

Trabajo Fin de Grado

Madera, material tradicional, una nueva tecnología
para la construcción en altura

Wood, a traditional material, a new technology for
high buildings

Autor/es

Marta Traín Pérez

Director/es

Santiago Carroquino Larraz
Luis Agustín Hernández



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D^a. MARTA TRAÍN PÉREZ,

con nº de DNI 73133356A en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)
Grado _____, (Título del Trabajo)

MADERA, MATERIAL TRADICIONAL, UNA NUEVA TECNOLOGÍA PARA LA
CONSTRUCCIÓN EN ALTURA

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 23 de Septiembre de 2016

Fdo: Marta Traín Pérez

Resumen

La madera ha sido un material siempre presente en la arquitectura, vinculado a la naturaleza y al hombre. Sin embargo, desde el siglo XIX, ésta posee un papel secundario en el proceso constructivo. En una sociedad en la que asegurar las necesidades del presente sin comprometer las futuras es de vital importancia, un material tan tradicional y sostenible como la madera tiene un papel potencial como protagonista. Y no solo en lugares alejados de las grandes urbes y cercanos a la naturaleza, sino en la propia ciudad.

El trabajo plantea un análisis de estas potencialidades en el campo de lo urbano, y concretamente de la construcción en altura. En primer lugar se realiza un análisis histórico del desarrollo en la construcción con madera. Una vez estudiado el desarrollo tradicional, se analiza la situación actual y de las últimas décadas, atendiendo a las nuevas preocupaciones medioambientales. En este contexto se analizan también las ideas preconcebidas adquiridas con el tiempo, las cuales hacen de la madera un material no deseado en la ciudad. Estas ideas se reflejan también en la normativa, la cual, a diferencia de en siglos pasados, juega un papel muy importante y por ello se analiza con detenimiento. Este estudio se realiza intentando dar una visión global, comparando la situación de Europa y Norteamérica, donde se encuentran los países que actualmente apuestan por la construcción urbana en madera.

Por último, se concreta el análisis a través de unos casos de estudio que permiten una visión más específica de todos los aspectos mencionados en el trabajo. Se trata de tres casos de estudio, elegidos por poder ser desarrollados en otros contextos y por las potencialidades de sus sistemas constructivos.

Palabras clave:

Construcción en altura, madera, prefabricado, sistema constructivo, técnica constructiva.

Tabla de contenidos

Resumen	5
1.Razón de estudio	11
2. Un material tradicional: la madera hasta el siglo XIX	13
2.1. La madera y el hombre	13
2.2.Tradición	14
2.2.1.Europa	14
2.2.2.EEUU	15
2.2.3.España	15
2.3.Potencialidades frustradas. La industrialización del s.XIX y las grandes guerras	17
2.3.1. El fenómeno de la prefabricación	17
2.3.2. Experimentación con madera. General Panel System y AA System	18
2.3.3. Usonian Houses de Frank Lloyd Wright	19
3.Un nuevo material: posibilidades en la construcción en altura	21
3.1.Contemporaneidad: debate sobre la protección del medio ambiente	21
3.1.1. El papel de la madera como material sostenible	22
3.1.2. Certificación de la madera y explotación de los bosques.	24
3.2. Superación de los prejuicios	25
3.2.1.Construcción híbrida	25
3.2.2.Posibilidades en prefabricación	25
3.2.3.Comportamiento ante el fuego	26
3.2.4. Experimentación en vivienda colectiva	27
3.3.Avance de la normativa	29
3.3.1. Europa	29
3.3.2.Diferencias entre los países miembros de la UE	30
3.3.3.El caso de Estados Unidos y Canadá	31
3.3.4. Reflexión sobre la normativa en España	34
3.4.Nuevos productos para la construcción en altura	35

4.Casos de estudio	39
4.1.LiveCycle Tower - LCT ONE	41
4.1.1 Estudio del tipo	43
4.1.2. Aportaciones del modelo	46
4.1.3. Evolución del sistema y réplica	51
4.2.Treet Tower	53
4.2.1.Estudio del tipo	55
4.2.2. Aportaciones del modelo	58
4.2.3. Evolución del sistema y réplica	61
4.3.Wood Innovation and Design Centre	63
4.3.1. Estudio del tipo	65
4.3.2. Aportaciones del modelo	68
4.3.3. Evolución del sistema y réplica	72
5. Conclusiones	75
Bibliografía	77

1. Razón de estudio

En un mundo en el que la industria de la construcción supone el gasto de la mitad de los recursos del planeta, se puede afirmar que el proceso constructivo es un tema de máxima importancia para la sociedad. Inherente a la construcción, se encuentra el arquitecto, como mediador entre arte, técnica, sociedad y economía. Su labor es de vital importancia, el arquitecto construye la ciudad y lo más importante, decide cómo construirla. Este Cómo, hace referencia al proceso, a los medios que se utilizan para el fin, que es la obra de arquitectura.

Por la complejidad que adquiere el mundo poco a poco, cada vez es más complicado ser ese mediador. Antiguamente la labor era mas sencilla, y el arquitecto estaba directamente relacionado con los materiales y el proceso constructivo. Hoy en día, poco a poco se van incorporando más agentes al proceso y es cada vez más difícil mantener esta conexión. Sin embargo, hoy mas que nunca es necesario prestar atención al Cómo. El no reflexionar sobre el proceso no solo afecta a lo formal, sino también al entorno y al medio ambiente. Hoy en día existe la necesidad de recuperar el equilibrio entre seres humanos y entorno.

El respeto por la naturaleza no solo pasa por un respeto estético y formal, sino también por un proceso proyectual y constructivo respetuoso. El hecho de construir en la ciudad, donde la naturaleza está menos presente, no nos aleja de los efectos sobre ella ni nos exime de ellos. En este sentido, si la construcción, inherente al arquitecto, está consumiendo los recursos del planeta, la labor actual del arquitecto sería preguntarse cuál es la solución. La solución no puede ser dejar de lado la técnica y volver a lo tradicional, pero si volver la mirada atrás y ver qué es lo que se ha quedado por el camino.

En este contexto, una reflexión acerca de los materiales de construcción es muy pertinente. No solo de los materiales en sí, sino de su proceso, de su ciclo de vida. El arquitecto contemporáneo ha añadido a su labor y a su pensamiento el concepto de sostenibilidad, el cual esta presente en el complejo proceso de la obra.

La madera aparece aquí como un material cuya obtención, al contrario de la creencia común, es respetuosa con el medio, pues una explotación controlada no supone un riesgo para el entorno. Se trata del más tradicional de los materiales y el más cercano al ser humano, con un papel secundario en la arquitectura actual, pero con enormes potencialidades técnicas. Potencialidades no solo como material tradicional, sino en relación con lo urbano y con la modernidad.

Parece imposible pensar que se pueda introducir la madera como material de construcción en la ciudad, o es más, en la vivienda en densidad y en las obras de gran altura. Aquí es dónde el arquitecto tiene que preguntarse por lo 'no posible' y convertirlo en posible.

Por consiguiente, el objetivo del presente trabajo es analizar este material, la madera, como material tradicional, para luego estudiar sus posibilidades como material tecnológico y en concreto, en la construcción urbana y en altura. Se trata de un análisis que sigue una línea cronológica, con el objetivo de obtener una visión amplia y completa del contexto, y por tanto, de la pertinencia del estudio.

2. Un material tradicional: la madera hasta el siglo XIX

2.1. La madera y el hombre

...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... (Wright, 1928)

La madera, junto con la piedra y el barro, son los materiales de construcción más primitivos. En diversas épocas de la historia, el hombre se ha preguntado por el origen de la arquitectura, por el primer refugio construido por el ser humano. Ya en la época grecorromana, en los Diez Libros de Arquitectura de Marco Vitruvio, aparece la mención a este refugio primitivo. El mito de la cabaña primitiva aparecerá más tarde en las teorías de la Ilustración, y supondrá el referente para entender el origen de la arquitectura, los componentes esenciales. Es en el libro de Marc-Antoine Laugier, *Essai sur l'architecture*, donde se hace una descripción más concreta de la cabaña primitiva. Los materiales utilizados para esta cabaña son los troncos y ramas de árboles, cubriendo los huecos intermedios con otros materiales (Echaide, 1990). Es decir, el vínculo del hombre con la madera como material para construir existe desde el origen de la arquitectura.

A lo largo de la historia, no solo se utilizará para la construcción de refugios, sino también de puentes, barcos y otras construcciones. Dentro de los materiales más primitivos, es el que posee mejores cualidades para ser trabajado y transformado. La piedra es demasiado dura y pesada y el barro no tiene consistencia suficiente para adaptarse a cualquier tipo de construcción. La excelente relación resistencia-peso, y también su trabajabilidad, dotan a la madera de la cualidad de poder ser utilizada para casi cualquier cosa.

No obstante, no solo existe un vínculo del hombre con la madera en la construcción, este material ha sido manipulado continuamente a lo largo de la historia para la fabricación de todo tipo de herramientas y utensilios. También en decoración, mobiliario, escultura, y otras manifestaciones artísticas. Tanto por su aroma, como por su tacto, como por su calidez, es un material que provoca comodidad y sentimiento de refugio. Ya que antes de la cabaña, los propios árboles son los que ofrecen refugio.

2.2.Tradición

Aunque la evidencia de restos de posibles construcciones prehistóricas de madera es ambigua, estos descubrimientos sugieren que el uso de la madera para construir refugios permanentes data de hace casi medio millón de años. Podemos entender dos maneras de construir en madera: usándola como elemento masivo o utilizándola como esqueleto.

En el Lago de Constanza, entre Alemania Suiza y Austria, se encontraron restos de construcciones palafíticas de madera [fig 1]. Estos restos pueden haber sido los orígenes de la construcción de madera maciza o masiva (Jacobo, 2004). Por otro lado, la procedencia de la estructura de esqueleto de madera se remonta a las cabañas prehistóricas de forma cónica o de sección triangular, también llamadas *roof houses*, realizadas con ramas de árboles y cubiertas con césped. La utilización de la madera parece haber sido casi una respuesta universal a las necesidades de vivienda en toda cultura. Las ramas de árbol se convirtieron poco a poco en postes de madera clavados en la tierra, aparecieron los suelos de madera para protegerse mejor del agua y de la humedad, y finalmente, las cabañas se convirtieron en casas de más de una planta. Así, se fue complejizando la construcción en madera en las diferentes épocas a lo largo de la historia, en busca de una mayor estabilidad con menor material y menores medios (Turan, 2009).



Fig. 1. Poblado palafítico con el sistema 'Blockbau' en el Lago Constanza. (Jacobo, 2004)

2.2.1.Europa

Cuatro son las principales técnicas existentes para construcciones de madera en Europa antes de la industrialización: la técnica acolumnada con marco perimetral rígido *Stab- o Ständerbau*¹, las construcciones de madera maciza o *Blockbau*², la construcción *Rahmenbau*³ y la técnica de entramado con diagonales de madera, llamada *Fachwerk*⁴. En Europa del Norte fue común la *Stabbau* hasta la edad media, la cual tiene su origen en las *Stabkirchen* [fig 2] noruegas. Más tarde fue sustituida en gran medida por las casas de madera maciza o *Blockhaus* (Campbell & Pryce, 2005). Sin embargo, el sistema *Blockbau* ya existía, incluso se utilizaba en la edad de piedra como sugieren restos encontrados en países como Suecia, Noruega, Finlandia y en la región de los Alpes (Jacobo, 2004). La tradición de la 'Blockbau' se extiende desde

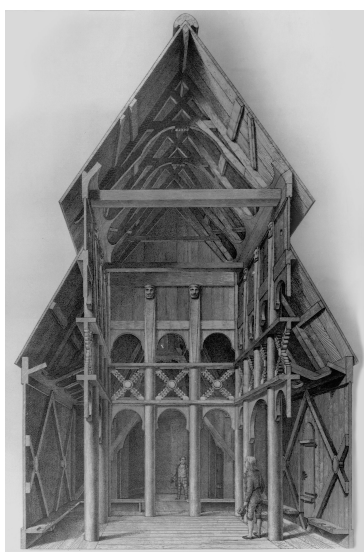


Fig. 2. Iglesia de Borgund, Noruega. Dibujo de G.A. Bull.

¹ Construcción medieval en madera en la que los troncos (de altura, la altura de la casa) se ubican verticalmente uno junto a otros y luego rigidizados por medio de una viga-dintel superior horizontal, sin elementos estructurales en diagonal. Los huecos entre troncos son rellenados por una malla de barro o por tabloncillos de madera. (Freigang, 2016).

² Técnica de construcción en madera consistente en paredes construidas a base troncos de madera colocados horizontalmente uno sobre otro. La mayoría con parte sobresaliente de los troncos en las esquinas exteriores (Freigang, 2016).

³ Aparece en el siglo XV y se trata de una técnica similar a la técnica 'Ständerbau'. La construcción se lleva a cabo piso por piso, los troncos verticales tienen la altura de un piso, no traspasan toda la altura de la vivienda. (Freigang, 2016)

⁴ Construcción de esqueleto en la que, además de los troncos de madera colocados verticalmente y rellenados los huecos con barro o ladrillo, aparecen vigas de madera diagonales que rigidizan la estructura. (Freigang, 2016).

Escandinavia hasta Europa del este, mientras que las técnicas '*Fachwerk*' , '*Ständerbau*' y '*Rahmenbau*' se dieron principalmente en Europa central y Europa del oeste.

La técnicas '*Ständerbau*' y '*Rahmenbau*' son quizás las más importantes a destacar puesto que fueron las que sentaron las bases de los sistemas *Ballon Frame* y *Plattform-Frame* americanos (Kolb, Systembau mit Holz, 1992), los cuales revolucionarían la construcción en madera.

2.2.2.EEUU

Estados Unidos fue pionero en la estandarización de materiales de construcción con madera. La situación de Estados Unidos era diferente a la europea: los materiales eran abundantes pero la mano de obra cualificada escasa, de este modo la mecanización sustituyó poco a poco a esa mano de obra no cualificada. El siglo XIX, concretamente el periodo entre 1850 y 1890, presencié una oleada de gente hacia las tierras del oeste (Giedion, 2009) y ciudades como Chicago o San Francisco pasaron de ser pequeñas poblaciones a grandes ciudades en solo unos años. Existía entonces la necesidad de dar vivienda a todos los nuevos colonos de manera rápida y con un montaje sencillo que no requiriera mano de obra cualificada. Así, entre los años 60 y 80, aparece el sistema de *Balloon Frame* que, aunque con orígenes algo equívocos, se convirtió en el principal método de construcción de vivienda. Su origen y desarrollo, más que a una invención heroica, se debe a un proceso de acumulación de experiencias pasadas y adaptación a las necesidades del momento. El desarrollo de la construcción en madera en EEUU tuvo no solo razones relacionadas con la tradición, sino también sociales y económicas. El paso de la producción de clavos artesanal a la producción industrializada de éstos, hizo que la construcción de madera se abaratara. Esto provocó un cambio revolucionario en el ensamblaje de la madera, convirtiéndola en material idóneo para las necesidades del momento (Turan, 2009).

De este modo, en Estados Unidos se produjo el paso que abrió la posibilidad de introducir la madera en el mundo industrializado del siglo XIX, mientras Europa dejaba este material de lado (Arbeitsgruppe Urbaner Holzbau, 2014). El movimiento moderno en Europa había optado por el desarrollo del recién descubierto hormigón y la industria del acero. Sin embargo, en Estados Unidos se desarrollaban las *Usonian Houses* de Frank Lloyd Wright y el *General Packed System* desarrollado por Walter Gropius y Konrad Wachsmann.

2.2.3.España

Si bien se puede pensar que no existe una gran tradición en construcción con madera en la Península Ibérica, lo cierto es que la madera siempre ha estado presente, quizás sin llamar la atención, ya que se suele dar en los forjados y cubiertas de cada casa tradicional. A pesar de su imagen de

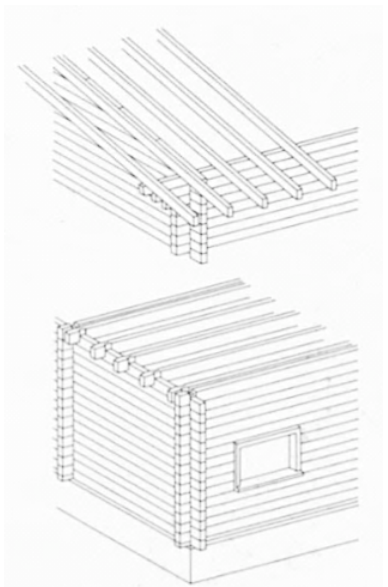


Fig. 3. Blockbau. (Kolb, Systembau mit Holz, 1992)



Fig. 4. Fachwerkbau. (Kolb, Systembau mit Holz, 1992)

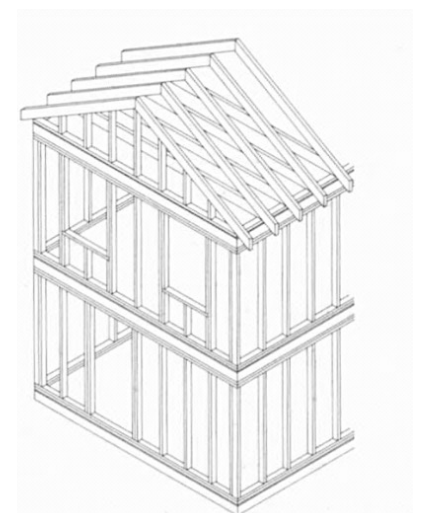


Fig. 5. Rahmenbau. (Kolb, Systembau mit Holz, 1992)

material para la artesanía, la madera siempre ha existido como material estructural, desde las iglesias románicas hasta las casas de tapial. Si bien es cierto que los materiales más usados en construcción tradicional en España son la piedra, el adobe y el ladrillo, la madera siempre ha estado presente allí donde se necesitara soportar una fuerza a flexión, es decir, en forjados y cubiertas. Estos forjados de madera los encontramos prácticamente en todas las construcciones tradicionales, y no solo en éstas, también en construcciones palaciegas.



Fig. 6. Casa típica de entramado de madera. Covarrubias, Burgos (Jiménez Landi, 1985)

A pesar de las diferencias entre las distintas regiones de España, se puede afirmar que la madera se usa en forjados, cubiertas y galerías. Es notable por otro lado que en el norte, en los caseríos vasco-navarros por ejemplo, la utilización de la madera es más evidente, el primer piso es de mampostería pero sin embargo, los pisos superiores se realizan con entramado de madera, rellenando los vanos con ladrillo o adobe. Este sistema aparece también en otras zonas de España como las Cordilleras centrales y en las zonas de León y Castilla la Vieja, un destacable ejemplo son las casas entramadas del área de Burgos [fig. 6]. En otras zonas, sin embargo, quizás no es típico el uso del entramado de madera pero sí son típicos los balcones o galerías llamados '*Solana*'. Ejemplos de ello serían la típica casas santanderina, asturiana y gallega, así como en la ya nombrada área de Burgos (Jiménez Landi, 1985).

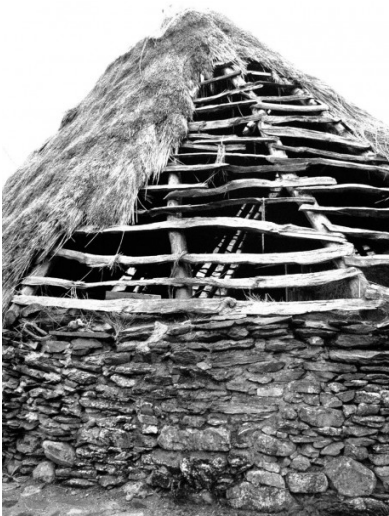


Fig. 7. Entramado de madera de cubierta en una palloza (Tectónica-online, 2013).

Una pregunta interesante puede ser, de dónde procede esta tradición. La respuesta es compleja. Existen construcciones prerrománicas como es la *palloza*, tradicionales del noroeste peninsular, en las que ya aparece la madera como estructura para la cubierta, la cual se cubre posteriormente de paja. Más tarde, los romanos y los árabes utilizaron entramados de madera en las cubiertas de sus construcciones, probablemente los segundos influenciados por los primeros. No obstante, nos encontramos con falta de ejemplos y documentos de la edad media que hayan sobrevivido (Nuere, 2014). Según el arquitecto y experto en carpintería Enrique Nuere, la tradición de carpintería en cubiertas vendría influenciada por los países del norte, puesto que la técnica coincide con la más antigua de estos pueblos.

La construcción tradicional nos enseña cómo se ha usado cada material para lo que mejor servía, tratándose siempre de una construcción mixta.

2.3.Potencialidades frustradas. La industrialización del s.XIX y las grandes guerras

2.3.1. El fenómeno de la prefabricación

Tras la revolución industrial, la modernidad se comenzó a entender en unión a la Industria (Kaufmann & Nerdinger, 2011). La madera era un material asociado con lo manual, lo artesanal, y por ello quedó sustituido en la construcción por el acero, y más tarde, en el siglo XX, por el hormigón. Para entender la influencia de la industrialización en la manera de construir, y concretamente en los sistemas de construcción con madera, es necesario hablar del fenómeno de la prefabricación. Estados Unidos va a jugar un papel fundamental en cuanto a experimentación en este ámbito. Tras adaptar las formas de construir europeas a su propia situación, creará las suyas propias, de las que de nuevo se retroalimentará Europa de manera significativa, cerrándose así el círculo (Korvenmaa, 1990).

