



TRABAJO FINAL DE GRADO

PROYECTAR CON MADERA CONTRALAMINADA

Autor: Scarano Requena, Jorge

Tutora: Álvarez Isidro, Eva María
Cotutor : Gómez Alfonso, Carlos José
Cotutora: Villaescusa Gil, María Dolores

Escuela Técnica Superior de Arquitectura
Grado en Fundamentos de la Arquitectura
Curso 2018-2019



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR DE
ARQUITECTURA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

*A Thierry y Rosa, por el apoyo y el
amor incondicional desde el principio*

RESUMEN

Todos los expertos coinciden en que nos enfrentamos a una crisis medioambiental sin precedentes y que, si no empezamos a producirse cambios radicales en nuestra forma de afrontarlo, sus consecuencias serán fatales e inevitables. La industria de la construcción es una de las más contaminantes del planeta, por lo que los arquitectos y demás agentes implicados tenemos la obligación de encontrar alternativas que nos permitan seguir satisfaciendo las necesidades de la gente de forma responsable y sostenible.

Ante este panorama, y gracias también a los avances tecnológicos, la madera ha resurgido como uno de los grandes candidatos a ser el material que defina la construcción en el futuro cercano. De entre todos los nuevos productos que han surgido en los últimos años, destaca la madera contralaminada por cambiar la forma en la que se entienden los proyectos con estructuras de madera, sustituyendo elementos lineales por planos resistentes de madera maciza.

En este trabajo se pretende dar una visión general de la situación de la madera contralaminada en la actualidad, para mostrar y constatar sus credenciales como principal alternativa sostenible a las estructuras convencionales de hormigón y acero.

Palabras clave:

Madera contralaminada; construcción; sostenibilidad; eficiencia; nuevos materiales

ABSTRACT

The scientific community agree that we are facing an environmental crisis as we have never seen. If we don't turn the way we are fighting it, the consequences would be fatal and unavoidable. Building industry is one of the world's most energy consuming, which let the architects with the task of finding and developing new solutions that let us satisfy people's needs in a sustainable and responsible way.

The worries about this alongside the technological advances are getting timber into being one of the most suitable materials to define the building industry in next years. Between all new products and systems, cross-laminated timber highlights, as is a game changer in the way we understand and imagine timber structures.

The aim of this academic work is giving a state-of-the-art vision of cross-laminated timber nowadays, showing and checking its credentials as the main alternative to conventional steel and concrete construction systems.

Key words:

Cross-laminated timber; construction; sustainability; efficiency; new materials

ÍNDICE

RESUMEN	4
1. INTRODUCCIÓN	8
1.1. MOTIVACIÓN	10
1.2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA	10
1.3. ¿QUÉ ES LA MADERA CONTRALAMINADA?	11
1.3.1. Tableros de madera contralaminada	11
1.3.2. Estructuras de madera contralaminada	13
1.3.3. Otros productos relacionados	15
1.3.4. Origen, evolución y estado actual en españa	16
2. CLT EN LA CONSTRUCCIÓN	20
2.1. BENEFICIOS	22
2.1.1. Tiempo de ejecución y precisión	22
2.1.2. Ligereza	23
2.1.3. Transporte y logística.....	24
2.2. SOSTENIBILIDAD	25
2.2.1. Producción y huella de carbono de la madera	25
2.2.2. Menor uso de materiales con alta huella ecológica	26
2.2.3. Eficiencia energética	27
2.2.4. Uso masivo de la madera y desarrollo forestal.....	28
2.3. ESTÉTICA	28
2.3.1. Materialidad.....	29
2.3.2. Nuevas formas arquitectónicas	30
2.4. IMPACTO ECONÓMICO	31
2.4.1. Coste de la estructura	31
2.4.2. Ahorro en gastos indirectos.....	32
3. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	34
3.1. RESISTENCIA AL FUEGO	36
3.1.1. Comportamiento estructural	36
3.1.2. Propagación y evacuación	38
3.2. SEGURIDAD ESTRUCTURAL	39
3.2.1. Acciones perpendiculares al panel	39
3.2.2. Acciones en el plano del panel	40
3.2.3. Predimensionado, secciones estándar	41
3.3. RESISTENCIA A SISMO	42
3.4. AHORRO DE ENERGÍA, ENVOLVENTE	44

3.4.1.	Conductividad y puentes térmicos	44
3.4.2.	Masa e inercia térmica.....	44
3.4.3.	Estanqueidad	45
3.5.	SALUBRIDAD, PROTECCIÓN FRENTE A LA HUMEDAD	45
3.5.1.	Protección de la estructura.....	45
3.5.2.	Infestación	47
3.6.	PROTECCIÓN FRENTE AL RUIDO	47
3.6.1.	Aislamiento a ruido aéreo.....	47
3.6.2.	Transmisión del ruido por la estructura.....	48
3.6.3.	Vibraciones	48
3.7.	MANTENIMIENTO	49
3.7.1.	Reparaciones	49
4.	PROYECTOS CON CLT	50
	Cooperativa viviendas La Borda	52
	Dalston Works	54
	Bloque de viviendas Puukuokka	56
	Casa vacacional en Rigi.....	58
	Casa 205	60
	Extensión vivienda Hunsett Mill.....	62
	Montessori Schoolhouse	64
	Pabellón “Multiply”	66
	Sala polivalente del teatro Vidy	68
	Pabellón de los elefantes	70
5.	CONCLUSIONES.....	72
	BIBLIOGRAFÍA.....	75
	IMÁGENES	77



1. INTRODUCCIÓN

1.1. MOTIVACIÓN

Los expertos pronostican, con un consenso científico mundial pocas veces visto, que, si continúa el *statu quo* actual, el mundo no logrará los objetivos ambientales de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible ni las metas ambientales convenidas internacionalmente para 2050, haciendo irreversibles los efectos negativos del cambio climático. Las proyecciones futuras indican que los avances son demasiado lentos para alcanzar las metas, o que incluso progresan en sentido equivocado, en gran parte por la incapacidad constante de adoptar medidas urgentes y contundentes.¹

El sector de la construcción es uno de los mayores consumidores de energía y emisores de gases de efecto invernadero del planeta. Según el IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) los edificios consumen un 32 % de la energía consumida mundialmente y emiten un 19 % de los gases de efecto invernadero solo contando su vida útil, sin tener en cuenta los consumos y emisiones durante la obra o de la industria productora de materiales (por ejemplo, solo la industria del cemento supone un 5 % de las emisiones mundiales).² A pesar de la obvia necesidad de encontrar sistemas alternativos de construcción para mitigar la situación, la construcción es un sector muy conservador en el que los cambios siempre se encuentran con gran resistencia para ser implantados.³

La primera y principal motivación surge de la convicción de que, ante la actual crisis climática, la construcción con madera contralaminada es la mejor alternativa sostenible frente a la construcción convencional en edificios de viviendas, oficinas y educación de baja y media altura en entornos urbanos (lo cual supone un altísimo porcentaje de las edificaciones), siendo un sistema viable para muchos otros usos y tipologías.

Por otro lado, la aparición de los sistemas de tableros CLT ha supuesto un cambio de paradigma respecto a cómo se entienden las estructuras de madera, pasando de elementos lineales y unidireccionales a planos rígidos resistentes en ambas direcciones. Esto ha generado que surjan nuevas e inesperadas expresiones formales, compositivas y estéticas. Así, la segunda motivación es la posibilidad de explorar el nuevo abanico de soluciones expresivas que surgen del uso de los tableros de madera contralaminada.

1.2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

Existen numerosos estudios sobre la resistencia del sector de la construcción frente a la implantación de nuevos sistemas y avances tecnológicos. En el artículo *Adoption of unconventional approaches in construction: The case of cross-laminated timber*,⁴ Kell Jones estudia la implantación de la madera contralaminada en el sector, concluyendo las barreras y los alicientes con los que, a ojos de arquitectos, constructores y promotores, se encuentra. Las conclusiones de dicho estudio fueron que los mayores alicientes a la hora de utilizar madera contralaminada fueron la sostenibilidad, la sencillez, rapidez y precisión en la construcción y la estética. En el otro lado, las barreras más fuertes con las que se encontró el material al plantearse su utilización fueron el

miedo al impacto económico, la falta de familiaridad con el producto, la falta de proyectos de referencia y la incertidumbre sobre sus características técnicas ante la ausencia de normativa al respecto.

Partiendo de las conclusiones del citado artículo, y de la convicción de que la madera contralaminada es una de las mejores alternativas a la construcción convencional, el objetivo principal de este trabajo es crear un documento que recoja todas las cuestiones relativas a la adopción de la madera contralaminada como sistema constructivo por parte del proyectista, dando una visión general de sus ventajas, desventajas y cómo superarlas, características técnicas, criterios básicos de diseño y construcción y proyectos de referencia.

Para establecer los puntos a desarrollar, se ha partido de las conclusiones del trabajo de Kell Jones y de otros estudios que, a través de encuestas o entrevistas, tratan de esclarecer las dudas o convicciones que genera el material a la hora de adoptarlo en los proyectos.

El contenido del trabajo se ha desarrollado a partir de la investigación en dos frentes principalmente: la consulta, comparación y síntesis bibliográfica y el análisis de proyectos construidos.

La bibliografía consultada ha estado formada principalmente por artículos científicos, certificaciones y documentación técnica, resultados experimentales y, en raras ocasiones, libros publicados. Actualmente, apenas existen publicaciones específicas sobre madera contralaminada, apareciendo únicamente como capítulos en libros sobre construcción en madera. A través de esta bibliografía se ha desarrollado toda la información referente a las características intrínsecas del material y el sistema constructivo.

A partir de los proyectos analizados se ha podido, además de constatar las características expuestas, obtener conclusiones acerca de las expresiones estéticas que aparecen de la mano de este nuevo material.

1.3. ¿QUÉ ES LA MADERA CONTRALAMINADA?

1.3.1. Tableros de madera contralaminada

Para construir un tablero de madera contralaminada, comúnmente llamado tablero CLT por sus siglas en inglés (*cross laminated timber*) o Xlam, un número impar de capas de listones de madera aserrada de entre 20 y 40 mm de grosor son pegados de manera que los listones de cada capa son ortogonales a los de la siguiente, formando un tablero de madera maciza con un gran ratio resistencia-peso, estabilidad dimensional en todas direcciones, buen comportamiento térmico, acústico y contra fuego, obtenido de una materia prima sostenible, reciclable y con una huella de carbono mínima o incluso negativa.

Se fabrican secciones de entre 3 y 9 capas, obteniendo grosores totales entre 60 y 380 mm y unas dimensiones máximas de los tableros que pueden llegar hasta los 3,80 metros de anchura y 17,50 metros de longitud⁵(valores de la productora española Egoín, pueden variar ligeramente entre distintos fabricantes). Normalmente se utilizan listones obtenidos de la parte externa del tronco, con una gran resistencia, pero muy sensibles a cambios dimensionales debido a la temperatura o la humedad.

Mientras que esto supone una limitación para la mayoría de usos, en la madera contralaminada este hecho no supone un problema, pues las capas dispuestas perpendicularmente compensan mutuamente estas deformaciones, dando como resultado un elemento dimensionalmente estable en todas las direcciones. Las maderas más utilizadas son las de conífera, pino, abeto o alerce, siendo la conífera la más usada en España. El aumento de resistencia producido por la unión de distintas capas permite el uso de maderas blandas y de crecimiento rápido.⁶

En Europa se utilizan mayoritariamente dos tipos de adhesivo: tipo PUR, con base de poliuretano o, en menor medida, tipo MUF, de melanina-urea-formol. El adhesivo tipo MUF es más eficiente sellando huecos de la madera, y funciona mejor a altas temperaturas, mientras que el adhesivo tipo PUR, al ser libre de formaldehído y soluble, asegura una toxicidad mínima y facilita la reutilización o reciclaje de los tableros. En la producción de los tableros, los listones primero se adhieren longitudinalmente con juntas en diente de sierra, aprovechando para eliminar las secciones de los listones con defectos. Los listones de la misma capa son unidos lateralmente, normalmente sin adhesivo, para después aplicar el adhesivo y unir las distintas capas aplicando presión.⁷

Históricamente, las desventajas de la madera como material para la construcción han sido su comportamiento heterótropo, la limitación del tamaño de las piezas al de los troncos y la necesidad de crear estructuras con elementos lineales. Primero, la madera laminada eliminó las limitaciones dimensionales al crear elementos macizos mediante la unión de piezas más pequeñas, fácilmente obtenibles y manipulables. Después, la madera contralaminada eliminó el problema del comportamiento heterótropo gracias al laminado ortogonal mediante el cual se obtienen unas características mucho más homogéneas y previsibles. El tablero de madera contralaminada también abre un nuevo abanico de posibilidades a la construcción con madera al convertir los elementos lineales, tradicionales en las estructuras de madera, en planos, cambiando completamente como se entienden las estructuras de este material.

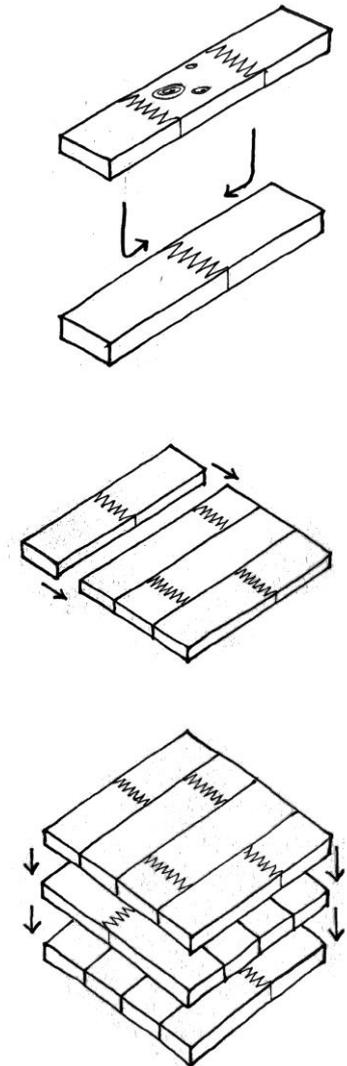


Fig.1, sup: esquema fabricación tableros CLT, elaboración propia

Fig.2, izq: acopio de tableros CLT. Natural Resources ministry Canada

Fig.3, der: instalación de estructura de CLT. Egoín

1.3.2. Estructuras de madera contralaminada

En la construcción, los tableros CLT pueden ser utilizados como muros, forjados, cubiertas planas o inclinadas y, en general, cualquier elemento tipo losa. Así, los tableros de madera contralaminada pueden constituir la totalidad de la estructura aérea de un edificio, soportando eficientemente esfuerzos paralelos (muros) y perpendiculares (forjados, cubiertas) al plano.

El sistema constructivo que mejor aprovecha las propiedades de los tableros de madera contralaminada es en el que los muros son a la vez estructura, cerramiento exterior y separación entre sectores. Este sistema es ampliamente utilizado para construir edificios de bloques de vivienda, escuelas u oficinas. El tablero de madera contralaminada constituye el muro base sobre el que instalar fachadas, aislamientos o trasdosados, proporcionando a los muros una parte importante del aislamiento térmico y acústico final, obteniendo así un sistema sin puentes térmicos y con una gran eficiencia energética gracias al buen comportamiento térmico de la madera.

La principal ventaja de este tipo de estructuras sobre las estructuras convencionales de hormigón es el reducido tiempo de ejecución y la altísima precisión. Los tableros se entregan en obra cortados a la medida necesaria, incluyendo huecos y uniones, por lo que el único trabajo a realizar es la colocación y la unión de los tableros. Una vez levantada la estructura, la instalación de los acabados es también mucho más rápida sobre los tableros de madera contralaminada, no debiendo esperar tiempos de secado de ningún tipo y siendo muy fácil trabajar sobre ellos únicamente con herramientas de mano.

Fig.4, izq: edificio Dalston Works en construcción, Waugh Thistleton Architects

Fig.5, der: detalle construcción edificio Dalston Works, Waugh Thistleton Architects



Con ejemplos construidos de hasta once plantas,⁸ este sistema constructivo ha demostrado efectivamente ser una alternativa enormemente beneficiosa para la construcción de edificios de altura media en entornos urbanos con mejores características térmicas y acústicas, más rápido y de forma mucho más sostenible. El ejemplo más emblemático de este tipo de construcción podría ser el edificio Dalston Works, de Waugh Thistleton, en Londres. Este edificio tiene a la vez el título de edificio de madera contralaminada más alto y más grande del mundo, siendo el tercero más alto construido con estructura de madera.

Aunque el sistema mencionado es el más extendido y el que mejor aprovecha las cualidades de los tableros de madera contralaminada, en viviendas unifamiliares, pabellones y edificios de menor entidad se han ido experimentando distintos acercamientos a las posibilidades formales

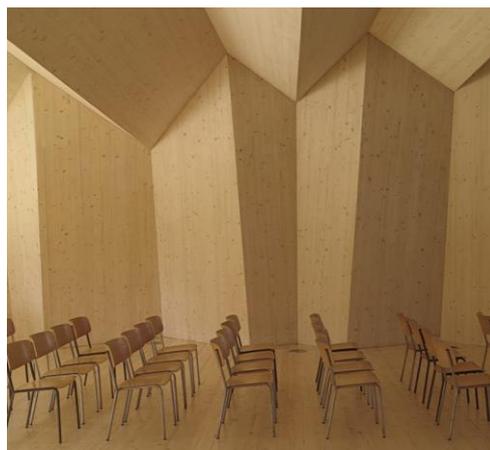
de este material. Alison Brooks en el pabellón "The Smile" utiliza los tableros de madera contralaminada a la vez como cerramiento, muro de carga y viga de gran canto, creando grandes voladizos y necesitando apenas un pequeño punto de apoyo para sostenerse. Para construir la capilla de Saint Loup, en Suiza, los arquitectos diseñaron un espacio tubular cerrado por una estructura de planos plegados construida con tableros de madera contralaminada con los cantos laterales biselados, de forma que crean una superficie quebrada pero continua.

En los últimos años, la implantación de las máquinas de corte por control numérico computerizado (CNC) ha hecho posible la elaboración de tableros con formas y uniones mucho más complejas sin el enorme coste que tendría realizarlos con métodos manuales. Esto, además de reducir coste y tiempo en la elaboración de los tableros, ha provocado la aparición de muchos proyectos que llevan mucho más allá el diseño con madera contralaminada. La capilla de Saint Loup utiliza los tableros para crear una cubierta de planos plegados, un sistema que dota al conjunto de una rigidez mucho mayor. El pabellón de los elefantes del Zoo de Zúrich está cubierto por una cúpula formada por 600 piezas de madera contralaminada, cada uno diferente a todas las demás, lo cual habría sido inviable sin la automatización de las máquinas CNC.

Fig.6, izq: pabellón The Smile, Alison Brooks

Fig.7, cen: interior de capilla St.Loup, Millo Keller

Fig.8, der: interior del pabellón de los elefantes de Zurich, Andreas Buschmann



Las uniones entre paneles o entre paneles y elementos de hormigón o acero se realizan normalmente mediante conectores metálicos. Se utilizan tirafondos para unir los tableros directamente entre ellos o angulares y piezas auxiliares metálicas, según el tipo de esfuerzo al que está solicitada la unión. Igual que en las estructuras de madera laminada, existen gran cantidad de tipos de uniones, pudiendo ser ocultas, vistas o uniones de carpintería sin conectores. Como ya se ha comentado, la aparición de las máquinas de corte CNC ha provocado un resurgimiento de las uniones de piezas de madera sin elementos auxiliares, muy costosas de realizar por medios manuales. El nuevo pabellón del teatro Vidy, por ejemplo, utiliza el diseño computerizado y la precisión del corte con máquinas CNC para crear una estructura plegada de dos hojas en la que cada elemento encaja con el siguiente como si se tratasen de piezas de un puzzle sin necesidad de conectores metálicos.

1.3.3. Otros productos relacionados

Es muy común encontrar edificios con estructura de madera en los cuales se utilizan estructuras mixtas con distintos productos de este material, aprovechando mejor las capacidades de cada uno. También han surgido productos desarrollados a partir de la madera contralaminada que pueden tener un hueco importante en la construcción durante el futuro cercano. Aunque estos productos no sean objeto de este trabajo, se mostrarán para dar una imagen más completa.

Madera laminada *Glulam*

La madera laminada encolada, *glued laminated timber* o *Glulam*, es quizá el producto de madera contemporáneo más conocido y precursor de la madera contralaminada. Se utilizan listones de madera rectangulares para, mediante encolado y prensado, crear elementos que no tienen la limitación dimensional que si tiene la madera naturalmente. Los listones se encolan en la misma dirección, formando elementos lineales que funcionan como pilares o vigas y pueden adoptar cualquier inclinación o curvatura. Actualmente es la madera que se usa en las estructuras de entramado. Además, la ausencia de limitaciones dimensionales y la gran resistencia que ofrece ha impulsado su uso en cubiertas de grandes luces como las de pabellones deportivos.

