	
2	Viviendas unifamiliares o adosadas de más de R+1	Viviendas de una sola planta, pero con estructura compartida en una franja	Viviendas individuales de más de R+1 en franjas	Vivienda colectiva de no más de 3 plantas (residenciales)
3	Residencial donde la planta superior no está a una cota superior a 28 metros			
4	Residencial donde la planta superior está entre 28 y 50 m de altura			

*R Refiere a planta baja

La Tabla 25 presenta las limitantes de reacción a fuego en Francia.

Tabla 25. Exigencias de reacción al fuego en Francia (Gaillard, et al., 2018).

Situación	Elemento	Familia 1 o Familia 2 individual	Familia 2 colectivo	Familia 3	Familia 4	Chimeneas	
Hall de entrada	Revestimiento de suelo	NA	NA	Cfl-s1	Cfl-s1	Cfl-s1	
	Paredes verticales	NA	C-s3 d0	B-s3 d0	A2-s1 d0	B-s3 d0	
	Techos	NA	C-s3 d0	B-s3 d0	A2-s1 d0	B-s3 d0	
	Muebles grandes	NA	NA	NA	NA	NA	
Escaleras	Revestimiento de escaleras	NA	NA	Dfl-s2	Dfl-s2	Dfl-s2	
	Revestimiento de paredes y techos	NA	C-s3 d0	A2-s1 d0	A2-s1 d0	A2-s1 d0	
	Estructura en voladizo y rodamientos	NA	NA	A1	A1	A1	
Circulación horizontal	Puede haber humo	Revestimiento de suelo	NA	NA	Cfl-s1	Cfl-s1	Cfl-s1
		Paredes verticales	NA	NA	C-s3 d0	C-s3 d0	C-s3 d0
		Techos	NA	NA	B-s3 d0	B-s3 d0	B-s3 d0
	Al aire libre	Paredes verticales	NA	NA	C-s3 d0	C-s3 d0	C-s3 d0
		Techos	NA	NA	C-s3 d0	C-s3 d0	B-s3 d0

Portugal

En Portugal, las exigencias de reacción a fuego (Diario da República, 2008) se presentan de forma resumida en la Tabla 26.

Tabla 26. Exigencias de reacción al fuego en Portugal (Diario da República, 2008).

Definición del elemento	Altura			
	≤ 9 m	≤ 28 m	> 28 m	
Revestimientos exteriores sobre fachadas, marcos de ventanas y cortinas	Sin aberturas	D-s3 d1	D-s3 d1	C-s3 d1
	Revestimientos y ventanas	C-s2 d0	C-s2 d0	B-s2 d0
	Marco de ventana y cortinas	D-s3 d0	D-s3 d0	C-s3 d0
Revestimiento exterior creando caja de aire	Soporte de sistema de aislamiento	C-s2 d0	B-s2 d0	A2-s2 d0
	Revestimiento de la superficie externa y las que enmarcan el espacio de aire ventilado	C-s2 d0	B-s2 d0	A2-s2 d0
	Aislamiento térmico	D-s3 d0	B-s2 d0	A2-s2 d0
Sistema compuesto para aislamiento térmico exterior con revestimiento sobre aislamiento "etics" y el material de aislamiento térmico	Sistema completo	C-s3 d0	B-s3 d0	B-s2 d0
	Aislamiento térmico	E-d2	E-d2	B-s2 d0

b) Resistencia al fuego

La resistencia al fuego es la capacidad de un elemento constructivo para mantener durante un periodo de tiempo determinado las siguientes funciones dentro de una edificación: i) la función portante o resistencia mecánica del elemento estructural (R); ii) la integridad del

elemento constructivo (E), por ejemplo, cuando se trata de un muro de compartimentación; y iii) el aislamiento térmico del elemento constructivo (I).

Así, la resistencia mecánica o estructural a fuego (R) está relacionada directamente con su función estructural, mientras que las resistencias a la integridad (E) y al aislamiento (I) están relacionadas con los elementos constructivos de compartimentación o cerramiento.

i. Resistencia mecánica o estructural (R)

La resistencia mecánica o estructural a fuego (R) se define como la capacidad de un elemento estructural para soportar la exposición al fuego durante un tiempo “t” (normalmente entre 30 y 180 min, dependiendo del uso de la edificación) sin pérdida de su estabilidad estructural. Esta exigencia debe verificarse independientemente del material con que sea realizada la estructura, dado que el no cumplimiento podría implicar su colapso.