Los primeros indicios de prefabricación se dan ya en 1624 en Estados Unidos, cuando los Ingleses llevan a Cape Ann, Massachusetts, una casa de madera desmontable para la flota pesquera. También habrá signos de prefabricación con madera en los siguientes siglos para proveer de vivienda inmediata a personas que llegaban a un nuevo emplazamiento. Casas prefabricadas fueron enviadas a California en 1848 desde Inglaterra, Francia, Alemania, Bélgica... hasta que la industria local se desarrolló y sustituyó a las importaciones. En 1892 Ernest F. Hodgson funda una compañía en Boston y comienza la manufactura de casas de paneles de madera. No había, sin embargo, énfasis en pasar a la gran escala, se trataba de casas de una sola planta (Kelly, 1951).

En Europa, tras la primera guerra mundial, la escasez de materiales convencionales y de mano de obra hicieron que fuera necesaria una alternativa a la construcción tradicional. Sin embargo, solo en países como Finlandia, Suecia o Alemania, donde abundaba la madera, se empleó este material. El acero y los productos con base en cemento jugaron un papel más importante en otros países como Francia e Inglaterra donde la madera no era tan abundante. Se experimentó mucho, pero esta potencialidad se vio truncada por el quizás mal planteamiento inicial. Por ejemplo, los sistemas desarrollados durante este periodo en Inglaterra cayeron en desuso a partir de los años 30, se volvieron a utilizar los sistemas constructivos previos a la guerra y los nuevos sistemas industrializados se quedaron en imitaciones inferiores de las edificaciones tradicionales (Kelly, 1951).

...the new types were, in design, mostly inferior imitations of brick buildings. No attempt had been made to evolve designs which suited, and took advantage of, the new structural concepts. So utterly bankrupt was the movement in this respect that the new constructions were laboriously worked to the same niggling plans which were in common use for brick houses at the same time. It

was not realized, and it is still not realized, that plans and designs suitable for brick buildings, which can be factory-made articles of standardized size which require the clearest and simplest planning for their economical use.⁵

2.3.2. Experimentación con madera. General Panel System y AA System

Hablando concretamente de la madera, los Estados Unidos jugaron un papel central desde los años 20 hasta el periodo tras la Segunda Guerra Mundial. En Europa, países como Finlandia y Alemania, con una gran tradición de construcción en madera, tuvieron también un papel importante. Por otro lado, fueron la guerra y la situación de emergencia tras éstas, los agentes que provocaron la rápida racionalización de la industria (Korvenmaa, 1990).

A destacar es la labor de dos arquitectos en Europa, Konrad Wachsmann y Alvar Aalto. Si bien su influencia se da en distintos países, su trayectoria tiene un denominador común: la búsqueda de sistemas prefabricados industriales para la construcción. Ambos trabajaron como creadores de nuevos sistemas estandarizados para empresas constructoras madereras. Konrad Wachsmann en la década de los 20 trabajó para la empresa alemana *Christoph & Unmack*, y Alvar Aalto hizo lo mismo en Finlandia para la empresa *A.Ahlström Oy* a finales de los años 30.

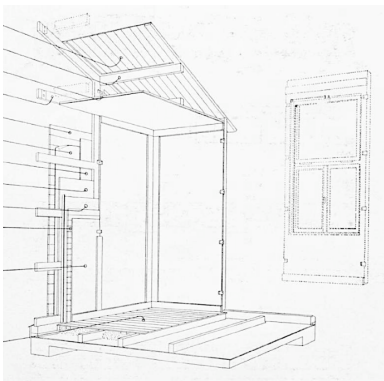


Fig. 8 *Metodo Panel* (Wachsmann, Holzhausbau: Technik und Gestaltung, 1930).

Tanto Wachsmann como Aalto crearon nuevos sistemas, sin embargo quizás fue Wachsmann el que más se acercó a la completa estandarización e industrialización, mientras que Aalto no rompió tanto con la estética tradicional.

La empresa *Christoph & Unmack*, donde Wachsmann trabajaba, se aprovechaba del mercado generado por la escasez de viviendas existente en el periodo entreguerras. Se utilizaba la tradición centroeuropea *Blockbau* y también el importado sistema *Ballon Frame*. Konrad Wachsmann desarrolló dos sistemas que buscaban adaptar estos sistemas a la realidad alemana. Estos se llamaron: *Entramado de madera in situ* y *Método Panel* [fig. 8]. El sistema de clavos americano jugaba un papel muy importante ya que permitía rapidez y economía. El *Método Panel* dio un paso más allá hacia la verdadera prefabricación pues sustituyó el entramado (típico del *Ballon Frame*) por el panel autoportante. Sin embargo, el punto de inflexión en la carrera de Wachsmann lo supuso su emigración a EEUU como refugiado de guerra en 1941. Allí, junto a Walter Gropius, desarrolló el sistema llamado *General Panel System* [fig. 9]. Este sistema difería de los que había creado en Europa por la aparición del módulo, el sistema sofisticado de conexiones y su carácter de sistema de construcción único. Aquí se ve como finalmente se desarrolla un sistema muy diferente al *Ballon Frame*. La gran innovación se desarrolla en los sofisticados conectores-gancho [fig.10], que dejaban atrás el sistema de clavos

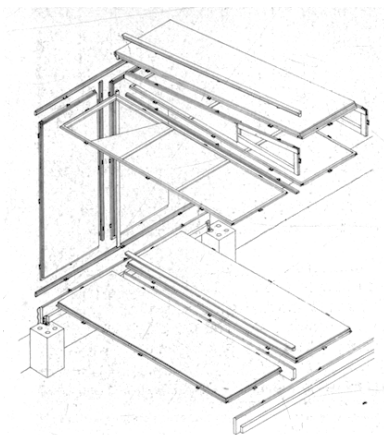


Fig. 9 *General Panel System* (Wachsmann, The turning point of Architecture: structure and design, 1961).

⁵ D. Dex Harrison, "An outline of prefabrication", en *Tomorrow's Houses*, ed. by John Madge (London: Pilot Press, 1946), p. 118-9

americano. Esta propuesta no obstante fracasó igual que fracasaron otras iniciativas de prefabricación surgidas en el periodo post-guerra, pues la sociedad americana veía la prefabricación como algo de mala calidad, para épocas de necesidad. Esta no fue la única razón para el fracaso del sistema pero si una a destacar. Otros sistemas prefabricados funcionaron mejor por ofrecer un producto de costes medios y por acercarse más al Estilo Internacional, imagen del desarrollo (Fernández Rodríguez & Soler Monrabal, 2011).

El contexto de Alvar Aalto era algo distinto, en Finlandia era típica la *Blockbau* por su gran durabilidad, resistencia y comportamiento térmico. Desde finales del siglo XIX, se comenzó a utilizar el sistema americano de *Ballon Frame*, igual que había ocurrido en Alemania. A pesar de las cualidades de la construcción tradicional, esta necesitaba mano de obra más cualificada y mayores tiempos de ejecución. En un tiempo en el que la escasez de vivienda y el hacinamiento eran los principales problemas, se necesitaba una solución. Con la aparición de los nuevos materiales aislantes, fue posible utilizar el sistema *Ballon Frame*, el cual era de fácil y de rápido montaje. Antes de empezar a trabajar para la empresa *A.Ahlström Oy*, Aalto presentó a concurso proyectos de casas prefabricadas de madera, utilizando tableros Insulite y Ensonite, de distintas marcas comerciales. Una vez trabajando para *A.Ahlström Oy*, diseñó el sistema AA. Se realizan múltiples diseños diferentes [figs.11-12], pero es un sistema casi enteramente *in-situ* (Korvenmaa, 1990). El punto de inflexión para Alvar Aalto también será Estados Unidos, no como refugiado sino como invitado en el MIT, donde se incorporará como investigador. Allí investiga sobre la posibilidad de un sistema flexible de construcción de casas prefabricadas. A su vuelta a Finlandia termina de desarrollar el *AA System*, esta vez aparece el módulo y diseña la estandarización de los componentes completos, los muros exteriores tienen los huecos incluidos y están preparados para recibir el acabado exterior. Aquí es cuando se empieza a tratar de verdadera prefabricación, el tiempo en obra se reduce considerablemente.

No obstante, hay que tener en cuenta que ambos optan por buscar sistemas que fomenten la variación, rechazando la producción seriada de casas iguales. A pesar del momento de necesidad, no solo son los motivos económicos los que rigen sus proyectos, sino que buscan un avance arquitectónico que abra otras posibilidades.

2.3.3. Usonian Houses de Frank Lloyd Wright

Frank Lloyd Wright merece una mención especial, pues, dentro de su modernidad y a diferencia de algunos de sus coetáneos, no desechó materiales clásicos como la madera.

Wright buscaba una arquitectura tanto económica como cultural, que respondiera a la vez al lugar y a los habitantes. De la idea de economía, se deriva la idea de producción en masa de viviendas, también presente en estos

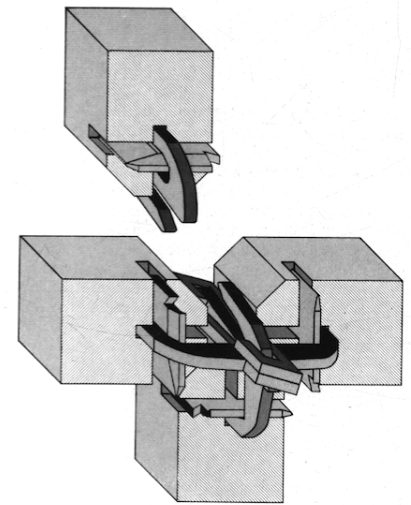
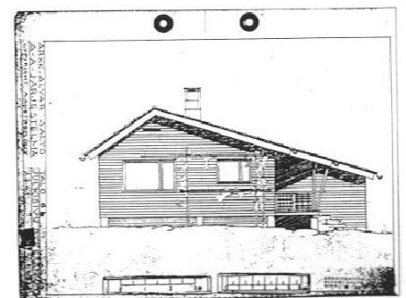
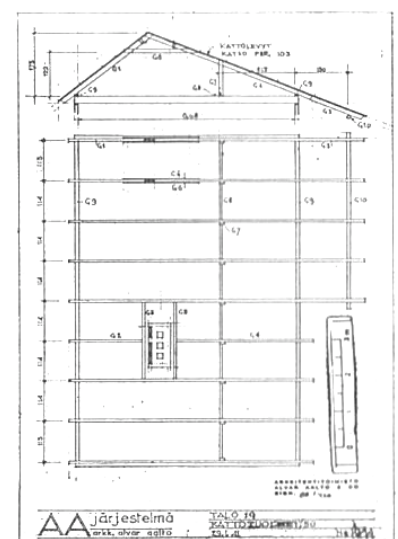


Fig. 10 Conexiones General Panel System (Wachsmann, The turning point of Architecture: structure and design, 1961).



88/915 Type 6b

Fig. 11 Casa AA-System tipo 6b (Cervera, 2011).



88/426 Type 19

Fig. 12 Casa AA-System tipo 19 (Cervera, 2011).

proyectos, aunque nunca llegue a realizarse una prefabricación como tal. No se puede dejar de lado la idea de organicidad, el concepto de que una casa, una vez construida, puede seguir creciendo.

Entre 1936 y 1941, se dieron los proyectos más significativos dentro de la serie de las *Usonian Houses*. Existían cinco tipos de diseños: la *Polliwog Usonian*, la *Diagonal Usonian*, la *In-line Usonian*, la *Hexagonal Usonian* y la *Raised Usonian* (Wildman, 2000). Si bien empleó el módulo y la cuadrícula, buscaba un sistema lo suficientemente flexible como para crear múltiples diseños, utilizando paneles de madera provenientes de la industria. En este sentido, es más cercano al trabajo que realizó Alvar Aalto que al trabajo de Konrad Wachsmann. Los tres buscan sistemas flexibles, sin embargo Aalto y Wright usaron la madera en relación a la tradición, no buscaban un sistema de construir universal sino algo más local. Se puede decir que Wright se queda en un sistema adaptable a elementos estandarizados, al igual que Aalto en la fase primera de desarrollo del AA System, sin llegar a una prefabricación total. Quizás esa es una de las razones por las que el sistema de Wright tuvo más éxito que el *General Panel System*, pues las *Usonian Houses* no se veían como viviendas de baja calidad y eran más cercanas al Estilo Internacional.

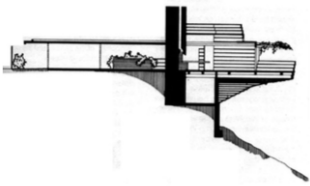


Fig. 13 Casa Sturges (Wildman, 2000).

La madera entonces se convirtió ,en esta época posterior a las guerras, en el material ideal para una construcción rápida y económica, debido a sus cualidades y su trabajabilidad en taller. Esto llevó a que la madera y la prefabricación se asociaran con la baja calidad. Y no solo con eso, sino con una vuelta atrás, al pasado, cuando la gente ansiaba desarrollo, algo nuevo, algo que ya ofrecía el acero, el hormigón y el Estilo Internacional. Quizás no se investigó más en sus posibilidades ya que, mientras la baja calidad con madera es barata, desarrollar elementos y sistemas de calidad sí costaba más dinero que utilizar otros materiales. No se ha de olvidar además, que todavía, en algunas partes de Europa, se mantiene la imagen de la Segunda Guerra Mundial, donde lo único que quedaba en pie eran los muros masivos de hormigón (Entrevista a Reinhard Wiederkehr. 'Holz kann sehr viel', 2015).

3.Un nuevo material: posibilidades en la construcción en altura

3.1.Contemporaneidad: debate sobre la protección del medio ambiente

Así como el siglo XIX supuso un cambio en la construcción debido al desarrollo de la técnica, el final del siglo XX ha supuesto a su vez otro cambio debido a la concienciación medioambiental. Una vez dominada la técnica y su rápido desarrollo, se plantean a partir de 1970 cuestiones relacionadas con el cuidado del medio ambiente. Los medios para alcanzar el gran avance tecnológico e industrial no habían sido cuestionados, y es en este momento, cuando los límites de este proceso comienzan a aparecer y estos medios comienzan a ser analizados. En las siguientes décadas, se comienza a hablar de la finitud de las reservas de petróleo, del efecto invernadero, de la lluvia ácida, de la muerte de los bosques... (Guttmann, 2008). En la actualidad, la sociedad ha tomado conciencia de la necesidad de encontrar un equilibrio entre el ser humano y el entorno, esto pasa por buscar alternativas y utilizar materias primas renovables que posibiliten un desarrollo futuro sostenible. Esto no solo engloba la construcción, sino todas las actividades humanas. Sin embargo, la actividad constructiva del hombre es una de las actividades menos sostenibles y consume aproximadamente el 50% de los recursos mundiales. La construcción sostenible supone un cambio de mentalidad (Acosta Jaramillo, 2014).

Esta nueva preocupación debía ser recogida consecuentemente por la norma. Actualmente existen tanto leyes y normas nacionales como internacionales sobre sostenibilidad y medioambiente, concretamente en el ámbito de la construcción. En el marco europeo es el CEN (Comité europeo de normalización) el encargado de elaborar estándares en relación a materiales, servicios y procesos. Normas como la ISO 15392:2008 *Sustainability in building construction- General principles*, o la ISO 21929-1:2011 *Sustainability in building construction – Sustainability indicators*, establecen principios e indicadores de sostenibilidad en relación a tres dimensiones: ecológica, económica y social; y además los indicadores tratan las consecuencias de la elección del emplazamiento, el desarrollo del proyecto y del terreno. Son de especial importancia además, las normas ISO 15686 *Buildings and constructed assets – Service life planning* y EN 15643:2010 *Sustainability assessment of buildings* (Arbeitsgruppe Urbaner Holzbau, 2014). Aunque sin ser de obligado cumplimiento, estas normas crean un estándar de calidad sostenible que busca un avance común. Lo que si es de obligado cumplimiento después de la directiva 2002/91/CE del parlamento europeo y del consejo de 16 de diciembre de 2002 relativa a la eficiencia energética de los edificios, y su posterior modificación, la directiva 2010/31/UE, es la certificación de todos los edificios que salen al mercado inmobiliario. Esta directiva incluye parámetros a cumplir para esta certificación, que será concretada por cada estado miembro. En España, el Real Decreto 235/2013 incorpora parcialmente la directiva europea y aprueba el procedimiento básico de certificación energética de edificios (Secretaría de estado de Energía, Gobierno de España, 2016).



Fig. 14. (CEI-Bois, 2011)

El caso de Estados Unidos va más allá. El certificado *LEED* (leadership in Energy and Enviromental design) es un sistema más dinámico que tiene en cuenta más aspectos como por ejemplo la calidad del aire en la vivienda, la eficiencia del uso del agua y la mejora en el proceso de planeamiento y de construcción de la vivienda, entre otros. Otros estándares conocidos son el *Green Globe* y el *Energiestar*, pero es el *LEED* el que más ha influido internacionalmente, y concretamente, en Europa. En Alemania existe el estándar *Passivhaus* como modelo para la casa del futuro y se están desarrollando variantes como la *Plusenergiehaus*, buscando una certificación más dinámica parecida a la estadounidense. Otros países también han implantado sus propios estándares y certificaciones además del *Passivhaus* (a nivel europeo), ejemplos a destacar son Italia, Suiza y Gran Bretaña. Los dos primeros, con sus estándar *CasaClima* y *Minergie* respectivamente, suponen tanto estándares de calidad como certificaciones energéticas (Isopp, 2008). Quizás con mas intensidad ahonda en este tema Gran Bretaña con su política *Zero Carbon Home* y el estándar *BREEAM*. La primera requiere que las nuevas construcciones a partir de 2016 mitiguen, siguiendo determinadas medidas, las emisiones de CO₂ (calefacción, electricidad, agua caliente...) (Zero Carbon Hub, 2016). Por su lado los estándar *BREEAM* británico y *Minergie* suizo se han internacionalizado más que otros y son empleados en otros países de la unión europea, como España y Francia por ejemplo. La pregunta es, ¿son estos estándares son tan internacionalizables?, puesto que cada país tiene unas condiciones climáticas y de recursos distintas.

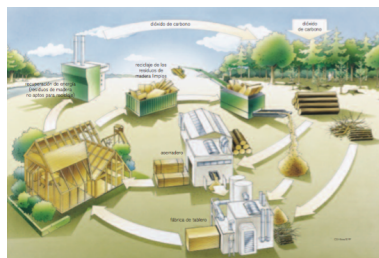


Fig. 15 (CEI-Bois, 2011)

3.1.1. El papel de la madera como material sostenible

Parece evidente hablar de los propios materiales y materias primas cuando hablamos de sostenibilidad en construcción. La elección del material es esencial a la hora de planificar una construcción sostenible y poco a poco la sociedad es más consciente de ello. Es en este punto donde entra en juego la madera.

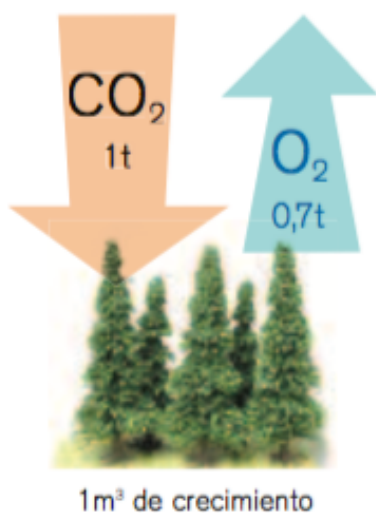


Fig. 16. (CEI-Bois, 2011)

Sus cualidades lo hacen un material muy apto para la construcción sostenible, siendo uno de los materiales renovables más utilizados por el hombre desde la antigüedad. A pesar de ello, la madera ha sido relegada a un papel secundario durante muchos años debido al favoritismo de la modernidad por otros materiales (Acosta Jaramillo, 2014). Es ahora, cuando el cambio de mentalidad en la construcción abre camino a este material, no como material secundario, sino como material principal.

Tradicionalmente se tiende a dar más valor a las construcciones masivas, de gran peso, que a las estructuras ligeras (proholz Austria, 2001), a pesar de que el comportamiento estructural sea igualmente adecuado. Esta ligereza es, sin embargo, una ventaja cuando hablamos de sostenibilidad. La ligereza no significa menor durabilidad ni menor estabilidad. Esta es una de las ventajas de la madera como material constructivo estructural, ya que tiene una excelente

relación resistencia/peso que hace que sea más fácilmente transportable y tratable en taller, aportando un alto grado de prefabricación y calidad, y reduciendo tiempos de obra. Ya que se trata de construcción en seco, también aporta mayor flexibilidad de montaje y desmontaje y no por ello es menos duradero, al contrario, esta flexibilidad permite que la vida del edificio se alargue siendo posible adaptarse a distintos contextos (Guttmann, 2008).

Actualmente el consumo de energía y la emisión de CO₂, -principal causante del cambio climático-, son aspectos a tener en cuenta a la hora de construir, la madera tiene grandes ventajas también en este aspecto. Citando la directiva 2010/31/UE:

El 40 % del consumo total de energía en la Unión corresponde a los edificios. El sector se encuentra en fase de expansión, lo que hará aumentar el consumo de energía. Por ello, la reducción del consumo de energía y el uso de energía procedente de fuentes renovables en el sector de la edificación constituyen una parte importante de las medidas necesarias para reducir la dependencia energética de la Unión y las emisiones de gases de efecto invernadero. Las medidas adoptadas para reducir el consumo de energía en la Unión permitirán, junto con un mayor uso de la energía procedente de fuentes renovables, que la Unión cumpla el Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC)...

