

Trabajo de Final de Grado

Arquitectura Baja en Carbono: Proyectar y Construir en Madera

Diego Cantero Lozano

Universitat Politècnica de València
Escuela Técnica Superior de Arquitectura
Grado en Fundamentos de la Arquitectura
Tutor - Santiago Sanjuán García
Cotutor - Matía Dolores Villaescusa Gil
curso académico 2020/2021



ESCOLA TÈCNICA
SUPERIOR
D'ARQUITECTURA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Resumen

Este estudio se centra en el **panel contralaminado de madera**, también denominado por sus siglas en inglés **CLT** (*Cross-Laminated Timber*), en la aplicación a edificios en altura, su **sostenibilidad** y **eficiencia**. Se abordará un análisis gradual, empezando desde la propia madera, pasando por los derivados de esta, ejemplos que se dan hoy en día, hasta el análisis de un proyecto relevante.

Se estudiará tanto el aspecto estructural del material, tanto en cerramientos como en forjados, así como otras características, como el **aislamiento**, la **ligereza** o la **sostenibilidad**, que lo hacen destacar cuando es comparado a otros sistemas.

Tanto para la explicación de la producción del material, como para el análisis del proyecto, se llevarán a cabo siguiendo una serie de puntos lógicos desde la materia prima hasta la puesta en obra.

This study focuses on Cross-Laminated Timber, also named by its acronym CLT, and its application in high buildings, its sustainability and efficiency. The analysis would be gradual, beginning from the wood on its own, going through its derivatives, examples nowadays, until the analysis of a relevant project.

The structural aspect of the material will be studied, both in walls and slabs, as well as other characteristics such as insulation, lightness and sustainability, which make it stand out when compared to other systems.

Both, the CLT production and the project analysis, will be carried out following a series of logical points from the raw material to the construction.

Palabras clave: madera contralaminada, sostenibilidad, eficiencia, estructura, bajo en carbono, medio ambiente.

Índice

0. Introducción	6
0.1 Objetivos	6
0.2 Justificación e interés del tema	6
0.3 Metodología	7
1. La madera como material	8
1.1 Evolución histórica de la madera	8
1.2 Evolución de la madera en distintas culturas	9
1.3 Avance de la tecnología dependiendo del sector	10
1.4 Usos y ejemplos en el presente	11
- Glulam	12
- NLT	13
- DLT	14
2. CLT como material de construcción	15
2.1 Introducción al CLT	16
2.2 Comparación a otros sistemas	17
2.3 Materia prima, encolado y prensado	18
2.4 Diseño e ingeniería	20
2.5 Corte y mecanizado	24
2.6 Puesta en obra	25

3. Introducción a los edificios en altura	32
3.1 Características limitantes : viento	32
3.2 Características limitantes : fuego	33
3.3 Edificios con estructura de madera mixta	35
3.4 Edificios con estructura únicamente de CLT	39
4. Análisis de proyecto relevante. Caso de estudio	42
4.1 Introducción al edificio en cuestión	42
4.2 Materia prima, encolado y prensado	44
4.3 Diseño e ingeniería	46
4.4 Corte y mecanizado	48
4.5 Puesta en obra	49
5. Conclusión	53
6. Anexo	54
6.1 ODS	54
7. Bibliografía y recursos digitales	55

0. Introducción

0.1 Objetivos

El objetivo principal del siguiente trabajo es el estudio del CLT como material, comparándolo con otros sistemas y buscando puntos a favor y en contra, para luego enfocar su aplicación en los edificios en altura y los requisitos que la madera como material, y el CLT como sistema, requieren a la hora de proyectar y de construir, así como el uso actual que se hace de él en algunos países.

El estudio se enfoca en los edificios en altura por la singularidad de los desafíos que suponen, porque es en ellos dónde se estudian nuevas soluciones, se establecen los códigos y se comprueba que el CLT es viable para las construcciones del futuro.

0.2 Justificación e interés del tema

La madera fue, y sigue siendo en muchos países, un material de construcción esencial, tanto por su accesibilidad como por su trabajabilidad. Con la llegada del hormigón y el acero, su uso en estructuras quedó en un segundo plano, pero dadas las condiciones actuales, en las que prima la búsqueda de la sostenibilidad, avances y estudios sobre nuevos sistemas, y algunas ventajas como la construcción prefabricada modular en seco, han hecho que la madera esté resurgiendo con fuerza, sobre todo en países de centro y norte de Europa, así como Norteamérica.

Además del hecho de ser un material reciclable y ecológico, tiene una ventaja frente a todos los demás y es el secuestro de dióxido de carbono, es decir, la absorción de CO₂ que realiza el árbol antes de ser talado permite en muchos casos que la emisión a la atmósfera sea negativa, todo ello sumado a la reducción de la mano de obra necesaria, a la rapidez de construcción y la ligereza de la misma.

Existen ya muchas empresas con plantaciones controladas que evitan la deforestación mientras suministran los materiales necesarios, y es que al mismo tiempo que se evita la tala y/o contaminación de otros ecosistemas, supone una alternativa fiable al resto de sistemas que suponen más contaminación, por lo que la madera en sí, y el CLT como sistema, se está volviendo más común en edificios de grandes dimensiones, en gran medida por la obligación que supone combatir el cambio climático.

0. Introducción

0.3 Metodología

Teniendo claros los objetivos, el trabajo se dividirá en tres partes:

En primer lugar se procederá a una **investigación** de como la **madera** se empleaba en el **pasado**, y de **cómo evolucionó** y debido a que condicionantes hasta los derivados que se emplean hoy en día. En esta primera parte solo se analizarán los otros sistemas similares al CLT que provienen de la madera, con ejemplos ilustrados, y que tipos de soluciones estructurales aportan y en qué características se diferencian.

En segundo lugar pasamos a un **estudio en detalle del CLT** como material estructural, empleando tanto bibliografía como proyectos construidos, ya sea únicamente de CLT o mezclando diversas soluciones, enfocando más allá de su comportamiento y resistencia a cargas y esfuerzos, teniendo en cuenta la fabricación, la maquinaria e infraestructura necesaria, que ventajas representa frente al hormigón y al acero empleando otros estudios, así como los condicionantes y límites a tener en cuenta durante la fase de proyecto. Se consultará en gran medida prontuarios técnicos en muchos casos de fabricantes y empresas suministradoras, pues el código técnico no da indicaciones muy claras sino que simplemente considera al CLT como madera.

Por último, y una vez se tiene en cuenta todo el proceso de fabricación y construcción que conlleva el CLT, así como sus singularidades y puntos débiles, se procede a la determinación de las **limitaciones de los edificios en altura**, sea cual sea su estructura, que son el **viento** y el **fuego**, y como estos afectan al CLT en comparación con otros materiales, y luego se procede al análisis de los proyectos construidos, haciendo especial énfasis al proceso constructivo y a las soluciones planteadas, dependiendo de los condicionantes de cada proyecto. En esta fase tendrá especial importancia el proyecto que será escogido como **caso de estudio**, y del cual se analizará todo su proceso de proyecto, fabricación y construcción; así como esclareciendo cuál ha sido y es su impacto en el medio ambiente según estudios llevados por el propio arquitecto.

1. La madera como material

1.1 Evolución histórica de la madera

La **madera** es junto con la piedra uno de los materiales más antiguos en la historia de la construcción, tanto es así, que se ha datado un pozo de roble encontrado en la República Checa de antes del año 5000 a.C. Se conservó todo este tiempo por estar sumergida en agua, y nos demuestra que en el Neolítico ya eran capaces de manipular la madera.

Durante la **época clásica**, también se empleó este material para la construcción de templos, cuando se seguía el ejemplo del Megarón, derivado de los templos micénicos, y para ello disponemos del que aún queda en pie, el templo de Esparta de Artemisa Ortia, que se remonta al s.IX a.C, y cuya columnata era de madera, así como en los demás templos de la época. Con el paso de los años, también se empezaron a añadir elementos decorativos de **carpintería**, que luego quedaron reflejados en la piedra, que se empezó a usar en los zócalos en el s.VII y luego pasó al resto del edificio.

Durante la **época medieval**, hubo un auge en la construcción urbana, sobre todo en el norte de Europa, y la madera era un material **cercano y asequible**, que servía de estructura tanto para las viviendas como para algunas catedrales. En las primeras, la madera componía la estructura principal del edificio, formando pilares y vigas. De mitades del s.XV a finales del XVII se hizo uso el entramado de madera, tan característico en las fachadas de edificios medievales de Alemania y Francia. En las catedrales la madera era imprescindible para la creación de **cimbras**, **cubiertas** y **elementos decorativos**.

Cuando los colonizadores se dirigían a América, surgió en el s.XVIII una nueva forma de construir de manera rápida y eficaz, se conoce como **balloon frame** y consiste en una estructura ligera de madera en la que no existen pilares, sino que la estructura la forman una serie de listones verticales. Este sistema derivó en el **platform frame**, cuya única diferencia con el **balloon frame** es la interrupción de la estructura a nivel de forjados, para así poder construir un edificio de varias plantas sin necesidad de buscar piezas grandes.

La **madera laminada encolada** nació de manos de Friedrich Otto Hetzer, un carpintero alemán que obtuvo licencia sobre este producto en 1901 para el empleo en vigas rectas, y en 1906 obtuvo la patente para piezas curvadas. Estos sistemas se extendieron por el centro y el norte de Europa, y más tarde fue introducida también en Estados Unidos. Desde entonces, se han desarrollado numerosos sistemas para construir con madera, como los **paneles SIP**, que abarcan el 80% del mercado de la construcción de madera de Chile, el **sistema Block** que deriva de la construcción mediante troncos, y el **Mass Timber**, del cual se hará una explicación más pormenorizada a lo largo de este TFG.

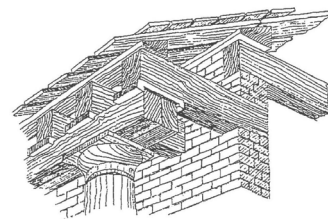


Imagen 1.1 Detalle axonométrico de un templo griego construido en madera.
- La construcción en Grecia (II), Francisco Ortega Andrade



Imagen 1.2 Edificio medieval en el pueblo alemán de Bernkastel.
- <https://www.ich-geh-wandern.de/bernkastel-bernkastel-kues>



Imagen 1.3 Vivienda construida empleando el balloon frame.
- <https://buildsmatr.com/products/wood-or-steel-framing>



Imagen 1.4 Biblioteca construida enteramente de mass timber.
- <https://vilssa.com/madera-laminada-encolada-estructural>

1.2 Evolución de la madera en distintas culturas

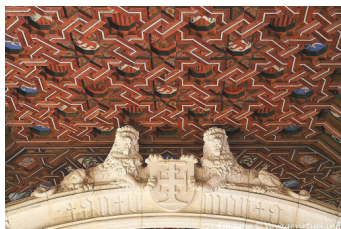


Imagen 1.5 Artesonado mudejar en San Juan de los Reyes, Toledo
- <http://ruartecontract.com/arte-mudejar-y-artesonados-arquitectura-contemporanea/>



Imagen 1.6 Vivienda tradicional en la aldea de Bork, Dinamarca.
- <https://travelgula.net/ruta-vikinga-lugares-imprecindibles-de-dinamarca.html>



Imagen 1.7 Vivienda construida empleando el balloon frame.
- <https://www.nomadbubbles.com/casas-japonesas/>

Independientemente del periodo histórico, la madera ha quedado arraigada en las raíces de distintas culturas por razones diversas, llegando en la mayoría de sus casos a desembocar en soluciones actuales para cumplir el mismo objetivo.

Los **musulmanes** empleaban la madera, junto con otros materiales como el barro y el yeso, por ser **fácil de conseguir y rápida de aplicar**, derivado de su cultura nómada. Como en el Islam las imágenes están prohibidas, y por ello las esculturas y las pinturas, la monumentalidad se buscaba a partir del tratamiento de los materiales mencionados, lo que lleva a los artesonados de madera de patrones geométricos, que se puede encontrar en muchas de sus obras.

Los **escandinavos** recurrían a la madera para todas las construcciones debido a su **accesibilidad** y a la dimensión de los bosques nórdicos, pero también por una característica muy importante de la madera, la capacidad de **aislamiento térmico**, lo que permitía crear espacios cálidos y acogedores. Se utilizaba sobre todo el pino rojo proveniente de Finlandia, empleado en un tipo de construcción llamado *lafting*, que consistía en el encaje de troncos de manera horizontal para formar grandes muros. Tanto es así, que uno de los grandes arquitectos del s.XX, Alvar Aalto, lo tuvo en cuenta en todas sus obras para el diseño de interiores.

Por otra parte, en la **cultura japonesa**, el empleo de la madera se debía al clima húmedo del país, pues se empleaba para crear **espacios abiertos y ventilados** que evitaban la aparición de moho, y por otra parte la estructura de madera entramada es útil contra los terremotos y los tifones. La madera ha sido uno de los principales elementos de construcción en Japón, por ello se desarrollaron técnicas como el *Shou Sugi Ban* que consiste en carbonizar la capa exterior de la madera para que sea más resistente a la intemperie. Además, los carpinteros japoneses diseñaron maneras de ensamblar la madera sin necesidad de emplear terceros.

Desde hace siglos, en Japón se practica la **reforestación**, lo que les permite conservar los recursos, de lo cual hablaremos más tarde con los sellos de garantía y calidad de la madera.

1.3 Avance de la tecnología dependiendo del sector

El trabajo de la madera ha sido llevado durante toda su historia por el **carpintero**, que aparte del trabajo ligado a la arquitectura, con la realización de cimbras, elementos estructurales, ornamentos o muebles, estaba vinculado a la realización de ruedas y carros (carpinteros de lo prieto), y más importante aquellos que fabricaban barcos (carpinteros de ribera). De manera que podríamos hablar de **tres campos**, la arquitectura, los navíos y las infraestructuras.

De las culturas antes mencionadas, tanto la escandinava como la japonesa tienen en común que eran potencias importantes en lo que se refiere al sector naval, y por ello disponían de **grandes expertos** capaces de tratar la madera y trabajar con ella.

Pero no debemos olvidar que los navíos de madera estuvieron presentes durante muchos siglos en todo el mundo ya fuera en forma de pequeñas barcas o grandes naves, pues no fue hasta el s.XIX cuando se empezaron a construir naves de acero, y aun así, después de esto y hasta en nuestros días, aún existen ciertos tipos de embarcaciones que se siguen construyendo en madera.

Esto permitió desarrollar elementos muy importantes, como las **juntas** y las **uniones**, para que los barcos fueran capaces de resistir las embestidas del mar y que al mismo tiempo fueran estancos. De esta manera, existen ciertos tipos de madera con mejor disposición para la construcción de barcos por sus características, por su **durabilidad**, **ligereza**, **estabilidad** o **resistencia a la flexión**. Y en la construcción ocurre algo parecido, pues dependiendo del uso que se le va a dar a la madera, por ejemplo si va a colocarse en interiores o en exteriores, o si se necesita que sea blanda para realizar detalles o decoraciones, se tiene muy en cuenta el tipo de árbol y la zona del tronco que se debe escoger.

Por otro lado, en lo que se refiere a infraestructura, cabe destacar el papel de los **puentes**, que por característica general debían salvar grandes luces por lo que se diseñaron respuestas que después se imitaron con la construcción en piedra, acero y hormigón.

En la actualidad, gracias a los nuevos materiales derivados de la madera que tienen mayor **resistencia** y **durabilidad**, y a las nuevas tecnologías, se pueden seguir construyendo puentes que además son **ecológicos** y se **integran en el paisaje**.

Por un lado, los vikingos eran diestros constructores de barcos, ya sean los famosos barcos de guerra *drakkar*, ágiles naves capaces de transportar muchos hombres y cuya quilla plana les permitía entrar en zonas con poca agua, como barcos mercantes a vela, también llamados *karve*.

Trabajaban con azuela, una técnica llamada tringladillo, que aún se utiliza hoy en día en algunas zonas de Noruega, que consistía en elaborar tres piezas estructurales (la quilla, la roda y el codaste) a las que luego se le acoplarían tablas, previamente dobladas, con clavos.

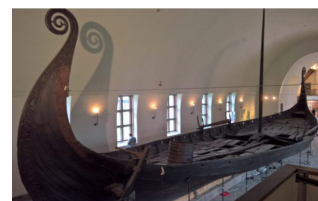


Imagen 1.8 Barco de Oseberg, Museo de Barcos Vikingos de Oslo.
- <https://barcovikingo.com/historia-vikingos/museo-barcos-vikingos-oslo/>

Por otra parte, la cultura japonesa está muy enfocada a la pesca, y por ello se han desarrollado muchas embarcaciones de tamaño pequeño y mediano para este fin; pero sin duda en lo que destacan es en la calidad de sus carpinteros, como ocurre en el Santuario de Ise, que se reconstruye cada 20 años con total exactitud y demuestra la habilidad de los artesanos.



