

SISTEMAS DE ENTRAMADO DE MADERA: CONSTRUCCIÓN CON CLT

Tutor: David Sanz Arauz
Mar Maria Gasca Alonso

Trabajo de fin de grado
Universidad Politécnica de Madrid

SISTEMAS DE ENTRAMADOS DE MADERA: CONSTRUCCIÓN CON CLT.

Estudiante

Mar Maria Gasca Alonso

Tutor

David Sanz Arauz

Departamento de construcción y tecnología arquitectónica

Aula TFG 1

Mercedes González Redondo, *coordinadora*

José de Coca Leicher, *adjunto*

Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid

Universidad Politécnica de Madrid

A mi padre, que es mi referente, mi inspiración y apoyo incondicional en la vida.

Índice

RESUMEN

- ESTÍMULO DE LA INVESTIGACIÓN
- HIPÒTESIS DE ESTUDIO
- OBJETIVO DEL TRABAJO
- ESTRUCTURA

INTRODUCCIÓN

1. ESTADO DE LA CUESTIÓN

- 1.1 La madera y el medio ambiente
- 1.2 Pequeña comparativa del consumo energético entre el hormigón, el acero y la madera.
- 1.3 Sistemas de entramados
- 1.4 Características del CLT
- 1.5 Estudio comparativo entre vigas de CLT y GLT
- 1.6 Estabilidad global

2. METODOLOGÍA DE ESTUDIO

3. CASOS DE ESTUDIO

- 3.1 Carbon 12
- 3.2 Brock Common, Vancouver, Canada
- 3.3 Hoho Building, Viena, Austria
- 3.4 Mjosa Tower, Brummundall, Noruega

CONCLUSIONES

FUENTES

- Bibliografía y recursos digitales
- Procedencia de las ilustraciones

RESUMEN

El uso de la madera en construcción se está implementando a gran velocidad en los últimos años. Esto se debe a la necesidad de construir de manera menos agresiva para el planeta debido al punto de no retorno climático en el que nos encontramos. Como en multitud de industrias, la de la construcción ha invertido en el desarrollo de nuevos materiales para poder mitigar el impacto sobre el planeta.

El consumo energético y de recursos naturales para la fabricación de otros materiales como el hormigón o el acero es algo que tener en cuenta a la hora de construir. El reciclaje de este tipo de productos requiere también un alto consumo de energía y la necesidad de maquinaria específica para ello.

Así, la madera se abre camino entre el resto de los materiales para posicionarse como principal material estructural en un futuro, debido a las mejoras significativas en relación con su fabricación puesta en obra y desarrollo. En todo el mundo se han empezado a construir numerosos edificios con estructura de madera, que, combinados con otros tipos de materiales, posibilitan la construcción de edificios de mayor altura y desarrollo tecnológico aportando menos impacto ambiental.

Los entramados de madera representan una alternativa interesante para la construcción. Como antecedentes de entramados de madera a los de madera laminada utilizados en los casos de estudio, cabe destacar el sistema de entramado ligero, el sistema de paneles de CLT y finalmente el sistema de vigas y columnas de madera laminada.

En los edificios a estudiar, las estructuras se resuelven mediante entramados de madera laminada, forjados de CLT y un material de rigidización de la estructura que varía en cada caso. De esta manera, el uso del CLT también representa una buena alternativa para la construcción de forjados. Su estructura de madera orientadas en direcciones perpendiculares que le permite trabajar en las dos direcciones como si de una losa de hormigón se tratara con un peso propio mucho menor. Otra de las características del CLT es la prefabricación, que implica grandes beneficios en la puesta en obra ya que el material viene listo del taller.

La estabilidad global de este tipo de edificios de gran altura, requieren del apoyo de otros materiales para la rigidización estructural que aporte estabilidad global al edificio y también para posibilitar el cumplimiento de los códigos y normas constructivas que normalmente no es posible cumplir con el uso de un único material como la madera.

Con intención de profundizar en el uso de la madera en estructuras de gran altura y concretamente en el uso de entramados de madera laminada y forjados de CLT, se estudian cuatro edificios que han constituido un referente constructivo debido a sus estructuras híbridas.

PALABRAS CLAVE

CLT · Construcción · Entramados · Estructura mixta · Sostenibilidad · Madera

Motivación

El tema del presente trabajo surge a raíz de la reflexión sobre como el desarrollo de nuevos materiales va alterando periódicamente la imagen de las ciudades y como los materiales en auge de cada momento implican unas maneras de construir diferentes. Desde el uso de la piedra, el ladrillo cerámico, el hormigón o el acero, la construcción ha ido aportando características visuales y espaciales a los espacios que habitamos. Cada material trae consigo unas características y unas limitaciones inherentes al mismo que se ponen de manifiesto a hora de construir y que nos afectan de maneras implícitas por su materialidad, su gasto energético, su impacto medioambiental, ... Es posible leer en los espacios como se han construido, por lo que, ¿cómo evolucionará la arquitectura en relación con la aparición y el desarrollo de nuevos materiales?

Hipótesis de estudio

Según el marco de posibilidades constructivas actual, la implementación de las nuevas tecnologías no deberían ser un impedimento sino una oportunidad para la arquitectura de evolucionar. El equilibrio entre las partes y el uso de diferentes soluciones en función de las necesidades y requerimientos del nuevo paradigma constructivo permitirá proyectar en una dirección más amplia a la actual.

Dentro de estas posibilidades, ¿qué soluciones permiten una aproximación más equilibrada entre los requerimientos espaciales y las exigencias técnicas? ¿qué posibilidades constructivas existen hoy en día con las que utilizar los medios naturales de manera más eficiente y sostenible? ¿Qué ventajas y desventajas se pueden extraer del uso de materiales diversos que sinérgicamente encaminen las posibilidades del paradigma estructural no únicamente hacia el cumplimiento de los requerimientos técnicos sino también hacia los espaciales propios de una arquitectura con miras más amplias?

Objetivo de trabajo

El objetivo de este estudio es extraer información sobre 5 edificios que han marcado un punto de inflexión con relación a la construcción híbrida, es decir, soluciones mixtas, donde el material fundamental es la madera en sus distintas posibilidades, productos y subproductos unida al sistema de entramados. Asegurando así la mirada sobre soluciones que planteen situaciones conscientes del impacto climático y los demás requerimientos de la sociedad actual y del planeta.

Se busca encajar en un marco general la razón por la cual se ha empezado a construir de esta manera y cuales han sido los factores que han llevado a ello. Partiendo de las decisiones estructurales y técnicas, cabe cuestionarse y analizar cuáles de estas soluciones constructivas limitan en menor medida las soluciones espaciales de la arquitectura, integrando así los pilares constitutivos de una buena arquitectura.

En definitiva, el objetivo será desgranar las soluciones variables que a partir de nuevos productos y sistemas constructivos derivados de la madera como el CLT que impone unas marcadas limitaciones espaciales y estructurales, en su combinación o integración con materiales como el hormigón y el acero y sistemas constructivos de entramados, e incluso la integración de otros materiales actuales como la madera laminada encolada (GLT), la madera compuesta estructural (SCL) o incluso la madera maciza, puede resultar precisamente en una visión estructural híbrida que permita la gama de opciones necesaria para proyectar la arquitectura con libertad.

Estructura

1.- Establecer el marco actual del paradigma constructivo en el que se introducen nuevos requerimientos técnicos tales como el impacto medioambiental, mediante una breve introducción que conducirá desde la idea general establecida hasta la cuestión y objetivo del trabajo.

Esta introducción incluirá como la arquitectura afecta al estado del planeta, como inicio del cambio del sistema constructivo con madera y como las estructuras híbridas que empiezan desarrollarse, posibilitan la formalización de nuevos parámetros tipológicos estructurales.

2.- Datos sobre la madera, pequeña comparativa con el hormigón y el acero.

Mediante la enumeración de algunas características de estos materiales, se pretende dar una visión general de cómo afectan estos tres materiales al medio ambiente, en cuanto a cuestiones de fabricación, extracción y puesta en obra.

3.- Resumen de estudios relacionados con la madera.

Los nuevos materiales como el CLT tienen unas características concretas, en los estudios a resumir, se analizan y se ponen a límite para comprobar si pudiesen funcionar también para otro tipo de elementos estructurales, a modo de justificación de las decisiones estructurales tomadas en los edificios a analizar.

4.- Estudio de 5 ejemplos de estructura híbrida.

Se analizan 5 ejemplos de edificios en altura que destacan por su estructura principal de madera, que, unida con otros materiales como el CLT, el hormigón o el acero, mejoran su capacidad de crecer en altura y satisfacer refuerzos estructurales necesarios en este tipo de edificios. Planteando así soluciones estructurales que dan lugar a la riqueza de la organización espacial por su simple gama de opciones.

INTRODUCCIÓN

Los materiales de la construcción son fundamentales para entender la situación de temporalidad social y tecnológica que refleja la imagen de las ciudades. A través de su estudio, se puede llegar a comprender en que las circunstancias culturales y económicas se encuentran cada sociedad.

En Europa, pero concretamente en España, nos hemos acostumbrado a la construcción con acero, hormigón armado, productos derivados de la industria del cemento y ladrillo cerámico. Debido a su revolucionaria aplicación, rapidez constructiva y función estructural y precio asequible de los productos, estas industrias han abarrotado el mercado a lo largo de los años, y consecuentemente la ciudad es un reflejo de ello.

Cabe mencionar, que no se ha tenido en su correcta consideración los otros conceptos implícitos en el uso de estos materiales, tales como la producción de CO₂ en su proceso de fabricación, el consumo energías no renovables y el uso excesivo de componentes químicos, que dañan la salud del planeta y que han creado un ciclo difícilmente sostenible a largo periodo. Complicando así el uso, acceso y comercialización de otros materiales u otros sistemas constructivos menos dañinos y que si ofrecen sostenibilidad además de cumplir con los mismos requisitos técnicos exigibles.

El hormigón, es un material compuesto para cuya fabricación se requiere gran cantidad de energía, materia prima y agua ¹, estudios contrastados afirman el resultado de que:

” cada año se producen 3 toneladas de hormigón por persona en el mundo, lo que se traduce en que entre el 5 % y el 8 % del carbono mundial provenga de únicamente del hormigón”. ²

En cuanto a la huella ecológica, la fabricación de hormigón implica la extracción de arena y grava en grandes cantidades, que hay que mover de un lugar a otro, dejando un gran impacto en el paisaje.

Por su parte, el acero, también demanda una cantidad enorme de energía para su fabricación, así como la huella en el paisaje ³.

“El acero, en la producción de hierro, demanda un 4% de la energía mundial”⁴.

Actualmente, los acuerdos internacionales adoptados debidos al cambio climático están motivando cambios en los hábitos de consumo de las personas. En lo referente a la arquitectura, la construcción es un sector que arroja elevados valores de emisiones de CO₂ y gases de efecto invernadero.

El impacto ambiental mundial de los edificios data del 20% del consumo de agua, entre el 25 y el 40% del uso de energía, entre el 30 y 40% de las emisiones de gases de efecto invernadero y entre el 25 y el 40% de la generación de residuos sólidos.⁵

Todo esto nos lleva a plantear la pregunta de cuáles son las alternativas que tenemos a partir de ahora en lo referente al cambio climático en el sector de la construcción.

En este sentido, durante los últimos años la industria de la construcción se ha visto afectada por una corriente de implementación de nuevas tecnologías, sistemas constructivos y materiales, en gran medida no solo debido al cambio que el planeta está sufriendo y al punto de no retorno climático en el que nos encontramos, sino gracias a la implantación de estas nuevas leyes, marcos normativas y directivas europeas como la 2010/31/UE⁶ que establecen un marco de nuevos criterios de sostenibilidad (NZEB. Nearly Zero Energy Building)⁷, eficiencia energética y certificación medioambiental.

En este marco, en el cual frente a las nuevas exigencias la construcción se ve obligada, a girar sobre sí misma y replantearse por completo, renace la madera para presentarse como uno de los materiales más viables.

Esto se debe a que, de la necesidad de construir de manera menos agresiva y más eficiente, surja el desarrollo de nuevos sistemas constructivos basados en materiales de bajo impacto ambiental que ayuden a mitigar este efecto sobre el planeta. La madera destaca en este campo, por tener una “energía incorporada” (embodied energy)⁸ positiva. Esta, implica la suma de toda la energía necesaria para la producción del material, desde la extracción de la materia prima hasta su puesta en obra, pasando por toda la manufacturación que deba realizarse, transporte, e incluso su posible reciclaje.

En comparación con otros materiales usados tradicionalmente para estructuras, la madera es hoy en día el único material de construcción con una huella de carbono negativa.

Debido al potencial de este material y su incipiente desarrollo como producto para la construcción, se ha mejorado significativa-

mente su posición y han empezado a eclosionar los numerosos edificios que la incluyen por sus diferentes propiedades, ya sea desde el punto de vista estructural, térmico o eficiente.

Entre estos sistemas constructivos, cabe destacar el CLT como producto. El CLT es un producto compuesto por varias capas de madera pegadas longitudinal y transversalmente (99,4 % de madera y 0,6 % de cola)⁹, que comenzó a fabricarse en Austria, con el objetivo de reutilizar la madera de menor valor.

Lo explícito en este nuevo material es la disposición del entramado, que reduce al mínimo los esfuerzos de la madera, cumpliendo de forma segura los requisitos que se imponen a todo material de construcción moderno, ya sean térmicos, acústicos o estructurales. Es un material que en definitiva cuenta con un alto grado de flexibilidad, que deberá ser sometido a grandes deformaciones para romperse y colapsar. La puesta en obra del CLT es ensamble en seco, esto influye positivamente en el bienestar de las personas¹⁰ y a la hora de la ejecución de las obras, lo que le otorga una posición de valor en la eficiencia no solo medioambiental si no constructiva y económica a la vez que se dota al edificio de un sistema constructivo ágil y sostenible que optimiza los tiempos de obra al garantizar una rápida y precisa ejecución.

