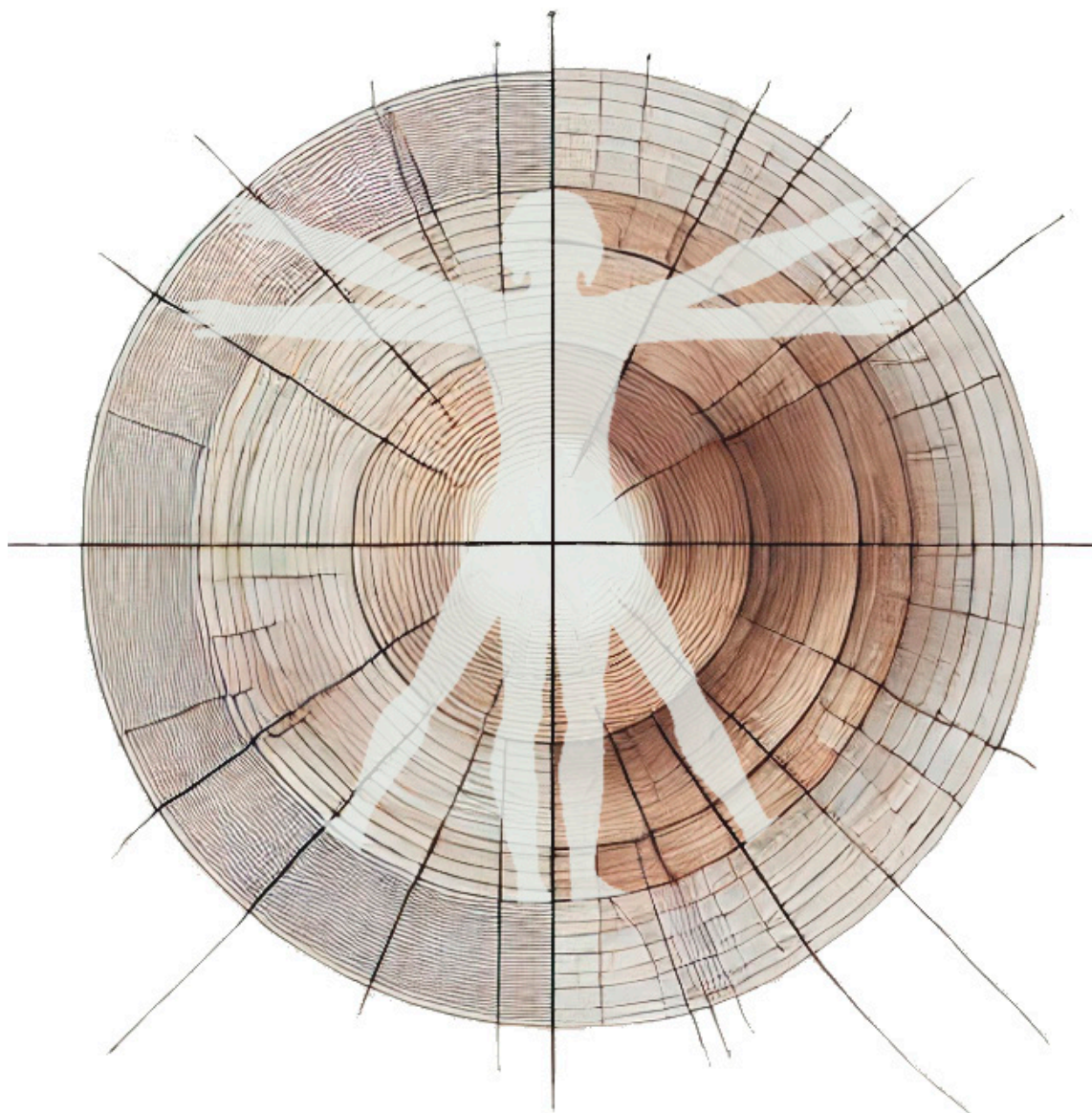


Anatomía de las estructuras de madera. Vivienda en altura.



Adrián Rodrigo Duerto

Directores:

Carlos Labarta Aizpún

José Antonio Alfaro Lera



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Anatomía de las estructuras de madera.
Viviendas en altura.

Anatomy of Wooden Structures: High-Rise Housing

Autor/es

Adrián Rodrigo Duerto

Director/es

Carlos Labarta Aizpún
José Antonio Alfaro Lera

Grado en Estudios en Arquitectura
Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2025

Resumen

Anatomía de las estructuras de madera, se entiende como la forma en que las estructuras de madera están organizadas y funcionan, comparándolas con un sistema vivo, similar al cuerpo humano. Esta analogía permite entender la madera y sus componentes estructurales como elementos interconectados que deben trabajar en armonía para garantizar la estabilidad, resistencia y funcionalidad del edificio.

La madera es el material del futuro, la madera contamina poco...

Estas son frases que escuchamos hoy en día ante las nuevas necesidades que la sociedad nos demanda a los arquitectos, pero ¿qué tienen de verdad estas afirmaciones? Depende de la manera en la que se trabaje. La madera tiene muchas ventajas y alguna desventaja al igual que todos los materiales, por eso es necesario saber **trabajar de manera correcta y eficiente** con ella, saber qué se puede hacer y qué no, qué puntos fuertes tiene o hasta donde podemos llegar con las técnicas y materiales que tenemos hoy en día.

Se estudiará la forma en la que sus propiedades afectan a la estructura y como esta condiciona el proyecto. La **estructura** es parte fundamental de la **anatomía**¹ de un edificio, son sus huesos y se verá la importancia cuando trabajamos con elementos estructurales de madera, el porque debemos entenderla y hacer trabajar a todos los **órganos del edificio** en conjunto.

Se compararán los distintos tipos de estructuras y se finalizará obteniendo unas conclusiones para **ver como la madera afecta la manera de proyectar en los edificios. Qué condicionantes nuevos tiene o cuáles recupera**. En definitiva, ver como el material condiciona el proyecto y su proceso.

1. ·Ciencia que estudia la estructura y forma de los seres vivos y las relaciones entre las diversas partes que los constituyen. (R.A.E.)

·Análisis o examen minucioso de algo. (R.A.E.)

Abstract

Anatomy of Wooden Structures is understood as the way wooden structures are organized and function, drawing a comparison to a living system, such as the human body. This analogy allows us to perceive wood and its structural components as interconnected elements that must work in harmony to ensure the stability, strength, and functionality of the building.

Wood is the material of the future; wood causes little pollution...

These are phrases we often hear today in response to the new demands society places on architects. But how true are these statements? The answer depends on how wood is worked with. Wood has numerous advantages and, like any material, some disadvantages. Therefore, it is essential to **understand how to work with it correctly and efficiently**—knowing what can and cannot be done, identifying its strengths, and understanding the limits of the techniques and materials currently available.

This study will explore how wood's properties influence structural behavior and how this, in turn, shapes the architectural project. Since **structure** is a fundamental part of a building's **anatomy**¹—its very skeleton—it is critical to understand it and ensure that all the **building's organs** work in unison when dealing with wooden structural elements.

Various types of structures will be compared, and conclusions will be drawn to determine **how wood influences the design of buildings. What new constraints does it introduce, or what forgotten ones does it revive?** Ultimately, this research aims to examine how the material shapes the project and its development process.

1. Science that studies the structure and form of living beings and the relationships between their various constituent parts. (R.A.E.)

²Thorough analysis or examination of something. (R.A.E.)

Índice

1. Introducción	11
1.1 Objetivos y problemas abordados	12
1.2 Motivación	12
1.3 Estructura del trabajo	13
1.4 Metodología	13
2. Perspectiva a lo largo de la historia	15
3. Especificaciones de la madera industrializada	21
3.1 Propiedades mecánicas	22
3.2 Problemas y ventajas	24
3.3 Ciclo de vida y huella de carbono	27
4. Tipos de estructuras	29
4.1 CLT	30
4.2 GLT (Glulam)	31
4.3 LVL	32
4.4 Mixta	33
5. Casos de estudio	35
5.1 Bloque 6x6	36
5.2 Cornellà Impsol	40
5.3 39 viviendas Entremutilvas	46
5.4 Paris XIII	52
5.5 Mjøstårnet	58
6. Conclusiones	65
7. Bibliografía	71

1.Introducción



Fig. 1. Museo y Centro de Investigación GC Prostho / Kengo Kuma

1.1 Objetivos y problemas abordados

El trabajo tiene como objetivo estudiar las tipologías de viviendas generadas en la proyección y construcción de edificios cuyo elemento portante principal es la madera, incluyendo pilares, muros o sistemas mixtos.

Se analizará como esta metodología constructiva y estructural influye en las distribuciones de los espacios interiores, así como en la organización. Además, se destaca la creciente presencia de esta técnica constructiva en la arquitectura actual. Para poder entender todas estas soluciones adoptadas por los diversos arquitectos es necesario estudiar las características del material y los motivos por los cuales se opta por construir con ella.

Se obtendrán conclusiones fundamentadas sobre las ventajas y desventajas de esta metodología, identificando aspectos que funcionan mejor y otros que funcionan peor, cuál contamina realmente más o que estrategias son mejores adoptar cuando se emplea esta manera de construir edificios de una cierta altura. Qué condicionantes nos genera la madera en la estructura o distribución, veremos qué cambios hay con respecto otros materiales. Como la estructura es un elemento de la anatomía de los edificios y como tienen que trabajar todos en conjunto.

1.2 Motivación

La investigación y estudio se apoya en la creciente solicitud de este método constructivo poco estudiado, sobre todo en España donde se está empezando a emplear, pero sin estar muy expandido y donde no todos los arquitectos conocen la manera de construir con este tipo de soporte ni qué implicaciones tiene.

En mi caso el interés nace de mi experiencia Erasmus donde aprendí a construir con estructuras de madera, en una escala muy inferior a la que este trabajo aborda, pero que me motivó a realizarlo, puesto que era una técnica nueva para mí y me pareció muy interesante a realizar de cara a las normativas y demandas de la sociedad actual a los arquitectos.

1.3 Estructura del trabajo

Para poder entender el papel que juega la madera en la arquitectura y en este caso en edificación de tipo residencial, se va a realizar un pequeño recorrido por la historia de este material, viendo como ha llegado a ser lo que es en la actualidad.

No obstante, la madera que se usa hoy en día no es aquella que sale directamente de los árboles. Por ello se verán y explicarán estas características, desde unas propiedades mecánicas fundamentales, así como normativas ante el fuego, el agua, el sonido, su baja huella de carbono y otras.

Posteriormente, pasaremos a ver qué tipos de estructuras o combinaciones de ellas podemos encontrarnos en los edificios, explicando que se suele hacer y razonando el porqué, todo esto para poder verlo en ejemplos prácticos que son la base de este trabajo.

Veremos una serie de casos de estudio y analizaremos en como afecta la elección de la disposición de los elementos portantes a las distribuciones, a las dimensiones o luces máximas, a los metros útiles de un apartamento, en definitiva, a la calidad de vida del espacio que proyectamos.

Con todo lo anteriormente comentado sacaremos las conclusiones pertinentes sobre la manera en la que afectan los distintos tipos de estructura de madera al arquitecto en su fase de proyectación. Ver qué aspectos hay que tener en cuenta y en función de lo que tengamos que proyectar, pudiéramos escoger una tipología o combinación de varias, entendiendo el porqué de la elección y siendo conscientes de los aspectos técnicos que fundamentan la elección.

1.4 Metodología

El enfoque de este trabajo se centra en el análisis de las tipologías de viviendas a partir de diferentes proyectos arquitectónicos, con el objetivo de conocer y comparar las herramientas y métodos utilizados en su proyección.

Para ello, se estudiarán las plantas, secciones, imágenes durante el proceso de construcción, la disposición y dimensiones de la estructura, las dimensiones del edificio, algún detalle. Todo esto utilizando los planos obtenidos de los distintos estudios de arquitectura, revistas, publicaciones y los datos proporcionados por los fabricantes de los diferentes tipos de madera empleados en la construcción, como por ejemplo la variedad, el volumen, tipo de elemento, etc.

2. Perspectiva a lo largo de la historia



Fig. 2. Representación asentamiento Prehistorico.

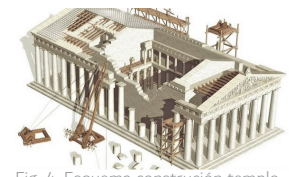


Fig. 4. Esquema construcción templo.



Fig. 6. Pagoda Hokki-ji, Okamoto, Japón



Fig. 8. Estructura Balloon Frame.



Fig. 10. Render proyecto W350, Tokio.

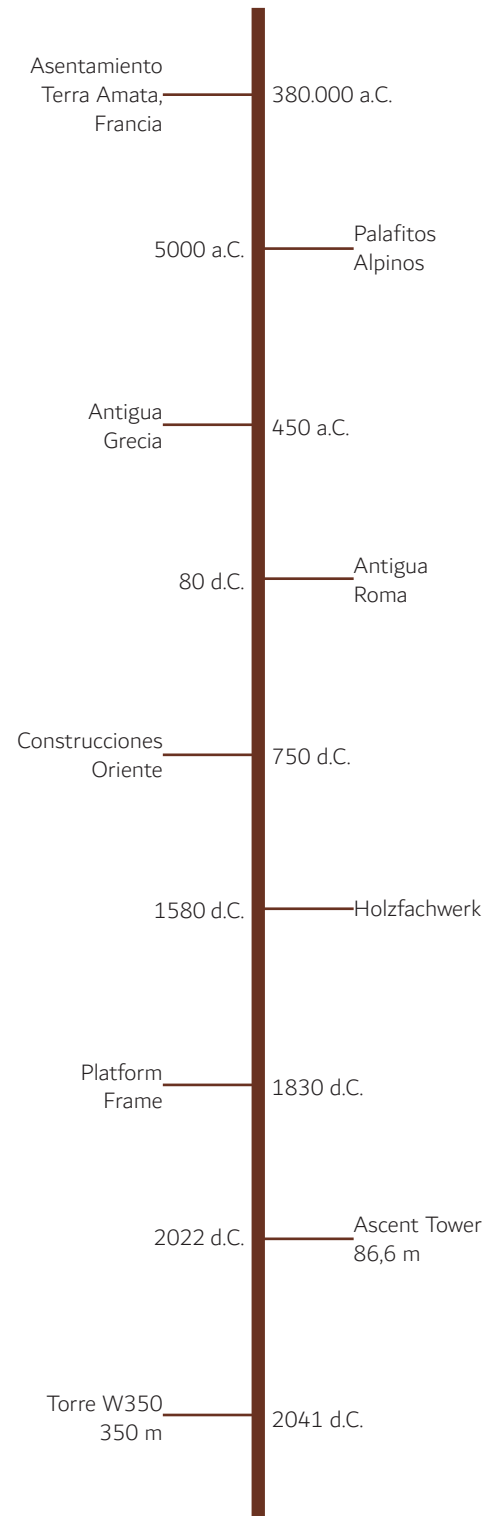


Fig. 3. Reconstrucción palafitos alpinos.



Fig. 5. Representación Coliseo, Roma



Fig. 7. Casa Baumann en Eppingen, Alemania, 1580



Fig. 9. Edificio Ascent, Milwaukee, 2022.

2. Perspectiva a lo largo de la historia

La madera es un material que, gracias a su presencia en la naturaleza sin necesidad de procesar, ha sido utilizada para la construcción de los primeros asentamientos y refugios desde la Prehistoria (Palafitos alpinos, Siglo V a.C.), convirtiéndolo en uno de los materiales constructivos más antiguos junto con la piedra y el adobe. Esto se debe a sus propiedades naturales como su resistencia, flexibilidad y facilidad para conseguirla en casi cualquier entorno.

Se comienza a usar siendo conscientes de sus propiedades, en las civilizaciones como Egipto, Mesopotamia, Grecia y Roma, principalmente en techumbres de templos o viviendas, pero también en la construcción de barcos. Por ejemplo, el Velarium² del Coliseo en Roma estaba construido sobre una estructura de vigas de madera con un anillo central.

Así mismo, Vitrubio, en los Diez Libros de Arquitectura, hace referencia a un edificio de esqueleto de madera con relleno de adobe, el primer edificio de este tipo se encontró enterrado por la erupción del Vesubio del año 79 d.C. en Herculano.

En Roma, fue utilizada en edificios comunes como las insulae romanas. Estas construcciones combinaban una base de ladrillo con una parte superior de apartamentos construido con una estructura de madera. La ligereza de este material no solo reducía el peso total de las edificaciones, sino que facilitaba su construcción, permitiendo que alcanzaran alturas de hasta cinco o seis plantas. Sin embargo, el riesgo de colapso debido a la falta de regulaciones llevó a Julio César, según se menciona en Cities in Civilization de Sir Peter Hall, a promulgar leyes que limitaban la altura de estas estructuras a 21 metros. Más tarde, el emperador Trajano redujo este límite a 18 metros para reforzar la seguridad. Siendo esto el primero de los antecedentes a las actuales normativas que afectan a la madera.

Otros lugares donde nos encontramos con la presencia de la madera como material histórico es en Asia oriental y Japón. Construyeron edificaciones religiosas de una altura considerable, las pagodas, estos edificios han demostrado las cualidades y posibilidades de este material si se utiliza de manera eficiente, pero, sobre todo, su resistencia al paso del tiempo cuando este material está tratado y cuidado de una manera correcta. Un caso de esto es la Pagoda Horyu-Ji en Japón, construida en el año 711 d.C.

2. Velarium: cobertura desplegable de tela compuesta de varias hojas de cáñamo, utilizada en los circos, teatros y anfiteatros romanos para garantizar a los espectadores una adecuada protección en casos de mal tiempo. (Wikipedia)

2. Perspectiva a lo largo de la historia



Fig. 11. Reconstrucción de una vivienda neolítica, Francia.



Fig. 12. Museo de viviendas sobre pilotes de Unteruhldingen.

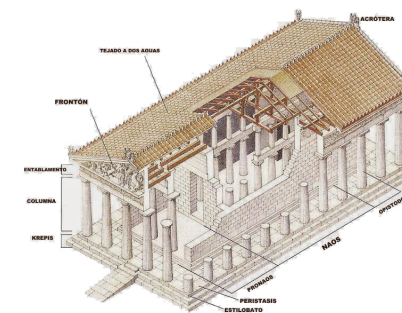


Fig. 13. Esquema estructural templo griego tipo.