Imagen 1.9 Santuario de Ise, Japón.
- <https://arquitecturayempresa.es/noticia/santuario-de-ise-japon-el-templo-que-se-reconstruye-cada-20-anos>

1.4 Usos y ejemplos en el presente

Aún con toda la evolución histórica, explicada en las páginas anteriores, la madera que se emplea para la construcción, mantiene los mismos usos que se le ha dado desde que se empezó a usar para el ejercicio de la arquitectura, entre los cuales se encuentran el **estructural**, ya sea principal o auxiliar, y el de **ornamentación**.

Aún con todo, la madera pasó a un segundo plano cuando durante la revolución industrial aparecieron el acero y posteriormente el hormigón como materiales de construcción, pero actualmente la madera está resurgiendo como material y ello se debe gracias al desarrollo de la tecnología de los **programas BIM**, que han traído consigo la sencillez de diseño para sistemas modulares, y la obtención de piezas con precisión milimétrica gracias a las **máquinas de corte por control numérico (CNC)**.

Esto ha permitido trabajar con materiales modulares de dimensiones exactas denominadas de Madera en Masa, o **Mass Timber** en inglés. Los más utilizados en este grupo son la Madera Contralaminada, o su acrónimo en inglés **CLT (Cross-Laminated Timber)**; Madera Laminada-Encolada, o su acrónimo en inglés **Glulam (Glue-Laminated Timber)**; Madera Laminada-Clavada, o su acrónimo en inglés **NLT (Nail-Laminated Timber)**; y Madera Laminada en espiga, o su acrónimo en inglés **DLT (Dowel Laminated Timber)**.

Al trabajar con piezas prefabricadas en taller, se reduce mucho el tiempo de construcción, la mano de obra, los costos, las mermas y los errores.

Además, los gobiernos de algunos países como Canadá, promueven este tipo de estructuras para mitigar los efectos del **cambio climático**, y no solo por ser **más ecológico** en su fabricación que el hormigón, sino que también trabaja como **aislante** y se consiguen minimizar los puentes térmicos.

En las siguientes páginas, se desarrollaran los sistemas mencionados (Glulam, NLT y DLT), exceptuando el CLT, que será analizado más en profundidad en el siguiente apartado.

1.4 Usos y ejemplos en el presente

- Glulam

Este producto de ingeniería, está formado por segmentos individuales de madera, con uniones a partir de adhesivos, que comúnmente son de **melanina o poliuretano**.

Las piezas de Glulam pueden tener formas muy variadas además de tener gran resistencia, lo que permite crear **luces muy grandes** y por ello es especialmente usado en **pabellones y puentes**, en gran parte gracias a la formación de arcos.



Imagen 1.10 Viga Glulam.
- <https://wigo.info/es/glulam>

Arquitectos Bjarke Ingels Group
Área 1.100m²
Año 2013
Ubicación Hellerup, Dinamarca



Imagen 1.11 Vista interior del gimnasio con vigas de Glulam.
- <https://big.dk/#projects-ghg>

• Gammel Hellerup Gymnasium •



Imagen 1.12 Vista interior del gimnasio con vigas de Glulam.
- <https://big.dk/#projects-ghg>

Arquitectos StructureCraft
Área 275'2 m²
Año 2010
Ubicación Princeton, Canadá



Imagen 1.13 Piezas prefabricadas de glulam.
- <https://structurecraft.com/projects/princeton-bridge>

• Princeton Bridge •



Imagen 1.14 Vista del puente con piezas curvadas de Glulam.
- <https://structurecraft.com/projects/princeton-bridge>

1.4 Usos y ejemplos en el presente

- NLT

La **madera laminada-clavada**, debe su resistencia a los **tornillos o clavos** que unen las diferentes piezas de madera entre sí. A diferencia del Glulam, es empleado para **superficies**, ya sean forjados, muros portantes o cubiertas. Las piezas se colocan siempre en **números pares** y pueden alcanzar una superficie máxima de 3'6 x 30 m, y tener un grosor de entre 89 y 314 mm.

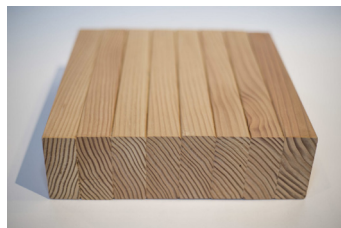


Imagen 1.15 Pieza de NLT.
- <https://www.fastapp.com/concept-lab/material/nail-laminated-timber-nlt-9/>

Arquitectos CLB Architects
Área 110.000m²
Año 2010
Ubicación Jackson, Wyoming



Imagen 1.16 Detalle del forjado.
- <https://clbarchitects.com/projects/jackson-hole-airport-expansion/>

• Jackson Hole Airport •



Imagen 1.17 Vista interior del gimnasio con vigas de Glulam.
- <https://clbarchitects.com/projects/jackson-hole-airport-expansion/>

• Stapleton Library •

Arquitectos Andrew Berman
Área 12.000 m²
Año 2013
Ubicación Stapleton, Staten Island



Imagen 1.18 Vista exterior de la librería.
- <https://www.archdaily.com/870214/stapleton-library-andrew-berman-architect>



Imagen 1.19 Vista interior de la librería.
- <https://www.archdaily.com/870214/stapleton-library-andrew-berman-architect>

1.4 Usos y ejemplos en el presente

- DLT



Imagen 1.20 Pieza de DLT.
- <https://www.madera21.cl/blog/2018/02/15/dlt-el-nuevo-producto-de-madera-maciza-especial-para-pisos-y-techos/>

El DLT es muy similar al NLT, con la diferencia de que en lugar de emplear clavos o tornillos, se emplean **pasadores de madera**, en inglés llamados *dowels*.

Es muy fácil de fabricar debido a las máquinas de corte por control numérico y es más barata que aquellas en las que se emplean colas y adhesivos para formar los paneles.

Como el NLT, es bueno para superficies y se pueden realizar modificaciones en obra.

• The Soto •

Arquitectos Lake Flato
Área 15.641m²
Año 2019
Ubicación San Antonio, Texas



Imagen 1.21 Vista exterior del edificio.
- <https://www.lakeflato.com/developmentcommercial/soto-building/?project=open>

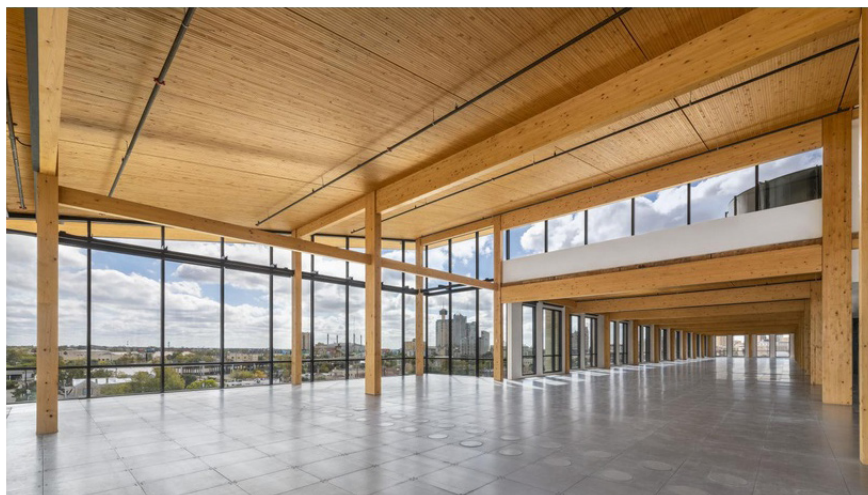


Imagen 1.22 Vista interior de la planta de oficinas.
- <https://www.lakeflato.com/developmentcommercial/soto-building/?project=open>

• Museum of Fine Arts of Houston •

Arquitectos Lake Flato
Área 3.623 m²
Año 2018
Ubicación Houston, EEUU



Imagen 1.23 Vista exterior del edificio.
- <https://www.archdaily.com/904648/houston-museum-of-fine-arts-lake-flato-architects>



Imagen 1.24 Vista interior del museo.
- <https://www.archdaily.com/904648/houston-museum-of-fine-arts-lake-flato-architects>

2. CLT como material de construcción

Como se ha comentado anteriormente, el CLT es un producto derivado de la madera, del tipo de madera en masa, y con el que se trabaja mediante piezas prefabricadas de forma modular. El antecedente del CLT es la madera contrachapada o *plywood*, que sigue los mismo conceptos que veremos más adelante pero con estratos más delgados, y dependiendo de sus dimensiones, podía y puede usarse para barcos o modelación.



Imagen 2.1 Detalle de panel de CLT.
- <https://www.maderea.es/que-son-los-paneles-contralaminados-o-clt/>

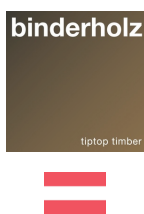
2.1 Introducción al CLT

El CLT es un sistema compuesto por tablones de madera, llamados estratos, adheridos entre sí gracias a adhesivos estructurales, de manera que las fibras se colocan en direcciones opuestas para adquirir resistencia en ambos sentidos, lo que además le aporta estabilidad dimensional en ambas direcciones; fue patentado en Francia en 1985 pero los primeros proyectos se llevaron a cabo en Suiza y Alemania. Actualmente el CLT es un producto que se utiliza mucho en centro y norte de Europa y se ha extendido también a los Estados Unidos y Canadá. Al ser un material de construcción en seco, es muy rentable para países con climas muy fríos. Algunos de los principales productores son:



Imagen 2.2 Panel de CLT.
- TFG Edificación en altura con CLT, Ángel Andrés Fernández

- Fabricantes en Austria



- Fabricantes en Europa



- Fabricantes en el resto del mundo



2.1 Introducción al CLT

Los tablones que forman el panel deben cumplir el código **UNE 56544**, que define las maderas estructurales.

Los tamaños de los paneles depende del fabricante y el uso que se les va a dar, y aunque lo más común es que se haga en grupos de **3, 5 o 7 estratos**, existen más combinaciones disponibles. Los espesores vendrán definidos por el requerimiento estructural, que normalmente varia en valores de **19, 25, 38 o 50 mm**, hasta un **máximo de 300 mm** de grosor.

Tabla 2.1 Medidas y clases estándar de los estratos usados en la fabricación de paneles de CLT

Parámetro	Rango más común	Rango disponible
Grosor, a	20 - 45 mm	20 - 60 mm
Ancho, b	80 - 200mm	40 - 300 mm
Calidad de fuerza	C14 - C30	-
Relación a/h	4:1	-

Tabla 2.2 Medidas y clases estándar de los paneles de CLT

Parámetro	Rango más común	Rango disponible
Grosor, a	80 - 300 mm	60 - 500 mm
Ancho, h	1'20 - 3'0 m	hasta 4'80 m
Largo l	16 m	hasta 30 m
Nº de capas	3, 5, 7, 9	hasta 25

Aunque se suelen disponer de **manera asimétrica**, pueden existir casos concretos, como en revestimientos, refuerzos estructurales o más resistencia frente al fuego, que provoque la simetría en el número de estratos de la pieza. Los acabados dependen de cada empresa distribuidora.

Las dimensiones más comunes del panel pueden variar de **0'5 m hasta 18 m**, y será esencial tener en cuenta las **dimensiones del camión** para que pueda ser transportado a obra sin problema.

Para **forjados**, los estratos exteriores estarán colocados de manera que las **vetas** estén orientadas con la **dirección más larga del panel, que cubren el hueco del vano**. En cambio, para **muros**, las vetas estarán colocadas en **vertical**, para conseguir así una resistencia mayor al esfuerzo. Los paneles pueden ser no vistos y quedar revestidos, tener visual industrial o visual de "alto grado".

Con lo que se ha comentado en el reciente párrafo, podemos observar en la foto (imagen 2.5) como los paneles que tienen función estructural han sido orientados de maneras que las vetas están orientadas con las direcciones de máximo esfuerzo.

Imagen 2.5 Orientación más común de las vetas.
- <https://www.nextarquitectura.com/arquitectura/clt/>

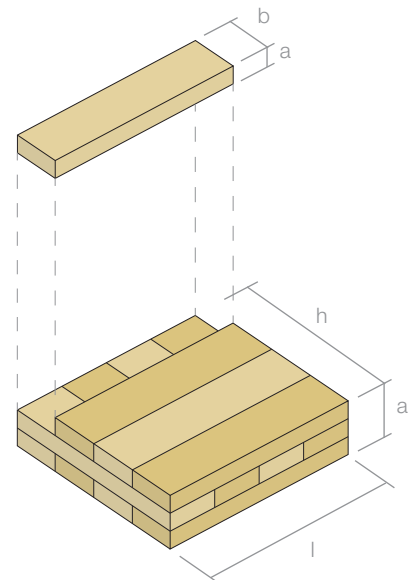


Imagen 2.3 Panel de CLT.
- Elaboración propia

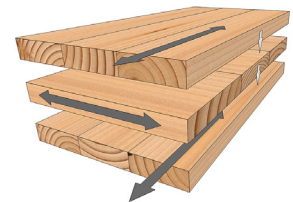


Imagen 2.4 Orientación más común de las vetas.
- <https://www.maderea.es/que-son-los-paneles-controlaminados-o-clt/>



2.2 Comparación a otros sistemas

El 6 de abril de 2009, hubo un terremoto de 6.7 en la escala de Ritzer que afectó a una gran área de Albruzzo, y habiendo muchos edificios que quedaron destrozados, surgió el proyecto C.A.S.E. cuyo objetivo era la creación de unos edificios residenciales con unos altos estándares de **comodidad, habitabilidad, seguridad frente al sismo** y **ecologismo**, para ello se diseñaron estructuras con diferentes tipos de construcción prefabricada (madera contralaminada, acero y hormigón prefabricado) para un edificio tipo, construido sobre una placa de aislamiento sísmico. Se empleó madera en el 50% de las viviendas construidas.

En aquellos donde la madera forma la estructura principal, además de permitir una **construcción en un periodo corto de tiempo**, **incrementa el rendimiento térmico** del edificio, pues trabaja 10 veces mejor que el hormigón y **reduce los costes energéticos** un 50% con respecto a estructuras tradicionales, además de garantizar flexibilidad frente a futuros cambios en caso de que sean necesarios.

Una de las principales ventajas del CLT, es que **la huella de carbono es negativa**, pues durante todo el proceso de crecimiento del árbol, este va absorbiendo CLT de la atmósfera, y la producción de CO₂ durante la fabricación del panel es menor que esta absorción.



Imagen 2.6 Planta baja y primera, edificio en Aquila.
- <https://www.sistem.it/es/realizaciones/edificios-residenciales/bloques-viviendas-de-varios-pisos-y-viviendas-sociales/proyecto-c-a-s-e-laquila/>



Imagen 2.7 Estructura completa, edificio Aquila.
- <https://www.sistem.it/es/realizaciones/edificios-residenciales/bloques-viviendas-de-varios-pisos-y-viviendas-sociales/proyecto-c-a-s-e-laquila/>

Otras de las principales ventajas frente al hormigón son:



- 80% de peso de los materiales



+ 3500MWh de energía almacenada



- 141 toneladas de CO₂ desprendidas a la atmósfera



- 45% de energía consumida

2.3 Materia prima, encolado y prensado

“La Madera es una Materia Prima Única, que reúne las cualidades de **Eficiencia Energética**, **Higiene**, **Salud** y protección del **Medio Ambiente**. Sus prestaciones mejoran las condiciones de **Seguridad frente al Fuego** y **frente al Sismo**; mejoran las **condiciones Acústicas**, **Térmicas** y de **Estanqueidad**, y por tanto suponen un mayor **Confort**. La madera es **100% Reciclable** y **no produce Residuos**.”

La madera más utilizada para fabricar el CLT es el **abeto**, aunque también es posible con **pinos** o **alerces**. Hay un pino en concreto (*Pinus sylvestris*) que se emplea para los revestimientos y que le otorga una mejor calidad. Los fabricantes suelen usar plantaciones cercanas, siendo en todos los casos **coníferas**.

El primer paso para la fabricación del CLT consiste en el **secado de la madera**. Recién cortada, el contenido de humedad varía entre el 50 % y el 110%. Mediante el secado al aire libre los valores se reducirían a entre el 16 y el 18%, pero la UNE 56540 exige que para uso estructural se encuentre en la clasificación “**madera muy seca**”, lo que requiere de **secados en cámara**.

En el siguiente paso se procede a **serrar** la madera para obtener los estratos, los cuales se cepillarán buscando cualquier tipo de imperfección para **garantizar la uniformidad**, y que las superficies estén limpias de residuos para el correcto funcionamiento de los adhesivos que se añadirán posteriormente, se suele rebajar entre 2,5 y 4 mm el grueso de por lo menos la cara y el dorso.

En el caso de que los estratos no sean lo suficientemente largos, y se deseen longitudes más grandes, se unirán entre si con **unión dentada**.

Una vez que los estratos están listos, se procede al **pegado** de estos, para lo que se emplearán unos adhesivos específicos para ello, siendo los más comunes para la fabricación de CLT el Penoplasto y Aminoplasto (MUF, PRF) o la Emulsion-Polímero-Isocianato (EPI), aunque desde 1994 el adhesivo más empleado en Europa es el **PUR**, que consiste en un único componente de poliuretano que **reacciona con la humedad de la madera**.