Por otro lado, lo implícito es que existen numerosos artículos sobre su peso relativo y su resistencia¹¹ en comparación con otros materiales como el hormigón o el acero, que le otorgan un puesto competitivo. Así como las propiedades de resistencia al fuego y su potencial térmico que incluso pueden llegar a superar los de muchos materiales usados hoy en día en la construcción, cuyas composiciones químicas los limitan a la hora de dar cumplimiento a las exigencias técnicas.

Por ejemplo, el mito de la madera como producto no apto para según qué tipo de construcción por su resistencia al fuego, es debido a que comunmente se la ha considerado como un “combustible” ... En cierto modo lo es, pero pocos son aquellos materiales que podamos denominar ignífugos, y las exigencias técnicas de las estructuras (véase como ejemplo el CTE-DB SI)¹² no van en la dirección obtener esta propiedad, sino que estos requisitos se centran en el tiempo de reacción y colapso estructural de los materiales. En este caso, y sin ahondar más en ello, la madera adopta un proceso de carbonización natural exactamente idéntico a la reacción mediante la cual los árboles se protegen a sí mismos¹³. Por lo que estos conceptos se traducen que en el dimensionado de las estructuras de madera se tenga en consideración.

El CLT, empieza a ser considerado, conocido y aconsejado, pues existen hoy en día numerosos estudios, artículos, etc. que abordan su naturaleza. La dirección de este trabajo no será la de reiterar lo hasta ahora ya descrito como buena base y ejemplificación de los sistemas constructivos y productos de la madera. En ellos está el futuro, pero también hay que lidiar con las nuevas limitaciones que estos abordan.

Algunos de estos estudios anteriormente nombrados llegan a introducir el inconveniente del CLT en su uso para edificios de gran altura con plantas libres, puesto que su naturaleza de muros de carga resulta espacialmente rígida, en contraposición con una maya de pilares y jácenas que dará como resultado una tipología arquitectónica con numerosas ventajas espaciales y organizativas que hay que tener en cuenta a la hora de proyectar el vacío arquitectónico.

En este sentido existen ya algunos casos de inclusión del CLT como muros portantes, pero con soluciones de forjados de entramados ligeros de madera que pueden dar lugar a una tipología de techos más sensible y próxima a nuestra tradición.

Pues no solo cuentan las soluciones técnicas, sino que debemos ser capaces de proyectar en una dirección en la que la arquitectura siga constituyendo el confort espacial.

Otra limitación no exclusiva del CLT, ni tan solo de la madera, es que la arquitectura tiene un peso gravitacional, lo que nos obliga a solucionar el encuentro de los edificios con el terreno. En este caso el hormigón sigue siendo el material más usado por sus numerosas ventajas a la hora de cimentar, etc. No es extraño que, desde ya en el uso cotidiano y pasado de la madera, el encuentro de esta con el terreno se realizara a través de un elemento pétreo, para alejarla de la humedad y de sus consecuentes patologías.

Estos últimos párrafos introducen la idea de que las estructuras mixtas o híbridas tienen un sentido constructivo bastante concreto y coherente, pues en el equilibrio de las partes y la diversidad pueden nacer generosas oportunidades arquitectónicas.

En definitiva, el CLT como producto, resulta ventajoso y como cualquiera de los anteriormente nombrados presenta sus limitaciones. Pero también su combinación con otros productos como el GLT o el SCL anteriormente nombrados. A lo largo del planeta se están empezando a construir edificios que amplían los límites del uso de este material y que, combinados con otros materiales como el hormigón o el acero limitando su papel y cuantificando su gasto energético, permiten construcciones que hace unos años serían impensables.

En el presente trabajo se pretende estudiar distintas soluciones de entramados en combinación con otros materiales, entre los que la madera destaca como principal, aun en sus diferentes formas. Entre ellas se escoge el CLT como elemento común, para poder obtener conclusiones sobre las ventajas y los inconvenientes que estas combinaciones puedan tener. De esta manera, se toman cinco ejemplos de características constitutivas similares que permitirán extraer una conclusión del mismo en la arquitectura.

1. ESTADO DE LA CUESTIÓN

1.1 LA MADERA Y EL MEDIO AMBIENTE

El uso de madera se ha incrementado en estos últimos años debido a la situación de no retorno en cuanto a la contaminación global en la que nos encontramos.

Bajo esta premisa, la madera comienza a posicionarse como uno de los materiales con los que construir de manera respetuosa en un futuro y contribuir con ello a la lucha contra el cambio climático.

Es un material que crece de manera natural en los bosques, sin necesidad de aportes energéticos del ser humano, por lo que en su producción lo único que consume son recursos naturales como son el agua y la luz del sol. Mientras lo hace, es capaz de absorber dióxido de carbono de la atmósfera, guardándolo en su interior y de esta manera ayuda al planeta a mitigar los efectos del ser humano. Este dióxido de carbono queda encapsulado en la madera, por lo que actúa como contenedor de este gas tan perjudicial para el ambiente. Alargar el uso de la madera sin quemarla implica el almacenamiento de grandes cantidades de dióxido de carbono durante tanto tiempo como la madera tenga un uso ¹⁴.

La actual corriente de construcción con madera y sus productos derivados, lleva implícita la necesidad de gestionar de manera controlada el crecimiento y la explotación de los bosques. A lo largo del planeta se están promoviendo normativas en relación con este propósito. Para la obtención de certificaciones LEED (Leadership in Energy and Environmental Design)¹⁵, por ejemplo, ya es necesario que la madera utilizada en las construcciones provenga de bosques de crecimiento sostenible.

Lo cierto es que la problemática principal del uso de la madera en la construcción son las propias normativas que regulan la construcción de edificios en cada país, muy estrictas con el uso de este material. Sin embargo, la regulación del uso de ciertos materiales trae consigo beneficios como el control minucioso de las explotaciones forestales y por tanto la deforestación controlada ¹⁶. Además, el reclamo de certificaciones sobre la madera, como la procedencia de esta de bosques de crecimiento sostenible amplían la idea de poder obtener un control más preciso sobre el estado de los bosques del planeta.

1.2 PEQUEÑA COMPARATIVA DE EL CONSUMO ENERGÉTICO PARA LA OBTENCIÓN DE DISTINTOS MATERIALES CONSTRUCTIVOS

El impacto ambiental que genera la construcción de los edificios es un problema que ha empezado a preocuparnos no hace mucho tiempo. La sociedad tiende a actuar de manera local a la hora de aportar soluciones para paliar los problemas que la industrialización, el consumismo y el capitalismo han generado.

Sin embargo, a la hora de construir edificios son pocos los que tienen en cuenta estas consideraciones. En los países nórdicos, que están a la cabeza de la conciencia global a favor del clima, el 98% de las viviendas construidas tienen estructura de madera. En EE.UU y Canadá rondan el 80% mientras que en Alemania el porcentaje desciende al 40%. Por el contrario, España solo cuenta con un 2% de viviendas fabricadas con madera, lo que marca una diferencia significativa en el uso de materiales poco respetuosos con el medio ambiente ¹⁷.

Un punto importante a la hora de construir con madera y no dañar los ecosistemas es la procedencia de esta. Es necesario que la madera utilizada provenga de bosques de cultivo sostenible, cuyo crecimiento y tala están estrictamente controlados.

Cuando pensamos en la construcción de edificios con madera en países como España, un impedimento importante es el precio del producto. La constante en la construcción española con ladrillo cerámico, bloque de hormigón, hormigón armado, acero, perfilaría metálica, compuestos de pvc, etc. Componen una industria que ha estabilizado sus precios en el mercado paulatinamente, aumentando en consecuencia los de materiales como la madera hasta establecer el pretexto de que “siempre” es más económico que la madera. Ciertamente el concepto de la economía en este sentido no compone lo “caro” que le sale no solo a la salud medioambiental del planeta si no a nosotros mismos, debido a todos los gastos generados implícitamente en el sistema sanitario, social, etc.

Por otro lado, a la hora de construir con materiales con impacto nulo o casi nulo en el medio ambiente (a través de metodologías “sostenibles”), no solo se debe tener en cuenta el consumo de energía necesaria para su fabricación, materiales que normalmente están compuestos y requieren sucesivas fases para su fabricación, sino que también entran en juego datos como la distancia de transporte de los materiales y el medio de transporte en sí de estos ¹⁸. En este sentido, surge la duda de ¿qué es más rentable en cuanto al aporte de CO₂, el desplazamiento de estructuras enteras de madera, cuya huella de carbono es negativa, a una obra a x km de distancia en la que se va a requerir un transporte y por tanto emisión de gases de efecto invernadero, o el uso de materiales que, aunque se encuentren en las proximidades, requieran un menor consumo de combustible en su transporte pero que en su fabricación y posterior reciclaje sean más

perjudiciales? Estas cuestiones son muy relativas y dependen de los casos específicos de cada proyecto, pero sería importante tener este tipo de consideraciones en cuenta a la hora de construir.

La industria de la construcción es responsable de un alto porcentaje de la creación de residuos sólidos en el planeta. La vida útil de los edificios y por tanto de sus materiales tiene un impacto ambiental importante. Mientras que las estructuras de hormigón y acero utilizan mayor cantidad de recursos en cuanto a extracción y reciclaje, los productos relacionados con la madera tienen un impacto menor a la hora de su deshecho o reutilización. Aunque cuentan con adhesivos entre sus componentes, se están implementando ya adhesivos biodegradables.

En un estudio realizado por Mario Fernández Forcada dentro de su tesis doctoral: La madera contralaminada como alternativa en sistemas de baja energía estructural, se comparan resultados relacionados con el ahorro energético entre el hormigón, el acero y la madera contralaminada y se obtiene que esta última ofrece un ahorro energético del 25% respecto al hormigón y un 41% respecto al acero. También hace esta comparación según el tipo de edificio, en este caso en un edificio de viviendas, donde el ahorro respecto a la construcción en hormigón es del 20% y de acero de un 48%. En la tesis también se realiza la comparativa entre la energía primaria en el periodo de construcción y la masa necesaria para un edificio de viviendas y para una vivienda unifamiliar. En los gráficos adjuntos se observa que el acero estructural siempre obtiene los valores más elevados en oposición a la madera contralaminada que obtiene los más bajos¹⁹.

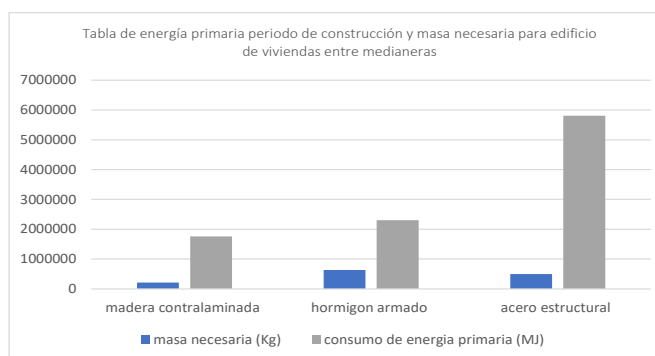
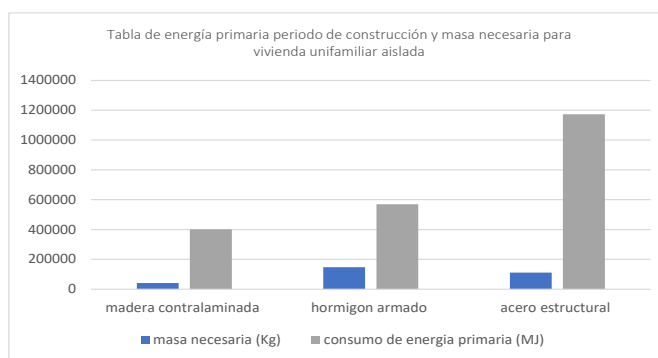


Fig.o.o. Gráficos de consumo de energía primaria para construcción de viviendas unifamiliares y viviendas entre medianeras.

1.3 ENTRAMADOS DE MADERA

Como componentes y antecedentes de los sistemas estructurales de los casos de estudio enmarcados en los sistemas estructurales híbridos destacan los sistemas de entramado ligero, los sistemas de paneles y los sistemas de bastidores.

SISTEMAS DE ENTRAMADO LIGERO

Este tipo de sistema está compuesto por piezas esbeltas de madera maciza. Estas piezas son estables por si mismas, pero requieren entramados transversales para alcanzar la estabilidad general. Las piezas están separadas a una distancia de entre 40 y 60 cm para la constitución del entramado. La disposición de las piezas funciona de manera tridimensional, donde elementos livianos son capaces de soportar elevadas cargas repartiéndolas entre los elementos que conforman el entramado. Estos sistemas tienen cierta flexibilidad a las deformaciones. Pese a que permiten una prefabricación total o parcial, la velocidad de montaje no alcanza los niveles de los sistemas de paneles o de bastidores y que precisa mayor tiempo de acabado en obra ²⁰.

SISTEMAS DE PANELES

En este tipo de sistema de paneles, las cargas horizontales y las cargas verticales están soportadas por el mismo material, por paneles de madera contralaminada, dispuestos de manera regular en planta. Esta disposición de los paneles tiende a ofrecer poca libertad en planta, por lo que suele ser más adecuado para programas residenciales, donde las necesidades de los ocupantes no varían ²¹. Una ventaja de este tipo de sistemas es la velocidad de montaje y su prefabricación en taller. Las dimensiones de los paneles están estandarizadas y dependen del fabricante y de las dimensiones de la maquinaria para su fabricación. Las piezas se transportan en camiones de una sola pieza, listas para colocar en obra ²².