Este párrafo de la directiva indica el marco futuro común en el sector de la construcción. Siguiendo esta línea, la madera consume menos energía en su transformación y además se trata de un 'sumidero de carbono', es decir, los árboles captan CO₂ durante la fotosíntesis y éste no vuelve a la atmósfera hasta que la madera es usada como combustible. Teniendo en cuenta además, que los costes de su transporte suelen ser menores al CO₂ 'captado' por cada pieza (CEI-Bois, 2011), la utilización de madera en construcción no solo es eficiente sino enormemente sostenible.

Otro aspecto del ahorro de energía es el comportamiento térmico. La madera es un excelente material aislante y su uso minimiza los puentes térmicos existentes en una construcción, debido a que su coeficiente de conductividad térmica es mucho mas bajo que el de otros materiales como el hormigón y el acero. Del mismo modo, la madera es un material confortable térmicamente puesto que el calor se transmite lentamente a través de él, haciendo que, aunque la temperatura sea fría fuera, la superficie interior no se enfría con rapidez permitiendo una temperatura agradable al tacto (Grobbaauer, 2008).

Por todo esto, desde hace tiempo, la madera es un material muy utilizado por aquellos que buscan confortabilidad, calidad de vida y vuelta a la naturaleza. Sin embargo, esto se ha dado fuera de la ciudad, a modo de vivienda unifamiliar. La incorporación de la madera en la vivienda urbana y en densidad todavía requiere la eliminación de multitud de prejuicios que se han ido forjando desde la aparición y desarrollo de la industria y la modernización.

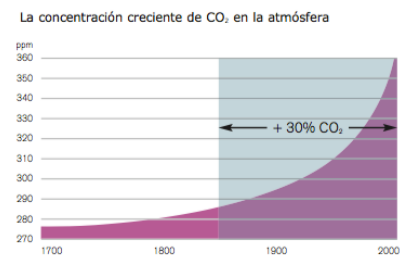


Fig. 17. (CEI-Bois, 2011)

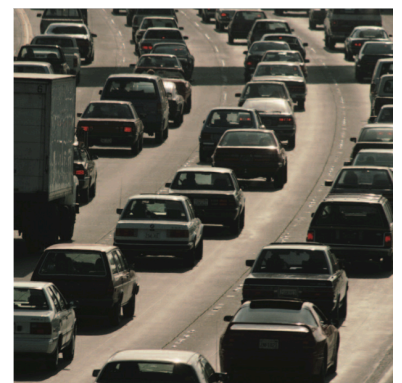


Fig. 18. (CEI-Bois, 2011)

3.1.2. Certificación de la madera y explotación de los bosques.

Toda sociedad en la que abundan los recursos naturales se dedica a la explotación sin control, teniendo en cuenta solo la economía. Solo cuando los efectos comienzan a aparecer y los recursos a escasear, comienza a ser necesario administrar los recursos naturales de otra manera. Esto no se trata de algo aislado sino de algo presente internacionalmente (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2012). Ocurre hoy en día con las reservas de petróleo y ocurrió antes con los bosques. La deforestación ocurrida hasta el siglo XIX fue alarmante y llevó a que durante el siglo XX se tomara conciencia de ello, si bien no en todas las partes del planeta.

Si se quiere utilizar la madera como material sostenible, la explotación de esta debe ser por consiguiente sostenible y respetuosa con el medio ambiente. No tendría ningún sentido utilizar la madera con fines ecológicos si en su obtención destruimos el medio ambiente. Tan importante es este aspecto, que en las últimas décadas han surgido leyes que controlan la tala indiscriminada. En Europa, la Unión Europea decidió que era necesario establecer un control y desde 2003 se establecieron diferentes medidas. A través del plan de acción FLEGT (Aplicación de las leyes, gobernanza y comercio forestales) se establecen medidas para eliminar los productos procedentes de tala ilegal del mercado. Además, con el nuevo Reglamento EUTR (*EU Timber Regulation*) queda prohibido introducir madera aprovechada ilegalmente y productos derivados de esta madera en el mercado de la UE. La madera ilegal es la proveniente de explotaciones que incumplen las leyes nacionales e internacionales, las cuales buscan garantizar mantener la biodiversidad de los bosques y reducir los impactos ambientales de la tala. Este reglamento es vinculante para todos los países miembros (Comisión Europea, 2013). De este modo, la madera debe estar certificada para asegurar que proviene de fuentes controladas, algunos de los certificados existentes más reconocidos mundialmente son el FSC y el PEFC.



Fig. 19. (es.fsc.org)



Fig. 20. (www.pefc.es)

En Estados Unidos y Canadá, grandes productores de madera, también existen regulaciones en este sentido y también es obligatoria la certificación de la madera.

3.2. Superación de los prejuicios

3.2.1. Construcción híbrida

Por su asociación con el hombre y lo natural, las construcciones de madera han buscado ser 'puras', es decir, utilizar casi únicamente madera. No obstante, tradicionalmente, si era necesario usarla unida a otros materiales para conseguir una construcción más eficaz, se hacía. Es común ver la piedra o ladrillo en los basamentos o podios de diversas edificaciones de madera.

Del mismo modo, si hoy en día se habla de introducir la madera en lo urbano y desarrollarla en altura, parece imprescindible utilizar su potencial unido al de otros materiales. Hoy en día la situación es distinta y disponemos de más variedad de productos y de tecnología, y por tanto de más posibilidades, lo importante es combinarla de manera inteligente. Quizás los materiales que más cualidades aporten en una construcción híbrida con madera sean el acero y el hormigón. El acero es el que ha proporcionado la posibilidad de uniones más resistentes y por tanto, un comportamiento estructural adecuado en la construcción en altura. Y el uso del hormigón, en combinación con la madera, puede dar lugar a un mejor comportamiento acústico y ante el fuego.

Mención especial se merecen los forjados, pues la utilización de la madera para el forjado, antes de la aparición del acero y el hormigón, era algo universal. La primera patente de forjado híbrido de madera y hormigón data de 1939 y desde entonces se han ido mejorando las conexiones entre ambos materiales y la efectividad de los sistemas .

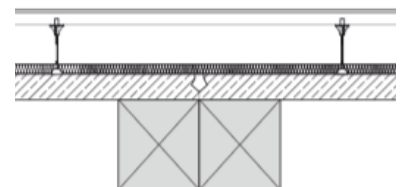


Fig. 21. Forjado del Illwerke Zentrum Montafon (Revista proholz, zuschnitt 54, 2014)

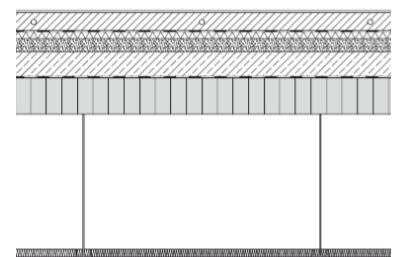


Fig. 22. Forjado de un colegio en Linz (Revista proholz, zuschnitt 54, 2014)

3.2.2. Posibilidades en prefabricación

Como ya se ha mencionado, la prefabricación con madera es un tema que se remonta a la época colonial, donde quizás empezó a adquirir ese carácter de arquitectura efímera y poco duradera. Sin embargo, con el paso de las décadas, se ha ido complejizando la construcción, y con ello el propio desarrollo de la obra. La prefabricación aparece como una manera de optimizar este proceso constructivo y dotarlo de mayor calidad (kaufmann & Nerdinger, 2011). En esta línea, la rapidez de montaje que permiten los elementos prefabricados de madera es un aspecto que favorece el ahorro de energía, cuanto más rápida sea la construcción, menor coste, no solo energético sino también monetario.

A menudo se entienden las palabras prefabricación, sistema, módulo, industria... con monotonía y falta de creatividad. Sin embargo, construir mediante sistemas supone una unión entre Arquitectura, trabajo manual e industria, buscar la máxima eficiencia, como ya hicieron arquitectos como Frei Otto o Buckminster Fuller (Staib, Dörrhöffer, & Rosenthal, 2008). Hoy en día, debido a la ya comentada



Fig. 23-24. Construcción de la Comunidad E3 en Berlín (www.kadenundlager.de)

influencia de la industria de la construcción en el medio ambiente, buscar la solución mínima con una máxima exigencia significa también ser sostenible. Además, la experiencia hasta ahora nos dice que los nuevos métodos permiten una mayor flexibilidad, ya no se habla de elementos estandarizados sino de diseños estandarizables. Conceptos y obras individuales se encargan a empresas que ofrecen la tecnología necesaria para desarrollar los diseños en el taller, dotando estas obras de soluciones personalizadas (kaufmann & Nerdinger, 2011). Puesto que los materiales de madera deben producirse en taller, cuantas más piezas puedan unirse en éste mayor calidad y eficiencia.

El avance en las técnicas de prefabricado y el desarrollo de nuevos materiales y uniones más eficientes, son algunas de las razones por las cuales el Paradigma ha cambiado y la madera ha pasado a ser el tercer material más utilizado después del acero y el hormigón. En los últimos 25 años, la construcción en madera ha pasado de centrarse en vivienda unifamiliar a convertirse en un tema de importancia en ingeniería constructiva (Isopp, 2015). Ya no se trata de unifamiliar y vivienda social, los sistemas en madera son muy adecuados para vivienda en densidad.

Hablar de vivienda en densidad es hablar de vivienda en altura. Y cuando se construye en altura, la repetición comienza a aparecer como algo inherente. En este sentido, la técnica de prefabricado nos aporta soluciones y no limitaciones. De la gran variedad existente de sistemas en madera, resultan muchas combinaciones posibles que permiten adaptarse a ideas individuales y concretas. Esto supone que el tiempo de planeamiento por parte de arquitectos se alargue, pero el tiempo y los problemas en obra disminuyan. Las posibilidades son muchas, desde diferenciar estructura y cerramiento, integrando o no ventanas, puertas e instalaciones, hasta realizar células de habitación completas que se colocan una sobre otra (Kolb, Holzbau mit System, 2010).

3.2.3.Comportamiento ante el fuego

Es cierto que la madera es un material combustible, pero también es cierto que se conoce como es ese proceso de combustión y por lo tanto se puede prever su comportamiento.

El cálculo de la resistencia ante el fuego de una sección de madera se realiza mediante el método de la sección reducida [fig. 25], explicada pormenorizadamente en el Eurocódigo y en el DB-SI del CTE. La sección reducida de madera se obtiene eliminando de la sección inicial la profundidad eficaz de carbonización, d_{ef} , en las caras expuestas, alcanzada durante el periodo de tiempo considerado (Documento Básico SI. Seguridad en caso de incendio, 2010). De este modo, para un tiempo determinado, podemos saber cuál es la sección que sigue trabajando de manera efectiva.

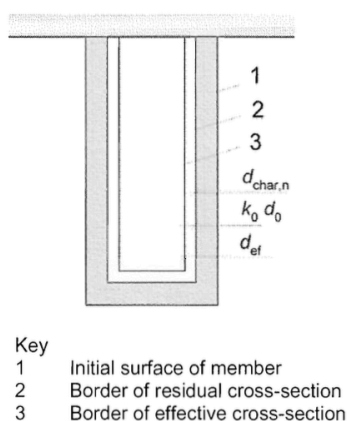


Fig. 25 Método de sección reducida (CEN, 2004).

Si la comparamos con otros materiales como el acero, el comportamiento resulta ser más adecuado, pues estructuralmente sigue funcionando. El acero en caso de incendio, por las altas temperaturas, pierde su capacidad resistente, llevando a un colapso de la estructura más rápido. Por otro lado, el hormigón tiene un buen comportamiento en caso de incendio pues no aporta a su propagación y resiste altas temperaturas, sin embargo su comportamiento es más incierto y no tan fácilmente predecible como el de la madera, pues si las armaduras quedan expuestas pierden su capacidad resistente.

Como contrapunto, es cierto que la madera aporta a la propagación de la llama y con ello al propio incendio, sin embargo existen tratamientos superficiales que evitan este efecto.

3.2.4. Experimentación en vivienda colectiva

Como se ha dicho antes, el avance de la prefabricación industrial en madera en el siglo XX se vio más bien limitado a la vivienda unifamiliar y no creció en altura ni en densidad. Sin embargo, debido a la preocupación medioambiental, las características y la condición de materia renovable de la madera hacen que este material sea planteado también, pese a la desconfianza de algunos, como un material apto para la vivienda colectiva urbana.

Como ejemplo de primeras experimentaciones con este tipo de vivienda cabe destacar a países como Alemania y Suiza, con gran tradición maderera. En la región de Baviera, Alemania, entre 1992 y 2000 se realizaron numerosas viviendas experimentales en madera, impulsadas por el departamento superior de construcción. Se trataba de vivienda social cuyo objetivo era reducir costes sin perder la calidad. (Sandek, 2001). Esta decisión tomada políticamente con una intención social y de reducción de costes, sin embargo, abrió el camino al desarrollo de la construcción urbana en madera, ya que más tarde, alternativamente a estos proyectos sociales dirigidos por la administración, existen ejemplos de comunidades que quieren una vida más ecológica en la ciudad y buscan una alternativa a la vivienda unifamiliar suburbana. Esta alternativa se trata de vivienda colectiva en madera. Proyectos de referencia existen en Friburgo, Constanza, Tubinga, Estrasburgo y Berlín entre 2000 y 2012 (Kuhn, 2014).

Esta vivienda experimental comenzó con sistemas mas tradicionales como el *Rahmenbau* y el *Platform Frame* y, por su carácter experimental, llevó también a nuevas soluciones como el uso los tableros contralaminados y la técnica *Brettstapel* (Sandek, 2001). En proyectos posteriores, como por ejemplo la comunidad *e3* en Esmarchstrasse en Berlín, la técnica se va complejizando y se dan construcciones híbridas que van abriendo más puertas y eliminando prejuicios. Otro aspecto importante es la adaptación a la normativa y los problemas y soluciones que conlleva el desarrollo de estos proyectos.



Fig. 26. Viviendas en Graz (Revista proholz, número 1, 2001)



Fig. 27. Viviendas en Innsbruck (Revista proholz, número 1, 2001)



Fig. 28. Viviendas en Schwarzach (Revista proholz, número 1, 2001)

La experiencia tanto de los constructores como de los habitantes es siempre positiva, quizás por la participación activa de estas comunidades de vecinos en el planeamiento. Las ventajas para las dos partes son notables. Según la encuesta del nº1 de la revista austriaca *Proholz* a diversos arquitectos, ingenieros y empresas, todos coinciden en que las ventajas para los propietarios e inquilinos son muchas: la rapidez de construcción en seco, el aspecto ecológico, el ahorro energético, el clima agradable, la flexibilidad... Todos coinciden además en que la imagen de la madera sigue siendo negativa en algunas zonas pero son optimistas en que poco a poco los avances van a ir eliminando esta visión desconfiada de que la madera es algo efímero, poco duradero o peligroso en caso de incendio.

3.3. Avance de la normativa

3.3.1. Europa

La preocupación medioambiental a finales del s.XX, fue una de las causas por las cuales la normativa relativa al ámbito de la construcción se desarrollara en los países europeos. Esto, y el interés común por la armonización de la Europa creada tras el Tratado de Roma de 1957. En 1975 se decide crear el programa *Eurocode* para cumplir con el artículo 95 del tratado, para eliminar obstáculos técnicos y especificaciones técnicas. Una primera generación de Eurocódigos se publica en la década de 1980, más tarde se elaborarán como normas europeas que primero serán experimentales (ENV) por la dificultad de realizar unos documentos aceptables para todos los países. Entre 1992 y 1998 se aprobarán 62 ENV que más tarde, a partir de 1998, se convertirán en normas EN⁶. Apoyando a los eurocódigos se publican también una serie de directivas sobre productos de construcción y contratos públicos⁷. Aunque de uso no obligatorio, tienen el rango de normas europeas, primero como una alternativa a las normas nacionales, a las que finalmente reemplazan. Las normas nacionales en conflicto, consecuentemente, debían ser eliminadas (Ministerio de Fomento. Gobierno de España, 2016). Otros reglamentos y directivas en estrecha relación con los Eurocódigos son la directiva de adquisición pública, la Directiva de Servicios, la Directiva de Provisión de Información en el área de Estándares Técnicos y Regulaciones y, la más destacable quizás, la Regulación de Productos de Construcción (EU) No 305/2011, la cual tiene como base la anterior nombrada directiva 89/106/ECC de 1988. Este nuevo reglamento busca fijar unas condiciones para que la comercialización de los productos de construcción en el mercado europeo tenga un marcado armonizado que indique las prestaciones de los productos (Joint Research Centre, 2016). En esta línea, el 3 de Marzo de 2013 entró en vigor el Reglamento EUTR relativo a la comercialización de la madera con el fin de detener la circulación de madera aprovechada ilegalmente en la Unión Europea (Comisión Europea, 2016). La normativa no solo ha avanzado introduciendo a la madera como un material importante, o al menos equiparable a otros, sino que busca proteger el medio ambiente. Una muestra de que es el interés medioambiental el que ha despertado el uso de la madera y no el económico.

⁶ EN 1990 (Eurocode 0): Bases de diseño estructural

EN 1991 (Eurocode 1): Acciones en estructuras

EN 1992 (Eurocode 2): Proyecto de estructuras de hormigón

EN 1993 (Eurocode 3): Proyecto de estructuras de acero

EN 1994 (Eurocode 4): Proyecto de estructuras mixtas de hormigón y acero

EN 1995 (Eurocode 5): Proyecto de estructuras de madera

EN 1996 (Eurocode 6): Proyecto de estructuras de fábrica

EN 1997 (Eurocode 7): Proyecto geotécnico

EN 1998 (Eurocode 8): Proyecto para la resistencia al sismo

EN 1999 (Eurocode 9): Proyecto de estructuras de aleación de aluminio

⁷ Directiva 89/106/EEC de 21 de Diciembre de 1988, Directiva 93/37/EEC de 14 de Junio de 1993, Directiva 92/50/ECC de 18 de Junio de 1992 y Directiva 89/449/ECC de 18 de Julio de 1989.

A pesar de la armonización que suponen las normas europeas, sigue habiendo grandes diferencias de normativa entre los países miembros, especialmente en lo referente a la construcción en madera. El Eurocódigo que trata la madera es el Eurocódigo 5 y, a pesar de que la norma europea dice que cada país miembro debe implementar los eurocódigos añadiendo un anexo nacional, esto no ha ocurrido todavía en todos los países. En España por ejemplo, solo se han publicado 10 anexos nacionales, de los 58 posibles, y no existe ninguno para el Eurocódigo 5. Esta implementación es importante puesto que en los Eurocódigos existen muchos datos de elección nacional debido a las diferencias de clima, terreno, entorno...etc, de cada país.

3.3.2.Diferencias entre los países miembros de la UE

La seguridad en caso de incendio es el tema más importante y complejo a tratar, y por ello es en el que se muestran más diferencias entre países. Las exigencias básicas de seguridad en caso de incendio suelen ser iguales o similares: se limitará el riesgo de propagación tanto en el interior como en el exterior del edificio, será posible para los ocupantes abandonarlo o alcanzar un lugar seguro dentro del mismo en condiciones de seguridad y el edificio dispondrá de los medios adecuados para la detección, control y extinción del posible incendio. Sin embargo, a pesar de estas condiciones casi comunes, hay países que añaden una medida prudencial y limitan la altura permitida en edificios de madera. Mientras Suecia, Noruega, Gran Bretaña, Francia e Italia no imponen ningún límite de altura, solo el cumplimiento de normativa en caso de incendio, otros países como Suiza, Austria, Alemania y Finlandia sí tienen limitaciones de altura como medida extra (Arbeitsgruppe Urbaner Holzbau, 2014).



Fig. 29. Complejo de viviendas Cennni di Cambiamento en Italia (www.cennnidiCambimento.it)



Fig. 30. Edificio Murray Grove en Londres (www.waughthistleton.com)

Mención especial merecen los países nórdicos; Dinamarca, Finlandia, Islandia, Noruega y Suecia. Con el objetivo de reforzar la industria maderera nórdica, desde 1990, el *Nordic Comitee for Building Regulations* (NKB) tiene la labor de armonizar las regulaciones nórdicas en construcción. Estos países tienen una tradición común y gran potencial para promover el uso de madera en Europa (Pousette, Gustafsson, Fynholm, & Edvardsen, 2008). Si bien tienen y tuvieron diferencias, la tendencia es común, por ejemplo en cuanto al número de plantas máximo permitido, como indica la tabla:

	Up to 1993	1994	1997	1999	2004	2010
Sweden	2	∞	∞	∞	∞	∞
Norway	3	3	∞	∞	∞	∞
Finland	2	2	4 ¹	4 ¹	4 ¹	4 ^{1,2}
Denmark	1-2	1-2	1-2	4	∞	∞

¹: with sprinkler, two stories without sprinkler
²: under investigation

fig.31 Tabla comparativa de alturas permitidas en construcción en madera (Schauerte, 2010).

Finlandia en este caso sería la excepción, pero modificaciones están siendo investigadas. Es notable que el progresivo cambio se debe a la aparición del sistema de extinción de incendios con rociadores (*sprinkler*). La razón de que existan menos limitaciones se debe a que estos países han avanzado de códigos de construcción prescriptivos, con medidas exactas a tomar, a códigos basados en resultados, es decir, aquellos que indican únicamente unos objetivos pero dan libertad de cómo alcanzarlos (salida satisfactoria de los ocupantes en caso de incendio...). El problema existente es la falta de guía para la verificación del cumplimiento de objetivos, la cual puede llevar a soluciones arbitrarias (Thureson, Sundström, Mikkola, Bluhme, Hansen, & Karlsson, 2008).