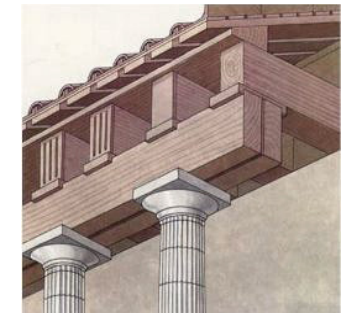


Fig. 14. Representación de un entablamiento de madera.



Fig. 15. Esquema estructural de una insula romana.

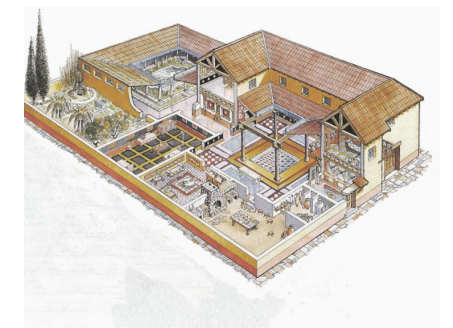


Fig. 16. Representación esquemática de una domus romana.



Fig. 17. Pagoda Horyu-Ji, Ikaruga, Japón.

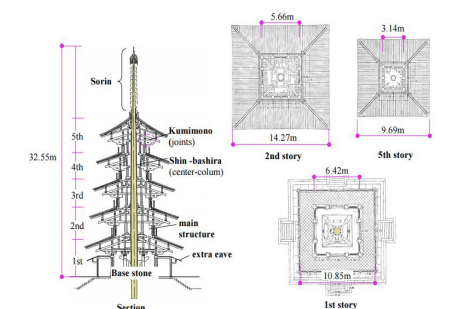


Fig. 18. Planos de la pagoda Horyu-Ji en Japón.

2. Perspectiva a lo largo de la historia



Fig. 19. Vivienda en Gundelsheim con sistema fachwerk.



Fig. 20. Plaza tradicional con fachadas fachwerk.



Fig. 21. Construcción vivienda Balloon Frame.

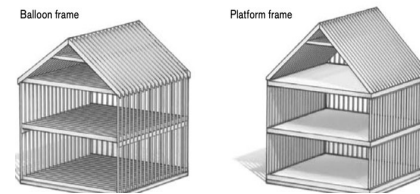


Fig. 22. Esquema comparativo Balloon Frame y Platform Frame.



Fig. 23. Casa Jabocs I, Wisconsin, F.L.Wright, 1937.



Fig. 24. Casa Pope-Leighey, Virginia, F.L.Wright, 1939.

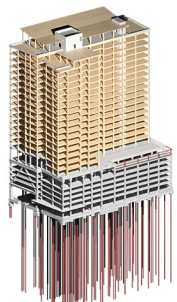


Fig. 25. Representación estructural torre Ascent, Milwaukee.



Fig. 26. Torre Mjøstårnet, Noruega, Voil Arkitekter, 2019.

2. Perspectiva a lo largo de la historia

En la edad media, S. XIII, aparece el sistema de fachwerk, presente sobre todo en la arquitectura alemana, es una técnica constructiva tradicional. Consiste en un sistema estructural que utiliza un entramado de vigas y postes de madera maciza, ensamblados entre sí, formando un esqueleto que se rellena con otros materiales para cerrar las paredes. Los elementos verticales, horizontales y diagonales se unían para formar un marco estable. Las uniones suelen realizarse mediante ensamblajes de madera, como espigas y mortajas, sin clavos ni tornillos en muchos casos.

En la arquitectura moderna, los principios del fachwerk han inspirado sistemas híbridos, como los entramados mixtos con acero o vidrio. Es un gran ejemplo de como un método tradicional sigue influyendo en el diseño actual.

Es con la revolución industrial, cuando aparece la maquinaria para procesar la madera y se empieza a construir con sistemas prefabricados. Además, comienza a transportar a partes del mundo que no tenían un acceso tan fácil al material gracias a los nuevos medios de transporte, pero también es cuando pasa a ser sustituida por elementos como el hierro o el acero.

Es a mediados del siglo XX, cuando se usa el material procesado de manera más masiva, el Ballon Frame o el Plattform-Frame con la aparición de la madera contrachapada, la madera contra laminada (CLT) y la madera encolada (Glulam). En temas de seguridad se crean los primeros estándares y normas que regulan los requisitos mínimos en la construcción. Durante estos años se edifican las Casas Usonianas, donde la madera está muy presente, no tanto como elemento estructural, pero sí como elemento que tiene una estrecha relación con el habitar y el ser humano.

... Es el más cercano al hombre entre los materiales empleados en la construcción. El hombre ama su cercanía, gusta sentirla bajo su mano, la encuentra agradable al tacto y a la vista. La madera es universalmente atractiva...

(Frank Lloyd Wright, 1928)

Por último, en el siglo XXI, es el renacimiento de la madera como material sostenible, se retoma como material estructural en edificación en altura, de forma que es el esqueleto de los edificios.

Además, aparecen las primeras construcciones de gran altura como el Mjøstårnet en Noruega y se empieza a usar de manera híbrida con el hormigón y el metal.

3. Especificaciones de la madera industrializada

La madera como elemento tiene, al igual que otros materiales, unas características que la convierten en un producto muy bueno en algunos aspectos, pero también tiene unas propiedades que hay que entender y con las que hay que tener cuidado para poder construir con ella.

Para ello, vamos a estudiar una serie de características que nos ayuden a entender los problemas a los que hay que enfrentarse cuando se utiliza, pero también para comprender las razones detrás del creciente aumento de su demanda.



Fig. 27. Montaje vigas de las oficinas Tamedia, Zurich, Shigeru Ban.

3.1 Propiedades Mecánicas

La madera es un material anisotrópico, lo que significa que sus propiedades mecánicas varían en función de la dirección de las fibras. Esta característica afecta directamente en su comportamiento estructural, haciéndola única en comparación a otros materiales de construcción como el acero o el hormigón. Por ello, en función de la colocación de sus fibras y de la manera en la que se emplee, puede tener una muy buena resistencia. La madera muestra una alta resistencia a la tracción o compresión siempre que la carga o esfuerzo sea paralelo a las fibras, lo que la convierte en un material idóneo para soportar esfuerzos en estructuras como vigas, pilares y tirantes. Si las fuerzas se aplican de manera perpendicular a las fibras, la madera tiene más limitaciones, puesto que se puede aplastar, deformar o fracturar.

Otra de las características muy interesante en este material es su densidad, puesto que tiene una alta relación peso-resistencia, lo que la hace ideal en estructuras ligeras pero resistentes. Su densidad varía según la especie y el tratamiento, condicionando directamente su capacidad de carga y su comportamiento ante esfuerzos mecánicos.

Estos cambios de comportamiento, en función de su colocación, de la especie, de su densidad e incluso de la cantidad de humedad que contiene, ha provocado que se tenga que regular todo esto de cara al cumplimiento de la normativa en términos de seguridad. La clasificación se basa en una serie de criterios establecidos en las normas UNE-EN 14080 y UNE-EN 386, que detallan tanto los procedimientos de fabricación como los tipos de madera y adhesivos empleados. Estas normas definen las clases del producto, siendo las más habituales la C-24 y la GL-24, provenientes principalmente de pinos o abetos. Estos tipos presentan una resistencia característica a flexión de 24 N/mm². En el caso de elementos más grandes, esta resistencia puede incrementarse hasta 36 N/mm² en clases superiores, como la GL-36.

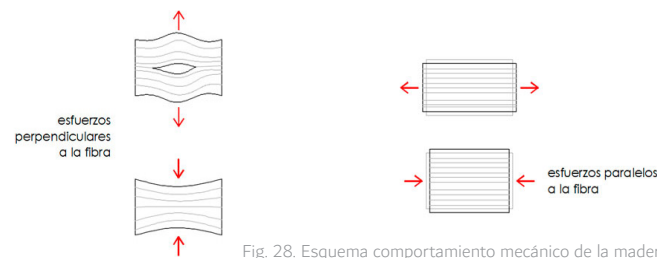


Fig. 28. Esquema comportamiento mecánico de la madera.

El módulo de elasticidad (E) que se tiene en cuenta en los cálculos para las normativas depende de su especie, densidad y contenido de humedad, por lo que tienen que establecerse unos rangos que se deben de cumplir durante su fabricación y colocación.

Así mismo, aunque no es tan dúctil como los metales, la madera posee cierta flexibilidad que le permite soportar cargas dinámicas, como vientos o terremotos, sin fallar de manera súbita. Además, su estructura interna ayuda a amortiguar vibraciones y ruidos. Este tipo de resistencia combinada con su buena relación peso-resistencia es muy importante en determinados países donde los terremotos ocurren con cierta frecuencia puesto que la acción sísmica es proporcional al peso del edificio. En países como Japón podemos ver su buen comportamiento a lo largo de los siglos con el ejemplo de las pagodas nombradas en el recorrido histórico. A pesar del resultado que hemos visto con el paso de los años en edificaciones antiguas, recientemente, se han realizado varios estudios controlados con de CLT donde un edificio de siete plantas resistió una simulación de un terremoto de 7,2 grados sin acercarse a los límites establecidos por el código técnico.



Fig. 29. Edificio para la prueba de resistencia a sismos.



Fig. 30. Edificio sobre plataforma de simulación de sismos, Miki, Japón.

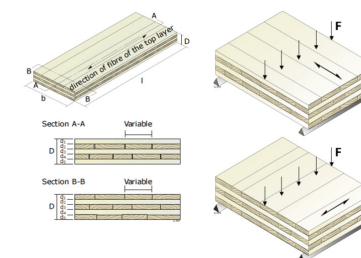


Fig. 31. Esquema de la colocación de la madera para optimizar el soporte de las cargas.



Fig. 32. Viga de madera con fisuras generadas por un exceso de cargas.

3.2 Problemas y ventajas

Uno de los problemas a los que se enfrenta este material es la **humedad**, ya que puede cambiar sus propiedades mecánicas, pero el exceso de humedad o incluso la filtración de agua a la estructura, puede generar otro tipo de problemas como la aparición de hongos, la deformación de las dimensiones originales de los elementos, la corrosión de las uniones metálicas y muchos otros.

Por todo ello es fundamental tener en cuenta varios aspectos a la hora de construir con madera. Hay que asegurarse que pueda ventilar para que regule los cambios de humedad del ambiente. Originalmente, con la aparición de los primeros elementos de madera encolada, el pegamento que se usaba no era resistente al agua, provocando que se disolviera y perdiera sus cualidades, no fue hasta 1936 que aparecen estos primeros pegamentos. En la actualidad se trata para ser impermeable desde el lado exterior, pero siendo este producto siempre transpirable. Así mismo, otra manera de prevenir este problema consiste en elevar la estructura, evitando el contacto con el terreno, para ello, se suele colocar sobre una plataforma previa realizada en otro material, de esta manera, se evita la absorción de humedad por capilaridad.

Al igual que el agua, otro elemento para tener en cuenta es la **exposición al sol**. En los casos en que la madera contra-laminada está diseñada para estar expuesta, se debe tener en cuenta el efecto de la luz ultravioleta, ya que ciertas variedades pueden oscurecerse con bastante rapidez cuando se exponen al sol. En particular, la madera de pino tiende a enrojarse, lo que afecta a los tonos deseados o provoca marcas en las partes de la tabla que han estado expuestas más que otras.

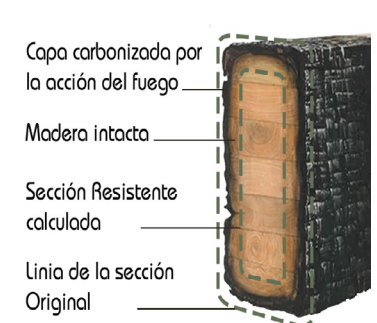


Fig. 33. Sección explicativa del comportamiento de la madera ante un incendio y su sección efectiva.

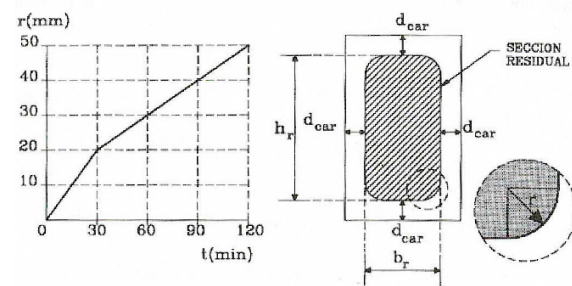


Figura 16.2. Redondeo de las aristas.

Fig. 34. Sección y gráfica de temperaturas de la madera ante un incendio y su sección efectiva.

Otro de los factores con los que siempre ha tenido que enfrentarse es el **fuego**, como material combustible que es, se tiene la idea de que una estructura de madera comenzará a arder rápidamente y de manera descontrolada. Sin embargo, sabemos perfectamente como se comportará el material ante un incendio y por ello podremos prever su comportamiento.

La resistencia estructural ante el fuego se calcula considerando el deterioro del material debido a la carbonización y la disminución de las propiedades mecánicas en las zonas cercanas a la superficie expuesta al calor. Este análisis se basa en el método de la sección reducida, que se detalla en normativas como el Euro código 5 y DB-SI del Código Técnico de la Edificación (CTE).

Se calcula la profundidad de carbonización teniendo en cuenta el tiempo de exposición, el tipo de madera y unas posibles condiciones del incendio. De esta manera se conocerá la sección efectiva que seguirá soportando cargas durante el tiempo necesario estipulado, además la propia capa carbonizada actúa como una barrera protectora, ralentizando la propagación del fuego y resguardando el núcleo. Aunque la parte exterior pierde toda su resistencia, su bajo coeficiente de conductividad térmica impide que las altas temperaturas externas lleguen al interior del elemento.

Este enfoque permite diseñar estructuras seguras, incluso en condiciones de incendio, garantizando que las propiedades residuales sean suficientes para soportar las cargas durante el tiempo necesario para la evacuación y el control del fuego.

En comparación con otros materiales como el acero, el comportamiento de la madera resulta más adecuado, ya que estructuralmente sigue funcionando durante más tiempo. El acero, al ser expuesto a altas temperaturas, pierde su capacidad de resistencia, lo que provoca un colapso más rápido. El hormigón, por su parte, muestra un buen comportamiento frente al fuego, puesto que no contribuye a su propagación y soporta altas temperaturas. Sin embargo, su desempeño es menos predecible que el de la madera, ya que, si las armaduras quedan expuestas, pierden su resistencia.

Aunque puede favorecer la propagación de la llama y contribuir al avance del incendio, existen tratamientos superficiales que permiten mitigar este efecto.

3. Especificaciones de la madera industrializada

Sabiendo que muchas veces la madera queda expuesta hacia el interior, el control de la **acústica** es un factor a tener en cuenta. Pudiendo ser este un problema que se pase por alto pero que crea situaciones en las que la calidad de vida y del edificio se ve fuertemente perjudicada.

Todo dependerá de su correcta instalación. Lo ideal es separar acústicamente los distintos apartamentos, para ello podríamos separarlos entre sí dentro de la propia pared por una pequeña cámara de aire o unas placas de yeso a cada lado del acabado, pero nos impediría ver el material expuesto. Además, las vibraciones generadas por golpes o el ruido al caminar podrían ser algo incómodo, puesto que en un edificio de este tipo la continuidad de las paredes y pisos es constante. Por lo tanto, si no se aíslan acústicamente las uniones o elementos que unen los distintos paneles de CLT o Glulam de la estructura, se podrían transmitir los sonidos entre las distintas plantas y apartamentos.

Por último, uno de los factores que más se valora es su **facilidad constructiva**, gracias a que no requiere de una gran cantidad de mano de obra, herramientas o tiempo.

La madera se procesa en aserraderos, se corta a medida mediante una máquina de control numérico (CNC) lo que genera elementos con gran una precisión, rapidez y facilitando el proceso. Estas máquinas también se utilizan para cortar los huecos, ya sea para ventanas, pasos de una escalera o los huecos de instalaciones. De este modo, cuando los paneles llegan al sitio de la obra, solo es necesario elevarlos, colocarlos en su posición y fijarlos con la ayuda del operario. Este proceso reduce considerablemente los desechos generados, elimina la fabricación in situ y permite reutilizar toda la madera desechada en el taller para otros productos.

La reducción del tiempo en obra conlleva un ahorro significativo en los costos de construcción y en algunos casos se consigue completar más de una planta a la semana.

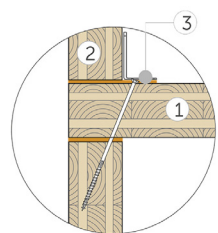


Fig. 35. Detalle de la colocación de aislamiento acústico en estructura de CLT.



Fig. 36. Máquina de CNC cortando paneles de CLT a medida en fábrica.

3. Especificaciones de la madera industrializada

3.3 Ciclo de vida y huella de carbono

Como hemos comentado previamente, uno de los aspectos fundamentales de su elección, son las bajas emisiones, en parte porque cuando se hacen los cálculos de la huella de carbono en la construcción, se considera que la madera absorbe CO₂ en su fase de crecimiento y lo almacena en su interior. Mientras que los otros materiales solo emiten CO₂, lo que, ya de principio, supone una gran ventaja para la madera.

Pero hay que tener en cuenta que depende de muchos factores cuanto contamine. Si el proceso de tala no se hace de manera correcta o si su procesamiento no es efectivo, podría contaminar mucho. Además, ya no solo es la fase de construcción, sino también, qué ocurre después de que acabe la vida útil del edificio en la que se ha empleado. Si pasa a quemarse o va a un vertedero, expulsará todo el CO₂ acumulado a la atmósfera. Sí que es cierto que no se tiene experiencia en este aspecto, puesto que los edificios de madera en masa son bastante recientes y aún no se ha podido recopilar suficiente información al respecto.

De acuerdo con un estudio realizado por Michael Green Architects, un edificio de 20 plantas con estructura de madera en masa podría almacenar hasta 3.100 toneladas de CO₂. En cambio, si construimos el mismo edificio en hormigón generaría aproximadamente 1.200 toneladas de CO₂. Esto representa una diferencia de 4.300 toneladas de CO₂.

Así mismo, teniendo en cuenta las emisiones, un edificio en hormigón necesita después una gran cantidad de aislamiento para hacerlo térmicamente eficiente y adecuar su temperatura. Mientras que la madera, al ser un mal conductor de calor, nos permite ahorrar en aislamiento térmico. Al requerir menos cantidad de ese material, también ahorramos en procesos secundarios que afectan al consumo total de la construcción del edificio.