Normalmente se utilizan sistemas mixtos de madera laminada y contralaminada para crear estructuras porticadas en las que la madera laminada conforma la estructura principal y la madera contralaminada funciona como entrevigado y forjado.

Panel nervado

Se fabrica sustituyendo la capa central del tablero de madera contralaminada por una estructura de largueros, generando huecos o cajones que se aprovechan para colocar una capa de aislamiento. A diferencia de la madera contralaminada normal, estos tableros si funcionan claramente en la dirección de los largueros, pudiendo obtenerse en esta dirección luces mayores que con un tablero normal, de hasta 12 metros para las cargas habituales de edificios residenciales o administrativos. Se utiliza para formar forjados con mejores capacidades térmicas y acústicas en edificios con estructuras de madera

En España, este tipo de producto lo comercializa Egoín con el nombre EGO CLT MIX.

Madera contralaminada sin cola

Se trata de un producto actualmente en fase de desarrollo surgido en Estados Unidos. Su funcionamiento es análogo al de los uso de cualquier tipo de pegamento o cola. Mediante el uso de máquinas de corte CNC, se da forma a los listones de manera que cada capa se une a la siguiente mediante uniones secas de carpintería en espiga. Igual que los listones, la dirección de las espigas se alterna en cada capa para dotar de estabilidad en todas las direcciones. Aunque todavía se están investigando las posibilidades y propiedades de este tipo de producto, ya se ha podido comprobar que estructuralmente tienen una capacidad comparable con los tableros de madera contralaminada estándar. La principal ventaja es la ausencia total de pegamentos y colas químicas y,

Fig.9, sup: estructura mixta de hormigón, madera laminada y tableros contralaminados, *Emergent timber technologies*

Fig.10, inf: tablero nervado para forjado, *Emergent timber technologies*



Fig.11: pieza de madera contralaminada entrelazada, *ITAC UTAH*



por tanto, la potencial eliminación de los contaminantes que estos puedan generar.

Este tipo de producto ha sido desarrollado originalmente por el ITAC (*Integrated Technology in Architecture Center*) de la Universidad de Utah bajo el nombre de Madera Contralaminada Entrelazada (*Interlocking Cross Laminated Timber*).

Madera microlaminada

También conocida como madera de chapa laminada, LVL (*laminated veneer lumber*) o por el nombre comercial "Kerto". Está compuesto por láminas de madera de aproximadamente 3 mm obtenidas por desenrollo encoladas entre sí para obtener vigas o tableros de grandes dimensiones. Se colocan todas las láminas con la fibra orientada en la misma dirección, pudiendo disponerse ortogonalmente hasta un 20 % de ellas, para dotarle de algo más de resistencia en la dirección perpendicular. Igual que los tableros de madera contralaminada, puede ser utilizado como vigas, muros o losas, aunque la resistencia que alcanza es menor. Su principal ventaja con respecto a esta es la posibilidad de obtener paneles con curvas complejas de forma más sencilla (los paneles de madera contralaminada solo admiten una leve curvatura en una única dirección).

Tableros de fibras orientadas

Conocidos como tableros OSB por sus siglas en inglés (*Oriented strand board*). Se obtiene aplicando presión y calor a virutas de madera encoladas. Las virutas tienen una forma y espesor variable, y se alinean formando capas; las exteriores están dispuestas en un sentido relativamente longitudinal (ya que no están completamente orientadas) del tablero, y las de las capas intermedias tanto perpendicular como paralelas o longitudinales. Las virutas se suelen disponer en tres capas, y raramente en 5 capas.

Este tipo de tableros ya es ampliamente conocido en la construcción por su uso en elementos secundarios, pero actualmente se está investigando su uso como tablero estructural principal. Sus capacidades resistentes son mucho menores que las de la madera contralaminada, por lo que su uso está limitado a estructuras pequeñas con poca exigencia o a elementos puntuales, donde su reducido coste respecto a los productos de madera maciza lo convierten en una opción interesante.

1.3.4. Origen, evolución y estado actual en España

El panel de madera contralaminada nace como producto comercial a mitad de los años 90 en Austria casi como una evolución lógica de las estructuras de madera laminada. Aunque no se puede considerar todavía un producto de mercado de masas, a partir de los años 2000 ha sufrido una fuerte expansión, implantándose en centro Europa y extendiéndose a otros lugares con tradición de construcción en madera como Canadá, Estados Unidos o Australia. A pesar de la expansión, más del 80% de la producción mundial continúa en centro Europa, estando a la cabeza Austria (~60%), seguido de Alemania (~17%) y Suiza (~3%).⁹



Fig.12, sup: muestra de madera microlaminada Kerto, *Emergent timber technologies*

Fig.13, inf: setas de Sevilla, edificio realizado con madera LVL, *Javier Orive*



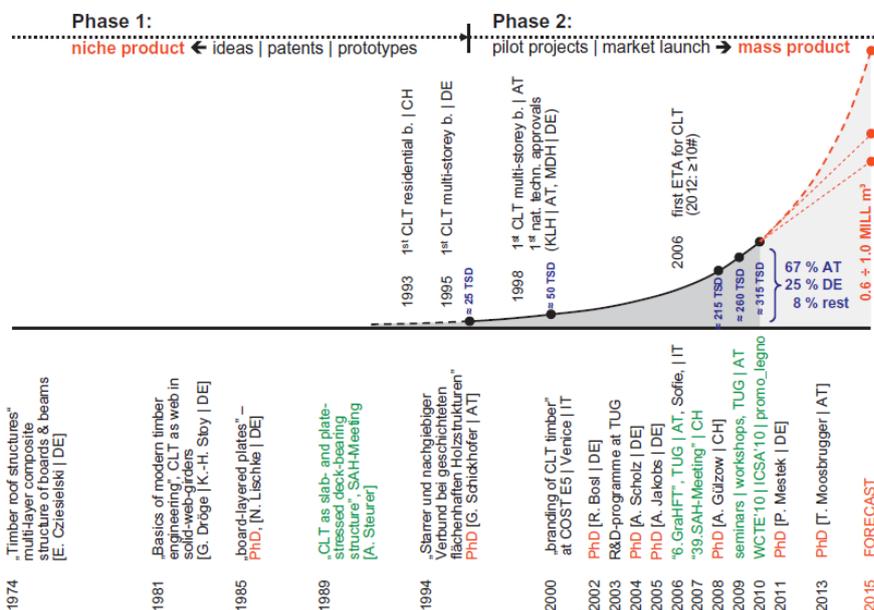
Un estudio del Instituto de la Madera de la Universidad de Graz de 2010 preveía que la producción de madera contralaminada en Europa mantendría un aumento constante y que, para 2015, habría alcanzado una cuota de producción anual de 600.000 m³.¹⁰ Esta previsión fue alcanzada y superada, siendo la producción en 2016 de unos 680.000 m³ y estimándose un aumento hasta 1.200.000 m³ para el año 2020.¹¹



Fig.14 y 15: principales empresas españolas de CLT.

Fig.16, der: esquema nacimiento y evolución de madera CLT, Schickhofer, G., 2010

Fig.17 a 19: principales empresas europeas de CLT



A pesar del crecimiento del mercado, todavía no existe una normativa común europea ni un estándar de construcción, necesarios para desarrollar su potencial como producto de masas. En Europa la normativa de aplicación existente está totalmente basada en patentes y certificados técnicos (*European Technical Assessment, ETA*) específicos de cada productor, basados en los criterios mínimos establecidos en el Eurocódigo 5: Proyecto de estructuras de madera (el cual no incluye específicamente al tablero de madera contralaminada).¹²



En nuestro país la situación no es diferente. En la normativa específica sobre estructuras de madera del Código Técnico de la Edificación (Documento Básico: Seguridad Estructural – Madera) los tableros de madera, en general, no aparecen como elemento estructural principal, y los tableros de madera contralaminada en particular ni si quiera son mencionados, por lo que las estructuras de madera formadas por planos no están contempladas en dicha normativa. Por suerte para este material, la normativa española es prescriptiva, no descriptiva. Esto significa que la normativa permite utilizar cualquier sistema constructivo siempre y cuando se certifique de forma competente que cumple con los requisitos exigidos. Una normativa específica que unifique métodos de cálculo y coeficientes de seguridad es necesaria para el crecimiento de la producción.¹³



Aunque todavía no es un material muy conocido ni extendido en nuestro país (que no tiene una gran tradición maderera), comienza a existir una buena cantidad de proyectos construidos con madera contralaminada, sobre todo en el norte de la península. Las empresas

líderes en la producción nacional son la vasca Egoín y Amatex, en Soria. Ambas empresas disponen de equipos de asesoramiento técnico e instaladores, de manera que se encargan de todo el proceso de fabricación de las estructuras, desde asistencia al diseño y adecuación hasta la puesta en obra.



2.CLT EN LA CONSTRUCCIÓN

2.1. BENEFICIOS

Además de los importantes beneficios relacionados con el uso de materiales sostenibles, de lo que se hablará más adelante, la construcción con tableros de madera contralaminada presenta numerosas ventajas como sistema constructivo respecto a los sistemas más convencionales de hormigón o acero. Estas ventajas son la suma de las características propias de la madera (con sus desventajas intrínsecas minimizadas por la contralaminación) con los beneficios propios de los sistemas prefabricados y en seco. Así, las principales ventajas del sistema son la velocidad de ejecución, la alta precisión, la disminución de trabajo y residuos en obra, la ligereza de la estructura y la mejora del aislamiento térmico y acústico (o la facilidad para alcanzar los valores de aislamiento deseados).

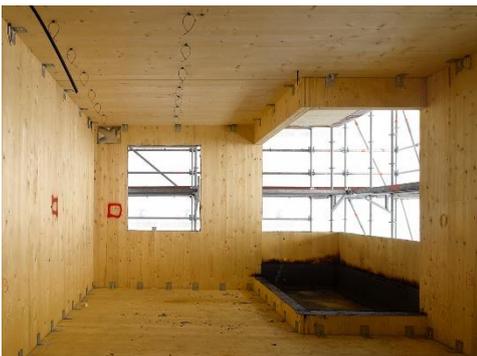
2.1.1. Tiempo de ejecución y precisión

El reducido tiempo de ejecución es por muchos considerado el mayor beneficio directo de la utilización de estructuras de CLT. Los tableros son fabricados íntegramente en taller y entregados en obra con su medida definitiva, con los huecos de puertas y ventanas realizados y con las uniones preparadas. El único trabajo a realizar en obra es la elevación y colocación de los tableros en su lugar, la colocación de juntas acústicas o de estanqueidad donde proceda y el atornillado de la unión, requiriendo así menos tiempo, menos personal y menos maquinaria pesada, ya que, salvo la elevación, todos los trabajos se pueden realizar con herramientas de mano. Muchos ejemplos construidos muestran que el tiempo de elevación de la estructura puede ser de menos de una semana por planta para un edificio de viviendas convencional, sensiblemente menor que en una estructura convencional.¹⁴ Por ejemplo, la estructura del edificio Murray Grove de Londres, de nueve plantas, se levantó en solo nueve semanas.¹⁵

A medida que se levanta la estructura, los trabajos posteriores pueden comenzar inmediatamente después de la finalización de cada sección, pues no se deben esperar tiempos de fraguado ni secado de ningún tipo, ahorrando tiempo y permitiendo una organización mucho más eficaz de los equipos de trabajo en obra. Los acabados, aislantes y revestimientos se instalan directamente sobre los tableros, que funcionan como muros base y son fácilmente trabajables con taladros de mano y tornillos autoperforantes. La instalación de carpinterías también se acelera al estar los huecos preparados con precisión industrial. De nuevo en el edificio Murray Grove, los trabajos comenzaban inmediatamente al terminar cada planta, y el tiempo total de construcción fue de unos once meses, adelantándose a la fecha estipulada.¹⁵

Fig.20 y 21, izq: interior de edificio Murray Grove, Waugh Thistleton Architects

Fig.22, der: exterior de edificio Murray Grove, Waugh Thistleton Architects



En la construcción convencional, mucho tiempo en obra se pierde realizando pequeñas correcciones de errores, de tamaños de huecos y carpinterías, pasos de instalaciones, etc. La altísima precisión con la que se producen los tableros de madera contralaminada, aumentada todavía más con el uso de las máquinas de corte CNC reduce los potenciales retrasos y costes derivados de problemas aparecidos en obra, además de permitir una mayor estandarización de elementos secundarios como carpinterías y revestimientos.⁶

Con un buen diseño y planificación de los trabajos en obra, la reducción del tiempo total de construcción puede llegar a un 20 % con hasta un 50 % menos de trabajadores para el levantamiento de la estructura.¹⁵

2.1.2. Ligereza

Siendo la madera CLT un material estructural macizo con una capacidad resistente comparable a la del hormigón, su peso es sensiblemente menor, con una densidad de entre 450 y 550 kg/m³ según la especie de madera utilizada, un 25 % del peso del mismo volumen de hormigón. Gracias a esto el peso total de las estructuras es mucho menor, pudiendo llegar a ser, según el tipo de edificio, seis veces más ligera que una estructura de hormigón y la mitad que una equivalente de acero.

Gracias a esta reducción la madera CLT facilita la construcción en lugares donde las condiciones del suelo son una limitación, ya sea por su baja resistencia, su difícil accesibilidad o la presencia de túneles o galerías en el subsuelo. Igualmente facilita el aumento de alturas de edificios ya construidos o la construcción dentro de estructuras existentes. En todo caso, el tamaño de las cimentaciones se verá siempre muy reducido en comparación con una estructura convencional, reduciendo así una de las partidas más caras y con mayor uso de maquinaria pesada de las obras, además de reducir el volumen total de hormigón y armaduras, ambos materiales con una alta huella de carbono.

Como ejemplo, para el proyecto de la casa 205 de H Arquitectes, una de las premisas era alterar lo mínimo el terreno, una parcela boscosa con una gran pendiente.¹⁶ La ligereza de la madera contralaminada permitió construir toda la vivienda sobre una cimentación mínima, apenas dos muretes de hormigón, y elevando los tableros con una grúa móvil desde el camino de acceso. Gracias a esto, la alteración sobre el terreno fue mínimo, solo el desbroce y allanado bajo el edificio y del camino de acceso.

Fig.23: vivienda 205, Starp estudi



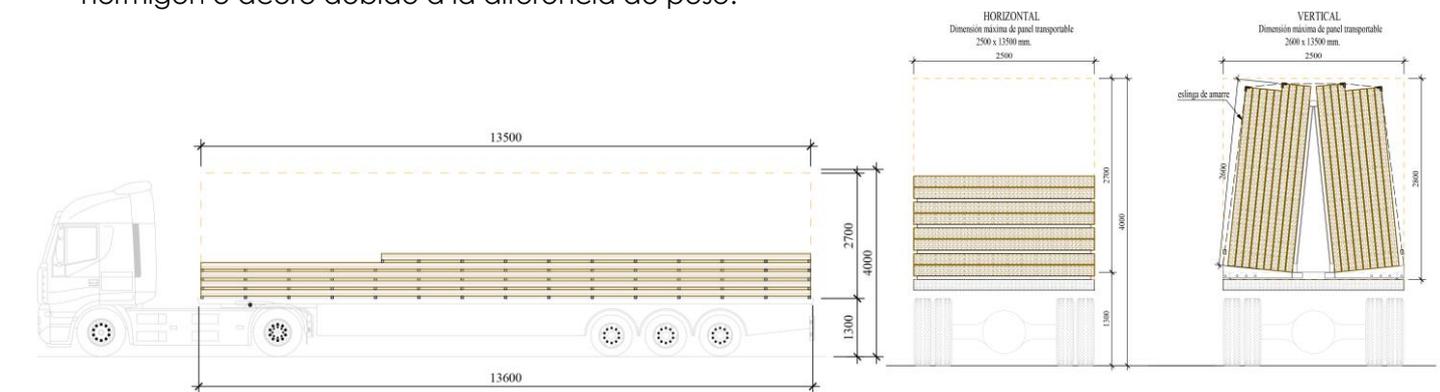
2.1.3. Transporte y logística

El transporte de los tableros CLT es más sencillo que el necesario para una estructura de hormigón gracias a su ligereza y al no requerir camiones especiales ni estar limitado por tiempos de fraguado o endurecimiento. En prácticamente cualquier caso los tableros serán planos, por lo que, con un buen diseño del despiece de la estructura pueden ser transportados en camiones convencionales de forma muy eficiente. Gracias a esto y a la gran disminución del peso total de la estructura, la cantidad de envíos del taller a obra es mucho menor que la necesaria en una estructura equivalente de hormigón. Los proyectos contruidos demuestran que esta reducción puede llegar a ser hasta de un 80 % cuando las condiciones son favorables. Las propias productoras ofrecen guías de dimensionado adaptadas a la normativa de transporte de sus países de actividad. Obviamente, el transporte será más complicado cuando el proyecto requiera de piezas complejas que no puedan apilarse fácilmente o de gran tamaño, pero en todo caso, siempre será más sencillo que el transporte de piezas equivalentes de hormigón o acero debido a la diferencia de peso.



Fig.24, sup: camión cargado con tableros CLT, guía transporte Egoín

Fig.25, inf: esquema distribución en camión de plataforma abierta, el más común, guía transporte Egoín



Como ya se ha mencionado, el levantamiento de la estructura se realiza a gran velocidad. Por ello, siempre considerando un buen diseño y organización de la estructura, se puede reducir casi totalmente la necesidad de almacenaje en obra, levantándose desde el camión los tableros e instalándose directamente en su lugar.

Esto supone una gran ventaja en entornos urbanos o de difícil acceso, donde el desplazamiento de camiones es más complejo y puede generar grandes molestias y el espacio disponible para acopios es menor. En la casa vacacional en Rigi del equipo AFGH, con un clima invernal de alta montaña muy severo y solo accesible en teleférico, la facilidad de transportar madera contralaminada permitió que pudieran llevarse los tableros a la obra de forma relativamente sencilla con un helicóptero-grúa y que se pudiera construir todo el edificio en la ventana de tiempo en que la climatología era benigna.

Al apenas existir trabajos *in situ* la cantidad de materiales almacenados en obra es mucho menor, lo que, junto a los reducidos tiempos de construcción, la precisión y la menor necesidad de maquinaria pesada, reducen sensiblemente las posibilidades de que se produzcan accidentes. Además, los residuos generados por la instalación de la estructura son casi nulos, apenas el serrín generado al atornillar y ningún material químico o potencialmente perjudicial.

Fig.26: residuo formado en una semana de instalación de estructura en Murray Grove, Waugh Thistleton Architects



2.2. SOSTENIBILIDAD

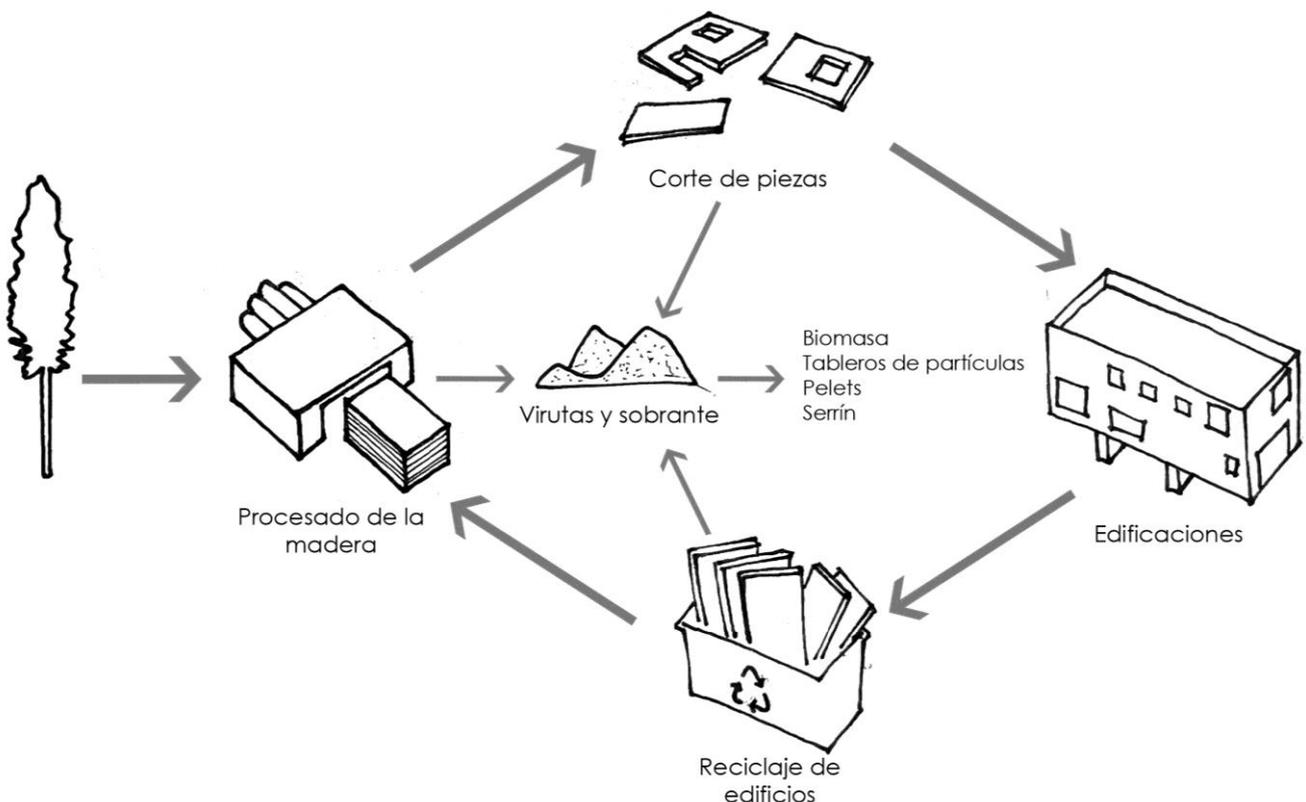
Según la encuesta realizada por Kell Jones, la sostenibilidad medioambiental fue el requisito que llevó a utilizar la madera contralaminada en el proyecto en hasta un 30 % de los casos, siendo el factor más veces presente, por encima del ahorro de tiempo, el coste económico o el impacto social.