SISTEMAS DE VIGAS Y COLUMNAS

En los sistemas de bastidores, las cargas verticales son soportadas por un sistema interconectado de vigas y pilares. Sin embargo, estos sistemas requieren medidas adicionales, como arriostramientos transversales o muros a cortante para resolver problemas de estabilidad lateral. La disposición de la estructura posibilita mayor libertad en planta, por lo que se asocia a programas que requieren espacios interiores más amplios. La disposición de la estructura también repercute en la envolvente del edificio, posibilitando la ampliación de las áreas de acristalamiento ²³. Este tipo de estructuras suelen ser de madera laminada, de modo que la velocidad de montaje es ágil ya que las piezas se traen directamente para ser instaladas ²⁴.

SISTEMAS HIBRIDOS

Representan la unión de los dos sistemas anteriores ya que en ocasiones ninguno de estos constituye la solución óptima. En los sistemas híbridos se combinan distintos materiales y soluciones estructurales que a menudo tienen que ver con razones arquitectónicas, estructurales o económicas o por el uso de productos constructivos de cercanía o para cumplir requisitos normativos ²⁵.

En los casos de estudio se consideran cuatro edificios que cuentan con un sistema híbrido en la resolución de su estructura.

1.4 CARACTERÍSTICAS DEL CLT

Como introducción del material, el CLT (cross laminated timber) es un producto derivado de la madera. Está formado por el apilamiento y la prensa de capas de tabloncillos de madera orientados en direcciones perpendiculares entre sí y unidos mediante adhesivos. Esto hace cuenta con buena resistencia tanto a tracción como a compresión, funcionando de manera similar a una losa de hormigón ²⁶.

Al estar compuesto por madera se trata de un material sostenible y al ser montado en taller goza de unas características de prefabricación excelentes, que le permiten garantizar un alto grado de precisión en la ejecución y un control de calidad estricto ²⁷.

El manejo de herramientas digitales para su fabricación y cálculo permite contar con una mayor previsión de la obra tales como plazos en los que va a estar toda la estructura terminada y el presupuesto de esta.

Además cuenta con unas características físicas que hacen que se posicione entre los materiales de construcción.

- **Peso propio:** tiene un peso propio reducido, lo que favorece a la hora de dimensionar la cimentación en cuanto al volumen necesario de hormigón. Es capaz de soportar las mismas cargas que el hormigón con un 80% menos de peso propio ²⁸.

- **Contenido de humedad:** el contenido de humedad con el que se suelen comercializar los tabloncillos es de entre el 12 y el 20% ²⁹.

- **Densidad:** las más habituales de entre 450 y 520 kg/m³, pero depende de la madera que se utilice ³⁰.

- **Resistencia a la difusión del vapor y barrera de vapor:** permite el intercambio de vapor de agua con el interior ³¹.

- **Estanquidad al agua:** no es estanco, pero suele estar acompañado de otros materiales que lo son.

- **Aislamiento acústico:** al tener una estructura porosa, posee un alto coeficiente de absorción. Se comporta bien frente a ruido aéreo y ruido de impacto debido a su buena rigidez dinámica ³².

- **Aislamiento térmico:** la madera ofrece buena resistencia al paso del calor, por lo que se considera buen aislante térmico. Cuenta con una conductividad térmica de 0,14 W/m.K ³³.

- Comportamiento frente al fuego

Para que la madera arda deben ocurrir varios factores. El calor de las llamas hace que la pequeña cantidad de humedad que exista en el interior de la sección de madera sea impulsada hacia el centro de la sección, haciéndola menos susceptible al fuego. Además, se produce la carbonización de la superficie, que crea una capa aislante impermeable que sirve de protección el interior, tanto de la temperatura que existe en el exterior debido al fuego como del suministro de oxígeno que es necesario para que la combustión se desarrolle ³⁴.

1.5 ESTUDIO COMPARATIVO DE COLUMNAS DE CLT Y GLT: ESTUDIOS A COMPRESIÓN

En la actualidad los productos madereros en masa, entre los que destacan el CLT y GLT se están utilizando cada vez mas en construcción. El CLT y GLT están empezando a sustituir considerablemente a la madera en masa como estructura de soporte primaria.

El GLT (glued laminated timber) tiene una larga trayectoria en los países desarrollados. Está formado por listones de madera unidos entre si mediante adhesivos estructurales en una dirección. Este material se puede utilizar tanto en horizontal aplicado en forma de viga como en horizontal en forma de pilar. La prefabricación también permite producirlo con formas curvas y cuenta con gran variedad de clases resistentes. Para la fabricación del GLT, las capas a adherir se someten a compresión lateral durante un periodo de tiempo entre dos horas y más de una semana ³⁵.

Por su parte, el CLT es la ultima incorporación a la familia de productos de la madera maciza. Su fabricación se lleva a cabo mediante listones de madera unidos entre si mediante adhesivos estructurales y a diferencia del GLT, sus capas están orientadas de forma perpendicular unas con otras. El CLT se utiliza en paneles de grandes dimensiones que pueden ser dispuestos tanto en horizontal para la formación de forjados como en vertical para la formación de muros. Los paneles de CLT se fabrican en una prensa de gran tamaño y se someten a presiones en ambas direcciones. Es necesario un periodo de dos horas de prensa en frio para que las capas se adhieran correctamente ³⁶.

Las especies de árboles de los que se extrae la madera para la fabricación de ambos productos suelen ser las mismas, en general, maderas blancas.

En el estudio “Un estudio comparativo de los comportamientos de compresión de la madera laminada cruzada y columnas de madera laminada encolada.” se investigan los comportamientos frente a compresión de columnas de GLT y de CLT. Para ello se utilizaron los mismos parámetros de fabricación para ambos materiales, entre los que destacan el uso de madera de cicuta y el adhesivo PUR de un compo-

nente y el uso de tres capas para cada material, para ayudar a identificar las distintas compresiones y comportamientos de estos materiales. Las dimensiones de las piezas estudiadas fueron para ambos materiales 4200 mm x 1100 mm x 105 mm. Estas se dividieron en muestras de 210 mm y de 420 mm. Así se obtuvieron muestras de ambos materiales de dos longitudes distintas.

Del estudio a compresión axial de muestras de dos longitudes distintas de CLT y GLT, se extrajeron las siguientes conclusiones:

1.- La muestra de GLT obtuvieron valores de resistencia a compresión fueron significativamente más altos que los del CLT. Sin embargo, la muestra de CLT presentó mejores valores de ductilidad y mejores propiedades de absorción de energía debido a la disposición cruzada de sus capas. Esto determina que las columnas de CLT podrían tener mejor rendimiento de conexión que las columnas de GLT para determinadas aplicaciones ³⁷.

2.- Estadísticamente la longitud de las muestras no tuvo efecto significativo, por lo que el módulo de resistencia a compresión obtenido es objetivo y se puede utilizar para la comparación de resultados en los modelos de tensión deformación ³⁸.

3.- En cuanto a la rotura de las muestras, ambos materiales exhibieron cuatro tipos diferentes: por cizallamiento oblicuo, por división longitudinal, por aplastamiento y por agrietamientos tanto en extremos como en juntas. Los modos de rotura de la muestra de GLT fueron simples, mientras que los modos de CLT fueron mas complicados debido a la estructura cruzada del material ³⁹.

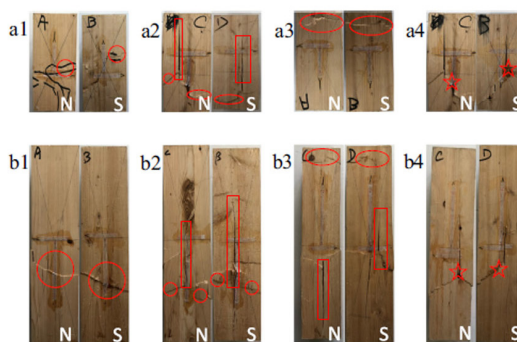


Fig. 0.1: modos de rotura de la columna de GLT

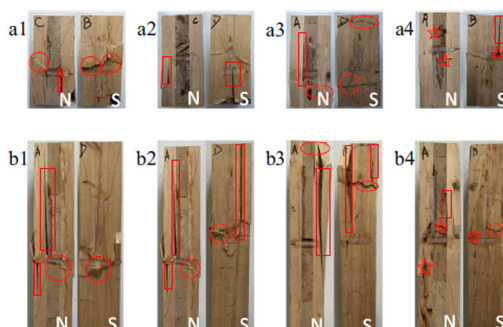


Fig. 0.2: modos de rotura de la columna de CLT

1.6 ESTABILIDAD GLOBAL

El CLT se puede utilizar tanto para la construcción de forjado como de muros. El objetivo de este trabajo es el estudio de estructuras mixtas, que cuentan en su mayoría con forjados de clt, vigas y pilares de glt y un núcleo que rigidiza la estructura de otro material.

La estabilidad frente a cargas lateras es un factor importante en este tipo de edificios de gran altura. Las cargas por viento pueden provocar balanceos y deslizamientos en la parte superior de la torre y están limitadas a $1/500$ de la luz o pensando en que el edificio se comporta como un pilar en voladizo $1/500$ de la altura. La dimensión de estos desplazamientos esta directamente relacionada con la esbeltez, la rigidez y la altura del edificio, de manera que las cargas verticales del edificio mejoran la estabilidad frente a vuelco.

Al poder utilizarse tanto en muros como en forjados el CLT se puede utilizar como sistema resistente frente a cargas laterales. Al contrario que en el sistema platform-type cuya estructura se lleva a cabo integramente mediante paneles de CLT y cuenta con multitud de muros para la resistencia a cortante de la estructura ⁴⁰, las soluciones con entramados evitan esta redundancia estructural, encargándose estos elementos mas ligeros de transmitir las cargas a plantas inferiores.

2. METODOLOGÍA DE ESTUDIO

Se lleva a cabo un estudio de cuatro edificios que han constituido un referente en la construcción con entramados de madera en altura. Han servido como prototipo para verificar estos sistemas constructivos híbridos, formados por un elemento rigidizador de la estructura que se ha llevado a cabo mediante distintos materiales entre los que destacan el acero en el caso del edificio Carbon 12, el hormigón como en el caso del edificio Brock Commons o el edificio HOHO o los paneles de CLT en la torre Mjosta. Todos ellos cuentan con cimentación de hormigón y entramado de vigas y pilares de GLT y sistemas de forjados de CLT siendo la madera el material principal de todos los edificios.

Los condicionantes de cada edificio han llevado a la solución de estos de manera distinta y es aquí donde se estudia como los sistemas de entramados han beneficiado a estos edificios.

Además, estos edificios se han escogido debido a que todos se han construido en los últimos 5 años, lo que implica la implementación de nuevas metodologías de diseño, como son el uso de tecnologías como VDC (Virtual Design and Construction) o BIM (Building Information Model).

Cabe mencionar que este último requisito se ha incluido debido al criterio de precisión a la hora de la ejecución de estos complejos proyectos, pudiendo así claramente incluir sus numerosas ventajas y disminuyendo la posibilidad de errar y por lo tanto de influir en el análisis de manera opuesta al objetivo del trabajo. En este sentido, las ventajas de este método de diseño incluyen la posibilidad de modificación del modelo de manera instantánea y coordinada dentro del equipo, lo que facilita la comunicación entre todas las personas que participan en el diseño y elimina posibles errores. Otra de las ventajas es la precisión sobre todas las variables que influyen en el proyecto. También, reduce los tiempos de organización para la puesta en obra ya que permite organizar las piezas de manera inversa para que al llegar a obra se coloquen directamente y no consuman espacio para el acopio de material en la parcela. Las nuevas tecnologías no solo se aplican a la fase de diseño sino también a la de construcción. Este tipo de edificios cuentan con un alto grado de prefabricación. Los elementos se fabrican y componen en taller, adhiriendo así su piezas o artugios constituyentes como pueda ser la perfilera metálica, uniones, etc. De forma que al llegar a obra no se necesite invertir tiempo en el ensamblaje. Con esto se consigue reducir enormemente el tiem-

po de construcción, lo que conlleva reducción de inversión en mano de obra y de recursos mecánicos, permitiendo obtener resultados en menos tiempo ⁴¹.

3. CASOS DE ESTUDIO

El uso de la madera contralaminada está en auge actualmente. Representa una gran alternativa para la construcción estructural en forma de muros portantes y de forjados en edificios cuya distribución en planta no requiere de grandes luces o grandes espacios diáfanos. En viviendas unifamiliares, por ejemplo, permite una ejecución mucho más rápida. Sin embargo, a la hora de construir edificios en los que la configuración en planta está marcada por necesidades espaciales con menor división, el uso de este material no es capaz de satisfacer estas necesidades por lo que se tiende a coordinar con otros materiales.