Las ventajas de este adhesivo, respecto a los utilizados con anterioridad, es su fácil aplicación por no necesitar mezclas, que **no desprende gases** de componentes orgánicos volátiles (VOCs), **no contiene disolventes** y el **tiempo de pegado es más rápido**.

Existen investigaciones respecto a esta parte del proceso, por ser el único componente que no es reciclable. Una vez adheridos los estratos se recortan los bordes del panel.



Imagen 2.9 Abeto Rojo



Imagen 2.10 Abeto Douglas



Imagen 2.11 Pino



Imagen 2.12 Alerce

- <https://maderame.com/>



La madera, como cualquier producto, debe cumplir con una serie de criterios, que se ilustran con unos sellos de calidad.

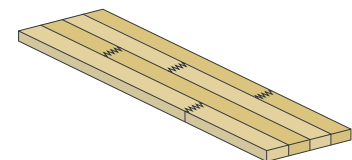


Imagen 2.13 Láminas con unión dentada
- Elaboración propia



Imagen 2.14 Aplicación de PUR
- <https://www.jowat.com/es-CL/aplicaciones/industria-maderera/materiales-con-base-de-madera/laminada/>

2.3 Materia prima, encolado y prensado

El mayor peligro una vez pegados los estratos es la **delaminación**, por lo que los adhesivos se someten a tests de resistencia a esfuerzos y a altas temperaturas. Otros problemas que pueden surgir a partir del encolado son la curvatura de cara o canto, el **alabeo**, que puede afectar al proceso de pegado.



Imagen 2.15 Aplicación de PUR
- TFM El tablero contralaminado, Umberto Viotto

Los ya mencionados estratos unidos por diente de sierra son muy útiles para evitar deformaciones, pues al limitar el largo de las tablas, estas se reducen de manera significativa.

Para asegurar la adhesión de los paneles, estos deben ser prensados mediante **prensa hidráulica**, que puede llegar a 6 MPa de esfuerzo vertical, o **técnicas de vacío**, cuya presión ronda 0'1 MPa.

Para evitar roturas debido al estrés generado por la pérdida de la humedad, se realizan **ranuras** que permiten el movimiento de los estratos y **reducen las tensiones internas**. En algunas ocasiones, es necesario ejercer presiones laterales para evitar desplazamientos, además se debe tener en cuenta el tiempo en que se ejerce presión y la temperatura durante el proceso, que debería rondar los 15°C.

Una vez terminado este proceso se procede al **cepillado** de todas las caras del material, y a su **apilamiento de manera automática** para su posterior mecanizado y transporte.



Imágenes 2.16 y 2.17 Procesos de pegado y prensado
- TFM El tablero contralaminado, Umberto Viotto

2.4 Diseño e ingeniería

Como para cualquier material, es necesario identificar una serie de condicionantes que van a definir la estructura del proyecto, las cuales son el fuego, las dimensiones, las cargas, el uso y la exposición al ambiente.

Uno de los requisitos más importantes del CLT durante el diseño de un edificio, cuya estructura se va a componer de este material, es una planificación muy detallada y una muy clara estrategia de ejecución, para que todas las piezas y conexiones puedan ser elaboradas en taller, y ello permita una rápida y limpia ejecución del proyecto.

Será necesario por tanto tener en cuenta como serán colocados los paneles respecto a los huecos en fachada y a las uniones necesarias. Por ello se puede plantear distintos casos genéricos, estos en concreto son los planteados por el proveedor español EGOIN:

Caso 1 Los huecos son menores a 4m², se puede emplear un único panel en el que se abren los mencionados huecos.

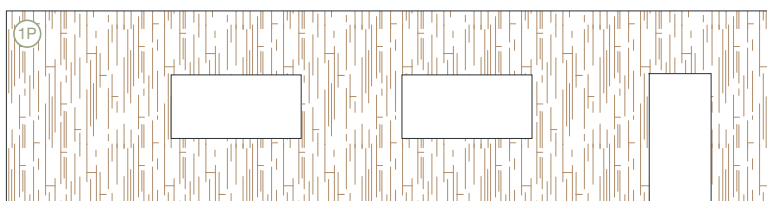


Imagen 2.18
- Elaboración propia

Caso 2 Cuando los huecos superen los 4 m², se puede optar por realizar subdivisiones.



Imagen 2.19
- Elaboración propia

Caso 3 En el supuesto caso de que el dintel tenga poca altura, su luz sea considerable o reciba cargas puntuales, se pueden emplear vigas de madera laminada o incluso de acero.



Imagen 2.20
- Elaboración propia

2.4 Diseño e ingeniería

En el caso de diseños más estándar, encontramos los siguientes casos:

Caso 1 Cuando la altura de forjado es cercana a los estándares de los paneles, estos se pueden colocar en horizontal en longitudes de hasta 14 m. Si existen desajustes entre la altura de la pared se puede resolver añadiendo una durmiente en el suelo (40 – 80 mm).

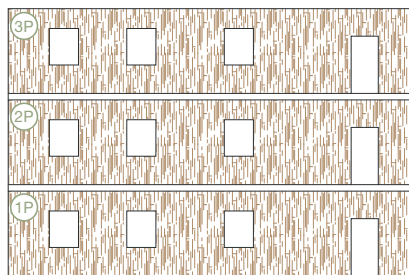


Imagen 2.21
- Elaboración propia

Caso 2 Cuando la altura de forjado sobrepasa los 3 m, los muros se subdividen en su longitud, preferiblemente en anchos de 2'40 m por facilidad de transporte.

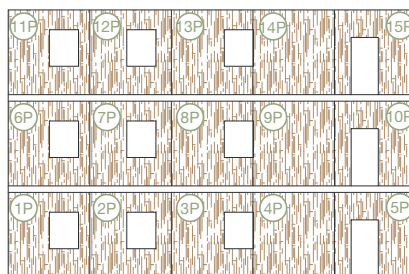


Imagen 2.22
- Elaboración propia

Caso 3 Colocación de paneles de manera vertical que permita resolver varios forjados. Este método es muy útil cuando ya existen forjados construidos, pues los paneles de CLT se atornillan a la testa de estos, con paneles de hasta 16 m de altura. Cuando se trate de nueva construcción lo recomendable es no sobrepasar los 12 m de altura.

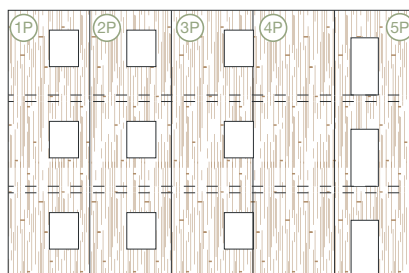


Imagen 2.23
- Elaboración propia

2.4 Diseño e ingeniería

Y siguiendo estos criterios llegamos a la conclusión de 3 maneras de construcción:

En horizontal. Llamada en T en la normativa, están compuesto generalmente por 3 capas, y se debe tener cuidado a la hora de manipularlos, cuando la longitud supere los 10 m de longitud por ser muy cimbreantes. En algunos casos concretos es necesario la superposición de paneles para salvar ciertas alturas.

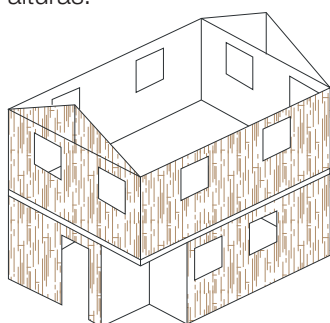


Imagen 2.24
- Elaboración propia

Sistema mixto. Combinación de paneles en horizontal y vertical, útil cuando existen diferencias de alturas y no se pretende dejar juntas en lugares no deseados.

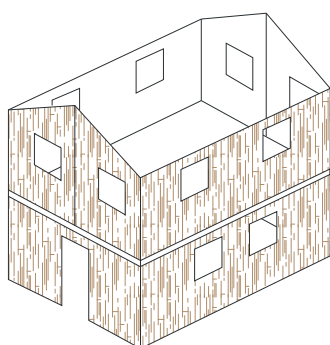


Imagen 2.25
- Elaboración propia

En vertical. Empleado en casos muy concretos, cuando las medidas de paneles estándar no coincide con las alturas de proyecto o sobrepasan la altura flexible (3,75 m), cuando la altura entre forjados es grande y se pretende simplificar su transporte o cuando las cubiertas son inclinadas, para aprovechar mejor la forma de las fachadas y el resultado estético es mejor. Este sistema requiere de detalles más complejos como el empleo de perfiles para refuerzo o rebajes en el muro para el encaje del forjado en este.

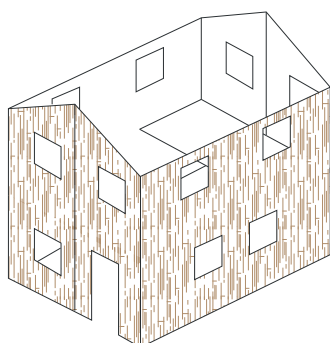


Imagen 2.26
- Elaboración propia

2.4 Diseño e ingeniería

Otro punto importante a la hora del diseño es la **cimentación** del edificio, que puede ser de hormigón, sobre forjado sanitario o pilotes metálicos. Habrá que poner especial atención en la **humedad** que pueda recibir los paneles desde el terreno.

Para la fase de desarrollo del proyecto, existen programas desarrollados por los propios distribuidores de CLT, en general muy simples, a partir de Excel o Java, que tolerados por el Eurocódigo, permiten realizar el diseño en **una dimensión** de los componentes de la estructura y comprobarlos para **límites últimos y de servicio**. Son programas poco flexibles por las limitaciones de cálculo y la selección de variables.

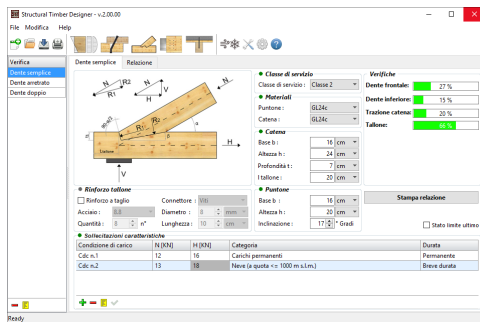


Imagen 2.27 Programa simple para cálculo en una dimensión
 - <https://maderaestructural.wordpress.com/2018/04/05/software-express-de-calculo-de-estructuras-de-madera/>

Pero en todo caso, las mejores herramientas son las conocidas como **BIM (Building Information Modeling)**, programas enfocados en el diseño arquitectónico que permiten trabajar en un mismo proyecto a varios niveles. Cada vez más empleados y en muchas ocasiones incluso requeridos por las instituciones públicas, disponen de software específico con el que se puede realizar el desarrollo de un proyecto enfocado en el CLT, como puede ser el caso de **Wood Framing CLT** para Revit, de Autodesk. Una de las principales herramientas para el cálculo de estructuras de madera es **CadWork**, que permite trabajar en todas las fases del proyecto.

Este tipo de software permite definir todos los parámetros del proyecto, incluyendo los conectores a emplear, los tipos de corte, los soportes y demás detalles, y que pueden ser modificados durante el proceso por ser modelos dinámicos.

Estos modelos 3D son los que se exportan a dibujos CAD para realizar las mediciones y los cortes de todas las piezas de manera muy precisa.



Imagen 2.28 Modelado 3D en agacad.
 - <https://agacad.com/blog/webinar-clt-panels-walls-floors-roofs-revit>

2.5 Corte y mecanizado

Una vez están modelados los tableros necesarios para el proyecto, es la oficina técnica la que establece los **patrones de mecanizado** y corte de cada panel, que en general se realizan gracias a **máquinas de corte por control numérico computarizado (CNC)**, que obtienen la información necesaria gracias a los programas antes mencionados, ya sea en formato BLT o CAD.

Este tipo de máquinas se usan para todo tipo de madera en general, y se basan en el empleo de una serie de herramientas (fresadora, torno, corte por láser, estampadora, etc.) que trabajan en 2 o 3 ejes, dependiendo de la complejidad de la máquina, que por lo general suele llevar un equipo incorporado para su manipulación.

Además incorporan una serie de accesorios así como cambiador automático de herramientas, control de la velocidad y activación del husillo y refrigerante, todo ello controlado por un programa específico de instrucciones llamado también CNC, escrito en un lenguaje simple denominado **G** y **M**, y regulado la **normativa ISO** que con instrucciones simples mediante comandos.

N01 G00 X10.0 Y5 Z0 F5
T **T** **T**
Dirección **Dato** **Palabra**

Imagen 2.29 Bloque parte de un conjunto de instrucciones.
 - <https://www.demaquinasyherramientas.com/mecanizado/introduccion-a-la-tecnologia-cnc>

Dado al gran control que da este tipo de máquinas, además de huecos como puertas y ventanas, también se pueden plantear los perfiles de los paneles para establecer machihembrados, cortes oblicuos o las aperturas para instalaciones.

Para este tipo de trabajos, algunas empresas han desarrollado modelos concretos para el trabajo de paneles de grandes dimensiones, enfocadas a medianas y grandes empresas, cuya producción se basa en los tableros de CLT.

Una vez se realizan los cortes, se marcan el número del panel y el proyecto, así como las uniones planteadas en la fase de diseño.



Imagen 2.32 Paneles apilados con nomenclatura.
 - Technical Design Guide. Crosslam CLT. Structurlam



Imagen 2.33 Nomenclatura de un panel.
 - Prontuario Técnico para la Construcción con Paneles de Madera Contralaminados EGO CLT. EGOIN

CÓDIGOS G
G00: Posicionamiento rápido (sin maquinari)
G01: Interpolación lineal (maquinando)
G02: Interpolación circular (horaria)
G03: Interpolación circular (antihoraria)
G04: Compás de espera
G10: Ajuste del valor de offset del programa
G20: Comienzo de uso de unidades imperiales (pulgadas)
G21: Comienzo de uso de unidades métricas
G28: Volver al home de la máquina
G32: Maquinar una rosca en una pasada
G36: Compensación automática de herramienta en X
G37: Compensación automática de herramienta en Z
G40: Cancelar compensación de radio de curvatura de herramienta
G41: Compensación de radio de curvatura de herramienta a la izquierda
G42: Compensación de radio de curvatura de herramienta a la derecha
G70: Ciclo de acabado
G71: Ciclo de maquinado en torneado
G72: Ciclo de maquinado en frentado
G73: Repetición de patrón
G74: Taladrado intermitente, con salida para retirar virutas
G76: Maquinar una rosca en múltiples pasadas
G96: Comienzo de desbaste a velocidad tangencial constante
G97: Fin de desbaste a velocidad tangencial constante
G98: Velocidad de alimentación (unidades/min)
G99: Velocidad de alimentación (unidades/revolución)

CÓDIGOS M
M00: Parada opcional
M01: Parada opcional
M02: Reinicio del programa
M03: Hacer girar el husillo en sentido horario
M04: Hacer girar el husillo en sentido antihorario
M05: Frenar el husillo
M06: Cambiar de herramienta
M07: Abrir el paso del refrigerante B
M08: Abrir el paso del refrigerante A
M09: Cerrar el paso de los refrigerantes
M10: Abrir mordazas
M11: Cerrar mordazas
M13: Hacer girar el husillo en sentido horario y abrir el paso de refrigerante
M14: Hacer girar el husillo en sentido antihorario y abrir el paso de refrigerante
M30: Finalizar programa y poner el puntero de ejecución en su inicio
M31: Incrementar el contador de partes
M37: Frenar el husillo y abrir la guarda
M38: Abrir la guarda
M39: Cerrar la guarda
M40: Extender el alimentador de piezas
M41: Retraer el alimentador de piezas
M43: Avisar a la cinta transportadora que avance
M44: Avisar a la cinta transportadora que retroceda
M45: Avisar a la cinta transportadora que frene
M48: Inhabilitar Spindle y Feed override (maquinar exclusivamente con las velocidades programadas)
M49: Cancelar M48
M62: Activar salida auxiliar 1
M63: Activar salida auxiliar 2
M64: Desactivar salida auxiliar 1
M65: Desactivar salida auxiliar 2
M66: Esperar hasta que la entrada 1 esté en ON
M67: Esperar hasta que la entrada 2 esté en ON
M70: Activar espejo en X
M76: Esperar hasta que la entrada 1 esté en OFF
M77: Esperar hasta que la entrada 2 esté en OFF
M80: Desactivar el espejo en X
M98: Llamada a subprograma
M99: Retorno de subprograma

Imágenes 2.30 y 2.31 Instrucciones Generales y Miscelaneas.
 - <https://www.demaquinasyherramientas.com/mecanizado/introduccion-a-la-tecnologia-cnc>

2.6 Puesta en obra

- Transporte

Lo primero será transportar los tableros de la fábrica a la obra, para ello se podrá optar por el transporte marítimo, pero será esencial el transporte en **camión**, en los que se deberá poner especial atención en su embalaje, para que queden completamente protegidos de la lluvia.