El EC 5, en su parte 1-2, establece distintos procedimientos de aplicación para realizar la comprobación estructural para un determinado tiempo de exposición al fuego, siendo el método de la sección reducida el más comúnmente aplicado. Básicamente, consiste en determinar la resistencia de los elementos estructurales de madera con una sección parcialmente consumida ante la acción representada por la curva normalizada tiempo-temperatura. Se realiza poniendo en relación el valor de cálculo de las acciones actuantes en esta situación accidental, con la capacidad de respuesta resistente, en cuyo valor de cálculo intervienen coeficientes de modificación distintos a los de la situación persistente. Para ello se utilizan criterios probabilísticos acordes con el carácter accidental de la situación. Para conocer las dimensiones de dicha sección reducida se parte de la velocidad de avance de la carbonización, que es conocida experimentalmente y se puede considerar constante. Por ello, es posible estimar la profundidad carbonizada a partir de dicha velocidad de carbonización, muy dependiente de la familia botánica a la que pertenezca la madera.

Sin embargo, EC 5 no establece las limitantes en cuanto al tiempo de exposición a fuego que deben ser capaces de soportar los distintos elementos estructurales; sino que las exigencias quedan relegadas a la normativa local de cada país.

España

El CTE DB SI establece exigencias de resistencia al fuego de los elementos estructurales principales de las estructuras, como son forjados, pilares y vigas (Tabla 27). Según estos requisitos, para un edificio residencial de vivienda, residencial público, docente o administrativo de altura menor a 15 m, todos los elementos estructurales, sean de madera u otro material, deben cumplir con una resistencia a fuego de 60 min., que pasan a ser de 90 min. para edificios de hasta 28 m de altura y 120 min. para alturas mayores a 28 m.

Tabla 27. Exigencia de resistencia a fuego de los elementos estructurales (extraída de Tabla 3.1 CTE DB SI).

Uso del sector de incendio considerado	Plantas de sótano	Plantas sobre rasante		
		Altura de evacuación del edificio		
		≤ 15 m	≤ 28 m	> 28 m
Vivienda unifamiliar	R 30	R 30	–	–
Residencial Vivienda, Residencial Público, Docente, Administrativo	R 120	R 60	R 90	R 120
Comercial, Pública Concurrencia, Hospitalario	R 120	R 90	R 120	R 180
Aparcamiento (edificio de uso exclusivo o situado sobre otro uso)			R 90	
Aparcamiento (situado bajo un uso distinto)			R 120	

Por otro lado, si los elementos estructurales se ubican en una zona de riesgo especial, deberán cumplir con la resistencia exigida en la Tabla 28.

Tabla 28. Exigencia de resistencia al fuego de los elementos estructurales en zonas de riesgo especial integradas de los edificios (extraída de la Tabla 3.2 del CTE DB SI).

Tipo de riesgo	Exigencia de resistencia a fuego
Riesgo especial bajo	R 90
Riesgo especial medio	R 120
Riesgo especial alto	R 180

Francia

Las exigencias de resistencia a fuego de Francia se recogen en la Tabla 29 (Gaillard, et al., 2018).

Tabla 29. Exigencia de resistencia a fuego en Francia (Gaillard, et al., 2018).

		Familia			
		1	2	3	4
Elementos estructurales	Piso y elementos portantes verticales	R 15	R 30	R 60	R 90
Superposición vertical:	Individual en banda o colectivo	R 30	R 60	R 90	R 90
Muro de carga	Individual	R 15	R 15	NA	NA
	Colectivo	NA	R 30	R 30	R 60

Portugal

Las exigencias de resistencia a fuego en función de la clase de riesgo en Portugal están establecidas en el Anexo I del Diario de la República serie 1ª Nº 250 (Diario de la República, 2008) y se resumen en la Tabla 30, siendo el Decreto de Lei 220/2009 el que define los tipos de edificios (I-XII).

Tabla 30. Resistencia al fuego suficiente de los elementos estructurales en Portugal (Diario da República, 2008).