Con todo ello, podemos decir que, si se emplea la madera de manera correcta y eficiente, podemos reducir mucho la contaminación que se emite en la construcción, reduciendo las emisiones.

4. Tipos de estructuras

Para poder entender la anatomía arquitectónica de los edificios, primero hay que darles un elemento de soporte. Para ello, se debe elegir la estructura que mantenga el conjunto y lo estabilice. Esta elección determinará una serie de factores condicionantes que influirán en el proyecto. Por ello, es necesario estudiar qué posibilidades tenemos, qué materiales hay y qué características tiene cada uno. Entender como va a afectar nuestra elección a la anatomía global del proyecto y del edificio. Ya sea porque nos da más libertad a la hora de plantear la distribución o porque nos ahorra costo económico, pero es importante poder justificar la elección acorde a nuestro proyecto y a nuestro edificio. Que esta serie de decisiones se entienda como un único y configure la anatomía arquitectónica que buscamos.



Fig. 37. Proyecto con estructura de hormigón, acero y madera.

4.1 CLT

Cross-Laminated Timber (Madera contra laminada) es un material procesado compuesto por láminas macizas dispuestas en capas que se colocan de manera perpendicular entre sí y se unen mediante adhesivos. Esta disposición cruzada mejora significativamente las propiedades estructurales del material y lo convierte en una opción ideal para aplicaciones en construcción.

Las láminas se colocan en ángulos de 90 grados unas respecto a otras. Se encolan entre sí, creando el compuesto con un 99,4% de madera y un 0,6% de colas. Se suelen colocar entre 3 y 7 capas de planchas, en función de los requisitos de soporte de carga. Adquiriendo una buena resistencia tanto en direcciones longitudinales como transversales. Por ello, se puede usar tanto en paredes, muros y techos. Así mismo, esta manera de formar el material minimiza la deformación y la hace más estable que la madera maciza tradicional.

Al ser un material procesado, compuesto de muchas tablas, se le puede dar diferentes dimensiones y formatos, llegando en la actualidad hasta los 16 metros de longitud y unos 4-5 metros de alto. Además, como se explicaba en su facilidad constructiva, se puede cortar y modificar de manera sencilla con máquinas de corte CNC (Máquina de Control Numérico) en función de las necesidades del proyecto.

Y si se va a quedar vista en el proyecto, se puede tartar con diferentes productos según las necesidades, materiales impermeabilizantes, protección extra ante incendios, antihongos, barnices contra el sol y muchas otras opciones.

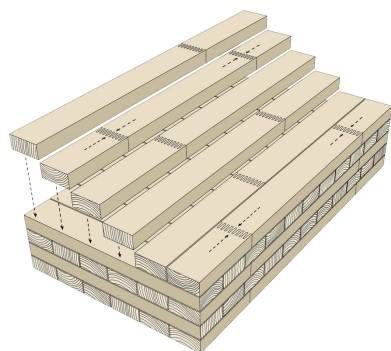


Fig. 38. Esquema montaje panel CLT.



Fig. 39. Edificio de estructura de CLT en su totalidad.

4.2 GLT (Glulam)

Glued Laminated Timber (Madera laminada encolada) es otro tipo de material estructural derivado de la madera, ampliamente utilizado en la construcción por su combinación de resistencia, flexibilidad y estética. Está formado por láminas macizas que se unen mediante adhesivos de alta resistencia para formar un único elemento.

En este caso la unión de las láminas se hace únicamente de manera longitudinal, de forma que el elemento que se produce está pensado para soportar los esfuerzos en una dirección concreta, lo que le da unas características específicas pero muy eficientes si se sabe utilizar de manera correcta.

Puede fabricarse en rectas o curvas, lo que es óptimo para estructuras arquitectónicas complejas como arcos, cúpulas, vigas y vigas curvas. Permite además crear elementos de gran tamaño que serían imposibles con madera maciza por su longitud. Así mismo es mucho más resistente que la madera maciza, cuando en el proceso de fabricación se eliminan las imperfecciones.

El Glulam transmite una sensación de calidez, además al igual que el CLT se trata exteriormente para adquirir resistencia ante posibles elementos. Gracias a la laminación y el uso de adhesivos, tiene menos probabilidades de deformarse o agrietarse por cambios de humedad.

Se puede ver utilizado en puentes, estadios de escala reducida, auditorios...

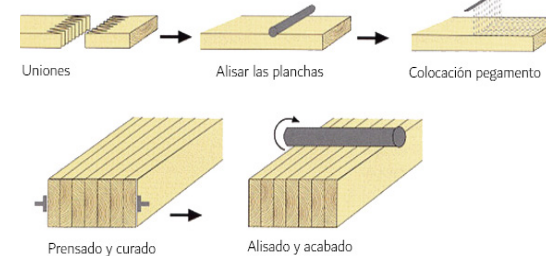


Fig. 40. Esquema montaje de una pieza de Glulam.



Fig. 41. Centre Pompidou, Metz, Francia, Shigeru Ban, 2010.

4.3 LVL

Laminated Veneer Lumber (madera micro laminada) es un material de madera fabricado mediante la unión de finas láminas unidas con adhesivos resistentes. Este proceso crea un material homogéneo, estable y con altas prestaciones mecánicas, que lo convierte en una opción popular para aplicaciones estructurales exigentes.

Se compone de láminas de un grosor de 3 a 4 mm, colocadas en paralelo y unidas con adhesivos bajo alta presión y temperatura. A diferencia del CLT, las capas están orientadas en la misma dirección, lo que maximiza la resistencia en una dirección específica, pero le perjudica cuando se generan esfuerzos en la dirección perpendicular a la de formación del panel.

Puede fabricarse en grandes longitudes y secciones delgadas, permitiendo elementos estructurales más ligeros y esbeltos.

Generalmente, se utiliza en edificios de poco tamaño o como refuerzos puntuales en construcciones de dimensiones más considerables, ampliaciones o refuerzos de estructuras existentes. Es ideal para elementos largos y delgados como vigas, montantes y dinteles.

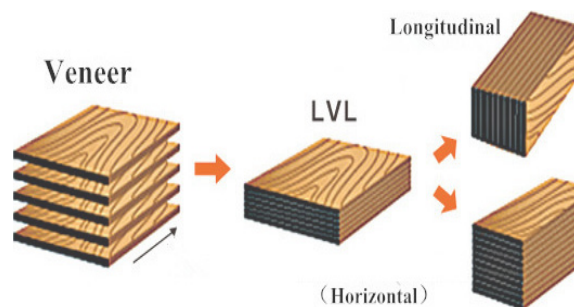


Fig. 42. Esquema montaje panel LVL.



Fig. 43. Metropol Parasol, Sevilla, J. Arquitectos Mayer, 2011.

4.4 Mixta

Es cierto que la madera como elemento estructural, como ya hemos visto, tiene muchos beneficios y algún inconveniente. Por ello hay veces que la manera más eficiente, sencilla y con mayor sentido es combinar las cosas buenas que nos aporta este material con las cosas buenas que tienen otros materiales como el hormigón, el ladrillo o el metal. De esta manera podremos reducir los problemas que se generan al máximo. Si bien es cierto que hacer esto requiere un conocimiento amplio de todos los materiales y técnicas constructivas, tener en cuenta los materiales en la fase de proyectación y ver qué implicaciones tendría esta combinación.

Por ejemplo, como ya habíamos comentado en el apartado de las características, muchas de las estructuras se colocan sobre una base de hormigón para evitar el contacto con el terreno y así evitar problemas de hongos, humedad y prolongar su vida útil. También podemos tener en cuenta que la mezcla de materiales en determinados puntos nos permite aprovecharnos de las cualidades que tienen algunos de estos materiales ante determinados problemas. Podría ser el caso del hormigón ante el fuego, por ello, si el núcleo de comunicaciones verticales, que es fundamental en caso de incendio, se realiza en hormigón, podemos ahorrar el uso excesivo de madera en ese punto, que nos obligaría la normativa a sobredimensionar. Además, esta elección nos permite dar una rigidez necesaria en determinados edificios. Con una decisión nos podemos evitar más de un problema.

Lo mismo podría pasar con el metal, podemos colocar elementos puntuales de metal en zonas donde las propiedades mecánicas de este material sean muy superiores a la que nos podría aportar la madera.

Es por ello, que un correcto uso mixto de estructuras o elementos estructurales, puede tener muchos beneficios globales en el desarrollo total del proyecto. Si se tiene el conocimiento y se razona en la fase proyectual del desarrollo, se puede dar un valor extra al edificio.

5. Casos de estudio

Para poder entender y ver todas las características, comprobar las aplicaciones prácticas de todo aquello relacionado con las estructuras de madera y con sus implicaciones, se han escogido una serie de casos de estudios que se consideran interesantes, tanto por su mezcla de materiales portantes, como por el tipo de madera, su dimensión o su distribución, su forma y función...

Son edificios representativos, cada una con una naturaleza diferente y una anatomía propia. Son ejemplos de anatomías estructurales diversas y que cada una afecta al conjunto de una manera diversa.

Se va a explicar el motivo de su construcción, la idea sobre la que se apoya el proyecto y como dialogan la estructura con esa idea. Ver qué problemas y ventajas tiene la elección, interpretar las soluciones que se aplican y por último ver si idea y estructura van de la mano, hasta qué punto la una condiciona a la otra o viceversa.



Fig. 44. Collage resumen casos de estudio.

5. Casos de estudio

5.1 Bloque 6x6



Fig. 45. Fachada norte Bloque 6x6.

Este bloque de apartamentos, desarrollado por Ramón Bosch y Bet Capdeferro en Gerona, es un claro ejemplo de una edificación con estructura solo de madera. Ubicado en un entorno urbano de transición entre la ciudad compacta y el ensanche de manzana abierta, caracterizado por una notable presencia de equipamientos públicos. Basado en criterios de flexibilidad de programa y la disminución de la huella de carbono durante todo el ciclo de vida del edificio. La utilización de paneles de madera contra laminada (CLT) y vigas de madera laminada encolada (GLT) en la construcción del volumen sobre rasante hace referencia a la tipología tradicional de estructura muraria, configurando espacios habitables con dimensiones uniformes entre los elementos portantes.

Las viviendas se componen de 6 estancias, todas aproximadamente de unos 12 m², sin definir las con ningún uso en particular, lo que permite una apropiación libre de cada espacio, facilitando una flexibilidad de programa según lo que los habitantes requieran a lo largo de la vida útil del edificio. El proyecto, gracias a tener una crujía no demasiado grande, genera una doble orientación, norte-sur, lo que favorece la ventilación cruzada y permite orientar los espacios en función de sus necesidades de luz. En el centro del edificio y utilizando un módulo entero de 2/3 de la crujía, tenemos en núcleo de comunicaciones vertical con las escaleras y ascensor, el núcleo da salida al pasillo norte, mientras que en fachada sur genera un retranqueo que le da una dinamicidad a la fachada.

La sistematización y orden que se busca cuando se construye con una estructura de madera prefabricada, sirve de base compositiva regular sobre la que opera la doble posición de los cierres de la galería sur: como invernadero en invierno y como umbráculo en verano. Esta radical diferenciación aporta dinamismo y vibración en la fachada del edificio, que expresa su voluntad y capacidad de adaptación al clima.

Estudio de arquitectura
Bosch.Capdeferro

Año
2016-2020

Nº de viviendas
35

Estructura
CLT + GLT

Plantas
B+5

Volumen madera
1.000 m³

5. Casos de estudio

En la fachada norte, sin embargo, tenemos la pasarela que da acceso a las viviendas, creando pequeños espacios de relación entre los vecinos. En este caso, la madera queda expuesta directamente a la intemperie, esto se justifica por las condiciones solares, al no estar tan expuesta a la luz directa, la vida útil de los materiales no se verá tan perjudicada.

La repetición de un único tipo de vivienda, junto con el empleo de CLT como material estructural, crea las condiciones ideales para la implementación de sistemas prefabricados. Estos se aplican tanto en la fachada principal como en la estructura misma, mejorando la calidad constructiva y optimizando los costes y los tiempos de ejecución. Así mismo, el empleo en determinados puntos de pilares y vigas de Glulam, permite romper la rigidez estructural, creando en fachada sur la posibilidad de tener un espacio que no esté partido por la mitad. Esto se consigue llevando a fachada un pilar que da la sensación de mantener el orden de los elementos portantes, pero en el interior se queda liberado y permite abrir o cerrar unas puertas correderas para aumentar considerablemente la superficie, aportando la flexibilidad de espacios que se buscaba desde un principio en el planteamiento de los arquitectos. Es decir, la intención original de los arquitectos se consigue gracias al juego de la estructura, sabiendo que si todo el edificio se planteaba con un único material (CLT) esta intención organizativa se hubiera visto perjudicada. Por ello, sabiendo las limitaciones del material, se opta por combinar los elementos portantes de CLT con situaciones puntuales de vigas de Glulam sobre un pilar del mismo material, todo ello sin perder el carácter de orden que caracteriza a la fachada sur, la cual expone el planteamiento estructural del edificio y sus ideas. Creando un contraste entre lo que se ve desde fuera y lo que realmente ocurre dentro.



Fig. 46. Sección transversal proyecto.



Fig. 47. Alzado Longitudinal proyecto.



Fig. 48. Posibles tipos de distribución, flexibilidad.



Fig. 49. Planta tipo proyecto.

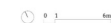




Fig. 50. Axonometría constructiva seccionada.



Fig. 51. Vista exterior en fase de construcción.

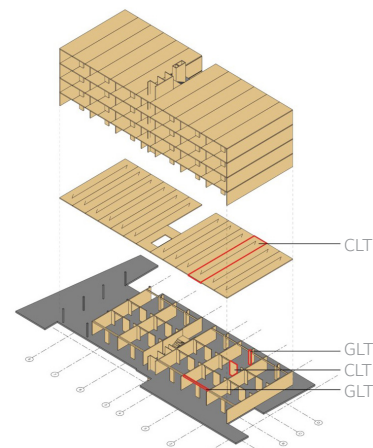


Fig. 52. Axonometría estructural.

Es decir, crean un contraste, una regularidad muy marcada exterior, sobre todo en la fachada sur, que continúa con el lenguaje de los edificios de la zona y en fachada norte se marca con los retranqueos de la fachada. Los cuales coinciden con la estructura que se ve en la fachada sur. Y sin embargo, para conseguir la flexibilidad que la sociedad reclama hoy en día, jugando con la estructura y sus limitaciones, consiguen una libertad de espacios, de miradas cruzadas entre estancias.

Se ve claramente como estructura y proyecto van de la mano, se entiende la necesidad de la madera en tener un cierto orden y regularidad, pero jugando con los distintos tipos de elementos que soportan cargas se consigue llegar a un resultado que cumple con las expectativas de flexibilidad y adaptación del proyecto.

Así mismo, la anatomía estructural del edificio le da un carácter propio. Los muros de carga que separan las viviendas crean un orden estructural que continúa de la planta calle hasta la última. Además, esta elección unidireccional de la estructura, obliga a generar apoyos intermedios en la crujía, a veces, a través de paredes de CLT y en otros puntos con vigas de Glulam, lo que el arquitecto aprovecha para crear las separaciones entre estancias, dando así una coherencia entre estructura y proyecto.

Una de las consideraciones extras que hacen, es que conociendo los problemas acústicos de la madera, colocan unos separadores entre los ascensores y el CLT, evitando así que pasen a la estructura las vibraciones generadas por este.

Otro punto a tener en cuenta es comprobar el ratio de m³ de madera en función de la superficie, en este caso con una superficie construida de 4.375 m² y una utilización de unos 1.000 m³ de elementos estructurales, podemos decir que se usa una media de 0,23 m³/m². Eso es un ratio aceptable, ya que la cantidad de material es baja en relación con la cantidad de superficie que se construye.



Fig. 53. Vista exterior pasillo.



Fig. 54. Vista interior, transparencia y conexión.

5. Casos de estudio

5.2 Modulus Matrix



Fig. 55. Patio interior.

El proyecto del estudio de Marta Peris y José Manuel Toral (Peris Toral) ganó el concurso para construir un bloque de viviendas en Cornellà de Llobregat, Barcelona, en el que el proyecto surge a través de un concurso público con una regulación de parámetros normativos muy estrictos. La parcela mide 51 x 41 m y había que dejar un patio de 15 x 25 m.

Lo que lo hace especialmente interesante, es su estructura, en este caso, hecha casi completamente con madera. Estas excepciones son la planta enterrada y la planta baja, es decir, el entramado portante se construye directamente sobre una plataforma de hormigón armado. Como se ha ido comentando durante el trabajo, esto se debe en parte a la manera en la que la madera actúa en el contacto con el terreno y los posibles problemas con el exceso de humedad que pudiera haber en ese punto.

El proyecto pasa por varias fases antes del comienzo de la construcción, pero desde el principio y teniendo en cuenta los condicionantes estéticos de los edificios de alrededor de la parcela y los requisitos del concurso (patio de 15x25 metros) optan por hacer un planteamiento radical con una retícula que les permitirá colocar los diferentes espacios necesarios en una vivienda. Buscan la desaparición total de los pasillos, creando solo estancias o habitaciones, permitiendo así crear una permeabilidad y flexibilidad total, rompiendo la jerarquía de los espacios y permitiendo la adaptación de estos. Buscan también la doble orientación que permita organizar el espacio en función de las necesidades de luz.

En su intención de dibujar habitaciones y no viviendas, optan por descubrir una modularidad muy marcada que les permita albergar todo tipo de estancias en su interior.

Para ello, a través del estudio de diferentes referencias japonesas y de Le Corbusier (Petit Cabanon) consideran que la modulación de 3,6 x 3,6 metros es la ideal para su proyecto, originando así espacios de 13 m². (Ver Fig. 58.)

Estudio de arquitectura
Peris+Torat Arquitectes

Año
2019-2021

Nº de viviendas
85

Estructura
CLT + Glulam

Plantas
B+5

Volumen madera
2.100 m³

5. Casos de estudio

Al realizar esta modulación en todo el espacio, acaban generando 114 módulos por planta y 543 en total, los cuales se tendrán que distribuir en función del tamaño de los apartamentos. Uno de los planteamientos era que la cocina fuera un espacio central y abierto, a través de ella se ven el resto de las habitaciones.

