

Proyecto Erasmus+ 2022-1-NO01-KA220-HED-000087893

Este proyecto Erasmus+ ha sido financiado con el apoyo de la Comisión Europea. La Comisión Europea y las Agencias Nacionales Erasmus+ no se hacen responsables del uso que pueda hacerse de la información aquí difundida.

Proyecto de construcción BIM-LCA

Título: Utilización de la madera como material de construcción



1 - Objetivos

Los objetivos de este tutorial sobre la madera son los siguientes:

- Conocer las ventajas medioambientales del uso de la madera como principal material de construcción en los edificios.
- Conocer el estado de la tecnología para fabricar elementos de madera para estructuras de edificios.
- Conocer la tipología de los sistemas de estructuras de madera para edificios.
- Conocer los resultados de una evaluación del ciclo de vida (ECV) que compara los impactos ambientales de un edificio de madera con los del mismo edificio de hormigón.

2 - Metodología de aprendizaje

El profesor dará una explicación sobre la madera como material de construcción de unos 30 minutos.

Los alumnos leerán este tutorial y seguirán los pasos que en él se indican, a saber:

- Las ventajas de la madera como material de construcción. (Vídeo Ted talk incluido).
- Gestión forestal.
- Normas de construcción en madera y guías de diseño.
- Sistemas estructurales en la construcción con madera.
- Elementos estructurales en la construcción de madera.
- Conexiones en estructuras de madera.
- Resistencia sísmica en estructuras de madera. (Vídeo incluido).
- Madera y seguridad contra incendios.
- Deterioro de la madera por agentes biológicos.
- Software de diseño de madera maciza.
- Ejemplo de diseño de un edificio de madera maciza. Stora Enso. (estudio de ACV incluido)

Para evaluar el éxito de la solicitud, se realizará un cuestionario a los estudiantes.

3 - Duración de la tutoría

La implementación descrita en este tutorial se llevará a cabo a través del sitio web del Proyecto BIM-LCA mediante autoaprendizaje.

3 horas lectivas son adecuadas para esta formación.

4 - Recursos didácticos necesarios

Sala de ordenadores con acceso a Internet.

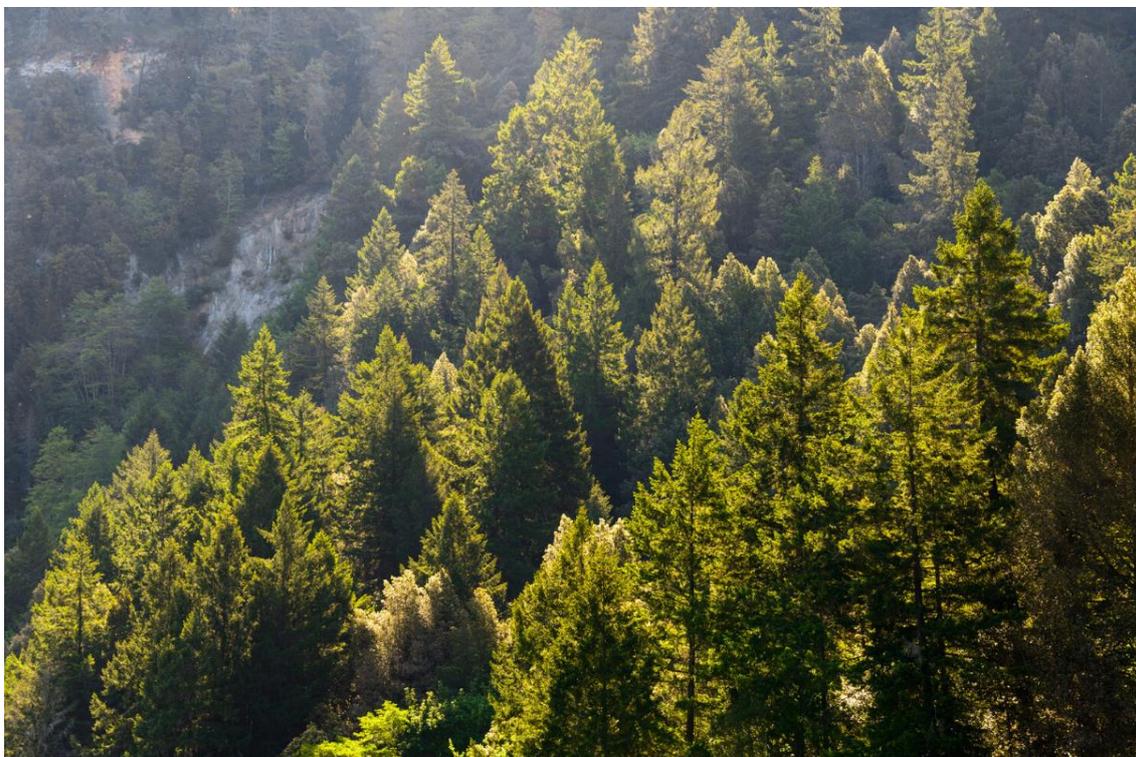
Software necesario: Microsoft Office.

5 - Contenido y tutorial

5.1 - Introducción. Las ventajas de la madera como material de construcción

5.1.1. Sostenibilidad máxima

La madera destaca como material de construcción excepcionalmente renovable, sobresaliendo en sostenibilidad. Durante su crecimiento, los árboles capturan y retienen el nocivo dióxido de carbono, secuestrando eficazmente el CO₂ dentro de la madera en lugar de emitirlo al aire. De ahí que sea crucial talar los árboles sólo cuando han alcanzado la plena madurez y han dejado de absorber CO₂, garantizando así las máximas ventajas medioambientales. Cuando los bosques son gestionados de forma responsable por propietarios que dan prioridad a la reposición de recursos frente al agotamiento, puede estar seguro de que la madera que utiliza ha sido talada de forma respetuosa con el medio ambiente. [1].



La energía incorporada abarca la energía total necesaria para fabricar un producto o prestar un servicio. En el sector de la construcción, esto incluye la energía gastada durante los procesos de construcción, producción y transporte, que suelen constituir

aproximadamente el 30-50% de la huella de carbono total de un proyecto. Convertir los árboles en madera para la construcción implica un consumo energético mínimo, y el proceso de construcción suele exigir sólo una fracción del transporte necesario para el hormigón.

Estos factores contribuyen a que la madera reciba la calificación más baja en cuanto a energía incorporada entre los materiales de construcción más utilizados.

Por ejemplo, una viga de madera requiere aproximadamente 80 megajulios (MJ) de energía por metro cuadrado de superficie y emite 4 kilogramos de CO₂. En cambio, un metro cuadrado de suelo sostenido por una viga de acero requiere 516 MJ y emite 40 kilogramos de CO₂, mientras que un suelo de losa de hormigón requiere 290 MJ y emite 27 kilogramos de CO₂.

La madera no sólo presume de una resistencia y durabilidad excepcionales, sino que también mantiene unos estándares de alta calidad, incluso cuando se tiene en cuenta la velocidad de construcción. Las estructuras de madera pueden durar siglos y son más rentables y fáciles de mantener que otros materiales alternativos.

5.1.2. Eficiencia térmica

Las características inherentes a este material también contribuyen a su reputación de respetuoso con el medio ambiente. La madera, al ser un aislante natural, contiene diminutas bolsas de aire que restringen su capacidad de transmitir calor. Esta característica reduce la energía necesaria para calentar y refrigerar las viviendas, lo que se traduce en una menor dependencia de los combustibles fósiles. Además, los armazones de madera ofrecen más espacio para el aislamiento que las estructuras de ladrillo, mejorando así la eficiencia térmica.

5.1.3. Facilidad de montaje

La madera, conocida por su ligereza y adaptabilidad, ofrece facilidad de manejo e instalación. Esto simplifica el proceso de construcción, haciéndolo más rápido, más rentable y menos perturbador. Se convierte en una opción ideal para el desarrollo de zonas industriales abandonadas y la construcción urbana, creando obras más silenciosas, tranquilas y limpias.



Además, la madera destaca en la fabricación fuera del emplazamiento, lo que reduce significativamente los tiempos de construcción hasta en un 50%. Las estructuras de madera pueden precortarse con precisión y montarse fácilmente con menos trabajadores, menos entregas in situ y un mínimo de residuos. La fabricación en un entorno de fábrica controlado elimina los problemas relacionados con el clima, reduce la probabilidad de defectos y disminuye el riesgo de lesiones. Además, la mayor automatización del proceso de fabricación reduce la dependencia de la mano de obra cualificada tradicional. En términos de ahorro de costes, la construcción en madera destaca como una alternativa considerablemente más rentable que los métodos de construcción tradicionales.

5.1.4 ¿Un material clásico o el principal material de construcción en el futuro?

Michael Green, arquitecto de Vancouver, es uno de los principales defensores de la construcción de rascacielos de madera en Norteamérica. En su charla TED, afirmó que la madera es el material más avanzado que puede utilizar y habló de la necesidad de crear un logro significativo, como la Torre Eiffel, utilizando madera.