Además de por innovadora normativa en madera, los países nórdicos destacan por sus proyectos en marcha para promover el uso y la industria de este material. A mencionar son el proyecto 'Norwegian Wood' noruego, el finlandés 'Modern Wood Town' y la estrategia sueca de más uso de la madera en la construcción, sin olvidarnos del proyecto común 'Nordic Wooden Cities'. El éxito y la diferencia de estos proyectos respecto a otros es el gran papel que desempeña el sector público y el gobierno en su impulso y desarrollo. A parte de los proyectos físicos, realizan numerosos estudios de cara a servir como referencia para un nuevo Eurocódigo así como implementar la directiva europea de productos de la construcción (CPD).

Otra de las diferencias es la inclusión o no del novedoso material, madera contralaminada, en la normativa técnica nacional. Solo los países germanohablantes, Alemania, Suiza y Austria, lo contemplan en sus estándares nacionales (Architecture&Design).

Quizás la diferencia principal radique en la manera de entender la norma. Algunos de los países más restrictivos son, paradójicamente, aquellos que mas tradición tienen y más apuestan por este material. Quizás el exceso de prudencia sea debido a la propia tradición y al conocimiento profundo de los peligros. Hablamos por ejemplo de Alemania, Suiza y Austria. La norma hace ya desde el principio una diferenciación entre materiales combustibles y no combustibles, de este modo, además de las características que tiene que cumplir el material en caso de incendio, puede no estar permitido. Por ejemplo, las vías de escape en caso de incendio deben ser de materiales no combustibles, es decir el núcleo de comunicaciones en ningún caso puede ser de madera. En otros países, sin embargo, se habla de resistencia al fuego y no de combustibilidad, cualquier material puede ser utilizado siempre que cumpla el requerimiento establecido. Es el caso de Inglaterra e Italia entre otros.

3.3.3.El caso de Estados Unidos y Canadá

En Estados Unidos existe el *American Wood Council*, un Grupo de Comercio que representa al 75% de la industria americana maderera. Este grupo incluye a las instituciones NFPA (*National Forest Products Association*) y API (*American Paper Institute*), la primera encargada anteriormente de realizar



Fig. 32. Proyecto de torre de madera en Skelleftea, Suecia (www.archdaily.com)

códigos de edificación. La misión actual de este grupo es desarrollar herramientas y guías para la construcción en madera, y así extender la aceptación de estos productos e influenciar políticas públicas que afecten a su uso. Este grupo publica periódicamente un manual técnico para el cálculo de estructuras de madera así como estándares técnicos, que deben ser usados en conjunto. Los documentos más recientes son del año 2015, tanto el manual los siguientes estándares: ANSI/AWC NDS-2015 *National Design Specification (NDS) for Wood Construction* y ANSI / AWC SDPWS-2015 - *Special Design Provisions for Wind and Seismic standard* (American Wood Council).

Por otro lado, el *International Building Code (IBC)*, es el código de edificación predominante en Estados Unidos, aceptado por la mayoría de los estados. Es necesario mencionar, que cuando hablamos de Estados Unidos tenemos que tener en cuenta la gran diversidad de normativa existente. De esta forma, este código destaca como tendencia general, sin ser totalmente representativo de todos los estados. El IBC es desarrollado periódicamente por el *International Code Council (ICC)*, dedicado, al igual que el AWC, a desarrollar códigos y estándares a usar en el diseño de construcción. En este caso no solo se centra en madera sino en todo tipo de construcciones. El ICC fue fundado en 1994 para crear unos códigos comunes; a pesar de que los códigos regionales habían funcionado, se veía la necesidad de una cierta armonización, al igual que ocurrió en Europa. Es necesario mencionar este código, puesto que es en él en el que aparecen limitaciones en altura en edificaciones de madera (International Code Council).

El IBC es el documento en el que aparecen los requerimientos y limitaciones de las construcciones en general, y de la madera en particular. En la sección 5 es donde aparecen las áreas y alturas máximas de los edificios, la particularidad que existe es que se hace una doble clasificación: por un lado se clasifican los edificios según su uso (comercial, residencial, educacional, industrial...) y por otro lado según el tipo de construcción (diferentes combinaciones dependiendo de qué elementos sean combustibles). El uso que interesa es el Residencial a largo plazo, R2, y en cuanto al tipo de construcción, los tipos III, IV y V, que son los que permiten que existan materiales combustibles como la madera. Lo interesante es que en el tipo IV, aparece el material CLT, se permite en paredes exteriores a pesar de ser material combustible, esto no ocurría en códigos anteriores y muestra la nueva confianza en este material. En la siguiente tabla podemos ver las alturas máximas permitidas:

OCCUPANCY CLASSIFICATION	TYPE OF CONSTRUCTION										
	SEE FOOTNOTES	TYPE I		TYPE II		TYPE III		TYPE IV		TYPE V	
		A	B	A	B	A	B	HT	A	B	
R	NS ^{d, h}	UL 160	65	55	65	55	65	50	40		
	S13R	60	60	60	60	60	60	60	60	60	
	S	UL 180	85	75	85	75	85	70	60		

1ft=304,8 mm

NS: sin sistema de sprinklers; S13 y S: con sistema de *sprinkler*

A: material tratado contra el fuego; B: material no tratado contra el fuego

Fig 33. Tabla de clasificación según uso del edificio (International Code Council, 2015)

El tipo III solo permite materiales combustibles en el interior, con la excepción de maderas tratadas con retardante para el fuego. El tipo IV, es un poco menos restrictivo y permite también CLT en el exterior. Ambos tienen alturas permitidas de 25m, mientras que el tipo V, el que más libertad da, está limitado a 18m. Esto teniendo en cuenta los sistemas *sprinkler*, sin ellos las máximas alturas disminuyen considerablemente. Podemos decir que lo significativo de este nuevo código es la introducción del CLT y el aumento de altura máxima permitida. En 2012, independientemente del tipo de uso, la altura máxima permitida era de ~20m para tipo III y IV, y 15 m para tipo 5. Además, en uso residencial, el número máximo de plantas sobre el suelo era 4 para tipos III y IV y 3 para tipo V. La tendencia hacia una mayor libertad en el código está clara (International Code Council, 2015). Además, cabe destacar el interés por aumentar el número de plantas mediante la construcción de podios de hormigón u otro material no combustible. Este tipo de construcciones son tratadas por el código como dos estructuras diferentes, de esta manera se puede llegar a construir un edificio de 7 plantas con madera, siendo las dos primeras de estructura de hormigón. Un ejemplo de esto sería el complejo de edificios *Mercer Court*, en la universidad de Washington (Multy Story Wood Construction, 2012).

El sistema de requerimientos en Canadá es similar. El *National Building Code* (NBC) de Canadá también hace distinción entre tipos de construcción combustible y no combustible, y entre distintos usos. El número de pisos máximo permitido en construcciones de madera era de 4 en edificios residenciales según el NBCC de 2010. A destacar es el Código de Edificación de la provincia de British Columbia, el cual va un paso por delante y el número máximo de plantas permitidas, ya en 2012, en uso residencial era 6, si bien más por motivos económicos. No es de extrañar que sea ahí donde se realizó en 2014 el edificio de madera de oficinas más alto del mundo, en la ciudad de Prince George (Green, 2012). A pesar de que la normativa restrinja la altura de edificios residenciales a 6 plantas y de no residenciales a 4 plantas, el proyecto del edificio *Wood Innovation Design Centre* de Michael Green Architecture (MGA) tuvo una exención y fue posible realizarlo con 8 niveles. A pesar de estas restricciones el gobierno canadiense apoya la investigación en esta área. Sin embargo, las provincias le llevan ventaja, después de British Columbia, en otras como Ontario o Quebec se ha permitido este cambio. Las tres representan los mercados de construcción más grandes de Canadá. El NBCC 2015 ya permite la construcción de edificaciones de hasta 6 plantas con materiales combustibles, sin embargo, las propuestas para el NBCC van más allá. Distintos arquitectos y equipos diseñan propuestas desde 2013 que demuestren que los rascacielos con madera son posibles bajo la iniciativa *Tall Wood Building Demonstration Initiative*. (Government of Canadá). Arquitectos como Michael Green defienden que con sistemas de madera masiva, por ejemplo la madera contralaminada, es posible aumentar la altura permitida sin comprometer la seguridad ante un incendio. Este material es totalmente distinto al entramado de madera, predominante en el mercado de construcción en madera de Canadá. A pesar de estar considerado como material combustible, el comportamiento ante el fuego es adecuado y cumple las condiciones. Este material ha sido por ejemplo

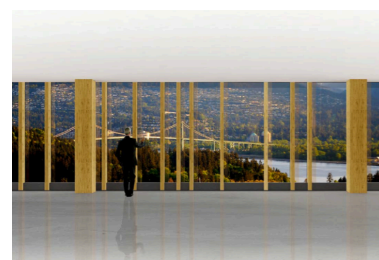


Fig. 34-35. Propuesta de Michael Green para edificio de 20 plantas (Green, 2012).

incorporado estándares como el CSA O86 y el ANSI/APA PRG 320 en los últimos años.

3.3.4. Reflexión sobre la normativa en España

Se ha hablado con anterioridad de los distintos enfoques de las normativas de los países europeos. España se encuentra dentro del grupo de países que no hacen una distinción explícita entre materiales combustibles y no combustibles para la estructura, sino que exigen simplemente unos requisitos de resistencia ante el fuego. Esto es importante, pues la normativa supone un límite en el uso de la madera en construcciones en altura. Es cierto que en revestimientos y otros elementos puntuales se especifica que tipo de material debe ser en relación a su combustibilidad, sin embargo, el enfoque general es el de exigir unos requerimientos generales, no limitando el uso de un material u otro mientras sea capaz de cumplirlos. La limitación en altura la impondrán las normativas municipales, pero no en relación al material, sino al entorno urbano.



Fig. 36 Edificio de madera de 6 plantas en el casco urbano de Lérida (www.elmundo.es)

Paradójicamente, la construcción en madera en altura está lejos de ser algo común en España, sin embargo existen algunos ejemplos. Sorprende que uno de ellos tenga una altura de 6 plantas (5 más azotea), altura límite y que supone un problema en muchos países con normativas mas restrictivas. Se trata de un edificio realizado en pleno casco urbano de Lleida, con madera contralaminada. Otro se ha proyectando en el centro de Barcelona, esta vez sólo de 3 plantas. A pesar de estos ejemplos, el desconocimiento de su uso y cálculo hace que no sea un material más utilizado.

3.4. Nuevos productos para la construcción en altura

Después del avance de la normativa y de las experimentaciones en vivienda colectiva, la construcción con madera en la propia ciudad se encuentra en pleno desarrollo. La gran mayoría de la población mundial vive en ciudades, y es muy pertinente por lo tanto, preguntarnos cómo ser sostenibles dentro de la ciudad. La utilización de la madera en contexto urbano puede llevar a la sociedad a una manera de vivir más respetuosa con el medio. Y construir en la ciudad conlleva construir en altura.

Hoy en día los proyectos urbanos son muy complejos y los requisitos para los materiales utilizados son cada vez mayores. Se busca cubrir mayores luces y crecer más alto, sin renunciar a la seguridad estructural y en caso de incendio. Esto hace que para que la madera pueda ser utilizada en este contexto, nuevos productos eficientes derivados de la madera hayan tenido que ser desarrollados.

Ya antes del siglo XIX se habían buscado soluciones para construir con madera cubriendo mayores luces, pero es justo a principios del siglo XX, en 1901 cuando aparece la primera patente de un material derivado de la madera y que permitirá cubrir grandes luces. Se trata de la madera laminada encolada, una patente suiza del arquitecto Otto Karl Friedrich Hetzer referida a varias láminas de madera unidas entre sí, orientadas con la fibra en dirección paralela, con adhesivo estructural. Este material tuvo un gran desarrollo en Suiza y pronto se exportó a otros países europeos y a Estados Unidos.

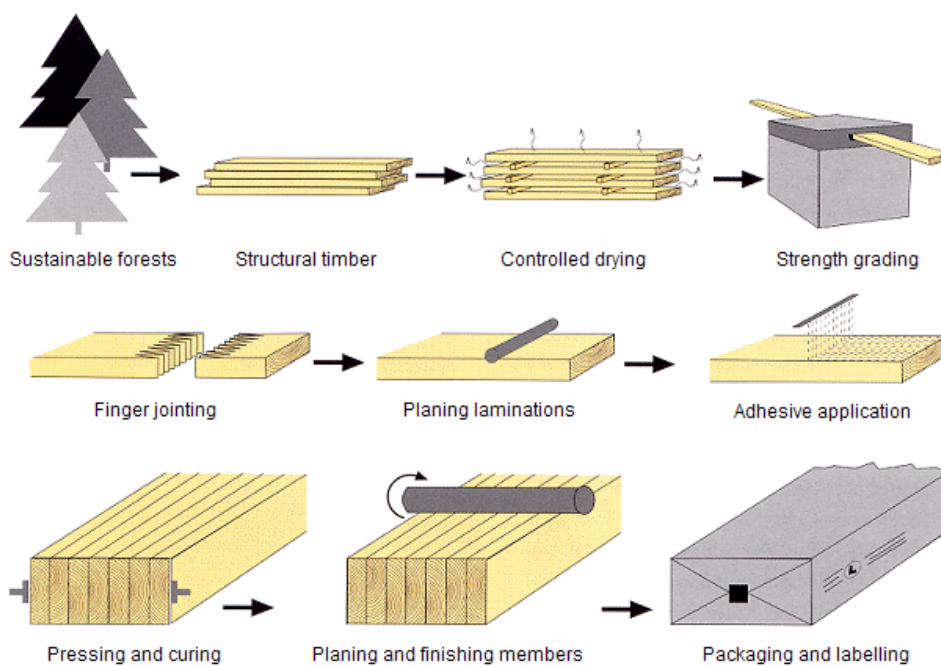


fig.37. Proceso de fabricación de la madera laminada encolada. www.glulam.co.uk

Se trata de un producto que puede producirse de cualquier tamaño, con la curvatura que se desee y con la posibilidad de fabricar piezas sin defectos. Hoy en día, para obtener la madera encolada, se utilizan tablas de madera aserrada que por yuxtaposición y mediante unión encolada dentada forman cada lámina. Y después, una vez obtenida la largura deseada, por superposición y mediante el encolado de sus caras se unen las tablas y dan lugar a la pieza (AITIM , 2011).

En Europa para el control de la calidad de los productos de madera laminada existe la norma UNE-EN 14080:2013- Estructuras de madera. Madera laminada encolada y madera maciza encolada. Requisitos. En esta norma se establecen, entre otros aspectos, las resistencias al fuego y las resistencias estructurales. En cuanto a las propiedades mecánicas, existen 8 clases resistentes, dependiendo del tipo de láminas madera del que estén compuestas las piezas .

Más tarde, a principio de los años 90, en Suiza de nuevo se comenzó la producción de un nuevo producto, la madera contralaminada (CLT). A partir del año 2000 comenzaron a realizarse obras con este material en Suiza, Austria y Alemania, y en la última década se ha convertido en el producto estrella mundial para la construcción en madera. El sistema de producción es parecido al de la madera encolada: las piezas clasificadas de madera se unen mediante unión dentada encolada hasta alcanzar la largura deseada formando las láminas, que luego se adosan por sus cantos formando capas de láminas de madera. La gran diferencia es que cada capa está orientada con la fibra en dirección perpendicular a las adyacentes. De este modo se consigue una gran resistencia y estabilidad.

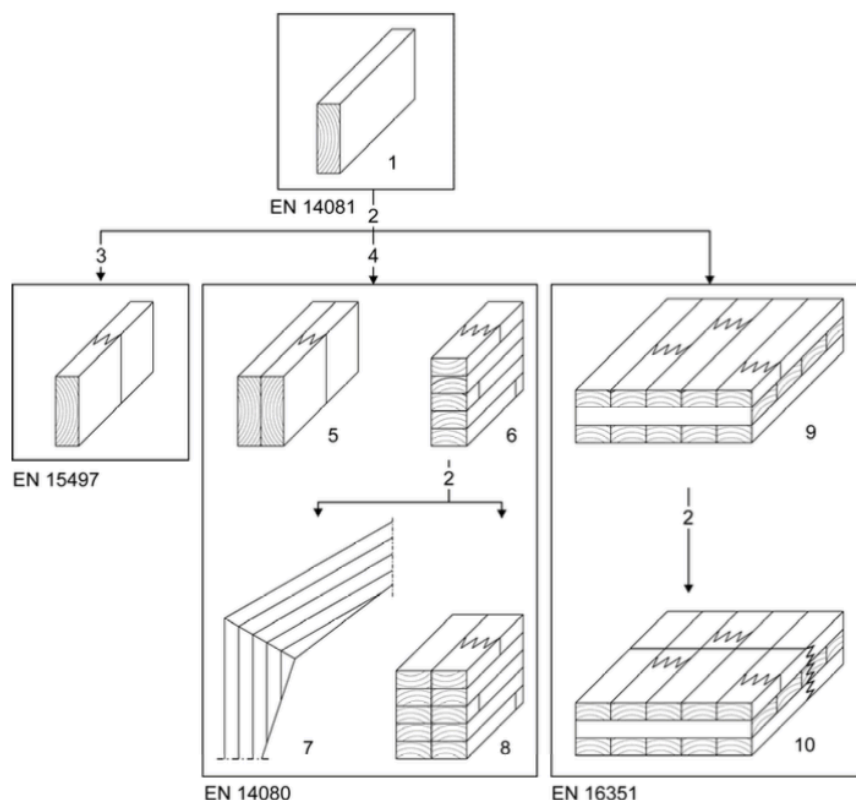


fig.38. Proceso de fabricación de la madera contralaminada (Medina, 2016).

Se trata de un material relativamente nuevo, no obstante desde principios de 2016 existe una norma europea, al igual que para la madera laminada, que especifica las características de los distintos tipos de madera contralaminada. Se trata de la norma EN 16351 -Estructuras de madera. Madera contralaminada. Requisitos. Por existir más variedad a la hora de la fabricación que en la madera laminada, la clasificación es más compleja. La norma contempla dos posibilidades para obtener la resistencia y rigidez: mediante los datos de geometría y las propiedades de resistencia y rigidez de las capas o mediante ensayos con elementos enterizos de MCL tal como se describe en el anexo F de la norma (Medina, 2016).

Mediante este sistema se pueden construir paneles portantes de madera de gran resistencia, algo que con la madera laminada no es posible. Se trata de elementos unitarios, se pueden utilizar en forjados y paredes evitando el entramado o el esqueleto de vigas y columnas. La madera contralaminada o CLT abre las puertas a la posibilidad de construcciones con muros portantes ligeras, sin que la apertura de huecos suponga un problema. Otros materiales como el hormigón son demasiado más pesados como para que el sistema de muros portantes pueda desarrollarse en altura. Se trata de una posible alternativa a la construcción de esqueleto moderna.

Una alternativa a la madera contralaminada para la producción de paneles de madera masiva, esta vez sin uso de adhesivos, es la técnica *Brettstapel*. Alrededor de 1970 el ingeniero alemán Julius Natterer desarrollo otro producto, de concepto similar a la madera laminada pero sin utilizar adhesivo. La forma más antigua de este producto consistía en tablas de madera aserrada unidas entre sí, cara a cara, mediante clavos. Este sistema evolucionó con la utilización de adhesivos para conseguir mayores luces pero una de las críticas al sistema era la necesidad de unir las piezas manualmente, lo cual aumentaba el tiempo de producción. Como continuación, en 1999 Kaufmann Massive Holz GmbH desarrolló el sistema llamado *Dübelholz*, la diferencia se encontraba en el uso de espigas de madera muy resistentes en vez de clavos. Estas se colocaban perpendicularmente a las tablas y, a pesar de que el objetivo era no usar adhesivos, la contracción y expansión de la madera causaba problemas y acabaron siendo necesarios. De este modo en 2001, la compañía austriaca *Sohm holzbautechnik* desarrollo el *Diagonal Dübelholz*. En este caso las espigas de madera se introducían con un ángulo formando una V o una W, minimizando el problema de las contracciones y expansiones y no siendo necesario el uso de adhesivos. Hoy en día la unión de las tablas se realiza industrialmente y diversas compañías en Austria, Suiza y Alemania desarrollan este producto (Henderson, 2009).

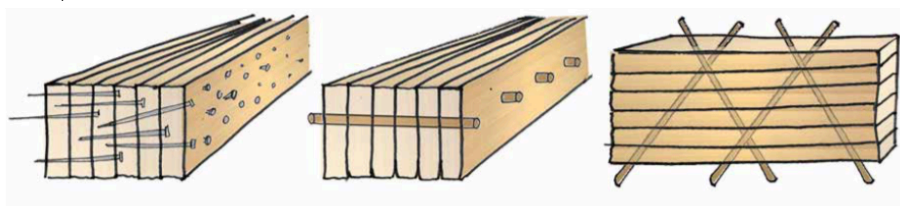


fig. 39. .Brettstapel, Dübelholz, Diagonal Dübelholz (Henderson, 2009).

Se trata de un producto que es completamente madera, sin la existencia de adhesivos, al contrario que la madera laminada y contralaminada. Sin embargo, éstos últimos son los sistemas más usados y extendidos, quizás debido a la mayor simplicidad en la producción.