Estructura tipo	Requisito	Riesgo			
		1	2	3	4
I Vivienda unifamiliar o plurifamiliar	Resistencia	R30	R60	R90	R120
II Estacionamiento	Resistencia	R60	R90	R120	R180
III Administrativo	Resistencia	R30	R60	R90	R120
IV Escolares	Resistencia	R30	R60	R90	R120

V	Hospitales	Resistencia	R30	R60	R90	R120
VI	Espectáculos y reuniones públicas	Resistencia	R30	R60	R90	R120
VII	Hoteles y restauración	Resistencia	R30	R60	R90	R120
VIII	Comerciales y estaciones de transporte	Resistencia	R30	R60	R90	R120
IX	Deportivos y recreativos	Resistencia	R30	R60	R90	R120
X	Museos y Galerías	Resistencia	R30	R60	R90	R120
XI	Bibliotecas y archivos	Resistencia	R60	R90	R120	R180
XII	Industrias, oficinas y almacenes	Resistencia	R60	R90	R120	R180

ii. Integridad (E) y aislamiento (I) de los elementos constructivos

Las funciones de integridad y de aislamiento, tal y como fue anteriormente mencionado, están relacionadas con los elementos de compartimentación y cerramiento. La integridad se garantiza si el elemento mantiene su geometría, no permitiendo el paso del fuego a través de él.

Al igual que en el caso de la resistencia a fuego, las exigencias de integridad y aislamiento vienen establecidas por cada país.

España

El CTE DB SI establece las exigencias de resistencia al fuego de los elementos constructivos que delimitan sectores de incendio, para garantizar que la estructura presente un comportamiento adecuado en cuanto a integridad y aislamiento (Tabla 31).

Tabla 31. Resistencia al fuego de las paredes, techos y puertas que delimitan sectores de incendio (Tabla 1.2 del CTE DB SI).

Elemento	Plantas bajo rasante	Resistencia al fuego		
		Plantas sobre rasante en edificio con altura de evacuación:		
		$h \leq 15 \text{ m}$	$15 < h \leq 28 \text{ m}$	$h > 28 \text{ m}$
Paredes y techos que separan al sector considerado del resto del edificio, siendo su uso previsto:				
- Sector de riesgo mínimo en edificio de cualquier uso	(no se admite)	EI 120	EI 120	EI 120
- Residencial Vivienda, Residencial Público, Docente, Administrativo	EI 120	EI 60	EI 90	EI 120
- Comercial, Pública Concurrencia, Hospitalario	EI 120	EI 90	EI 120	EI 180
- Aparcamiento	EI 120	EI 120	EI 120	EI 120
Puertas de paso entre sectores de incendio	EI2 t-C5 siendo t la mitad del tiempo de resistencia al fuego requerido a la pared en la que se encuentre, o bien la cuarta parte cuando el paso se realice a través de un vestíbulo de independencia y de dos puertas.			

Se establecen también los criterios de integridad y aislamiento a satisfacer en zonas de riesgo especial, determinado de acuerdo con lo establecido en la Tabla 2.2. del CTE DB SI, integradas en edificios (Tabla 32).

Tabla 32. Condiciones de las zonas de riesgo especial integradas en edificios (Tabla 2.2 CTE DB SI).

Característica	Riesgo bajo	Riesgo medio	Riesgo alto
Resistencia al fuego de la estructura portante	R 90	R 120	R 180
Resistencia al fuego de las paredes y techos que separan la zona del resto del edificio	EI 90	EI 120	EI 180
Vestíbulo de independencia en cada comunicación de la zona con el resto del edificio	–	Sí	Sí
Puertas de comunicación con el resto del edificio	EI ₂ 45-C5	2 x EI ₂ 30 -C5	2 x EI ₂ 45-C5
Máximo recorrido hasta alguna salida del local	≤ 25 m	≤ 25 m	≤ 25 m

Por otro lado, se imponen limitantes relacionadas a los elementos exteriores para evitar la propagación exterior del fuego, destacando la de medianeras y fachadas, donde los elementos verticales separadores con respecto a otro edificio deben ser al menos EI 120.

Francia

Las exigencias de resistencia a fuego en cuanto a integridad y estanqueidad de los elementos constructivos se recogen en la Tabla 33 (Gaillard, et al., 2018).

Tabla 33. Resistencia al fuego de las paredes, techos y puertas que delimitan sectores de incendio en Francia (Gaillard, et al., 2018).