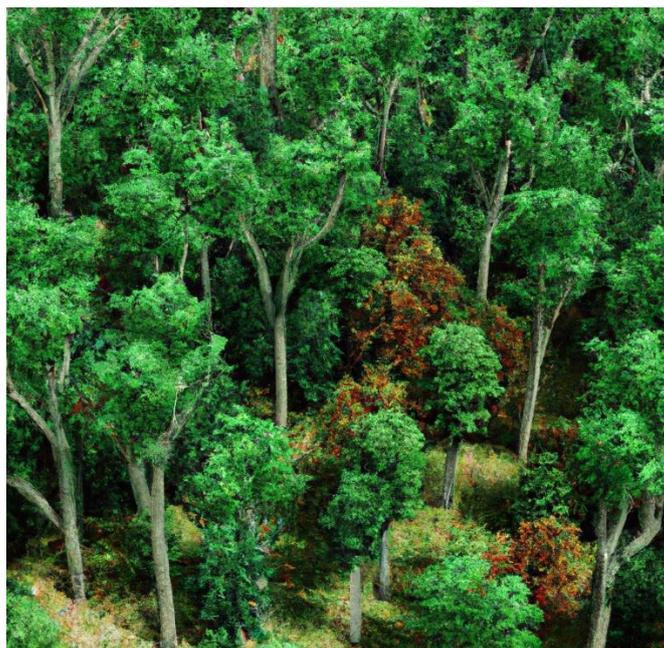


[Vídeo 1](#)

5.2 - Gestión forestal

5.2.1. Silvicultura y madera

En el mundo interconectado de hoy, tenemos que pensar en los bosques y la madera de diferentes maneras: en nuestras zonas locales, en las regiones cercanas y en todo el mundo. En la actualidad, alrededor del 30% de la superficie terrestre, unos 4.000 millones de hectáreas, está cubierta de bosques. Pero estos bosques se han ido reduciendo durante muchos años debido a prácticas como quemar la tierra para despejarla y destinarla a la agricultura, convertirla en tierras de cultivo y talar árboles ilegalmente. Sin embargo, la velocidad a la que desaparecen los bosques se ralentizó un poco entre 2010 y 2015. Aunque cada año se plantan unos 4,3 millones de hectáreas de nuevos bosques, seguimos perdiendo 3,3 millones de hectáreas de bosque al año.



Los bosques de distintas partes del mundo, como las zonas tropicales, subtropicales, frías y templadas, son cruciales para obtener madera que podamos utilizar. Pero, cuando se trata de fabricar productos de madera, los bosques de cultivo de Europa son el centro de atención. Estos bosques se gestionan de un modo que es bueno para muchas cosas, no sólo para obtener madera. Ayudan a proteger el medio ambiente, proporcionan lugares para el disfrute de la gente y sustentan una gran variedad de plantas y animales.

Por otro lado, hay una gran industria en todo el mundo que planta y cultiva ciertos tipos de árboles, como eucaliptos y pinos de crecimiento rápido, principalmente para fabricar cosas como madera para energía, papel y otros productos. Cultivan estos árboles en grandes grupos, y no es tan bueno para el medio ambiente.

Cada año, los bosques de la Tierra nos dan mucha madera, unos 3.700 millones de metros cúbicos (que son como 2.200 millones de toneladas). De esa cantidad, aproximadamente la mitad se utiliza para producir energía y la otra mitad se transforma en otros productos, como madera para la construcción. Por tanto, la madera sigue siendo un material muy importante que podemos seguir utilizando, y es uno de los tres materiales que más utilizamos y que proceden de la naturaleza.

5.2.2. Presente y futuro de los recursos madereros en Europa

Durante muchos siglos, los habitantes de Europa han cuidado sus bosques e incluso los han cultivado especialmente para obtener madera para construir cosas como casas. En la Unión Europea, que cuenta con 28 países miembros, hay 180 millones de hectáreas de bosques, que cubren alrededor del 41% de su territorio. Sorprendentemente, la superficie forestal aumentó un 5% entre 1990 y 2010, y sólo en Alemania aumentó en 48.000 hectáreas entre 2002 y 2012.

Estos bosques europeos contienen mucha madera. Por ejemplo, en Alemania hay unos 3.700 millones de metros cúbicos de madera, y en toda la UE es aún más, unos 22.500 millones de metros cúbicos. Alemania es el país de la UE con más reservas de madera, a excepción de Suiza y Austria. De media, en Alemania hay unos 336 metros cúbicos de madera por hectárea de tierra. Y en Alemania vuelven a crecer cada año unos 120 millones de metros cúbicos de madera, de los que unos 80 millones se utilizan como troncos en bruto.

Todas estas cifras nos dicen que Alemania tiene materia prima de sobra, y que no se va a agotar pronto. De hecho, **un cálculo demostró que todos los edificios nuevos construidos en Alemania podrían hacerse con sólo un tercio de la cantidad media de madera que el país puede obtener de forma sostenible de sus bosques.**

Para utilizar la madera de forma sostenible, debemos asegurarnos de que cuidamos bien nuestros bosques y ayudamos a que vuelvan a crecer. Una forma de hacerlo es tener bosques diversos que se ajusten a sus ubicaciones y climas específicos. Estos bosques diversos se parecerán más a los naturales y se mantendrán sanos con el paso del tiempo. Tendrán muchos tipos diferentes de árboles, más madera dura y más madera muerta y en descomposición, lo que es bueno para el medio ambiente.

En Alemania han estudiado cómo crecen sus bosques y cuánta madera pueden obtener en el futuro. Para ello han utilizado un modelo llamado "Waldentwicklungsund Holzaufkommensmodellierung" (WEHAM), que es una forma elegante de modelizar el desarrollo de los bosques y los recursos madereros. Según este modelo, esperan disponer de unos 80 millones de metros cúbicos de troncos en bruto al año durante los próximos 40 años. Esto significa que la cantidad de madera en los bosques alemanes aumentará hasta unos 3.900 millones de metros cúbicos.

Sin embargo, también prevén que cambie el tipo de madera que obtienen. En la actualidad, la mayoría de los troncos que utilizan para la construcción proceden del abeto (alrededor del 44%). Pero en 2027, la cantidad de troncos de abeto disponibles se reducirá a un 35%. En su lugar, dispondrán de más madera blanda de pinos y abetos Douglas. También habrá un gran aumento de hayas y robles. Este cambio se debe al cambio climático, que hará que los bosques caducifolios y mixtos sean más importantes para obtener madera en Europa.

5.3- Normas de construcción en madera y guías de diseño.

Americanos:

- El American Wood Council (AWC) y el International Code Council han lanzado una publicación conjunta, **Mass Timber Buildings and the IBC**, que ofrece una visión general de los requisitos para la construcción con madera en masa que se encuentran en el *Código Internacional de la Edificación* (IBC) de 2015, 2018 y 2021.

- **La Especificación Nacional de Diseño (NDS) de 2018 para construcciones de madera** fue desarrollada por el Comité de Estándares de Diseño de Madera del Consejo Americano de la Madera (AWC) y ha sido aprobada por ANSI como Estándar Nacional Americano. La NDS de 2018 se menciona en el Código Internacional de la Edificación de 2018. Las adiciones significativas a la NDS de 2018 incluyen nuevos clavos de vástago anular para revestimiento de techos y disposiciones de diseño de tracción de la cabeza del sujetador para abordar el aumento de las cargas de viento en ASCE 7-16 Cargas mínimas de diseño y criterios asociados para edificios y otras estructuras.
- La norma ANSI/AWC 2021 ***Special Design Provisions for Wind and Seismic (SDPWS)*** proporciona criterios para la dosificación, el diseño y el detallado de sistemas, elementos y conexiones de madera de ingeniería en sistemas de resistencia a fuerzas laterales. El diseño de ingeniería de estructuras de madera para resistir fuerzas sísmicas o de viento se realiza mediante el diseño de tensión admisible (ASD) o el diseño de factor de carga y resistencia (LRFD). Se proporcionan capacidades nominales de cortante de diafragmas y muros de cortante para conjuntos de referencia.
- **Diseño técnico en madera CSA 086, Asociación Canadiense de Normalización, 2014.**
- **Consejo Internacional de Códigos. Código internacional de construcción. Country Club Hills, Illinois, EE.UU. 2018.**
- **Consejo Internacional de Códigos. Código residencial internacional. Country Club Hills, Illinois, EE.UU. 2018.**
- **APA-Asociación de la Madera de Ingeniería. Standard for Performance-Rated Cross Laminated Timber, ANSI/APA PRG 320. Tacoma, Washington, EE.UU. 2020. Tacoma, Washington, EE.UU. 2020.**

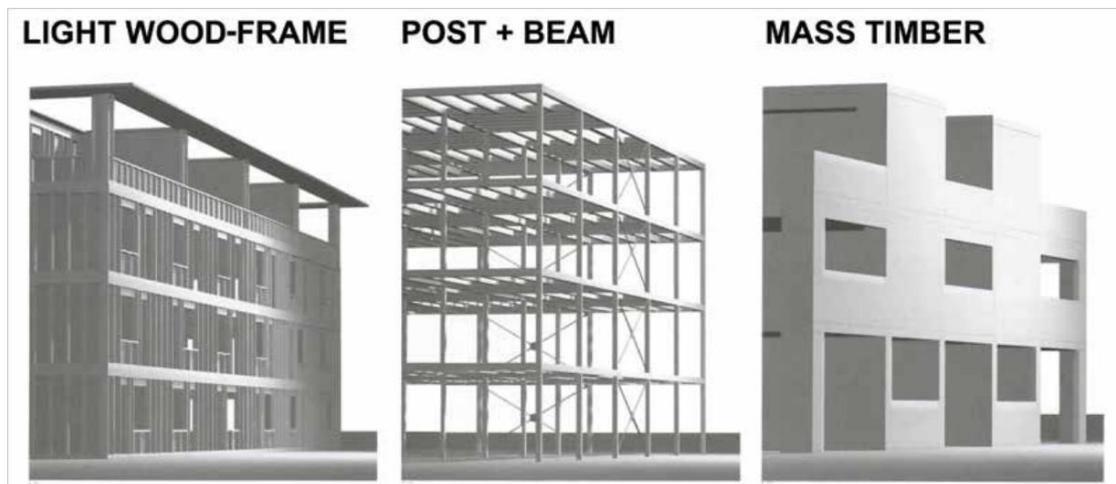
Europeos:

English title	Description
EN 338	EN 338 - Structural timber ? Strength classes
ETA-14/0349	European Technical Assessment ETA-14/0349 of 02.10.2014
Expertise Rolling shear - no edge gluing, H.J. Blass	Expertise on Rolling shear for CLT
EN 1995-1-2	EN 1995-1-2 - Eurocode 5 — Design of timber structures — Part 1-2: General — Structural fire design
EN 14080	EN 14080 - Timber Structures - Glued laminated timber and glued solid timber - Requirements
DIN EN 1995-1-1	EN 1995-1-1 - Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings
DIN EN 1995-1-1 NA	EN 1995-1-1 - National Annex – Nationally determined parameters – Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General ? Common rules and rules for buildings
Technical expertise 122/2011/02: analysis of load bearing capacity and separation performance of CLT elements	Verification of the load bearing capacity and the insulation criterion of CLT structures with Stora Enso CLT
Technical expertise 2434/2012 - BB: failure time t_f of gypsum fire boards (GKF) according to ON B 3410	Expertise on failure time t_f of gypsum wall fire boards according to ON B3410 and gypsum wall boards type DF according to EN 520
EN 1990	EN 1990 - Eurocode ? Basis of structural design
Fire safety in timber buildings - technical guideline for Europe	Fire safety in timber buildings - technical guideline for Europe; publishes by SP Technical Research Institute of Sweden
National specifications concerning ÖNORM EN 1995-1-2, national comments and national supplements, chapter 12	ÖNORM EN 1995-1-2 - National specifications concerning ÖNORM EN 1995-1-2, national comments and national supplements, chapter 12
DIN EN 1995-1-2_NA	DIN EN 1995-1-2 - Germany - National Annex - Eurocode 5: Design of timber structures ? Part 1-2: General ? Structural fire design ? National specifications concerning DIN EN 1995-1-2, national comments and national supplements
Expertise Rolling shear, H.J. Blass	Expertise on rolling shear strength and rolling shear modulus of CLT panels
ÖNORM EN 1995-1-1_NA, chapter 7.3	ÖNORM EN 1995-1-1 - Austria - National Annex – Nationally determined parameters – Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General- Common rules and rules for buildings; chapter 7.3

- **Guía del proyectista para el Eurocódigo 5: Diseño de edificios de madera: EN 1995-1-1.** La norma EN 1995, o Eurocódigo 5, describe los principios y reglas de diseño que deben utilizarse para el diseño de madera y materiales derivados de la madera en estructuras de edificación y de ingeniería civil. La Guía del Proyectista para el Eurocódigo 5: Diseño de Edificios de Madera proporciona orientación sobre la interpretación y el uso de los principales requisitos de diseño de la Parte 1.1., "Reglas comunes y reglas para edificios". Normas comunes y normas para edificios, con orientaciones adicionales sobre los principios, requisitos y normas de la Parte 1.2, Diseño estructural en caso de incendio.
- **Diseño estructural de madera contralaminada.** Diseño básico y principios de ingeniería según el Eurocódigo. proHolz Austria. Grupo de trabajo de la industria austriaca de la madera para la promoción de la aplicación de la madera. Viena/ Austria. 2014. ISBN 978-3-902926-03-6

5.4- Sistemas estructurales en construcciones de madera

Los sistemas estructurales más utilizados para edificios de una o varias plantas se muestran en las siguientes figuras [2]:



5.2.1. Construcción ligera con armazón de madera

La madera se utiliza con frecuencia como principal material de entramado en viviendas unifamiliares, plurifamiliares y estructuras comerciales debido a su rentabilidad, amplia disponibilidad y sencillos procedimientos de montaje. Las técnicas de construcción de entramado ligero se emplean habitualmente en la construcción de establecimientos comerciales, instalaciones sanitarias, instituciones educativas y diversos edificios comerciales [3]. [3].



Progresivamente, los componentes de las estructuras ligeras se fabrican fuera de las obras y se ensamblan posteriormente en el lugar de construcción.

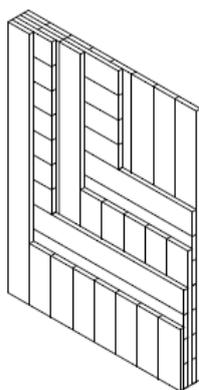
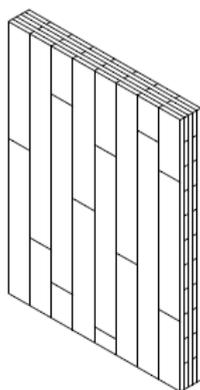
5.2.2. Construcción en madera maciza

La madera maciza es una categoría de estilos de entramado que se caracteriza por el uso de grandes paneles de madera maciza para la construcción de paredes, suelos y tejados. También incluye formas innovadoras de edificios escultóricos y estructuras no edificatorias formadas por paneles de madera maciza o sistemas de entramado de 2 m o más de anchura o profundidad. Los productos de la familia de la madera maciza incluyen

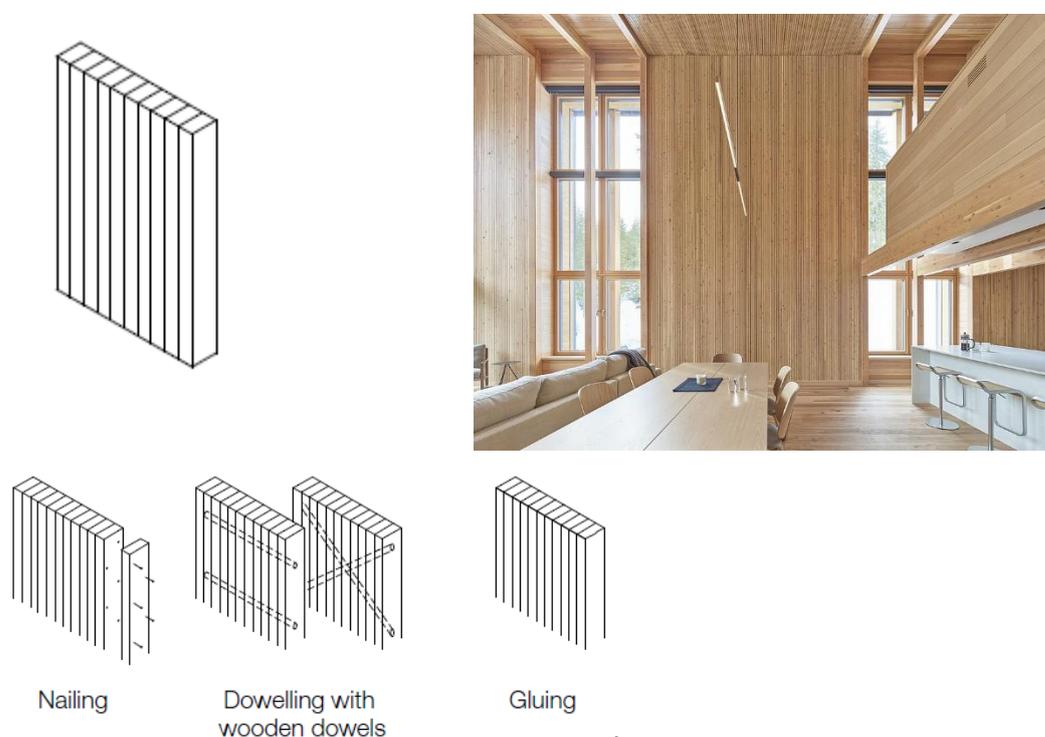
La madera en masa representa una clasificación de metodologías de entramado, que se distinguen convencionalmente por la utilización de paneles de madera maciza de gran tamaño en la construcción de paredes, suelos y tejados. También abarca configuraciones inventivas de construcciones arquitectónicas y estructuras no edificatorias, formadas por paneles de madera maciza o sistemas de entramado con dimensiones superiores a 2 metros de anchura o profundidad. El espectro de productos de madera maciza incluye: [2], [4], [5]:



Madera contralaminada (CLT).



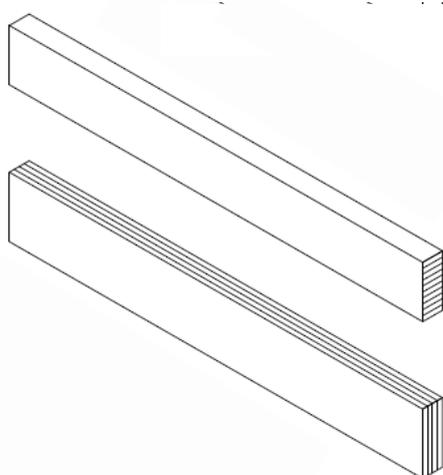
La madera contralaminada (CLT) se compone de capas de madera dimensionada, normalmente tres, cinco o siete, dispuestas en ángulo recto y unidas entre sí para crear paneles estructurales caracterizados por una resistencia, estabilidad dimensional y rigidez excepcionales. Estos paneles presentan una solución notablemente rentable para proyectos arquitectónicos de varios pisos y de gran tamaño. Algunos arquitectos consideran el CLT tanto un sistema de construcción autónomo como un material de construcción versátil que puede integrarse perfectamente con otros productos de madera, prestándose a aplicaciones híbridas y compuestas. El CLT es adecuado para aplicaciones de suelos, paredes y cubiertas, e incluso puede dejarse expuesto en superficies interiores con fines estéticos. La naturaleza laminada cruzada de la madera contralaminada le confiere una capacidad bidireccional. Además, el CLT puede fabricarse a medida en varias dimensiones, y los tamaños de los paneles varían de un fabricante a otro. **Madera laminada con espigas (DLT)**