Respecto al comportamiento ante el fuego, para cada producto de madera es necesario un sobredimensionado de las piezas para que su capacidad estructural aguante el tiempo considerado. Para mejorar el comportamiento ante un incendio, y también acústico, se han desarrollado no otros productos, sino otros sistemas híbridos madera-hormigón. Estos son de especial importancia también para construcciones de gran altura, donde la protección en caso de incendio juega un papel aun más importante.

Estos paneles híbridos madera-hormigón se suelen utilizar para forjados. Todos tienen en común estar compuestos por una fina capa de hormigón soportada por un sistema de vigas o de paneles de madera. Las diferencias entre ellos radican en la manera de conectar la madera con la placa de hormigón y en que tipo de producto de madera se usa como soporte, si es en forma de vigas o de paneles masivos. Otra diferencia existe en si la capa de hormigón se realiza in situ o en taller.



fig. 39. Distintos tipos de forjado híbrido (Revista proholz, zuschnitt 54, 2014)

4.Casos de estudio

A continuación se analizan tres casos de estudio para comprobar la aplicación real de todo lo desarrollado. Se trata de tres casos excepcionales, pues en todos hay una investigación exhaustiva anterior para comprobar la viabilidad y seguridad del proyecto. Los tres casos prototipos que abren una investigación sobre el sistema utilizado, para comprobar sus posibilidades futuras y poder ser replicados y mejorados en otros contextos.

4.1.LiveCycle Tower - LCT ONE



fig. 40-41 (Architekten Hermann Kaufmann ZT GmbH, 2016)

La torre de oficinas *LTC ONE* es el primer edificio de 8 plantas de estructura de madera en Austria. El edificio es un prototipo del estudio *LiveCycle Tower*, el cual analiza la posibilidad de edificios de hasta 20 plantas con un sistema flexible, modular y listo-para-construir. El uso actual del edificio es de oficinas, sin embargo el objetivo es también la flexibilidad de uso. Las dimensiones, tanto la altura como la superficie, están pensadas para posibles usos de hotel y viviendas, además del uso de oficina.



fig.42-44 (Architekten Hermann Kaufmann ZT GmbH, 2016)

GENERAL

Proyecto	LifeCycle Tower ONE
Localización	Dornbirn, Austria
Tipo de proyecto	Privado. Edificio de oficinas
Arquitecto	Hermann Kaufmann
Comienzo de obra	Septiembre 2011
Finalización de obra	Agosto 2012
Certificación	Passivhaus

GEOMETRÍA

Número de plantas	8
Altura total	27m
Altura de evacuación	21,97m
Superficie neta por planta	1765m ²
Superficie bruta por planta	2319m ²

COSTES

Coste por m²	1650 euros
Coste total	4,1 mill. euros
Madera utilizada	280 m ³

EQUIPO MULTIDISCIPLINAR

Supervisor de obra	Rhomberg Bau GmbH
Promotor	CREE GmbH
Soporte financiero	BM:VIT (Ministerio de Transporte, Innovación y Tecnología), Österreichische Forschungsgesellschaft FFG (Agencia de Promoción de la Investigación), Raiffeisenlandesbank (Banco regional).
Soporte técnico contra el fuego	Institut für Brandschutztechnik und Sicherheitsforschung (IBS)
Arquitectos	Hermann Kaufmann Architekten ZT GmbH
Construcción en madera	Sohm Holzbau GmbH
Ingenieros estructurales	Merz Kley Partner GmbH
Ingenieros mecánico	Ingenieurbüro Brugger

Por tratarse de un edificio comercial, desarrollado por una empresa de construcción privada, este proyecto tenía dese el principio como requisitos poder competir con el resto de construcción comercial del mercado y ser comercializable en el mercado global (Kollar, 2014). Es por eso que este proyecto es significativo como ejemplo de construcción en madera, no solo posible, sino competitiva en el mercado actual. Esto se consigue reduciendo costes por imprevistos en obra, es decir optimizando la construcción.

La complejidad inherente a esta clase de obra llevó a que fuera necesario un trabajo indisciplinar. Si bien este equipo es el que ha hecho posible el desarrollo del proyecto, también, por la falta de experiencia, ha alargado el proceso de planificación. El objetivo era prevenir futuros problemas y efectos negativos (Kollar, 2014). La manera de superar todos los obstáculos era crear un sistema lo suficientemente inteligente como para convencer a inversores y clientes. Las claves de este proyecto son: **rápidez de montaje y flexibilidad**.



fig.45 (Architekten Hermann Kaufmann ZT GmbH, 2016)

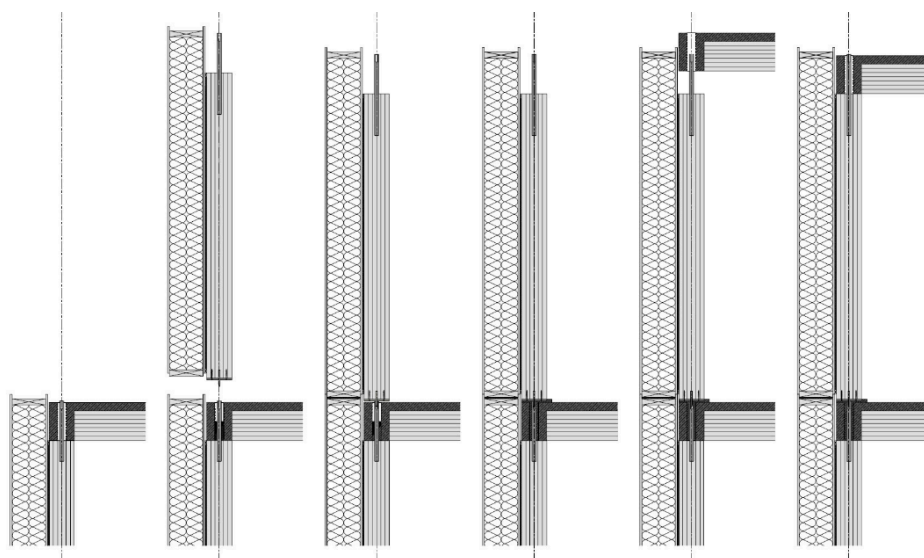
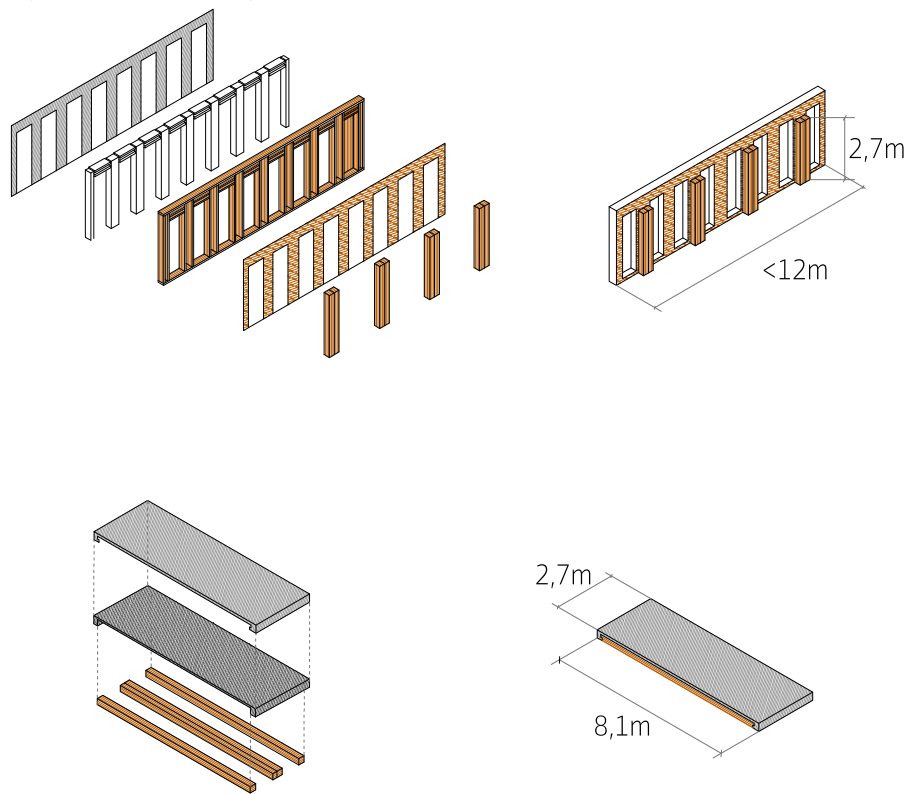


fig.46. (Architekten Hermann Kaufmann ZT GmbH, 2016)

Se trata de la nueva vivienda prefabricada *do-it-yourself*, pero esta vez no es aplicada a vivienda unifamiliar ni a vivienda social, sino a construcción en altura con altas expectativas de calidad. Este proyecto es la muestra de que es posible desarrollar una construcción 'desmontable' adaptada a nuestros días y a las exigencias del mercado.

4.1.1 Estudio del tipo

Montaje de elementos suelo y fachada



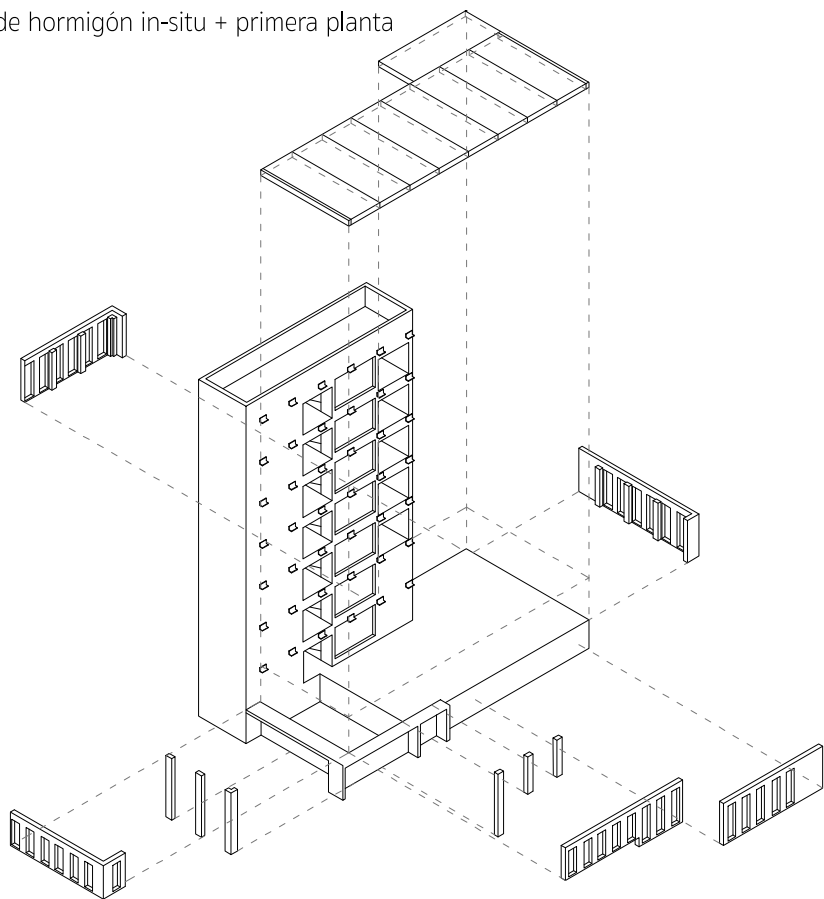
DATOS TÉCNICOS

Sistema constructivo	Por paneles
Estructura	Híbrida. Madera-hormigón
Podio de hormigón	Si. Una planta
Núcleo	Hormigón
Estructura vista	Solo al interior

NORMATIVA

Cálculo estructura	Eurocódigo 5
Protección en caso de incendio	OiB-Richtlinie 2
Protección acústica	OiB-Richtlinie 5
Clasificación de materiales	EN 13501

① Núcleo de hormigón in-situ + primera planta



REQUISITOS

En caso de incendio:

Estructura	R90
Vías de escape	REI 90
Compartimentación entre sectores de incendio	REI 90
Máxima altura de evacuación	22m

Tipo de material:

Estructura	A2(no combustible)
Vías de escape	A2(no combustible)
Compartimentación entre sectores de incendio	A2(no combustible)
Número máximo de plantas en estructura de madera	6

Tipo de material:

Estructura	D(combustible)
Compartimentación entre sectores de incendio	Híbrido A2+D
Número de plantas	8

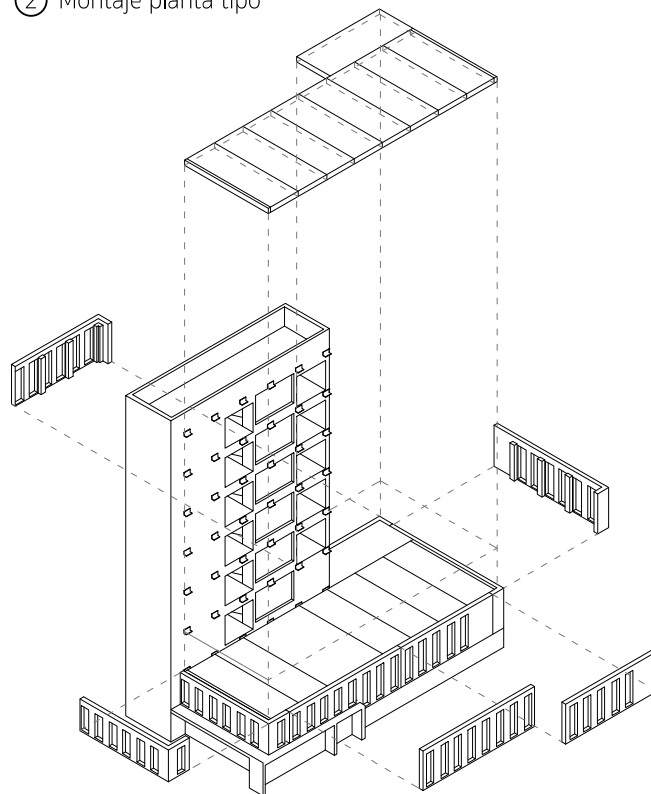
MEDIDAS COMPENSATORIAS

Forjado híbrido **REI 90**. Actúa como separación en sectores de incendio.

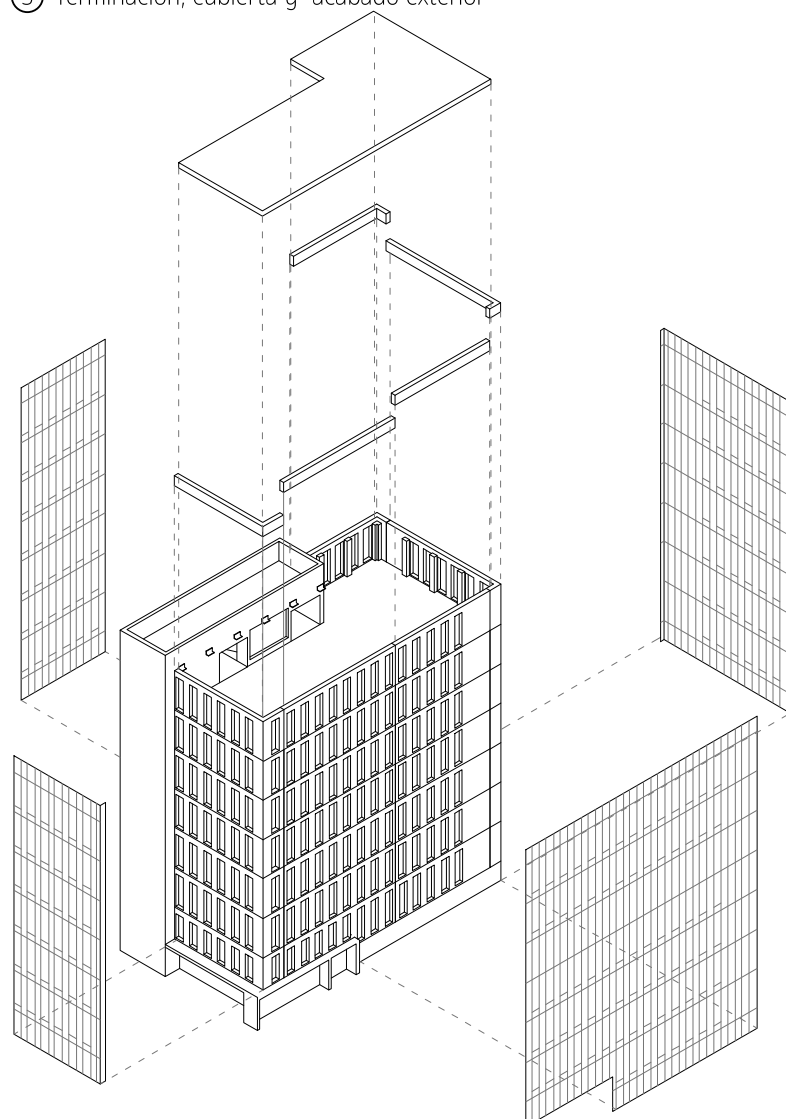
Sistema de **rociadores de incendio** (*sprinkler*).

Estructura encapsulada hacia el exterior para protección en caso de incendio.

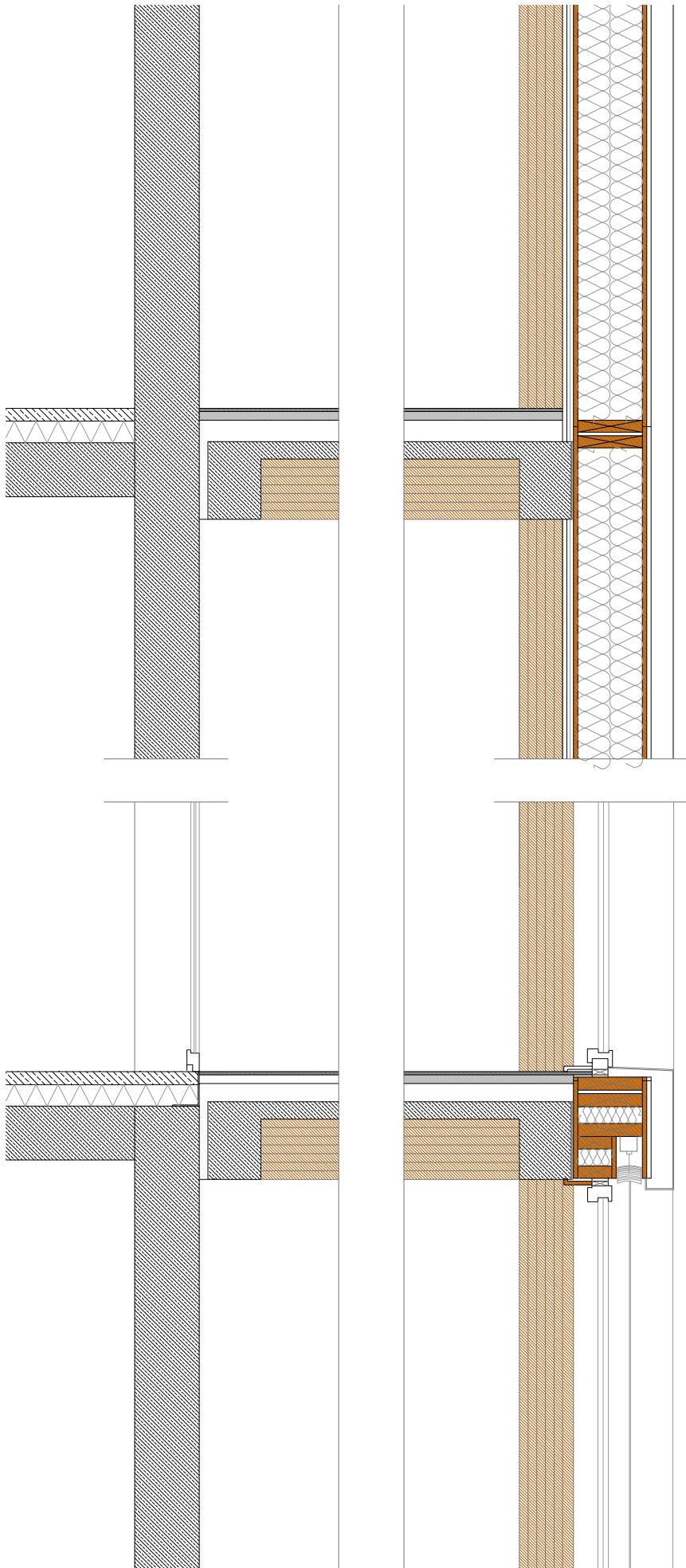
② Montaje planta tipo



③ Terminación, cubierta y acabado exterior



El test contra el fuego de los paneles prefabricados se llevó a cabo en el instituto de investigación **Pavus** en República Checa por falta de un espacio suficiente en en **IBS** (Institut für Brandschutztechnik und



Fachada

- Chapa de aluminio
- 18mm fibrocemento resistente al fuego y a la humedad
- 20mm
- 320mm aislamiento
- 20mm
- 50 mm placa de acabado interior

Forjado

- Suelo flotante
- Bloque híbrido: 80mm hormigón , 280mm viga de madera laminada, terminación transversal con viga de hormigón armado.

Fig. 51. Elaboración propia.