Para poder tener unas condiciones similares en todos los apartamentos y conseguir una doble orientación y una buena ventilación cruzada, optan por poner los núcleos de comunicación en las esquinas interiores, evitando tener esos puntos conflictivos en las viviendas. Las escaleras, a pesar de que están cubiertas, no están cerradas, de manera que se consideran exteriores y no hay que sectorizarlas. Esto ayuda con la normativa de incendios porque no es necesario cumplir unos requisitos tan estrictos. La escalera se hizo al principio y de una sola pieza.

La elección del material estructural del edificio, aparte de por sus propias características portantes, los arquitectos la justifican gracias a otra serie de propiedades que tiene la madera y que se han comentado con anterioridad, pero que resuelven perfectamente las condiciones a las que se expone el edificio.



Fig. 56. Núcleo de escaleras íntegro en CLT.

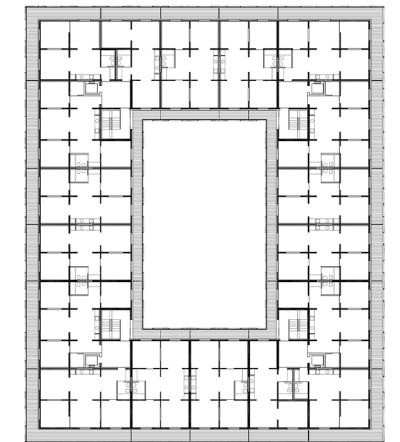


Fig. 57. Planta Tipo.

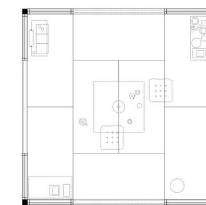


Fig. 58. Habitación de 8 tatamis 3,60 x 3,60 m y Le Petit cabanon 3,66 x 3,66 m. Le Corbusier.



Fig. 59. Maqueta concurso.

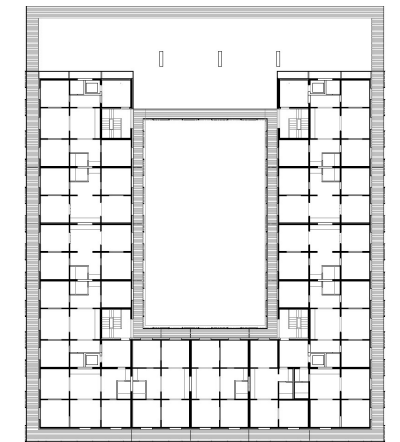


Fig. 60. Planta ático.

5. Casos de estudio

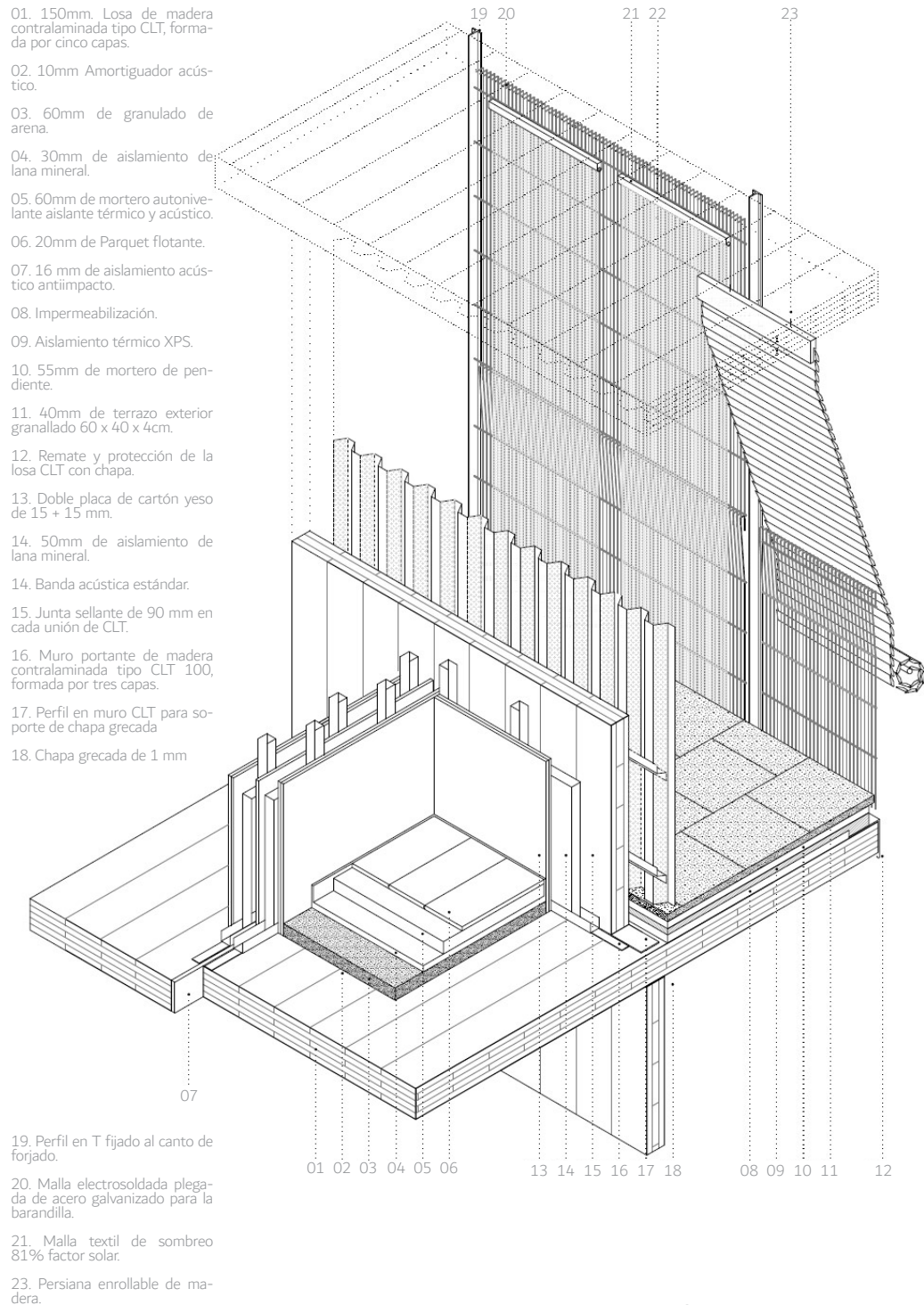


Fig. 61. Axonometría constructiva seccionada.

5. Casos de estudio

En la planta podemos empezar a apreciar cuáles han sido los condicionantes de la idea en la estructura y qué se ha decidido hacer para solucionarlos.

Empezando desde el terreno, se comienza con la cimentación de hormigón, en la que se opta por una cimentación profunda sobre la que apoyan la solera y los muros perimetrales de hormigón también. Continuamos ascendiendo hasta el techo de planta baja con pilares de hormigón armado y forjados de losa maciza.

Sobre esta losa se comienza la construcción de la estructura de madera laminada de pino, en este caso, dos materiales portantes diferentes, tenemos un sistema de pilares y jácenas de Glulam, pero en fachada se opta por muros de CLT que hacen la función de elemento vertical resistente y al mismo tiempo de revestimiento interior. Estos mismos paneles en el exterior se termina con chapa grecada, lo cual lo protege del exterior y alargará su vida. Tenemos un sistema de pilares y jácenas en el interior que nos dan una versatilidad de planta muy grande y los apoyos puntuales se deciden colocar en las esquinas de la cuadrícula sobre la que parte el origen de la idea.

A pesar de la libertad de planta, se decide hacer las particiones interiores continuando la cuadrícula, creando una distribución final de espacios mucho más rígida. Estas separaciones se hacen de cartón-yeso, con unas propiedades particulares para cada una de las posibles separaciones de espacios.



Fig. 62. Vista sótano en construcción.



Fig. 63. Vista unión viga GLT con losa hormigón.



Fig. 64. Pilar Glulam con unión metálica.



Fig. 65. Vista interior en obra con instalaciones. Estructura unidireccional.

En cuanto al fuego, tenían dos estrategias principales para garantizar la resistencia de la madera. La primera consiste en aprovechar cada centímetro adicional expuesto, no requerida estructuralmente, para obtener unos 30 minutos de resistencia al fuego. En este caso, debido a la altura y características del edificio, se requería una resistencia al fuego de 90 minutos (RI 90). Para dejar los forjados vistos, se añadieron tres centímetros al canto estructural necesario, logrando así la resistencia requerida. La segunda estrategia, aplicada en las fachadas de CLT, consistió en recubrir la madera con materiales protectores. En este caso, se utilizó un sistema de cartón-yeso, que aporta 15 minutos de protección por capa. Se instaló un trasdosado compuesto por dos placas y además, se añadió un centímetro adicional por capa, asegurando así los 90 minutos de resistencia al fuego exigidos.

Realmente, el planteamiento inicial del proyecto era transmitir toda la carga mediante paredes portantes, las de las fachadas, que sí se mantienen en el resultado final, pero también en vez de hacer pilares de Glulam se proponía realizarlo mediante paredes de CLT. Este planteamiento provocaba que el consumo de madera fuera el doble del obtenido finalmente, además esta elección les dificultaba dar la libertad de espacio y de retícula que buscaban, aparte de que hubieran aparecido problemas acústicos mayores. Con los cálculos originales se utilizaban unos 0,5 m³/m², pero cambiándolo por vigas y pilares de se consiguió reducir a más de la mitad hasta llegar a 0,24 m³/m², lo cual pasa a ser un consumo justificado de madera.

En coherencia con la elección final de los arquitectos, al hacer una estructura mediante pilares, provocaba que había que colocar unas vigas entre los elementos verticales de GLT. Había dos opciones, crear forjados bidireccionales, lo que implicaba que esa unión visual de espacios se perdía porque la viga rompería la continuidad del techo o hacer una estructura unidireccional, que es por lo que se optó. Esta elección se justificaba puesto que daba más flexibilidad pero separa la vivienda en 3 zonas, la que da al interior del patio, la parte central donde vienen los cuartos húmedos y la zona que da al exterior, provocando una unicidad entre los espacios que se encuentran en la misma zona estructural. Es esta elección de estructura lo permite potenciar la idea e intención del proyecto.

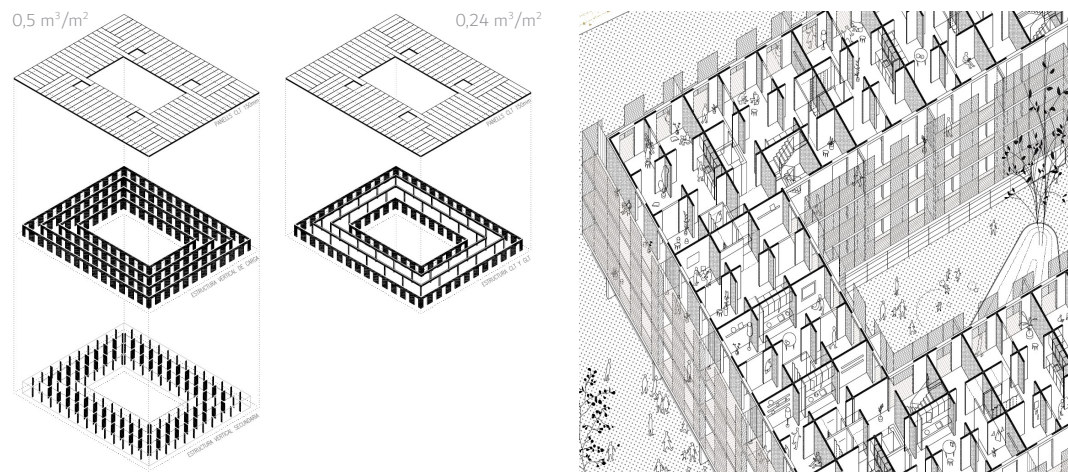


Fig. 66. Axonometría justificativa de la elección de la estructura.

Fig. 67. Axonometría del proyecto.



Fig. 68. Vista exterior del edificio.

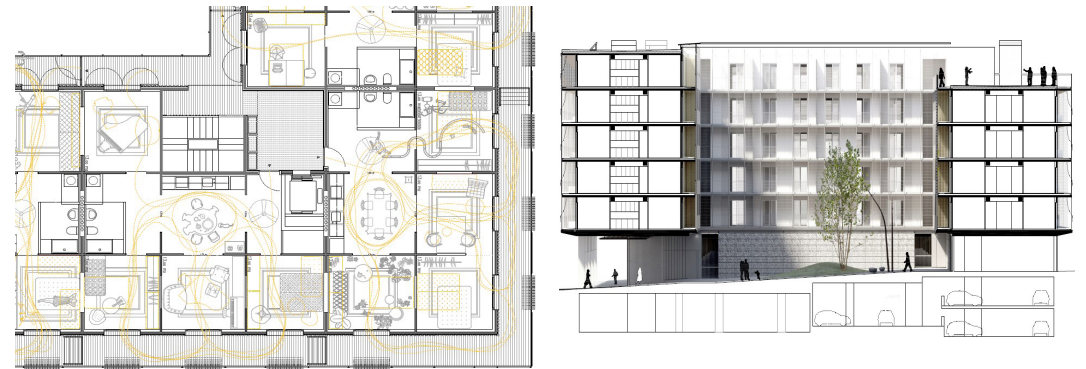


Fig. 69. Planta esquema de vida.

Fig. 70. Sección significativa.



Fig. 71. Vista interior. Transparencia y continuidad entre fachadas.



Fig. 72. Vista interior. Desaparición de los pasillos.

5. Casos de estudio

5.3 39 viviendas Entremutilvas



Fig. 73. Vista exterior fachada sur.

Estudio de arquitectura
MRM arquitectos
Taller Básico de Arquitectura
Año
2021-2024

Nº de viviendas
39

Estructura
Mixta (M + H + A)

Plantas
B+4

Volumen madera
1.010 m³

El estudio MRM Arquitectos junto con Taller Básico de Arquitectura diseñaron y construyeron esta promoción de viviendas encargada por la sociedad pública Nasuvinsa (Navarra de Suelo y Vivienda). Se proyectan 39 viviendas en un bloque de 18 metros de altura (B+4), de distintas tipologías, de dos, tres y cuatro dormitorios, con 59 plazas de garaje en sótano.

El objetivo principal era diseñar un edificio de viviendas de alquiler que destacara tanto por su habitabilidad como por su eficiencia energética (Edificación de Consumo Casi Nulo), además de lograr una integración en el entorno a pesar de las irregularidades de la parcela. Para enfrentar estos desafíos, el equipo de arquitectos optó por emplear una combinación variada de materiales portantes, adaptados a las particularidades del proyecto y del contexto urbano.

La promotora destacaba y promovía el uso de madera como elemento estructural y de esa manera, incentivar al sector privado. Con este proyecto marcaba un precedente y un ejemplo a seguir de lo que se puede hacer a nivel local.

En la fase de proyectación, trabajando en conjunto con los urbanistas, se decide diseñar un edificio en forma de L, lo que permite así cerrar el edificio a la fachada más fría, expuesta al ruido y el viento. De esta manera, la fachada sur es la parte interior de esta L, además es la que recoge las mejores vistas, aportando así un factor de calidad extra al proyecto. Esta fachada sur presenta unos balcones continuos que exponen la madera, la cual es uno de los ejes principales de este proyecto.

5. Casos de estudio

El proyecto combina de manera excelente los tres materiales estructurales por excelencia, haciéndolos trabajar cada uno de su manera más eficiente. El hormigón como basamento que separa el edificio del terreno y que transmite todas las cargas a la cimentación, los pilares metálicos continuos transmiten el peso al basamento y la madera en los forjados, acompañada de hormigón para darle unas mejores condiciones acústicas.

Todas estas elecciones, aparte de dar una solución a las cargas del bloque, aportan unas características arquitectónicas. El basamento de hormigón soporta unas columnas de hormigón sobre las que apoyarán directamente las vigas de madera y los pilares de acero. Estas columnas de hormigón de la planta enterrada ascienden por encima del terreno, dejando así un hueco para que la luz entre e ilumine los aparcamientos, aparte de permitir una ventilación natural del espacio y de las vigas de Glulam. Una vez que pasamos de la planta enterrada ya nos encontramos con las viviendas, que descansan sobre un primer forjado mixto (panel de CLT con una capa de compresión de hormigón), que se apoya sobre una retícula de vigas de madera laminada encolada (Glulam).

Para poder crecer en altura se opta por una retícula de pilares metálicos de acero que apoyan directamente sobre los pilares de hormigón de la planta sótano. Estos pilares metálicos atraviesan todos los forjados del proyecto hasta la cubierta. Para poder anclar las vigas de los forjados se diseñan en los propios elementos metálicos unos anclajes soldados que esperan a las vigas de madera.



Fig. 74. Pilares hormigón planta sótano.

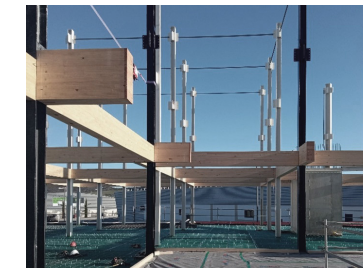


Fig. 75. Imagen en obra. Hormigón, Acero, Madera.



Fig. 76. Materiales en obra. Prefabricación.

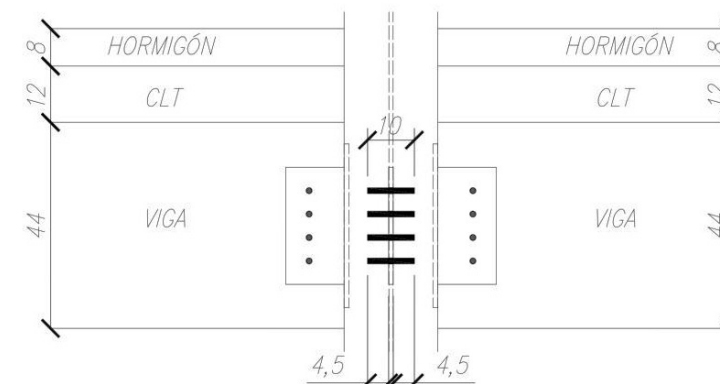


Fig. 77. Detalle unión pilar metálico y viga GLT (Glulam)



Fig. 78. Axonometría estructural.