Las estructuras de madera laminada con espigas se concibieron inicialmente como componentes de losa, contruidos a partir de tablas económicas de calidad inferior que se ensamblan para crear elementos estructurales de madera maciza de alta calidad que soportan cargas. La cohesión de múltiples tablas se orquesta para compensar sus inhomogeneidades inherentes. Los tabiques de madera laminada con espigas están formados por tableros de madera maciza, normalmente blanda, de entre 20 y 60 mm de grosor, meticulosamente interconectados. Las unidades de tabiques verticales, diseñadas para facilitar el montaje in situ, suelen fabricarse en anchuras que facilitan su manipulación práctica. Estas tablas pueden abarcar toda la longitud del elemento estructural, estar unidas por juntas de dedos o presentar conexiones escalonadas. El grosor de estos elementos está limitado principalmente

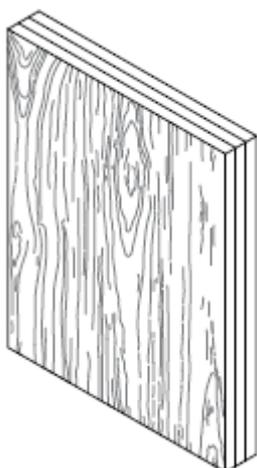
por la anchura máxima del tablero, que suele alcanzar los 240 mm o, en casos menos frecuentes, los 280 mm. En sus inicios, las tablas se unían con clavos, principalmente de acero, lo que podía dificultar las modificaciones posteriores. Sin embargo, cuando las tablas se unen con clavos de madera dura, a menudo de haya, los componentes resultantes pueden modificarse y reciclarse después de la fabricación, como si fueran de madera maciza.

Madera laminada encolada (madera laminada encolada)



La madera laminada encolada, comúnmente conocida como madera laminada encolada, está constituida por láminas de madera individuales, específicamente seleccionadas y dispuestas en función de sus atributos de rendimiento, y posteriormente unidas entre sí utilizando adhesivos duraderos y resistentes a la humedad. La orientación de las vetas de todas las láminas se mantiene paralela al eje longitudinal del elemento. La madera laminada presenta unas características notables de resistencia y rigidez y se ofrece en una variedad de grados de apariencia adecuados tanto para fines estructurales como arquitectónicos. Aunque se emplea convencionalmente como vigas y pilares, los diseñadores tienen la opción de utilizar la madera laminada encolada en forma de tablón para suelos o cubiertas. La naturaleza adaptable de la fabricación de la madera laminada permite la creación de "paneles" de madera laminada, capaces de facilitar curvaturas intrincadas y diseños geométricos distintivos. En los casos en que se emplean estas configuraciones innovadoras para los paneles de suelos y cubiertas, la madera laminada encolada se considera una extensión de la familia de productos de madera maciza y a veces se denomina madera laminada encolada (GLT).

Madera de chapa laminada (LVL)



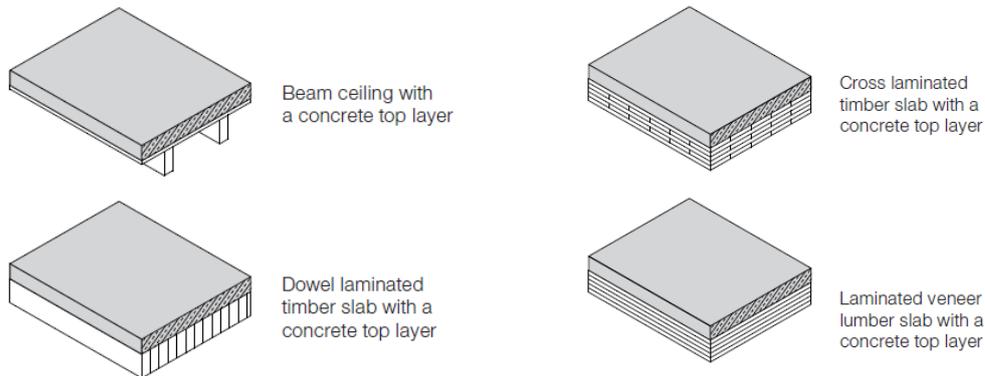
La madera de chapa laminada (LVL) es un producto de madera maciza con una relación resistencia-peso dos veces superior a la del acero, lo que la convierte en una opción óptima cuando se requieren atributos exigentes como resistencia, estabilidad dimensional y una capacidad de carga sustancial. El LVL se fabrica a partir de múltiples capas de chapas de madera secadas en horno y clasificadas según su resistencia, unidas meticulosamente en un entorno de fábrica controlado. La adaptabilidad y la fiabilidad estructural demostrada del LVL han precipitado un rápido aumento de su adopción en el ámbito de la construcción con madera en masa.

Como uno de los materiales de construcción basados en la madera más robustos en relación con su masa, el LVL presenta una solución ideal cuando se requiere un material portante que sea sostenible y dimensionalmente estable. El LVL se presta a la prefabricación de precisión y a la integración perfecta con diversos materiales.

El producto LVL que ofrece Stora Enso (<https://www.storaenso.com/en/products>) se fabrica uniendo chapas de 3 mm de grosor mediante adhesivos de alta resistencia. Los troncos empleados en la producción de LVL se someten a un proceso de pelado y secado que garantiza la dispersión uniforme de cualquier defecto natural de la madera en la chapa. Esto, unido al proceso de laminado, da como resultado un material lineal y uniforme dotado de una resistencia y rigidez notables.

Las vigas y pilares LVL se pueden obtener en dimensiones de panel de hasta 24.000 mm x 2.400 mm x 75 mm, que se pueden cortar a medida para satisfacer los requisitos específicos del proyecto. Para espesores superiores a 75 mm, Stora Enso ofrece vigas y pilares LVL G, que se fabrican volviendo a unir paneles LVL en una configuración plana. [6].

Losas mixtas de madera y hormigón



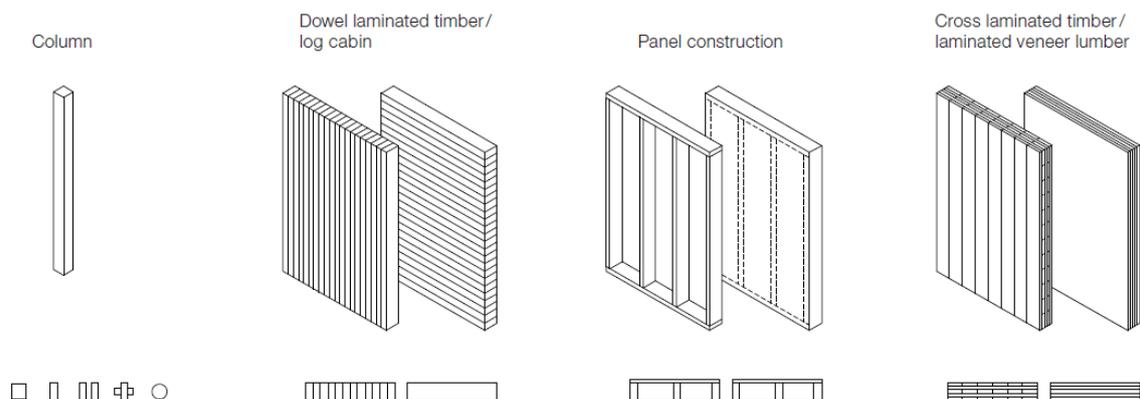
El concepto de forjados mixtos de madera y hormigón surgió en la década de 1920 con el objetivo principal de reducir las cantidades de hormigón y acero utilizadas en la construcción de forjados. Tras la Segunda Guerra Mundial, esta técnica volvió a cobrar importancia, sobre todo para reforzar y rehabilitar techos de vigas de madera envejecidos.

Desde la década de 1990, se ha producido un resurgimiento en la aplicación de losas mixtas de madera y hormigón, especialmente en proyectos de construcción contemporáneos. En la actualidad, estas losas constituyen los componentes híbridos más frecuentes en la construcción con madera. En comparación con las estructuras compuestas exclusivamente de madera, ofrecen mejoras en la integridad estructural, el aislamiento acústico y las características de seguridad contra incendios. Además, su masa añadida sirve para mitigar vibraciones indeseables. En consecuencia, las losas mixtas de madera y hormigón son especialmente adecuadas para la construcción de vanos medianos y largos. [5].

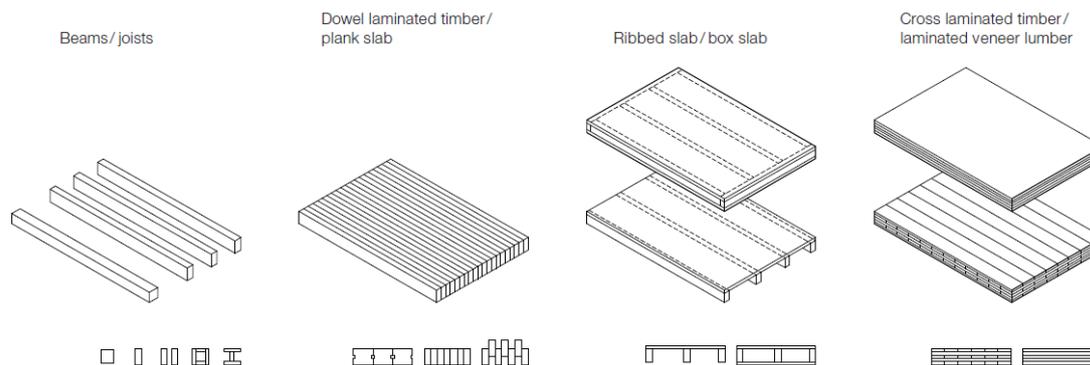
5.5- Elementos estructurales en la construcción de madera

Las siguientes figuras ilustran los componentes estructurales más comunes que suelen emplearse en las construcciones de edificios de madera [5].