2.2.1. Producción y huella de carbono de la madera

Durante su crecimiento, los árboles absorben dióxido de carbono mediante la fotosíntesis, almacenando el carbono en la madera y expulsando oxígeno a la atmósfera. Este proceso se ralentiza a medida que el árbol envejece, hasta su muerte, cuando el árbol comienza a descomponerse y todo el carbono es expulsado de vuelta a la atmósfera. En las explotaciones forestales gestionadas para producción maderera los árboles son talados antes del fin de este ciclo, por lo que el dióxido de carbono queda almacenado en la madera. Por cada árbol talado se plantan nuevos árboles, que comenzarán el ciclo de nuevo, existiendo siempre una masa de árboles jóvenes en crecimiento, absorbiendo dióxido de carbono de la atmósfera a un ritmo mayor del que tendrían los árboles ya crecidos. En los productos de madera laminada se utilizan mayoritariamente maderas blandas y de rápido crecimiento, lo que acelera todavía más este ciclo.

Todos los productos de madera funcionan como almacenes de dióxido de carbono. Al construir con madera proveniente de bosques gestionados de manera sostenible, aumentamos la capacidad del planeta de almacenar dióxido de carbono. Por todo ello, en muchas ocasiones, la madera tiene una huella de carbono negativa: el carbono emitido a la atmósfera durante el proceso de tala y procesado es menor que el que ha absorbido el árbol durante su crecimiento.

Fig.27: esquema circularidad de la vida de la madera, elaboración propia



La producción de madera puede llegar a no generar ningún residuo no aprovechable durante su procesado. Como se ha comentado antes, la madera contralaminada se fabrica con los listones exteriores del tronco, difícilmente aprovechables para cualquier otro uso, por lo que se comienza aprovechando una parte normalmente sobrante en los aserraderos. Se considera que durante el aserrado de los troncos se aprovecha un 60 % de la madera para crear listones, siendo el 40 % restante trozos de madera, serrín, virutas y fibras de madera. Estos subproductos son aprovechables para una gran cantidad de usos: piezas para carpintería, conglomerados, tableros de fibras orientadas, aislantes de fibra de madera y, en última instancia, cuando el sobrante no sea aprovechable, como biomasa para la generación de energía.

Al final de la vida útil de los edificios construidos en seco, pueden ser fácilmente desmantelados y gestionar los residuos eficientemente. La madera contralaminada, si se han utilizado pegamentos con base de poliuretano tipo PUR, es totalmente reciclable. Igual que con los restos de madera durante el proceso de aserrado, esta madera se puede reutilizar para confeccionar piezas de carpintería, tableros de virutas, serrín, o utilizarse como biomasa para generar energía, ya que el pegamento tipo PUR no emite gases contaminantes al quemarse.

2.2.2. Menor uso de materiales con alta huella ecológica

El simple hecho de utilizar una estructura de madera contralaminada ya supone una importante reducción de emisiones al cambiar materiales con una gran huella de carbono como el hormigón o el acero por un material renovable como la madera. Además de esta reducción directa, este tipo de estructuras ayudan a reducir el uso de otros muchos materiales no renovables durante la obra, todos ellos relacionados con las ventajas constructivas que se han comentado en el punto anterior.

Las cimentaciones, aunque siguen siendo de hormigón en la inmensa mayoría de casos, utilizan mucho menos volumen de hormigón y acero de lo que necesitarían en una estructura convencional. Para las excavaciones se requiere el uso de maquinaria pesada, por lo que una reducción del volumen a excavar implica un ahorro considerable de combustibles fósiles. La menor cantidad de trayectos de camiones también implica un importante ahorro de combustibles.

Comúnmente, los paneles CLT constituyen el cerramiento de los edificios, por lo que sirven de muro base sobre el que instalar revestimientos y acabados y además aportan una buena parte del aislamiento térmico total del muro. En espacios interiores, la superficie de los tableros se deja a la vista en muchas ocasiones. Con todo esto se obtiene una importante reducción de material en aislantes, subestructura de revestimientos y acabados. Siguiendo criterios de sostenibilidad, se podría reducir todavía más el uso de este tipo de materiales utilizando aislantes de fibra de madera.

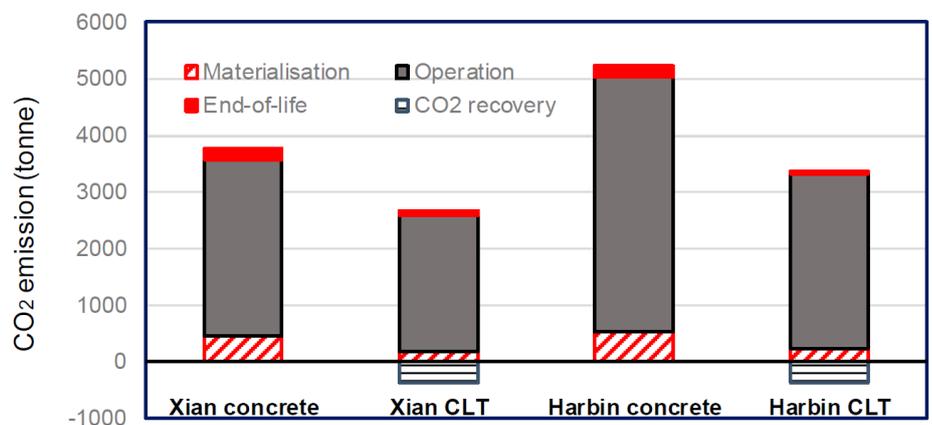
2.2.3. Eficiencia energética

Durante la vida útil de los edificios el consumo de energía se concentra en calefacción y refrigeración, iluminación y aparatos eléctricos. Mientras que en el resto es irrelevante, en la calefacción y la refrigeración son muy importantes los sistemas constructivos y materiales escogidos para los cerramientos, evitando pérdidas o aportes de energía no deseados. Cabe mencionar la importancia del buen diseño para obtener una mayor eficiencia energética: además de elegir los materiales y sistemas correctos, es indispensable elegir las orientaciones, protecciones solares y sistemas de ventilación adecuadas.

Como se explica más detalladamente en el punto 3.4., la madera contralaminada es un material con el que es relativamente sencillo conseguir una gran eficiencia energética de las edificaciones. La madera por si misma tiene un aislamiento muy elevado, lo cual se aprovecha totalmente al utilizar tableros macizos que forman parte del cerramiento. Se trata, además, de un sistema constructivo en el que se puede conseguir la ausencia total de puentes térmicos y, donde sea inevitable, serán mínimos debido al aislamiento de la propia madera. Otro factor a tener en cuenta es la alta estanqueidad que se puede conseguir, condición a la que se le da gran importancia en los estándares actuales más exigentes, como el alemán PassivHaus. En la práctica cualquier sistema constructivo actual puede alcanzar los valores necesarios de aislamiento con un buen diseño y dimensionado, por lo que la ventaja que supone el uso de madera contralaminada es la facilidad y disminución de materiales específicos con la que se consigue.

Ying Liu et al. realizaron un estudio comparativo entre la huella de carbono de dos edificios iguales a lo largo de toda su vida útil en regiones frías, uno construido con estructura de hormigón y muros fábrica cerámica y otro con estructura y muros de tableros CLT.¹⁷ La reducción de emisiones, sin contar el carbono absorbido por la madera, se estableció en aproximadamente un 40 %, siendo la reducción más importante en el periodo de uso del edificio. El carbono almacenado en la madera superaba al emitido durante toda la fase de construcción y de derribo, pudiendo alcanzarse así las emisiones nulas en caso de minimizar el gasto energético durante el periodo de uso mediante estándares PassivHaus o generación de energía renovable.

Fig.28: comparación de emisiones de CO₂ de edificio de CLT y de hormigón, Ying Liu, 2017



2.2.4. Uso masivo de la madera y desarrollo forestal

Ante el planteamiento de utilizar la madera a gran escala como alternativa sostenible a la construcción con hormigón y acero, surge la duda de si los bosques del planeta pueden absorber la demanda.

Existen distintos sellos internacionales, como FSC (Consejo de Administración Forestal) o PEFC (Programa para el Reconocimiento de Certificación Forestal) que, junto a regulaciones estatales y otros sellos confirman que los bosques están gestionados de una manera sostenible y responsable, asegurando la diversidad, el suministro y las buenas condiciones de la materia prima y los trabajadores. De los, aproximadamente, cuatrocientos millones de hectáreas de bosque en el mundo, sobre el 20 % tiene estos dos sellos.¹⁸

Un producto solo puede obtener esta certificación cuando demuestra que todas las compañías que participan del proceso de producción están acreditadas, pasando por la explotación forestal, aserraderos, distribuidores y productores. De esta forma se asegura la sostenibilidad de toda la industria. En Europa, la mayoría de la producción se produce con madera procedente de Alemania y Austria.

Al contrario de lo que se pueda intuir, desde el resurgimiento de la construcción con madera en Europa, los bosques regulados de los que surge esta madera han experimentado un crecimiento estable.^{19,20} De hecho, los únicos bosques del mundo que crecen actualmente son los de las explotaciones madereras. El aumento de la construcción con madera, en vez de reducir las masas boscosas, genera que aumente su protección y mejore su gestión, provocando un aumento paulatino de la masa vegetal. Además, la tala y plantación de árboles nuevos provoca que el dióxido de carbono que estos bosques absorben sea mayor que en los bosques no gestionados (como se ha comentado, los árboles absorben CO₂ a un mayor ritmo durante su crecimiento).

Mario Fernández estudia en su tesis doctoral la sostenibilidad del uso masivo de la madera contralaminada de conífera en España en los próximos 40 años, proponiendo un modelo de cálculo y realizando distintas simulaciones, tanto con la tasa de extracción actual como en el supuesto de un gran aumento de la demanda de madera²¹. En este estudio concluye que, en la mayoría de escenarios, un aumento de la demanda de madera para construcción en España no solo sería sostenible, sino que además produciría un aumento de la masa forestal total del país, permitiendo no sólo fomentar la sostenibilidad energética y en emisiones, sino a su vez, promover una actividad generadora de riqueza.

2.3. ESTÉTICA

Según la misma encuesta, la estética de los materiales es el tercer factor más importante a la hora de elegir un material como la madera contralaminada. Si bien no se puede considerar como una ventaja en sí misma, la madera contralaminada posee un fuerte carácter estético propio, el cual ha sido la razón por la que muchos arquitectos han decidido utilizarla.



Fig.29 a 33: principales sellos y certificados de protección de los bosques

2.3.1. Materialidad

Los tableros de madera contralaminada pueden dejarse expuestos sin ningún peligro en espacios interiores. En la mayoría de proyectos se aprovecha esta característica y se diseñan los espacios dejando los tableros de madera contralaminada sin revestir, mostrando el propio aspecto de los listones de madera en crudo. El hecho de que los tableros constituyan toda la envolvente de los edificios genera una gran variedad de soluciones, pudiendo dejar a la vista solo algunos elementos de suelos, paredes, escaleras o techos o dejar a la vista la totalidad de los tableros. Algunos proyectos llevan esta estética a la máxima expresión dejando a la vista la madera de la totalidad de las superficies interiores y extendiéndola a mobiliario y encimeras construidos con madera contralaminada.

La madera contralaminada se comercializa en general con tres niveles de calidad visual: industrial revestida, en la que no se aplica ningún criterio de acabado visual pues está pensada para instalarse con un trasdosado interior, como placas de yeso laminado; industrial vista, en la que se eligen listones con menos desperfectos y se eliminan los nudos y defectos más grandes; doméstica o vista, en la que se seleccionan para la capa exterior listones sin apenas defectos, de grano más compacto y se pulen las superficies. Los nombres y diferencias entre cada calidad pueden variar, reduciéndolos muchas empresas a calidad industrial, para revestir, y doméstica, para dejar a la vista. La especie de madera utilizada es el otro factor determinante para el acabado visual de los tableros.²² En ocasiones se cambia la especie de la capa que va a quedar vista por el interior, de manera que la madera no vista se escoge con criterios estructurales o económicos y la madera de la capa vista se elige por criterios estéticos, por ejemplo, tableros con alma de madera de pino, más económica, y capa exterior de madera de alerce. Es destacable la tendencia, surgida de la estética povera de parte de la arquitectura actual, de utilizar tableros de calidad visual industrial expuestos, adoptando los propios nudos y desperfectos de la madera como un elemento expresivo.

Fig.34: especies utilizadas por Egoín, catálogo EGO_CLT



Además de los criterios puramente estéticos, varios estudios demuestran los beneficios de los materiales naturales expuestos en lugares de trabajo, estudio o aprendizaje. Se han observado, en entornos de enseñanza o de trabajo con elementos de madera vista, aumento en la capacidad de atención y la creatividad, mejoras en la salud y estabilidad mental de los usuarios, reducción del estrés, mejora de la imagen externa para empresas o marcas y aumento de productividad en oficinas.²³ Además de estos beneficios, que pueden atribuirse a la imagen que se pueda tener culturalmente de cada material, en los espacios interiores la madera funciona como un regulador de los niveles de humedad, absorbiéndola de los ambientes demasiado húmedos y soltándola cuando el ambiente es demasiado seco, mejorando sensiblemente la calidad general del aire.

Existen casos en los que la elección de un sistema de tableros de madera contralaminada ha venido dada por criterios constructivos, no buscándose la estética propia de la madera. En este caso, los tableros de madera contralaminada se pueden revestir totalmente con cualquier tipo de acabado, ligero o pesado. Por ejemplo, el edificio Dalston Works de Waugh Thistleton Architects utiliza una estructura de madera que reviste con un acabado exterior pesado de ladrillos cara vista, adaptándose a la estética presente en el barrio de Londres donde se encuentra y dejando totalmente oculta la estructura de madera.



Fig.35, izq: madera con nudos a la vista en estación Kuse, Ken'ichi Suzuki

Fig.36, der: revestimiento cerámico de edificio Dalston Works, Waugh Thistleton Architects

2.3.2. Nuevas formas arquitectónicas

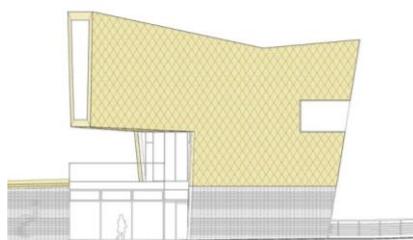
Los tableros de madera contralaminada han supuesto una nueva forma de entender el diseño de los edificios de madera, componiendo mediante planos resistentes que funcionan en cualquier dirección e inclinación. Este sistema, no equiparable a ningún sistema estructural existente, viene intrínsecamente unido a la aparición de nuevas formas arquitectónicas. Muchos arquitectos se han visto atraídos por la posibilidad de explorar estas nuevas formas y han desarrollado en sus proyectos las posibilidades de expresión formal surgidas de este nuevo sistema. En el compendio de proyectos de referencia se pueden ver algunos ejemplos.

La Torre de bodas en Blackpool, del equipo dRMM, utiliza los muros de madera contralaminada como vigas de gran canto para crear una gran pieza en voladizo en forma de cajón. Waugh Thistleton, en el

Fig.37, izq: alzado torre de bodas de dRMM

Fig.38, cen: interior torre de bodas de dRMM, Alex de Rijke

Fig.39, der: pabellón Multiply, Wauah Thistleton



2.4. IMPACTO ECONÓMICO

A la hora de ser escogida como material para los proyectos, la principal barrera con la que se ha encontrado la madera contralaminada ha sido el miedo a un impacto económico negativo, a un aumento en el coste total de la construcción.

2.4.1. Coste de la estructura

Al comparar directamente el coste de una estructura convencional con el de una de tableros de madera contralaminada, es cierto que el precio de la estructura de madera es sensiblemente superior. Como se ha visto anteriormente, la producción de madera contralaminada es un proceso complejo, con diferentes fases que implican a diferentes agentes: gestión y explotación forestal, aserrado, producción de tableros, diseño, corte, etc, requiriendo algunas de ellas instalaciones industriales muy especializadas. Cuando además se requiere del uso de máquinas de corte CNC el coste también aumenta según la complejidad del trabajo.

En países donde el uso de madera contralaminada no está muy extendido, como en España, la falta de productores puede incrementar potencialmente el coste total debido a la falta de competencia y a la menor posibilidad de encontrar productores locales, incrementando en muchos casos el coste en transporte (aunque la cantidad de envías será siempre menor que en una estructura equivalente de hormigón). La falta de conocimiento y formación, junto a la falta de normativa específica, hace prácticamente obligatorio contar con especialistas en estructuras de madera contralaminada para el correcto dimensionado y diseño de las piezas, siendo estos servicios aportados normalmente por las mismas empresas productoras de los tableros. En todo caso, aunque se tengan

los conocimientos necesarios para el dimensionado y diseño, es recomendable siempre contar con especialistas que puedan optimizar la producción y así aprovechar el resto de ventajas de la madera contralaminada.

2.4.2. Ahorro en gastos indirectos

Como se ve, existen factores que provocan que el coste directo de una estructura de madera contralaminada sea superior al de una estructura convencional. Sin embargo, las ventajas que ya se han comentado de los sistemas de madera contralaminada hace que muchos costes ajenos a la propia estructura se vean reducidos.

El transporte de los tableros de madera contralaminada es más sencillo al tener un menor volumen total de material, no requerir camiones especiales ni estar limitados por tiempos de fraguado del cemento, por lo que en países donde esté extendida la industria supone un importante ahorro. El peso de un edificio de madera contralaminada es sensiblemente menor al de un edificio equivalente de hormigón o acero, lo que supone una reducción del tamaño de las excavaciones a realizar y del volumen de hormigón utilizado en las cimentaciones. En edificios de varias alturas donde la partida de excavaciones y cimentación ocupa un gran porcentaje, esta reducción puede marcar una gran diferencia en el presupuesto final. La rapidez de ejecución y la necesidad de poca mano de obra, así como la facilidad para instalar revestimientos y acabados suponen un importante ahorro también.

La prefabricación en taller y la tecnología de corte CNC consiguen que la construcción de los tableros tenga una precisión casi absoluta. Reduce al mínimo la posibilidad de errores en obra y su correspondiente solución *in situ*, permitiendo además prever con mayor antelación y seguridad los pedidos necesarios de elementos secundarios como puertas y carpintería, sin necesidad de correcciones posteriores.

Aunque es muy difícil medir esta reducción debido a que procede de muchos puntos distintos, algunos autores y proyectistas consideran que, en muchos casos, con un diseño y organización suficientemente cuidadosos, el cambio de una estructura convencional a una de madera contralaminada puede ser económicamente neutro en el coste total de la construcción, pudiendo incluso suponer un ahorro considerable en casos específicos.



3. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

3.1. RESISTENCIA AL FUEGO

Al ser la madera un material combustible, la preocupación sobre el comportamiento de estas estructuras frente fuego es inevitable. Aunque pueda parecer contra intuitivo, la resistencia frente a incendios de las estructuras de madera contralaminada es muy alta, debido a la resistencia de los propios tableros y la eficiente compartimentación entre sectores, y ha sido uno de los factores decisivos a la hora de utilizar estas estructuras en muchos proyectos.

A pesar de tratarse de un sistema constructivo bien establecido en muchos países y de existir una significativa cantidad de datos experimentales en los que basar el diseño contra incendios, es necesaria más información, estandarización y marcos normativos para asegurar que estos métodos reflejan los riesgos de una estructura de madera. En muchos casos ha sido necesaria la participación de especialistas durante el proceso de diseño para asegurar la solución más adecuada y que sea aceptada por los organismos legales correspondientes.