5. Casos de estudio

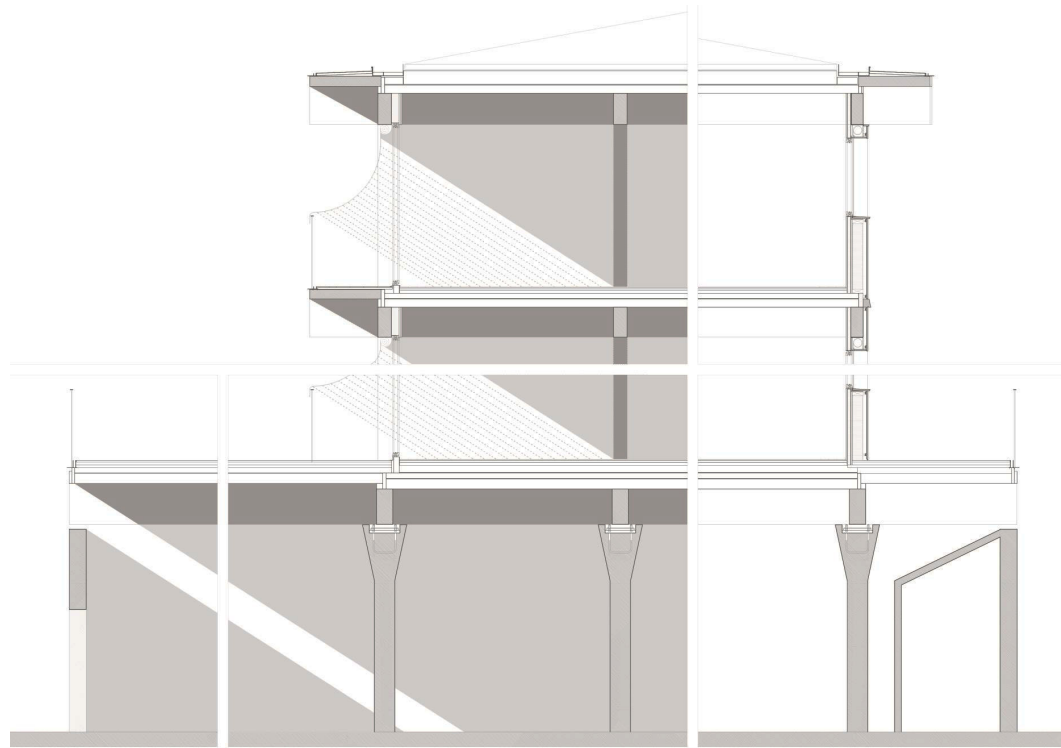
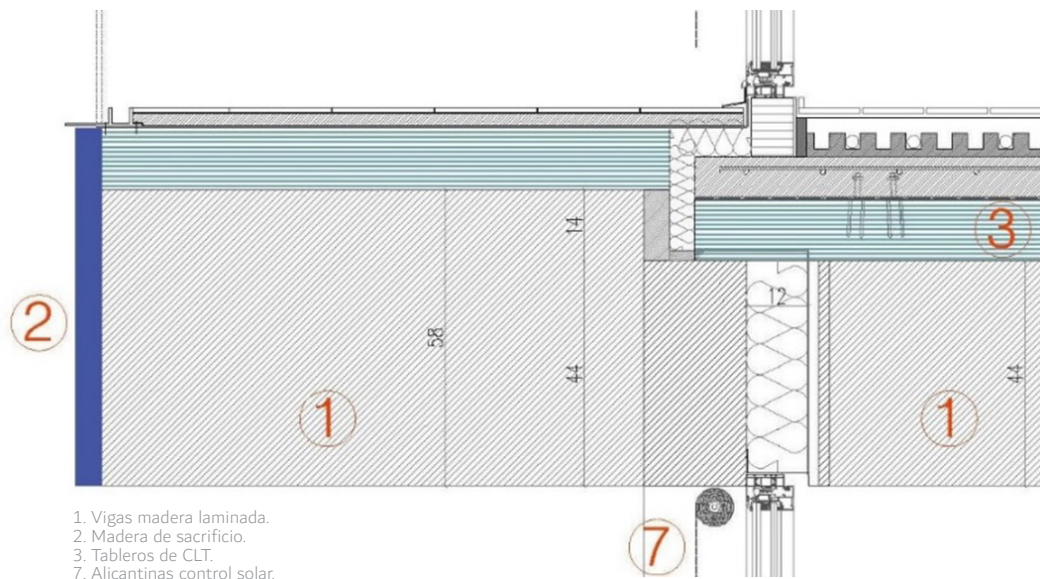


Fig. 79. Sección constructiva.



1. Vigas madera laminada.
2. Madera de sacrificio.
3. Tableros de CLT.
7. Alicantinas control solar.

Fig. 80. Detalle constructivo. Forjado int-ext.

5. Casos de estudio

Esta solución mediante estructura mixta permite liberar las fachadas y crear apoyos puntuales mínimos en la planta, creando una gran libertad, no obstante, para que estos pilares no afecten a la distribución se trabajó simultáneamente el desarrollo de la planta y la idea que se quería conseguir con la estructura. Para ello, en planta se opta por crear 3 sucesiones de espacio en las viviendas. En la fachada sur, están los espacios comunes del habitar, en la fachada norte las habitaciones y en medio los cuartos húmedos que requieren de un espesor de forjado mayor y se descuelga un falso techo. Esto permite además dejar vista la madera en los espacios del habitar. Se aprovecha esta distribución para colocar los pilares en los puntos entre los distintos espacios, quedando disimulados. Esta decisión se puede tomar gracias a varios factores y elecciones previas, al ser pilares de acero, su sección es muy inferior a la que se necesitaría en madera, permitiendo que pasen desapercibidos. Los elementos portantes metálicos permite trabajar mejor la variación de la retícula, no siendo todos los espacios de dimensiones y luces similares. Para facilitar la labor de la estructura metálica y de los forjados mixtos, los huecos de los ascensores vienen reforzados con pantallas de hormigón.

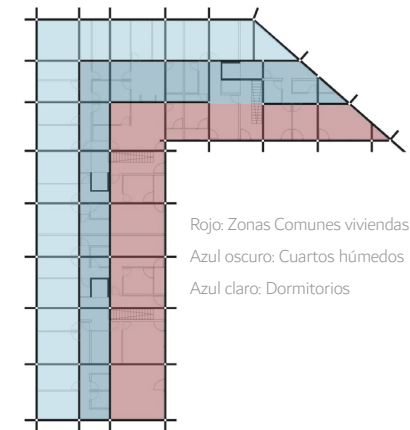


Fig. 81. Planta baja. Jerarquía de espacios

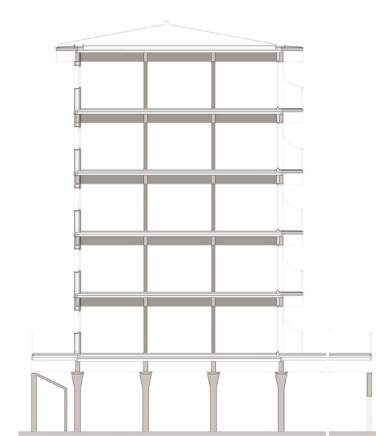


Fig. 82. Sección transversal.



Fig. 83. Foto de obra. Vigas espando a ser colocadas.

5. Casos de estudio

El sistema mixto ofrece múltiples ventajas. En primer lugar, permite arriostrar la estructura frente a esfuerzos horizontales, trasladándolos a las pantallas verticales de hormigón de los ascensores, lo que libera la planta de muros de carga que limitarían la flexibilidad en su distribución. Por otro lado, el comportamiento acústico del forjado mejora debido a la masa adicional que aporta el hormigón. La fachada queda completamente libre de condiciones portantes, resolviéndose mediante un entramado ligero de madera autoportante. Esto no solo mejora el rendimiento térmico, sino que también minimiza el volumen empleado, garantizando la viabilidad económica de la propuesta frente a soluciones más intensivas en madera.

La fachada de entramado ligero se reviste en su cara exterior con una piel de tablas verticales de madera termotratada con un acabado en color negro de cera. Este tratamiento asegura que el cambio natural en el tono de la madera con el paso del tiempo no afecte negativamente la percepción de los usuarios, ya que la fachada nunca tuvo el color natural de la madera desde su instalación.

Para comparar el consumo de la estructura con los otros edificios, obtenemos el ratio de volumen en función a la superficie. Se emplearon 680 m³ de CLT para los forjados y 330 m³ para las vigas de Glulam, todo ello teniendo en cuenta que cada planta del edificio tiene una superficie de 690 m², nos quedamos con una relación total de 0,24 m³/m².

Podemos observar como este adopta soluciones estructurales parecidas al de Peris Toral, pero es el cambio a estructura bidireccional y la elección de los materiales lo que le da una anatomía propia. La bidireccionalidad permite reducir los forjados al mínimo, marcando y dejando visible la estructura en el interior. Así mismo se emplean estas vigas vistas para separar los espacios, construyendo tabiques o simplemente generando una separación visual. Optan por sacar la estructura a la fachada sur para enfatizarla y la esconden en la fachada norte (más expuesta), con esta elección llevan el interior al exterior y viceversa.



Fig. 84. Escalera metálica. Suelo de CLT + hormigón para acústica.



Fig. 85. Foto fachada prefabricada.

5. Casos de estudio



Fig. 86. Vista significativa.



Fig. 87. Vista exterior fachada norte.



Fig. 88. Vista exterior pasillo distribuidor.



Fig. 89. Vista balcones. Pilares y madera.



Fig. 90. Vista interior. Estación orientación sur.



Fig. 91. Vista interior. Acceso, escaleras, vivienda.

5. Casos de estudio

5.4 Paris XIII - Wood Up



Fig. 92. Vista Exterior en relación con la ciudad.

El estudio de arquitectura LAN diseñó este edificio en París, en un encargo para desarrollar la zona de la Rive Gauche. La parcela, ubicada en una zona muy buena por su conexión con el río Sena, debe conseguir ordenar las conexiones entre los barrios del distrito XIII, el Sena e Ivry-sur-Seine. Esta zona tiene el deseo de crear un nuevo paisaje urbano metropolitano, un nuevo skyline de París, como ya ocurrió con el barrio de La Défense. El edificio alcanza los 50 metros de altura (altura máxima permitida para edificios residenciales en París) convirtiéndolo en un icono del barrio y de la ciudad.

Tal como ellos mismos apuntan, diseñar un edificio de madera es, ante todo, estudiar una estructura que pueda coincidir con su programa funcional. En este proyecto, la estructura del edificio se define en relación con el tamaño de las viviendas. Su estrategia es componer una dimensión de 3,90 metros para adaptarse fácilmente a cualquier tipo de vivienda. Una vez que tenían claro este posible orden y rigor, empiezan a plantear posibles intenciones del proyecto, una de las cosas que caracteriza y condiciona al edificio es la intención de crear unas dobles plantas.

El objetivo es conseguir un tipo de vivienda que combine la privacidad y la vida en comunidad. Los residentes pueden disfrutar de abundante luz, espacio, comodidad y flexibilidad en sus casas, y al mismo tiempo tener la oportunidad de reunirse con los vecinos en las zonas comunes y terrazas.

Para conseguir esta diversidad de espacios sin perder las ideas originales se trabaja siempre acorde a la estructura, que en este caso es híbrida, con una base de hormigón de tres pisos que aborda la complejidad del desnivel de 7 m del sitio hasta el Sena y genera nuevas conexiones entre el río y el vecindario.

Estudio de arquitectura
LAN Architecture

Año
2017-2023

Nº de viviendas
132

Estructura
Mixta (M + H + A)

Plantas
B+16

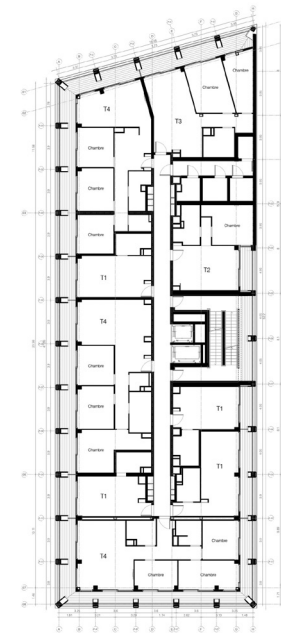


Fig. 93. Plano planta tipo (P+4)



Fig. 94. Vista interior. Doble altura.

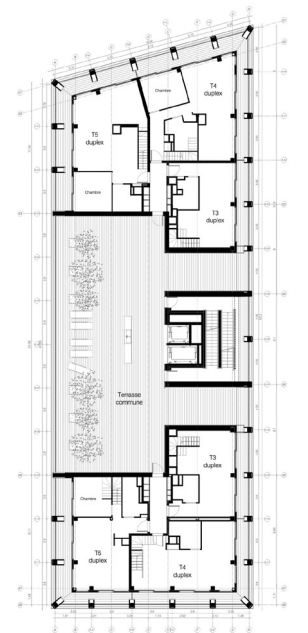


Fig. 95. Plano planta terraza (P+8).

Sobre la base de hormigón, comienzan a construirse los elementos estructurales, las columnas de madera, los muros de hormigón (núcleos de comunicaciones y de los muros de arriostramiento contra el viento) y las losas de hormigón y madera del suelo, forman una retícula que define el exterior y que, además, genera una segunda piel que proporciona balcones, sombra y privacidad a las fachadas traseras, casi totalmente acristaladas. Las losas se alternan constantemente, un forjado es de madera y el siguiente mixto (madera y hormigón), aportando una flexibilidad vertical al proyecto, además de la horizontal que se consigue al no haber muros de CLT, todo ello pensando en un cambio de necesidades de cara al futuro.

La estructura de madera, que generalmente está protegida y oculta, se expone intencionadamente. Está completamente revestida en vidrio para que sea visible.

En este caso, los elementos portantes son de madera laminada encolada (Glulam) y madera laminada cruzada (CLT), usando diferentes tipos en función de si se van a quedar expuestas a la intemperie (abeto) o protegidos en el interior (haya y abeto) considerando las propiedades de cada uno. Todo el material procede de bosques al norte de París y fue transportada a través del Sena, de esta manera se conseguía reducir aún más la huella de carbono del edificio.

La liberación de la planta al máximo se consigue gracias a la elección de la estructura y los materiales, se organizan los apartamentos más pequeños y las unidades dúplex de doble altura en las esquinas del bloque. La estructura interna en madera laminada se deja expuesta a las ventanas de altura completa. La organización y variación tipológica, permite crear 132 unidades de apartamentos.

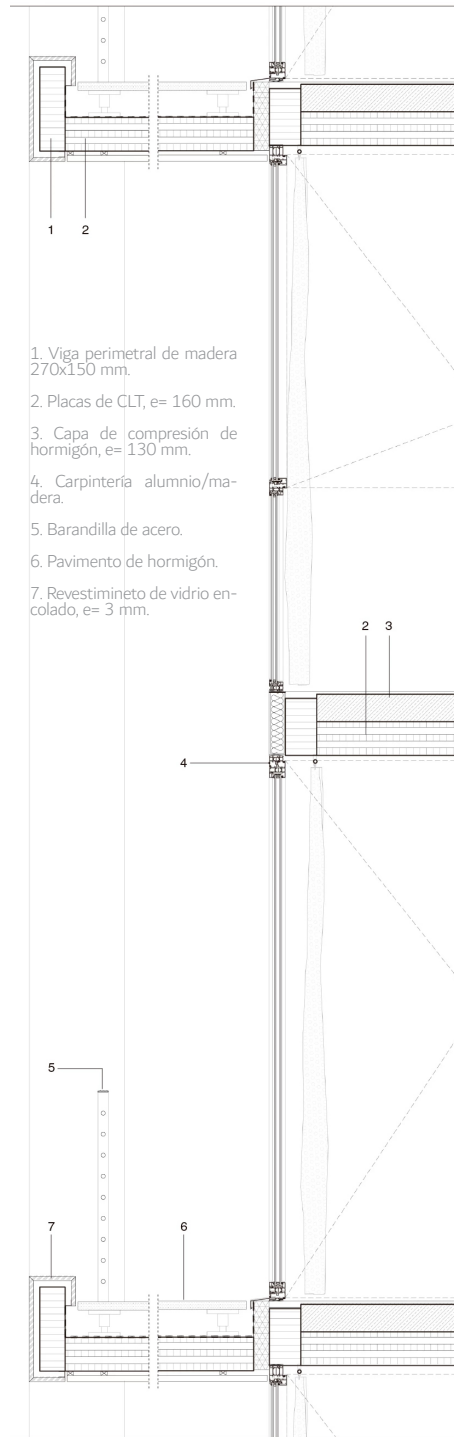


Fig. 96. Detalle constructivo. Exterior - Interior.

- 8. Viga de madera laminada de abeto (GLT).
- 9. Pilar de madera laminada de haya (GLT).
- 10. Viga Virendeel de acero.
- 11. Forjado mixto de madera y hormigón (CLT).
- 12. Pantalla de hormigón de contraviento.
- 13. Viga escalera de acero.
- 14. Pilares de hormigón.

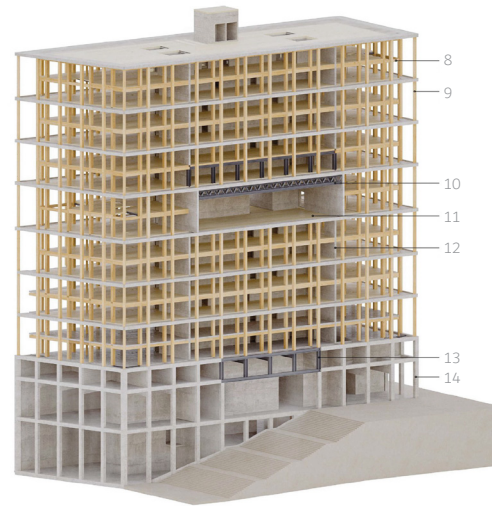


Fig. 97. Axonometría estructural.



Fig. 98. Vista exterior. Correspondencia con detalle.

En el intento de crear un edificio con espacios de relación entre las personas, el proyecto se abre a la ciudad a través de la creación de un piso común en la planta 8. Creado como un híbrido entre un patio cubierto, una logia y un mirador con vistas a París e Ivry, creando un espacio versátil privilegiado. Para poder abrir este espacio, combinan en ese punto la estructura de madera, con las mixtas, pero además tienen que proyectar un refuerzo con acero, un sistema de pilares y de cercha metálica que permite salvar la luz creada en ese espacio.

Las columnas exteriores de Glulam estabilizan el edificio. Cada una de estas columnas se extiende dos pisos por la fachada, reduciendo a la mitad el número aparente de plantas cuando se ve desde lejos, combinado con la creación de balcones en los puntos donde se apoyan estos pilares, crean un potente efecto geométrico, dando la sensación de que hay la mitad de las plantas y que todas son de doble altura. Esto permite dar una sensación de flexibilidad del exterior que intenta luego llevarse al interior. Todo ello tratado simultáneamente y conseguido gracias a la elección de su estructura y las combinaciones de esta.