Elementos estructurales verticales:



Elementos estructurales horizontales:



5.6- Conexiones en estructuras de madera

El coste de las conexiones dentro de una estructura de madera maciza puede influir significativamente en el presupuesto global del proyecto. Sin embargo, la complejidad del diseño de las conexiones de madera en masa va más allá de las meras consideraciones estructurales, ya que abarca cuestiones estéticas, el cumplimiento de la normativa contra incendios, la viabilidad de la construcción, la adaptación a los cambios dimensionales de la madera debidos a la humedad y las medidas de protección contra la humedad. En consecuencia, la búsqueda de una solución óptima se convierte en un reto polifacético para los diseñadores.

Para facilitar este intrincado proceso, [WoodWorks](#) ha publicado un catálogo de conexiones de madera de fácil manejo que pretende aclarar la gama de conexiones de madera maciza estructurales y arquitectónicas disponibles. El objetivo es simplificar la selección de tipos de conexión rentables al tiempo que se equilibran otros factores críticos [7].

Este catálogo, denominado índice de conexiones de madera maciza, sirve de herramienta para seleccionar los tipos de conexión adecuados para un proyecto determinado. Estos tipos de conexión requieren evaluaciones estructurales para verificar su resistencia y rigidez. Además, deben protegerse adecuadamente contra la humedad y los riesgos de incendio, de acuerdo con los códigos de diseño aplicables a las estructuras de madera, ya sean europeos o americanos.

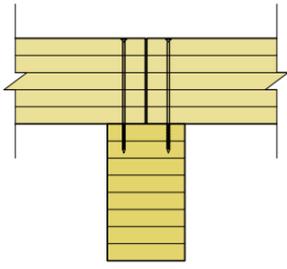
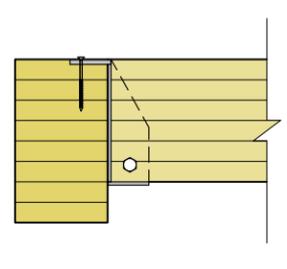
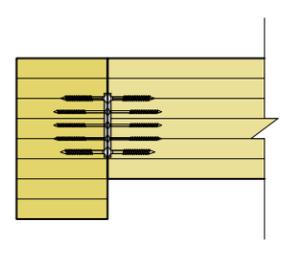
Para acceder al catálogo, haga clic [aquí](#).

Para sistematizar este índice, las conexiones estructurales se han clasificado en tres "clases de conexión" distintas, agrupando aquellas con atributos compartidos relacionados con el coste, la constructibilidad y la resistencia al fuego. Estas clases se explican y ejemplifican en la Tabla 1 como Clase 1, Clase 2 y Clase 3. Las conexiones de clase 1 requieren exclusivamente elementos de madera maciza y fijaciones estructurales. Las conexiones de clase 2 implican componentes de acero fabricados a medida, como placas y ángulos, además de fijaciones estructurales. Por el contrario,

las conexiones de clase 3 se componen de conectores prefabricados patentados ofrecidos por proveedores como Simpson Strong-Tie, Rothoblaas y MiTek, entre otros. Las conexiones de clase 3 suelen ir acompañadas de pruebas corroborativas que corroboran su resistencia y su resistencia al fuego.

En general, las conexiones de clase 1 representan la opción más económica y sencilla para la instalación, aunque no siempre coinciden con otros requisitos del proyecto. Por el contrario, las conexiones de clase 2 y 3 suelen ser más costosas. Sin embargo, las conexiones de clase 3 pueden ser especialmente pertinentes cuando se prefieren las conexiones ocultas o cuando las clasificaciones de resistencia al fuego tienen una importancia primordial.

TABLE 1: Connection Classes

Connection class	Class 1	Class 2	Class 3
Class description	Requires only mass timber elements and fasteners	Utilizes steel fabricated elements, with components such as angles and plates, and includes fasteners	Prefabricated proprietary connectors
Connection example			
	Beam Bears on Girder*	Beam Bears on Steel Bearing Seat with Knife Plate*	Beam Connected to Girder with Proprietary Concealed Connector*

*Table 8 in the *Index of Mass Timber Connections*

5.7 - Resistencia sísmica en estructuras de madera

Título del vídeo: "Comparación de soluciones madereras y no madereras: Una exploración de 8 opciones de sistemas laterales sísmicos y de viento para estructuras de madera maciza"

En esta presentación en vídeo, profundizamos en la gama de sistemas disponibles para impartir resistencia sísmica a las estructuras de madera maciza. En concreto, nos centramos en los sistemas verticales de resistencia a las fuerzas laterales, que desempeñan un papel fundamental en la resistencia a las fuerzas laterales del viento y sísmicas en el contexto de las construcciones de madera maciza.

Tradicionalmente, los sistemas verticales de resistencia a fuerzas laterales en edificios de madera en masa se han desviado a menudo de las soluciones de entramado basadas en la madera. Sin embargo, se ha producido un cambio notable en los últimos tiempos, con un número creciente de proyectos que adoptan sistemas centrados en la madera. Entre ellos se incluyen los muros de cortante de entramado ligero de madera,

los muros de cortante de madera contralaminada (CLT) y los entramados arriostrados de madera. Paralelamente, hay casos en los que los sistemas laterales que no son de madera presentan ventajas convincentes.

Esta presentación en vídeo sirve como recurso ilustrativo, ofreciendo una visión de 8 sistemas laterales comunes empleados en el diseño y la construcción de edificios de madera maciza.



[Vídeo 2](#)

La siguiente figura muestra cuatro opciones de sistemas laterales sísmicos en madera.



Madera op. 1: Muros cortantes de entramado ligero



Madera op. 2: Muros cortantes de madera maciza



Madera op 3: Muros pantalla basculantes de madera maciza

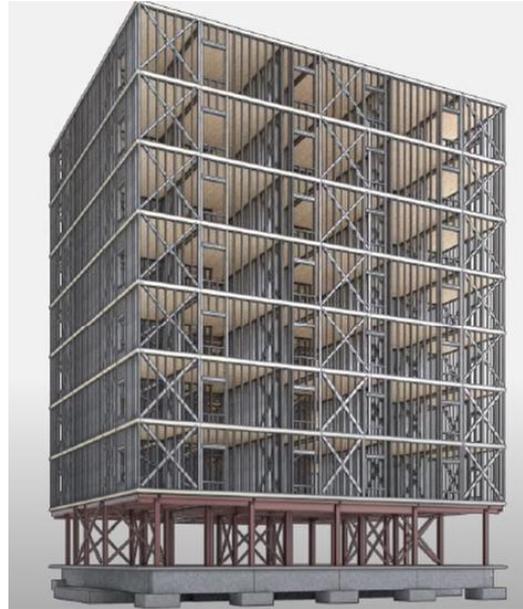


Madera op. 4: Madera maciza Marcos arriostrados

Y ahora se muestran cuatro opciones de sistemas laterales sísmicos no madereros:



Op. no maderables 1: Muros de cortante de hormigón



Op. no maderables 4: Muros cortantes de acero conformado en frío



Masonry Shearwall

No maderable op 3: Muros cortantes Masonary



Op. no maderable 2: Estructuras de acero arriostradas/momentadas

La norma europea de referencia para el diseño de edificios antisísmicos es:

- EN 1998-1:2004 Eurocódigo 8: Cálculo de estructuras sismorresistentes: Reglas generales, acciones sísmicas y reglas para edificios

Por otro lado, las Disposiciones Especiales de Diseño ANSI/AWC 2021 para Viento y Sismo (SDPWS) proporcionan criterios para la proporción, el diseño y el detalle de los sistemas de madera de ingeniería, miembros y conexiones en sistemas de resistencia a fuerzas laterales.

5.8- Madera y seguridad contra incendios

La combustibilidad de la madera sigue siendo un factor primordial que conduce a estrictos reglamentos y normas de construcción que limitan considerablemente su

utilización como material de construcción. La seguridad contra incendios es un factor determinante para fomentar la sensación de seguridad y desempeña un papel fundamental en la selección de materiales para proyectos de construcción. Un prerrequisito fundamental para ampliar la aplicación de la madera en la construcción es garantizar unas sólidas medidas de seguridad contra incendios. [8].

En las últimas décadas, numerosas iniciativas internacionales de investigación han emprendido el estudio del comportamiento del fuego en estructuras de madera, con el objetivo principal de proporcionar datos y conocimientos esenciales para la incorporación segura de la madera en las prácticas de construcción. Este esfuerzo concertado ha dado lugar a innovadores conceptos y modelos de diseño contra incendios, respaldados por exhaustivos protocolos de ensayo. La mejora de los conocimientos en el ámbito del diseño resistente al fuego de estructuras de madera, junto con las intervenciones tecnológicas, en particular la implantación de sistemas de rociadores y la disponibilidad de servicios de bomberos bien equipados, ha allanado el camino para la integración segura de la madera en un amplio espectro de aplicaciones. En consecuencia, varias naciones han iniciado revisiones de sus normativas contra incendios para dar cabida a una mayor dependencia de la madera.

La armonización de los métodos de ensayo y clasificación de incendios se ha producido recientemente en Europa, aunque los requisitos reglamentarios de construcción siguen determinándose en gran medida a nivel nacional. Las normas europeas existen a nivel técnico, pero la gobernanza de la seguridad contra incendios sigue en el ámbito de la legislación nacional y es, por tanto, una cuestión de discurso político. En consecuencia, se espera que persistan las normativas nacionales en materia de incendios, pero la nueva armonización de las normas europeas promete acelerar las reformas de las normativas nacionales.