		Familia			
		1	2	3	4
Elementos estructurales	Pisos	REI 15	REI 30	REI 60	REI 90
	Paredes verticales de la envolvente excluyendo fachadas	NA	EI 30	EI 30	EI 60
Superposición vertical: Muro de carga	Individual en banda o colectivo	REI 30/EI 30 C	REI 60/EI 30 C	REI 90/EI 30 C	REI 90/EI 60 C
	Individual	REI 15	REI 15	NA	NA
	Colectivo	NA	REI 30/E15	REI 30/E 15	REI 60/E 30
Superposición vertical: No Muro de Carga	Individual en banda o colectivo	EI 30	EI 60	EI 90	EI 90
	Individual	EI 15	EI 15	NA	NA
	Colectivo	NA	EI 30/E 15	EI 30/E 15	EI 60/E 30

Portugal

Las exigencias de resistencia y compartimentación en caso de incendio en función de la clase de riesgo en Portugal están establecidas en el Anexo I del Diario de la República serie 1ª Nº 250 (Diario de la República, 2008) y se resumen en la 0, siendo el Decreto de Lei 220/2009 el que define los tipos de edificios (I-XII).

Resistencia (R), integridad (I) y aislamiento (E) de los elementos constructivos en caso de incendio en Portugal (Diario da República, 2008).

	Estructura tipo	Requisito	Exigencia (min)			
			1	2	3	4
I	Vivienda unifamiliar o plurifamiliar	R y C	REI30	REI60	REI90	REI120
II	Estacionamiento	R y C	REI60	REI90	REI120	REI180
III	Administrativo	R y C	REI30	REI60	REI90	REI120
IV	Escolares	R y C	REI30	REI60	REI90	REI120
V	Hospitales	R y C	REI30	REI60	REI90	REI120
VI	Espectáculos y reuniones públicas	R y C	REI30	REI60	REI90	REI120
VII	Hoteles y restauración	R y C	REI30	REI60	REI90	REI120
VIII	Comerciales y estaciones de transporte	R y C	REI30	REI60	REI90	REI120
IX	Deportivos y recreativos	R y C	REI30	REI60	REI90	REI120
X	Museos y Galerías	R y C	REI30	REI60	REI90	REI120
XI	Bibliotecas y archivos	R y C	REI60	REI90	REI120	REI180
XII	Industrias, oficinas y almacenes	R y C	REI60	REI90	REI120	REI180

1.2.2. DISEÑO EN SITUACIÓN DE SISMO

El diseño de estructuras sismorresistentes está regulado a nivel europeo por la Norma EN 1998-1, que brinda las reglas generales, detalla la definición de acciones y define las reglas específicas para el diseño de edificios. Estas últimas se diferencian en función del material que compone el edificio. Las reglas específicas para edificios de madera se desarrollan en el capítulo 8 de la norma.

En general, la resistencia y la capacidad de disipación de energía que se puede asignar a una estructura está relacionada con el grado con el que se puede aprovechar la respuesta no-lineal de la misma. A nivel de diseño, ese balance entre resistencia y capacidad de disipación de energía está caracterizado por el factor de comportamiento q y por la clase de ductilidad asociada a la estructura.

En la Tabla 8.1 de la norma se definen las clases de ductilidad de las estructuras de madera en función del comportamiento dúctil y la capacidad de disipación de energía bajo cargas sísmicas que posea el edificio. Se definen tres clases de ductilidad L , M o H que se asocian a una baja, media o alta capacidad para disipar energía, respectivamente. Para cada clase de ductilidad, y en función de la tipología estructural, se definen los valores límite del factor de comportamiento q , parámetro de interés en el diseño sismorresistente (Tabla 34). La norma prevé que los Anexos Nacionales puedan establecer límites geográficos específicos para las clases de ductilidad DCM y DCH.

Tabla 34. Concepto de diseño, tipologías estructurales y valores límite superiores para el factor de comportamiento q para las tres clases de ductilidad (Tabla 8.1 del EN 1998-1).