De este modo, se procede al estudio de 4 casos de estudio, en los que se ha utilizado el CLT en combinación con otros materiales como la madera laminada, el hormigón o el acero. Todos muestran variabilidad en la combinación de materiales, motivo por el cual han sido elegidos. Son los siguientes:

- Carbon 12
- Brock Common, Vancouver, Canada
- Hoho Building, Viena, Austria
- Mjosa Tower, Brumundall, Noruega

Se adjunta a modo de vista general una tabla con las características principales de cada edificio.

	localización	plantas	altura	duración de la construcción	final de obra	ciementación	núcleos estructural	entramado	forjados
CARBON 12	Portland, Oregon	8	29	2 años	2017	Hormigón	acero	madera laminada	CLT
BROCK COMMON	Vancouver, Canada	18	53	2 años	2017	Hormigón	hormigón	madera laminada	CLT
HOHO BUILDING	Viena, Austria	24	84	3 años	2019	hormigón	hormigón	madera laminada	CLT
MJOSA TOWER	Brumundall, Noruega	18	85,4		2019	hormigón	CLT	madera laminada	CLT + 7 últimas plantas de hormigón

Fig.o.3 Tabla resumen de los casos de estudio



Fig.o.4 Render del Carbon 12

3.1. CARBON 12

El edificio Carbon 12 con 8 plantas y 29 m de altura está ubicado en el norte de Portland, Oregón, ciudad con gran economía maderera. Es un edificio de viviendas cuya planta baja está ocupada por uso comercial. Las plantas superiores albergan 14 apartamentos de lujo. En el momento de su construcción, se erigió como prototipo de construcción en madera, como guía para posteriores regulaciones normativas de este tipo de edificios, siendo el primer edificio construido con madera en altura de Estados Unidos.

La construcción del edificio comenzó en 2016 y terminó en 2018. La superficie construida del edificio es de unos 3.900 m². Fue desarrollado por el estudio Path + Kaiser ⁴².

A diferencia de otros edificios construidos con este nivel de prefabricación, el cerramiento y las divisiones interiores del Carbon 12 se construyeron in situ mediante entramado ligero de madera.

ESTRUCTURA

Como edificio piloto en este tipo de construcción, destaca por la combinación de sistemas constructivos. La cimentación se ejecuta mediante pilotes, el núcleo rigidizador central es de acero, los forjados de CLT, vigas y columnas de madera laminada y fachadas y tabiques de entramado de madera ligero.



Fig. 0.5. Estructura Carbon 12

La baja resistencia del terreno y la sismicidad de la zona, obligaron a ejecutar una cimentación profunda mediante pilotes in situ.

La estructura central es de acero, que constituye el núcleo estructural que aporta la estabilidad global necesaria aumentando la rigidez de este y su peso propio. Se optó por el acero debido a la mayor agilidad de montaje en comparación con el hormigón. Cada planta se premontaba en taller y se elevaba con una grúa en obra, acompañando el montaje con el de la estructura de madera.

El entramado de vigas y pilares de madera laminada fue la opción para solucionar el resto de la estructura. Debido a la mayor flexibilidad y ligereza con la que cuenta la madera en comparación con otros materiales, constituía una buena solución para los problemas de sismo característicos de la zona, reduciendo los empujes laterales proporcionales al peso propio del edificio.

Los paneles de forjado de CLT son los encargados de la transferencia de cargas laterales al núcleo de acero, actúan como diafragmas rígidos, gracias a las conexiones entre los paneles.

Es importante destacar el papel de las conexiones entre las distintas partes de la estructura. Al estar formada por distintos materiales, estos, tienen distintos grados de tolerancia, por lo que es importante dimensionar bien cada parte. Se llevaron a cabo pruebas en taller para cerciorarse de que funcionaban bien ante sismo. Las conexiones entre elementos de madera se llevaron a cabo mediante uniones de acero, que se protegían del fuego con la propia madera estructu-

ral, embebiendo el encuentro en la estructura. Estas uniones comprobadas frente a sismo permitían cierta rotación en caso de movimiento del terreno ⁴³.

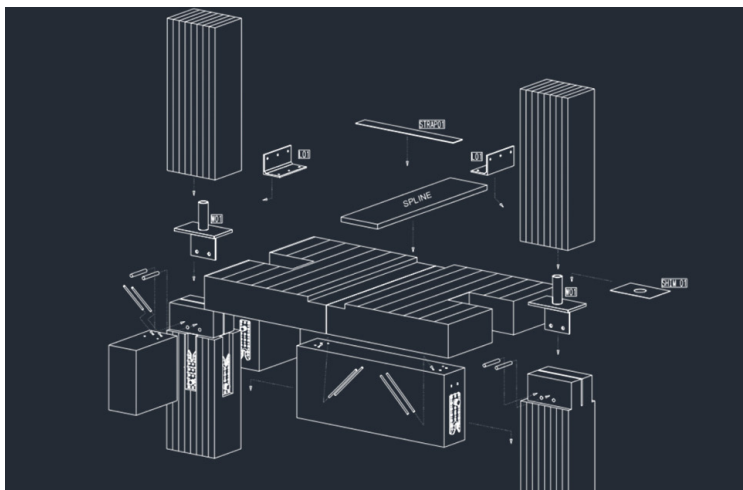


Fig. o.6. Encuentros entre pilares y forjados

Se utilizaron 234 pilares de madera laminada, 336 vigas de madera laminada proporcional a un volumen de 111 m³ y 242 paneles de CLT que corresponde a un volumen de 433 m³. Para las uniones entre la estructura se utilizaron 556 conexiones de acero ⁴⁴.

FUEGO

Uno de los problemas que suelen tener los nuevos edificios de madera es el cumplimiento de la normativa de resistencia al fuego. Si bien estamos acostumbrados a pensar que la madera es más combustible que otros materiales, en la actualidad se está confirmando que no es así.

En el caso del Carbon 12, la normativa no solo se ha cumplido, sino que se ha superado utilizando herramientas pasivas. La cantidad de ocupantes por planta es mucho menor de lo requerido en el código, por lo que la evacuación por escaleras, que en este caso son de acceso directo desde cada vivienda eliminando este tramo de recorrido de evacuación, es mucho menor que lo permitido como estrategia de eliminar posibles colapsos de tráfico en la escaleras.

En cuanto al acceso de los bomberos, el encontrarse el edificio separado de las medianerías y situado en la esquina de la parcela, facilita el acceso de los bomberos en caso de incendio.

Un punto débil de los edificios de madera son las uniones metálicas de la estructura. En este caso se encuentran ocultas dentro de la estructura de madera, de modo que es esta la que protege las conexiones respecto al fuego ⁴⁵.

Una de las exigencias del código en este tipo de edificios de madera es que exista un sistema de aspersores en cada planta que cuente con un sistema de tuberías propio y bien diferenciado del resto de cir-

cuitos de agua, así, a través de las comunicaciones verticales se va ramificando en cada apartamento, que, a su vez, constituyen un sector de incendios independiente por vivienda.



Fig 0.7 Planta del edificio

RUIDO

Para el proyecto de acondicionamiento acústico se contrató a subcontratas para el abastecimiento de materiales. Uno de los puntos importantes a tratar eran los espacios que pudieran quedar separados entre los paneles de CLT y los encuentros entre las vigas y columnas, por lo que el proceso de acondicionamiento comenzó cerrando cualquier muesca que permitiera el paso de vibraciones y ruido mediante espuma expansiva, tiras de cierre de chapa y bloques de madera.

Para separar acústicamente el sistema de piso de las paredes, se proyectó espuma aislante. Aunque la característica principal de este tipo de estructuras es la construcción al yeso, siempre existen limitaciones que obligan al uso de materiales como el gypcrete, compuesto por yeso cemento Portland y arena, para mitigar este tipo de problemas. El sistema de suelo acústico está formado por una capa para el ruido de impacto, un panel de aislamiento y por último el vertido del gypcrete, para reducir el ruido de impacto y aumentar la resistencia al fuego ⁴⁶.

AHORRO DE CARBONO

La construcción del Carbon 12 permitió encapsular 132 toneladas de carbono.

La madera utilizada para la construcción proviene de los bosques de Columna Británica, incluyendo la madera de pinos muertos debido al ataque del escarabajo del pino de montaña, evitando así que esta madera terminara calcinada aumentando las emisiones de carbono y pudiendo ocasionar nuevos incendios en los bosques. Además se ha utilizado madera de abeto Douglas en las vigas, pilares y capas interiores de los paneles de CLT, un árbol de crecimiento rápido, nativos del oeste de los estados unidos y con poca necesidad de agua.



Fig 1.o. Render del Brocks common

3.2 Brocks common

El edificio Brock Common con 18 plantas y 54 m de altura forma parte del complejo Point Grey Campus de la UBC (University of British Columbia), ubicado al oeste de Vancouver, en Canadá. Fue programado para atender al uso de residencia de estudiantes en 2015, para proporcionarles viviendas asequibles. A su vez alberga usos recreativos y académicos para el campus, por lo que se encuentra dentro de la categoría C, residencial, en el código de construcción de Columbia Británica y con una categoría A-2, asamblea en los espacios de estudiantes.

En mayo de 2017, momento de su apertura, supuso el edificio de su categoría más alto del mundo, construido con estructura de madera. Este prototipo de la construcción en madera demostró la viabilidad de este material para edificios de gran altura, gracias al continuo estudio y desarrollo de las aplicaciones de la madera en masa para la construcción e ingeniería que se lleva a cabo en la UBC.

Es, además, el primer edificio residencial de madera construido en Norteamérica con la peculiaridad de estar compuesto por un sistema estructural híbrido que le ha permitido en función de la normativa vigente, cumplir con los códigos de construcción de la Columbia Británica basados en el código Nacional de construcción de Canadá. Cabe mencionar que la UBC, cuenta como una entidad jurídica propia por lo que goza de la jurisdicción sobre sus terrenos, edificios e infraestructuras de forma que funciona similar a un pequeño municipio.

El edificio cuenta con una superficie de 15.120 m² cuya huella es de 15m x 26 m, obteniendo un total de 840 m². La construcción del Brock Common duró 18 meses. Fue diseñado por el estudio Acton Ostry Architects Inc y costó 51.5 millones de \$. Cuenta con la certificación LEED GOLD ⁴⁷.

La fachada se prefabricó de forma modular formada por paneles con un sistema de protección contra la lluvia. La estructura de los paneles de la fachada es de acero y tiene una capa de revestimiento de fibra de vidrio, una capa de aislamiento térmico y climático de lana de roca semirrígida y el acabado exterior es de fibra de madera y el conjunto de las ventanas. El sellado de los paneles fue muy detallado para garantizar la estanquidad de estos y se aplicó calafateo en la parte inferior para reducir los fallos debidos a la intemperie.

El aislamiento interior, la barrera de vapor y la capa final de yeso se completaron in situ como parte del trabajo interior.

La cubierta del Brocks Common es de acero. Tras muchos estudios sobre la posibilidad de construirla con elementos prefabricados, se eligió este sistema debido a la posibilidad de que el agua dañara la superestructura de madera maciza.

Las vigas de acero se apoyan sobre los pilares de GLT y culmina con una cubierta tradicional SBS (estireno, butireno, estireno).. Esta combinación de cubierta tradicional y estructura prefabricadas requería que la cubierta se construyera con un índice de tolerancia mayor que la que marca la norma para garantizar la hermeticidad del sistema ⁴⁸.

ESTRUCTURA

La estructura híbrida del edificio esta formada de la siguiente manera: la cimentación, la planta baja, la segunda planta y los núcleos de ascensores y de escaleras son de hormigón, que proporciona la estabilidad mientras que la superestructura restante está construida con paneles prefabricados de CLT que se apoyan en madera laminada GLT y pilares de PSL con conexiones de acero y es la encargada de transportar las cargas verticales.

Se llevaron a cabo multitud de pruebas estructurales en las que se fueron testando elementos para un mejor desarrollo estructural. Se prestó especial interés a las cargas gravitatorias y laterales, por lo que se optó por un sistema híbrido.

Las cargas gravitatorias de las plantas 2-18 están compuestas por paneles de forjado de madera contra laminada.

El sistema de carga lateral está compuesto por los paneles de forjado y los núcleos de hormigón que transfieren las cargas directamente a la cimentación.

Los paneles de CLT tienen la peculiaridad de estar unidos a listones de madera contrachapada atornillados y unidos al panel, creándose así un único diafragma en cada una de las plantas para soportar las cargas laterales.

Las cargas laterales se resuelven de manera que se transfieren a los forjados, de estos a los núcleos de hormigón a través de conexiones de arrastre de acero localizadas en los bordes de los núcleos y en todo el perímetro del edificio y después de los núcleos a la cimentación.

El uso del núcleo de hormigón permitió que el edificio cumpliera con los requerimientos del código, ya que actúa como contrapeso del edificio frente a vuelco. El volumen de cimentación se ve reducido en relación con lo que habría sido habitual con una estructura completa de hormigón debido al menor peso propio de la estructura de madera, que se traduce en menor inercia y por tanto menor resistencia a vuelco durante un evento sísmico ⁴⁹.



Fig 1.1 Estructura de hormigón

Fig 1.2. Detalle de unión de los paneles de CLT con forjado

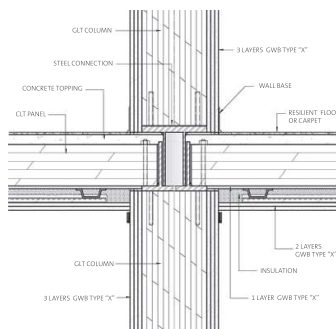


Fig 1.3. Estructura completa del edificio



FORJADOS

Se utilizan paneles de CLT de cuatro tamaños para permitir el solapamiento entre crujías y plantas de las capas de los paneles, siendo la crujía es de 4 x 2,85 m.

Los paneles de CLT de 5 capas tienen 169 cm de espesor con la peculiaridad de que las capas exteriores están tensadas a máquina y las capas interiores son de madera SPF y están unidas mediante adhesivo para la madera que cumple la norma CSA ⁵⁰.

PILARES

En el edificio existen tres tipos de pilares cuyas características varían en función de la ubicación y las cargas de éstos.

Pilares de GLT 265x265 mm a partir de la décima planta

Columnas de GLT de 265x265 mm en las plantas de la 2-9

Y columnas de PSL de 265x265mm en posiciones de alta tensión en el centro de las placas de suelo de las plantas 2-5.