Fig. 99. Foto exterior. Hueco, estructura, ciudad.



Fig. 100. Foto exterior. Hueco, doble altura.



Fig. 101. Vista exterior representativa.

5. Casos de estudio

Gracias este tipo de medidas y decisiones lleva a decir a los arquitectos que el proyecto se trata literalmente de un edificio de cristal con una estructura de madera que actúa como un sistema de columnas y vigas para mantener el cristal en su sitio.

El proyecto se vio afectado por grandes retrasos, provocados por factores externos como el incendio de Notre-Dame de París, la necesidad inmediata de construir la villa olímpica (casi toda de madera). Todo esto provocó cambios de normativa, escasa disponibilidad de materiales y aumento de los precios.

Aun así, el coste total por metro cuadrado ha acabado siendo poco más que el de los equivalentes convencionales: 2.700 euros en lugar de los aproximadamente 2.500 euros del hormigón. En cuanto al consumo en m³ por superficie, se consigue reducir bastante al emplear vigas de madera laminada encolada (Glulam) y forjados mixtos. Consiguiendo un ratio muy bueno, pero sí que es cierto, que es un proyecto donde el empleo de hormigón también es bastante alto comparado con el resto de los estudiados en el trabajo, no implica que sea algo negativo, pero sí una consideración a tener cuenta.

La anatomía del edificio es especial, una solución mixta que le permite enseñar la madera, transmitiendo así unas sensaciones, y usando el hormigón en zonas menos expuestas. Con los forjados ocurre lo mismo, solo enseña la mitad de los forjados de hormigón y expone en el interior al máximo los forjados de madera. Consigue exponer la madera al máximo, dándole así unas cualidades visuales que incitan a exponerlo, ponerlo como muestra. Es la madera la que da forma exterior al edificio.



Fig. 102. Vista exterior. Columnas y vigas que sujetan el cristal en su sitio.



Fig. 103. Imagen Interior. Planta acceso de hormigón.

5. Casos de estudio

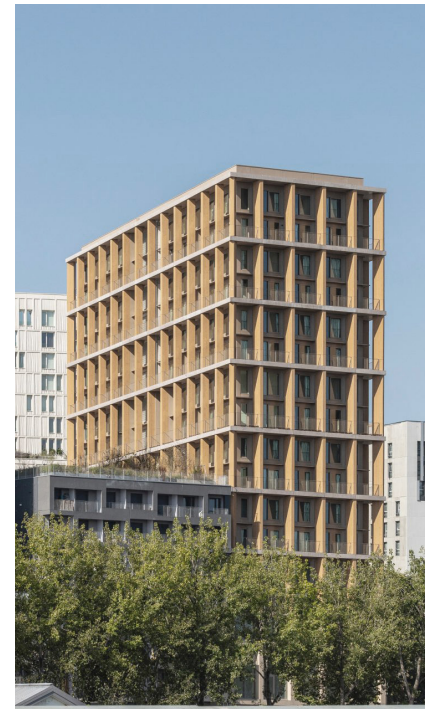


Fig. 104. Vista exterior representativa.

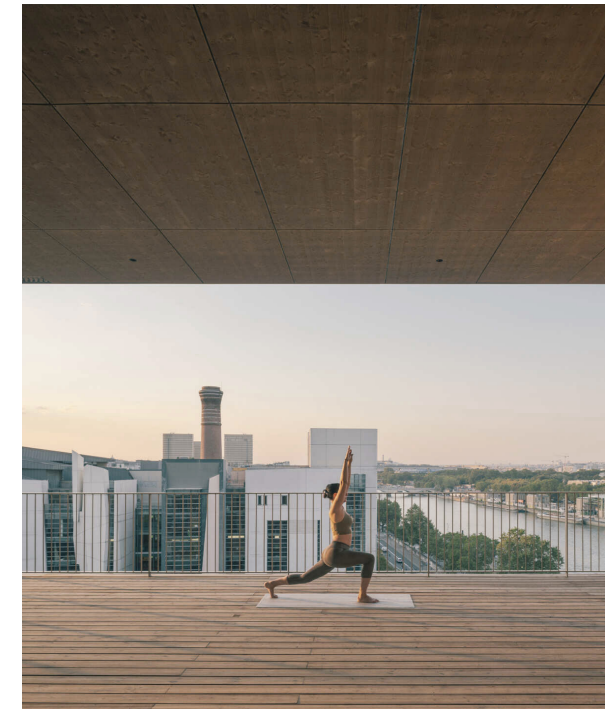


Fig. 105. Vista interior-exterior. Terraza superior. Zonas comunitarias.



Fig. 106. Vista interior. Vivienda en esquina de una altura.

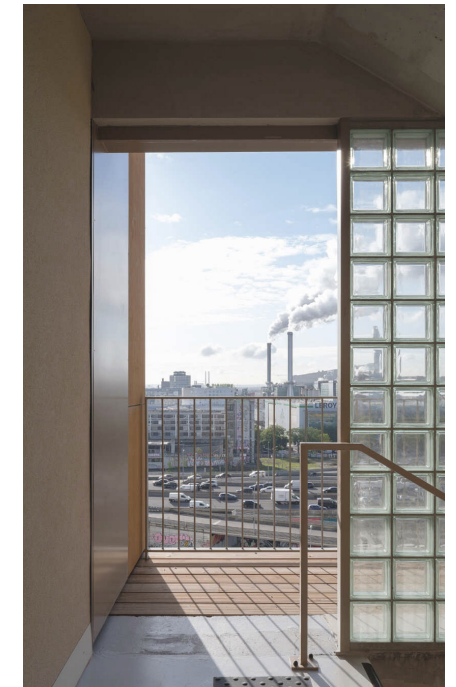


Fig. 107. Vista interior-exterior. Nucleo comunicaciones.

5. Casos de estudio

5.5 Mjøstårnet



Fig. 108. Vista Exterior. Pérgola.

Estudio de arquitectura
Voll Arkitekter

Año
2017-2019

Nº de viviendas
30 (uso mixto)

Estructura
Mixta (M + H)

Plantas
B+17

Volumen madera
2.600 m³

El proyecto ubicado en Brumunddal, al norte de Oslo, está diseñado por el estudio Voll Arkitekter. Lo que hace a este edificio tan interesante es su altura, puesto que está formado por 18 plantas sobre rasante (85,4 metros), lo que lo convierte en el segundo edificio más alto del mundo de estructura de madera, solo superado por The Ascent con (86,6 metros). Si bien es cierto que el edificio The Ascent tiene una estructura mixta, teniendo los primeros 6 pisos de hormigón.

El edificio se terminó en marzo de 2019 tardando solo 2 años en realizarse, lo cual para un edificio de estas dimensiones es bastante rápido, esto se debe a la prefabricación de las piezas, sin necesidad de apenas realizar parte de la estructura in situ como sí que ocurre, por ejemplo, con el hormigón.

Con una superficie de 17 m de ancho y 37,5 m de largo, cada planta tiene aproximadamente 640 m². El programa total de la torre es de unos 10.500 m². El edificio alberga distintos usos, desde zonas públicas en las plantas bajas, oficinas, un hotel y los apartamentos. En el estudio de la tipología se van a utilizar los planos de la parte residencial, pero siendo conscientes que los usos que hay en las plantas inferiores también pueden condicionar a lo que ocurre en los apartamentos.

Los apartamentos van desde la planta 12 hasta la 16 y hay 6 en cada planta, obteniendo así 30 apartamentos en la torre.

El proyecto nace con unas ciertas inspiraciones como explica el estudio:

“Desde el punto de vista de la sostenibilidad, el aspecto más importante de nuestro edificio fue demostrar que es posible construir edificios de madera grandes y complejos y, de ese modo, inspirar a otros a hacer lo mismo.”³

3. Øystein Elgsaas (Voll Ark Partner), 2023. Entrevista para Dezeen.

5. Casos de estudio

Todo esto lo intentan hacer manteniendo la huella de carbono del edificio lo más baja posible, en parte, este edificio tiene unas características que ayudan a conseguir esto. Primero, Noruega es un país donde el acceso a la madera es relativamente fácil, pero además, la proximidad del edificio a un importante centro forestal y de procesamiento del material significó que los materiales para la torre Mjøstårnet procedían de bosques de abetos y pinos cercanos. El traslado desde la fábrica donde se procesaba la madera hasta el lugar de construcción era de apenas 15 minutos.

Realmente los elementos principales del edificio se componen de grandes cerchas de madera laminada de abeto (Glulam) ubicadas a lo largo de las fachadas, complementadas con columnas y vigas internas. Estas cerchas gestionan las fuerzas globales tanto horizontales como verticales, proporcionando al edificio la rigidez estructural necesaria. Por su parte, los muros de CLT actúan como soportes de carga secundarios, encargándose de sustentar los tres ascensores y las dos escaleras. Los suelos se realizaron con LVL (madera micro laminada).

Posteriormente, grandes piezas de fachada prefabricadas se colocaron en el exterior de las estructuras, protegiéndola y creando la envolvente del edificio. Estos elementos tipo sándwich vienen con aislamiento resistente al fuego y revestimientos exteriores ya fijados. Para el revestimiento se eligió un producto hecho con madera de pino tratada para ser resistente al fuego.

Aunque el estudio había asumido el compromiso de utilizar madera como material principal, este no estuvo exento de desafíos. La ligereza de los elementos estructurales presentó complicaciones, ya que la parte superior del edificio era propensa a movimientos causados por el viento. Según las normativas noruegas, las aceleraciones máximas provocadas por el viento en el último piso de la torre Mjøstårnet se sitúan en el límite de lo aceptable para edificios residenciales.



Fig. 109. Plano planta apartamentos.

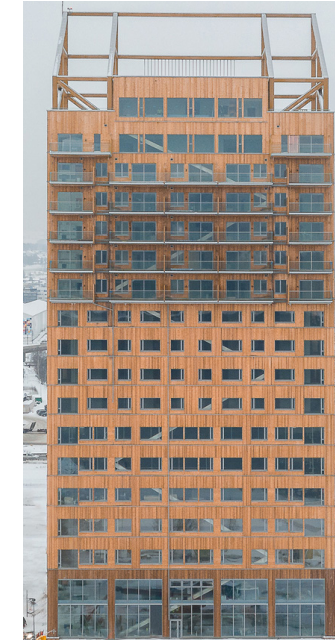


Fig. 110. Vista exterior. Alzado.



Fig. 111. Plano planta ático.



5. Casos de estudio

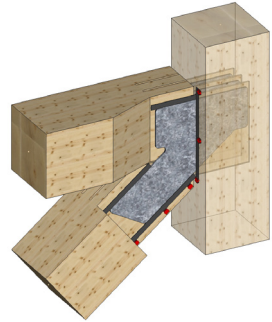


Fig. 112. Detalle constructivo. Exterior - Interior.

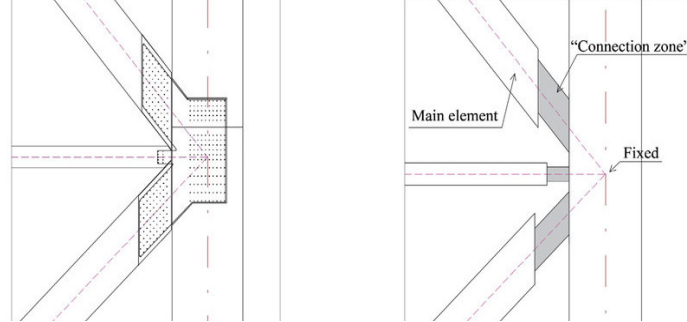


Fig. 113. Detalle constructivo. Unión metálica entre elementos de la estructura.



Fig. 114. Detalle constructivo. Unión acero. Cimentación - Viga.

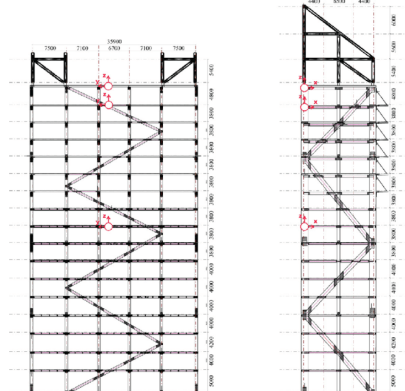


Fig. 115. Alzados estructurales.



Fig. 116. Detalle constructivo. Unión acero. Encofrado a cimentación.



Fig. 117. Imagen fase construcción 1. Estructura portante vertical. GLT y CLT.

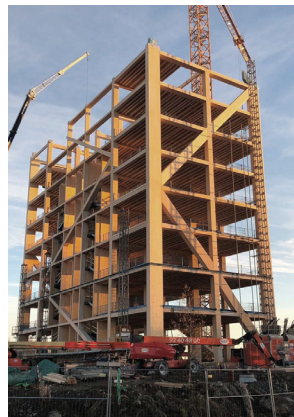


Fig. 118. Imagen fase construcción 2. Estructura y forjados. CLT, GLT y VLV.



Fig. 119. Imagen fase construcción 3. Estructura, forjados y fachadas. CLT, GLT, VLV y hormigón.

5. Casos de estudio

Para abordar este problema, los arquitectos optan generalmente por estrategias de estructuras mixtas, combinando madera y hormigón. En el caso de Mjøstårnet, el estudio Voll Arkitekter decidió incorporar hormigón en los suelos superiores para proporcionar el peso y la solidez necesarios. En los pisos del 12 al 18, los forjados están compuestos por una capa de hormigón vertido sobre un elemento de madera prefabricado, creando un espesor total de 30 cm.

Este enfoque, que reemplazó los forjados de madera por pisos de hormigón en las plantas superiores, aumentó el peso en la parte alta del edificio, lo que contribuyó a ralentizar las aceleraciones del movimiento causado por las fuerzas del viento, mejorando así la estabilidad general de la estructura.

Este es un claro ejemplo de como es casi más importante la estructura y la construcción que la distribución, puesto que gracias a los métodos utilizados y las estrategias adoptadas se libera la planta, dejando apenas unos pocos pilares que condicionan el espacio, en concreto 8.

Al liberar la planta tanto, da una libertad de distribución muy grande que apenas condiciona el proyecto, pudiendo sacar un alto rendimiento al espacio y no crear superficies perdidas.

Además, la elección de esta técnica implica la utilización de casi todos los elementos (jácenas, pilares y vigas) de Glulam, consiguiendo una relación de uso de madera en función de la superficie de 0,24 m³/m², puesto que se emplean unos 2.600 m³ de elementos estructurales para una superficie aproximada de 10.500 m².

Así mismo, conociendo las limitaciones del producto, en el diseño del proyecto se emplean uniones metálicas entre los forjados y las vigas de fachada, permitiendo una conexión perfecta. No obstante, con la complejidad estructural que tiene el proyecto y siendo el primero de este tipo y con esta envergadura, se diseñaron unas uniones metálicas que reciben y sujetan los pilares entre sí, añadiendo la complejidad de que hay que transmitir la carga en diagonal en algunos puntos.

No solo eso, sino que la unión en planta baja de la estructura con el forjado de hormigón se tuvo que pensar para elementos de esa dimensión.

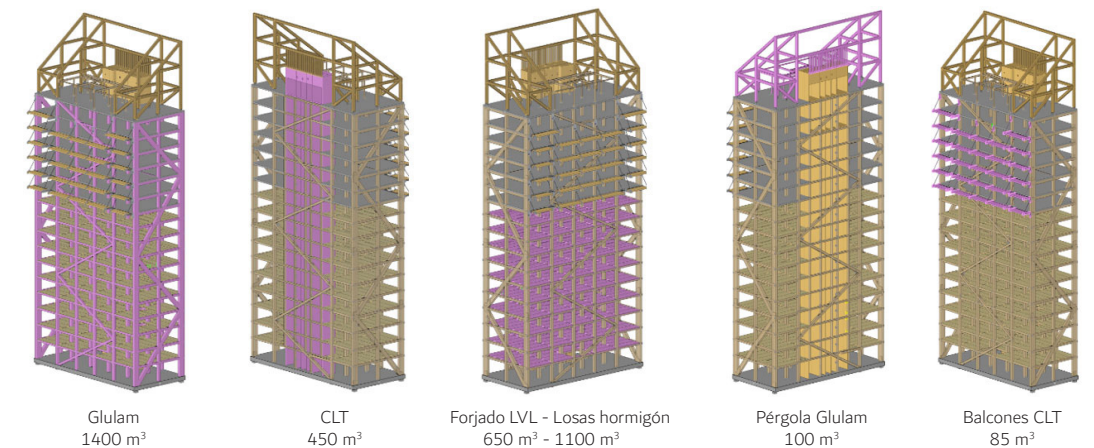


Fig. 120. Axonometría de materiales.

5. Casos de estudio

Durante la construcción, se tuvieron que enfrentar a varios problemas relacionados con la elección de la estructura, uno de ellos fue la exposición de la madera a la intemperie y la humedad. Se consideró en los plazos de realización de obra, que, una vez acabada la estructura y puestos los cerramientos, se debía de echar aire caliente al interior, controlando el secado para poder continuar. No todo salió como se esperaba, puesto que los forjados de LVL, al contrario que los de CLT, absorbe agua a través de los laterales que están expuestos y debido a su diseño, entra agua y es más difícil secarlos. El margen de error conforme se aumenta la altura tiene que ser mucho menor, aun con esos condicionantes y debido a la gran precisión de los elementos prefabricados de todas las vigas, solo se tuvo que mandar rehacer una que no encajaba a la perfección en las uniones metálicas, las cuales requerían de una precisión milimétrica.

No obstante, el proyecto fue un éxito, sentando unos precedentes en la manera de construir con madera en edificación en alturas considerables. La estructura es un elemento que puede generar el propio proyecto si se sabe trabajar con el material y se adoptan las medidas necesarias.

El tipo anatómico que se crea es diferente al resto, lo primero y esencial es la estructura y el resto va subordinado a ella. En este tipo de edificación de mayor altura, el esqueleto del edificio toma especial importancia, sacrificando a veces el resultado espacial como se puede ver en las imágenes interiores del edificio. La estructura intenta adaptarse al máximo, esto se aprecia en la colocación de las vigas entre los pilares interiores, se opta por colocar en la dirección más corta. De esta manera, se rompen las distribuciones de los espacios, se aprovechan esas líneas para trazar las paredes de separación entre habitaciones, oficinas y los apartamentos. De esta manera, además, apoyan varias sobre la estructura del ascensor, ahorrando pilares y material.