Para ambas opciones mencionadas, es necesario tener en cuenta las medidas máximas del vehículo, siendo por lo general más limitante el camión, que suele ser de **18 metros**, dependiendo del tipo de camión, en caso de que se necesiten tableros de mayores dimensiones se podrá optar por medidas alternativas como el desdoble.

Por otra parte, habrá que tener en cuenta si se descargarán los paneles antes de su colocación, o si su montaje en obra se realizará directamente desde el camión, para realizar al apilamiento en el camión de manera acorde a ello.

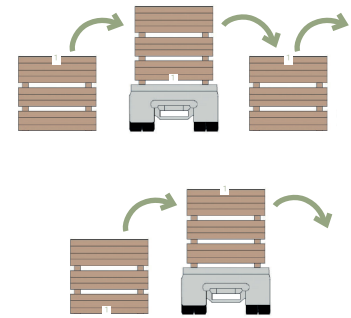
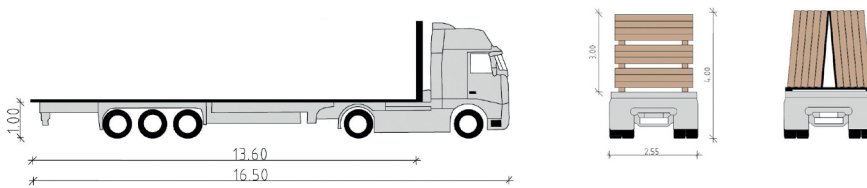


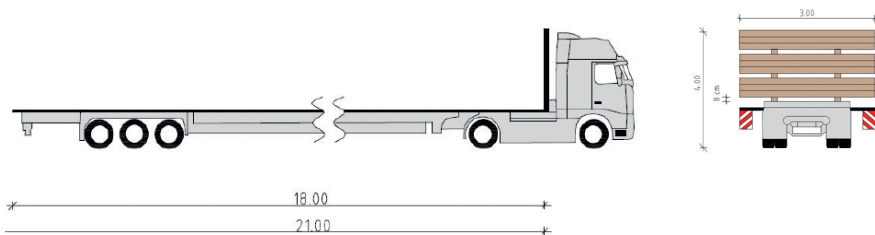
Imagen 2.34 Procesos carga-descarga.
- Elaboración propia



Imágenes 2.38 - 2.40 Semirremolque estándar
- Directiva de procesamiento binderholz CLT bbs



Imagen 2.35 Pinzas con forma en C.
- Prontuario Técnico para la Construcción con Paneles de Madera Contralaminados EGO CLT. EGOIN



Imágenes 2.41 y 2.42 Semirremolque telescópico.
- Directiva de procesamiento binderholz CLT bbs



Imagen 2.36 Anclaje de elevación.
- Directiva de procesamiento binderholz CLT bbs

- Montaje

Para ser manipulados, se disponen de unas **piezas en C** que se enganchan al tablero y con los cuales será posible elevarlos con una grúa. Se colocan siempre por pares y el número de parejas dependerá del grueso del tablero y con un límite de peso máximo dependiendo del gancho.

Otros métodos pueden ser mediante **anclajes** o **eslingas**, que se anclan a tornillos que se colocarán por parejas dependiendo del peso que se debe levantar, o que se atan en unas perforaciones realizadas al panel.

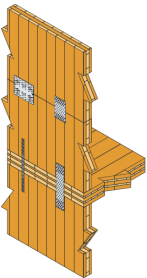
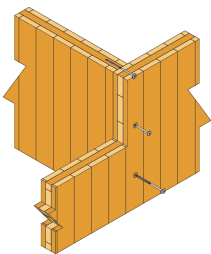
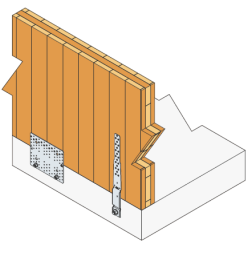
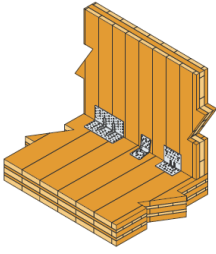
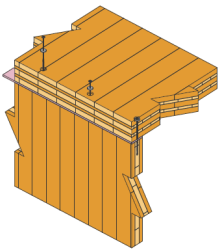
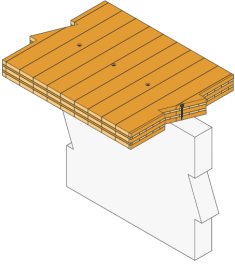
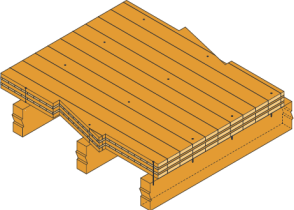
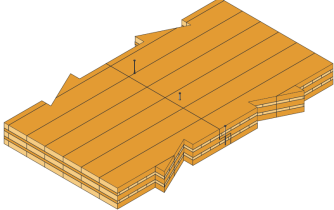
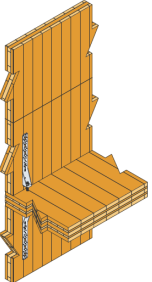
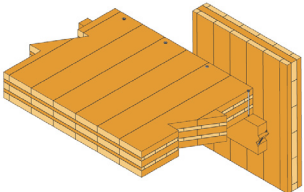
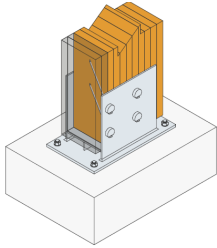
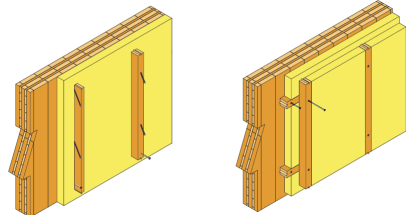


Imagen 2.37 Lazo de elevación.
- Directiva de procesamiento binderholz CLT bbs

2.6 Puesta en obra

- Uniones

Como hemos visto anteriormente, las uniones son una parte del proyecto que cabe tener en cuenta desde los primeros momentos del proceso de diseño, por lo tanto vamos a ver las uniones más comunes y sus soluciones:

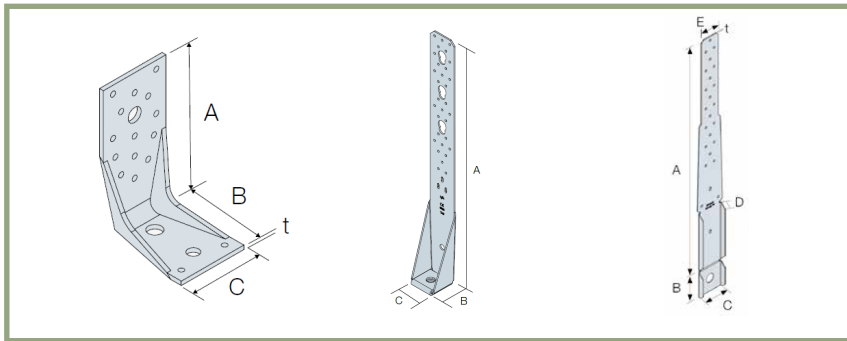
			
Muro sobre muro Placas de anclaje	Esquina entre muros Tornillos	Muro sobre forjado de hormigón Placas de anclaje o escuadras	Muro sobre forjado Escuadras
			
Forjado sobre muro Tornillos	Forjado sobre muro hormigón Pasadores	Forjado sobre vigas Tornillos	Unión de forjados Tornillos o planca de anclaje
			
Transmisión de esfuerzos Anclaje	Forjado sobre listón Pasadores y/o tornillos	Uniones con herrajes Tornillos	Envoltorio sobre muro Tornillos

Imágenes 2.43 - 2.54 Uniones más comunes.
- Conexiones y fijaciones para uniones CLT, Strong-Tie

2.6 Puesta en obra

Escuadras de anclaje

Piezas especialmente adaptadas para paneles de CLT, su forma permite la óptima actuación frente a **cargas de levantamiento y elevación**, pudiendo ser anclados, dependiendo del modelo a CLT o a hormigón.



De izquierda a derecha:

Imagen 2.55. Escuadra reforzada para armazón de madera.

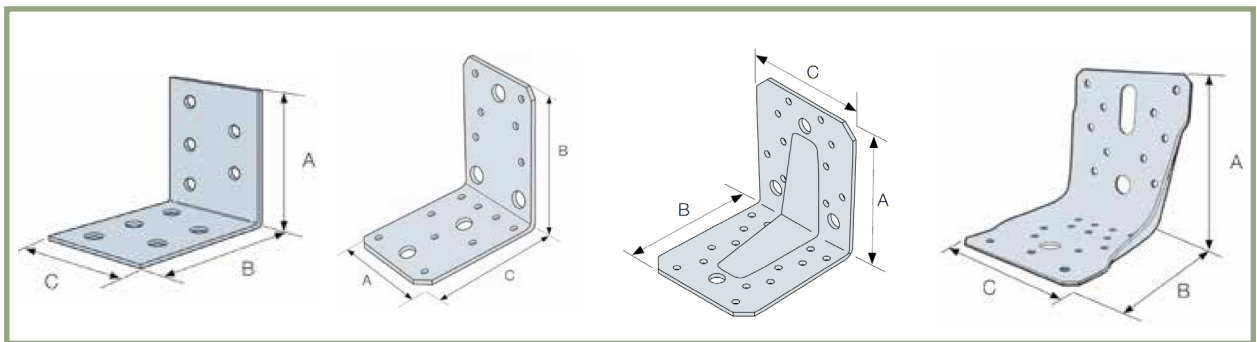
Imagen 2.56 Anclaje para paneles de madera.

Imagen 2.57 Anclaje de armazón con múltiples aplicaciones.

- Conexiones y fijaciones para uniones CLT, Strong-Tie

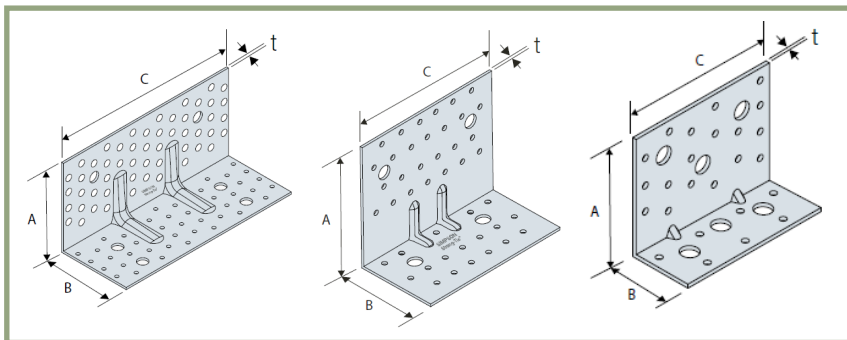
Escuadras estructurales

Existen diversas opciones, que podemos agrupar de la siguiente manera: las escuadras simples, las anchas, y aquellas que disponen de aislamiento acústico. Todas constan de una **gran resistencia y polivalencia** en lo que respecta a su uso.



Imágenes 2.58 - 2.61 Escuadras simples.

- Conexiones y fijaciones para uniones CLT, Strong-Tie



Imágenes 2.62 - 2.64 Escuadras anchas.

- Conexiones y fijaciones para uniones CLT, Strong-Tie

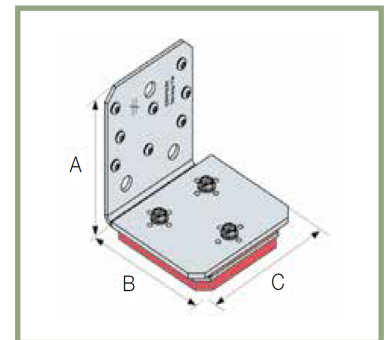


Imagen 2.65. Escuadra con aislamiento acústico.

- Conexiones y fijaciones para uniones CLT, Strong-Tie

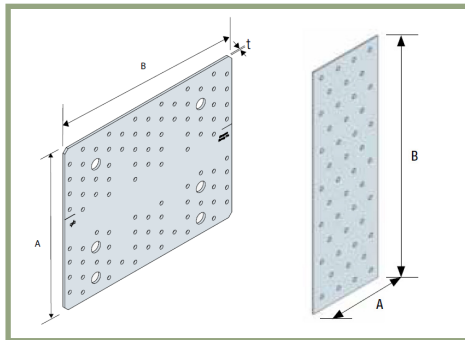
2.6 Puesta en obra

Placas y flejes

Las placas perforadas tienen **gran variedad de aplicaciones**, aunque lo más común es que sean empleadas en **empalmes**, al igual que los flejes.

Uniones ocultas

En algunas juntas existe la opción de dejar oculta la pieza, lo cual es común en **bases de muros** y en **vigas de gran canto**, para ello se emplea una placa con alma que además absorbe **cargas de elevación y laterales**. Por lo general son piezas muy largas que se cortan según las necesidades de la obra.



Imágenes 2.66 y 2.67 Placas de anclaje.
- Conexiones y fijaciones para uniones CLT, Strong-Tie



Imagen 2.68 Fleje perforado.
- Conexiones y fijaciones para uniones CLT, Strong-Tie

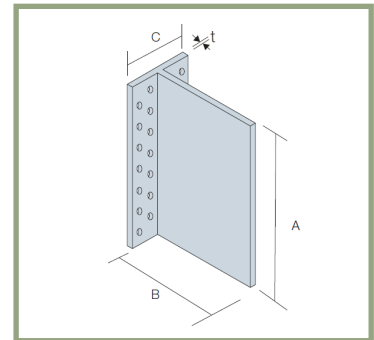


Imagen 2.70 Estribo con alma.
- Conexiones y fijaciones para uniones CLT, Strong-Tie

Tornillos y puntas de unión

Elementos **imprescindibles** para el trabajo con madera, que pueden formar un tipo de unión en sí mismo o trabajar con placas, flejes o escuadras.

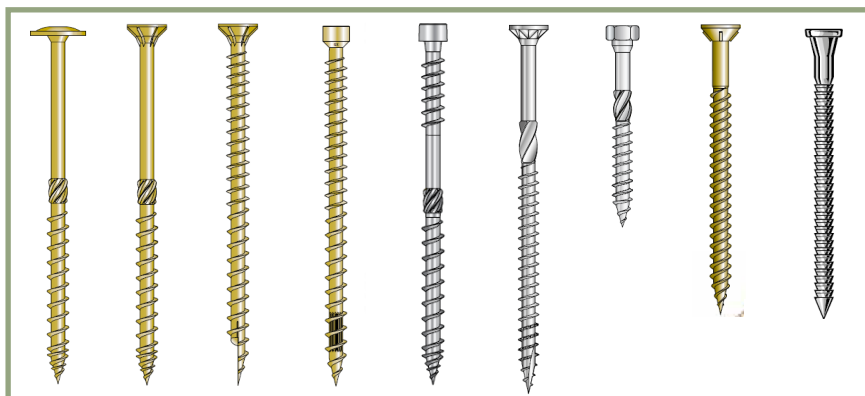
A parte de los distintos tamaños disponibles, las diferencias más generales entre cada tipo de tornillo son la forma de la cabeza, lo que implica una herramienta en concreto para el atornillado, y la rosca, que nos indica si es necesaria o no una perforación previa en el material. A la hora de elegir las dimensiones del tornillo, y el número de estos, habrá que comprobar la **resistencia a tracción** y a **cizalladura** para que puedan soportar los esfuerzos.

Imágenes 2.71 - 2.79. Diferentes modelos de tornillos.

- Conexiones y fijaciones para uniones CLT, Strong-Tie

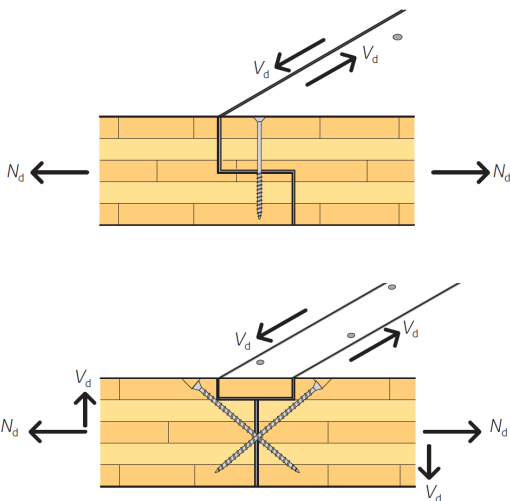
De izquierda a derecha:

- Tornillo para madera estructural de cabeza plana
- Tornillo para madera estructural con cabeza fresada
- Tornillo estructural con cabeza fresada de rosca completa
- Tornillo estructural de cabeza cilíndrica de rosca completa
- Tornillo estructural con cabeza cilíndrica y doble rosca
- Tornillo para madera con cabeza fresada
- Tornillo estructural con cabeza hexagonal de rosca parcial
- Tornillo en cinta para paneles de madera
- Punta anillada electrocincada



2.6 Puesta en obra

- Detalles constructivos



Unión de paneles en el mismo plano

La unión en paralelo puede realizarse de muy **diversas maneras**, aquí se muestran dos de las principales y los esfuerzos que permiten transmitir.