Para transferir la carga directamente de los pilares a los forjados de CLT, los pilares se diseñan con conectores de acero, que se montan en taller para ahorrar tiempo en la puesta en obra.

Fig 1.4. Colocación manual de los pilares tras la elevación con grúa.



ELEMENTOS DE HORMIGÓN

La cimentación, los núcleos de escaleras y las losas de forjados de planta baja y segunda planta se llevaron a cabo mediante hormigón armado in situ.

La losa de la segunda planta establece el nexo entre la estructura de hormigón y la de madera maciza, transfiriendo las cargas de gravedad de la estructura superior de madera de los niveles superiores a la estructura inferior de hormigón.

Los núcleos de hormigón armado actúan como rigidizador de la estructura frente a cargas laterales de viento y sismo.

Se construyeron mediante un encofrado elevable de madera y acero formado por una caja de encofrado interior y otra de encofrado exterior que incluía una plataforma de seguridad para los trabajadores.

Se diseñó el sistema de encofrado en doble altura para que se pudiesen hormigonar varias plantas a la vez, lo que permitió un control más estricto de las tolerancias laterales de los núcleos independientes, incluyendo las tolerancias externas del hueco del ascensor.

La estructura de hormigón se concluyó antes de comenzar el montaje de la estructura de madera que permitió facilitar las labores de coordinación ya que se requería el uso de una grúa tanto para desmontar el sistema de encofrado como para empezar a montar la estructura de madera y el desplazamiento de estas estaba restringido debido a las dimensiones del área de actuación ⁵¹.

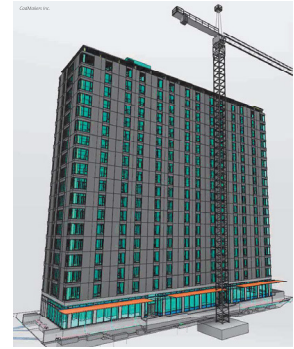


Fig 1.5. Modelo digital



Fig. 1.6. Encofrado núcleos de hormigón

MADERA MACIZA

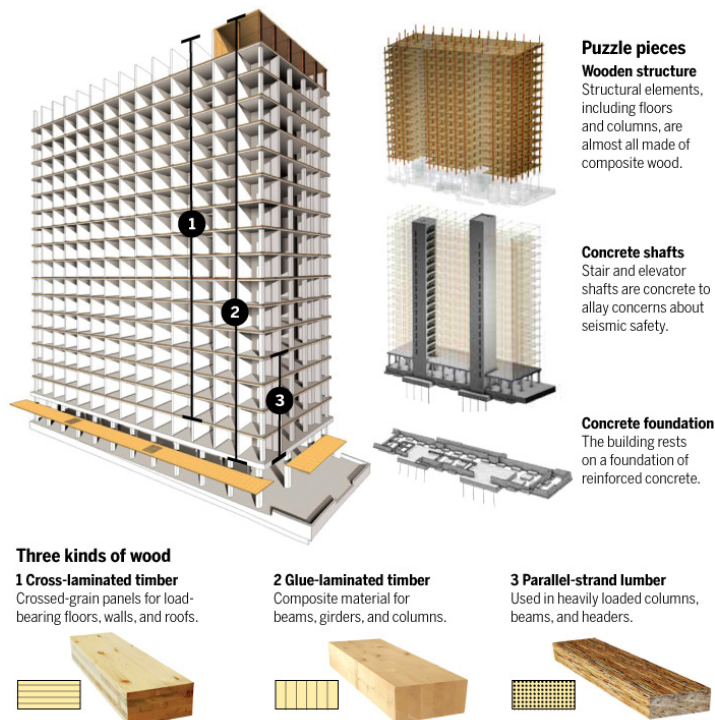


Fig 1.7 componentes de la estructura.

La estructura superior de madera en masa está formada por paneles de CLT para los forjados y pilares de madera laminada GLT y de madera paralela PSL con conexiones de acero ⁵².

El fabricante de los elementos de madera exportó el archivo enviado por el equipo de diseño del edificio como archivos geométricos STP de manera que se pudieron realizar ajustes teniendo en cuenta los procesos de fabricación, como el grosor de la sierra y para generar un modelo de fabricación que fuera utilizado directamente por las máquinas CNC. Éstas cortaron los paneles de CLT incluyendo los agujeros en los extremos de los pilares donde se insertarían los conectores de acero que se fabricaron por separado y se unieron en taller para tener un control minucioso de cada una de las piezas y reducir el tiempo de montaje en obra.

Para eliminar posibles errores de colocación cada pieza fue marcada con un identificador. Los camiones se cargaron de manera inversa a la colocación en obra de forma que se descargaban directamente a su lugar de colocación. Esta precisión en el montaje transporte y almacenamiento permitió no utilizar excesivo espacio para el acopio de materiales ya que la estructura entera se montó directamente sin descargarla previamente del camión reduciendo así el tiempo de montaje y la necesidad de operarios.

Los paneles de CLT se diseñaron de manera que el sistema de elevación estuviese integrado en el diseño, así, se realizaron en fábrica agujeros en los paneles para la elevación, para equilibrar la masa de cada panel en la instalación.

Los herrajes también se incorporaron en fábrica antes de su colocación de manera que uno de los extremos se pudiera alinear antes que el otro que solo requeriría de un puntero láser para su ajuste. Cuando el panel estaba en posición, las cadenas se soltaban y se colocaban los pernos para fijarlo.

Una vez estaban colocados los 29 paneles del forjado, se atornillaban las ranuras de madera de contrachapado entre los paneles para conectarlos todos en un solo diafragma.

El último paso fue atornillar las correas de arrastre a los paneles y se atornillaron a los núcleos de cada piso para transferir las cargas laterales del diafragma del forjado de CLT a los núcleos de hormigón.

Se distinguió en el montaje entre los pilares perimetrales y los interiores. Los perimetrales se colocaron mediante un equipo especial de montadores y los interiores se colocaron manualmente.

Todos los pilares de madera laminada se elevaron con la grúa y se colocaban manualmente por los operarios. La conexión de tubo de acero de cada columna superior se colocó dentro de la conexión de la columna inferior y se fijó con un pasador de acero.

El último paso antes de proceder a colocar la siguiente planta fue colocar las diagonales y los tirantes para evitar la rotación de los pilares ⁵³.

Para el montaje de la estructura de madera solo se necesitaron 9 personas trabajando.

Los paneles de CLT fueron protegidos frente al agua mediante una capa de sellador en fabrica. Los paneles se cubrieron durante el transporte y se les aplico una segunda capa de sellador en obra después de la instalación de los listones.

La cara superior de los forjados se cubrió con una capa de hormigón con un desfase de no mas de cinco plantas respecto a la ejecución de la planta.

El revestimiento de hormigón se utilizo con fines acústicos, pero también mejoraba parámetros como la resistencia al fuego y al agua.

FUEGO

A parte del recubrimiento de hormigón, se encapsulo cada placa de CLT con paneles de yeso tipo X y posteriormente se añadieron dos capas de yeso más durante los trabajos interiores ⁵⁴.

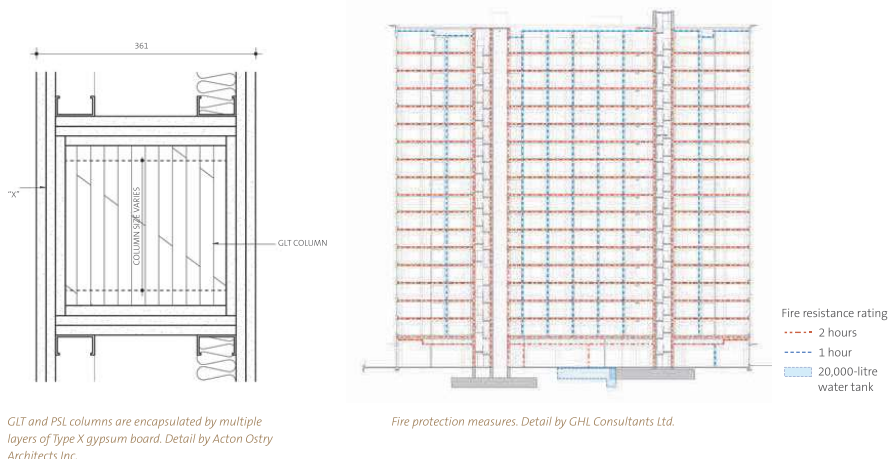


Fig 1.8. Pilares de GLT colocados

Fig 1.9. Encapsulado de los pilares de GLT frente al fuego

Fig 1.10. Comportamiento de la estructura frente al fuego

PREFABRICACIÓN

La prefabricación de la estructura en taller es una de las características principales de este tipo de edificios con estructura de madera. Por un lado, reduce el tiempo de ejecución de la obra y permite mayor precisión en la ejecución de cada pieza mientras que posibilita la reducción de residuos tanto en obra como en taller.

El modelo estructural del edificio fue transferido directamente al proveedor de madera maciza, lo que incluía los paneles de CLT, las vigas de PSL y los pilares de GLT. El fabricante de acero fue subcontratado por el proveedor de madera, de modo que el diseño y ejecución en taller de las conexiones de acero y las correas de arrastre fuese precisa, existiendo comunicación constante entre ambas partes.

Los componentes prefabricados se ordenaron y cargaron en camiones en orden inverso a las fases de construcción obtenidas del mo-

delo, de tal manera que los componentes se extraían con ayuda de la grúa directamente al lugar de colocación 55.

Fig. 1.11. Prefabricación, de los paneles de CLT

Fig. 1.12. Transporte y puesta en obra de los paneles de CLT

Fig. 1.13. Descarga del material en obra



Fig 1.14. Prefabricación de los paneles de fachada



FASES DE CONSTRUCCIÓN



Fig 1.15. Fases de la obra

Los núcleos de hormigón y las plantas primera y segunda se llevaron a cabo en 7 meses, durante los meses de invierno. Se construyeron en su totalidad debido a su carácter de núcleo estructural al que después se le fueron ensamblando el resto de los elementos de madera.

Pese a que los núcleos de comunicaciones verticales estaban contruidos, no se utilizó ningún ascensor de construcción durante el proceso, en su lugar la grúa desplazaba los materiales hasta los pisos superiores mediante una plataforma de carga en voladizo que se desplazada entre los pisos en función de las necesidades.

Al mismo tiempo, la estructura de madera maciza y los paneles de fachada se estaban construyendo en taller. Los propietarios del edificio quisieron utilizar elementos prefabricados en la medida de lo posible debido a las ventajas que aportan en tiempos de construcción.

El montaje de los paneles de CLT junto con la estructura de pilares de GLT duró 3 meses, por lo que se adelantó 2 meses respecto al tiem-

po previsto. Esto se debe a que el modelo virtual no tiene en cuenta la componente de aprendizaje humana en el proceso y es que a medida que se iba avanzando, los operarios se familiarizaban mas con el montaje, lo que les permitió gestionarlo de manera mas eficiente.

A medida que la obra avanzaba, se fueron estableciendo ajustes en los tiempos de enganche, por lo que, la planta 3 utilizó 7.3 horas de grúa mientras que la planta 18 utilizó 3.1 horas de grúa. Lo mismo ocurrió con la envolvente, la planta 2 tardó 12.7 horas de grúa y la planta 15 solo tardo 4,4 horas.

Esta variación en tiempos de montaje conforme avanzaba la construcción es una muestra del aprendizaje por parte del equipo en todo el proceso de construcción del edificio.

Se tardaba aproximadamente una semana en montar dos plantas de el edificio, lo que incluía el montaje de paneles de CLT vigas de columnas de GLT y el cerramiento prefabricado, el encapsulamiento de los componentes de madera con una capa de yeso y el vertido de un revestimiento de hormigón y la instalación del cerramiento prefabricado de todo el perímetro menos uno, para posibilitar el acceso de los materiales a cada planta, que se terminó al concluir la obra.

Los trabajos de acabados en interiores duraron 10 meses con una media de 13 personas trabajando por planta durante 65 días.

La planificación del modelo VDC se utilizo para crear una lista de componentes de los sistemas. Esto permitió que los trabajos relacionados con las instalaciones se realizaran fuera de obra, incluyendo el montaje previo de los equipos de la sala de máquinas, el corte de los conductos y tuberías y demás componentes de los sistemas. Esta fase concluyó en menos de un mes en vez de 3 o 4 meses que hubiera sido lo habitual en este tipo de edificios ⁵⁶.

AHORRO DE CARBONO

El edificio cuenta con la certificación LEED oro y utiliza el sistema de energía de la UBC. Con la construcción del Brocks Common, se consigue encapsular 2.563 toneladas de carbono, el equivalente a 490 coches en carretera durante un año.



Fig 2.o. Render del Hoho building

3.3 HOHO BUILDING

El edificio HOHO con 24 plantas y 84 m de altura forma parte de un conjunto de edificios de 9, 15 y 23 plantas, con dos sótanos y un edificio secundario de 5 plantas sobre rasante, ubicado en el centro de Urban Lakeside en el noroeste de la ciudad de Viena, Austria, en un barrio residencial rodeado de edificios de menor altura.

El uso mixto del edificio incluye espacios de trabajo, restaurantes, apartamentos y lugares de ocio.

Los trabajos de construcción del edificio comenzaron en 2016 y terminaron en 2019, momento en el cual superó en altura al que hasta entonces había sido el edificio más alto del mundo con estructura de madera, el edificio Brock Commons.