4.1.2. Aportaciones del modelo

Madera laminada

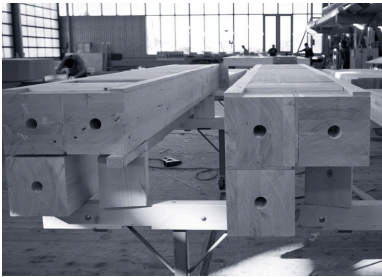


Fig. 52. Triples columnas para las esquinas (Architekten Hermann Kaufmann ZT GmbH, 2016)



Fig. 53. Conexión columna-panel híbrido (Architekten Hermann Kaufmann ZT GmbH, 2016)



Fig. 54. Conexión núcleo-panel híbrido (Kaufmann, 2012)

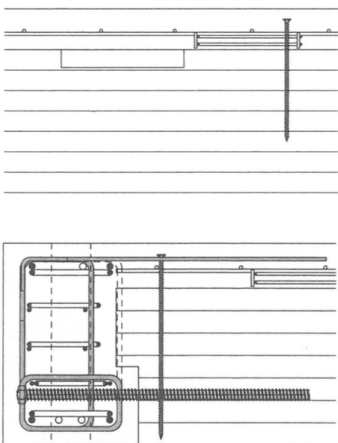


Fig. 55-56. Detalles de armado de hormigón y conexión del bloque híbrido (Sauer, 2015)

Gracias a su excelente propiedad resistencia/peso ($d:0,47 \text{ g/cm}^3$) y su facilidad de trabajo en taller, es un material clave. La estructura la forman principalmente soportes de este material de 24x24cm en forma de dobles o triples columnas [fig 52], para un mejor apoyo de los paneles superiores, y vigas 24x28cm, las cuales conforman los propios paneles híbridos de forjado. También se usa este material para el entramado que forma el soporte no estructural de la fachada.

Sistema de conexiones innovador

Cuando hablamos de construcción en altura, debido a las grandes tensiones, las uniones se convierten en los puntos más importantes de la estructura. Unas uniones bien diseñadas son las que definen el éxito o fracaso del sistema. El acero juega un papel muy importante en esta parte del sistema.

Las uniones entre los paneles híbridos y las columnas son de gran precisión por tratarse de elementos prefabricados de taller. Las uniones se hacen a través de conexiones bisagra, lo cual es una ventaja estructural puesto que solo existen fuerzas normales al eje considerado. El sistema es sencillo, cada columna tiene embebido un tubo de acero [fig 53] con un pequeño hueco en la parte superior, el cual recibirá la siguiente columna. Por otro lado, los paneles híbridos tienen cuatro huecos, uno en cada esquina, por los que se introducen los tubos de acero de la cabeza de las columnas. Por último, la columna inmediatamente superior tiene en el pie una placa de acero con un perno de anclaje, el cual se introduce en el hueco del tubo incrustado en la cabeza de la columna inferior (Tectónica online, 2013).

La conexión de los paneles híbridos con el núcleo de comunicación se lleva a cabo de manera similar, a través de unas placas metálicas en L embebidas en el hormigón. Estas placas llevan incorporados dos pernos de anclaje que se introducen en los respectivos huecos situados en las esquinas del panel. Es importante tener en cuenta también que cualquier hueco restante entre tubos y huecos es rellenado inmediatamente por mortero de cemento para que todo quede sellado (interés de protección contra el fuego) (Tectónica online, 2013)

La unión madera-hormigón en el propio bloque híbrido también es importante y se lleva a cabo mediante elementos metálicos como tornillos y otros conectores [fig 55-56].

Por última vez, una vez terminado el montaje, es importante sellar cada planta herméticamente del exterior. Las juntas de la fachada se sellan con adhesivos adecuados a cada material y las juntas de los suelos se rellenan con mortero de cemento (Tectónica online, 2013).

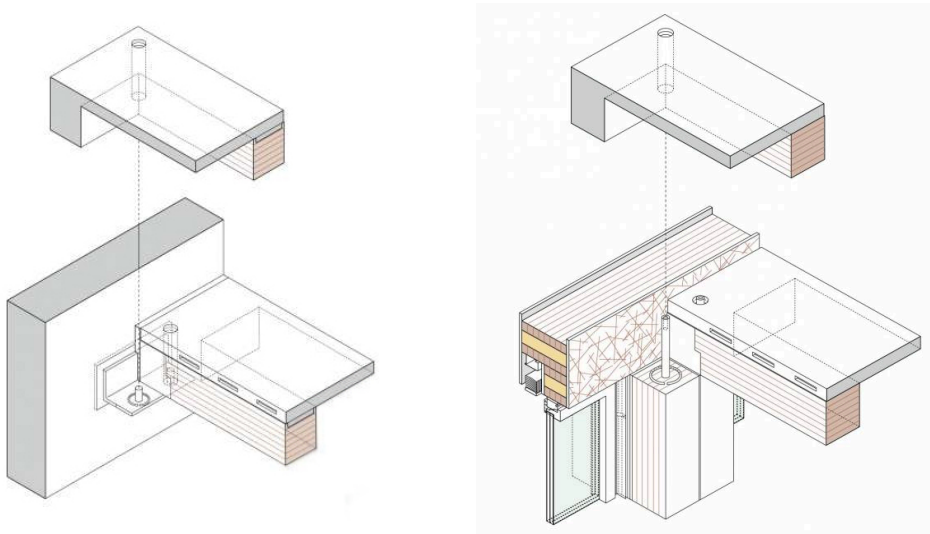


fig 57. Diagramas de conexiones de panel con núcleo y con columna respectivamente (Tectónica online, 2013)

Tampoco nos podemos olvidar de las esquinas, puntos clave para el comportamiento estático uniforme de todo el edificio. Son especialmente importantes además porque estamos hablando de construcción prefabricada y es importante que este elemento sea resistente y dé unidad al conjunto. En este proyecto, la solución es realizar la esquina incluida en uno de los paneles de fachada, apareciendo una columna triple y así solucionando la conexión en esquina en el taller y evitando problemas en obra.

Protección contra el fuego/Construcción híbrida

Si bien las claves para el éxito de este proyecto, como se ha nombrado con anterioridad, eran la flexibilidad y la rapidez de montaje, el elemento decisivo para haber alcanzado los ocho pisos de altura es el panel híbrido madera-hormigón [fig 24]. El obstáculo más grande en este tipo de proyecto no es la estática sino la protección contra el fuego y la estricta normativa al respecto. Siguiendo la norma europea EN 13501 y testado de manera experimental, el bloque híbrido resultó cumplir la condición REI90, imprescindible para cumplir los requerimientos normativos (Kaufmann, 2012).

Las normas que rigen la construcción en Austria son las *OiB-Richtlinien*, estas normas armonizan los aspectos técnicos de construcción en el país. Concretamente la que trata sobre protección contra el fuego es la *OiB-Richtlinie* 2. La estructura de la norma en los países germanohablantes es similar, de modo que la Austríaca es parecida a la Alemana y también hace una primera diferenciación entre clases de edificios, siendo también 5. En este caso se



Fig. 58. Panel fachada de esquina (Tectónica online, 2013).



Fig. 59. Panel fachada de esquina (Architekten Hermann Kaufmann ZT GmbH, 2016).

trataría de tipo 5⁸ con más de 6 plantas. El requerimiento contra incendio de la estructura en este caso, según la tabla 1b de la *Oib-Richtlinie 2*, es de R90 y además el material debe ser tipo A2⁹ (material no combustible). Esto en principio supondría la imposibilidad de utilizar madera por ser material tipo D (material combustible). Sin embargo, a pesar de esta imposibilidad inicial, existen medidas de compensación permitidas por la norma para poder realizar edificios de este tipo con estructura de madera. Entre ellas están la utilización de sistema activo de extinción de incendios *sprinkler* o encapsular el elemento de manera que en caso de incendio este no se vea afectado durante el tiempo estimado (Teibinger, 2015). Los sistemas *sprinkler* son costosos económicamente y no son asequibles para cualquier bolsillo. En este caso no obstante, es posible y es el sistema que se utiliza para no tener que encapsular los elementos estructurales y que la madera quede vista en el interior.



Fig. 60 División entre pisos debido al uso del hormigón (Kaufmann, 2012).

Además de esto, la norma también exige una compartimentación en sectores de incendio separados por elementos no combustibles, especialmente si se trata de edificación tipo 5, como es el caso. Aquí es donde entra la importancia del bloque híbrido, sin él no sería posible la realización del proyecto. Además de su resistencia REI90, la capa de hormigón superior y las vigas de hormigón que cierran los lados más cortos del bloque aportan la sectorización anti-incendio necesaria para que el proyecto sea posible. Se busca evitar, en la medida de lo posible, el contacto madera-madera entre distintos pisos (Tectónica online, 2013).

A pesar de lo conseguido, el núcleo de comunicaciones ha de hacerse también de material no combustible, al contrario de lo proyectado inicialmente, debido a la estricta normativa. Este debe ser de materiales que cumplan los requerimientos REI90 y sean de tipo A2, sin posibilidad de medidas compensatorias. En la fachada tampoco se permite que la madera aparezca vista, se recurre entonces a un encapsulado de los elementos de madera.

Aspectos sostenibles

El objetivo de este proyecto no es otro repensar nuestra manera de construir. Se trata, como ya se ha dicho, de un prototipo de un estudio más amplio dentro del Programa *Haus der Zukunft* (<http://www.HAUSderZukunft.at>), el cual busca caminos concretos para construir de manera innovadora y sostenible. La madera, por lo ya comentado en apartados anteriores, es una elección inteligente si nuestro objetivo es la eficiencia energética, el balance de CO₂, producir menos residuos..., entre otros aspectos sostenibles.

Para cumplir estos objetivos de sostenibilidad se opta por realizar un edificio según el estándar, de origen alemán, *Passivhaus*. Algunos de los requerimientos de este estándar son (Passivhaus.de, 2016):

- Gasto de calefacción menor a 15 kWh/m² al año

⁸ *Gebäudeklasse 5 (GK5)*: edificio con un nivel de evacuación/escape de no más de 22m.

⁹Según la clasificación de la norma europea EN 13501, A2 corresponde a un material no combustible.

- Energía primaria requerida por la calefacción residual, agua caliente, ventilación y electricidad es menor a 120 kWh/m²a
- Intercambio de aire a 50pa menor a 0.6/h
- Cerramiento con $U < 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Minimización de puentes térmicos
- Uso de la energía solar a través de la orientación sur
- Acristalamiento y marcos de carpinterías con $U_w < 0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Recuperación del calor del 75% y precalentamiento del aire entrante (por ventilación) mediante un sistema de recuperación de calor.
- Calentamiento de agua por placas fotovoltaicas o bomba de calor.

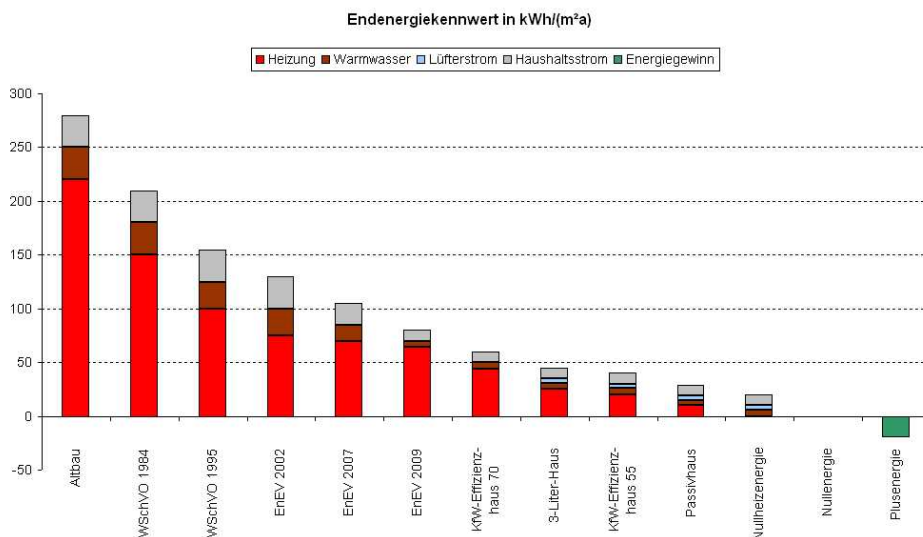


fig 61: (Passivhaus.de, 2016)

El cerramiento es un elemento muy importante para el estándar Passivhaus. En este caso se trata de una estructura portante de madera laminada que contiene en su interior lana mineral y es rematada por dos paneles de fibras de madera [fig 26]. Este conjunto tiene 48cm de grosor y se le añade un fino recubrimiento de fibrocemento de 18mm en el exterior que resiste la humedad y el fuego (Tectónica online, 2013). Por último, se añade un recubrimiento de aluminio (reciclado en un 60%), el cual no está presente en la pieza prefabricada para evitar daños durante el transporte. El sistema entero tiene una $U=0,12 \text{ W/m}^2\text{K}$ y por ello cumple con el estándar Passivhaus. El uso de la madera contribuye a esta baja transmitancia térmica.

Otros aspectos que contribuyen al cumplimiento de los requerimientos anteriores son los paneles fotovoltaicos para el suministro de agua caliente, la ventilación con recuperación de calor, calefacción con aporte geotérmico y con una demanda de 14 kWh/m²a y las células fotovoltaicas para la electricidad del edificio (las cuales además aportan excedente a la red). No se debe olvidar, por otro lado, que el uso de la madera minimiza además los puentes térmicos puesto que su conductividad térmica es mucho menor que la de otros materiales.



Fig. 62 Fabricación de un panel de fachada (Tectónica online, 2013).

Este proyecto se erige como la posibilidad de un sistema no solo sostenible, sino económicamente viable. Se trata de hacer cálculos con miras al ciclo de

vida del edificio a largo plazo, teniendo en cuenta todas las fases: planificación, obtención de recursos, transporte, realización, uso y reciclaje (al final del ciclo de vida). No es de extrañar además, que la localización sea en esta zona de Austria, donde la tradición en madera es destacable. De este modo, se hace posible una fabricación regional y se minimizan los costes de transporte así como la contaminación que conlleva este. Este sistema está pensado, sin embargo, para el mercado internacional. Esto significa que, a pesar de su buen funcionamiento en esta localización, cabría preguntarse si funcionaría en otros contextos o tendría que sufrir modificaciones significativas.

4.1.3. Evolución del sistema y réplica

LifeCycle Tower Project

Como se ha nombrado, el LiveCycle Tower One, no es otra cosa que un prototipo tras un estudio exhaustivo de las posibilidades de este sistema. El estudio llega a hablar de un edificio de hasta 20 plantas. El cual ahorraría 9493 toneladas de CO2 comparándolo con otro equivalente realizado con hormigón armado, es decir, casi el 90%.



fig. 63 (www.inhabitat.com)



fig. 64 (Architekten Hermann Kaufmann ZT GmbH, 2016)

El sistema es muy similar al prototipo construido LCT One. La luz de los paneles híbridos es de 9,45m y estos están compuestos por vigas laminadas de sección 18x36cm y una capa de 18 cm de hormigón.

El estudio de los requisitos contra incendio sigue las normas austríacas, aunque el objetivo es seguir trabajando en ello y conseguir que se adapte a otros escenarios como Alemania o Suiza. Las ideas base para la seguridad ante incendio son: un núcleo de madera masiva encapsulada de materiales no combustibles y resistentes al fuego 90 minutos, suelos con paneles híbridos madera-hormigón y columnas de madera laminada solo expuestas hacia el interior. Se busca garantizar la misma seguridad antiincendio que la que existiría si el edificio estuviera construido con materiales no combustibles. Otras medidas compensatorias serían: la existencia de rociadores de incendio, detectores de humo y disminución de la supeficie de los sectores de incendio.

GENERAL	
Proyecto	LifeCycle Tower
Localización	Cualquiera
Tipo de proyecto	Edificio de oficinas/Residencial/Hotel
Arquitecto	Hermann Kaufmann
Certificación	Passivhaus

GEOMETRÍA	
Número de plantas	20
Altura total	76m
Superficie por planta	950m ²

DATOS TÉCNICOS	
Sistema constructivo	Por paneles
Estructura	Híbrida. Madera-hormigón
Podio de hormigón	No
Núcleo de comunicacione	plantas 1-2: hormigón; plantas2-20: madera
Estructura vista	Solo al interior



Fig. 65 (Zangerl, Kaufmann, & C.Hein, 2010).

Brook Commons. University of British Columbia.

GENERAL

Proyecto	Brook Commons
Localización	Vancouver, Canadá
Tipo de proyecto	Público. Residencia de estudiantes
Arquitectos	Acton Ostry Architects Inc.
Asesor	Hermann Kaufmann
Certificación	LEED

GEOMETRÍA

Número de plantas	17
Altura total	53m
Superficie por planta	

DATOS TÉCNICOS

Sistema constructivo	Esqueleto
Estructura	Híbrida. Madera-acero
Podio de hormigón	Si. Una planta
Núcleo	Hormigón
Estructura vista	Solo última planta

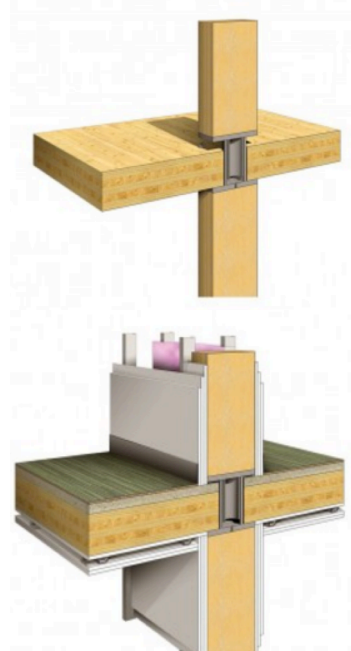


Fig. 71-72.(www.actonstry.ca)

La residencia de estudiantes *Brook Commons* en la universidad de *British Columbia* de Vancouver será, cuando se termine en 2017, el edificio de estructura de madera más alto del mundo. Si bien esta vez no es diseñado directamente por Hermann Kaufmann, arquitecto líder en el proyecto LiveCycle Tower, tiene una clara influencia como asesor. Esto hace que el sistema constructivo sea similar al utilizado en el LTC One y que suponga una posibilidad de internacionalizar el sistema, adaptándolo en este caso a las necesidades y requerimientos canadienses. No se trata de paneles híbridos, sino de paneles CLT que posteriormente se encapsularán. Es una estructura de esqueleto, pero el encaje entre los paneles CLT de suelos con los elementos estructurales, tiene influencia del sistema del LTC One. Así como también los paneles de fachada prefabricados.



fig. 66-70 (www.actonstry.ca)

Puesto que la normativa prohíbe realizar edificios de más de 6 plantas con estructura de madera, este edificio es una excepción. En compensación, fue necesario tomar medidas muy estrictas contra incendios. Toda la estructura debe estar encapsulada, solo existe estructura vista en el último piso, en una sala común y a modo de demostración.

4.2.Treet Tower



fig 73 (Trifkovic, 2015).

Este edificio de 14 plantas será, a su finalización a finales de este año, el edificio de estructura de madera más alto del mundo. Se trata de un conjunto de 62 apartamentos, incluyendo un gimnasio común y una terraza con impresionantes vistas en la azotea del edificio. Previo al proyecto se realizó entre 2007 y 2008 un estudio de viabilidad para edificios en madera de gran altura por el Instituto Noruego de Tecnología de la madera (Trifkovic, 2015). Se encuentra en una zona urbana de Bergen, en la orilla del fiordo *Puddefiorden* y al lado de un puente con importante circulación de vehículos, al cual supera en altura.

GENERAL

Proyecto	Verdens Høyeste Trehus
Localización	Bergen, Noruega
Tipo de proyecto	Privado. Viviendas
Arquitectos	Artec
Comienzo de obra	2014
Finalización de obra	2016
Certificación	Passivhaus

GEOMETRÍA

Número de plantas	14
Altura desde entrada	49,4m
Altura desde muelle	52,8m
Superficie neta por planta	5830 m ²



Fig. 74-76 (Trifkovic, 2015)

COSTES

Coste total mill. euros

Madera CLT utilizada 385m³

Madera laminada utilizada 550m³

EQUIPO INTERDISCIPLINAR

Arquitectos ARTEC

Paisajistas Smedsvig

Constructor BOB

Promotor CREE GmbH

Soporte técnico fuego Skansen
Consult AS

Construcción en madera Moelven

Construcción de módulos Kodumaja

Equipo de ingenieros Sweco, NTNU

El estudio dio como resultado un sistema modular de apartamentos combinado con vigas laminadas de madera. Al igual que en los proyectos comentados con anterioridad, el desarrollo del proceso se llevó a cabo por un equipo multidisciplinar.