Han salido a la luz notables disparidades entre los países europeos, que abarcan variaciones en el número de plantas permitidas en las estructuras de madera y las limitaciones específicas impuestas a la visibilidad de las superficies de madera tanto en aplicaciones interiores como exteriores. Algunos países carecen de normativas explícitas o no imponen restricciones al número de plantas de los edificios de madera. No obstante, se suele considerar un umbral práctico y económico de ocho plantas para las estructuras de madera. En particular, este límite puede ampliarse para aplicaciones como fachadas, revestimientos y suelos, ya que estos componentes también suelen integrarse en estructuras de hormigón, lo que ejemplifica la adaptabilidad de la madera en diversos contextos arquitectónicos."

5.8.1 Normas europeas de seguridad contra incendios en la madera

El siguiente documento del Eurocódigo 5 trata el tema

- EN 1995-1-2:2004 Eurocódigo 5: Cálculo de estructuras de madera - Parte 1-2. Generalidades: Parte 1-2: Cálculo estructural en caso de incendio.

También existe una guía para la protección contra incendios de los elementos de madera de los edificios:

- Östman, B., Mikkola, E., Stein, R., Frangi, A., König, J., Dhima, D., Hakkarainen, T., & Bregulla, J. (2010). *Seguridad contra incendios en edificios de madera: Guía técnica para Europa*. Informe SP nº 2010:19

5.9 - Deterioro de la madera por agentes biológicos

Los principales factores biológicos que amenazan la integridad estructural de la madera son los hongos de la madera, los escarabajos saproxílicos, las termitas y los moluscos y crustáceos marinos. En la mayoría de los escenarios, los hongos de la madera asumen el papel predominante como agentes responsables del deterioro de la madera.

El Eurocódigo 5 indica cómo proceder para proteger los elementos estructurales del ataque de organismos:

La madera y los materiales derivados de la madera deberán tener una durabilidad natural adecuada de conformidad con la norma EN 350-2 para la clase de peligro de que se trate (definida en las normas EIV 335-1, EN 335-2 y EN 335-3), o recibir un tratamiento de conservación seleccionado de conformidad con las normas EN 351-1 y EN 460.

NOTA 1: El tratamiento conservante puede afectar a las propiedades de resistencia y rigidez.

NOTA 2: Las normas para la especificación de los tratamientos de conservación figuran en las normas EN 350-2 y EN 335.

5.10 - Software de diseño de madera maciza.

Programa informático para el análisis global de la madera mediante elementos finitos:



Estos tres programas son programas comerciales de elementos finitos. Para modelar la estructura de elementos de madera con estos programas es necesario tener cuidado al introducir la rigidez de los elementos estructurales.

En el caso de los paneles LVL, la rigidez relacionada con las fuerzas de flexión y las fuerzas normales en el plano son diferentes en la dirección de la fibra y en la dirección perpendicular a la fibra.

En el caso de paneles CLT, debido a que están contruidos de capas orientadas en direcciones ortogonales, se requiere una matriz de rigidez particular para los elementos de cáscara que modelan estos paneles. Con el software **CLT designer**, se puede calcular esta matriz de rigidez con el fin de introducirla en los programas Sap2000 o RFEM 5. En el caso del software de AEF Sofistik, se pueden modelar elementos estructurales 2D multicapa, por lo tanto, este software calcula adecuadamente la matriz de rigidez de los elementos Shell utilizados para modelar los paneles CLT.

Programa informático para la verificación del diseño de estructuras de madera conforme a las normas europeas:



[CLTdesigner - CLTdesigner](#)

El software de diseño CLT ofrece, entre otras, las verificaciones necesarias para el estado límite último (ULS) con respecto a la flexión y el cizallamiento para cargas permanentes y transitorias, así como situaciones de diseño accidentales (incendio), y las verificaciones para el estado límite de servicio con respecto a la flexión y las vibraciones según EN 1990 o EN 1995 para sistemas continuos como las placas de madera contralaminada.



[Calculatis - Servicios y herramientas digitales | Stora Enso](#)

Calculatis de Stora Enso es una herramienta gratuita de diseño de madera para ingenieros. Calculatis, eficiente y totalmente basada en web, permite analizar elementos estructurales de nuestros productos de madera maciza, incluidos los productos de nuestra gama Sylva™ by Stora Enso.

Desarrollado para satisfacer las necesidades de los ingenieros que trabajan con construcciones de madera, Calculatis incluye módulos de diseño para suelos, cubiertas, pilares, vigas, cabeceros, soportes y conexiones para estructuras de CLT, LVL, madera laminada encolada y madera maciza. La herramienta también puede realizar análisis higrotérmicos (valor U, diagrama de Glaser y condensación) y de

diseño contra incendios (criterios R, E e I) según el Eurocódigo y el código de construcción suizo (SIA).

Calculatis le ayuda en todas las fases de su proyecto de construcción en madera con un flujo de trabajo eficaz y resultados precisos. Con una parametrización fácil y clara, módulos listos para usar e informes ilustrativos, la herramienta le ayuda a ahorrar tiempo y a acceder a todos los cálculos en un solo lugar.

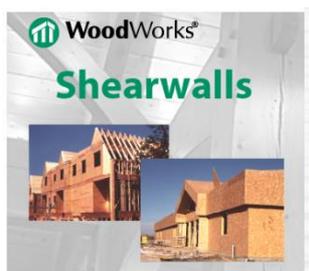
Programa informático para la verificación del diseño de estructuras de madera según las normas americanas:



<http://woodworks-software.com/us-edition/>



Con WoodWorks® Sizer, dimensione vigas, viguetas, columnas, montantes de pared y paneles contruidos con madera aserrada, madera laminada encolada, madera compuesta estructural, vigas en I y CLT.



WoodWorks® Shearwalls, diseña estructuras de entramado de madera de hasta 6 plantas. Con solo pulsar un botón, se generan las cargas de viento y sísmicas, se distribuyen las fuerzas y se diseñan los muros de cortante.



Con WoodWorks® Connections, puede diseñar conexiones formadas por pernos, tirafondos, tornillos para madera, clavos, placas de acero pesado y mucho más. Los resultados se muestran como dibujos de calidad CAD totalmente dimensionados.

5.11 - Ejemplo de diseño de un edificio de madera maciza. Stora Enso.

La empresa sueca Stora Enso ([Sobre nosotros | Stora Enso](https://www.storaenso.com/en)<https://www.storaenso.com/en>) distribuye elementos de madera para edificios. En su página web podemos encontrar varios ejemplos de edificios construidos con estructura de madera.

5.9.1. Descripción del edificio

Uno de estos ejemplos es un edificio residencial de 8 plantas que se muestra en la siguiente figura. Se construye en el centro de Helsinki (Finlandia) en 2023.

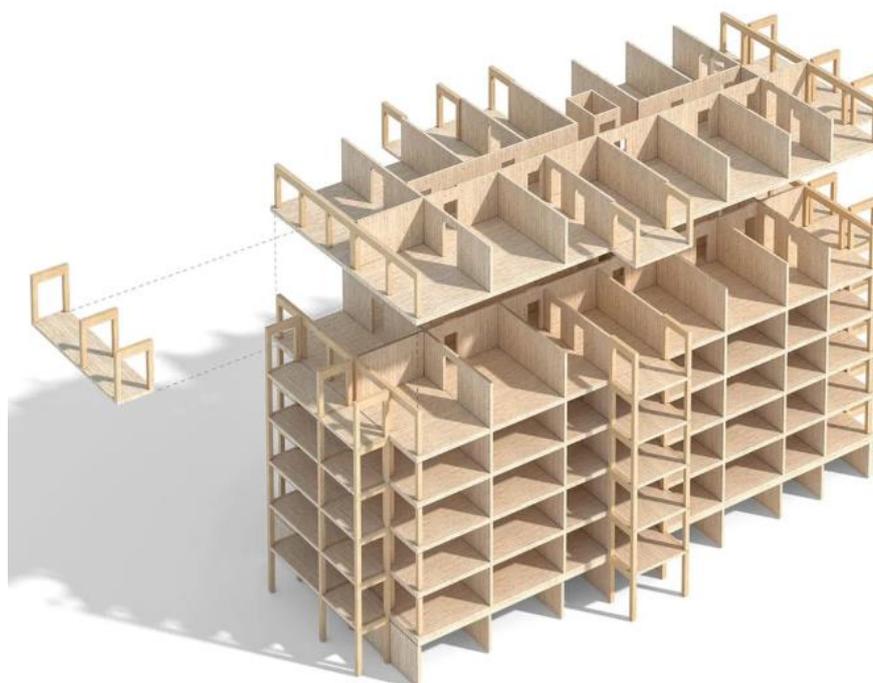


Sus principales características son:

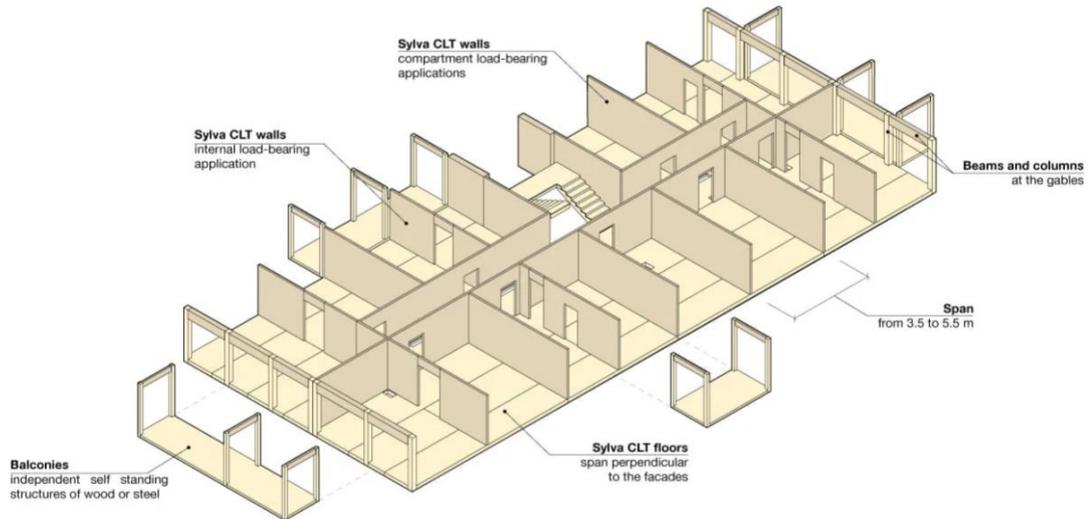
- **Sistema híbrido de madera:** Este sistema fusiona las ventajas de una estructura de madera maciza portante con una envolvente de construcción altamente prefabricada y no portante.
- **Principio de diseño modular:** Emplea un principio de diseño sencillo que se adapta a la aplicación modular en diversos emplazamientos, dando cabida a edificios de hasta 8 plantas de altura.
- **Flexibilidad de diseño:** El sistema ofrece flexibilidad en las configuraciones de los apartamentos, permitiendo combinar luces de entre 3,5 y 5,5 metros sin comprometer la rentabilidad.
- **Optimización del espacio:** La envolvente exterior de estructura de madera es notablemente más esbelta que otras alternativas con aislamiento similar, lo que permite ampliar la superficie interior hasta un 5%.
- **Beneficios medioambientales:** Este sistema reduce significativamente las emisiones de carbono en aproximadamente un 22% en comparación con un valor de referencia basado en minerales a lo largo de todo el ciclo de vida (desde las fases A1 a D5, abarcando 50 años). Además, reduce el carbono incorporado en aproximadamente un 29%, abarcando todos los materiales de construcción, desde los cimientos hasta el revestimiento.
- **Soluciones innovadoras para balcones:** El sistema también propone innovadores diseños de balcones autoportantes que eliminan la necesidad de penetraciones a través de la envolvente del edificio.

Las siguientes figuras muestran varios elementos de madera de la estructura y los cerramientos del edificio.

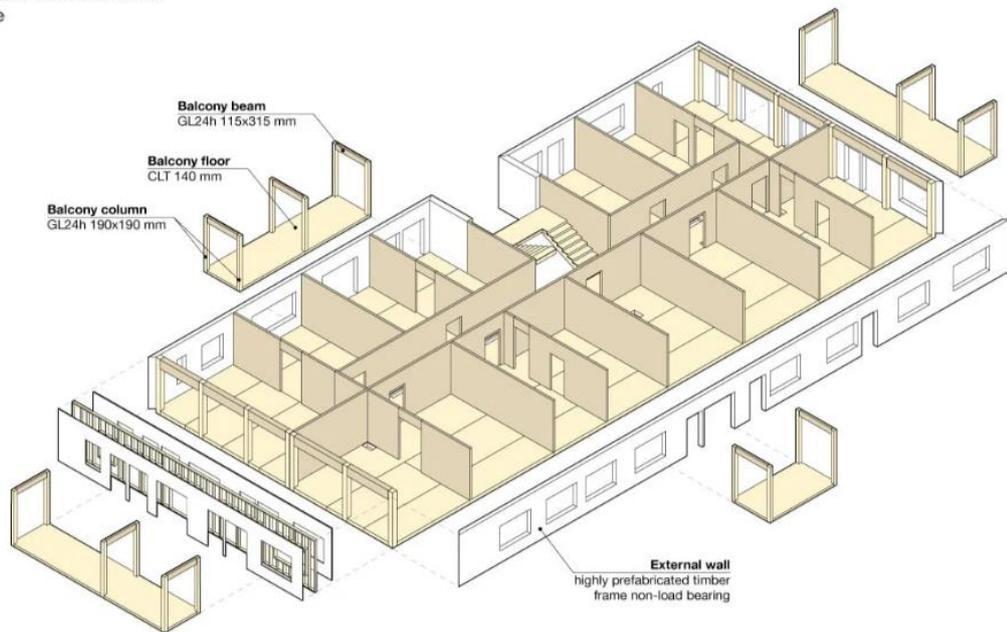
Estructura de madera.



Standard floor structure principles
perspective



Standard floor external walls
perspective



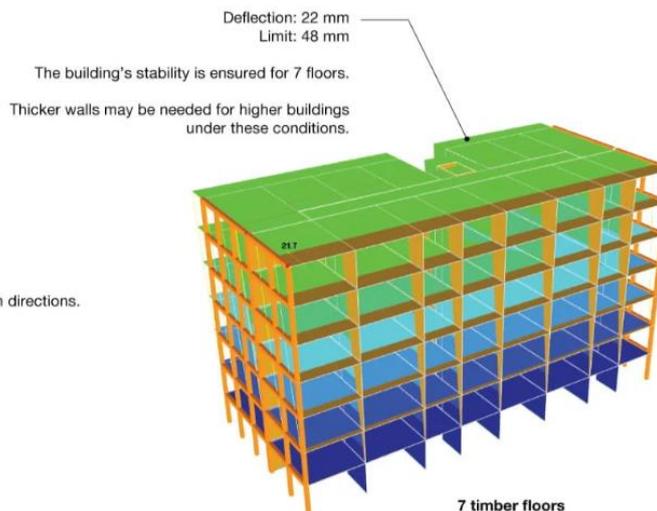
FEM analysis bracing structures

Based on the structural design study by Ramboll Finland

Model assumptions

- Wind conditions class I: $q_w(z)=0,906\text{kN/m}^2$
- Pinned-pinned beams and columns
- CLT walls 120mm
- The stability of the building is ensured by the CLT walls in both directions.

Total horizontal deflection limit: $H/500$



5.9.2. Coste del edificio de madera maciza.

He aquí la estimación de costes de la estructura de madera de un subcontratista especializado a un contratista principal:

- Coste de referencia: 582 EUR /m² [superficie total de madera, suelo y techo].
- Duración de la instalación: Aproximadamente 16 semanas
- El coste incluye:
 - Kit Sylva, que incluye paredes, suelos, escaleras, balcones, vigas y columnas.
 - Conectores,
 - Montaje
 - Margen del contratista, riesgos y prima.

5.9.3. Análisis del ciclo de vida del edificio de madera maciza.

En el sitio web de Stora Enso se puede acceder a un completo análisis del ciclo de vida de este edificio de madera, que puede descargarse como documento PDF (LCA pdf).

Los principales atributos de este estudio, realizado por Stora Enso, son los siguientes:

- **Análisis comparativo:** El estudio incluye una evaluación comparativa entre un diseño de estructura de madera y un diseño alternativo de estructura de hormigón. Examina las emisiones de CO₂ por metro cuadrado de superficie útil de ambas opciones a lo largo de la vida útil de un edificio de 50 años. El análisis también identifica los materiales y servicios más influyentes en términos de emisiones.
- **Evaluación del carbono a lo largo de toda la vida:** La evaluación de la huella de carbono a lo largo de toda la vida del edificio se llevó a cabo utilizando el modelo de Evaluación del Ciclo de Vida (ECV), empleando el "Método para la Evaluación del Carbono a lo largo de toda la Vida de los Edificios" (edición de 2021) prescrito por el Ministerio de Medio Ambiente de Finlandia. Este método

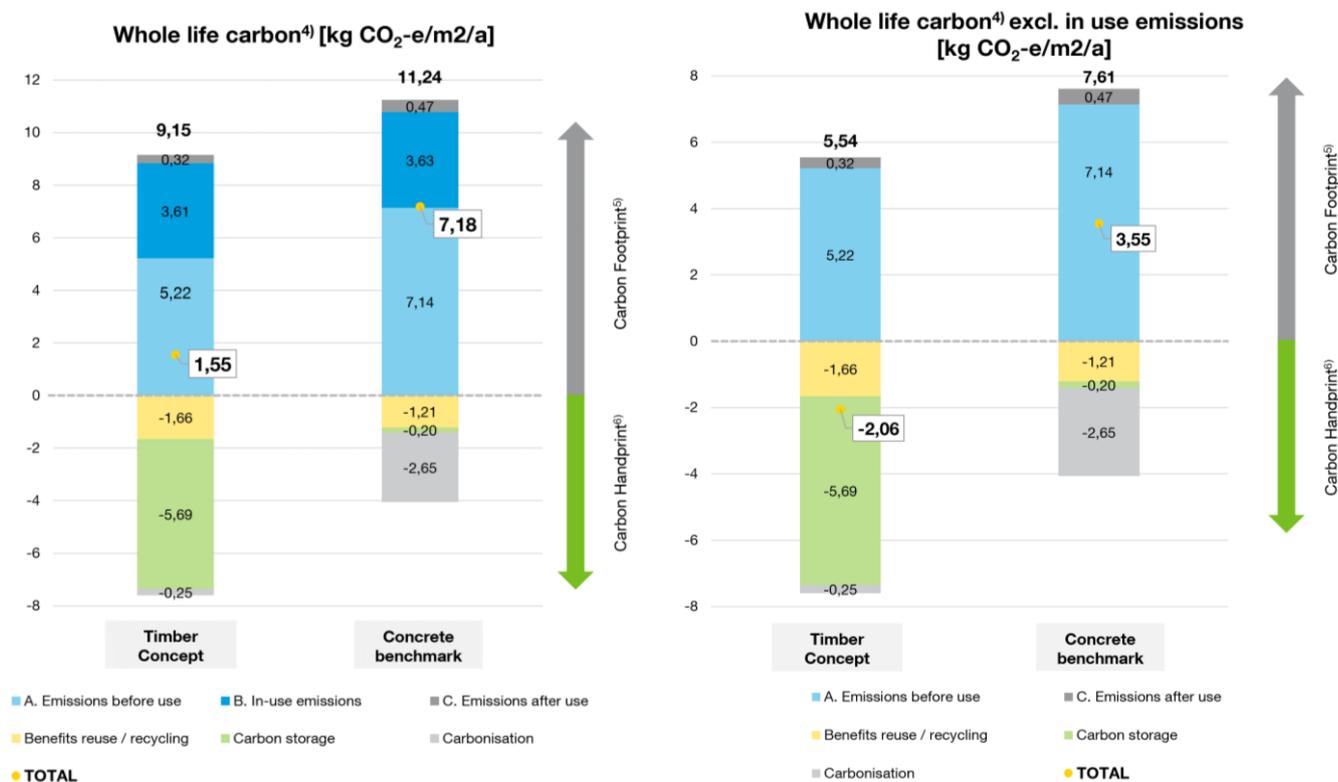
se basa en el marco de sostenibilidad conocido como Level(s), desarrollado por la Comisión Europea, y se adhiere a las normas establecidas para la construcción sostenible.