El edificio tiene una superficie de 25.000 m². Fue diseñado por el estudio RLP Rüdiger Lainer + Partner y costó 65 millones de dólares. Cuenta con una certificación LEED ORO (Leadership in Energy and Environmental Design). Los puntos significativos para obtener esta certificación son: protección contra el fuego, eficiencia energética, costos del ciclo de vida y eficiencia energética entre otros. Para optar a esta certificación, toda la madera procesada para la construcción debe provenir de bosques de gestión sostenible con certificación PEFC (Programme for the Endorsement of Forest Certification o Programa de reconocimiento de certificación forestal).

ESTRUCTURA

El 75% del edificio estará construido con madera, para cumplir con el código de construcción vigente, que prohíbe construir edificios de más de 15 plantas únicamente con madera.

Se divide en tres partes: la estructura soporte principal de madera, los forjados que se encargan de transferir las cargas de cada piso y la madera de borde que compone el cerramiento.

El núcleo soporte que corresponde a las comunicaciones verticales se hizo de hormigón in situ y se revistió con paneles de CLT.

El sistema de forjado se resolvió con paneles de CLT.

Para posibilitar mayor libertad en planta se estableció un sistema mixto con la peculiaridad de contar con una viga perimetral de hormigón prefabricada en cada planta.

La unión entre el panel de CLT y la viga perimetral de hormigón de borde se realiza mediante ensamblaje “nodo del sistema” en el cual se realizan anclajes a tracción vertical desde la cimentación hasta el último piso y también se ancla horizontalmente en los paneles de CLT de forjado. Los anclajes de los paneles de CLT con la viga perimetral se dividen en dos clases: amarres de borde periférico y los anclajes internos, componiendo una losa de madera resistente.

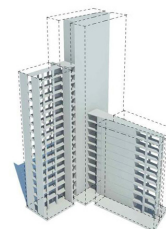


Fig 2.1. Componentes



Fig.2.3. Componentes de la estructura

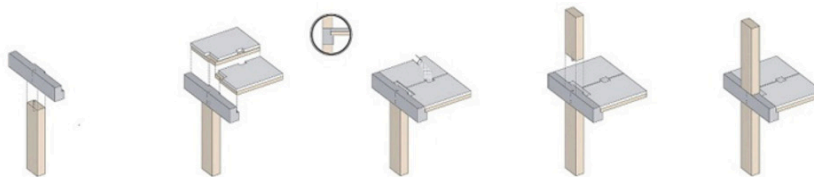


Fig. 2.3
Nudo del sistema

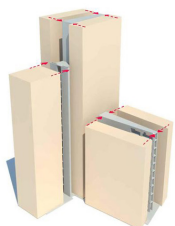


Fig.2.4. Componentes



Fig. 2.5. Montaje de
elementos de borde

MADERA DE BORDE

Los elementos de borde o envolvente del edificio son paneles de CLT. Se consideran elementos secundarios de la estructura ya que no soportan cargas. Están unidos a la estructura primaria de manera que únicamente soportan cargas locales de viento, su peso propio y el de los elementos de la fachada.

FACHADA

El cerramiento de fachada de CLT prefabricado en fabrica viene con las carpinterías y todas las capas instaladas para facilitar el montaje. Las dimensiones del cerramiento son de 4.8m se ancho, distancia correspondiente a la distancia entre pilares y 3,2 m de alto.

El montaje del cerramiento se llevaba a cabo una vez concluido el piso inferior, de manera que se colocaban los elementos de la envolvente sobre la viga perimetral de hormigón prefabricado y una vez concluida toda la fachada se procedía a colocar la siguiente viga de hormigón y sobre esta los paneles de forjado de CLT. Después se unirán milimétricamente entre sí.

MADERA VISTA

Uno de las principales ideas de proyecto era mantener vista la estructura de madera y prescindir de revestimientos. Estas decisiones planteaban problemas frente al fuego y frente al ruido que se tuvieron que estudiar en detalle. Así se construye un núcleo estructural principal de madera para posibilitar los objetivos previamente nombrados. Las paredes expuestas al interior se tratan mediante una protección a base de agua y control de amarilleo y contra la suciedad y las maschas.



Fig 2.6. imagen de l interior del edificio, acabado de la madera.

FUEGO

Respecto a la protección frente al fuego, se resolvió mediante áreas de sectorización y rutas de escape de mayor tamaño y sistemas automáticos de extinción de incendios.

Se desarrollo un sistema de juntas en las áreas de conexión.

La conexión “nodo del sistema” se probó frente al fuego durante 90 minutos, en los que se obtuvo una profundidad de carbonización de 4 cm en la junta de los soportes de los paneles de CLT de techo y 6,6 cm en el panel que correspondían a una velocidad de carbonización de 0,73 mm/min, lo que correspondía de manera similar a los cálculos teóricos.

SONIDO

Para solucionar los problemas frente al ruido, se diseñaron cortes en la estructura, tanto en el techo como en la fachada, de manera que se desacoplaba el sonido en las paredes interiores entre usos adyacentes distintos ⁵⁷.



Fig. 2.7. Discontinuidad de la estructura y la fachada para desacoplar el sonido.

DATOS SOBRE EL PROYECTO

Se suministraron 400 m³ de gluglam y 14.400 m² de madera contralaminada.

Los pilares prefabricados de madera laminada llegan a la obra listos para colocar. Se trata de elementos compuestos equipados con barras de acero de refuerzo que se insertan directamente en obra en los elementos prefabricados de hormigón. Las dimensiones de los pilares utilizados van desde los 400 x 400 mm² hasta los 400 x 1240 mm².

En cuanto a madera laminada correspondiente a las vigas, fueron necesarias 777 de la clase con mayor resistencia y calidad visual.

AHORRO DE CARBONO

La producción de dióxido de carbono de un edificio de 20 plantas construido con estructura de hormigón es de 1.200 toneladas. Su equivalente en madera, permite encapsular aproximadamente 3.100 toneladas, lo que serían 900 coches en la carretera durante un año.



Fig 3.o. Render de la torre Mjosta

MJOSTA TOWER

La torre Mjosta con 18 plantas y 81 m de altura, 85,4 m contando con la pérgola de coronación de la torre, se concibe como una de las torres con estructura de madera más altas del mundo.

Es el sucesor del edificio Treet, terminado en Bergen en 2014 de 51m de altura.

Está ubicado en el lago Brummundall en Noruega.

La construcción finalizó en el año 2019 y se inspiró en el Acuerdo Climático de París, con la idea principal de transmitir el mensaje de que se puede construir con madera edificios de gran altura contribuyendo así a la mejora del estado del planeta.

El edificio de uso mixto, cuenta con una superficie de 11.300 m² e incluye apartamentos, hotel, restaurante y una piscina fue diseñado por el estudio Voll Architecture.

ESTRUCTURA

La estructura de la torre destaca por la construcción del núcleo de CLT a diferencia de otros ejemplo vistos anteriormente. La cimentación y algunos forjados están contruidos con hormigón. Las vigas, pilares y diagonales para arriostrar el edificio son de madera laminada. Los paneles de fachada se traen de fabrica en tramos de 1 planta de entre 12 y 15 metros de largo.

PILARES

Toda la estructura está compuesta por pilares, vigas y diagonales de madera laminada encolada. Las diagonales atraviesan varias plantas de altura.

Las dimensiones de los pilares interiores y de esquina difieren entre sí, mientras que los interiores tienen unas dimensiones de 725 mm x 810 mm y 625 mm x 625 mm, los de esquina tienen casi el doble en una de las direcciones: 1485 mm x 625 mm.

FORJADOS

Se distinguen los forjados por plantas. De las 18 plantas del edificio, las 10 primeras se construyen con madera laminada, madera microlaminada y madera aserrada y salvan 7,5 m de luz. Llegan a la obra en paneles con aislamiento de lanada de roca y una membrana protectora de PVC en la cara superior. Esto hace que tengan una resistencia al fuego de R90. Los 7 forjados siguientes son de hormigón, para

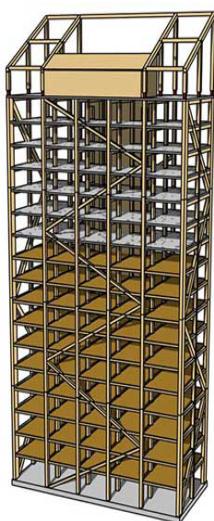


Fig. 3.1 Estructura de la torre Mjosta

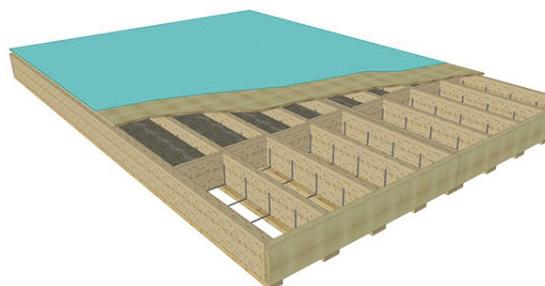


Fig. 3.2. Sistema de forjado.

aportar mas peso a la estructura del edificio y reducir las oscilaciones debidas al viento en la parte superior de la torre.

CARGAS

La construcción de edificios en madera con estas características trae consigo ciertos problemas a resolver. Uno de ellos fue cómo hacer frente a las fuerzas horizontales ocasionadas por el viento. Estas se solucionan mediante unas vigas diagonales que atraviesan varias plantas y con el núcleo de comunicaciones verticales de CLT.

Durante la construcción de la torre se instalaron acelerómetros para medir como se comportaba el edificio y para obtener información sobre el comportamiento del edificio.

Posteriormente, a medida que el esqueleto este terminado, estos acelerómetros se retiraran y se colocaran anemómetros para monitorizar el edificio con el objetivo de ver como se comporta en su totalidad y poder contrastar los datos con los del esqueleto estructural. Se midió que el desplazamiento máximo en la última planta del edificio es de 140 mm ⁵⁸.

FUEGO

«El uso de madera en las estructuras de carga puede reducir las emisiones de la producción de materiales hasta en un 85 por ciento», dice el asesor ambiental y arquitecto Bård S. Solem

“El proyecto es una contribución importante para hacer que la industria de la construcción internacional sea más respetuosa con el medio ambiente. «Cuando se prueba y se documenta que se puede construir un edificio de madera más alto que lo que antes se creía posible, no hay duda de que se trata de una ingeniería de clase mundial» afirma el director Sverre Tiltnes lo apoyó en Bygg21 designado por el gobierno.

Uno de los principales retos con los que cuentan los edificios de madera es la protección frente al fuego. En Noruega, se prohibió hasta 1997 la construcción en madera de edificios de más de tres plantas. Por este motivo se realizaron minuciosos estudios para conseguir que la torre fuese segura.

Se tomaron las siguientes decisiones:

La estructura de madera laminada (glulam) está sobredimensionada en volumen para que en caso de incendio conserve la capacidad portante. También, se ha diseñado de tal manera que el fuego en una parte de la estructura pueda llegar hasta la siguiente.

Sistema de rociadores: cuenta con un suministro adicional independiente y esta dimensionado para proporcionar un mayor volumen de agua. El edificio está cubierto tanto por dentro como por fuera de este sistema que, gracias a los avances, cuenta con una monitorización muy precisa.

Acceso de bomberos: el edificio cuenta con una sala de control cuya alarma se comunica directamente con el parque de bomberos.

Tiras contra incendios: El punto más inestable frente al fuego en este tipo de construcciones de madera está paradójicamente en las uniones de acero. En este caso se colocaron bandas de un material intumescente que se expandía 20 veces cuando se alcanzaban los 150°C

59.

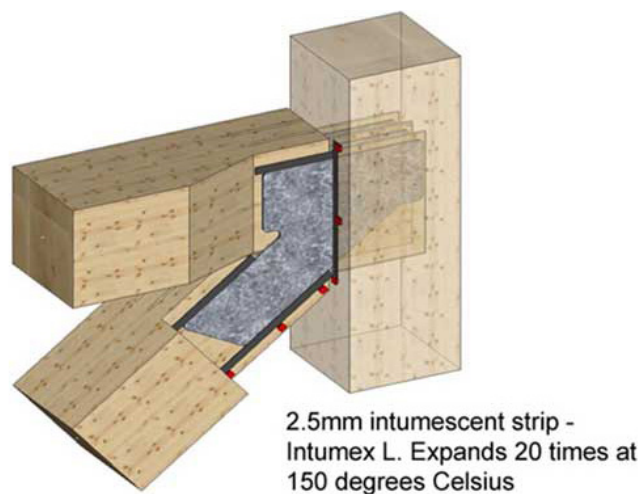


Fig. 3.3. detalle de junta para protección frente a incendios en uniones metálicas.

Celdas de incendio: el edificio se ha sectorizado de tal manera que cada zona individual de vivienda o habitación de hotel constituya una zona sectorizada independiente que evita que el fuego se propague.

Protección de la fachada: se ha tratado con un material ignífugo y se las cavidades de la fachada se han independizado en cada planta, rompiendo la continuidad.

Se utilizó madera laminada encolada, formada por varias capas y unidas con adhesivos duraderos resistentes a la humedad. Las vigas ignífugas de madera laminada encolada (glulam) forman una barrera de carbón que detiene al fuego, de manera que la estructura se mantiene intacta. También gracias a las grandes dimensiones de las vigas, en caso de incendio conservan su capacidad de carga.

PUESTA EN OBRA

En construcciones previas por parte de la compañía encargada del suministro de madera laminada, la estructura del edificio se había montado en taller para comprobar que todas las piezas encajaban perfectamente. En la torre Mjosta, gracias al diseño mediante modelos virtuales, se tomó la decisión de llevar las piezas directamente a obra para su montaje in situ. A diferencia de otras construcciones de este tipo, la torre avanzaba en fracciones de cuatro pisos. Las vigas y pilares de madera laminada llegaban a la obra y se montaban en bloques de cuatro plantas en el suelo, después la grúa elevaba el bloque hasta su posición final. Después, se montaban los forjados y se colo-

caban los paneles de la envolvente, prefabricados en taller y se cerraba por completo esa fase.