3.1.1. Comportamiento estructural

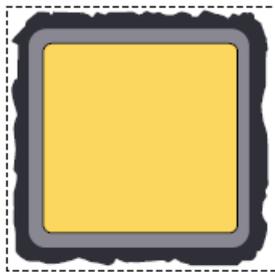
La energía requerida para comenzar la ignición de un tablero de madera contralaminada es significativamente más alta que la de un tablero chapado, listón o cualquier otro producto de madera no macizo. La cara expuesta del tablero comenzará a arder cuando se exponga a temperaturas de 300 °C o superiores. A medida que la cara de la madera se carboniza, la madera inmediatamente detrás se calienta, perdiéndose resistencia en esta primera capa, conocida como zona de pirolisis. Por debajo de estas capas, la madera no se ve afectada y mantiene toda su resistencia estructural. De esta manera, un elemento de madera mantendrá toda la resistencia estructural de la parte no quemada sin importar la exposición al fuego o la temperatura, mientras que elementos de hormigón o de acero pierden su resistencia y pueden colapsar ante altas temperaturas, a pesar de no ser materiales inflamables.^{24,25}



Fig.40: madera intacta detrás de la madera carbonizada, Arup

Teniendo esto en cuenta y conociendo la velocidad a la que arde la madera, se puede conseguir la resistencia exigida por la normativa sobredimensionando los elementos de forma que se cree una capa de sacrificio que pueda arder sin que el elemento pierda la resistencia estructural necesaria. A la sección calculada por requisitos estructurales, sin el sobredimensionado, se le conoce como sección efectiva. En los paneles EGO_CLT de la marca Egoin colocados verticalmente, la

velocidad de carbonización de los primeros 25 mm de la tabla expuesta al fuego es de 0,65 mm/min, siendo de 0,70 mm/min a partir de los 25 mm, cuando se haya formado una capa carbonizada. Cuando se hayan utilizado adhesivos tipo PUR, la capa se desprenderá al haber sido carbonizada al completo. La siguiente capa y posteriores ya habrán estado expuestas a altas temperaturas antes de empezar a quemarse, por lo que su velocidad inicial de carbonización es de 0,90 mm/min, volviendo a los 0,70 mm/min a partir de los 25 mm.⁵ Para evitar esto, normalmente se dimensiona el grosor de la capa de sacrificio de manera que una sola capa cumpla la exigencia, cuando sea posible. Como se ve en la tabla, estos datos son ligeramente superiores cuando el tablero está colocado como forjado o cubierta. Cuando se utilicen adhesivos tipo MUF, resistentes a las altas temperaturas, las capas carbonizadas se mantendrán adheridas al elemento, de manera que una vez sobrepasados los primeros 25 mm de la capa exterior, la velocidad de carbonización será constante. Según el certificado técnico de los paneles EGOCLT, se puede utilizar para la modelización frente a fuego de los tableros el modelo bilineal simplificado adoptado por la EN1995-1-2.



- Outline of timber beam
- Sacrificial (char) layer
- Pyrolysis zone (heated wood)
- Residual section - structural capacity retained

Fig.41, izq: esquema carbonización madera

Tabla 1: velocidades de carbonización de EGO_CLT, European Technical Certification EGO_CLT

Uso previsto	Posición de la tabla en el panel	Profundidad de la tabla [mm]	Velocidad de carbonización (β ₀) [mm/min]
Pared	Tabla expuesta al fuego	Los primeros 25 mm de la tabla tienen una velocidad de carbonización de:	0,65
		A partir de 25 mm ⁽¹⁾ la velocidad de carbonización de la tabla es de:	0,70
	Tablas sucesivas ⁽²⁾	Los primeros 25 mm de la tabla tienen una velocidad de carbonización de:	0,90
		A partir de 25 mm ⁽¹⁾ la velocidad de carbonización de la tabla es de:	0,70
Forjado o cubierta	Tabla expuesta al fuego	Los primeros 25 mm de la tabla tienen una velocidad de carbonización de:	0,65
		A partir de 25 mm ⁽¹⁾ la velocidad de carbonización de la tabla es de:	0,80
	Tablas sucesivas ⁽²⁾	Los primeros 25 mm de la tabla tienen una velocidad de carbonización de:	1,30
		A partir de 25 mm ⁽¹⁾ la velocidad de carbonización de la tabla es de:	0,80

Notas:

- (1) Se ha formado una capa carbonizada.
- (2) Puesto que la madera carbonizada se desprende tras la carbonización completa de cada capa, el criterio para analizar las tablas sucesivas (3ª, 4ª, etc.) es el mismo que el usado para analizar la 2ª tabla.

Para alcanzar resistencias más altas sin sobredimensionar en exceso, o simplemente cuando no se pretende dejar vista la madera, se utilizan revestimientos que suman su resistencia a la necesaria en el sobredimensionado. Aun así, se debe tener en cuenta que, en estos casos, cuando el fuego alcanza la madera, ésta ya habrá estado expuesta a altas temperaturas, por lo que su velocidad de carbonización inicial será mayor, de la misma forma que ocurría con la segunda y

posteriores capas de los tableros expuestos. Normalmente, las marcas incluyen esta consideración en sus tablas de predimensionado, de manera que ya está considerado el grosor extra, existiendo diferentes tablas según el requisito de resistencia frente a incendio.

Uniones

Las uniones entre tableros son, en la mayoría de casos, de acero, un material que pierde su resistencia cuando es expuesto a altas temperaturas. Esto las convierte en un punto crítico a la hora de plantear la resistencia contra incendios en el diseño.

El fallo de la unión puede ocurrir de dos maneras distintas. En la primera, es la propia unión metálica la que pierde su resistencia ante las altas temperaturas y colapsa. Cuando la madera se encuentra revestida esto no supone un gran problema, pues la solución es dotar a las uniones de un revestimiento suficiente que asegure la resistencia durante el tiempo suficiente. Cuando se quiera dejar la madera a la vista, se debe cuidar el diseño de manera que las piezas metálicas no queden expuestas. Los últimos modelos de cálculo han permitido el uso con seguridad de tirafondos en las estructuras de madera contralaminada. Con este tipo de uniones, el acero queda embebido en la madera y, por tanto, relativamente protegido de las altas temperaturas. El segundo tipo de fallo de las uniones ocurre cuando la madera en contacto con el metal comienza a quemarse debido a la transferencia de calor de este, se carboniza, perdiendo su resistencia, y se separa del conector metálico. Para evitar esto, se deben diseñar las uniones expuestas al fuego de manera que exista un material intermedio entre la pieza metálica y la madera, evitando que el calor se transmita directamente a la madera.¹⁵

3.1.2. Propagación y evacuación

Dada la compartimentación característica del sistema constructivo y la dificultad del fuego y la temperatura para atravesar los tableros, es relativamente difícil que un incendio se extienda rápidamente en una estructura de este tipo. Donde el diseño no sea tan compartimentado o queden expuestas grandes superficies de madera, debe considerarse el peligro potencial de que el fuego se extienda a lo largo de esas superficies. Existen numerosos tratamientos aplicados a la madera para reducir o prevenir la propagación de las llamas, pero tienen un impacto negativo en la huella medioambiental y limitan la posibilidad de reutilizar o reciclar la madera en el futuro, además de ser necesario su mantenimiento, por lo que debe priorizarse un buen diseño al uso de dichos tratamientos. Sin tratamiento, la madera contralaminada tiene una reacción al fuego de clase D-s2,d0,⁵ lo que significa que produce niveles bajos de humo y que no desprende partículas en llamas a pesar de ser un material combustible. Gracias a esto, se aumenta la seguridad durante la evacuación, disminuyendo las posibilidades de intoxicación por inhalación de humos o de quemaduras.

Dicho todo esto, es importante recordar que, sin importar qué sistema constructivo se utilice, un cuidado diseño de los recorridos de evacuación, de los sistemas de extinción y de la compartimentación es imprescindible para la reducción de los posibles daños personales y materiales en caso de incendio.



Fig.42: test de incendio a escala completa, XLam Australia Pty Ltd

3.2. SEGURIDAD ESTRUCTURAL

Al igual que para otros aspectos de la madera contralaminada, no se ha desarrollado normativa específica respecto a la seguridad y el cálculo estructural, por lo que no existen métodos simplificados ni coeficientes de seguridad estandarizados. Aun así, la investigación desarrollada en este sentido es muy amplia y cada productora ofrece valores y métodos de cálculo para sus productos. La mayoría de estructuras sencillas pueden calcularse con métodos de modelización y cálculo análogos a los de una estructura porticada de hormigón o acero, con alguna pequeña consideración específica. La baja rigidez de este tipo de tableros causará que en la mayoría de ocasiones las exigencias de limitación de deformaciones sean mayores que las de rotura, por lo que en muchos casos el dimensionado se realizará a Estados límites de servicio. En todo caso, los métodos ofrecidos deben basarse en el Eurocódigo 5: Proyecto de estructura de madera.²⁶

En general, se considera efectiva únicamente la resistencia de las capas paralelas al esfuerzo. Con ello, las barras perpendiculares están unidas entre sí por las barras transversales, por lo que se considera una unión flexible y debe tener en cuenta el cortante de rodadura en el cálculo.

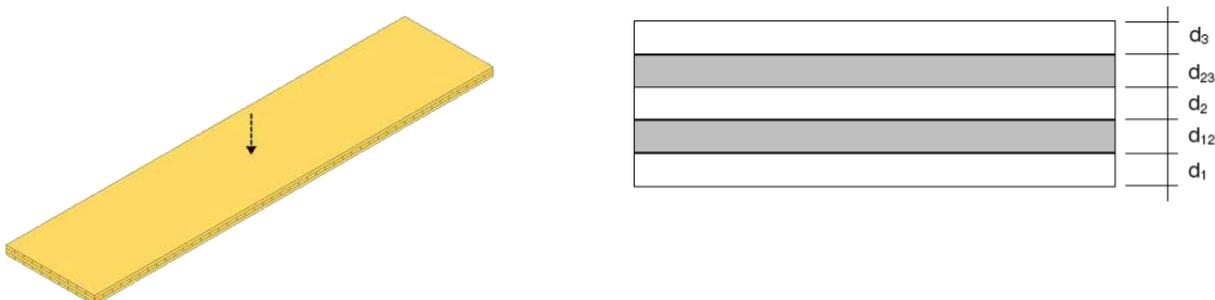
De cara a facilitar el diseño y prever costes, muchas marcas ofrecen tablas de predimensionado en los que incluyen las consideraciones de sobredimensionado por seguridad contra incendio. También se está comenzando a incluir en algunos programas de cálculo asistido por ordenador. La productora Stora Enso, por ejemplo, ofrece un programa de cálculo propio con el que realizar el predimensionado de los paneles.²⁷

Los datos y criterios que van a exponerse son los ofrecidos por Egoín en la Certificación técnica europea (ETA) de los paneles EGO_CLT una clase resistente de las tablas tipo C24.⁵

3.2.1. Acciones perpendiculares al panel

Este tipo de acciones se da principalmente en los casos en los que el panel se está utilizando como forjado o como cubierta, o bien ante esfuerzos horizontales como viento en paneles colocados en vertical. Las capas que se consideran serán las paralelas a la luz que se esté considerando, normalmente las capas impares para la luz principal y las pares para la luz secundaria.

Fig.43: capas efectivas ante acciones perpendiculares al panel, elaboración propia



Las propiedades características a considerar ante este tipo de acciones son:

Propiedad	Símbolo	Valor
Módulo de elasticidad		
-paralelo a la fibra	$E_{0, medio}$	11.600 MPa
-perpendicular a la fibra	$E_{90, medio}$	370 MPa
Módulo de cortante		
-paralelo a las tablas exteriores	G_{medio}	690 Mpa
-perpendicular a las tablas exteriores (módulo de cortante de rodadura)	$G_{R, medio}$	50 Mpa
Resistencia a flexión		
-paralelo a la fibra	$f_{m, k}$	24 MPa
Resistencia a compresión		
-perpendicular a la fibra	$f_{t, 90, k}$	2,50 MPa
Resistencia a cortante		
-paralelo a las tablas exteriores	$f_{v, k}$	4,0 MPa
-perpendicular a las tablas exteriores (módulo de cortante de rodadura)	$F_{R, v, k}$	0,65 MPa

Tabla 2: resistencia ante esfuerzos perpendiculares al panel, *elaboración propia con datos de ETA EGO_CLT*

3.2.2. Acciones en el plano del panel

Son las acciones que se dan cuando el panel está colocado en vertical. Principalmente son acciones de compresión, y en ocasiones esfuerzos de flexión cuando el muro funciona como viga en algún punto. De nuevo, solo se consideran efectivas las capas paralelas al esfuerzo, debiendo tenerse en cuenta que, para el mismo tablero, las capas efectivas a compresión y las efectivas a flexión no coincidirán.

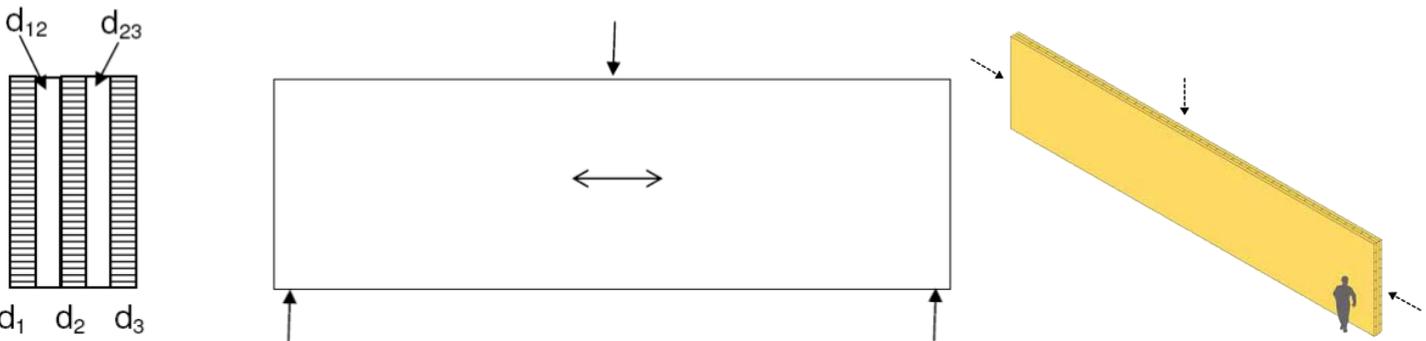


Fig.44: capas efectivas ante acciones paralelas al panel, *elaboración propia*

Las propiedades características a considerar son:

Propiedad	Símbolo	Valor
Módulo de elasticidad		
-paralelo a la fibra	$E_{0, medio}$	11.600 MPa
Resistencia a flexión		
-paralelo a la fibra	$f_{m, k}$	24 MPa
Resistencia a tracción		
-paralelo a la fibra	$f_{t, 0, k}$	14 MPa
Resistencia a compresión		
-paralelo a la fibra	$F_{c, 0, k}$	21 MPa
Resistencia a cortante		
-paralelo a la fibra	$f_{v, 0, k}$	5,0 MPa

Tabla 3: resistencia ante esfuerzos paralelos al panel, *elaboración propia con datos de ETA EGO_CLT*

3.2.3. Predimensionado, secciones estándar

Como ya se ha comentado, las marcas ofrecen tablas de predimensionado de sus productos. La española Egoin ofrece dichas tablas adaptadas a la limitación de flecha y protección contra incendios del código técnico español, con lo que nos sirven para comprobar el tipo de paneles que deberíamos plantearnos para nuestros proyectos.²⁸

Forjados biapoyados:

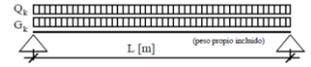
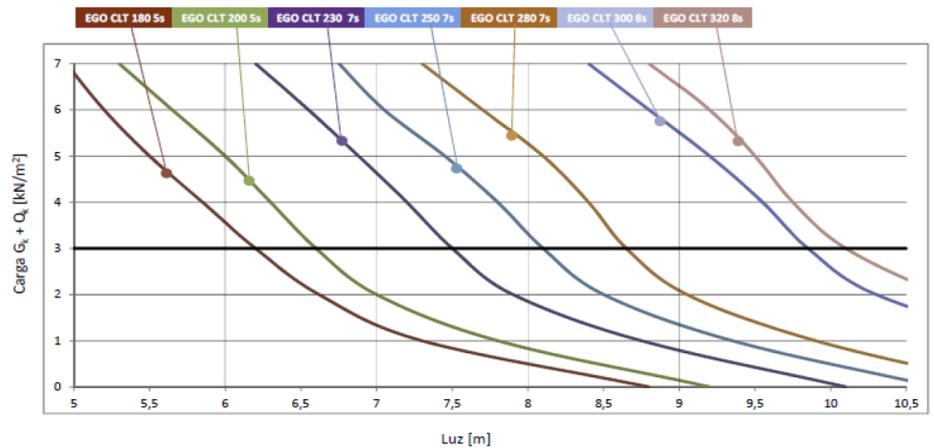
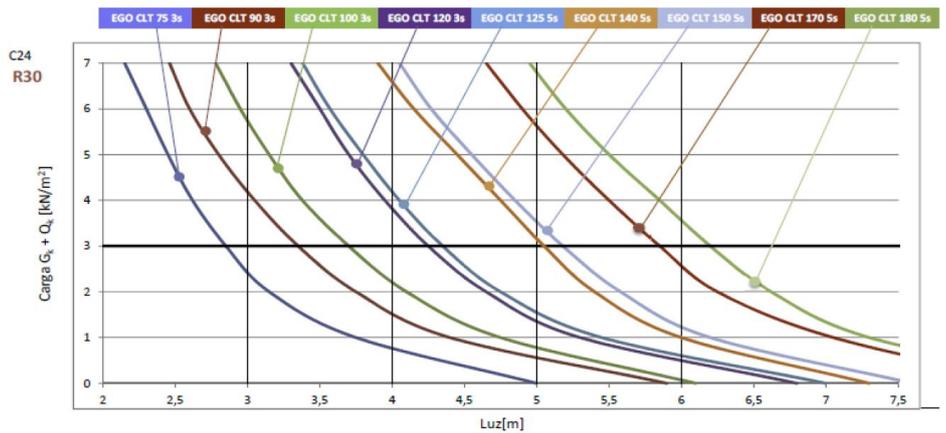


Fig. 45 y 46: tablas de predimensionado para forjados biapoyados con clase de resistencia C24 y resistencia a incendio R30, prontuario técnico Egoin



Voladizos:

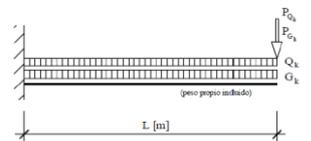
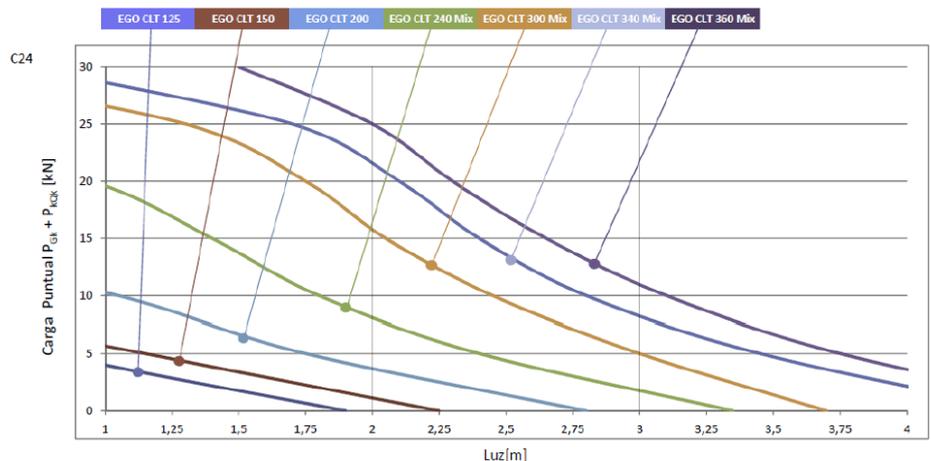


Fig. 47: tabla de predimensionado para forjados en voladizo con clase de resistencia C24, prontuario técnico Egoin



Muros:

C24

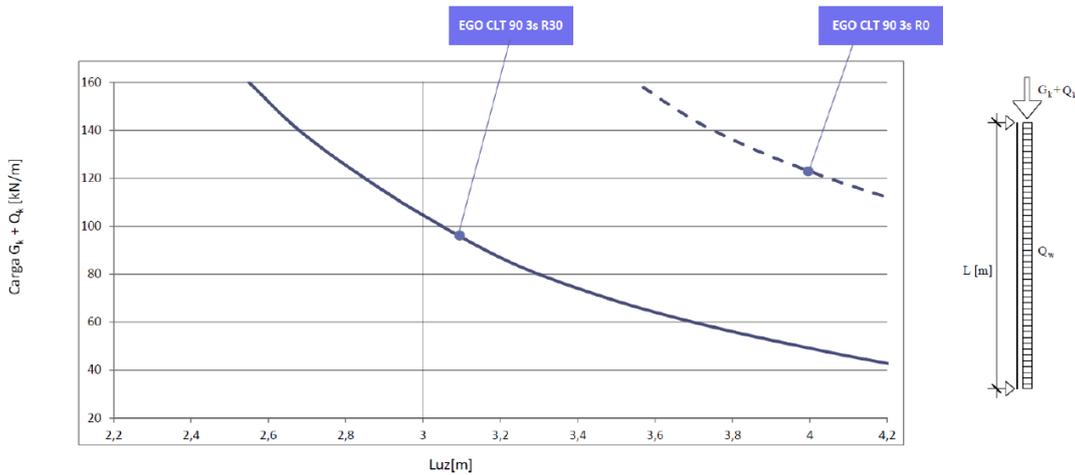
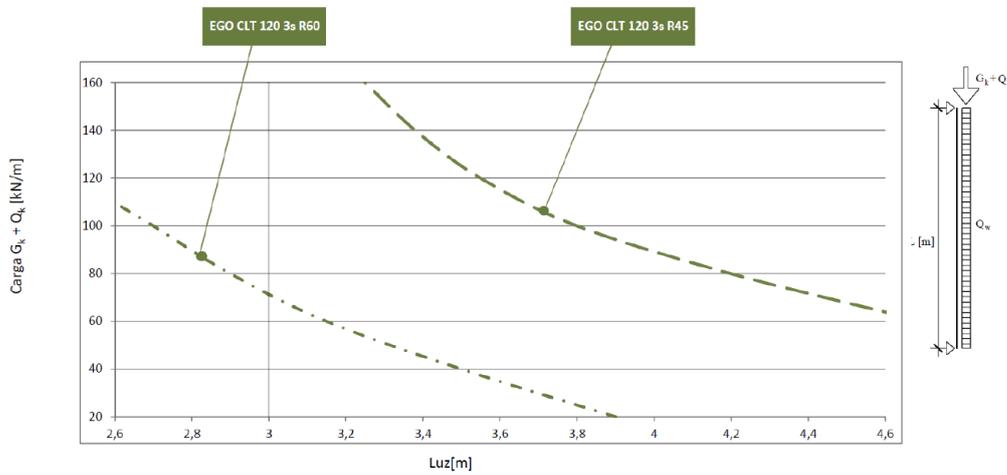


Fig. 47 y 48: tablas de predimensionado para muros, prontuario técnico Egoín

C24



Suponiendo unas condiciones aproximadas para un edificio de viviendas de luces máximas de 6 metros y una carga repartida de 5 kN/m², podemos comprobar que se podría construir un edificio de este tipo utilizando tableros EGO_CLT de 200mm con 5 capas para los forjados, pudiendo aguantar unos voladizos de hasta 2 metros sin refuerzos extra, y utilizando paneles EGO_CLT de 90mm con 3 capas para los muros, utilizándolos de 120mm en los puntos con más carga o donde se requiera más resistencia a incendio. La intención de este cálculo no es otra que ofrecer un pequeño orden de escala de las secciones más comunes que se vienen utilizando en la construcción con madera contralaminada.

3.3. RESISTENCIA A SISMO

De nuevo, no existe una normativa común ni un sistema de cálculo normalizado que iguale valores de cálculo, coeficientes de seguridad, etc. Existen, eso sí, numerosos estudios y una importante cantidad de datos experimentales, sobre todo respecto a edificaciones de baja altura hasta las seis o siete plantas, lo que se considera el campo más importante de aplicación de la madera CLT. Uno de los estudios más importantes es el del *National Institute for Earth Science and Disaster*



Fig. 49: edificio para pruebas de sismo a escala completa, NIED Japón

Prevention (NIED) de Tsukuba (Japón), que realizó tests a escala real sobre edificios completos aplicando los sismogramas de terremotos reales de Kobe, California y Nocera Umbria.²⁹ En todo caso, las conclusiones de este y otros estudios son que las estructuras de madera contralaminada son muy resistentes a los daños producidos por movimientos sísmicos y que la probabilidad de colapso es mínima incluso en terremotos de gran intensidad.³⁰

En comparación con el hormigón, la rigidez de la madera contralaminada es muy baja, y su elasticidad mayor, es decir, pueden soportar grandes deformaciones antes de que se produzca la rotura y recuperar después su forma original. Es esta característica la que lo convierte en un material con una gran resistencia a los movimientos sísmicos. En las grabaciones de los tests a escala real se puede observar como el edificio sufre fuertes deformaciones ante los empujes laterales para luego recuperar su forma sin ningún daño en las piezas de la estructura³¹. El punto crítico en este tipo de estructuras ante un terremoto se encuentra en las uniones metálicas, lugar donde es más probable el colapso. Por ello, la investigación actualmente se centra en obtener métodos analíticos y simplificados a través de los cuales obtener los esfuerzos producidos en los puntos de unión para poder realizar un correcto dimensionado.³²

En todo caso, todos los datos experimentales concluyen que, con un diseño adecuado de las uniones, los edificios de madera contralaminada cumplen sobradamente las exigencias de seguridad contra sismos.

Fig. 50: fallo de uniones metálicas en test de sismo, Matteo Izzi 2018



3.4. AHORRO DE ENERGÍA, ENVOLVENTE

3.4.1. Conductividad y puentes térmicos

La madera es un material con un aislamiento térmico muy elevado en comparación con otros materiales de construcción. Según la especie, su conductividad oscila alrededor de $\lambda=0,13 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, superado solo por los materiales utilizados específicamente como aislante. Si bien los sistemas tradicionales de entramado de madera no aprovechan este aislamiento, en los sistemas constructivos de madera contralaminada, al estar el cerramiento constituido en parte por los propios tableros, se aprovecha completamente el aislamiento del material. Un tablero de 9 cm de espesor, típicamente utilizado como muro de cerramiento, tiene por sí mismo una transmitancia térmica de $U=1,16 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{k})$, lo que ya es suficiente para los supuestos menos exigentes del CTE (DB HE-1). Utilizando aislante de fibra de madera ($\lambda=0,036 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) se alcanzaría la mayor exigencia para muros del CTE ($U<0,55 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{k})$ para zona climática E) añadiendo una capa de 3,5 cm de aislamiento al tablero de 9 cm, obteniendo una $U=0,54 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{k})$ en solo 12,5 cm de espesor total. Este cálculo no ha tenido en cuenta trasdosados ni acabados exteriores, pero sirve para ilustrar la facilidad con la que se pueden alcanzar altos valores de aislamiento al utilizar este tipo de material.

La mayoría de los puentes térmicos de un edificio se producen en el encuentro entre la estructura y la fachada (frentes de forjado, pilares, etc). Al construir con madera contralaminada, el muro base de la fachada lo forman los propios tableros, por lo que se pueden enrasar fácilmente los finales de los forjados con la cara exterior, con lo que se obtiene una superficie continua y plana sobre la que instalar el aislamiento por el exterior (condición necesaria para evitar condensaciones en la madera), obteniendo así un sistema de aislamiento continuo y sin apenas puentes térmicos. Donde sea inevitable que se produzcan puentes térmicos, como en las carpinterías o al alargar forjados para formar balcones, el propio aislamiento de la madera hará que la influencia del puente térmico en la eficiencia del cerramiento sea mínima.

3.4.2. Masa e inercia térmica

Materiales convencionales como el hormigón o el ladrillo tienen una gran inercia térmica, tienen una gran capacidad de almacenar energía y expulsarla cuando la temperatura exterior disminuye. Esta característica se utiliza para regular la temperatura interior de los edificios (absorbiendo energía durante el día y expulsándola por la noche, por ejemplo) o como medio para sistemas de calefacción (losas activadas, suelos radiantes, muro trombe, etc). Además, ayuda a mitigar los cambios rápidos de temperatura, suavizando la onda térmica.

La madera contralaminada, si bien tiene una inercia térmica relativamente alta en comparación con otros productos constructivos de madera, esta se encuentra por debajo de los valores que tienen el hormigón o los bloques cerámicos, por lo que no puede cumplir esta función por sí mismo. Existen aun así distintas estrategias para conseguir una alta inercia térmica en el sistema. Como demuestra el trabajo de María Sánchez, se pueden obtener cerramientos con una gran inercia térmica al combinar la madera CLT con tableros de fibra de madera

($\rho=140 \text{ kg/m}^3$) utilizados como aislante por el exterior. Otros proyectos combinan la madera con hormigón para aumentar la inercia total o para utilizar sistemas de calefacción superficiales como suelos radiantes o losas activadas.

Para obtener los máximos beneficios de la inercia térmica de los materiales, es aconsejable que estos estén expuestos, en contacto con el aire interior. La madera tiene la capacidad de equilibrar el contenido de humedad del espacio con el que está en contacto, por lo que, además de los beneficios de la inercia térmica, mejora la sensación térmica y la calidad del aire interior.

3.4.3. Estanqueidad

Los estándares actuales más exigentes de eficiencia energética, como el alemán Passivhaus, dan gran importancia a las pérdidas producidas por las fugas de aire no deseado de los edificios, producidas cuando no se alcanza la estanqueidad necesaria. Un edificio construido con madera contralaminada puede alcanzar fácilmente unos valores muy altos de estanqueidad. Los propios tableros funcionan bien como barrera de vapor, por lo que en muchas ocasiones no es necesaria la instalación de membrana de estanqueidad. La altísima precisión de producción de los tableros ayuda a que no se produzcan fugas en las propias juntas entre tableros. Normalmente, en los tableros que forman cerramientos, se instalan juntas de estanqueidad que pueden ser cintas adhesivas aplicadas después de la unión o perfiles de goma o caucho dentro de la junta.³³

La baja conductividad, la ausencia de puentes térmicos y los valores tan altos de estanqueidad hacen a la madera contralaminada un material altamente recomendable cuando se pretendan alcanzar certificaciones Passivhaus o equivalentes.

3.5. SALUBRIDAD, PROTECCIÓN FRENTE A LA HUMEDAD

La madera contralaminada está diseñada para su uso en espacios interiores y secos, siendo solo posible su uso externo cuando se encuentra tratada y protegida del impacto directo de los elementos.

3.5.1. Protección de la estructura

Los listones de madera utilizados para los tableros son secados artificialmente hasta tener un contenido de humedad de aproximadamente el 12 %, en el cual se considera inerte, no se deteriora. Cuando la madera se encuentra expuesta de forma continuada a una humedad alta (por encima del 20 %) puede comenzar a deteriorarse y perder su resistencia. La velocidad del deterioro aumentará según la cantidad de humedad, el tiempo que se encuentre expuesta, las altas temperaturas y el aporte de oxígeno.³⁴

Ante niveles moderados de humedad, como los producidos por el uso normal de una vivienda, las propiedades higroscópicas de la madera permiten que el propio material regule sus niveles de humedad cuando está en contacto con masas de aire bien ventiladas. Es por esto que es importante que los tableros de madera estén siempre ventilados. En proyectos donde la madera queda expuesta, esto no supone un problema, ya que están en contacto con el propio aire interior, que se

Fig. 51: efecto de la humedad en tablero CLT, Ferk H. 2013

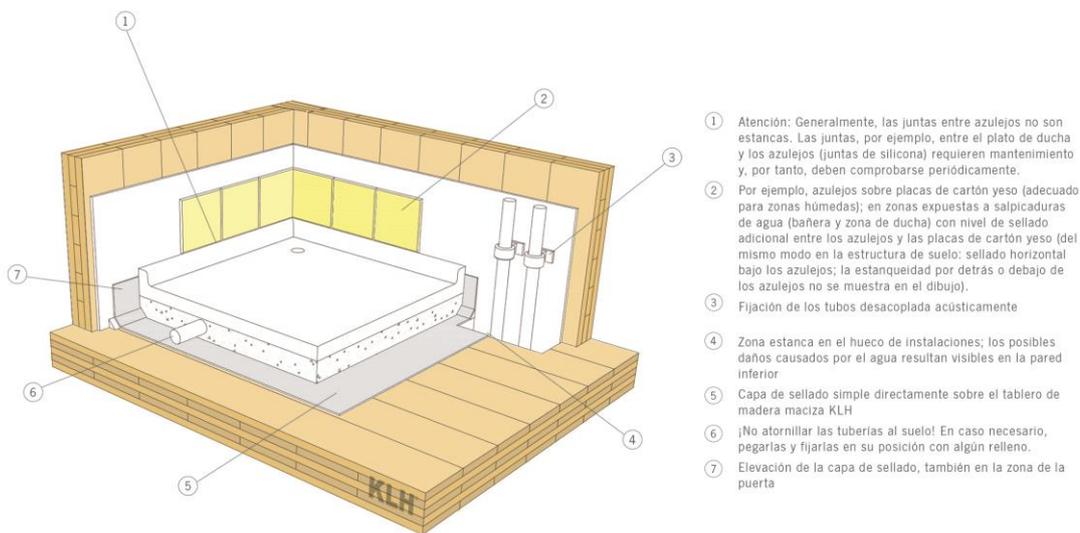


presupone suficientemente ventilado. Cuando la madera va a ser revestida, se debe tener mucho cuidado en el diseño, dejando siempre una cámara ventilada en contacto con los tableros de madera.

Los niveles peligrosos de humedad se producen principalmente cuando aparecen fugas en la red de distribución de agua, defectos en la impermeabilización, condensaciones indeseadas o absorción de agua por capilaridad.

Si bien una correcta instalación es imprescindible para evitar fugas y acumulación de agua en la red de distribución, se debe prever la posibilidad de que estos errores existan y separar, en la medida de lo posible, las tuberías de la estructura. Cuando esto no sea posible, debe cuidarse el diseño de manera que el agua nunca se acumule directamente sobre la estructura y existan materiales impermeables entre los pasos de instalaciones y la madera.³⁵

Fig. 52: recomendaciones para instalaciones de agua, catálogo de elementos constructivos para viviendas KLH

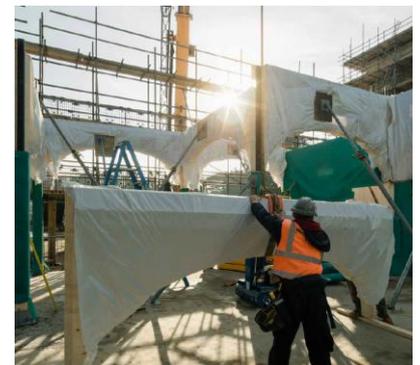


Cuando se vaya a colocar la impermeabilización, es muy importante asegurarse de que la madera está completamente seca y de que el material utilizado es permeable al vapor de agua, de manera que no se acumule la humedad entre este y los tableros. En la mayoría de casos, el propio tablero es impermeable al vapor y funciona como barrera.¹⁵

Las estructuras de madera contralaminada deben diseñarse de tal forma que se encuentre siempre en el lado caliente del cerramiento, es decir, que el material aislante principal debe situarse entre los tableros de madera y el exterior. De esta manera se evita la posibilidad de que se produzcan condensaciones en el interior de la madera.

La interfaz entre el terreno y la madera es el punto más crítico en cuanto al deterioro por exceso de humedad se refiere. Si bien se puede construir directamente contra el terreno, cualquier error en la instalación que genere un fallo en la impermeabilización puede producir la degradación de la base de los tableros y tener consecuencias fatales. Es importante también diseñar cuidadosamente el encuentro de la fachada con el suelo, de la parte inferior de las cámaras ventiladas y de los accesos, de manera que no se acumule agua en ningún punto. En

Fig. 53: estructura protegida de la humedad durante su instalación, Mark Hadden



todo caso, es recomendable elevar la estructura como mínimo unos 30 cm del terreno.

En la práctica, las estructuras de madera contralaminada se suelen construir sobre un basamento de hormigón que las eleva del suelo y las protege así de la humedad. En edificios urbanos donde la planta baja vaya a ser destinada a un uso diferente, normalmente se construye toda esta planta y el primer forjado en hormigón, adaptando la distribución estructural a los locales, y a partir de ahí se eleva la estructura de madera.

3.5.2. Infestación

Según el estándar europeo DIN 68800-2, los productos basados en madera maciza secada artificialmente con un contenido de humedad menor al 20 % se consideran suficientemente protegidos contra el ataque de insectos xilófagos. En la madera contralaminada se utilizan listones con aproximadamente un 12 % de humedad, por lo que normalmente se considera que son invulnerables al ataque de insectos.

Sin embargo, en situaciones en las que la madera haya estado expuesta a niveles altos de humedad, deberá considerarse la posibilidad de que exista infestación y aplicarse medidas al respecto. Muchos proveedores ofrecen paneles con tratamientos contra todas las especies potencialmente peligrosas para la madera, pero se debe considerar la posible toxicidad de los productos utilizados respecto a las normativas locales.

3.6. PROTECCIÓN FRENTE AL RUIDO

Como en otros puntos, no existe la suficiente cantidad de datos experimentales contrastados que nos permitan establecer un sistema completo de diseño acústico para las estructuras de tableros de madera contralaminada. Tampoco están incluidas en la normativa para utilizar los métodos simplificados que esta aporta (CTE DB-HR). Aun así, los resultados medidos en proyectos construidos son muy positivos. Mientras que en sistemas constructivos convencionales suelen producirse transmisiones de ruido indeseadas por errores durante la construcción, la alta precisión de la construcción con madera contralaminada minimiza o evita completamente estos errores, por lo que los niveles medidos en los proyectos superan en muchos casos los niveles esperados, a menudo con un margen considerable.

3.6.1. Aislamiento a ruido aéreo

A pesar de su bajo peso propio, los niveles alcanzados en aislamiento al ruido aéreo y de impacto son muy elevados, debido fundamentalmente a su sistema constructivo, que desacopla mecánicamente las caras externas.

Por sí mismo, sin revestimiento, un tablero de pared estándar 80 mm de 3 capas alcanza un aislamiento acústico de $R_a=31,0$ dBA y un tablero estándar de forjado de 135 mm de 5 capas un aislamiento de $R_a=38,0$ dBA.⁵ Para aislamiento a ruido exterior, la solución de fachada estándar, con aislamiento por el exterior y trasdosado de yeso laminado por el interior, cumplirá sobradamente la exigencia para cualquier caso. Cuando se pretenda dejar la madera vista en el interior, deberá

comprobarse que el tablero más el aislamiento exterior alcanza los valores exigidos. Para separaciones entre distintas unidades de uso se suelen utilizar tableros separados por una cámara de aire con aislante cuando se pretender dejar a la vista en el espacio interior, aunque esta solución conlleva un gasto extra de material. Cuando la madera vista no es una exigencia, con el trasdosado por ambas caras de un mismo panel se alcanzarán también los valores exigidos. Los mismos criterios sirven para los tableros de forjado o cubierta, debiendo estudiar la aportación de los pavimentos, falsos techos y aislantes de cubierta. En el punto 4.2 se exponen los detalles constructivos más utilizados y sus valores de reducción acústica para los casos más comunes.

3.6.2. Transmisión del ruido por la estructura

Mientras que la alta densidad de elementos estructurales es una ventaja tanto térmica como estructuralmente, la continuidad entre paredes, suelos y demás elementos en una estructura de madera contralaminada supone un medio sólido por el cual el sonido puede transmitirse grandes distancias a lo largo del edificio si no está correctamente diseñado. Para evitar esta transmisión indeseada de ruido se utilizan juntas acústicas, que permiten la desolidarización de los elementos estructurales colocando un material absorbente entre ellos. Estos materiales deben ser capaces de absorber las presiones de trabajo a las que se somete dicha junta. Los materiales más comunes son los cauchos y los paneles de fibras de alta densidad (fibra de madera, lana de roca, corcho, etc). Debe tenerse en cuenta la posibilidad de que estas juntas trabajen a la vez como junta acústica y como junta de estanqueidad a la hora de elegir el material.

Un acercamiento alternativo o complementario, cuando no se desea dejar la madera a la vista, es prevenir que el ruido alcance la estructura con materiales atenuantes separados de la estructura principal, que pueden ser trasdosados autoportantes, falsos techos o pavimentos flotantes.

3.6.3. Vibraciones

En forjados, la naturaleza ligera del material, su rigidez y el funcionamiento como losas sin entrevigado de ningún tipo lo hace muy susceptible a la transmisión de ruidos por vibración. La gravedad de los problemas de transmisión por vibración depende del uso, siendo el más común el de pisadas, y de la luz de la losa, aumentando considerablemente cuando se utilizan grandes luces.