Concepto de diseño y clase de ductilidad	q	Ejemplos de estructuras
Baja capacidad para disipar energía - DCL	1,5	Voladizos; vigas; arcos con dos o tres articulaciones; vigas en celosía con conectores.
Capacidad media para disipar energía - DCM	2	Paneles de muro encolados con diafragmas encolados, conectados con clavos y pernos; Estructuras mixtas consistentes en entramado de madera (que resisten cargas horizontales) y el relleno que no soporta carga.
	2,5	Pórticos hiperestáticos con uniones con tornillos o pernos (ver 8.1.3(3)P).
Alta capacidad para disipar energía - DCH	3	Paneles de muro calvados con diafragmas encolados, conectados con clavos y tornillos; Vigas en celosía con uniones clavadas
	4	Pórticos hiperestáticos con uniones con tornillos o pernos (ver 8.1.3(3)P).
	5	Paneles de muro o pared calvados con diafragmas calvados, conectados con clavos y tornillos.

España

En lo que respecta a España, no hay limitaciones geográficas para el uso de las clases DCM y DCH para estructuras de madera, según lo establece el Anexo Nacional AN/UNE-EN 1998-1.

Francia

En Francia tampoco hay limitaciones geográficas para el uso de las clases DCM para estructuras de madera, pero sí realiza modificaciones con respecto a las clases DCH, según lo establece el Anexo Nacional NF EN 1998-1/NA.

En particular, declaran que poseen resultados experimentales convincentes de investigaciones científicas en referencia a las clases DCH que no les permiten mantener las dos primeras tipologías estructurales que se dan como ejemplo para la clase H en la Tabla 8.1 de la norma EN 1998-1, manteniendo únicamente en dicha clase el último ejemplo *Nailed wall panels with nailed diaphragms, connected with nails and bolts* y estableciendo para este el límite superior de q en un valor de 3 en lugar de 5.

Portugal

En lo que respecta a Portugal, no hay limitaciones geográficas para el uso de las clases DCM y DCH para estructuras de madera, según lo establece el Anexo Nacional NP-EN 1998-1/NA.

2. DISEÑO ACÚSTICO

La acústica en edificación tradicional es un tema que en general no es muy relevante, sin embargo, en las sociedades modernas el diseño acústico toma enorme relevancia e incluso puede ser restrictivo y determinante de las soluciones elegidas.

El sonido en los edificios se puede transmitir a través de dos vías, por aire (ruido aéreo) o a través de la estructura (ruido de impacto). Por lo tanto, la caracterización de los edificios se basará en los parámetros de aislamiento con respecto a ambos tipos de ruido.

A la hora de caracterizar el aislamiento a ruido aéreo se realizan mediciones experimentales con el fin de verificar que el ruido no se transmite al recinto receptor, por lo que se podría decir que se trata de la diferencia entre el ruido que se emite y el que se recibe. Así, cuanto mayor sea el valor, mejor será el comportamiento de aislamiento acústico por ruido aéreo. Sin embargo, para caracterizar el ruido de impacto, se considera la medición del ruido que se transmite al recinto receptor, por lo que cuanto mayor sea el valor, será peor el comportamiento de aislamiento frente a ruido de impacto. Por lo tanto, las limitantes normativas suelen ser valores mínimos de aislamiento a ruido aéreo, y valores máximos de transmisión del ruido de impacto.

Los sistemas constructivos con madera son diversos, y también son diversas las formas de unión empleadas, lo que hace que el análisis acústico tenga una mayor dificultad, dado que no sólo basta con caracterizar el comportamiento acústico de los elementos estructurales, sino también se debe estudiar cómo se transmite el ruido entre los elementos según sea el medio de unión.

La metodología de diseño acústico consiste entonces en: 1) caracterizar acústicamente cada uno de los elementos del sistema constructivo, que suele ser realizada en laboratorio; 2) diseñar la solución constructiva completa mediante cálculos predictivos para considerar la

interacción de unos elementos con otros; y 3) validar la solución constructiva mediante ensayos *in situ* con el edificio terminado.

Los laboratorios de acústica están contruidos de manera que el ruido sólo pase a través del elemento constructivo que se va a ensayar. En base a los ensayos que se han realizado para caracterizar distintos elementos, se han creado bases de datos del aislamiento de distintas soluciones constructivas. Ejemplos de estas bases de datos pueden ser Lignum (Suiza) o Dataholz (Austria). El uso de estas bases de datos le permite al profesional encargado del diseño acústico tener una aproximación al comportamiento que presentan los distintos elementos.