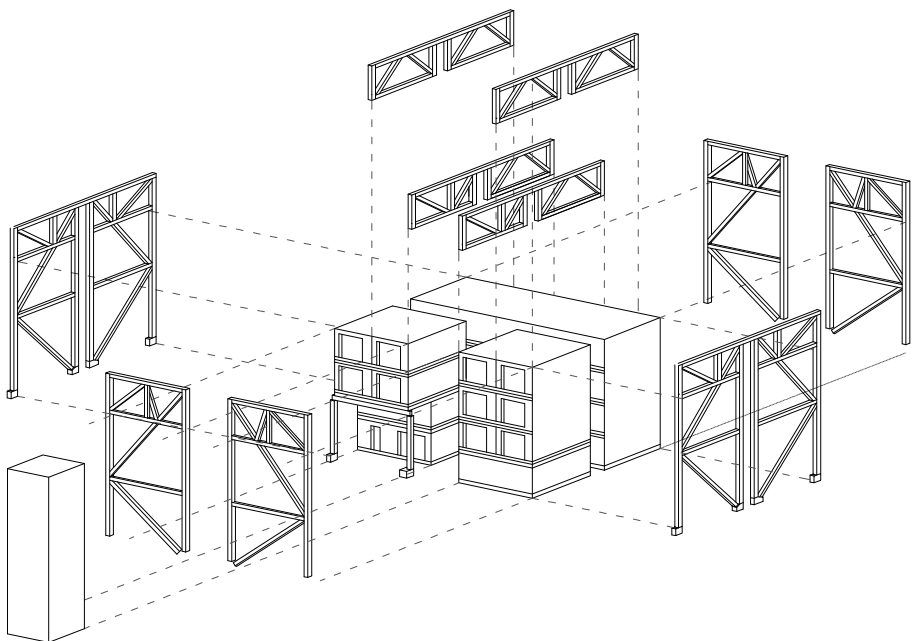
Se trata de un sistema pensado para ser replicable e incluso para alcanzar los 30 pisos de altura. La idea base es la construcción es una alta prefabricación, a base de módulos completos de habitación, con todo incluido. Sin embargo, el apilamiento de módulos hasta la altura deseada para el proyecto no era posible sin una estructura que les diera rigidez. Esta estructura estará inspirada en las estructuras trianguladas de los puentes de madera, trasladadas al plano vertical (Snølys.no, 2015). Las claves de este proyecto son: **el módulo, la precisión y la calidad.**



Fig. 77-79 (Trifkovic, 2015) (www.kodumaja.ee)

Como en el caso de el *LCT One*, el edificio *Treet* es un nuevo modo de entender un tipo de construcción que suele usarse para reducir costes. La vivienda transportable colonial americana se eleva para ser un rascacielos de una gran calidad y precisión. El sistema modular en rascacielos es un tema de actualidad, pero el éxito de este proyecto es haberlo conseguido con un material tan sostenible como la madera.

① Módulos plantas 1-4 + Estructura



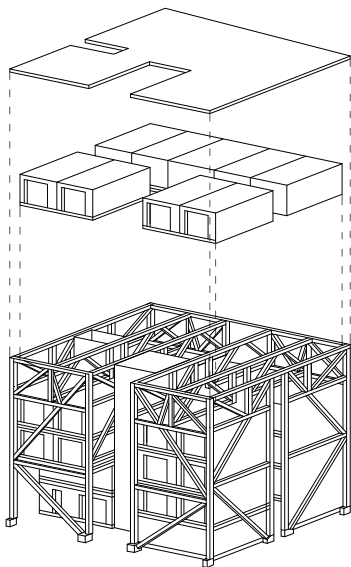
DATOS TÉCNICOS

Sistema constructivo	Modular+ Equeleto reforzado
Estructura	Híbrida. Madera- hormigón
Podio de hormigón	No
Núcleo de comunicaciones	CLT
Estructura vista	Solo en dos caras

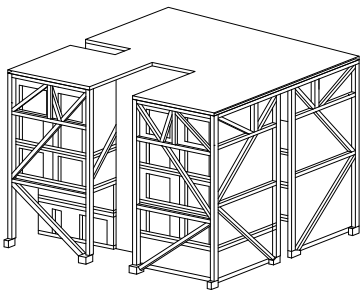
NORMATIVA

Cálculo estructura	Eurocódigo 5
Protección en caso de incendio	TEK 10
Clasificación de materiales	EN 13501

② Power storey



③ Plantas 1-5



REQUISITOS

En caso de incendio:	
Estructura principal	R90
Estructura secundaria	R60
Vías de escape	R90
Compartimentación entre sectores de incendio	R90
Máxima altura de evacuación	no hay
Tipo de material:	
Estructura	no existe requisito
Vías de escape	no existe requisito
Compartimentación entre sectores de incendio	no existe requisito
Número máximo de plantas en estructura de madera	no existe

Fig. 79.80 .Elaboración propia.

MEDIDAS COMPENSATORIAS

③ Plantas 1-10

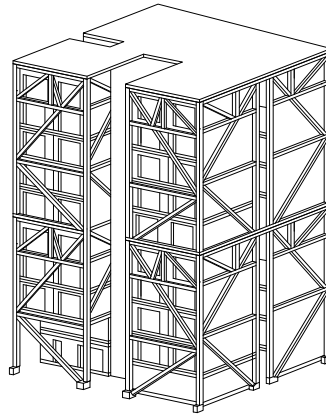
Sistema de **rociadores de incendio**
(*sprinkler*).

Sistema de **detectores de incendio**

Fachada cumple **B-s3, d0**

Aislamiento **A2-s1, d0**

Escaleras presurizadas



③ . Plantas 1-14 + Fachadas +Cubierta

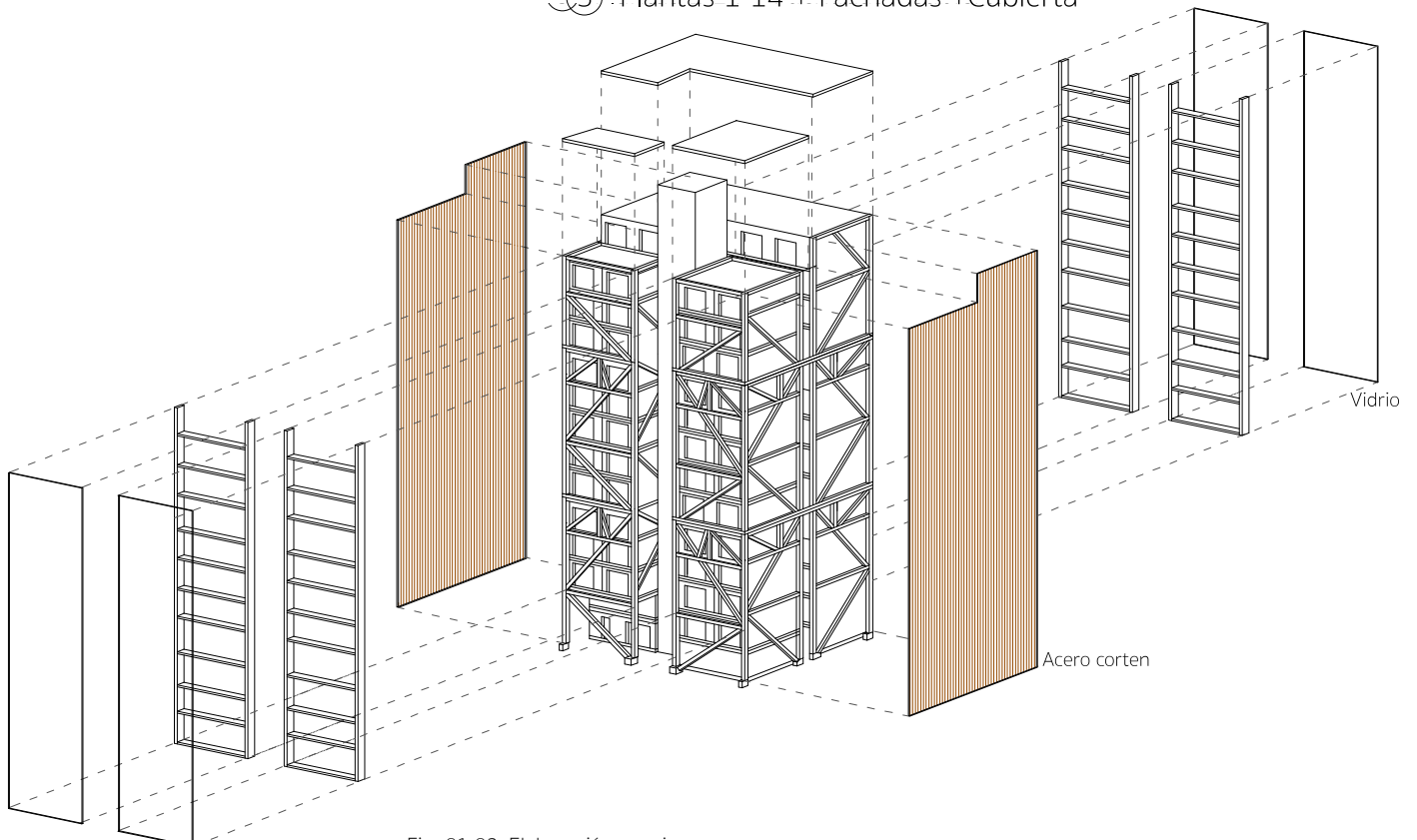


Fig. 81-82 .Elaboración propia.

4.2.2. Aportaciones del modelo

Madera laminada (*glulam*) y contralaminada (CLT)

Para la estructura principal se usa madera laminada de fuerza GL30c y GL30h, según la norma EN 14080. La madera contralaminada, o CLT, no forma parte de la estructura principal ni le aporta rigidez pero se usa para las comunicaciones del edificio. La razón del uso de CLT, además de por su gran resistencia, es su buen comportamiento ante incendio. La normativa Noruega de protección contra el fuego (véase apartado 3.3.5) es más flexible que la de otros países como Austria, está abierta a soluciones alternativas siempre que puedan ser documentadas. De este modo, en vez de encontrar un sistema complejo que cumpla la normativa, aquí se busca una estrategia razonable de protección contra el fuego pudiendo usar la madera en todos los elementos del proyecto. Esta estrategia contra el fuego debe justificarse como adecuada y ser aprobada legalmente. La estrategia del Treet fue aprobada en febrero de 2013 (Abrahamsen & Malo, 2014).



En este caso, ya que el interés es el mayor uso de madera posible, la propuesta pasa por utilizar materiales de madera que tengan buen comportamiento ante el fuego, como es el caso de la construcción masiva con CLT y madera laminada. La madera laminada de la estructura tiene una resistencia al fuego de R90 y la CLT de las comunicaciones del edificio, R60. La existencia de rociadores de incendio (*sprinkler*), la pintura resistente al fuego en la superficie de los elementos CLT y la resistencia R90 de los propios módulos de vivienda, hace que esta estrategia sea suficientemente segura.



Fig. 83-84 Fotos de la obra (bygg.no, 2014)

Rigidez de la estructura portante

Puesto que la construcción modular tiene un límite en altura, y se hace necesaria una estructura portante, es de máxima importancia el diseño de esta y la compatibilidad con los módulos de vivienda.

El cálculo de la estructura se hizo según el Eurocódigo 5 y los anexos nacionales cuenta. La fuerza más importante en el cálculo fue el viento, por ser la más desfavorable. La estructura debía ser suficientemente rígida como para que no existiera movimiento en las plantas superiores que fuera incómodo para los habitantes. Puesto que se optó por una estructura ligera, el análisis dinámico era de vital importancia y fue realizado por la NTNU (Norwegian University of Science and Technology).

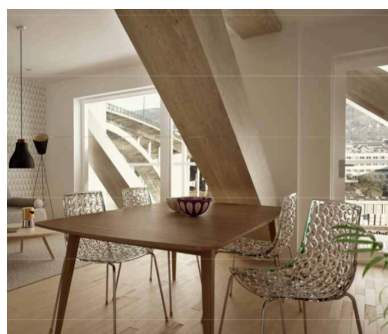


Fig. 85 Interior de módulo en *power storey* (Abrahamsen, 2014).

La idea para que la estructura pudiera crecer en altura fue la sectorización estructural, utilizando losas intermedias de hormigón para dar rigidez. En otros casos se ha visto que el hormigón se usa para sectorizar en caso de incendio, sin embargo, en este caso su misión es aportar peso a la estructura y con ello mejorar el comportamiento dinámico. El sistema es el siguiente: los niveles de 1

a 4 se apoyan sobre el forjado de hormigón del garaje, apilándose así los módulos hasta un máximo de 4 sin estar conectados con la estructura portante. El nivel 5 es llamado *power storey*. Es un nivel en el que la estructura se rigidiza en horizontal de modo que las vigas se introducen en el interior de la vivienda [fig 85] y son necesarios módulos especiales, los cuales si están conectados con la estructura y aportan rigidez. Justo encima de los módulos de este piso colocan varias losas de hormigón prefabricado formando una superficie unificada y acabando así el primer sector estructural. El sistema se repite de los niveles 6 a 9, siendo el 10 el siguiente *power Storey*. Por último se encuentra el grupo de módulos de los niveles 11 a 14, terminándose el edificio con una losa de hormigón.

Como se ha comentado, ya que la normativa noruega es más flexible y permite la madera vista, es necesario calcular la estructura para que resista en caso de incendio. Esto se hace en este caso mediante el sistema de sección reducida del Eurocódigo. Como resultado la estructura debe sobredimensionarse dando lugar a secciones típicas de columnas de 405x650mm o 495x495mm y secciones típicas diagonales de 405x405mm.

Conexiones entre elementos

Las conexiones entre las vigas estructurales son especialmente importantes dado su gran tamaño. Estas conexiones están inspiradas, al igual que la estructura, en las utilizadas en puentes de gran tamaño. Las placas metálicas están a una profundidad suficiente para que el fuego no las alcance en caso de incendio y no se comprometa la estabilidad de la estructura.

No menos importantes son las uniones entre módulo-módulo y estructura-módulo. Por su comportamiento estructural diferente se decide, tras los resultados de los análisis estructurales, no conectar los módulos con la estructura. Entre el módulo y las vigas portantes existe una distancia de 34mm (Abrahamsen & Malo, 2014) para cumplir tolerancias y que el movimiento de un elemento no afecte al otro. También existe una cierta distancia entre los módulos apilados [fig. 88]. Los posibles huecos a la vista resultantes de estas tolerancias se rellenan con juntas resistentes al fuego para evitar propagaciones.

Modularidad y sostenibilidad

Igual que en los casos anteriores, la idea base es construir de manera mas sostenible. Esta idea existe antes de realizar el diseño del edificio y por ello, éste debe responder desde el principio a las ideas de modularidad y uso de la madera, resultados del estudio previo. Así pues el uso de la madera es una decisión previa en busca de un menor coste energético. La empresa de ingeniería noruega Sweco reconoce que el coste de este edificio es mayor que otro de acero o hormigón, pero el tiempo de construcción es menor y también

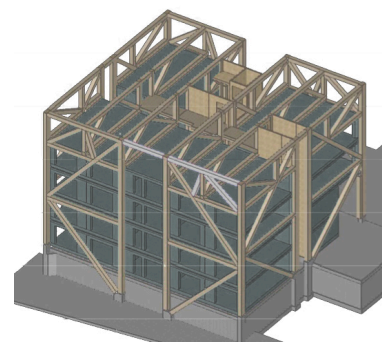


Fig. 86 Estructura del *power Storey* (Abrahamsen, 2014)

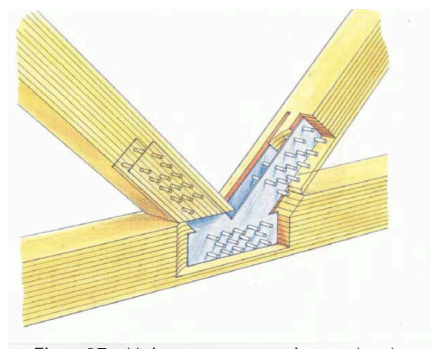


Fig. 87 Uniones entre vigas de la estructura principal (Abrahamsen, 2014).

lo es la huella de carbono (Abrahamsen, 2014). No hay que olvidar por otro lado, la sensibilidad ante la madera que existe en los países del norte, haciendo que los proyectos realizados con este material sean atractivos.

Otra de las razones importantes es la facilidad de trabajo en el taller. Por tratarse de una estructura compleja, la precisión es de vital importancia.

Puede aparecer además la pregunta, ¿por qué modular?. La respuestas pueden ser varias. La construcción mediante módulos de vivienda da libertad para lograr diseños atractivos y variados. Además en el aspecto económico, se reducen los tiempos de montaje en obra y el control de la calidad y la precisión es muy alto. No solo se reduce el tiempo de montaje sino también el de incorporación de las instalaciones. Y como se ha nombrado anteriormente, menor tiempo es igual a menor impacto ecológico y menos contratiempos.

Los módulos fabricados por la empresa Kodumaja tienen todas las instalaciones incluidas (*sprinkler*, electricidad, tuberías de agua, televisión...), de este modo solo hay que realizar las de los espacios comunes y finalmente conectarlas con el suministro general. También el acabado interior de los módulos esta realizado en taller. Poseen también certificación *SINTEF*, la cual tiene una gran importancia en noruega, y por ello cumplen unas altas expectativas técnicas.

La decisión de realizar estos módulos en madera, si bien es una de las decisiones base del proyecto, es también una ventaja. El buen comportamiento térmico de la madera hace que el estándar *Passivhaus* sea fácilmente alcanzable y simplifica el transporte debido a la ligereza, en comparación con módulos realizados con otros materiales como el hormigón o el acero. Su envolvente e instalaciones integradas son especialmente importantes para el estándar *Passivhaus*.

Las especificaciones técnicas incluyen cálculos precisos de acústica y en caso de incendio, los cuales aseguran la confortabilidad en la vivienda. Además la protección acústica es doble entre viviendas, pues siempre existirá el elemento pared de la vivienda, más el elemento pared de la vivienda contigua.

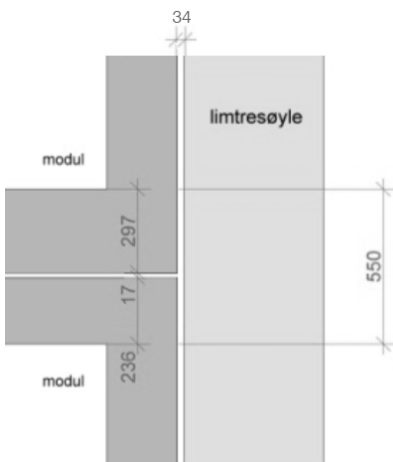


Fig. 88 Tolerancias entre módulos y estructura portante (Trifkovic, 2015).



Fig. 89 Imágenes (www.kodumaja.ee).



Fig. 90-91 (Trifkovic, 2015)

4.2.3. Evolución del sistema y réplica

Barents House

Tras el estudio de viabilidad y la construcción de la torre Treet en Bergen. La empresa de ingeniería *Sweco* y la empresa de madera aserrada *Moelven*, junto con otros colaboradores, vuelven a hacer un estudio para realizar esta vez un edificio de 20 plantas. Se mantiene la idea de estructura de esqueleto con refuerzos diagonales presente en el proyecto *Treet*. No obstante, lo modular se va a dejar de lado para centrarse en la propia estructura de madera. La iniciativa esta vez es de los arquitectos *Reiulf Ramstad Arkitekter AS*, los cuales ganaron el concurso de arquitectura presentado por la Secretaría de *Barents* de Noruega para un nuevo centro cultural en *Kirkenes*.



fig. 92 (Reiulf Ramstad Arkitekten, 2009)



fig.93 (Reiulf Ramstad Arkitekten, 2009)

Se trata de una malla de columnas de 6x6, las cuales tienen distintas secciones dependiendo de si están en esquina (700x700mm), en el perímetro (500x700mm) o en el interior (500x500mm). Las vigas y diagonales tienen secciones de 400x500mm y se unen a las columnas con placas de acero mediante conexiones innovadoras de gran resistencia. Sin embargo, el núcleo de comunicaciones está planteado en hormigón hasta el momento .

GENERAL	
Proyecto	Barentshus
Localización	Kirkenes,Noruega
Tipo de proyecto	Público. Centro cultural
Arquitectos	Reiulf Ramstad Arkitekten AS
Certificación	no otorgada

GEOMETRÍA	
Número de plantas	17
Altura total	¿

DATOS TÉCNICOS	
Sistema constructiv	Esqueleto reforzado con diagonales
Estructura	Madera
Podio de hormigón	No
Núcleo de comunicaciones	Hormigón
Estructura vista	Si

Se trata de un proyecto que se encuentra todavía en fase de desarrollo y no se ha comenzado su construcción. No existe ninguna referencia en aspectos tan importantes como son la protección en caso de incendio y la estabilidad de la estructura, por ello se está estudiando con cuidado las posibles soluciones para garantizar la seguridad. Son especialmente importantes los análisis estructurales que tienen en cuenta el viento, ya que es un factor muy importante, y los análisis del comportamiento ante el fuego de algunas uniones (Aarstad, 2011).

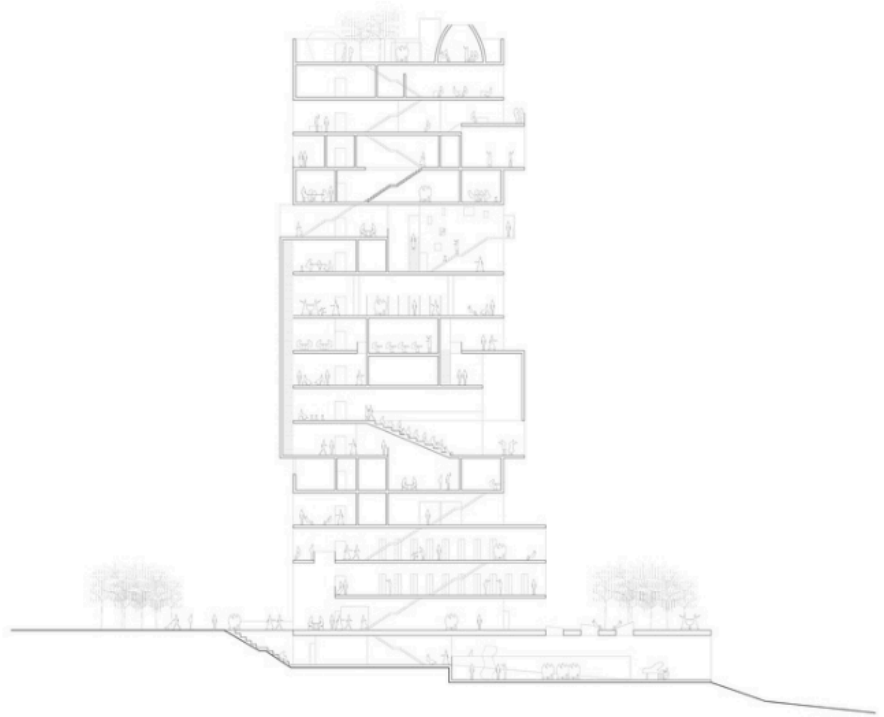


fig.94-96 (Reiulf Ramstad Arkitekten, 2009)

4.3. Wood Innovation and Design Centre



fig. 97 (Michael Green Architecture, 2016)

El edificio de la oficina de arquitectura puntera en construcción con madera, Michael Green Architecture, fue a su finalización el edificio más alto de estructura de madera de los Estados Unidos. El programa del edificio incluye un amplio espacio de entrada, aulas, un salón de actos de 75 plazas en la planta principal y otras facilidades para la investigación para el nuevo master *Engineering in Integrated Wood Design* de la *University of Northern BC*. De este modo las primeras plantas son utilizadas por la universidad y la parte superior del edificio tiene uso de oficinas. Se trata de un edificio de forma sobria y sencilla con el objetivo de que el propio material sea el que llame la atención.