Los problemas de vibración en los forjados se abordan mediante el aumento de la masa total de la losa, mediante materiales absorbentes y atenuantes o mediante una combinación de ambas soluciones

Si se quiere aumentar la masa de la losa, una solución común es aplicar una ligera capa de hormigón sobre el tablero, lo que es razonable cuando se desea instalar un suelo radiante o aumentar la inercia térmica del forjado. Cuando no se desea utilizar hormigón, se pueden utilizar alternativamente tableros de fibras de madera de alta densidad. Los pavimentos flotantes sobre materiales absorbentes son de gran ayuda para evitar que las vibraciones alcancen los tableros de forjado. Los acabados y revestimientos acústicos en falsos techos o paredes ayudan

a mitigar las vibraciones, pero son más efectivos contra ruido aéreo. Igual que en el resto de la estructura, cuando se prevea problemas por vibración, es importante diseñar las juntas de los forjados con materiales atenuantes de manera que se disminuye mucho la intensidad de las vibraciones.

3.7. MANTENIMIENTO

En general, si se cumplen las condiciones expuestas, la madera contralaminada no necesita ningún mantenimiento diferente al de cualquier otro material, de limpieza y cuidado. Las reaplicaciones de barnices, tratamientos o pinturas en maderas exteriores deberán realizarse entre cada cinco y diez años, dependiendo del producto. Cuando se deja sin tratamiento, la madera que esté expuesta, sobre todo a la luz solar, irá oxidando de manera natural y evolucionando a colores grisáceos, proceso que no afecta a sus cualidades más allá de su aspecto.

Como también se ha comentado, es de especial importancia para la durabilidad de la estructura su protección de la humedad continuada. Por ello se debe tener mucha precaución de mantener en buen estado las instalaciones de fontanería, saneamiento o calefacción, y tener un especial cuidado en el diseño y la ejecución de cualquier modificación o reparación que implique un peligro a este respecto.

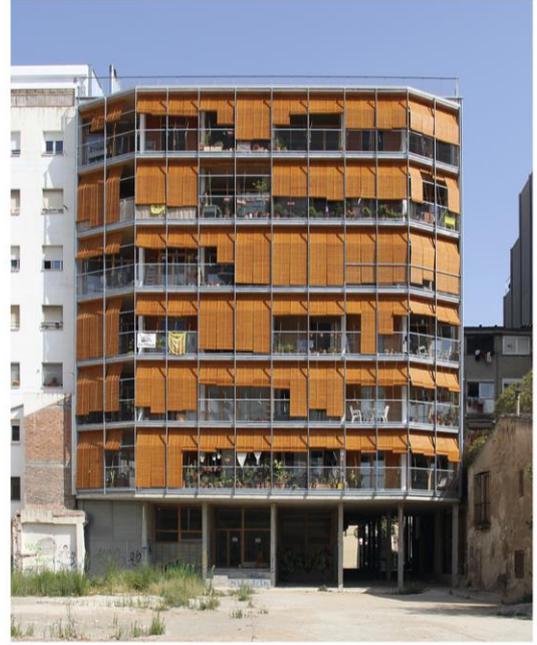
3.7.1. Reparaciones

Cuando la madera de un tablero ha sufrido algún daño, ya sea debido a un pequeño incendio, la acción de la humedad o un accidente de cualquier naturaleza, es relativamente fácil sustituir una sección de madera por una sana o incluso piezas enteras. Cuando se ha sobredimensionado la estructura por criterios de protección contra incendio, puede ocurrir que la integridad estructural se mantenga, habiéndose dañado solo la capa de sacrificio. En estos casos puede evitarse la sustitución de la madera eliminando la superficie dañada y colocando una capa de protección.

Cuando el daño afecta a la integridad estructural de la pieza es cuando debe colocarse una sección de madera sana en su lugar. Esto puede realizarse gracias a que las estructuras de madera contralaminada no son monolíticas, por lo que puedes mover más o menos libremente los elementos mientras mantengas la integridad estructural. Para realizar la sustitución, se apea la estructura, se extrae la sección dañada o la pieza completa y se coloca en su lugar la pieza o piezas sanas. A pesar de la aparente sencillez, no se debe obviar que se están modificando elementos estructurales, por lo que es imprescindible un estudio competente que asegure la estabilidad del conjunto.



4. PROYECTOS CON CLT



Cooperativa viviendas La Borda

Barcelona, España, 2018

Arquitectos: Colectivo LACOL

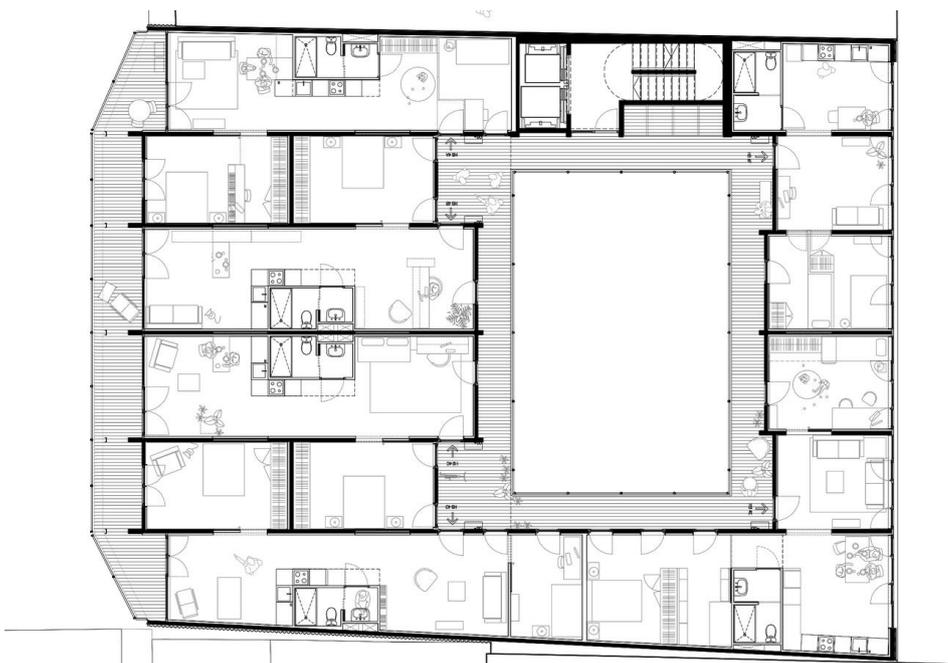
Empresa CLT: Egoín

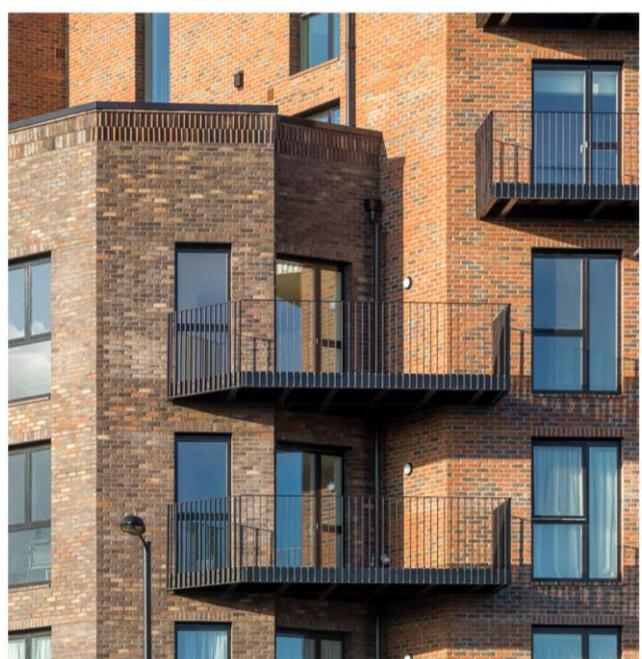
La Borda es una promoción de 28 viviendas auto-organizadas por los propios usuarios. Los objetivos eran construir el edificio con el menor impacto ambiental posible, tanto durante la obra como a lo largo de su vida útil, y conseguir el máximo confort con el menor gasto para reducir los costes globales de acceso a la vivienda y evitar la posibilidad de la pobreza energética entre los usuarios, aplicando estrategias pasivas para conseguir aprovechar al máximo los recursos existentes.

Actualmente La Borda es el edificio de madera más alto de España, con siete plantas. Sobre una planta baja de hormigón se levanta una estructura mixta de CLT y madera laminada alrededor de un gran patio comunitario. Siguiendo la voluntad comunitaria de la iniciativa, el edificio cuenta con muchos espacios comunes, siendo el más destacado el comedor común a doble altura abierto al patio y a la calle. La estructura sustituye los tableros CLT por pórticos de madera laminada en estos espacios para conseguir grandes espacios diáfanos en contraposición con la compartimentación de la zona donde se encuentran las viviendas. La estructura de CLT se dispone mayoritariamente de forma longitudinal hacia el fondo de la parcela modulando el ancho en tiras que marcan la separación entre espacios o viviendas. Perpendicularmente se cierran las tiras en ambas fachadas también con tableros CLT. Una subestructura de metal configura tanto las fachadas exteriores como las interiores y el cerramiento superior de policarbonato del patio. El edificio apuesta por una estética basada en la materialidad pura, pues deja a la vista tanto los elementos de madera como las superficies de hormigón y todas las ayudas metálicas.

Fig. 54 a 59, izq: cooperativa La Borda, *Lluc Miralles y LACOL*

Fig. 60: planta La Borda, *LACOL*





Dalston Works

Londres, Reino Unido, 2017

Arquitectos: Waugh Thistleton Architects

Empresa CLT: Binderholz

Este edificio residencial de diez plantas con 121 viviendas y espacio comercial en planta baja es actualmente el edificio con estructura de madera contralaminada más grande del mundo.

El conjunto modera su escala y se adapta a la parcela en esquina fragmentando el conjunto en volúmenes con una escala más agradable, de cinco, siete y diez plantas, permitiendo así el mayor soleamiento en los patios y los apartamentos. La forma de la planta genera dos patios, uno abierto a la calle como continuación directa del espacio público y otro cerrado, para disfrute de los residentes.

A partir de un pedestal de hormigón que forma los espacios abiertos de la primera planta, se levanta una estructura formada completamente por madera contralaminada. En este edificio, toda la madera queda revestida, tanto en interiores como en exteriores. La fachada continua de ladrillo cerámico sigue el estilo victoriano predominante en el barrio. Este edificio es la muestra de que sobre una estructura de madera contralaminada se puede instalar cualquier tipo de acabado de fachada, ligero o pesado.

Uno de las mayores restricciones de la parcela era la línea de tren subterránea que cruzaba por debajo, lo que limitaba el peso total del edificio y limitaba el tamaño de las cimentaciones. Gracias al uso de CLT, el peso total del edificio fue una quinta parte del calculado si fuera de hormigón, lo que permitió construir 35 viviendas extra sin sobrepasar el tamaño de las cimentaciones.

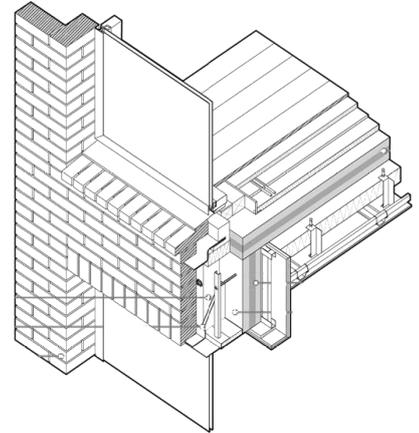


Fig. 61: detalle fachada Dalston Works, Waugh Thistleton Architects

Fig. 62 a 67, izq: edificio Dalston Works, Waugh Thistleton Architects

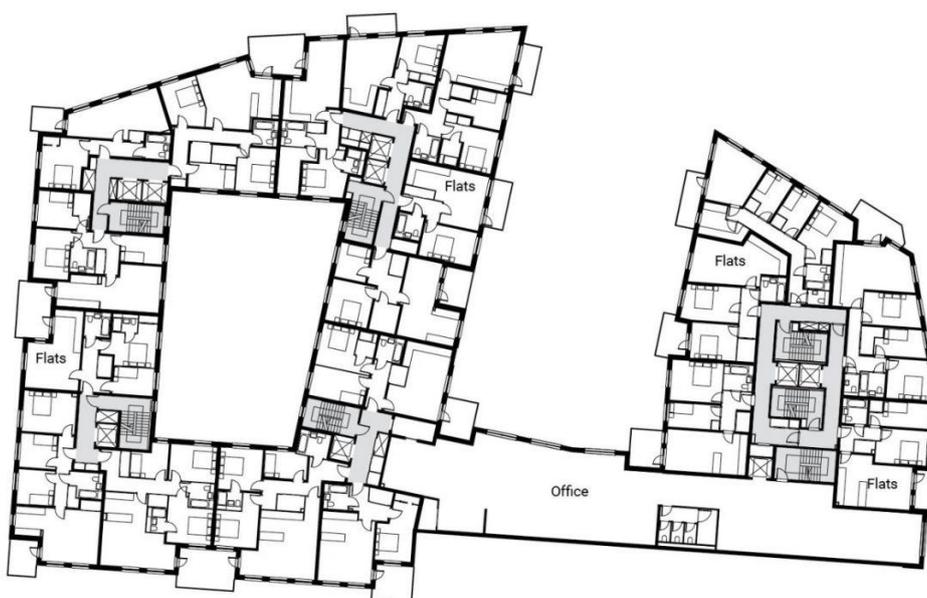


Fig. 68: planta Dalston Works, Waugh Thistleton Architects



Bloque de viviendas Puukuokka

Jyväskylä, Finlandia, 2018

Arquitectos: OOPEAA

Empresa CLT: Stora Enso

El complejo de viviendas Puukuokka está compuesto por tres edificios de entre seis y ocho pisos con un total de 150 viviendas. Los edificios están formados por bloques modulares prefabricados de madera contralaminada siguiendo el concepto patentado por Stora Enso. Se busca así conseguir viviendas asequibles, ecológicas y eficientes y fácilmente adaptables a las necesidades cambiantes en el tiempo.

Cada vivienda está formada por dos módulos, uno dedicado a los espacios de habitaciones y salón y el otro a los espacios húmedos, aseo y cocina. Los módulos proceden de taller totalmente preparados para ser izados y colocados, funcionando a la vez como estructura. El uso de elementos prefabricados garantiza un alto nivel de calidad y reduce al mínimo los retrasos, algo muy importante en lugares con climas tan estrictos como el de Finlandia. Sobre la estructura principal del edificio formada por los módulos se construyen también en CLT las conexiones horizontales y verticales, la fachada continua y los balcones.

Al exterior se instala una fachada de madera de alerce, que se pinta de negro en una de las fachadas, creando un fuerte contraste. En el interior, los revestidos blancos unidos a los tableros de madera contralaminada clara dejados a la vista en techos y algunas paredes crean unos espacios muy luminosos.

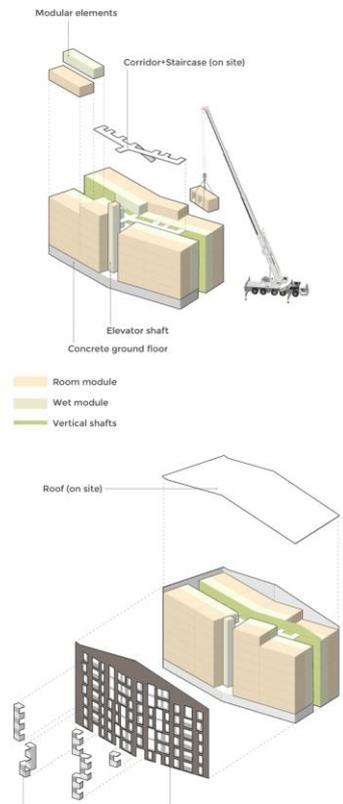


Fig. 69: esquema sistema de módulos prefabricados, OOPEAA

Fig. 70 a 76, izq: edificio Puukuokka, Mikko Auerniitty

Fig. 77: planta Puukuokka, OOPEAA





Casa vacacional en Rigi

Scheidegg, Alemania, 2004

Arquitectos: AFGH Architekten

Empresa CLT: Holzbau und Bedachungen

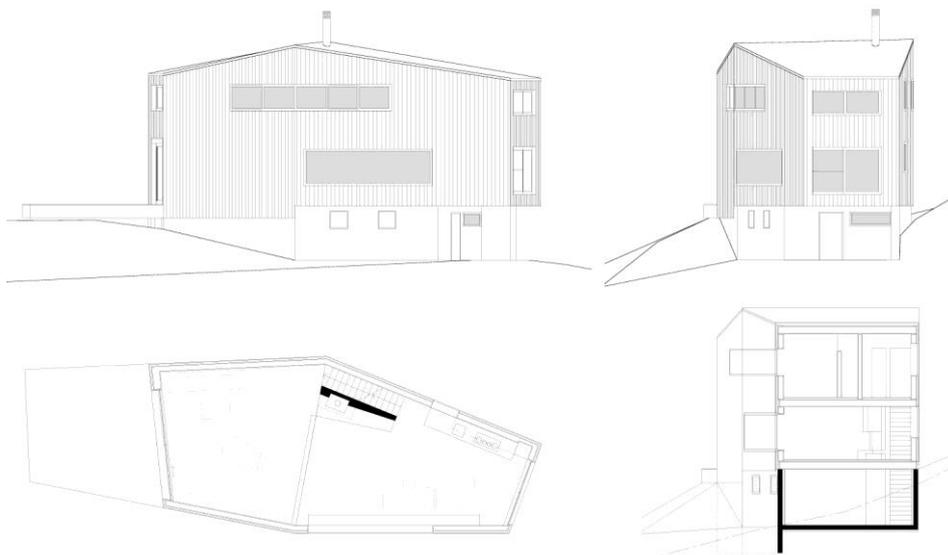
Esta vivienda de tres plantas se encuentra en las faldas de una montaña, en un punto accesible principalmente en teleférico, en una parcela con una gran inclinación.

El basamento de hormigón ancla el edificio a la pendiente del terreno, formando la primera planta del edificio y albergando el acceso y los servicios. Es la única parte del edificio construida *in situ*. Sobre este se levanta la estructura de paneles contralaminados, en forma de hexágono irregular alargado. Toda la vivienda se ordena alrededor de la chimenea de hormigón, que apoya sobre la planta baja y recorre el edificio verticalmente. Tanto la chimenea de hormigón, prefabricada en taller, como todos los tableros de la vivienda fueron izados hasta la parcela en un helicóptero grúa. La velocidad de ejecución fue clave para poder terminar la construcción de la vivienda en el margen de tiempo en el que el clima era más benigno. La forma hexagonal responde al lugar donde se encuentra, pues dirige su vértice a la dirección principal del viento, otorgándole así mucha más rigidez a una estructura ligera que podría tener problemas con los fuertes empujes que se producen a esa altura.

La materialidad del edificio es descarnada. En el interior los espacios principales están definidos por el contraste entre la chimenea, de hormigón visto, y el resto de superficies en las que se deja a la vista la madera contralaminada. Los espacios interiores se conectan hacia el exterior por grandes aperturas, destacando la ventana de más de cinco metros del salón, mostrando que, a pesar de ser un sistema parecido a muros de carga, pueden practicarse grandes huecos sin problema. Al exterior la materialidad pura se mantiene, revistiendo los paneles de madera con una capa exterior de la misma madera y dejando a la vista el hormigón.

Fig. 78 a 83, izq: vivienda en Rigi, Valentin Jeck

Fig. 84: planos vivienda en Rigi, AFGH





Casa 205

Vacarisses, España, 2008

Arquitectos: H Arquitectes

Empresa CLT: KLH

El proyecto está en una parcela con mucha pendiente y una importante masa boscosa, cualidades que se pretenden mantener, interviniendo lo mínimo posible en el terreno. La casa se sitúa justo encima de una plataforma natural de roca, que funcionará además como jardín de la casa. La única intervención extra en el terreno es el camino que recorre la parcela en diagonal y conecta sus distintos niveles.

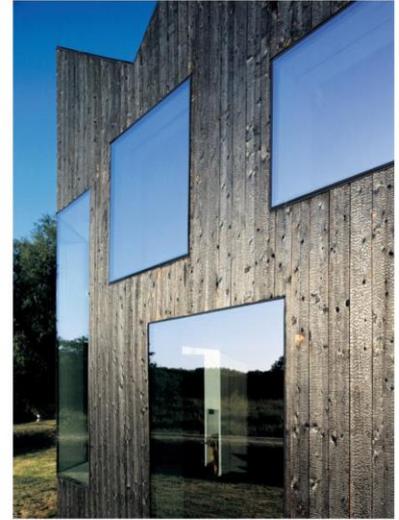
La vivienda consiste en un volumen prismático de dos plantas de madera apoyado en dos muretes de hormigón anclados con tirantes a la roca. Toda la estructura funciona como un conjunto, de forma que se pueden permitir que dos tercios de la vivienda estén en voladizo, ya que toda la fachada funciona como una gran viga. Los arquitectos señalan que es su primera casa en que la maqueta es un reflejo real de cómo se construye el edificio. Gracias a su ligereza, los tableros CLT se instalaron utilizando únicamente una grúa móvil instalada en el camino de acceso, de forma que ninguna maquinaria pesada tuvo que entrar en la parcela.