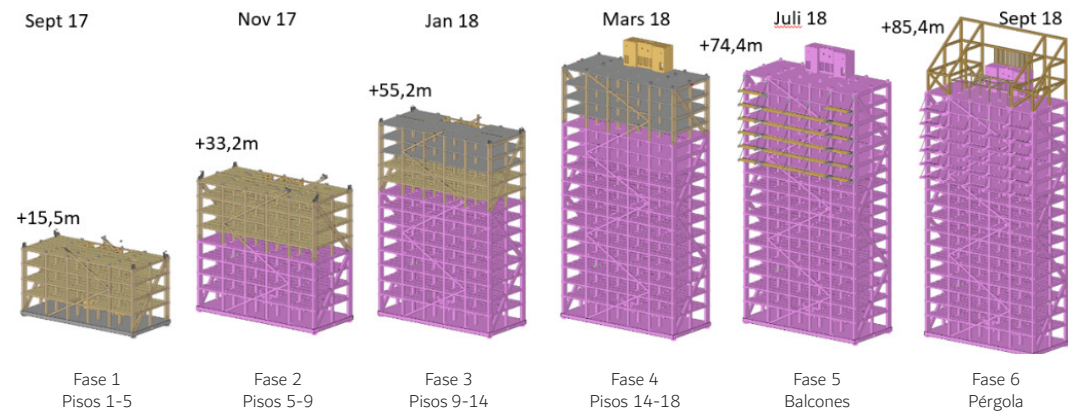


Fig. 121. Axonometría de esquema temporal.

5. Casos de estudio



Fig. 122. Vista exterior. Materialidad y balcones

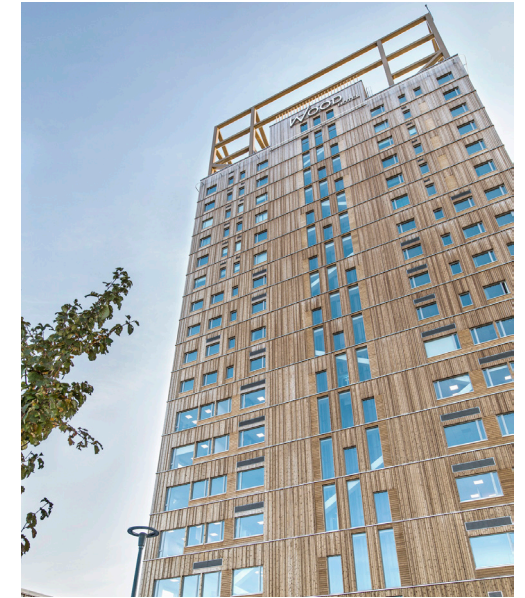


Fig. 123. Vista exterior. Materialidad y pérgola.

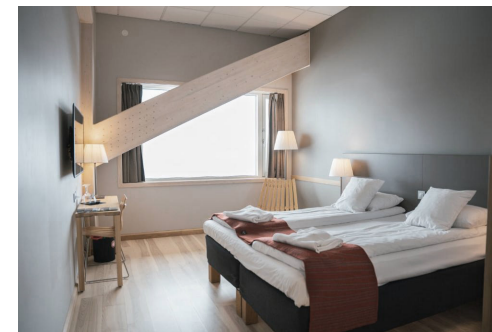


Fig. 124. Imagen interior. Habitación hotel. Estructura.



Fig. 125. Interior. Apartamento. Estructura. Ausencia materialidad.

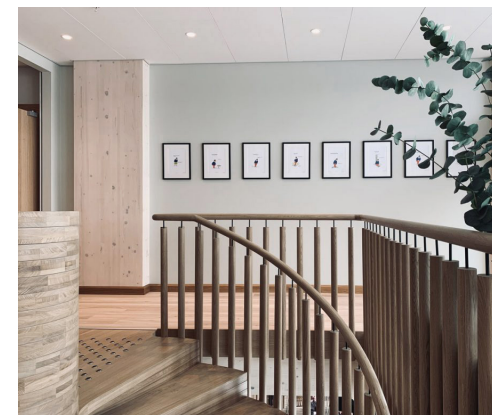


Fig. 126. Imagen interior. Zonas comunes. Estructura vista.



Fig. 127. Vista interior. Habitación hotel. Pared de madera.

6.Conclusiones



6.Conclusiones

El estudio sobre la anatomía estructural con madera revela una profunda conexión entre la estructura como elemento portante y la configuración espacial de los edificios. Esta relación se había perdido en los últimos años. En la modernidad, con la introducción del esquema de la Maison Dom-ino de Le Corbusier, la estructura y el espacio se disociaron, dando lugar a una arquitectura donde los elementos portantes eran independientes de la distribución y configuración interna de los espacios habitables. Esto se debe al concepto de la planta libre y la liberación de la fachada. En la actualidad, el hormigón nos permite construir con una libertad muy grande, no es necesario tener una continuidad de cargas estrictamente vertical, las losas han pasado a ser lisas, sin vigas, jácenas o cambios de altura, creando un espacio liso, sin énfasis mayor a la estructura que los propios muros o pilares. Sin embargo, al trabajar con madera como material portante, esta relación intrínseca entre forma, estructura y espacio se recupera, lo que enriquece la arquitectura contemporánea.

Son estas relaciones obligatorias las que crean una variedad de anatomías diferentes. Es esa relación con los organismos lo que se busca, todos los edificios tienen estructura, fachada, instalaciones, revestimientos interiores, etc., al igual que los hombres o los animales tenemos huesos, piel, intestino, ligamentos. En el caso de los edificios ocurre lo mismo, podremos clasificarlos en función de su materialidad, pero no todos son solo edificios de madera, no todos funcionan de la misma manera. Pero lo que sí que está claro es que si todos los órganos del edificio no trabajan en conjunto, no funcionará. El esqueleto tiene que hacer espacio para los órganos, para nuestras arterias, nervios... Lo mismo tiene que hacer el edificio, la estructura tiene que hacer hueco para los espacios que se albergan en su interior y depende de la manera en la que coloquemos nuestra estructura o nuestra fachada, se generaran los espacios del habitar.

En la madera retomamos aquella idea original de la piedra o el ladrillo, donde la estructura actúa como generadora de la forma y del espacio. Aunque los elementos industrializados nos brindan una mayor libertad en comparación con estos materiales tradicionales, sigue siendo esencial que la forma surja del material.

“Pregunta al ladrillo lo que quiere ser”

Louis Kahn

“La forma sigue a la función”

Louis Sullivan

6.Conclusiones

Como decía Kahn, los materiales tiene una cierta función en su interior. Debemos de preguntarnos qué quiere ser la madera, qué función va a desempeñar, si hacemos eso y sabemos la función, sabemos la forma. Función y forma van de la mano, son ellos los que crean los espacios. Por ese razonamiento la madera indirectamente nos genera los espacios, sus propias condiciones mecánicas, sus propiedades nos condicionan y ayudan a generar esos espacios.

Al igual que la madera recupera esa esencia primigenia en la forma de construir, tiene unas propiedades hápticas⁴ que la hacen óptimas para construir el espacio del habitar. Al final nuestro hogar es nuestro sitio seguro, de tranquilidad y por ello, la calidez que transmite, el olor, el hecho de que es un material vivo y natural consigue transmitir unas sensaciones de confort que se buscan especialmente en edificaciones de tipo residencial. Está claro que además la madera tiene una serie de propiedades de huella de carbono que la convierten en un material idóneo para las demandas sociales y normativas, pero esto no debe ser el único condicionante en su elección.

*Y así no me canso de repetir que la ESTRUCTURA, la estructura portante, más que sólo transmitir las cargas del edificio a la tierra por causa de la ineludible gravedad, lo que verdaderamente transmite es el orden del espacio, ESTABLECE EL ORDEN DEL ESPACIO, construye el espacio.*⁵

A. Campo Baeza, La estructura de la estructura, 2008

En definitiva, la vuelta de la madera como material portante nos está permitiendo reconciliar la estructura con el orden espacial y su forma, la necesidad de que la forma, la función y la estructura convivan juntas, que se potencien la una a la otra. Las elecciones que hacemos los arquitectos de estos tres puntos, nos permite crear anatomías arquitectónicas diferentes.

*Para soportar la Construcción es necesaria la Estructura. Para soportar la Arquitectura es necesaria la Estructura de la Estructura.*⁵

A. Campo Baeza, La estructura de la estructura, 2008

4. Háptico: Estudio de las percepciones a través del tacto. (R.A.E.)

5. La línea del cielo - La estructura de la estructura. Establecer el orden del espacio. pag. 7 y pag. 8

ISBN: 978-84-936485-9-6

6.Conclusiones

Estas conclusiones vienen respaldadas por el estudio de los casos prácticos. La elección de estos casos se ha basado en el interés que generaban, por su diferente estructura, sus múltiples formas y dimensiones, sus intenciones, etc. En definitiva, la manera en la que el material, en este caso la madera y sus diferentes formas en las que lo trabajamos, son capaces de generar una variedad de espacios, unas múltiples anatomías estructurales diferentes y todas ellas originadas en función de la forma en que se decide colocar la madera en su estructura.

En el Bloque 6x6 o en Cornellà Impsol, ambos buscan generar espacios flexibles, con una doble orientación. Son dos tipos estructurales diferentes y cada uno lo consigue de maneras diversas, una con una modulación marcada por los muros de carga y otra por los pilares, pero al final, siendo conocedores de como los elementos de la estructura iban a condicionar el espacio, ambos los emplean para conseguir su fin. En Cornellà esa separación se consigue con paredes muy permeables y vigas longitudinales en el techo paralelas a las fachadas. En el bloque 6x6 es directamente con tabiques de madera que parten el espacio, de manera más contundente, pero siempre paralelas a las fachadas, para así crear los espacios de dormir y los espacios de vivir, poniendo en medio los cuartos húmedos. Ambos proyectos intentan crear una libertad de espacio y modularidad para una posible reconversión en el futuro.

Es la madera y en consecuencia los elementos y formas que se eligen emplear, los que llevan a usar diferentes herramientas proyectuales, una forma diferente para una función similar, crea un proyecto y unos espacios distintos.

Con el edificio de vivienda Entremutilvas, que también tiene una doble orientación. Optan por otra anatomía estructural diferente, mixta, condicionada por otros aspectos. Se buscaba sacarles el máximo rendimiento a los materiales, hacer un forjado lo menor posible, para ello usan madera y hormigón. Sólo con las vigas bidireccionales se ordena el espacio, además esos mismos elementos los muestra en fachada enfatizando la estructura para que pueda ser visible desde el exterior. Además, se emplean pilares de acero que trabajan mejor que la madera como elemento portante vertical. En esa misma columna integra el elemento de unión de las vigas que siempre iba a tener que ser de metal.

Y en el proyecto de París XIII y Mjøstårnet para conseguir tener una dimensión en altura superior, se ven obligados a tomar una serie de medidas diferentes, pero siempre siguiendo con el mismo principio.

Si bien es cierto que hoy en día, para poder construir un edificio de gran altura con madera hay que sacrificar determinados aspectos, dar prioridad a la estructura, es ese el punto a desarrollar. Conseguir que estructura, forma y función sigan de la mano y trabajando al unísono.

6.Conclusiones

7. Bibliografía

7.1 Libros y revistas

7.2 Trabajos de fin de grado

7.3 Webgrafía

7.4 Créditos de imágenes

7. Bibliografía

7.1 Libros y revistas

- Waugh Thistleton Architects. (2018). *100 Projects UK CLT*.
- Campo Baeza, A. (2008). *La línea del cielo*.
- Revista Dezeen. (2023). Barker, N. *Timber Revolution*.
- Revista Dezeen. (2023). Hahn, J. *The hidden carbon impacts of getting mass timber wrong*.
- Revista Dezeen. (2023). Crook, L. *Building tall with timber “does not make sense” say experts*.
- Revista Dezeen. (2023). Crook, L. *Mass-timber buildings can have very high carbon emissions*.
- Revista Dezeen. (2023). Frearson, A. *At first we were definitely making concrete buildings out of timber*.
- Revista AV Proyectos 106. Buchner Bründler. *Bloque 6x6, Gerona*.
- Revista AV Monografías 243-244. España 2022. *Bloque 6x6, Gerona*.
- Revista Afasia. (2021). *bosch.capdeferro 6X6 BLOCK*.
- Revista Tectónica. (2024). *85 viviendas sociales en Cornellà / Peris+Torral Arquitectes*.
- Revista TC cuadernos 161. (2023). *LAN Arquitectura 2010 - 2023*.
- Revista Dezeen. (2025). Astbury, J. *LAN “deliberately exposes” mass-timber structure of Paris apartment block*.
- Periodico RIBA. (2025). Jervis, J. *Is Paris’s Wood Up a template for future timber housing projects?*
- Revista Divisare. (2024). *LAN Architecture WOOD UP*.
- Revista Afasia. (2023). *LAN Wood Up . PARIS*.
- Revista Dezeen. (2023). Finney, A. *Voll Arkitekter’s Mjøstårnet “helped wooden architecture reach new heights”*.
- Revista Dezeen. (2019). Block, I. *Mjøstårnet in Norway becomes world’s tallest timber tower*.

7. Bibliografía

7.2 Trabajos de Fin de Grado

- Cortés Jiménez, S. (2015). *La prefabricación estructural de la madera contralaminada y su aplicación en obra nueva y rehabilitación*. Recuperado de <https://zaguan.unizar.es/record/48260/files/TAZ-TFG-2015-3330.pdf>
- Traín Pérez, M. (2016). *Madera, material tradicional, una nueva tecnología para la construcción en altura*. Recuperado de <https://zaguan.unizar.es/record/61149/files/TAZ-TFG-2016-3616.pdf>
- Lucia Jiménez, V. (2017). *La madera como elemento clave en la certificación Passivhaus*. Recuperado de <https://zaguan.unizar.es/record/64020/files/TAZ-TFG-2017-3472.pdf>
- Martínez Gayá, J.E. (2018). *La madera en altura*. Recuperado de https://oa.upm.es/51465/1/TFG_Martinez_Gaya_JoseEnriqueop.pdf
- Anselmo, A. (2023). *MASS TIMBER CARBON SOLUTIONS Reducing Life-Cycle Carbon Emissions with Mass Timber Construction*. Recupertado de <https://hapticarchitects.com/wp-content/uploads/2023/08/Mass-Timber-Carbon-Solutions-Reducing-Life-Cycle-Carbon-Emissions-with-Mass-Timber-Construction.pdf>
- Moreno Carrera, J. (2023). *La habitación neutra. Desjerarquización y polivalencia en la vivienda colectiva*. Recuperado de https://oa.upm.es/75998/1/TFG_Jul23_Moreno_Carrera_Jorge.pdf

7.3 Webgrafía

- Sitio web oficial de Council on Tall Buildings and Urban Habitat (CTBUH). *State of Tall Timber 2022*. https://www.ctbuh.org/resources/papers/4530-Journal2022_Issue1_Stateof-TallTimber+TBIN.pdf
- Sitio web oficial de Council on Tall Buildings and Urban Habitat (CTBUH). *The State of Tall Timber: A Global Audit*. <https://www.ctbuh.org/mass-timber-data>
- Sitio web oficial de Council on Tall Buildings and Urban Habitat (CTBUH). *Tall Buildings in Numbers*. <https://global.ctbuh.org/resources/papers/3350-TBIN.pdf>
- Sitio web oficial de Council on Tall Buildings and Urban Habitat (CTBUH). *Timber High-Rises in Nordic Countries: Current Trends*. https://global.ctbuh.org/resources/papers/4630-Zahiri_TimberHighRisesInNordicCountries.pdf
- Sitio web oficial de Council on Tall Buildings and Urban Habitat (CTBUH). *Exposed Mass Timber in High-Rise Structures: A Practical Discussion of a Complex Fire Problem*. <https://global.ctbuh.org/resources/papers/download/4527-exposed-mass-timber-in-high-rise-structures-a-practical-discussion-of-a-complex-fire-problem.pdf>
- Sitio web oficial de Council on Tall Buildings and Urban Habitat (CTBUH). *How Does Mass Timber Improve Tall Construction Productivity and Sustainability?* <https://global.ctbuh.org/resources/papers/download/4524-how-does-mass-timber-improve-tall-construction-productivity-and-sustainability.pdf>
- Sitio web oficial de Council on Tall Buildings and Urban Habitat (CTBUH). *Making Tall Timber Financially Viable: the Design-Build Approach*. <https://global.ctbuh.org/resources/papers/download/4525-making-tall-timber-financially-viable-the-design-build-approach.pdf>
- Sitio web oficial de Council on Tall Buildings and Urban Habitat (CTBUH). *Tall Timber Buildings: Innovative Building Design and Damping Considerations*. <https://global.ctbuh.org/resources/papers/download/4528-tall-timber-buildings-innovative-building-design-and-damping-considerations.pdf>
- Sitio web oficial de Madera y construcción. *Madera: Rascacielos de madera*. <https://maderayconstruccion.com/madera-en-altura-rascacielos-de-madera/>
- Sitio web oficial de Maderea. *Historia de la construcción con madera*. <https://www.maderea.es/historia-de-la-construccion-con-madera/>

- Sitio web oficial de Interempresas. *BREVE HISTORIA DE LA MADERA COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN* <https://www.interempresas.net/Madera/Articulos/44265-Breve-historia-de-la-madera-como-material-de-construccion.html>
- Sitio web oficial de Egoín. *Girona Capdeferro*. <https://egoin.com/projects/girona-capdeferro/>
- Sitio web oficial de Premios Arquitectura. *Bloque 6x6, Girona*. <https://www.premiosarquitectura.org/proyectos/bloque-6x6/>
- Sitio web oficial de Metalocus. *Sostenibilidad con madera contralaminada. Bloque 6x6 por Bosch.Capdeferro Arquitectura*. <https://www.metalocus.es/es/noticias/sostenibilidad-con-madera-contralaminada-bloque-6x6-por-boschcapdeferro-arquitectura>
- Sitio web oficial de Bosch Capdeferro. *BLOQUE 6x6*. https://www.boschcapdeferro.com/_data/pdf_es/20230321-png-bloc-6x6-cast-201-es.pdf
- Sitio web oficial de Youtube. *Conferencia, Bloque 6x6, Girona*. <https://www.youtube.com/watch?v=EApfuobespw>
- Sitio web oficial de IAAC. *6x6 = Flexible Spaces*. <https://www.iaacblog.com/programs/case-study-bolc-6x6/>
- Sitio web oficial de Scalae. *Bloc 6x6 block · Girona · Bosch Capdeferro Arquitectura · Nous Realistes · Càpsula SCALAE «Trazas Trazos Trozos ...de Arquitectura»*. <https://scalae.net/trazastrozos/6x6-boschcapdeferro>
- Sitio web oficial de La casa de la arquitectura. *Bloque 6 x 6*. <https://lacasadelarquitectura.es/recurso/bloque-6-x-6/bc657f25-d269-4961-8fc4-d5eefd4a3d29>
- Sitio web oficial de On Diseño. *Bloque 6X6*. <https://www.ondiseño.com/proyecto.php?id=2912>
- Sitio web oficial de HIC arquitectura. *Bosch.Capdeferro 6x6 Block*. <https://hicarquitectura.com/2021/03/bosch-capdeferro-6x6-block/>