Imagen 2.80 Empalme por media vuelta.

Imagen 2.81 Unión con lengüeta simple y tornillos oblicuos.

- The CLT handbook - CLT structures facts and planning, SwedishWood

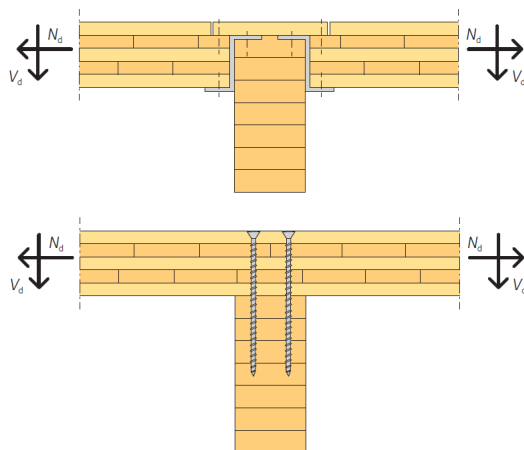
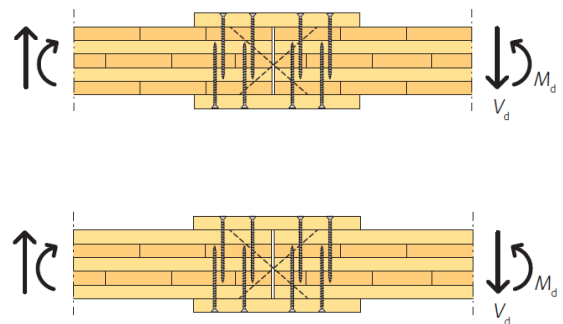
Unión forjados

Para que la **transmisión de momentos** sea posible, es necesario colocar dos lengüetas, tanto por arriba como por abajo, que pueden sobresalir o estar a ras del forjado. La capacidad de carga y la rigidez dependerá del **número de tornillos** que se decida colocar.

Imagen 2.82 Unión en dirección de máximo esfuerzo.

Imagen 2.83 Unión en perpendicular al máximo esfuerzo.

- The CLT handbook - CLT structures facts and planning, SwedishWood



Unión con vigas

Es bastante común en edificios con estructura de CLT, que parte de la misma esté compuesta por piezas de Glulam, en este caso se muestra como un forjado de CLT se podría unir a una viga de madera.

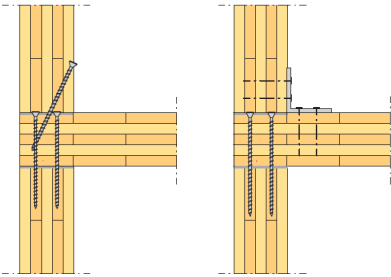
Imagen 2.84 Unión con lengüeta simple y perfiles en Z.

Imagen 2.85 Unión con tornillos pasantes.

- The CLT handbook - CLT structures facts and planning, SwedishWood

2.6 Puesta en obra

- Detalles constructivos



Unión de muros con forjado

Para las uniones de CLT entre muros y forjado, lo más común es emplear tornillos y/o escuadras, pero existen otras opciones, siendo algunas de estas más innovadoras. Aquí se presentan algunas soluciones efectivas, tanto para casos donde la unión queda vista, como otras donde queda oculta.

Imagen 2.86 Unión mediante tornillos largos, dos pasantes y uno oblicuo.

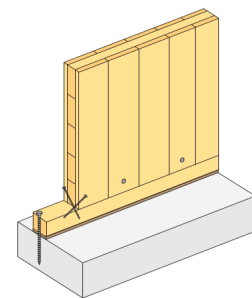
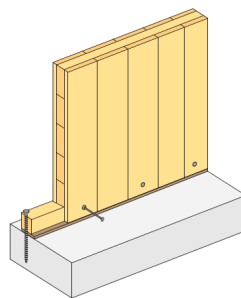
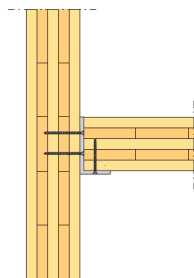
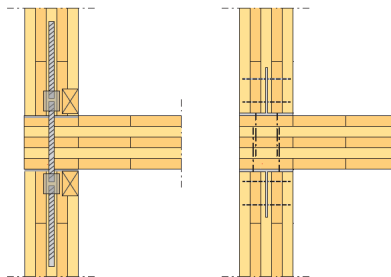
Imagen 2.87 Unión con tornillos pasantes y escuadra vista.

Imagen 2.88 Unión con tacos.

Imagen 2.89 Unión con estribos con almas.

Imagen 2.90 Unión con escuadra a muro continuo.

- The CLT handbook - CLT structures facts and planning, SwedishWood



Unión de muro a cimentación

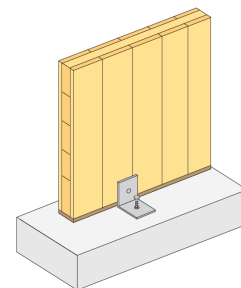
Además de las tipologías antes mencionadas, también se pueden realizar uniones mediante **productos químicos**. En el caso específico de losas de hormigón, pueden realizarse vaciados en la cimentación para encajar los paneles o colocarlos en superficie, y será importante colocar un **material higroscópico** en la junta.

Imagen 2.91 Unión mediante rail de madera dentro del panel.

Imagen 2.92 Unión mediante rail de madera con tornillos oblicuos.

Imagen 2.93 Unión con escuadras.

- The CLT handbook - CLT structures facts and planning, SwedishWood

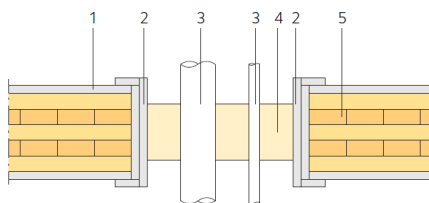


2.6 Puesta en obra

- Instalaciones

Los pasos de fontanería, saneamiento, electricidad, ventilación, etc. es necesario que sean planteados durante la fase de diseño, con especial detalle en los edificios donde se plantee dejar el CLT visto.

Normalmente se utilizan paneles ocultos o falsos techos, y los programas de diseño antes mencionados poseen herramientas para el planteo de las instalaciones y de esa manera que se puedan realizar los cortes y mecanizados que se requieran, y así en obra solo sea necesario colocar los elementos necesarios.



Imágenes 2.96 y 2.97 Perforación en forjado para paso de instalaciones.
- Forté – Building, australias first timber Highrise, Lend Lease and WoodWorks



Imagen 2.94 Perforaciones para instalaciones eléctricas.
- Forté – Building, australias first timber Highrise, Lend Lease and WoodWorks



Imagen 2.95 Panel perforado e instalaciones hidráulicas.
- Forté – Building, australias first timber Highrise, Lend Lease and WoodWorks

3. Introducción a los edificios en altura

Cuando una construcción alcanza una altura considerable, los condicionantes anteriormente mencionados se acentúan, y más concretamente dos, que definirán en gran parte el diseño de cualquier edificio en altura: el **fuego** y el **viento**.

3.1 Características limitantes: viento

Para analizar el comportamiento del CLT frente a la acción del viento, se tomarán como referencia el ensayo "*Risk-based wind design of tall mass-timber buildings*" realizado en la universidad de Brititish Coulumbia en Canadá, y el artículo "*Numerical Analysis on Global Serviceability Behaviours of Tall CLT Buildings to the Eurocodes and UK National Annexes*".

Una de las principales ventajas de las construcciones con madera respecto de los materiales convencionales es su **ligereza**, lo que en este caso juega en su contra, pues la frecuente exposición al viento puede producir vibraciones en el edificio que generen **disconformidad** para los ocupantes e incluso **inhabitabilidad** del mismo.

Para ello, los límites a estudiar con el fin de establecer los coeficientes pertinentes durante el diseño, son el **estado límite último** de agotamiento por solicitaciones, y el **estado límite de servicio** por deformación excesiva, aceleración excesiva (disconformidad del ocupante) e integridad de los materiales; ensayándose con un túnel de viento.

Una de las conclusiones de los estudios es de las variables más importantes en cuanto a la carga de viento se refiere, y estas son el **ángulo de incidencia** del viento, y por otra parte el **ratio de amortiguación** crítico del edificio. El riesgo aumenta para ambos tipos de límites si el ratio decrece.

De cualquier manera, lo que se considera es reducir el riesgo de que las últimas plantas resulten inservibles, por lo que se pueden emplear **sistemas de mitigación**, por ejemplo se comprobó que si el ratio de amortiguación varía de un 1'5% a un 5%, las probabilidades de fallo de la estructura se reducen alrededor de un 27%.

El CLT, por ser un elemento muráreo, trabaja bien en una dirección, pero debido a la prefabricación y limitación de tamaños, deberá tenerse en cuenta la **esbeltez** de la construcción.

Algunas de las soluciones más comunes es la de colocar **cruces de San Andrés** o **elementos diagonales** de Glulam, establecer un **núcleo rígido** de hormigón o **aumentar el peso** de los forjados.

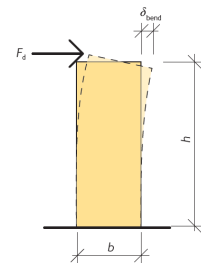


Imagen 3.1 Deformación de un panel por momento.
- The CLT handbook - CLT structures facts and planning, SwedishWood

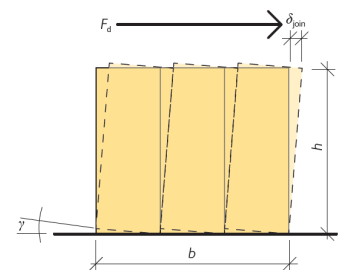


Imagen 3.2 Deformación de paneles por desplazamiento de juntas.
- The CLT handbook - CLT structures facts and planning, SwedishWood

3.2 Características limitantes: fuego

A pesar de lo que se pueda pensar de la madera como material, debido a su inflamabilidad a bajas temperaturas, la **madera carbonizada** tiene una capacidad aislante respecto de la madera natural de un orden de **6 veces**, lo que permite que el núcleo permanezca **intacto**. Al mismo tiempo, presenta **ventajas** respecto a otros materiales, pues el acero se deforma y altera a altas temperaturas, y el hormigón puede fracturarse con mayor acentuación cuando se riega con agua y se provoca un rápido enfriamiento.

Todo tipo de material está sujeto a un código UNE respecto a su comportamiento frente al fuego de la A a la F, de mejor a peor comportamiento, que representan a su vez un **índice de inflamabilidad y contribución** a la propagación del fuego. Puede ir acompañado de **subparámetros** en el caso de la **generación de humo** o de **partículas** que quedarán suspensas en el aire.

Durante los ensayos en laboratorio, se experimenta con tres aspectos distintos, cuyo valor se expresa en minutos, durante los cuales se mantienen ciertos requisitos: la **R**, indica la **capacidad portante** de un elemento sin pérdida de estabilidad frente al fuego, bajo acciones mecánicas definidas, la **E**, representa la **integridad de un elemento** separador, que no deja pasar gases o llamas a la otra cara o material adyacente, la **I**, representa el **aislamiento** de un elemento que está expuesto a fuego por un lado, manteniendo ciertas condiciones al otro.

Para ilustrar el comportamiento específico del CLT se emplearan los resultados de la NFPA de unos ensayos llevados a cabo en Canadá en 2018.

El ensayo, consistió en 6 tests a un habitáculo formado con CLT de incendios controlados con duración de **160 min**, realizando reparaciones en las partes especialmente dañadas del CLT.

Lo que sacamos en claro del gráfico de la derecha, siendo la línea verde la media de temperatura alcanzada y la rosa la media de las temperaturas del CLT de los distintos ensayos, es que este material **no actúa como combustible** hasta el min 60, momento en el que uno de los muros y el techo empezaron a participar en el fuego, siendo a partir del momento 130 min cuando el resto de muros participan también, aportando 7'5MW y 10 MW respectivamente.

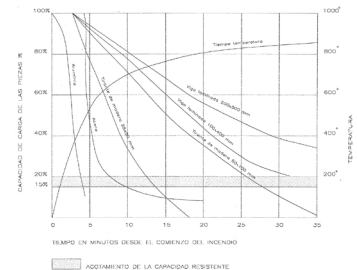


Imagen 3.3 Comparación a fuego con acero. - TFM El tablero contralaminado, Umberto Viotto

Clasificación según (clasificación propia)	COMBUSTIBILIDAD		Aplicación final		COMBUSTIBLE	CONTRIBUCIÓN AL FOC
	Resistencia	Integridad	Productos liberados por el elemento	Índice de humo		
A1	AL	AL	NO	NO	NO	100 (máxim)
A2	AL	AL	NO	NO	NO	100 (máxim) - Se controla la fuga (D)
B	AL	E	SI	SI	SI	100 (máxim) - No liberado
C	CL	C	SI	SI	SI	Limitado
D	DL	D	SI	SI	SI	100 (máxim)
E	EL	E	SI	SI	SI	100 (máxim)
F	FL	F	SI	SI	SI	100 (máxim) - Observaciones

Clasificación adicional según:	OPACIDAD DE FUMOS		Escala	Observaciones
	Quantum	velocidad d'emissió		
	Medio	Alta	s3	Las clases A2, A2,1, A2,2, E, EL, E, EL, F, F,1, F,2 no se clasifican para aquest categoria.
	Baja	Baja	s1	

CAÍDA DE GOTES O DE PARTÍCULAS INFLAMABLES	Sens caiguda (EN 1363:2002) en 600s		Escala	Observaciones
	SI	NO		
	SI	NO	s2	Las clases A2, A2,1, A2,2, E, EL, E, EL, F, F,1, F,2 no se clasifican para aquest categoria.
	SI	SI	s3	

Imagen 3.4 Simbología contribución al fuego. - TFM El tablero contralaminado, Umberto Viotto

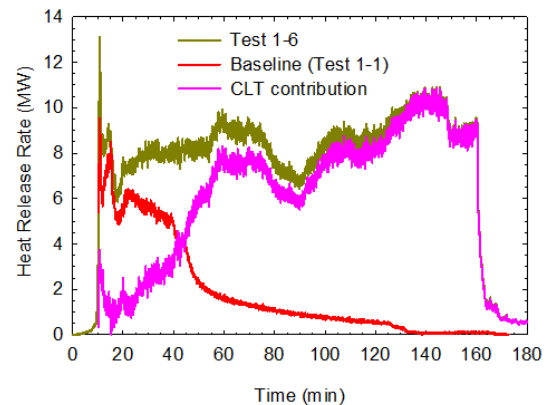
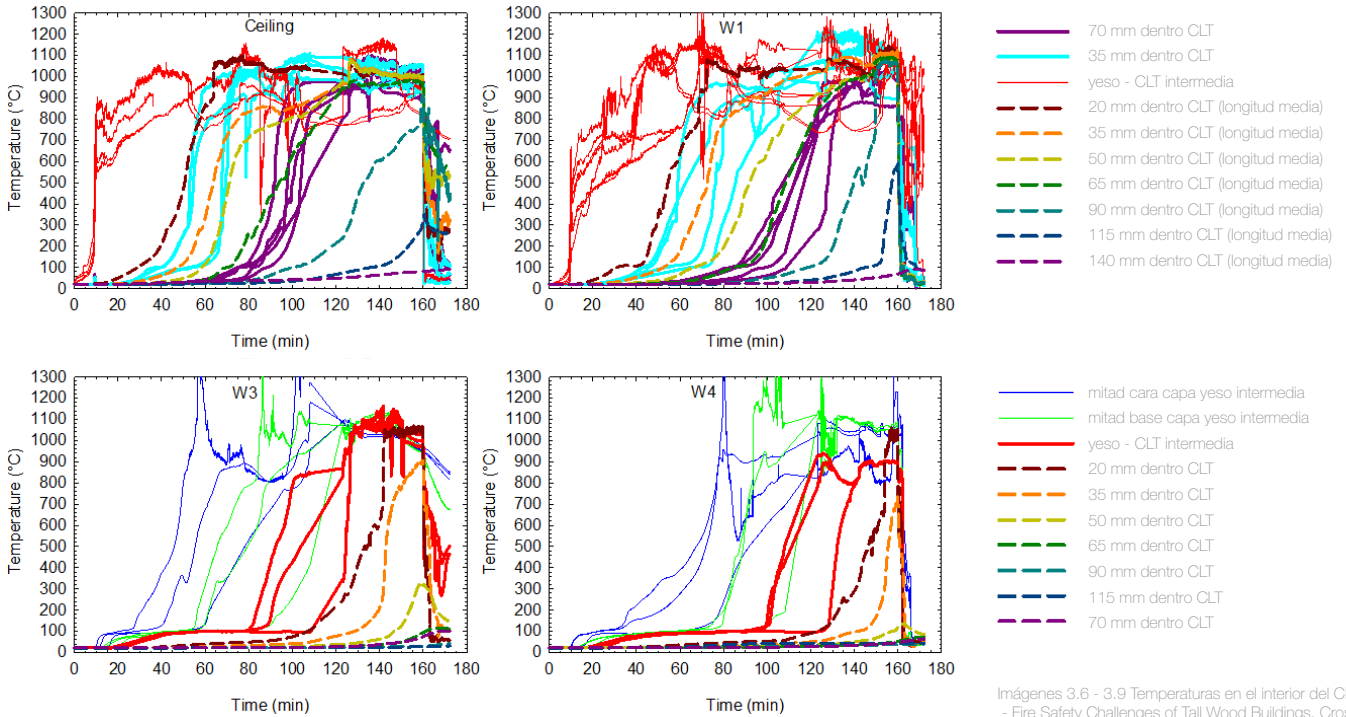


Imagen 3.5 Media de temperaturas en los 6 tests. - Fire Safety Challenges of Tall Wood Buildings. Cross Laminated Timber Compartment Fire Tests.