De los varios centenares de piezas que componían el edificio, durante la puesta en obra solo una no encajaba bien, por lo que tuvo que devolverse a taller y volver a fabricarla, lo que tardó una semana y no causó retrasos en la obra.

Los paneles de fachada se traen de fabrica en tramos de 1 planta de entre 12 y 15 metros de largo.

Durante la puesta en obra, el esqueleto de madera estuvo expuesto a la intemperie. Se observó que la madera aguantaba bien estos cambios, aunque los extremos de los muros, pilares y diagonales se protegieron temporalmente con láminas de plástico o placas de madera. Los elementos de forjado también se protegieron con una membrana protectora.

En este proceso se controló el nivel de humedad de la madera en varios puntos y profundidades para obtener datos del comportamiento de la madera. Al acabar cada fase se distribuía aire caliente para secar cualquier resquicio de humedad en la estructura de forma controlada.

De esta experiencia se extrajo que, pese a que la madera del esqueleto estructural aguanta bien la exposición a la intemperie, los paneles de forjado se tendrían que haber protegido mejor utilizando cinta adhesiva o epoxi, ya que absorben agua a lo largo de los bordes ⁶⁰.



Fig.3.4. Recepción en obra de pilares de tres plantas.

Fig.3.5 .Montaje de tramo de tres plantas para posterior colocación con grúa

GRÚA

Para la construcción de la torre se utilizó una grúa y elevadores de cubierta. El uso del andamiaje para este tipo de montaje no fue necesario. La estructura de madera venía con un andamio mástil instalado que facilitó el trabajo.

Fig.3.6. Elevación de la estructura con grúa.



AHORRO DE CARBONO

La madera utilizada para su construcción se produjo en una fábrica de madera laminada a menos de 15 km de la obra. El resto de los materiales también se suministraron por parte de proveedores locales.

CONCLUSIONES

Los edificios anteriormente estudiados tienen la característica común de ser construcciones principalmente con madera y en altura. Además, todos optan por el uso del CLT para la ejecución de los forjados, así como de vigas y pilares de madera laminada.

Cada uno de estos edificios representa un prototipo en esta nueva naturaleza constructiva. Se aprecia la capacidad de aprendizaje que se ha obtenido del análisis de este sistema en cuanto a agilidad de construcción y uso de distintos elementos. Se puede observar cómo, el Carbon 12, tarda en construirse el mismo tiempo que el Brock common, teniendo este último casi el doble de altura que el primero y casi cuatro veces su superficie.

El uso del CLT se ve disminuido debido al requerimiento de plantas diáfanas que posibiliten distribuciones más libres respecto a los usos que se van a albergar, siendo este uno de los puntos débiles del CLT. Sin embargo, se utiliza un alto volumen de este material en todos los edificios. Constituye un buen aliado estructural para la construcción de forjados, que permite libertad formal en planta debido a su prefabricación puesto que se corta en taller con la forma que se desee. También, es aplicable a muros estructurales, motivo por el cual edificios como el Mjosta tower lo han aplicado para la construcción de su núcleo estructural que se encarga de rigidizar la estructura.

Los sistemas de entramados de madera laminada están presentes en todos los edificios. Representan un alto porcentaje estructural respecto a otros sistemas como el núcleo rigidizador de la estructura o los paneles de CLT. Esto beneficia en varias cuestiones.

Desde la fabricación en taller, el control de calidad está garantizado. Los materiales recibidos en taller deben cumplir unos requisitos específicos que están recogidos en los códigos normativos de cada país. Tras la recepción, las fases de fabricación se llevan a cabo mediante maquinaria especializada, que asegura la eliminación de posibles errores humanos en el proceso. Además, debido a que este tipo de sistemas de entramados de vigas y pilares suelen contar con uniones metálicas, se da la posibilidad de llevar a cabo este tipo de uniones en taller, como en el edificio Brock Commons por ejemplo en el que gracias al trabajo coordinado de los agentes en el proceso de diseño, las uniones metálicas y las vigas y pilares de madera laminada se terminaron en taller, de modo que se reducen los tiempos de ejecución y la necesidad de mano de obra garantizando de la misma manera un control de calidad riguroso.

Estructuralmente y en comparación con otros sistemas constructivos con madera, como el sistema de paneles de CLT, el uso de entramado de vigas y pilares de madera laminada para la estructura vertical beneficia a la hora de ejecutar la cimentación ya que, al contar con un peso propio reducido, implica la necesidad de un menor volumen de hormigón. Sin embargo, en edificios en altura, puede constituir un inconveniente para contrarrestar los esfuerzos producidos por cargas de viento. En la torre Mjosta, por ejemplo, se tomó la decisión de construir los 7 forjados superiores con hormigón para poder contrarrestar estas cargas. Sin embargo, el reducido peso propio de la estructura y la flexibilidad de esta también mejora la reacción frente a sismo.

Todos los edificios estudiados tienen cimentación de hormigón, dado que es el material que mejores características posee en relación con cómo se acomoda al terreno y como se relaciona con químicamente. Ofrece mejores garantías en la ejecución frente a terrenos poco estables y es el único que posibilita la ejecución de cimentaciones profundas.

El entramado utilizado en todos los edificios es de madera laminada. Se han llevado a cabo estudios en los que se investiga el posible uso de la madera contralaminada para la fabricación de pilares pero debido a su composición estructural en una dirección, la madera laminada trabaja de forma más eficiente en este sentido.

Espacialmente también representa una alternativa interesante. Permite obtener una libertad en planta que los sistemas de paneles o de entramado ligero por ejemplo no permiten, de manera que resulta una buena opción para programas públicos en los que se necesitan espacios continuos de mayores dimensiones.

Las uniones son un punto clave en este tipo de sistemas. Sobre como unir los entramados de madera laminada con forjados de CLT se sigue investigando. El tipo de encuentro se relaciona directamente con como las cargas se van a transmitir a los forjados inferiores y de ellos al resto de la estructura. Se están desarrollando nuevos tipos de encuentros que debido a su geometría y por tanto al modo de transmitir las cargas, permiten obtener luces de hasta 7 metros con pilares de madera laminada y forjados de madera contralaminada.

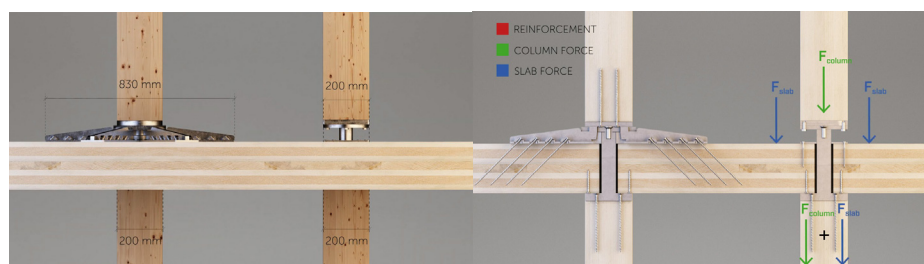


Fig.3.7. Sistemas de unión pilar GLT con forjado CLT

También representan un punto crítico frente al fuego. En el caso de la torre Mjosta, estas uniones son embebidas por la propia madera y cuentan con una junta ignífuga en su interior, que, en caso de incendio, se hincha evitando que el fuego siga su paso por el edificio.

Ahora bien, todos estos ejemplos constituyen prototipos que visibilizan la necesidad de construir de forma más eficiente climáticamente hablando, pero, sin embargo, siguen dependiendo de materiales que no lo son. Las exigencias de los códigos de construcción vigentes en cada país dificultan la posibilidad de que los próximos edificios sean íntegramente de madera. Esto plantea nuevos retos para la ingeniería de materiales.

La demanda de distintos materiales dentro de este tipo de construcciones se ve, sobre todo, en la rigidización de la estructura, como elemento al que se le transfieren todas las cargas para su descanso en la cimentación. En esta parte también intervienen significativamente los encuentros, tanto entre los elementos de madera como entre estos con las estructuras de acero u hormigón. Estos suelen ser metálicos y suponen uno de los puntos críticos frente al fuego. El modo resolutivo de estos encuentros describe una de las grandes dificultades de este tipo de edificios.

Bibliografía y recursos digitales

- [1] OVACEN web, El hormigón: el material mas destructivo de la tierra. (<https://ovacen.com/hormigon-material-destructivo-tierra/>)
- [2] GREEN, Michael. Amor, risas, sushi: el derecho a la vivienda y el cambio climá-tico. TED video, min 10:40, 2011. (<https://www.youtube.com/watch?v=emdSuaY9npE&t=636s>)
- [3] OVACEN web, El hormigón: el material mas destructivo de la tierra. (<https://ovacen.com/hormigon-material-destructivo-tierra/>)
- [4] GREEN, Michael. Amor, risas, sushi: el derecho a la vivienda y el cambio climá-tico. TED video, min 11:04, 2011. (<https://www.youtube.com/watch?v=emdSuaY9npE&t=636s>)
- [5] GREEN, Michael. Amor, risas, sushi: el derecho a la vivienda y el cambio climá-tico. TED video, min 7:34, 2011. (<https://www.youtube.com/watch?v=emdSuaY9npE&t=636s>)
- [6] Boletín oficial del estado, DIRECTIVA 2010/31/UE DEL PARLAMENTO EURO-PEO Y DEL CONSEJO de 19 de mayo de 2010 (<https://www.boe.es/doue/2010/153/L00013-00035.pdf>)
- [7] European Commission, Nearly zeroenergy buildings, Publicado: 31 Julio 2014, Última actualización: 12 marzo 2020 (https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/nearly-zero-energy-buildings_en)
- [8] Definición embodied energy. Extraído de Sciencedirect.com – Embodied- energy (<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/embodied-energy>)
- [9] Características del CLT extraídas de finsa.com- CLT- Características (https://www.finsa.com/cs/Satellite?d=Touch&idiomaNav=es_ES&c=CP_Producto_C&pagename=FN_CatalogoProductos/CP_Producto_C/CP_PTPProductoDetalle&cid=1426726545989)
- [10] <https://maderaestructural.wordpress.com/2018/02/08/clt-el-estado-del-arte-parte-ii/>
- [11] EGOIN, Prontuario Técnico para la construcción con Paneles de Madera Lami-nada EGO CLT, marzo 2016. (<https://egoin.com/wp-content/uploads/2017/04/PRONTUARIO-TECNICO-PANELES-CONTRALAMINADOS-CLT.pdf>)

- [12] CTE, DB-SI, Código técnico de la edificación. Documento Básico, Seguridad en caso de incendio. (<https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/SI/DBSI.pdf>)
- [13] GREEN, M.; TAGGART, J. Tall Wood Buildings: Design, Construction and Performance. Boston: Birkhäuser, 2017. ISBN 9783035604757. Non-Encapsulated Construction, Pág. 43.
- [14] MADEREA web- madera y fuego (<https://www.maderea.es/maderayfuego/>)
- [15] U.S Green Building Council web – LEED rating system (<https://www.usgbc.org/leed>)
- [16] Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura. El estado de los bosques del mundo: los bosques, la biodiversidad y las personas. ISBN978-92-5-132421-9. 2020
- [17] El País web. El mundo se rinde a los rascacielos de madera. Sandra López Letón. 23 marzo 2019. (https://elpais.com/economia/2019/03/21/actualidad/1553167229_981390.html)
- [18] <http://habitat.aq.upm.es/boletin/n4/lista.html>
- [19] FERNANDEZ Forcada, Mario. La madera contralaminada como alternativa en sistemas de baja energía estructural, Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. 2015
- [20] MADEREA, ¿que son los entramados ligeros de madera? (<https://www.maderea.es/que-son-los-entramados-ligeros-de-madera/>)
- [21] GREEN, M.; TAGGART, J. Tall Wood Buildings: Design, Construction and Performance. Boston: Birkhäuser, 2017. ISBN 9783035604757. Non-Encapsulated Construction, Pág. 62.
- [22] MADERA Y CONSTRUCCIÓN web. Las diez claves para dominar el diseño de los edificios de CLT. (<https://maderayconstruccion.com/las-diez-claves-para-dominar-el-diseno-de-edificios-de-clt/>)
- [23] GREEN, M.; TAGGART, J. Tall Wood Buildings: Design, Construction and Performance. Boston: Birkhäuser, 2017. ISBN 9783035604757. Non-Encapsulated Construction, Pág. 100.
- [24] MADERA Y CONSTRUCCIÓN web. Las diez claves para dominar el diseño de los edificios de CLT. (<https://maderayconstruccion.com/las-diez-claves-para-dominar-el-diseno-de-edificios-de-clt/>)
- [25] GREEN, M.; TAGGART, J. Tall Wood Buildings: Design, Construction and Performance. Boston: Birkhäuser, 2017. ISBN 9783035604757. Non-Encapsulated Construction, Pág. 134.
- [26] Sourza, Eduardo, ArchDaily, Madera Laminada Cruzada (CLT): qué es y cómo usarla, (<https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/893804/madera-laminada-cruzada-que-es-y-como-usarla>)