- **Cálculos con OneClickLCA:** Los cálculos se realizaron con la herramienta OneClickLCA, una plataforma reconocida para la evaluación del ciclo de vida en el sector de la construcción".

Las características del edificio consideradas en este estudio de ACV son:

- Superficie interior bruta: 4465 m²
- Superficie neta calefactada 4298 m²
- Superficie de la obra 587 m²
- Número de plantas: 8
- Vida útil de la estructura 50 años
- Tipo de calefacción: Calefacción geotérmica
- Consumo estimado de electricidad / año 267 MWh

Principales conclusiones de este estudio comparativo de ACV:



Análisis comparativo de las emisiones de carbono:

1. Emisiones totales del ciclo de vida (sin créditos):

- Construcción de madera: 9,15 kg CO₂-e/m²/año
- Construcción de hormigón: 11,24 kg CO₂-e/m²/año
- Resultado: La construcción en madera presenta un 22% menos de emisiones de CO₂ en comparación con la construcción en hormigón a lo largo de todo el ciclo de vida, sin tener en cuenta los créditos de reutilización/reciclaje, el almacenamiento biogénico de carbono o la carbonatación.

2. Emisiones totales del ciclo de vida (créditos incluidos):

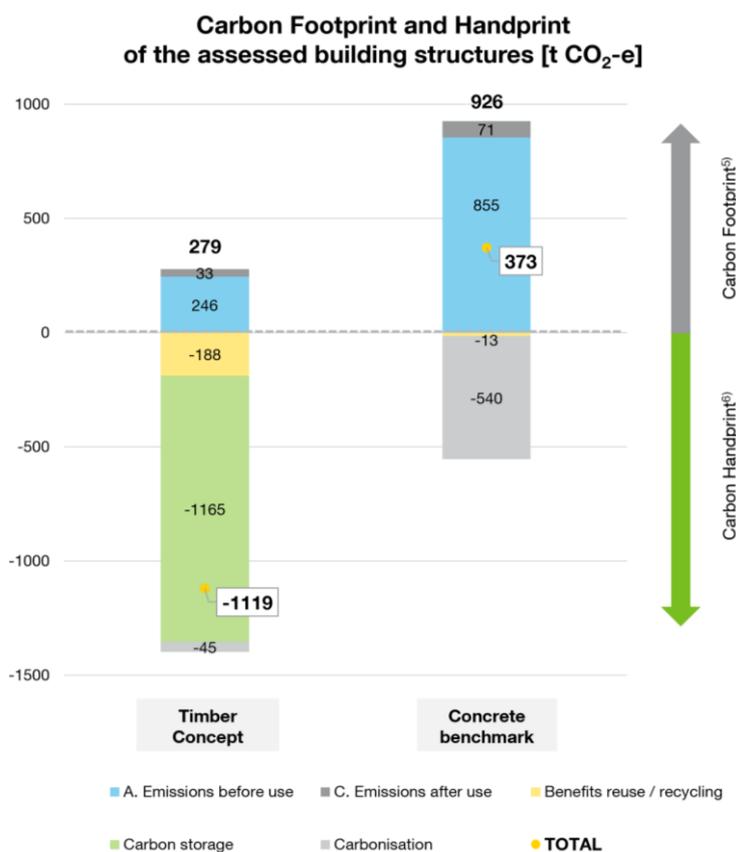
- Construcción en madera: 1,55 kg CO₂-e/m²/año
- Construcción de hormigón: 7,18 kg CO₂-e/m²/año
- Resultado: La construcción en madera demuestra una notable reducción del 78% de las emisiones de CO₂ en comparación con la construcción en hormigón a lo largo de todo el ciclo de vida, incorporando créditos procedentes de la reutilización/reciclaje, el almacenamiento biogénico de carbono y la carbonatación.

3. Emisiones totales del ciclo de vida (excluidas las emisiones de uso y los créditos):

- Construcción en madera: 5,54 kg CO₂-e/m²/año
- Construcción de hormigón: 7,61 kg CO₂-e/m²/año
- Resultado: La construcción en madera presenta un 27% menos de emisiones de CO₂ en comparación con la construcción en hormigón a lo largo de todo el ciclo de vida, excluyendo las emisiones durante el uso (electricidad, calefacción, refrigeración) y cualquier crédito derivado de la reutilización/reciclaje, el almacenamiento biogénico de carbono o la carbonatación.

4. Potencial de calentamiento global (excluidas las emisiones de uso y los créditos):

- Construcción con madera: -2,06 kg CO₂-e/m²/año (contribución negativa)
- Resultado: La construcción en madera supone una contribución negativa al potencial de calentamiento global de -2,06 kg CO₂-e/m²/año, excluyendo las emisiones durante el uso.



Comparación de estructuras:

1. Emisiones totales del ciclo de vida (sin créditos):

- Estructura de madera: 279 toneladas de CO₂-e
- Estructura de hormigón: 926 toneladas de CO₂-e
- Resultado: Una estructura de madera emite un 70% menos de CO₂ a lo largo de todo su ciclo de vida que una estructura de hormigón, sin tener en cuenta los créditos derivados de la reutilización/reciclaje, el almacenamiento biogénico de carbono o la carbonatación.

2. Impacto del almacenamiento de carbono:

- El concepto de edificio de madera almacena 318 toneladas de carbono a lo largo de su ciclo de vida.
- Esto implica que 1.165 toneladas de CO₂-e son secuestradas y almacenadas dentro de este edificio durante toda su vida útil.

3. Emisiones totales del ciclo de vida (incluidos créditos):

- Estructura de madera: -1.119 toneladas de CO₂-e (contribución negativa)
- Estructura de hormigón: 373 toneladas de CO₂-e
- Resultado: El armazón estructural de madera aporta una contribución negativa sustancial de -1.119 toneladas de CO₂-e al potencial de calentamiento global si se tienen en cuenta los créditos procedentes de la reutilización/reciclaje, el almacenamiento biogénico de carbono y la carbonatación. En cambio, la estructura de hormigón contribuye con 373 toneladas de CO₂-e.

Referencias

- [1] The benefits of timber as a building material - Specifier Review', 16 de marzo de 2018. <https://specifierreview.com/2018/03/16/timber-building-benefits/> (consultado el 18 de septiembre de 2023).
- [2] 'Mass Timber in North America', *Think Wood*. <https://www.thinkwood.com/continuing-education/mass-timber-north-america> (consultado el 18 de septiembre de 2023).
- [3] 'Light Frame Wood Construction', *Think Wood*. <https://www.thinkwood.com/light-frame-wood-construction> (consultado el 18 de septiembre de 2023).
- [4] T. W. c/o S. L. Board, 'Mass Timber Design Manual'. <https://info.thinkwood.com/masstimberdesignmanual> (consultado el 18 de septiembre de 2023).
- [5] K. Hermann, S. Krötsch, y S. Winter, *Manual de construcción en madera de varios pisos*. 2018. doi: 10.11129/9783955533953.

- [6] Laminated veneer lumber (LVL) - Wood products | Stora Enso'.
<https://www.storaenso.com/en/products/mass-timber-construction/building-products/lvl> (consultado el 18 de septiembre de 2023).
- [7] 'Index of Mass Timber Connections', *WoodWorks | Wood Products Council*.
<https://www.woodworks.org/resources/index-of-mass-timber-connections/>
(consultado el 18 de septiembre de 2023).
- [8] Seguridad contra incendios en edificios de madera: First European Guideline - SFPE'.
<https://www.sfpe.org/publications/periodicals/sfpeeuropedigital/sfpeurope3/issue3feature2> (consultado el 18 de septiembre de 2023).

6 - Resultados

Para evaluar el éxito de la solicitud, los estudiantes tendrán que responder a un cuestionario en línea.

7- Lo que hemos aprendido

Ventajas medioambientales de la construcción en madera

Que el estado de los conocimientos, la técnica y las normas sobre la madera nos permiten hoy diseñar edificios mucho más sostenibles que los de hormigón, acero y ladrillo.

Los tipos de elementos de madera disponibles para diseñar estructuras de madera.

Lista de herramientas informáticas para el diseño de la estructura de madera de un edificio.

La madera puede ser el material del futuro con una gestión forestal adecuada.

La importancia de los análisis de ACV para comparar los impactos ambientales de los edificios de madera con los producidos por los edificios de hormigón.