3.2 Características limitantes: fuego



Imágenes 3.6 - 3.9 Temperaturas en el interior del CLT. - Fire Safety Challenges of Tall Wood Buildings. Cross Laminated Timber Compartment Fire Tests.

En las imágenes podemos ver la evolución de las temperaturas en diferentes profundidades de los paneles que conforman el techo (*Ceiling*) y tres muros (W1, W3 y W4); tanto el techo como el muro W1 estaban en llamas antes de la combustión súbita generalizada, efecto que se produce en espacios confinados, en el cual los elementos que no estaban en llamas se incendian de manera súbita.

Además, son bastante reconocibles las **tres fases del incendio**, la fase inicial, la combustión libre y la latente, estando más retardado en W2 y W3 por generarse el incendio en la parte opuesta del habitáculo.

Con las diferentes medidas tomadas se observa, como ha sido mencionado con anterioridad, que la **carbonización** de la madera protege el interior de la pieza.



Imágenes 3.10 - 3.13 Fotos tomadas después del ensayo. - Fire Safety Challenges of Tall Wood Buildings. Cross Laminated Timber Compartment Fire Tests.

3.3 Edificios con estructura de madera mixta

- Treet

Este edificio de apartamentos de lujo, fue nombrado en 2015 como el proyecto de entramado de madera más alto del mundo, con 49 m de altura.

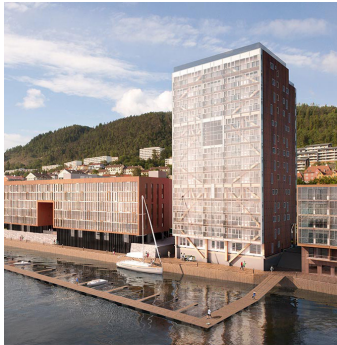


Imagen 3.14 Vista exterior del edificio.
- <https://www.forestmaderero.com/articulos/item/treet.html>

Arquitectos BOB
Área 5.600 m²
Año 2015
Ubicación Bergen, Noruega

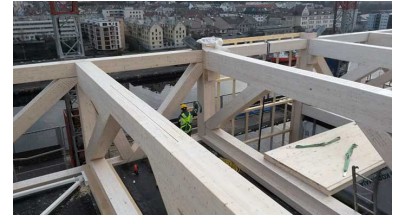


Imagen 3.17 Cerchas colocadas en obra. (arriba)
- <https://www.forestmaderero.com/articulos/item/treet.html>

Imagen 3.18 Cerchas fabricadas en taller. (izquierda)
- <https://www.forestmaderero.com/articulos/item/treet.html>



Imagen 3.15 Modelo 3D de la estructura.
- Wind-Induced motions of "Treet",

El proyecto, se cimenta sobre una **base de hormigón pilotada**, en la cual se apoyan los elementos de madera, que podemos dividir en dos grupos, la estructura exterior de **Glulam** y los núcleos de comunicación de **CLT**; por otra parte, los apartamentos están formados por **módulos autoportantes** que se prefabricaron y luego colocaron en la obra.

En el módulo 3D se puede observar como cada 4 forjados, menos en el caso de cubierta pues se hace antes, se coloca un **forjado de hormigón** que permitirá **aumentar el peso** del edificio y con ello la resistencia al viento.

En unos tests de viento se comprobó que el trabajo frente al viento era mejor sin conexiones adicionales, únicamente los módulos con la losa, pues, de esta manera, estos trabajan como un sólido rígido que sigue al forjado.

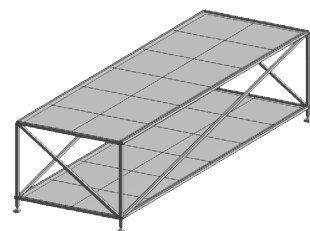


Imagen 3.16 Modelo 3D del módulo.
- Wind-Induced motions of "Treet",

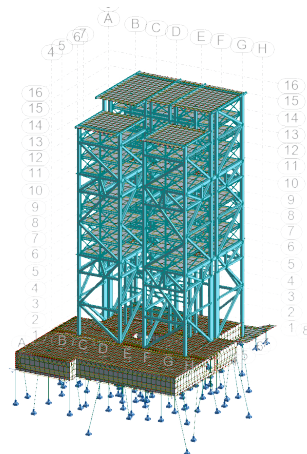


Imagen 3.19 Modelo 3D para comprobación a viento.
- Wind-Induced motions of "Treet",

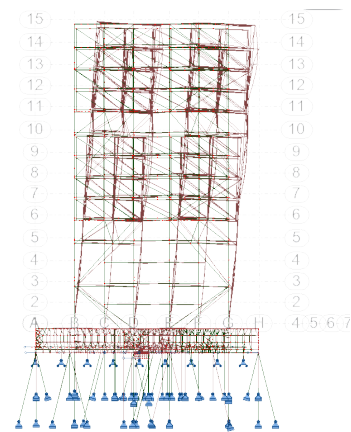
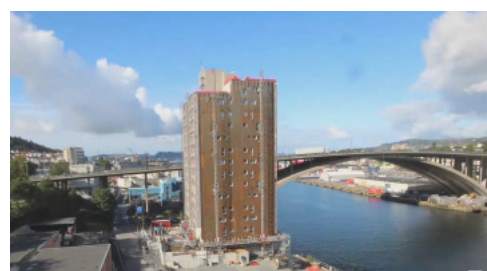
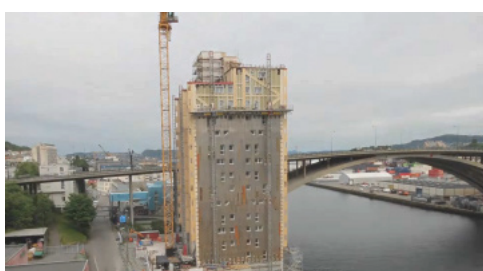
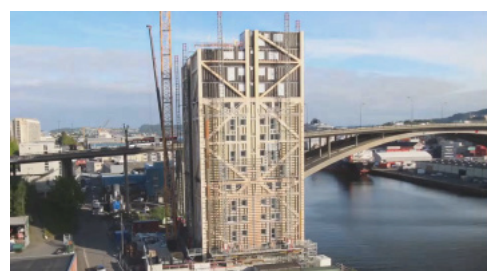
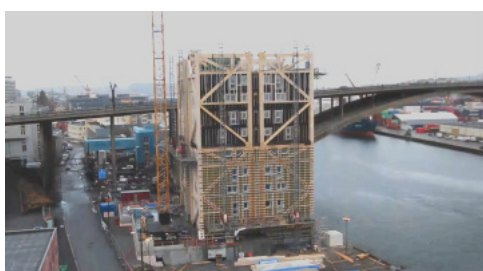
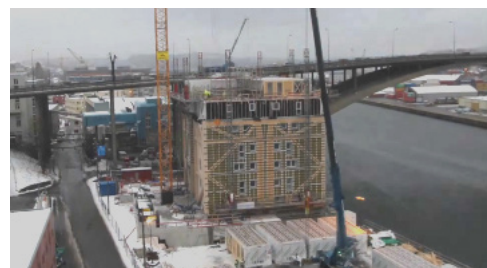


Imagen 3.20 Influencia del viento, visto en alzado.
- Wind-Induced motions of "Treet",

3.3 Edificios con estructura de madera mixta

- Treet

Proceso constructivo



Imágenes 3.21 - 3.30 Time lapse – The World's tallest Timber Building – 14 Storeys in Bergen HD.
- <https://www.youtube.com/watch?v=3j0U36x3D4>

3.3 Edificios con estructura de madera mixta

- Mjøstårnet



Imagen 3.31 Vista del edificio desde el lago.
- http://vollark.no/portfolio_page/mjostarnet/

Arquitectos Voll Arkitekter
 Área 11.300 m²
 Año 2019
 Ubicación Brumunddal, Noruega

El edificio se encuentra ubicado al lado del lago del cual recibe el nombre, y con una gran variedad de usos, entre los que se encuentra oficinas, habitaciones de hotel y apartamentos, alcanza los 18 pisos de altura, con una altura oficial de 85'4 m, lo que le hizo ser reconocido como el edificio de madera más alto del mundo.

El CLT se empleó para crear los núcleos verticales, de manera que actúa de una forma más secundaria siendo la estructura principal de Glulam.



Imagen 3.33 Montaje in situ de la estructura.
- <https://maderayconstruccion.com/torre-mjostarnet-noruega-arquitecturademadera/>



Imagen 3.34 Vigas con placas de anclaje predispuestas.
- <https://maderayconstruccion.com/torre-mjostarnet-noruega-arquitecturademadera/>

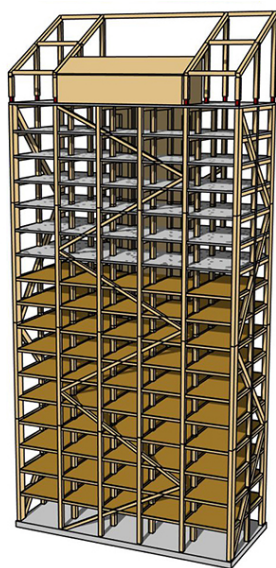


Imagen 3.32 Modelo de la estructura en 3D.
- <https://maderayconstruccion.com/torre-mjostarnet-noruega-arquitecturademadera/>

Mientras que los primeros forjados también fueron realizados con madera laminada, los últimos se construyeron en hormigón para que aumentara el peso del edificio y resistiera mejor los empujes del viento.

En cuanto a la resistencia al fuego, los elementos de madera son R90, a los que además se les aplicaron una resina retardante. Mientras que para las fachadas se eligió un producto de pino con especial protección al fuego.

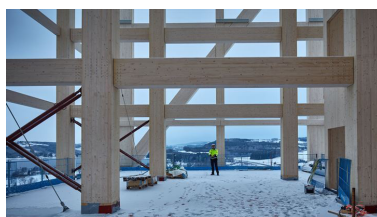


Imagen 3.35 Vista de la planta baja durante la construcción.
- <https://www.moelven.com/mjostarnet/>

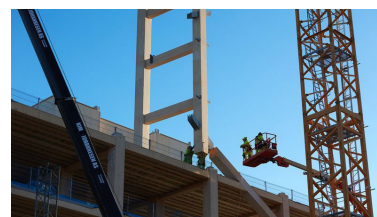
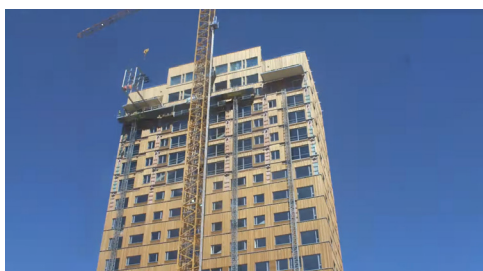
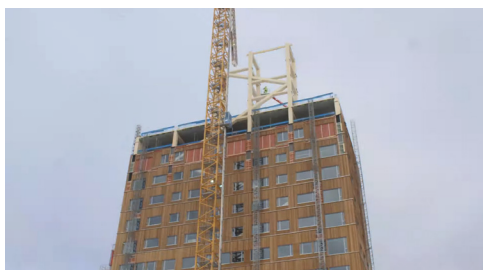


Imagen 3.36 Elevación de una cercha vertical con grúa.
- <https://www.moelven.com/mjostarnet/>

3.3 Edificios con estructura de madera mixta

- Mjøstårnet

Proceso constructivo



Imágenes 3.37 - 3.46 Mjøstårnet.
- https://www.youtube.com/watch?v=UacGO0a_BBA

3.4 Edificios con estructura únicamente de CLT

- Toronto Tree Tower

Este proyecto no construido, fue planteado para ser construido únicamente con **módulos formados por paneles de CLT** y elementos auxiliares de hormigón y acero. Estos módulos estarían anclados alrededor del núcleo vertical, que se encuentra en el centro del edificio.

Se plantearon 19 plantas, de manera que alcanzaría fácilmente los 62 m de altura, mezclando zonas privadas de **apartamento** con espacios abiertos de relación.

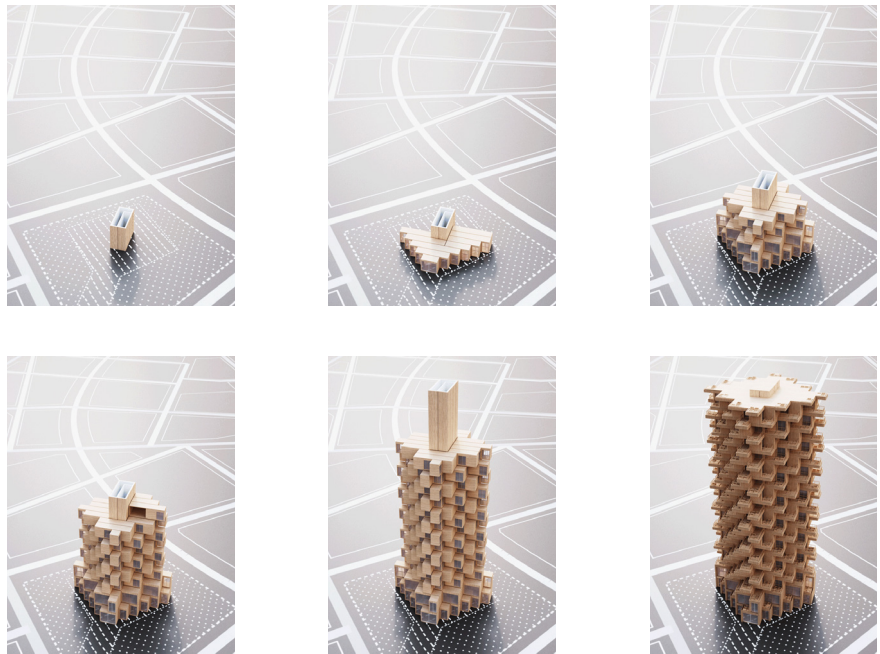


Imagen 3.47 Render exterior del proyecto.
- http://vollark.no/portfolio_page/mjostamet/

Arquitectos	Penda
Área	10.800 m ²
Año	-
Ubicación	Toronto, Canada



Imagen 3.48 Render exterior del proyecto.
- <https://www.inexhibit.com/case-studies/cit-goes-tall-high-rise-buildings-in-cross-laminated-timber/>



Imágenes 3.49 - 3.54 Orientación más común de las vetas.
- <https://www.precht.at/toronto-tree-tower/>

3.4 Edificios con estructura únicamente de CLT

- Forté Building

El primer edificio de CLT de Australia, lo que supuso un aumento en la demanda de este material en el país.

El suministrador del CLT fue la empresa antes mencionada KLH, y la estructura fue construida sobre una base de hormigón pilotada.

Todo el proceso de diseño se realizó en AutoCad de manera que luego se sacaron en archivos CAD/CAM.

Se propusieron una serie de objetivos al mismo tiempo que se compararon las soluciones de proyecto con dos sistemas distintos, con hormigón y con CLT, de hecho se calculó en su momento la emisión negativa de carbono, de 1.451 toneladas, comparable a eliminar 345 coches de las carreteras.

En lo que respecta a la resistencia al fuego, para los muros se eligieron específicamente dos tipos, de 128 y 158 mm, para que fueran R90, mientras que los forjados de 146 mm son de R120.



Imagen 3.55 Vista exterior de le Forté.
- <https://www.klh.at/es/referencias/forte-tower-melbourne/>

Arquitectos Lend Lease
 Área 110.000m²
 Año 2013
 Ubicación Melbourne, Australia

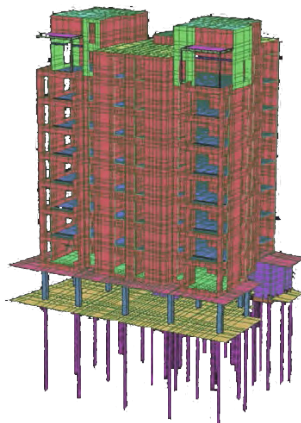


Imagen 3.56 Modelo 3D de Autocad.
- Forté – Building, australias first timber Highrise, Lend Lease and WoodWorks

Tabla 3.1 Comparación entre sistemas constructivos para la solución del Forté.