El exterior se reviste con tablas de madera de conífera, manteniendo la imagen de volumen de madera suspendido en medio del bosque. En el interior, la mayoría de superficies de madera se dejan a la vista, instalando tabiquería o trasdosados de placas de yeso laminado donde es necesario el paso de instalaciones. La estanterías y parte del mobiliario se construyen con la madera sobrante al practicar los huecos en los tableros.

Fig. 85 a 89, izq: casa 205, *Starp estudi*

Fig. 90: planos casa 205, *HArquitectes*





Extensión vivienda Hunsett Mill

Stalham, Reino Unido, 2009

Arquitectos: ACME

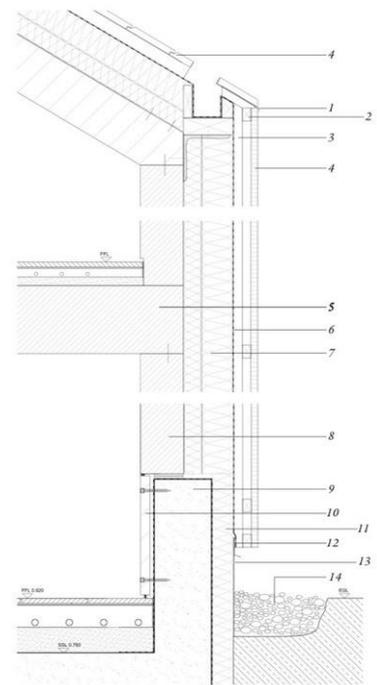
Empresa CLT: Züblin timber

Se trata de la extensión de una antigua vivienda tradicional en el parque natural Norfolk Broads. La primera acción de los arquitectos fue demoler las sucesivas ampliaciones dejando como base el edificio de ladrillo original.

Al abordar el proyecto, el objetivo era conseguir una intervención contemporánea y sostenible sin alterar el contexto local ni la escala del edificio original. La nueva extensión está planteada como una sombra de la casa original, extendiéndose desde un lado del edificio con un volumen difuso y un característico tono oscuro. La vivienda se divide en dos plantas, una planta baja con espacios diáfanos y a doble altura, presididos por la chimenea, y una segunda planta que vuelca a la primera y alberga las habitaciones. El edificio está construido completamente en madera contralaminada. Se proyecta una cubierta de planos plegados, lo que le otorga una gran rigidez y permite colgar de ella los tableros de la primera planta, que funcionan a tracción y sostienen el primer forjado, de manera que la planta baja queda completamente libre, interrumpida solamente por la chimenea y la comunicación vertical. Las aperturas, de forma irregular supeditadas a los usos interiores, marcan el carácter contemporáneo de la intervención

El acabado interior lo otorgan los propios tableros de madera, que se dejan a la vista y se extienden al mobiliario. En el exterior, el edificio se reviste con tableros de madera quemada, lo que confiere un tono oscuro que aumenta la sensación de ser una sombra del edificio original y además lo conecta con la tradición vernácula del lugar.

Fig. 91: detalle cerramiento, ACME



1 - Metal flashing to overhang 25mm over counter batten on wall; 2 - 32x25mm batten; 3 - 38x25mm counter batten / ventilation gap; 4 - Charred cedar fascia board; 5 - Laminated solid wood floor slab; 6 - Vapour permeable membrane; 7 - Wood fibre insulation with water resistant fibre board cover; 8 - Laminated solid wood wall; 9 - Reinforced concrete up-stand as flood defence; 10 - Secret fixed timber board skirting; 11 - Rigid insulation; 12 - 2mm galvanised steel flashing; 13 - Galvanised metal sheet secret fixed; 14 - Flint stone.

Fig. 92 a 97, izq: extensión Hunsett Mill, Cristóbal Palma

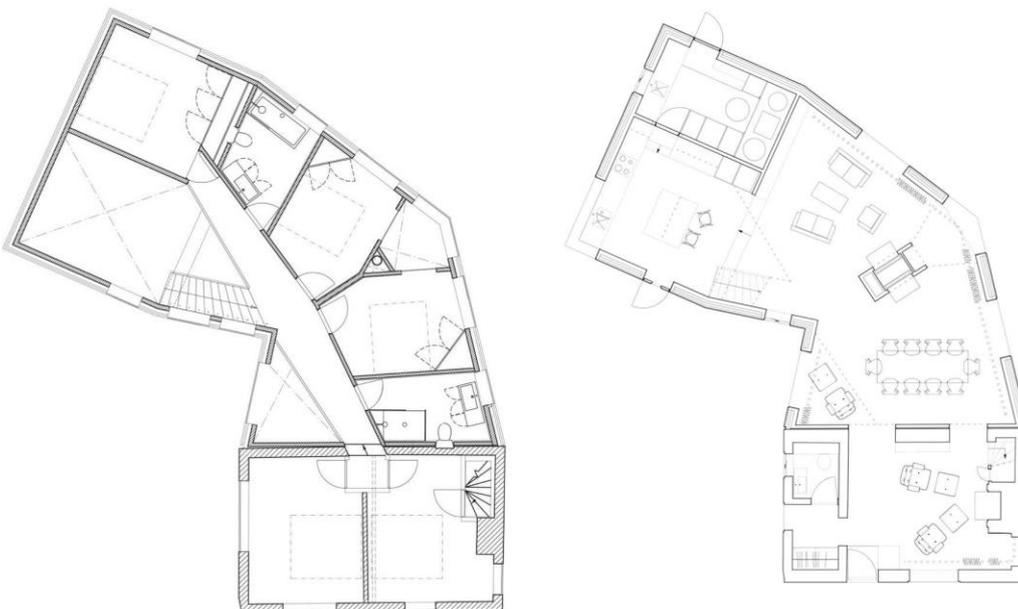


Fig. 98: planos Hunsett Mill, ACME



Montessori Schoolhouse

Logroño, España, 2015

Arquitectos: RODAR arquitectura

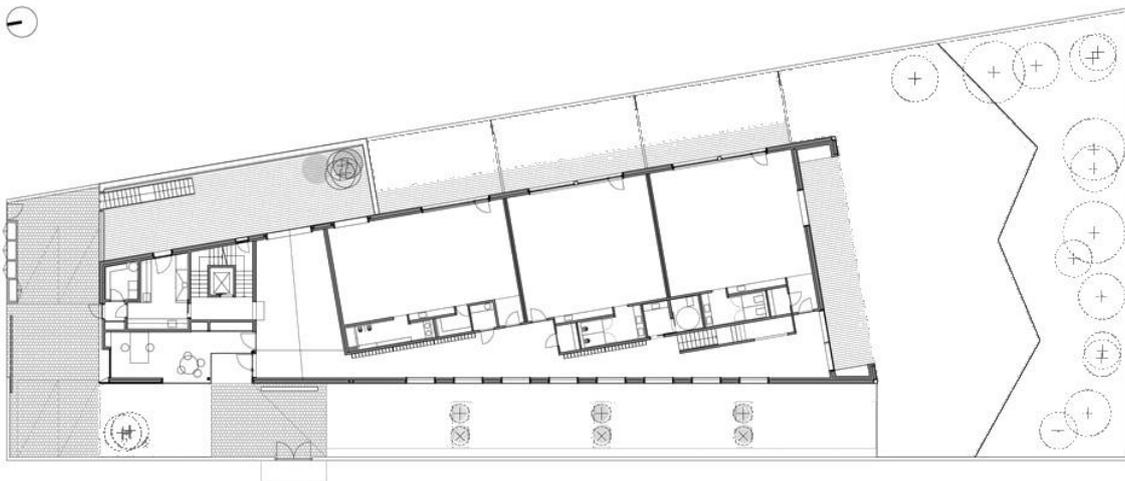
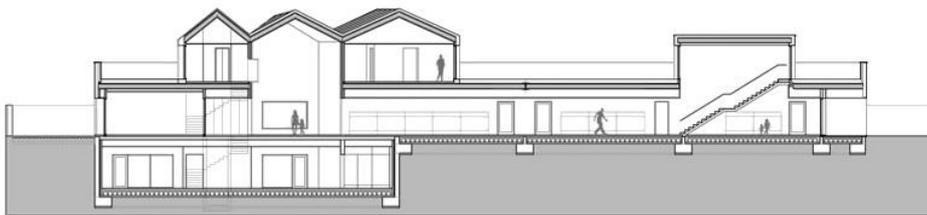
Empresa CLT: Egoín

Este sencillo edificio supone un buen ejemplo de la gran cantidad de escuelas que se están construyendo con sistemas de madera contralaminada. Varios factores son los que hacen los tableros CLT un material idóneo para edificios de enseñanza. Primero, está demostrado que los ambientes con materiales naturales influyen positivamente en la concentración, la capacidad de aprendizaje y el bienestar de los usuarios. Segundo, los tiempos de ejecución, que normalmente deben concentrarse en los periodos en los que las escuelas están cerradas. Y por último, al tratarse en su mayoría de edificios públicos, la responsabilidad sobre el control del coste, la eficiencia energética y los gastos de mantenimiento son mayores. La madera contralaminada permite un gran control de todos estos factores.

De la cimentación y el sótano de hormigón emerge un primer prisma rectangular revestido de madera oscura que funciona como el basamento del volumen. Sobre este emerge un volumen más pequeño con tres naves contiguas con cubierta a dos aguas revestidas de zinc. El programa principal se desarrolla en la planta baja, mientras que el volumen superior y el sótano se dedican a usos secundarios, administración y salas polivalentes. En el interior, los tableros a la vista son los protagonistas. Todas las paredes se dejan sin revestir, extendiendo la misma madera a encimeras, estanterías, asientos y resto de mobiliario. A la paleta de materiales se unen los techos y suelos blancos y la presencia del espacio verde exterior a través de grandes aperturas.

Fig. 99 a 103, izq; escuela Montessori Logroño, J. Callejas, J. Rocandío

Fig. 104: planta y sección escuela Montessori Logroño, Rodararquitectura





Pabellón “Multiply”

Londres, Reino Unido, 2019

Arquitectos: Waugh Thistleton Architects

Empresa CLT: AHEC

Este pabellón para el Festival de Diseño de Londres nace con la ambición de poner sobre la mesa el debate de cómo se van a abordar desde la construcción y la arquitectura los desafíos medioambientales a través de nuevos sistemas constructivos. El estudio Waugh Thistleton está abiertamente comprometido con el uso de sistemas sostenibles en sus proyectos, y es uno de los principales promotores de las estructuras de madera contralaminada en Reino Unido. En este proyecto también se explora el uso de tableros con listones de frondosas de gran dureza, muy abundantes en los bosques americanos, y más resistentes a las condiciones climáticas exteriores.

El pabellón, con nueve metros de altura, guía a los visitantes a través de un laberinto de escaleras, pasillos y espacios abiertos, invitándolos a explorar el potencial de la madera en la arquitectura. La estructura se plantea como el resultado de la adición de módulos cúbicos pre-ensamblados y unidos entre ellos en obra. Así, se plantea como una estructura desmontable, de forma que puede volver a reinstalarse con cualquier otra configuración. Los únicos materiales presentes en la construcción son la madera contralaminada, que forma tanto las paredes, suelos y techos como las escaleras, y el acero de las uniones y protecciones.

La madera se deja completamente desnuda, y el uso de frondosas, con una coloración más irregular, le otorga una materialidad característica diferente de la acostumbrada en los tableros CLT.

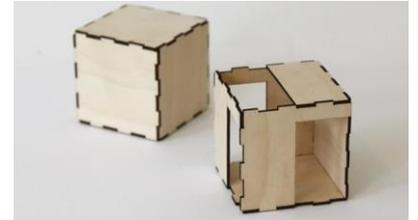


Fig. 105: maqueta módulos Multiply, Waugh Thistleton Architects

Fig. 106 a 111, izq: pabellón Multiply, Waugh Thistleton Architects

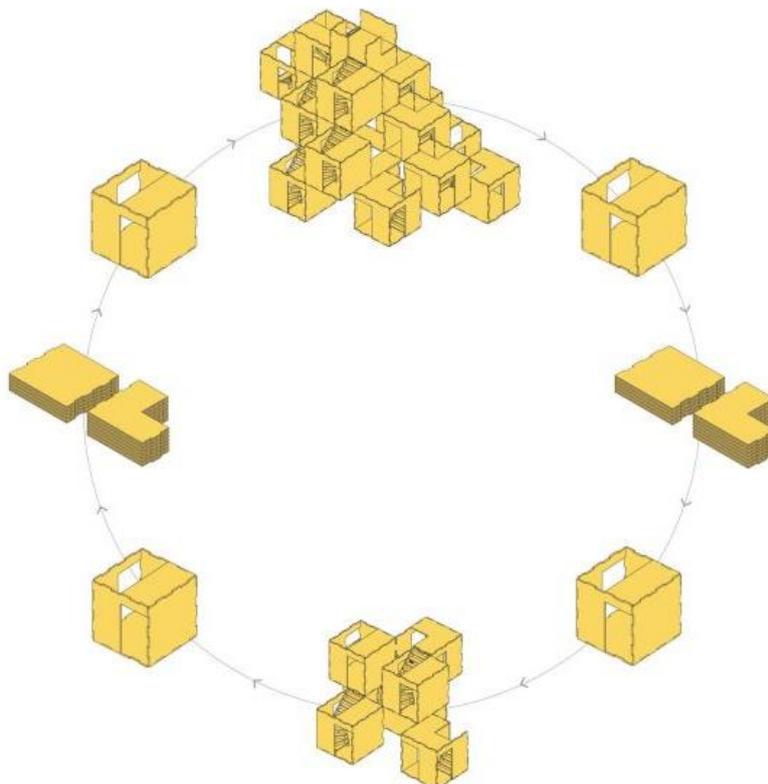
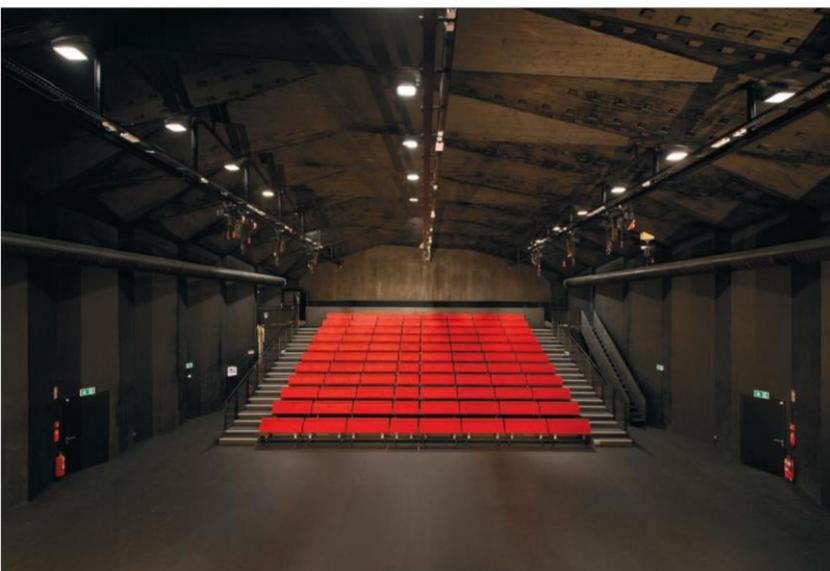
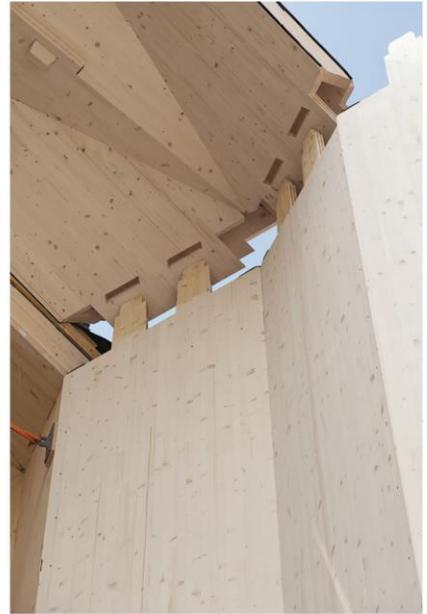


Fig. 112: esquema pabellón Multiply, Waugh Thistleton Architects



Sala polivalente del teatro Vidy

Laussane, Suiza, 2017

Arquitectos: Yves Weinand architecte

Empresa CLT: Blumer-Lehmann

Gracias a la tecnología CNC y el diseño asistido por ordenador se pudo construir la primera estructura a escala completa de planos plegados de dos capas para crear una nueva sala para el teatro Vidy.

La estructura está formada por 304 elementos de madera contralaminada, cada uno con una forma específica, que encajan perfectamente entre sí para formar una cubierta abovedada inspirada en las formas del origami japonés. Se utilizaron programas informáticos creados *ad hoc* junto a Rhinoceros y Grasshopper para automatizar la generación de los tableros y, sobre todo, de las uniones. Estas son uniones machihembradas entre los tableros sin elementos metálicos intermedios, fabricadas con máquinas de corte CNC de cinco ejes o más. Cada sección de cubierta se elabora y pre-ensambla en taller y en obra se iza y se coloca directamente en su lugar. Una vez levantada la estructura, el exterior se revistió de madera gris mientras que en el interior, una sala totalmente diáfana, se dejó a la vista la cara inferior de la novedosa solución de cubierta, mostrando también las uniones.³⁶

Este edificio, que es más un experimento que un proyecto de arquitectura, supone una de las más importantes innovaciones para la madera contralaminada en los últimos años, pues los sistemas desarrollados para hacer posible su construcción abren la puerta para que este material se introduzca en la generación de grandes estructuras paramétricas, campo en el que hasta ahora solo había aparecido como material secundario.

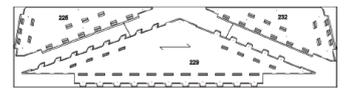
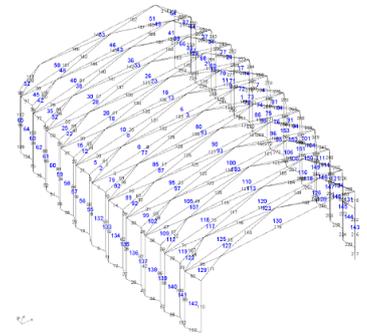
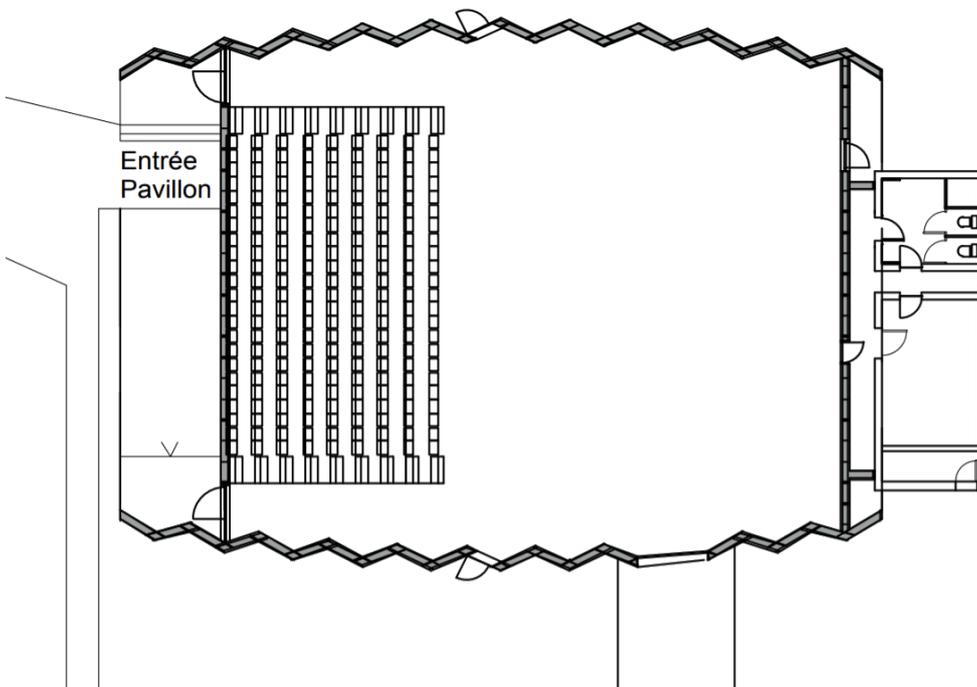


Fig. 113, sup: modelo informático estructura, Yves Weinand

Fig. 114, inf: anidamiento de piezas en tablero CLT, Yves Weinand

Fig. 115 a 121, izq: pabellón teatro Vidy, Yves Weinand

Fig. 122: planta pabellón teatro Vidy, Yves Weinand





Pabellón de los elefantes

Zoo de Zurich, Suiza, 2014

Arquitectos: Markus Schietsch Architekten

Empresa CLT: Züblin timber

Este edificio, parte del nuevo ecosistema de elefantes del zoo, consiste principalmente en una gran cúpula de madera que cubre un espacio diáfano donde se desarrolla el hábitat protegido.