- [27] FINSA, soluciones en madera. Soluciones constructivas. Guia General. 2020. Pág. 46
- [28] Juárez Montilla, Carmen. Madera vs. Hormigón: fortalezas y debilidades en su uso estructural. Trabajo de fin de grado. UPM, 2020. Pág 14
- [29] FINSA, soluciones en madera. Soluciones constructivas. Guia General. 2020. Pág. 50
- [30] EGOIN, Prontuario Técnico para la construcción con Paneles de Madera Lami-nada EGO CLT, marzo 2016. Pág 19. (<https://egoin.com/wp-content/uploads/2017/04/PRONTUARIO-TECNICO-PANELES-CONTRALAMINADOS-CLT.pdf>)
- [31] EGOIN, Construcción en madera. Pág 5. (<https://egoin.com/wp-content/uploads/2017/03/catalogo-clt-egoin.pdf>)
- [32] EGOIN, Construcción en madera. Pág 5. (<https://egoin.com/wp-content/uploads/2017/03/catalogo-clt-egoin.pdf>)
- [33] EGOIN, Construcción en madera. Pág 5. (<https://egoin.com/wp-content/uploads/2017/03/catalogo-clt-egoin.pdf>)
- [34] GREEN, M.; TAGGART, J. Tall Wood Buildings: Design, Construction and Performance. Boston: Birkhäuser, 2017. ISBN 9783035604757. Wood and fire, Pág. 42.
- [35] <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.139>, Pág.1
- [36] <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.139>, Pág.2
- [37] <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.139>, Pág.9
- [38] <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.139>, Pág.9
- [39] <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.139>, Pág.9
- [40] ANDRÉS Fernández, Ángel. Edificación en altura con CLT: Soluciones constructivas. Trabajo de fin de grado. UPM. Pág. 25.
- [41] <https://www.thinkwood.com/projects/brock-commons-tallwood-house>
- Think wood-brock Commons Tallwood House- Case Studies – Brock Commons – Construction overview
- [42] <https://buildingcarbon12.com/wood/>
- [43] Building Carbon 12, web.] Building Carbon 12 – Design and approval (<https://buildingcarbon12.com/design-and-approval/>)
- [44]] Building Carbon 12, web.] Building Carbon 12 – Construction (<https://buildingcarbon12.com/construction/>)
- [45]] ANDRÉS Fernández, Ángel. Edificación en altura con CLT: Soluciones constructivas. Trabajo de fin de grado. UPM. Pág. 25.
- [46] Building Carbon 12, web.] Building Carbon 12 – Construction (<https://buildingcarbon12.com/construction/>)

- [47] Think wood-brock Commons Tallwood House- Case Studies – Brock Commons – Code Compliance Pág 2, (<https://www.naturallywood.com/resource/brock-commons-tallwood-house-code-compliance-case-study/>)
- [48] Think wood-brock Commons Tallwood House- Case Studies – Brock Commons – Construction overview, Pág 18. (https://www.naturallywood.com/wp-content/uploads/2020/08/brock-commons-construction-overview_case-study_naturallywood.pdf)
- [49] Brock-commons-storyboards_factsheet_naturallywood (https://www.naturallywood.com/wp-content/uploads/2020/08/brock-commons-storyboards_factsheet_naturallywood.pdf)
- [50] Think wood-brock Commons Tallwood House- Case Studies – Brock Commons – Construction overview, Pág 11. (https://www.naturallywood.com/wp-content/uploads/2020/08/brock-commons-construction-overview_case-study_naturallywood.pdf)
- [51] Think wood-brock Commons Tallwood House- Case Studies – Brock Commons – Construction overview, Pág 12. (https://www.naturallywood.com/wp-content/uploads/2020/08/brock-commons-construction-overview_case-study_naturallywood.pdf)
- [52] Think wood-brock Commons Tallwood House- Case Studies – Brock Commons – Construction overview, Pág 12. (https://www.naturallywood.com/wp-content/uploads/2020/08/brock-commons-construction-overview_case-study_naturallywood.pdf)
- [53] Think wood-brock Commons Tallwood House- Case Studies – Brock Commons – Construction Modelling, Pág 6. (https://www.naturallywood.com/wp-content/uploads/2020/08/brock-commons-construction-modelling_case-study_naturallywood.pdf)
- [54] Think wood-brock Commons Tallwood House- Case Studies – Brock Commons – Code Compliance, Pág 13. (https://www.naturallywood.com/wp-content/uploads/2020/08/brock-commons-code-compliance_case-study_naturallywood.pdf)
- [55]] Think wood-brock Commons Tallwood House- Case Studies – Brock Commons – Construction Modelling, Pág 8. (https://www.naturallywood.com/wp-content/uploads/2020/08/brock-commons-construction-modelling_case-study_naturallywood.pdf)
- [56] Think wood-brock Commons Tallwood House- Case Studies – Brock Commons – Construction overview, Pág 8. (<https://www.naturallywood.com/wp-content/uploads/2020/08/brock->

commons-construction-overview_case-study_naturallywood.pdf)

[57] <https://maderayconstruccion.com/hoho-viena-construccion-hibrida-a-la-vista/>

[58] <https://www.forestalmaderero.com/articulos/item/noruega-construira-el-edificio-de-madera-mas-alto-del-mundo.html>

[59] <https://www.moelven.com/globalassets/moelven-limtre/mjostarnet/mjostarnet---construction-of-an-81-m-tall-timber-building.pdf>

[60] <https://www.forestalmaderero.com/articulos/item/noruega-construira-el-edificio-de-madera-mas-alto-del-mundo.html>

Procedencia de las ilustraciones

Fig 0.0: gráfico de elaboración propia a partir de datos extraídos de Fernández Forcada, Mario, *La madera contralaminada como alternativa en sistemas de baja inercia estructural*, tesis doctoral de la universidad Politécnica de Valencia.

Fig. 0.1: modos de rotura de columna de GLT, tomada de <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.139>, Pág.8

Fig. 0.2: modos de rotura de columna de CLT, tomada de <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.139>, Pág.9

Fig.0.3: Tabla resumen de los casos de estudio. Elaboración propia

Fig. 0.4: Render del Carbon 12, tomada de <https://www.archdaily.com/872219/path-architectures-catalytic-condominium-in-portland-is-the-tallest-timber-building-in-the-us> _ Ruta: Archdaily- Architecture news - PATH Architecture's Catalytic Condominium in Portland is the Tallest Timber Building in the US

Fig. 0.5: Estructura del Carbon 12, tomada de <https://www.windowswear.com/a-mass-timber-tower-rises-in-portland-urban-land/>

Fig. 0.6: Encuentros entre pilares y forjados, tomada de <https://buildingcarbon12.com/design-and-approval/>

Fig. 0.7: Planta del edificio, tomada de <https://www.carbon12pdx.com/units>

Fig. 1.0: Render del Brocks Common, tomada de <https://www.actonstry.ca/project/brock-commons-tallwood-house/> Fuente: Acton Ostry Architects Inc

Fig. 1.1: Estructura de hormigón, tomada de https://cwc.ca/wp-content/uploads/2019/03/CS-BrockCommon.Study_.23.pdf Brock Commons Tallwood House, University of British Columbia, Vancouver Campus. The advent of tall wood structures in Canada. A case of study. Pág. 5

Fig. 1.2: detalle de unión de los paneles de CLT con forjado, tomada de <https://www.naturallywood.com/resource/brock-commons-tallwood-house-code-compliance-case-study/>

Think wood-brock Commons Tallwood House- Case Studies – Brock Commons – Code Compliance – Pág. 9

Fig. 1.3: estructura completa del edificio, tomada de <https://www.naturallywood.com/resource/brock-commons-tallwood-house-code-compliance-case-study/>

Think wood-brock Commons Tallwood House- Case Studies – Brock Commons – Code Compliance – Pág. 9

Fig. 1.4: Colocación manual de los pilares tras elevación con grua, tomada de <https://www.thinkwood.com/projects/brock-commons-tallwood-house> Think wood-brock Commons Tallwood House- Case Studies – Brock Commons – Construction Modelling – Pág. 10

Fig. 1.5: modelo digital, tomada de <https://www.thinkwood.com/projects/brock-commons-tallwood-house>

Think wood-brock Commons Tallwood House- Case Studies – Brock Commons – Design Modelling – Pág. 5 _ CadMakers Inc.

Fig. 1.6: encofrado núcleos de hormigón, tomada de <https://www.thinkwood.com/projects/brock-commons-tallwood-house>

Think wood-brock Commons Tallwood House- Case Studies – Brock Commons – Construction overview – Pág. 13 – Fuente: Azadeh Fallahi

Fig. 1.7: componentes de la estructura, tomada de <https://www.sciencemag.org/news/2016/09/would-you-live-wooden-skyscraper>

Fig. 1.8: pilares de GLT colocados, tomada de <https://www.thinkwood.com/projects/brock-commons-tallwood-house>

Think wood-brock Commons Tallwood House- Case Studies – Brock Commons – Construction overview – Pág. 23 – Fuente: Bruder

Fig. 1.9: encapsulado de los pilares de GLT frente al fuego, tomada de <https://www.thinkwood.com/projects/brock-commons-tallwood-house>

Think wood-brock Commons Tallwood House- Case Studies – Brock Commons – Construction overview – Pág. 23 – Fuente: Bruder

Fig. 1.10: comportamiento de la estructura frente al fuego, tomada de <https://www.naturallywood.com/resource/brock-commons-tallwood-house-code-compliance-case-study/>

Think wood-brock Commons Tallwood House- Case Studies – Brock Commons – Code Compliance – Pág. 11 - Monitoring sensors are located across the entire building to provide data on its performance. Rendering by Acton Ostry Architects Inc.

Fig. 1.11: prefabricación de los paneles de CLT, tomada de <https://www.thinkwood.com/projects/brock-commons-tallwood-house>

Think wood-brock Commons Tallwood House- Case Studies – Brock Commons – Construction overview – Pág. 15 - Fuente: Azadeh Fallahi

Fig. 1.12: transporte y puesta en obra de los paneles de CLT, tomada de <https://www.thinkwood.com/projects/brock-commons-tallwood-house>

Think wood-brock Commons Tallwood House- Case Studies – Brock Commons – Construction overview – Pág. 15 - Fuente: Tim Herron

Fig. 1.13: descarga del material en obra, tomada de <https://www.thinkwood.com/projects/brock-commons-tallwood-house>

Think wood-brock Commons Tallwood House- Case Studies – Brock Commons – Construction overview – Pág. 15 - Fuente: KK Law

Fig. 1.14: prefabricación de los paneles de fachada, tomada de <https://www.thinkwood.com/projects/brock-commons-tallwood-house>

Think wood-brock Commons Tallwood House- Case Studies – Brock Commons – Construction overview – Pág. 18 – Fuente: Acton Ostry Architects Inc.

Fig.1.15: fases de la obra, tomada de <https://is-arquitectura.com/arquitectura/torres/brock-commons/>

Fig. 2.0: Render del Hoho building, tomada de <https://www.21stcentech.com/high-rise-buildings-permanent-carbon-sinks-build-wood/> Fuente:: Rudiger Lainer and Partner

Fig. 2.1: Componentes, tomada de <https://maderayconstruccion.com/hoho-viena-construccion-hibrida-a-la-vista/> Fuente: Woschitz Group

Fig. 2.2: Componentes de la estructura, tomada de <https://maderayconstruccion.com/hoho-viena-construccion-hibrida-a-la-vista/> Fuente: Woschitz Group

Fig. 2.3: Nodo del sistema, tomada de <https://maderayconstruccion.com/hoho-viena-construccion-hibrida-a-la-vista/> Fuente: Woschitz Group

Fig. 2.4: componentes de la estructura, tomada de <https://maderayconstruccion.com/hoho-viena-construccion-hibrida-a-la-vista/> Fuente: Woschitz Group

Fig. 2.5: montaje de elementos de borde, tomada de <https://maderayconstruccion.com/hoho-viena-construccion-hibrida-a-la-vista/> Fuente: Woschitz Group

Fig. 2.6: imagen del interior del edificio, acabado de la madera, tomada de <https://maderayconstruccion.com/hoho-viena-construccion-hibrida-a-la-vista/>

Fuente: Woschitz Group

Fig. 2.7: discontinuidad de la estructura y la fachada para desacoplar el sonido, tomada de <https://maderayconstruccion.com/hoho-viena-construccion-hibrida-a-la-vista/>

Fuente: Woschitz Group

Fig. 3.0: Render de la torre Mjosta, tomada de <https://www.metalocus.es/es/noticias/el-edificio-en-madera-mas-alto-del-mundo-la-torre-mjosa-por-voll-arkitekter>

Metalocus – el edificio en madera más alto del mundo. La torre Mjosta por Voll Arkitekter. 08/09/2018. (Brumunddal). Noruega. Metalocus, Antonio G de Juan.

Fig. 3.1: estructura de la torre Mjosta, tomada de <https://highways.today/2017/08/29/18-storey-mjosa-tower-brumunddal-norway-will-tallest-wooden-building-world/>

Fig 3.2: Sistema de forjado, tomada de 23. Internationales Holzbau-Forum IHF 2017_ Mjøstårnet - Construction of a 8 n 81 m tall timber building | Rune Abrahamsen_ Pág.8

Fig. 3.3: detalle de junta para protección frente a incendios en uniones metálicas, tomada de tomada de 23. Internationales Holzbau-Forum IHF 2017_ Mjøstårnet - Construction of a 8 n 81 m tall timber building | Rune Abrahamsen_ Pág.7

Fig. 3.4: recepción en obra de pilares de tres plantas, tomada de <https://maderayconstruccion.com/torre-mjostarnet-noruega-arquitecturademadera/>

Fig. 3.5: montaje de tramo de tres plantas para posterior colocación con grúa, tomada de <https://maderayconstruccion.com/torre-mjostarnet-noruega-arquitecturademadera/>

Fig. 3.6: elevación de la estructura con grúa, tomada de <https://maderayconstruccion.com/torre-mjostarnet-noruega-arquitecturademadera/>

Fig. 3.7: Sistemas de unión pilar GLT con forjado CLT, impresión de pantalla tomada de <https://www.rothoblaas.es/productos/fijacion/conexiones-para-pilar-y-forjado-en-clt/spider>