Elemento	Hormig'on	CLT
Pilares PB - secci'on	600 x 600 mm	450 x 450 mm
Forjado en P1 - canto	700 mm	400 mm
Muros estructurales	300 + 13 mm	2x123 + 13 mm
Forjado cubierta	250 mm	128 o 158 mm

En la comparación, se aprecia que la ligereza del CLT juega a su favor por requerir menos esfuerzo autoportante, mientras que el hormigón tanto por las limitaciones de normativa, como por la necesidad de aguantar su propio peso, requiere de elementos más voluminosos que quita espacio de uso e implica un mayor coste económico.

Imágenes 3.57 - 3.59

de izquierda a derecha:

- Montaje en obra de una escuadra longitudinal.
- Montaje en obra de escuadras puntuales.
- Colocación con grua de un módulo de baño.
- Forté – Building, australias first timber Highrise, Lend Lease and WoodWorks



3.4 Edificios con estructura únicamente de CLT

- Forté Building

Proceso constructivo



Imágenes 3.60 - 3.69 Forté Building.
- Forté – Building, australias first timber Highrise, Lend Lease and WoodWorks

4. Análisis de proyecto relevante. Caso de estudio

Por último, cabe hacer un análisis más profundo de un edificio que haya marcado un antes y un después en la construcción con CLT en edificios en altura, para de esta manera materializar todos los apartados teóricos comentados en el resto del trabajo de manera más práctica.

4.1 Introducción del edificio en cuestión

El proyecto escogido para analizar como culmen del CLT es el **Dalston Works**, de la firma de arquitectos **Waugh Thistleton**, ubicado en Londres, más concretamente en el distrito de Hackney, y que fue construido en 2017, y siendo el suministrador de CLT la empresa **Binderholz**.

Este edificio es destacable por varios motivos, el primero es por ser el más grande cuya **estructura está únicamente construida en madera**, en segundo lugar por estar destinado a **viviendas de alta densidad**, y por último por los objetivos planteados y conseguidos por el arquitecto, que reconoció, que **“el edificio demuestra el futuro de la construcción baja en carbono”**.

El promotor del proyecto fue **Regal Homes**, para el diseño de la estructura participaron **Ramboll**, y **B&K structures** para los cálculos.

Cuenta con **121 apartamentos**, un restaurante y un espacio polivalente, que en total suman 11.591 m². La altura del edificio varía entre 5 y 10 plantas, llega a su punto más álgido con 33'8m de altura.

La emisión de CO₂ durante la construcción fue de 976 toneladas, mientras que el carbono secuestrado fue de 3.576, de manera que la **emisión negativa** de CO₂ sería de **2.600 toneladas**, que supone una mejora considerable suponiendo que la huella de carbono equivalente si se hubiera construido en hormigón sería de 2.000 toneladas.



Imagen 4.1 Vista exterior del edificio.
- <https://waughthistleton.com/dalston-works/>

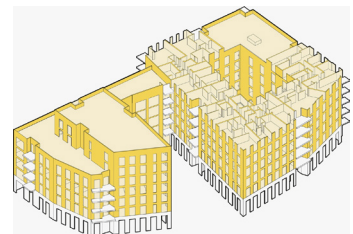


Imagen 4.2 Axonometría del edificio, CLT en amarillo.
- <https://waughthistleton.com/dalston-works/>



Imagen 4.3 Alzado Norte. Escala 1:750
- <https://www.architectsjournal.co.uk/buildings/high-density-low-carbon-dalston-works-by-waugh-thistleton>

4.1 Introducción del edificio en cuestión



Imagen 4.4 Planta Baja. Escala 1:750
- <https://www.architectsjournal.co.uk/buildings/high-density-low-carbon-dalston-works-by-waugh-thistleton>



Imagen 4.5 Planta tipo. Escala 1:750
- <https://www.architectsjournal.co.uk/buildings/high-density-low-carbon-dalston-works-by-waugh-thistleton>

4.2 Materia prima, encolado y prensado

La madera que se ha usado para este proyecto es en su mayoría de **pino cembro**, una cuantía de **4.500 m³** únicamente para la estructura, y si le sumamos el resto de madera empleada, el total equivale a **2.325 árboles**, cuya cuantía de madera puede ser reemplazada en tres horas en los bosques de Alemania y Austria. Por **cada usuario** del edificio, se han empleado algo menos de **3 árboles**.

Lo característico de este proyecto es que el **CLT** se ha empleado en **todos los elementos**: muros estructurales, particiones, escaleras, forjados y núcleo de comunicaciones; las únicas excepciones son la planta baja y la cimentación que se realizaron de **hormigón**, de manera que sirven de **base para el resto de la estructura**, al mismo tiempo que la **aísla de la humedad** proveniente del terreno, como se ha comentado en apartados anteriores.

El **recubrimiento** de los cerramientos exteriores es de tres tipos distintos de **ladrillo**, decisión proyectual argumentada por los arquitectos según las siguientes cuestiones, la primera por la **normalización de la madera como material estructural**, de manera que se recubre como si de una estructura convencional se tratase, y en segundo lugar por la ubicación del proyecto, para que la construcción siga el **estilo del barrio**, que es victoriano y eduardiano.

En lo que respecta a otros sistemas, los arquitectos realizaron estudios y cálculos al respecto, para poder comparar la solución en madera y en hormigón, y una de las principales **ventajas** de la construcción en madera fue que **el peso del edificio era 5 veces menor**, algo relevante pues permitió realizar más pisos de los que se tenían previstos como viables, pues uno de los limitantes claves en este proyecto es la línea ferroviaria que discurre por debajo del solar.

Los **paneles estructurales** tienen un espesor de **140 a 200 mm** para los **forjados**, y de **100 a 160 mm** para los **muros**, todos ellos de **5 estratos**, y en algunos casos **forjados de 260 mm**, de **7 estratos**.

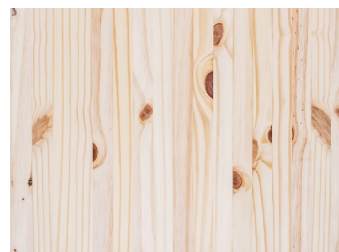


Imagen 4.6 Madera de Pino Cembro (Pinus Cembra).
- <https://www.demadera.info/wp-content/uploads/MADERA-DE-PINO>



Imagen 4.8 Construcción de cimentación y PB en hormigón.
- <https://www.theb1m.com/video/dalston-lane-the-worlds-largest-timber-building>



Imagen 4.9 Vista de los ladrillos de fachada.
- <https://waughthistleton.com/dalston-works/>

4.2 Materia prima, encolado y prensado

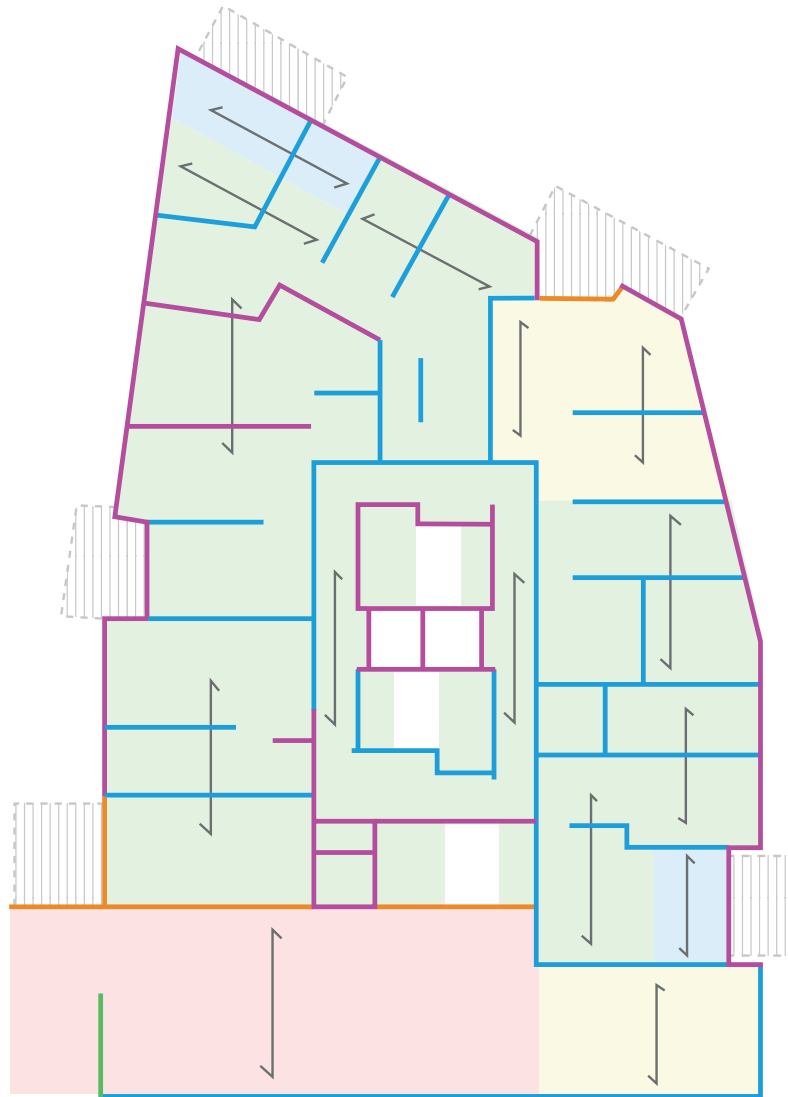


Imagen 4.10 Planta tipo del bloque este. Escala 1:200
 - <http://baumad.com/2017/11/14/dalston-works-londres/>

muros	forjados
— 100 - 55 - XLDQ - FC	■ 140 - 55 - XLDL - FC
— 120 - 55 - XLDQ - FC	■ 160 - 55 - XLDL - FC
— 140 - 55 - XLDQ - FC	■ 180 - 55 - XLDL - FC
— 160 - 55 - XLDQ - FC	■ 200 - 55 - XLDL - FC

4.3 Diseño e ingeniería

Por los tamaños de los huecos y las fotos tomadas en obra, entendemos cuales fueron las decisiones proyectuales a la hora de plantear la colocación de los paneles, cuyas medidas más usadas fueron de 2'2 x 13'5 m.

De los casos estudiados en apartados anteriores, vemos que los huecos no son demasiado grandes y por lo tanto, como podemos comprobar en las imágenes, todas las **vetas de los muros se colocaron de manera vertical**, mientras que la colocación de los paneles fue en horizontal, algo que vendría condicionado por la altura del edificio.

La conexión muro-forjado-muro, se realizó también siguiendo la de casos estándares, donde el forjado se apoya, y sobre este se coloca el siguiente panel, aunque preocupados por el aumento de peso del cerramiento de ladrillo, que podría llegar aplastar el forjado de CLT, los arquitectos trabajaron con la suministradora Binderholz para crear unas **cavidades** que se rellenarían **con lechada estructural para evitar estos aplastamientos**, y que ayudan a transmitir las cargas.

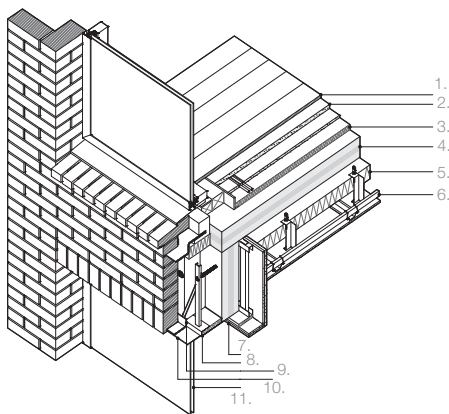
Por otra parte, se propuso el objetivo de hacer los forjados lo más finos posibles, por lo que **las luces se limitaron a 4/5 metros**, y con la intención de optimizar el sistema estructural, todos los paneles estructurales forman un muro continuo de planta baja a cubierta



Imagen 4.11 Vista interior durante la construcción.
- <https://www.architectsjournal.co.uk/buildings/high-density-low-carbon-dalston-works-by-waugh-thistleton>



Imagen 4.12 Vista exterior del edificio.
- <https://www.tree-hugger8.net/dalston-lane-worlds-largest-cross-laminated-timber-building-4855950>



1. Pavimento de madera con revestimiento de metal
2. Sistema de calefacción por suelo radiante
3. Aislamiento acústico por impacto
4. Panel de CLT de 100 mm
5. Aislamiento de lana de roca de 50 mm
6. Placa de yeso de 12-5 mm
7. Doble capa de cartón-yeso
8. Cierre de la cavidad ignífuga
9. Ángulo de soporte de la mampostería
10. Tapajuntas de aluminio PPC prensado
11. Ventana

Imagen 4.13 Detalle en axonometría del encuentro forjado-muro.
- <https://architecturetoday.co.uk/wp-content/uploads/Waugh-Thistleton-Dalston-Works-drawings-AT.pdf>

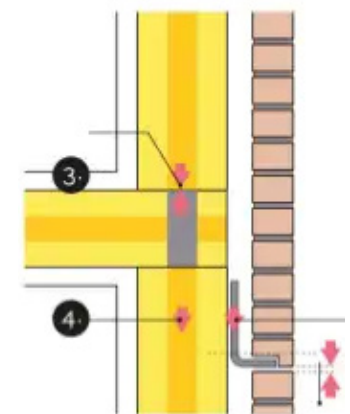
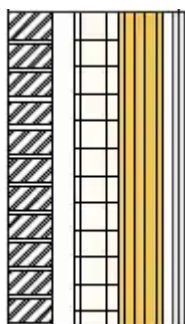


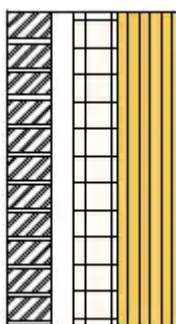
Imagen 4.14 Detalle de cavidad para lechada.
- <https://www.slideshare.net/paulius.micius/statyb-revolucijos-link-kodl-rinktis-ininerin-medien-dalston-lane-ir-100-projekt-clt-jungtinije-karalystje>

4.3 Diseño e ingeniería

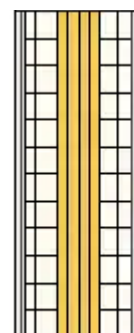
- Detalles constructivos



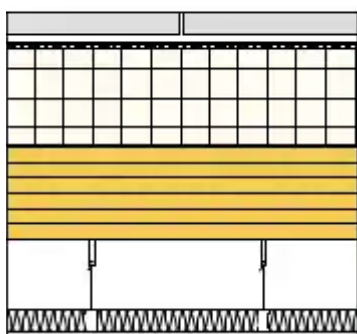
Cerramiento exterior estandar



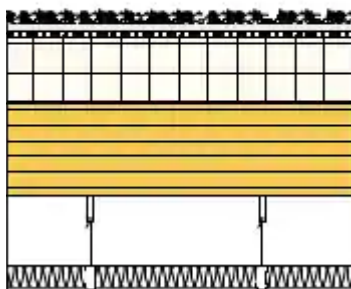
Cerramiento exterior con CLT expuesto



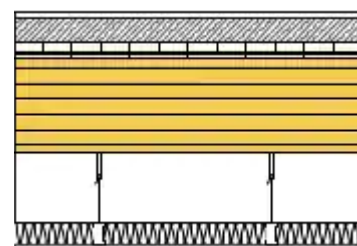
Partición



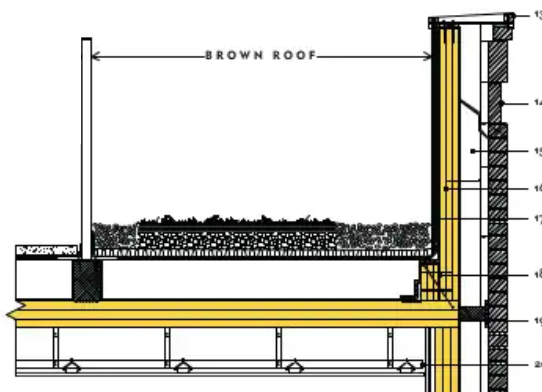
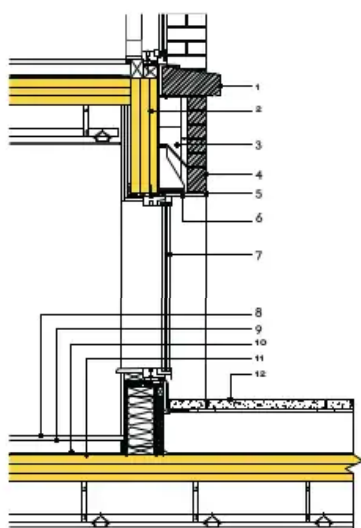
Forjado en terraza



Forjado "marrón"



Forjado de partición



Imágenes 4.15 - 4.21

- <https://www.slideshare.net/paulius.milcius/statyb-revolucijos-link-kodl-rinktis-ininerin-medien-dalston-lane-ir-100-projekt-clt-jungtinje-karalyste>

4.4 Corte y mecanizado

En el proceso de mecanizado se prepararon las **ventanas**, las **barreras de vapor y fuego**, y los **huecos para las instalaciones**.