7. Bibliografía

- Sitio web oficial de AMB. *PISA CORNELLÀ - Cornellà de Llobregat*. <https://www.amb.cat/es/web/habitatge/impsol/cercador/-/habitatge/ufYg9gOTMSO6/detall/153>
- Sitio web oficial de Peris Toral. *MODULUS MATRIX - 85 Social housing in Cornellà Cornellà*. <https://peristoral.com/proyectos/modulus-matrix-85-social-housing-cornella>
- Sitio web oficial de Egoin. *Cornellà Impsol*. <https://egoin.com/projects/cornella-impsol/>
- Sitio web oficial de Behance. *ARQT 2213 -EJERCICIO DETAIL 85 Viviendas en Cornellà*. https://www.behance.net/gallery/200973643/ARQT-2213-EJERCICIO-DETAIL-85-Vivien-das-en-Cornella?tracking_source=search_projects%7Ccornell%C3%A0
- Sitio web oficial de El Critic. *Una nova manera de concebre l'habitatge públic*. <https://www.elcritic.cat/mes/espai-critic/una-nova-manera-de-concebre-habitatge-public-73892>
- Sitio web oficial de On Diseño. *Viviendas sociales en Cornellà. 85 viviendas, 543 espacios y 2172 esquinas*. <https://www.ondiseno.com/proyecto.php?id=2911>
- Sitio web oficial de AMB. *PISA Cornellà, l'habitatge saludable*. <https://blogs.amb.cat/metro-polisbarcelona/ca/2021/03/08/pisa-cornella-lhabitatge-saludable/>
- Sitio web oficial de MRM arquitectos. *39 viviendas Entremutilvas*. <https://mrmarquitectos.com/proyecto/viviendas-entremutilvas/>
- Sitio web oficial de Egoin. *39 viviendas Entremultivas (Navarra)*. <https://egoin.com/projects/proyecto-39-viviendas-entremultivas-navarra/>
- Sitio web oficial de Youtube. *Proyecto 39 viviendas sociales en Mutilva (Navarra)*. <https://www.youtube.com/watch?v=cf6h3lilTn0>
- Sitio web oficial de Youtube. *39 viviendas sociales en Mutilva (Navarra)*. <https://www.youtube.com/watch?v=erV51kU9c60>
- Sitio web oficial de Youtube. *ERRO Y EUGUI - 39 VPO Mutilva - Fin de Obra*. <https://www.youtube.com/watch?v=CdjpMx7hkCg>
- Sitio web oficial de Erro y Eugui. *Resumen de la construcción de 39 #VPO para Nasuvinsa en Mutilva*. <https://www.erroyeugui.com/resumen-de-la-construccion-de-39-vpo-para-nasuvinsa-en-mutilva/>

7. Bibliografía

- Sitio web oficial de Wicono. *Sistemas WICONA en el mayor edificio de viviendas de protección oficial con estructura de madera de Navarra*. <https://www.wicono.com/es/es/wicono/actualidad/sala-de-prensa/sistemas-wicono-en-el-mayor-edificio-de-viviendas-de-proteccion-oficial-con-estructura-de-madera-de-navarra/>
- Sitio web oficial de Nasuvinsa. *Nasuvinsa construye el mayor edificio en madera de Navarra, con cuatro plantas y 39 VPO de alquiler*. <https://www.nasuvinsa.es/es/actualidad/nasuvinsa-construye-el-mayor-edificio-en-madera-de-navarra-con-cuatro-plantas-y-39-vpo>
- Sitio web oficial de LAN architects. *Paris XIII 132 housing units*. <https://www.lan-paris.com/en/projects/paris-xiii>
- Sitio web oficial de Avontuura. *LAN (Local Architecture Network) design mass timber residential tower in Paris XIII*. <https://www.avontuura.com/wood-up-lan-local-architecture-network/>
- Sitio web oficial de ArchDaily. *Wood Up Tower / LAN Architecture*. https://www.archdaily.com/1025340/wood-up-tower-lan-architecture?ad_medium=office_landing&ad_name=article
- Sitio web oficial de Metalocus. *A space, material and typological exploration. Wood Up tower by LAN*. <https://www.metalocus.es/en/news/space-material-and-typological-exploration-wood-tower-lan>
- Sitio web oficial de Elioth. *WOOD'UP (B1A3) - ZAC Paris Rive Gauche*. <https://elioth.com/en/woodup-b1a3-zac-paris-rive-gauche-2/>
- Sitio web oficial de REI Habitat. *Wood Up*. <https://www.reihabitat.com/nos-projets/wood-up/>
- Sitio web oficial de VOLL arkitekten. *Mjøstårnet*. https://vollark.no/portfolio_page/mjostarnet/
- Sitio web oficial de ArchDaily. *Mjøstårnet The Tower of Lake Mjøsa / Voll Arkitekter*. https://www.archdaily.com/934374/mjostarnet-the-tower-of-lake-mjosa-voll-arkitekter?ad_medium=gallery

7. Bibliografía

- Sitio web oficial de Moelven. *Mjøstårnet - 18 storey timber building completed*. <https://www.moelven.com/globalassets/moelven-limtre/mjostarnet/mjostarnet---18-storey-timber-building-completed.pdf>
- Sitio web oficial de Moelven. *Mjøstårnet – Construction of tall timber building*. https://www.moelven.com/globalassets/moelven-limtre/mjostarnet/mjostarnet---construction-of-an-81-m-tall-timber-building_presentation.pdf
- Sitio web oficial de Moelven. *Mjøstårnet - Construction of an 81 m tall timber building*. <https://www.moelven.com/globalassets/moelven-limtre/mjostarnet/mjostarnet---construction-of-an-81-m-tall-timber-building.pdf>
- Sitio web oficial de Metalocus. *El edificio en madera más alto del mundo. La Torre Mjøsa por Voll Arkitekter*. <https://www.metalocus.es/es/noticias/el-edificio-en-madera-mas-alto-del-mundo-la-torre-mjosa-por-voll-arkitekter>
- Sitio web oficial de ResearchGate. *Modeling stiffness of connections and non-structural elements for dynamic response of taller glulam timber frame buildings*. https://www.researchgate.net/figure/Mjostarnet-building-dimensions-in-m_fig1_360128166
- Sitio web oficial de Reencontre Wood Rise. *MJØSTÅRNET Présentation du plus haut bâtiment en bois du monde*. <https://rencontres-woodrise.ch/mjostarnet/>
- Sitio web oficial de Archello. *Mjøstårnet/The Tower of Lake Mjøsa*. <https://archello.com/project/mjostarnetthe-tower-of-lake-mjosa>
- Sitio web oficial de Avontuura. *The world's tallest timber tower rises in Brumunddal, Norway*. <https://www.avontuura.com/mjostarnet-by-voll-arkitekter/>

7. Bibliografía

7.4 Créditos de imágenes

- Fig Portada. [Imagen propia]
- Fig. 1. [<https://www.behance.net/gallery/16367875/Prosth-Museum-Kengo-Kuma-Analysis-Intervencion>]
- Fig. 2. [<https://losviajesdeaspasia.com/2023/07/07/terra-amata/>]
- Fig. 3. [<https://viajealpatrimonio.com/listing/palafitos-del-entorno-de-los-alpes/>]
- Fig. 4. [<https://i.ytimg.com/vi/Pr2hsonjrzU/sddefault.jpg>]
- Fig. 5. [<https://tecne.com/biblioteca/velarium-del-coliseo-romano/>]
- Fig. 6. [<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3173795>]
- Fig. 7. [https://es.wikipedia.org/wiki/Entramado_de_madera]
- Fig. 8. [<https://www.jgrarchitect.com/2015/02/a-barn-built-in-1830s.html>]
- Fig. 9. [<https://www.wiehag.com/en/references/ascent-tower/>]
- Fig. 10. [<https://reporter.si/clanek/magazin/neboticniki-prihodnosti-kako-epidemija-in-globalno-segrevanje-spreminjata-gradnjo-stolpnic-906149>]
- Fig. 11. [<https://whc.unesco.org/en/documents/115102>]
- Fig. 12. [https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:ANKAW%C3%9C_PBM_038.jpg]
- Fig. 13. [<https://algargosarte.blogspot.com/2014/09/el-templo-griego-partes-caracteristicas.html>]
- Fig. 14. [<https://ellegadodehipodamos.wordpress.com/2015/11/11/materiales-de-construccion>]
- Fig. 15. [<https://ireneu.blogspot.com/2014/12/insulas-bloques-pisos-roma.html>]
- Fig. 16. [<https://unhistoriador.com/edad-antigua/historia-de-roma/la-domus-romana>]
- Fig. 17. [<https://www.horyuji.or.jp/en/garan/gojyunoto/>]

7. Bibliografía

- Fig. 18. [<https://x.com/viajepatrimonio/status/1181213841020968960/photo/4>]
- Fig. 19. [<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b8/Gundelsheim-fachwerk-keller1607.JPG>]
- Fig. 20. [<http://malanga.blue/2020/11/fachwerk-arquitectura-tradicional/>]
- Fig. 21. [<https://artchist.blogspot.com/2015/03/estructura-de-madera-balloon-frame.html>]
- Fig. 22. [<https://www.finehomebuilding.com/project-guides/framing/evolution-of-the-house-frame>]
- Fig. 23. [<https://arquitecturaviva.es/obras/casa-jacobs-madison>]
- Fig. 24. [<https://www.revistaad.es/articulos/frank-lloyd-wright-casas-que-puedes-visitar>]
- Fig. 25. [<https://www.thorntontomasetti.com/project/ascent>]
- Fig. 26. [<https://www.archdaily.com/934374/mjostarnet-the-tower-of-lake-mjosa-voll-arkitekter>]
- Fig. 27. [<https://www.archdaily.cl/cl/02-341234/en-detalle-sistema-de-ensambles-oficinas-tamedia-shigeru-ban-architects>]
- Fig. 28. [<https://maderayconstruccion.com/sinergias-los-beneficios-de-combinar-la-madera-con-otros-materiales>]
- Fig. 29. [<https://maderayconstruccion.com/clt-y-sismo-un-caso-practico>]
- Fig. 30. [<https://cadamda.org.ar/revista55/maderadisegno4.jpg>]
- Fig. 31. [<https://egoin-andalucia.com/excelente-comportamiento-estructural>]
- Fig. 32. [<https://maderaestructural.wordpress.com/2019/06/01/tips-grietas-en-la-madera-laminada-encolada>]
- Fig. 33. [<https://3polhabitat.com/sistema-construccion>]
- Fig. 34. [<https://aceweb.cat/wp-content/uploads/2016/02/5-Jornada-fuego-madera-Jorge-Blasco.pdf>]

7. Bibliografía

- Fig. 35. [<https://www.rothoblaas.es/blog/acustica-fuoco-e-statica>]
- Fig. 36. [<https://www.hundegger.com/es-es/maquinas>]
- Fig. 37. [Imagen cedida por MRM arquitectos]
- Fig. 38. [<https://www.archdaily.com/1006603/cross-laminated-timber-reaches-new-heights-why-use-clt-in-construction>]
- Fig. 39. [<https://varba.es/construimos-en-malaga-un-edificio-sostenible-con-estructura-y-envolvente-de-madera>]
- Fig. 40. [<https://glulambeams.co.uk/about-glulam/what-is-glulam>]
- Fig. 41. [<https://www.indesignlive.com/projects/centre-pompidou-metz>]
- Fig. 42. [<https://fomexgroup.vn/plywood-news/what-is-lvl-how-is-it-made-and-the-application-of-lvl.html>]
- Fig. 43. [<https://hotelmix.es/visit/attraction/spain/seville/metropol-parasol>]
- Fig. 44. [Collage propio]
- Fig. 45, 46, y 47. [<https://www.metalocus.es/es/noticias/sostenibilidad-con-madera-contralaminada-bloque-6x6-por-boschcapdeferro-arquitectura>]
- Fig. 48. [<https://www.premiosarquitectura.org/proyectos/bloque-6x6>]
- Fig. 49. [<https://www.metalocus.es/es/noticias/sostenibilidad-con-madera-contralaminada-bloque-6x6-por-boschcapdeferro-arquitectura>]
- Fig. 50. [<https://www.iaacblog.com/programs/case-study-bolc-6x6>]
- Fig. 51. [<https://arquitecturaviva.es/obras/bloque-6x6-en-gerona>]
- Fig. 52. [<https://www.iaacblog.com/programs/structural-analysis-multistorey-mass-timber-building>]
- Fig. 53 y 54. [<https://www.premiosarquitectura.org/proyectos/bloque-6x6>]

7. Bibliografía

- Fig. 55. [<https://www.ondisenio.com/proyecto.php?id=29111>]
- Fig. 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63 y 64. [<https://tectonica.archi/madera/proyectos/85-viviendas-sociales-en-cornella-de-peris-toral-arquitectes-madera>]
- Fig. 65. [<https://egoin.com/projects/cornella-impso>]
- Fig. 66, 67, 68, 69, 70, 71 y 72. [<https://tectonica.archi/madera/proyectos/85-viviendas-sociales-en-cornella-de-peris-toral-arquitectes-madera>]
- Fig. 73. [<https://www.wicona.com/es/es/wicona/actualidad/sala-de-prensa/sistemas-wicona-en-el-mayor-edificio-de-viviendas-de-proteccion-oficial-con-estructura-de-madera-de-navarra>]
- Fig. 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83 84 y 85. [Imágenes cedidas por MRM arquitectos]
- Fig. 86, 87 y 88. [<https://www.wicona.com/es/es/wicona/actualidad/sala-de-prensa/sistemas-wicona-en-el-mayor-edificio-de-viviendas-de-proteccion-oficial-con-estructura-de-madera-de-navarra>]
- Fig. 89, 90 y 91. [<https://mrmarquitectos.com/proyecto/viviendas-entremuilvas>]
- Fig. 92. [<https://www.ribaj.com/buildings/lan-wood-up-paris>]
- Fig. 93. [https://www.archdaily.com/1025340/wood-up-tower-lan-architecture?ad_medium=office_landing&ad_name=article]
- Fig. 94. [<https://www.dezeen.com/2025/01/13/lan-wood-up-tower-paris>]
- Fig. 95. [https://www.archdaily.com/1025340/wood-up-tower-lan-architecture?ad_medium=office_landing&ad_name=article]
- Fig. 96. [www.luisfernandez-galiano.com/works/torre-de-madera-5]
- Fig. 97. [<https://www.dezeen.com/2025/01/13/lan-wood-up-tower-paris>]
- Fig. 98. [<https://www.lan-paris.com/en/projects/paris-xiii-1>]
- Fig. 99. [<https://www.ribaj.com/buildings/lan-wood-up-paris>]
- Fig. 100 y 101. [<https://www.dezeen.com/2025/01/13/lan-wood-up-tower-paris>]
- Fig. 102 y 103. [<https://www.lan-paris.com/en/projects/paris-xiii-1>]
- Fig. 104. [<https://www.dezeen.com/2025/01/13/lan-wood-up-tower-paris>]

7. Bibliografía

- Fig. 105. [<https://www.lan-paris.com/en/projects/paris-xiii-1>]
- Fig. 106. [<https://www.dezeen.com/2025/01/13/lan-wood-up-tower-paris>]
- Fig. 107. [<https://www.lan-paris.com/en/projects/paris-xiii-1>]
- Fig. 108, 109, 110 y 111. [<https://www.dezeen.com/2019/03/19/mjostarne-worlds-tallest-timber-tower-voll-arkitekter-norway>]
- Fig. 112. [https://www.moelven.com/globalassets/moelven-limtre/mjostarnet/mjostarnet---construction-of-an-81-m-tall-timber-building_presentation.pdf]
- Fig. 113. [https://www.researchgate.net/figure/Mjostarnet-building-dimensions-in-m_fig1_360128166]
- Fig. 114. [https://www.moelven.com/globalassets/moelven-limtre/mjostarnet/mjostarnet---construction-of-an-81-m-tall-timber-building_presentation.pdf]
- Fig. 115. [https://www.researchgate.net/figure/Mjostarnet-building-dimensions-in-m_fig1_360128166]
- Fig. 116. [<https://www.metalocus.es/es/noticias/el-edificio-en-madera-mas-alto-del-mundo-la-torre-mjosa-por-voll-arkitekter>]
- Fig. 117 y 118. [https://www.moelven.com/globalassets/moelven-limtre/mjostarnet/mjostarnet---construction-of-an-81-m-tall-timber-building_presentation.pdf]
- Fig. 119, 120 y 121. [<https://www.moelven.com/globalassets/moelven-limtre/mjostarnet/mjostarnet---18-storey-timber-building-completed.pdf>]
- Fig. 122. [<https://www.dezeen.com/2023/03/28/mjostarnet-voll-arkitekter-timber-revolution>]
- Fig. 123. [<https://www.dezeen.com/2019/03/19/mjostarne-worlds-tallest-timber-tower-voll-arkitekter-norway>]
- Fig. 124 y 127. [<https://es.trip.com/hotels/brumunddal-hotel-detail-45584185/wood-hotel-frich-s-hotel-spiseri>]
- Fig. 125. [<https://www.moelven.com/mjostarnet>]
- Fig. 126. [https://vollark.no/portfolio_page/mjostarnet]
- Fig. 128. [<https://mx.pinterest.com/pin/481111172714246131/>] y [https://www.archdaily.com/889142/japan-plans-for-supertall-wooden-skyscraper-in-tokyo-by-2041?ad_medium=gallery]