La cúpula, de forma libre, es amorfa en planta, con un diámetro que llega a los 80 metros y cubre un área de unos 6000 m². Respecto a su geometría, corresponde a una cúpula parabólica con el centro a unos 18 metros del suelo y un borde ondulado con distancias al suelo que varían entre los 80 centímetros y los 10 metros, colocándose en los puntos más altos las conexiones con el exterior, tanto de visitantes como para los animales. La cubierta está constituida por una gran cantidad de piezas de CLT diseñadas para funcionar a compresión y siendo cada una de ellas diferente a todas las demás. Para asegurar la unión de todas las piezas, vigas curvas de madera laminada recorren la cubierta por encima de los tableros CLT y, sobre estos, se coloca un acabado a base de tableros de madera microlaminada con la misma geometría que los otros tableros, de forma que en el exterior no se ve el despiece característico de los listones en los tableros CLT. Todos los tableros tienen una ligera curvatura que fue aplicada en obra utilizando de referencia la subestructura de vigas de madera laminada.

A través de la automatización mediante programas informáticos se pudo convertir la geometría curva en piezas individuales planas que permitieran conseguir la compleja geometría perforada que se buscaba, imitando aparentemente las estructuras naturales de las copas de los árboles.

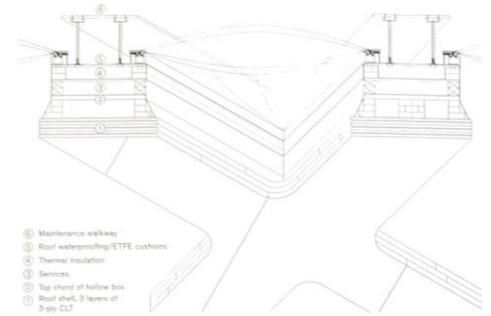
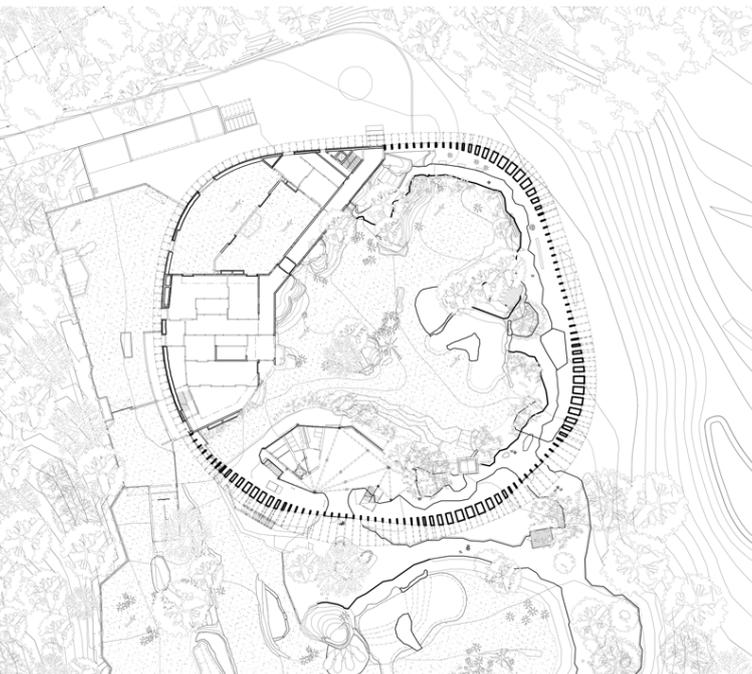


Fig. 123: detalle cubierta, Emergent Timber Technologies

Fig. 124 a 129, izq: pabellón de elefantes, Andreas Buschmann

Fig. 130 y 131: planta y cubierta de pabellón de los elefantes, Markus Schietsch Architekten





5. CONCLUSIONES

El objetivo del presente trabajo era mostrar las credenciales de la madera contralaminada como principal alternativa a los sistemas de construcción convencionales de acero u hormigón ante la necesidad de encontrar sistemas constructivos más sostenibles, fruto de la crisis climática que estamos sufriendo ahora mismo.

Se ha mostrado que el simple hecho de construir en madera supone una importantísima reducción de la huella de carbono de la construcción. Primero, porque los árboles de los que procede la materia prima absorben CO₂ de la atmósfera durante su crecimiento y este se queda almacenado en los productos de madera. Segundo, por reducir el uso de materiales convencionales, con una gran huella ecológica.

La madera contralaminada permite además una construcción con una gran eficiencia energética, con cerramientos de alta eficiencia y sin puentes térmicos, ahorrando en materiales aislantes y subestructuras. La menor cantidad de envíos, de maquinaria pesada y menor volumen de excavaciones suponen un ahorro en combustible y menores molestias al entorno.

Ante la duda de si la masa forestal podría absorber la demanda de un gran crecimiento de la construcción en madera, se ha mostrado que los únicos bosques que tienen un crecimiento constante son los dedicados a la explotación forestal. Por ello, el aumento de la producción maderera cuando viene de bosques certificados no se considera un factor de riesgo para la deforestación, sino todo lo contrario.

Además de las indiscutibles mejoras respecto a la sostenibilidad, la madera contralaminada ofrece grandes ventajas como material constructivo, siendo la más importante la reducción de los tiempos de ejecución, fruto de la prefabricación y la alta precisión con la que se construye. Se genera además un espacio de trabajo más limpio y con menor riesgo de accidentes. Como punto negativo, la definición necesaria en fase de proyecto de ejecución es mucho mayor, pues los cambios y ajustes en obra, muy presentes en sistemas más convencionales, pueden generar grandes problemas en este tipo de estructuras.

Se han mostrado las posibilidades estéticas del material, tanto en cuanto a su propio aspecto, dependiente de las calidades y las especies de madera como a las formas arquitectónicas que con él se puede producir. A pesar de las dudas sobre las limitaciones de una estructura basada en parte en muros de carga, se ha mostrado que, entendiendo como funciona el sistema, las limitaciones formales son muchas menos de las imaginables.

Si bien es cierto que el precio de una estructura de madera contralaminada es superior al de una estructura convencional, se ha mostrado que con el ahorro que genera en otros campos (menores cimentaciones y materiales secundarios, menor tiempo de ejecución, menos envíos, etc) se puede alcanzar un impacto económico nulo, o incluso una reducción del coste total, en según qué tipo de edificios.

Respecto a las características técnicas, los sistemas de madera contralaminada cumplen los requisitos exigibles sin dificultad a niveles equiparables a los de las construcciones convencionales, destacando muy por encima en eficiencia energética y en su resistencia a sismo. Donde tiene más problemas es en la resistencia a la humedad, por lo que se debe diseñar con el debido cuidado para evitar el contacto continuado con el agua.

Se ha ofrecido un elenco de proyectos en el que se muestran ejemplos de varias tipologías y formas de proyectar distintas. Se abarcan desde las formas más convencionales donde la madera contralaminada aprovecha mejor sus características hasta las formas más elaboradas que exprimen las posibilidades del material y demuestran su enorme capacidad expresiva.

Como conclusión final, se puede afirmar con rotundidad que la madera contralaminada es una de las mejores alternativas a la construcción convencional, sobretodo en edificios de baja y media altura en entornos urbanos, lo cual supone un enorme porcentaje de los edificios construidos.

BIBLIOGRAFÍA

1. Perspectivas del medio ambiente mundial, GEO 6. 2019.
2. Chapter 9: Buildings. In: *Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. Geneva, Switzerland; 2014.
3. Berardi U. A cross-country comparison of the building energy consumptions and their trends. *Resour Conserv Recycl*. 2017;123:230-241.
4. Jones K, Stegemann J, Sykes J, Winslow P. Adoption of unconventional approaches in construction: The case of cross-laminated timber. *Constr Build Mater*. 2016;125:690-702.
5. EGOIN. Evaluación Técnica Europea EGO_CLT. 2017.
6. Jeska S. *Emergent Timber Technologies: Materials, Structures, Engineering, Projects*. (Pascha KS, Hascher R, eds.). Basel: Basel : Birkhäuser, cop. 2015.; 2015.
7. Harris R. Cross laminated timber. *Wood Compos*. January 2015:141-167.
8. Waugh Thistleton. Dalston Works. <http://waughthistleton.com/dalston-works/>. Accessed July 17, 2019.
9. Plackner H. brettsperrholz wlichst global. *Holzkurier*. 2015:12-13.
10. Schickhofer G. Cross Laminated Timber (CLT) in Europe – from conception to implementation. University of British Columbia, Department of Wood Science, Vancouver, Canada. https://www.holzbauforschung.at/fileadmin/user_upload_hbf/News/2011/Vancouver_2010.pdf. Published 2010. Accessed July 23, 2019.
11. Ebner G. CLT production is expected to double until 2020. *Timber-Online.net*. 2017. <https://www.timber-online.net/holzprodukte/2017/06/brettsperrholz-produktion-in-europa---20162020.html>.
12. Espinoza O, Rodríguez-Trujillo V, Laguarda-Mallo M, Buehlmann U. Cross-Laminated Timber: Status and Research Needs in Europe. *Bioresources*. 2015;11:281-295.
13. Carabaño Rodríguez R, Galván Martínez J, Oteiza I, Martínez Sierra E. Madera contralaminada (CLT), situación actual. Alternativa para una construcción sostenible en España. In: *I Congreso Internacional Sobre Investigación En Construcción y Tecnología Arquitectónica*. Universidad Politécnica de Madrid; 2014:5.
14. Laguarda Mallo MF, Espinoza O. Awareness, perceptions and willingness to adopt Cross-Laminated Timber by the architecture community in the United States. *J Clean Prod*. 2015;94:198-210.
15. Waugh Thistleton. 100 UK CLT Projects. 2018:324. https://www.thinkwood.com/wp-content/uploads/2018/10/CLT-100-UK-Projects_Think-Wood-Web.pdf.
16. HArquitectes. Conferencia: Demandas y disponibilidades o la naturaleza del edificio. 2016. <https://media.upv.es/#/portal/video/ebbbd930-7ef6-11e6-9ed7-55c69334aueb>.
17. Guo H, Liu Y, Chang W-S, Shao Y, Sun C. Energy Saving and Carbon Reduction in the Operation Stage of Cross Laminated Timber Residential Buildings in China. *Sustain* . 2017;9(2).
18. PEFC facts and figures. <https://www.pefc.org/discover-pefc/facts-and-figures>. Published 2018. Accessed September 2, 2019.
19. BMEL. The Forests in Germany. 2014.

20. BMLFUW. Austrian Forest Report. 2015.
21. Fernández Forcada M. La madera contralaminada como alternativa en sistemas de baja energía estructural. December 2015.
22. Olatek. Catálogo paneles contralaminados CLT. 2018. <https://olatek.es/wp-content/themes/egoin.v2/PDF/3.1.2.-CATALOGO-OLATEK-CLT.pdf>.
23. Rice J, A. Kozak R, J. Meitner M, Cohen D. Appearance wood products and psychological well-being. *Wood Fiber Sci.* 2007;38.
24. Schmid J, Menis A, Fragiaco M, Clemente I, Bochicchio G. Behaviour of Loaded Cross-Laminated Timber Wall Elements in Fire Conditions. *Fire Technol.* 2015;51(6):1341-1370.
25. Dârmon R, Lalu O. The fire performance of Cross Laminated Timber beams. In: *Procedia Manufacturing.* ; 2019.
26. Brandner R, Flatscher G, Ringhofer A, Schickhofer G, Thiel A. Cross laminated timber (CLT): overview and development. *Eur J Wood Wood Prod.* 2016;74(3):331-351.
27. StoraEnso. Calculatis. <https://calculatis.storaenso.com/>. Accessed September 6, 2019.
28. Egoín. Prontuario Técnico para la Construcción con Paneles de Madera Contralaminados EGO CLT. 2019.
29. Ceccotti A. Seismic Behaviour of Multi-Storey XLam Buildings. September 2019.
30. Shahnewaz M, Tannert T, Alam MS, Popovski M. *Seismic Performance of Cross Laminated Timber (CLT) Platform Building by Incremental Dynamic Analysis.*; 2017.
31. Strong-tie S. CLT building seismic test. 2011. <https://www.youtube.com/watch?v=hSwjkG3nv1c&t=38s>.
32. Massimo Fragiaco. Seismic Behaviour of Cross-Laminated Timber Buildings: Numerical Modelling and Design Provisions. In: *Focus Solid Timber Solutions - European Conference on Cross Laminated Timber (CLT).* ; 2013:166-182.
33. EGOIN. Datos técnicos. <https://egoin.com/wp-content/uploads/2017/04/catalogo-clt-datos-tecnicos.pdf>.
34. Ferk H. Some Building Science Aspects for building with CLT. In: *Focus Solid Timber Solutions - European Conference on Cross Laminated Timber (CLT).* ; 2013:207-250.
35. KLH. Catálogo de elementos de construcción para vivienda. 2019.
36. Robeller C, Gamarro J, Weinand Y. Théâtre Vidy Lausanne - A Double-Layered Timber Folded Plate Structure. *J Int Assoc Shell Spat Struct.* 2017;58:295-314.

IMÁGENES

Fig. 1: esquema fabricación de tableros, elaboración propia

Fig. 2: acopio de tableros CLT, fuente: <https://www.nrcan.gc.ca/our-natural-resources/forests-forestry/forest-industry-trade/forest-products-applications/taxonomy-wood-products/cross-laminated-timber/15829>

Fig. 3: montaje de estructura CLT, en Prontuario técnico CLT, Egoín

Fig. 4 y 5: edificio Dalston Works, fuente: <http://waughthistleton.com/dalston-works/>

Fig. 6: pabellón The Smile, fuente: <http://www.alisonbrooksarchitects.com/project/the-smile/>

Fig. 7: capilla St. Loup, fuente: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/892185/capilla-temporal-para-las-diaconisas-de-st-loup-danilo-mondada-plus-localarchitecture>

Fig. 8: pabellón de los elefantes Zurich, fuente: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/770811/casa-del-elefante-del-zoo-zurich-markus-schietsch-architekten>

Fig. 9: estructura mixta glulam y CLT, fuente: Emergent Timber Technologies (Jeska, S., 2015)

Fig. 10: panel nervado para forjados, fuente: Emergent Timber Technologies (Jeska, S., 2015)

Fig. 11: madera contralaminada entrelazada, fuente: <https://www.treehugger.com/sustainable-product-design/interlocking-cross-laminated-timber-could-use-square-miles-beetle-killed-lumber.html>

Fig. 12: muestra de madera microlaminada Kerto, fuente: Emergent Timber Technologies (Jeska, S., 2015)

Fig. 13: setas de Sevilla, fuente: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/722852/metropol-parasol-jurgen-mayer>

Fig. 14 y 15: logos Egoín y AmateX

Fig. 16: esquema evolución del mercado CLT, fuente: Cross Laminated Timber (CLT) in Europe – from conception to implementation (Schickhofer, G., 2010)

Fig. 17, 18 y 19: logos Binderholz, KLH y Stora Enso

Fig. 20, 21 y 22: edificio Murray Grove, fuente: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-22097/stadthaus-24-murray-grove-waugh-thistleton-architects>

Fig. 23: vivienda 205, fuente: <http://www.harquitectes.com/projectes/casa-vacarisses-harquitectes/>

Fig. 24 y 25: transporte en camión, fuente: anexo I – transporte de los paneles CLT, Egoín

Fig. 26: residuo de instalación de estructura, fuente: 100 UK CLT Buildings (Waugh Thistleton, 2018)

Fig. 27: esquema reciclaje madera, elaboración propia

Fig. 28: comparación de emisiones de CO₂ de edificio de CLT y hormigón, fuente: Energy Saving and Carbon Reduction in the Operation Stage of Cross Laminated Timber Residential Buildings in China (Guo, H., 2017)

Fig. 29, 30, 31, 32, 33: certificados y sellos de protección de los bosques FSC, PEFC, Rainforest Alliance, Sustainable Forestry Initiative y WWF

Fig. 34: especies utilizadas en tableros, fuente: catálogo datos técnicos EGO_CLT, Egoín

Fig. 35: estación Kuse, fuente: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/892195/kiterasu-edificio-modelo-en-clt-en-la-estacion-kuse-ofa>

Fig. 36: detalle fachada Dalston Works, fuente: <http://waughthistleton.com/dalston-works/>

Fig. 37 y 38: planos e imagen Torre de bodas de dRMM, fuente: <https://www.archdaily.com/276022/tower-of-love-drmm>

Fig. 39: pabellón Multiply, fuente: <http://waughthistleton.com/multiply/>

Fig. 40: probeta CLT tras prueba de incendio, fuente: <https://www.thinkwood.com/news/4-things-to-know-about-mass-timber>

Fig. 41: esquema carbonización CLT, fuente: 100 UK CLT Buildings (Waugh Thistleton, 2018)

Fig. 42: test de incendio a escala completa, fuente: Full-scale fire tests of a two-story cross-laminated timber structure (Laura E. Hasburgh, 2018)

Fig. 43: capas efectivas ante acciones perpendiculares al panel, elaboración propia

Fig. 44: capas efectivas ante acciones paralelas al panel, elaboración propia

Fig. 45, 46, 47, 48 y 49: tablas de predimensionado EGO_CLT, fuente: prontuario técnico EGO_CLT, Egoín

Fig. 49: pruebas a escala completa de sismo, fuente: <https://www.youtube.com/watch?v=T08KRyVhyeo>

Fig. 50: fallo de uniones en pruebas de sismo, fuente: Seismic behaviour of Cross-Laminated Timber structures: A state-of-the-art review (Izzi, M., 2018)

Fig. 51: efecto de la humedad en tablero CLT, fuente: Some Building Science Aspects for building with CLT (Ferk, H., 2013)

Fig. 52: instalaciones de agua en edificios CLT, fuente: catálogo de elementos de construcción para vivienda, KLH

Fig. 53: estructura protegida de la humedad durante la obra, fuente: 100 UK CLT Buildings (Waugh Thistleton, 2018)

Fig. 54: estructura de La Borda, fuente: <https://egoín-andalucía.com/edificio-de-viviendas-la-borda-barcelona/>

Fig. 55 a 60: edificio La Borda, fuente: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/922182/edificio-la-borda-lacol>

Fig. 61 a 68: edificio Dalston Works, fuente: <https://www.archdaily.com/903839/worlds-largest-clt-building-provides-a-model-for-high-density-urban-housing>

Fig. 69, 70, 72, 73, 74, 75, 76 y 77: edificio de viviendas Puukuokka, fuente: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/765202/puukuokka-housing-block-oopeaa>

Fig. 71: obra de bloque Puukuokka, fuente: <https://resilientwood.tumblr.com/post/127403501067/puukuokka-housing-block>

Fig. 78, 80, 81, 82, 83 y 84: casa vacacional en Rigi, fuente: <https://www.archdaily.com/1461/holiday-house-on-the-rigi-afgh>

Fig. 79: elevación en helicóptero-grúa, fuente: The World's Most Extraordinary Homes, ep.1, (Netflix series)

Fig. 85, 86, 87, 88, 89 y 90: casa 205, fuente: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-13295/casa-205-h-arquitectes>

Fig. 92, 93, 94, 95, 96, 97 y 98: extensión Hunsett Mill, fuente: <https://www.archdaily.com/90094/hunsett-mill-acme>

Fig. 99, 100, 101, 102, 103 y 104: Montessori Schoolhouse Logroño, fuente: <http://www.rodararquitectura.com/montessori-schoolhouse>

Fig. 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111 y 112: pabellón Multiply, fuente: <https://www.detail-online.com/article/multiply-by-waugh-thistleton-architects-london-design-festival-2018-32994/>

Fig. 113, 114, 115, 116, 117 y 118: pabellón teatro de Vidy, fuente: Théâtre Vidy Lausanne - A Double-Layered Timber Folded Plate Structure (Robeller, C., 2017)

Fig. 119, 120, 121 y 122: pabellón teatro de Vidy, fuente: https://vidy.ch/sites/default/files/vidy_plaquette_pavillon.pdf

Fig. 123: detalle pabellón de elefantes, fuente: Emergent Timber Technologies (Jeska, S., 2015)

Fig. 124, 125 y 126: pabellón de elefantes, fuente: Emergent Timber Technologies (Jeska, S., 2015)

Fig. 127, 128, 129, 130 y 131: pabellón de elefantes, fuente: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/770811/casa-del-elefante-del-zoo-zurich-markus-schietsch-architekten>