Los cálculos predictivos para estimar el aislamiento a ruido aéreo y de impacto se basan en las normas internacionales ISO 12354-1:2017 y ISO 12354-2:2017, respectivamente.

Se detallan a continuación las exigencias establecidas en cada país de la región, y se identifica la normativa o fuente de referencia.

España

En España, el Código Técnico de la Edificación, en su Documento Básico de Protección frente a Ruido (CTE DB HR) establece los valores límite a cumplir en relación con el diseño acústico del edificio, independientemente del material con que se realice la edificación. No obstante, establece diferencias en el método a utilizar para realizar la verificación en función del material, viéndose penalizado el uso de madera respecto a materiales convencionales como el hormigón o el acero. El CTE establece dos opciones para verificar la protección frente a ruido con el fin de diseñar correctamente.

Establece una opción simplificada, basada en tablas sencillas obtenidas de cálculos previos y que sirven para una aplicación directa; no obstante, esta opción simplificada no es aplicable a forjados de madera, ni a forjados mixtos de madera y hormigón en casos generales. Sí es aplicable esta opción para justificar el cumplimiento frente al ruido exterior cuando no hay requisitos acústicos entre recintos interiores, como es el caso de las viviendas unifamiliares.

La otra opción es la general del CTE y que está basada en la norma ISO 12354:2017. Este método general presenta una cláusula o modificación que aplica a estructuras de madera y penaliza su uso debido a que no es posible utilizar valores de reducción de presión de ruido de impacto en forjados con un peso menor a 300 kg/m² o en forjados de vigas de madera. Los valores límite que establece el CTE DB HR y que, por tanto, rigen en España para el caso de recintos no pertenecientes a la misma unidad de uso se presentan en la Tabla 35.

Tabla 35. Exigencias de aislamiento acústico en recintos no pertenecientes a la misma unidad de uso en España (CTE DB HR).

Tipo de aislamiento acústico	Valores límite
Ruido aéreo	≥ 50 dBA
Ruido de impacto	≤ 65 dB

Francia

En Francia actualmente aplican las regulaciones existentes a nivel nacional para estructuras de cualquier material, no existiendo limitantes específicas para el diseño acústico de estructuras de madera. Las limitantes para el caso de recintos no pertenecientes a la misma unidad de uso se recogen en la Tabla 36 y están basados en la publicación de Ramusen (2019).

Tabla 36. Exigencias de aislamiento acústico en recintos no pertenecientes a la misma unidad de uso en Francia (Ramusen, 2019)

Tipo de aislamiento acústico	Valores límite
Ruido aéreo	≥ 53 dBA
Ruido de impacto	≤ 58 dBA

Portugal

Basadas en la misma publicación de Ramusen (2019), se presentan en la Tabla 37 las limitantes de Portugal para el caso de recintos no pertenecientes a la misma unidad de uso.

Tabla 37. Exigencias de aislamiento acústico en recintos no pertenecientes a la misma unidad de uso en Portugal (Ramusen, 2019).

Tipo de aislamiento acústico	Valores límite
Ruido aéreo	≥ 50 dBA
Ruido de impacto	≤ 60 dBA

Si se compara la exigencia normativa referida al aislamiento a ruido aéreo, encontramos que en general los 3 países de la región presentan exigencias similares, siendo Francia el que presenta la exigencia más restrictiva. En el caso de aislamiento a ruido de impacto, Francia es de nuevo el que presenta la exigencia más restrictiva y España el menos exigente.

A modo de comparativa entre 35 países europeos, las siguientes figuras (Fig. 107 y Fig. 108) presentan las exigencias en cuanto a ruido aéreo y de impacto, respectivamente.