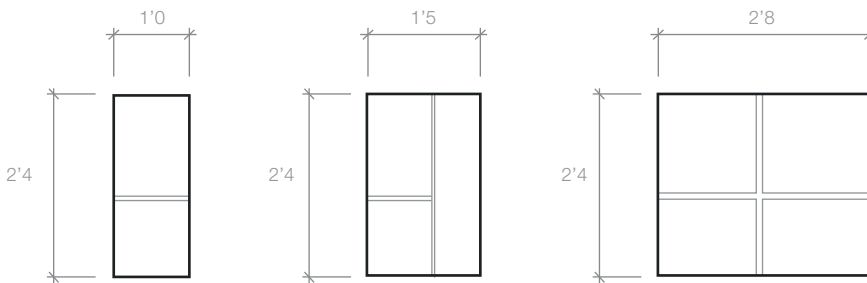
Para las ventanas, en lugar de crear un único hueco, como la madera es fácilmente modificable, se decidió hacer tres huecos de manera que quedaran dos elementos horizontales que harían de barandilla durante la construcción, y luego serían retirados por los operarios con sierras de mano.

Además, fueron requeridos ciertos mecanizados, tanto en la base como en la parte alta de algunos muros, para poder colocar los anclajes necesarios.

Por petición del promotor, los huecos en forjado para **paso de fontanería** serían de **8 pulgadas (20 cm)**, para tener en cuenta cualquier desalineación, pero al ir todas ellas en línea recta, luego supuso que se debían rellenar todos esos huecos que habían quedado.

Por otra parte, los huecos en fachada son los siguientes:

Ventanas



Puertas

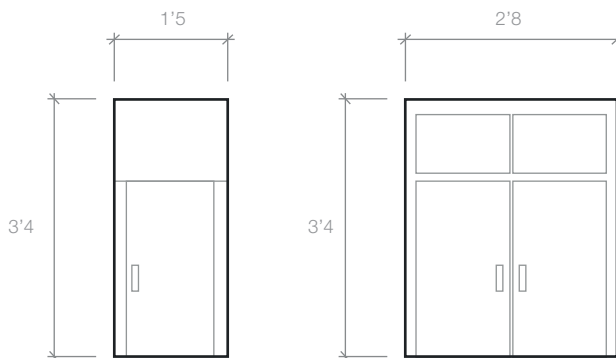


Imagen 4.22 Huecos de ventana con barandilla. - <https://waughthistleton.com/dalston-works/>



Imagen 4.23 Panel de planta primera con mecanizado para anclajes. - <https://www.binderholz.com/en-us/mass-timber-solutions/dalston-lane-london-great-britain/>



Imagen 4.24 Panel montado en taller. - https://www.architectmagazine.com/technology/detail/dalston-works-the-largest-clt-building-in-the-world_o



Imagen 4.25 Panel en taller. - https://www.architectmagazine.com/technology/detail/dalston-works-the-largest-clt-building-in-the-world_o

Imágenes 4.26 - 4.30 Huecos de ventanas y puertas. - Elaboración propia

4.5 Puesta en obra

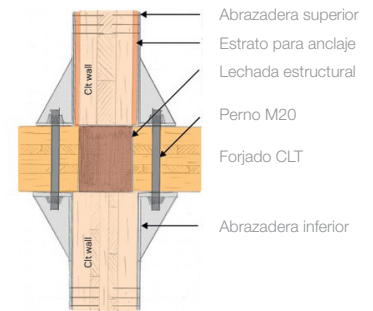
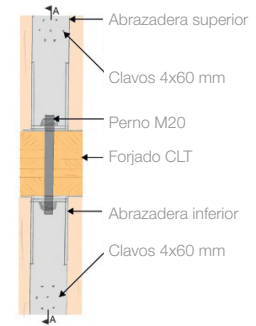
El número de envíos necesarios hasta la obra fue de 111, lo cual también supone una **significativa mejora**, pues si se hubiera realizado con hormigón, se hubieran necesitado alrededor de **700 camiones hormigonera**.

Para la **manipulación**, se montaron **dos grúas** con la altura suficiente como para poder manipular los paneles en cualquier altura. Para poder elevar los paneles, como vimos en apartados anteriores, se hizo uso de **lazadas** que se engancharon a cavidades de los paneles.

El **revestimiento interior** se hizo de **cartón-yeso**, que además proporciona resistencia al fuego de alrededor de 49 min. , por lo que se asumió unos grosores de panel de manera que la resistencia al fuego llegara a **R120**.

Para **lidar con los empujes** verticales, pero sobre todo con los **horizontales** provocados por el viento, la empresa **Ramboll**, encargada del cálculo estructural, diseñó unos **conectores especiales** que se colocaron en los **muros críticos**.

La pieza en cuestión consta de cuatro angulares que aumenta la rigidez de la conexión entre paneles verticales, al mismo tiempo que **evita que los forjados sean aplastados**. Se conectan verticalmente mediante **pernos**, de manera que cuando se somete a un **esfuerzo horizontal**, un perno se comprime mientras que el opuesto se estira, y de ahí pasa al otro angular, lo cual **evita que se tire hacia arriba del panel del forjado**; en estas zonas también se coloca lechada como se ha comentado anteriormente.



Imágenes 4.31 y 4.32 Alzado y perfil del anclaje especial.
 - <http://baumad.com/2017/11/14/dalston-works-londres/>



Imagen 4.33 Elevación de panel con grúa.
 - <https://www.binderholz.com/en-us/mass-timber-solutions/dalston-lane-london-great-britain/>

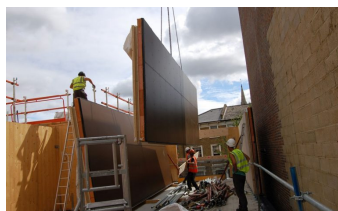


Imagen 4.34 Acercamiento del panel a su lugar.
 - <http://baumad.com/2017/11/14/dalston-works-londres/>

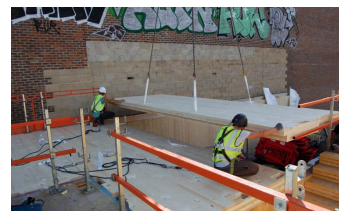
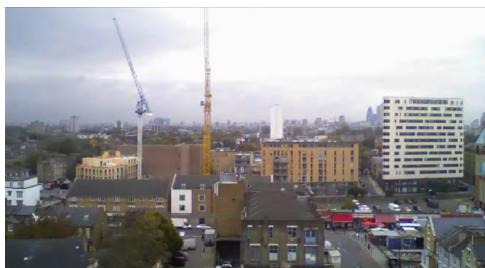


Imagen 4.35 Colocación del panel por los operarios.
 - <http://baumad.com/2017/11/14/dalston-works-londres/>

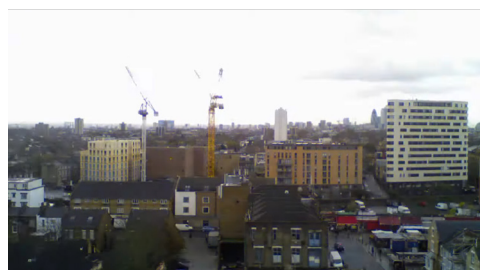
4.5 Puesta en obra



En julio de 2015 se empezó con la planta primera del bloque este, y para la planta segunda y tercera se empleó una grúa pequeña, que poco más tarde se desmontaría.



Hasta octubre se avanzó poco en la construcción porque se montaron dos grúas más grandes que se usarían durante todo el resto del proceso.

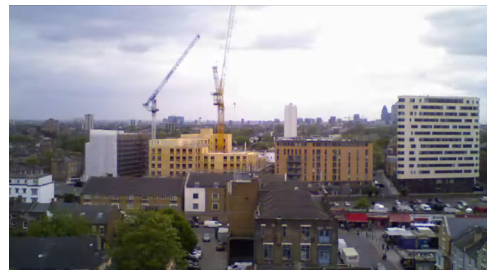
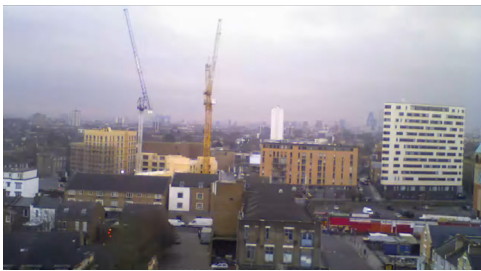


De mitades a finales de noviembre de ese mismo año se llevaron a cabo todas las demás plantas del bloque mientras se realizaba al mismo tiempo la cimentación y la planta baja del bloque intermedio y este.

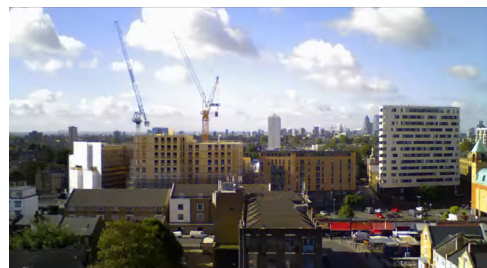
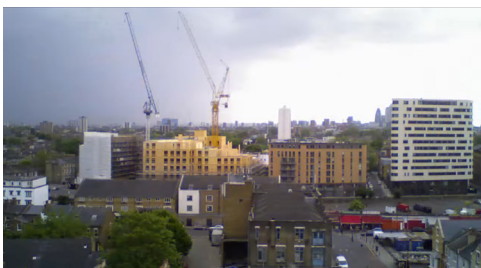
4.5 Puesta en obra



A primeros de febrero se empezaron las primeras plantas de los bloques restantes, al mismo tiempo que se colocaron los andamios en la parte del edificio donde la estructura ya estaba terminada.



La parte por construir es la más grande del edificio, por lo que también la que llevó más tiempo. En la parte andamiada, se comenzaron los trabajos de colocación de los ladrillos.



A finales de Junio de 2016 se acabó toda la estructura de CLT y se procedió a colocar andamios en donde aún no se habían colocado. Hace poco menos de un año que comenzó la obra.

Imagen 4.42 - 4.47 Imágenes del transcurso de la construcción.
 - <https://www.youtube.com/watch?v=HWhAZh-JeKw>

4.5 Puesta en obra



A principios de Agosto, el bloque este estaba prácticamente acabado mientras que comenzaban los trabajos para colocar los ladrillos en toda la parte restante.



A primeros de año de 2018 es cuando se empezaron a quitar los andamios restantes y se desmontó una de las grúas por no ser necesaria.



Con la grúa restante se llevaron a cabo trabajos de cubierta hasta finales de Febrero de 2018, cuando el edificio se terminó definitivamente.

5. Conclusión

A lo largo del trabajo se ha comentado las numerosas ventajas que posee el CLT, en primer lugar como **sistema ecológico** al ser un derivado de la madera, en segundo lugar en comparativa con sistemas más convencionales como el acero y el hormigón armado, y por último por ser un **sistema prefabricado**.

Por como se fabrica el CLT y de donde se obtiene la materia prima, este es un sistema **100 % reciclable** que conlleva que sea **completamente renovable**, y por lo cual a medio plazo es más ecológico respecto al resto. También la manera en la que se construye con el CLT es mucho más respetuosa con el medio ambiente en comparación con otros sistemas, ya sea por los desechos generados, la infraestructura o los recursos necesarios para su puesta en obra.

Actualmente, la principal desventaja de este nuevo sistema, a parte de la falta de ejemplos y prontuarios, es la **falta de tecnología**, porque se encuentra en un **proceso de maduración**, lo que hace que sea un modo de construir relativamente caro, los precios bajarán hasta un nivel en el que se convierta en un material **viable para cualquier tipo de proyecto**, debido a todas sus cualidades, y pasando al primer plano en lo que se refiere a sistema estructural.

6. Anexo

6.1 ODS

Principales



El CLT es un material todavía en desarrollo e investigación, sobre todo en lo que respecta al uso estructural en edificios de grandes alturas, pero ya se pueden observar ciertas ventajas ligadas a los objetivos de desarrollo sostenible como la **retención de CO₂**, que supone un gran avance para el ejercicio de la arquitectura; por otro lado, la **rápidez** con la que se trabaja, la **disminución de desperdicios** generados y la poca mano de obra necesaria para manejarla, solo hace que ayudar desarrollar ciudades sostenibles al mismo tiempo que se generan puesto de trabajos en otros campos como pueden ser los bosques de plantaciones controladas.

Secundarios



Lo comentado en el párrafo anterior no hará más que conllevar a cumplir otros objetivos de manera indirecta, pues el uso de estos bosques **impedirá la deforestación** de otras zonas y por lo tanto la conservación de la fauna. La creación de **nuevos empleos** enfocados en nuevas técnicas y materiales dará lugar a que las mujeres puedan optar a trabajar en el campo de la construcción, que siempre ha sido considerado de hombres. Por último y no menos importante, las características aislantes de la madera, y su carácter **ecológico** y **reciclable** ayudan a que las edificaciones requieran menos consumo de energía durante su uso, y sean menos contaminantes cuando deje de ser útil.

7. Bibliografía y recursos digitales

7.1 Documentos

[1] María Mateo Carmona. La Arquitectura de la Madera en la Cultura Oriental. Valencia, 2019.

[2] Construcción Prefabricada: Viviendas para la reconstrucción de la ciudad de L'Aquila.

[3] J. Enrique Peraza. La evolución de la Tecnología en la Carpintería.

[4] Hermann Kaufmann, Stefan Krötsch y Stefan Winter. Manual of Multi-Storey Timber Construction. 2018.

[5] Umberto Viotto. El tablero contralaminado. Barcelona, 2013.

[6] Ángel Andrés Fernández. Edificación en altrua con CLT: Soluciones constructivas. Madrid, 2020.

[7] Swedish Wood. The CLT Handbook. Stockholm, 2019.

[8] EGOIN. Prontuario Técnico para la Construcción con Paneles de Madera Contralaminados EGO CLT. Martxo, 2016.

[9] Simpson Strong-Tie. Conexiones y fijaciones para uniones CLT. Sainte-Gemme-La-Plaine.

[10] JZhao, X.: Kilpatrick, T. y Sanderson, I. Numerical Analysis on Global Serviceability Behaviours of Tall CLT Buildings to the Eurocodes and UK National Annexes. Glasgow, 2021.

[11] WoodWorks. Forté-Building, Australia's First Timber Highrise. 2013.

[12] Matiyas Bezabeh, Girma Bitsuamlak, and Solomon Tesfamariam. Risk-Based Wind Design of Tall Mass-Timber Buildings. Fredericton, Canada, 2013.

[13] Joseph Su, Pier-Simon Lafrance, Matthew Hoehler and Matthew Bundy. Fire Safety Challenges of Tall Wood Buildings – Phase 2: Task 2 & 3 – Cross Laminated Timber Compartment Fire Tests. Canada, 2018.

7.1 Webs

- [1] Anne Kohtz. La magia de la carpintería tradicional japonesa.
<https://www.nippon.com/es/views/b02342/>
- [2] Douglas Brooks. Construcción de barcos de madera en Japón: Historia and Tradiciones.
<https://www.asianstudies.org/publications/ea/archives/japanese-wooden-boatbuilding-history-and-traditions/>
- [3] ¿Qué hace especial la construcción nórdica?
<http://prurjc.blogspot.com/2014/05/que-hace-especial-la-construccion.html>
- [4] José Francisco Ferrando. Puentes de madera, uso y evolución hasta nuestros días.
<https://incofusta.com/puentes-de-madera-uso-y-evolucion-hasta-nuestros-dias/>
- [5] Audrey Migliani. ¿Qué es la madera laminada encolada o GLulam?.
<https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/928179/que-es-la-madera-laminada-encolada-mle-o-glulam>
- [6] Eric Baldwin. 9 proyectos de Glulam que trascienden la tradición.
<https://architizer.com/blog/inspiration/collections/glued-laminated-timber/>
- [7] ThinkWood. Viva el clavo, ¿Qué es el NLT?.
<https://www.thinkwood.com/mass-timber/nlt>
- [8] StructureCraft. Grandes posibilidades con el DLT.
<https://structurecraft.com/materials/mass-timber/dlt-dowel-laminated-timber>
- [9] Crosslam. Trayendo la madera de WA a todas las partes del mundo.
<http://www.crosslamaustralia.com.au/>
- [10] GreenSpec. CLT, proceso de fabricación.
<https://www.greenspec.co.uk/building-design/cross-laminated-timber-manufacturing-process/>
- [11] AgaCad. Software BIM para el diseño eficiente de muros, forjados y techos con madera contralaminada en Revit.
<https://agacad.com/products/bim-solutions/wood-framing-clt/overview>
- [12] Niall Patrick Walsh. El edificio de CLT más grande del mundo ofrece un modelo para edificio residencial de alta densidad.
<https://www.archdaily.com/903839/worlds-largest-clt-building-provides-a-model-for-high-density-urban-housing>
- [13] Riccardo Bianchini . El CLT llega alto. Edificios en altura construidos con CLT.
<https://www.inexhibit.com/case-studies/clt-goes-tall-high-rise-buildings-in-cross-laminated-timber/>
- [14] Andy Pearson . Dalston Lane: madera de altura.
<https://www.building.co.uk/technical-case-studies/dalston-lane-tall-timber/5079749.article#>