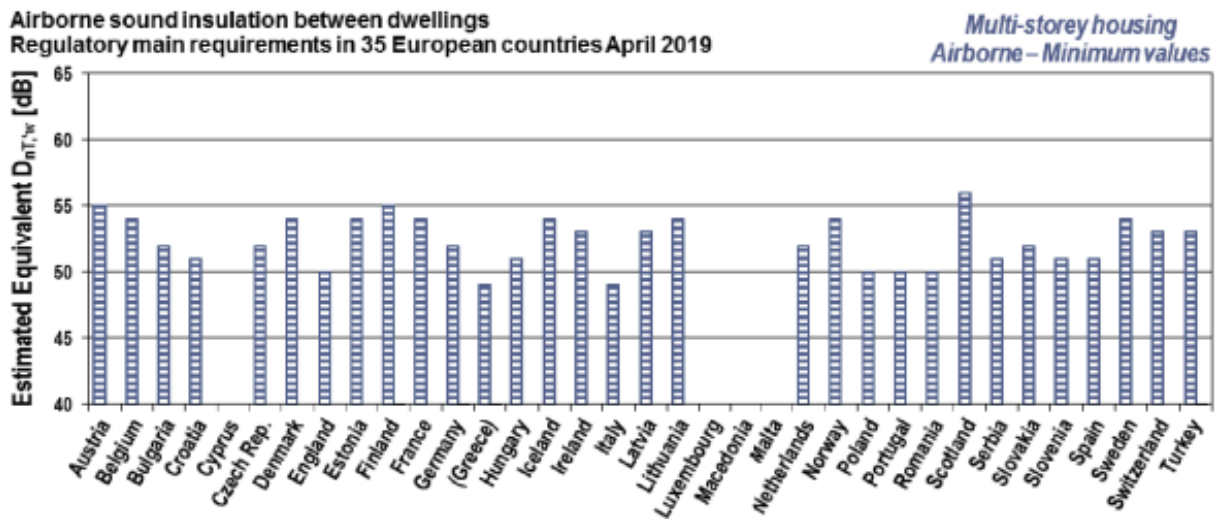


Fig. 107. Valor límite de aislamiento acústico a ruido aéreo para el caso de recintos no pertenecientes a la misma unidad de uso en los diferentes países europeos. Fuente: (Ramusen, 2019).

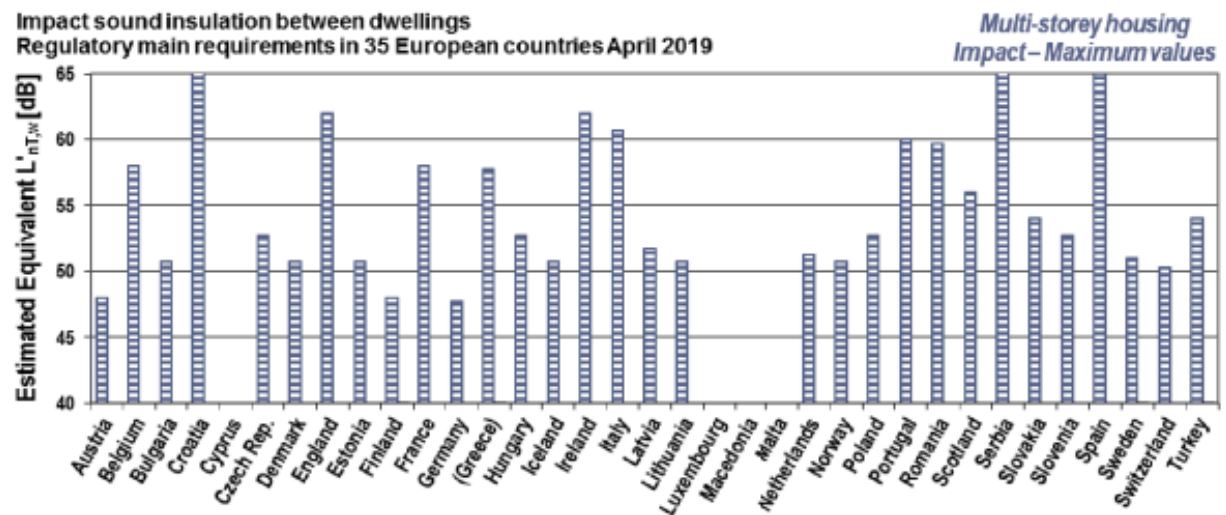


Fig. 108. Valor límite de aislamiento acústico a ruido de impacto para el caso de recintos no pertenecientes a la misma unidad de uso en los diferentes países europeos. Fuente: (Ramusen, 2019).

A la vista de estas figuras (Fig. 107 y Fig. 108) se observa que los países de la región SUDOE no son los que presentan las mayores exigencias, siendo países como Austria, Finlandia, Alemania, Suecia y Suiza los más restrictivos.

PÁGINA INTENCIONADAMENTE EN BLANCO