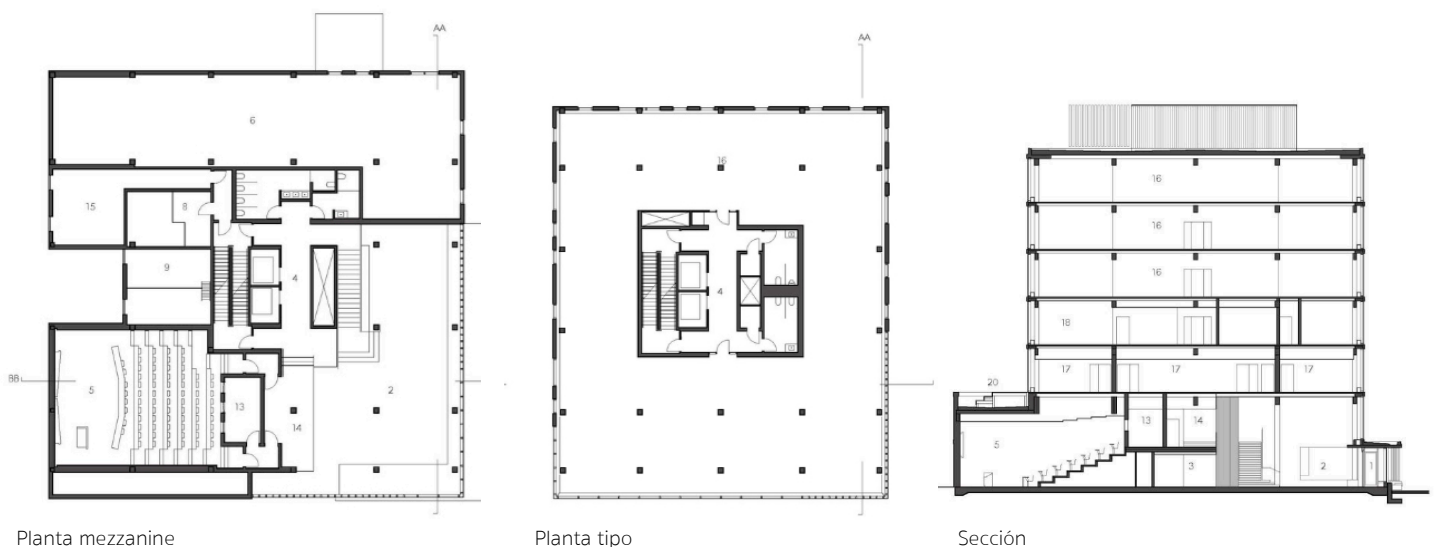
Su notable presencia en el centro de la ciudad ayuda a la revitalización de esta zona de Prince George (Canadian Wood Council, 2015).

GENERAL

Proyecto	Wood Innovation and Design Centre
Localización	Prince George, British Columbia, EEUU
Tipo de proyecto	Público. Oficinas/Educación
Arquitectos	Michael Green Architecture
Comienzo de obra	Agosto 2013
Finalización de obra	Agosto 2014
Certificación	LEED

GENERAL

Número de plantas	6 (más mezzanine)
Altura	30m
Superficie neta por planta	5830 m ²



Planta mezzanine

Planta tipo

Sección

Fig. 98-100 (Architect (Hanley Wood Media Inc), 2016)

COSTES

Coste total	25,1 mill. CAD
Madera CLT utilizada	3 83 paneles
Madera laminada utilizada	376 vigas y columnas

La localización del edificio en la ciudad de Prince George, en British Columbia, no es una decisión arbitraria. Esta provincia de Canadá es pionera en la implementación de la normativa para permitir edificios de mayor altura en estructura de madera.

A diferencia de los otros casos, se trata de un edificio de propiedad pública. Es desarrollado por el ministerio de Trabajo, Turismo y Formación en nombre del Gobierno de la provincia de British Columbia. Por tratarse de un edificio que va a albergar en su interior un centro universitario para la innovación y desarrollo del sector de la ingeniería en madera, este proyecto debía ser un edificio icónico que incorporara un diseño innovador y variedad de materiales y soluciones derivadas del material madera. Un equipo interdisciplinar, liderado por el arquitecto Michael Green, se hace necesario para el correcto desarrollo del proyecto. Tampoco es casualidad que sea Michael Green el diseñador del edificio, pues en 2012 ya publicó un estudio sobre la viabilidad de los rascacielos en madera con cálculos y diseños específicos. La clave de este proyecto es el uso de una **gran diversidad de materiales** derivados de la madera.

EQUIPO INTERDISCIPLINAR

Arquitectos	Michael Green Architecture
Paisajistas	Jay Lazzarin Landscape
Constructor	PCL Constructors West Coast Inc.
Promotor	CREE GmbH
Soporte técnico contra el fuego	CHM Fire Consultants Ltd.
Equipo de ingenieros	Equilibrium Consulting Inc., MMM Group Limited, RDH Building Engineering Ltd., Aercoustics Engineering Ltd.

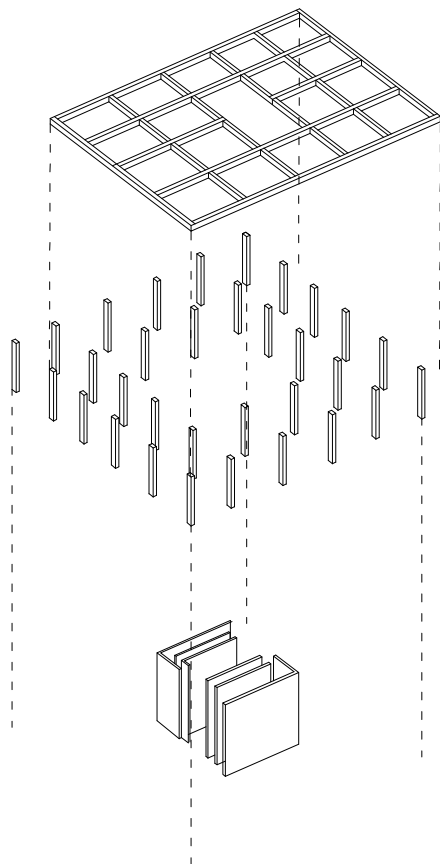


Fig. 101-104 (Michael Green Architecture, 2016)

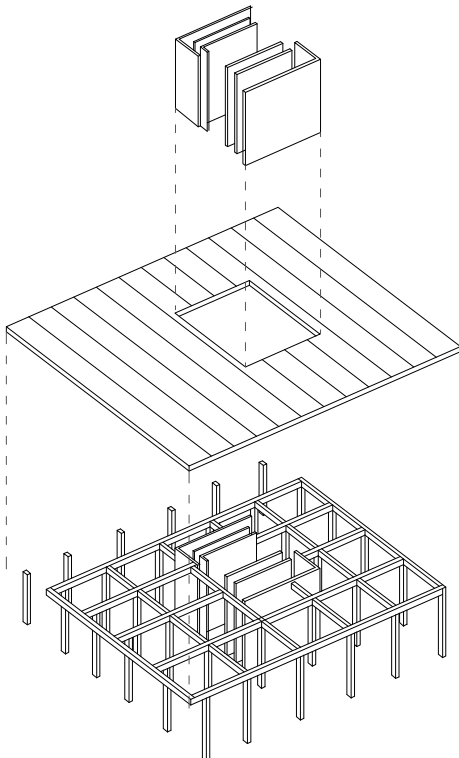
Se trata al final de un sistema *Ballon Frame* adaptado a la modernidad. Ni las columnas ni las vigas atraviesan los elementos con los que se encuentran. Sin embargo, las nuevas técnicas permiten tener secciones mayores y por lo tanto mayores luces, llegando a alcanzar el sistema de esqueleto heredado de la modernidad. La madera se convierte aquí en un material tan moderno y tecnológico como el hormigón o el acero.

4.3.1. Estudio del tipo

① Planta baja



② Forjado CLT



DATOS TÉCNICOS

Sistema constructivo	Equeleto
Estructura	Madera
Podio de hormigón	No
Núcleo de comunicaciones	CLT
Estructura vista	Si,Protegida

NORMATIVA

Cálculo estructura	British Columbia Building Code
Protección en caso de incendio	British Columbia Building Code
Protección acústica	British Columbia Building Code

REQUISITOS

En caso de incendio:

Estructura	R90
Vías de escape	R90
Compartimentación entre sectores de incendio	R90
Máxima altura de evacuación	la de un edificio de 4 plantas

Tipo de material:

Estructura	No combustible
Vías de escape	No combustible
Compartimentación entre sectores de incendio	No combustible
Número máximo de plantas en estructura de madera	4

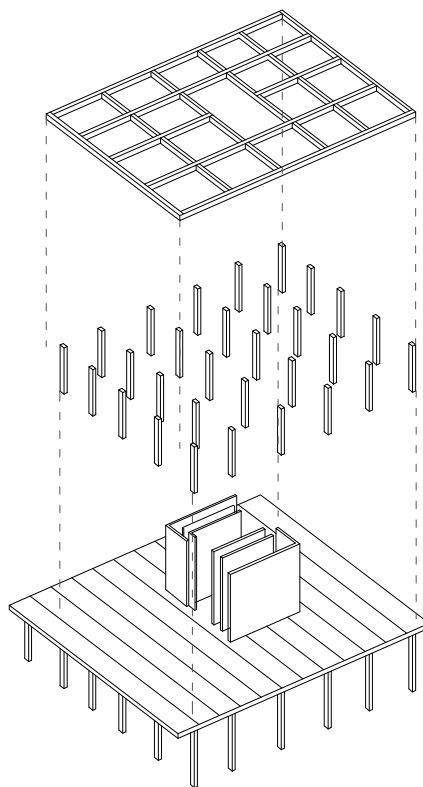
Fig. 105-106 .Elaboración propia.

INCUMPLIMIENTOS

Tipo de material:

Estructura	Combustible
Vías de escape	Combustible
Compartimentación entre sectores de incendio	Combustible
Número máximo de plantas en estructura de madera	6

③ Planta tipo



MEDIDAS COMPENSATORIAS

Sistema de **rociadores de incendio** (*sprinkler*).

Acceso desde el exterior para bomberos en cada nivel a menos de 25 m del nivel calle.

④ Cubierta + Fachadas

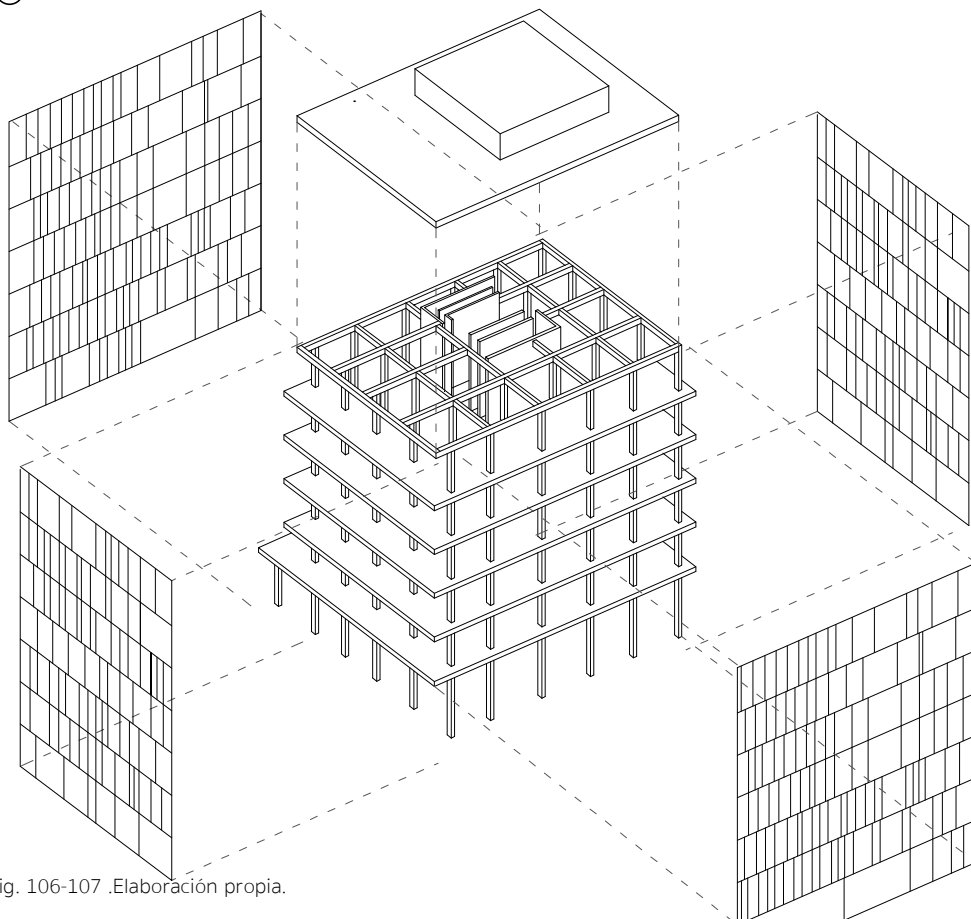


Fig. 106-107 .Elaboración propia.



Fig. 108. (Michael Green Architecture, 2016)

4.3.2. Aportaciones del modelo

CLT y *glulam*. Seguridad ante incendio

Antes de analizar cómo la madera contralaminada cumple con unos requisitos adecuados en caso de incendio, se debe tener en cuenta la normativa vigente y el hecho de que este edificio supone una excepción en ella.

El *Nacional Building Code* canadiense de 2010, el vigente cuando se realizó el proyecto, establece una distinción entre uso de los edificios y los materiales usados (véase apartado 3.3.3). La limitación en altura para edificios, tanto residenciales como no residenciales, era de 4 plantas. Sin embargo, como se ha nombrado anteriormente, la normativa regional de la provincia de British Columbia permite hasta 6 plantas para edificios residenciales. En este caso nos encontramos con un edificio público de modo que el límite sigue siendo 4 plantas. Debido al interés por superar este límite se realizó una normativa específica para este edificio (*Site-specific regulation*). El edificio debía cumplir con lo especificado en esta normativa y con los requisitos del *NBC* de los que no había sido eximido.



Fig. 109 Instalación de suelos CLT (Binational Softwood Lumber Council, 2015).



Fig. 110 Levantamiento núcleo de comunicaciones (Binational Softwood Lumber Council, 2015).



Fig. 111 Instalación de *sprinkler* (Canadian Wood Council, 2015).

La resistencia al fuego se calcula según el *Canadian CLT handbook*, el cual usa el método de la sección reducida para estimar la capacidad resistente restante en caso de incendio (Canadian Wood Council, 2015).

Este material es usado en los elementos donde la exigencia de resistencia con el fuego era alta, es decir en los suelos que separan las plantas [fig 109] y en el núcleo de 1h de resistencia contra el fuego en estos elementos y la madera contralaminada usada los cumplía sin necesitar protección adicional. Las superficies del núcleo de comunicación además, están tratadas para evitar la propagación de las llamas.

Por su lado, la madera laminada usada para vigas y columnas portantes, al igual que los suelos y paredes de CLT, cumple con el requisito de 1 hora de resistencia estructural en caso de incendio. Se puede decir que, al conocer cómo se comporta exactamente la madera en caso de incendio, la estructura puede ser sobredimensionada para garantizar esta la resistencia estructural en un periodo adecuado de tiempo. Además de estos requisitos, un sistema de rociadores (*sprinkler*) [fig 111] y de detectores de incendio se integra con las instalaciones.

Conexiones innovadoras

La primera conexión, y quizás la más importante, es la unión de la estructura con la cimentación. La cimentación del edificio está compuesta por una losa de hormigón (tal y como establece la norma). Dos elementos estructurales distintos han de anclarse a esta cimentación, los paneles de madera contralaminada que

forman el núcleo y las columnas de madera laminada que forman la estructura de esqueleto. Ambas se realizan con elementos de acero, siendo la conexión columna-losa la más destacable. Un elemento de acero es embebido en el hormigón y una placa de acero que encajará en este elemento es insertada en la base de la columna. Además se decide no terminar la columna a ras de suelo sino dejar una distancia evitando la junta. Esto da un aspecto aún más ligero a la estructura.

La siguiente conexión importante que determina el éxito del sistema es la conexión columna-viga-columna. Como ya se ha mencionado, ninguno de estos elementos atraviesa a otro de modo que es importante realizar una conexión lo suficientemente rígida que permita garantizar la estabilidad. La razón de que las vigas no atraviesen la columna es poder conseguir una conexión bisagra y que la madera funcione mejor estructuralmente. La resolución inteligente de este tipo de conexiones es posibilitada por la avanzada tecnología existente hoy en día y es clave para el éxito de la construcción de edificios en altura con este sistema.



Fig. 112 Conexión columna-cimientos (Michael Green Architecture, 2016) .

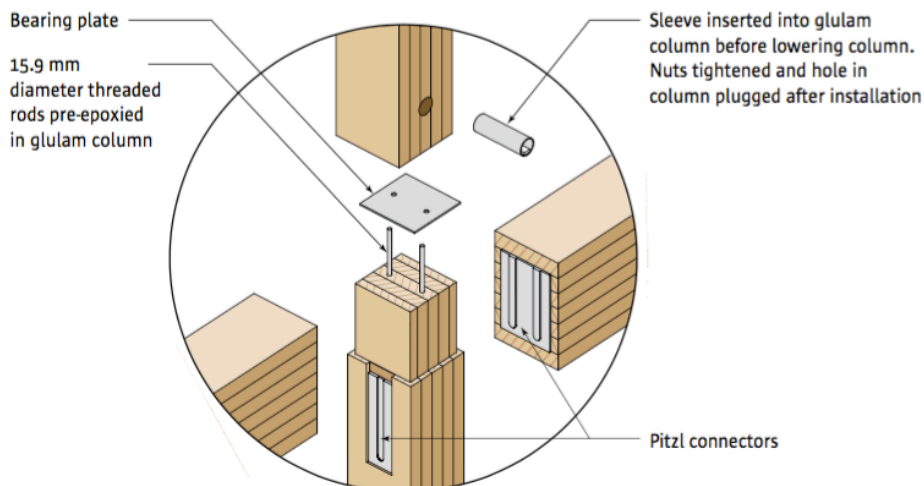


fig 113. Conexión columna-viga-columna (Canadian Wood Council, 2015).

Aspectos sostenibles

En este proyecto, además del interés ecológico, existe un interés icónico. Se busca demostrar las posibilidades del mercado de la madera en la zona. El edificio busca reunir en su interior a la Universidad, al sector de la madera y a otros agentes relacionados, con el objetivo de potenciar el uso de este material. En el edificio se usan multitud de maderas diferentes: abeto de Douglas, cedro rojo del oeste, cicuta, pino y abeto. Y también, distintos materiales derivados como son la madera contralaminada (CLT), madera laminada (*glulam*), chapa de madera laminada (LVL) y madera de filamento paralelo (PSL), así como los paneles de cedro rojo del cerramiento (Michael Green Architecture, 2016).



Fig. 114 (www.usgbc.org) .

Por otro lado, el aspecto sostenible es el que hace que este impulso a la industria maderera sea interesante y viable. El proyecto posee el estándar de calidad sostenible LEED Gold y es uno de los primeros edificios de Norteamérica con una declaración medioambiental o EBD (*Environmental Building Declaration*). Esto implica que se ha hecho un estudio del ciclo de vida el edificio y se han estudiado los efectos de los materiales y energía utilizados, en un periodo de 50 años (Canadian Wood Council, 2015). El efecto de los materiales es mínimo, puesto que casi el 100 % del edificio es madera y ésta tiene un impacto mínimo en el medio.

El sistema de certificación LEED es más dinámico que otros como el Passivhaus europeo. Existen una serie de indicadores generales, con ciertos requisitos cada uno. Por cada requisito cumplido se obtiene un punto, siendo el total de 69. La certificación Gold la obtiene aquel edificio con 39-51 puntos, siendo los indicadores generales los siguientes: localización sostenible, eficiencia en el suministro de agua, energía y atmósfera, materiales y recursos, calidad el ambiente interior e innovación y diseño. El uso de la madera es decisivo para cumplir algunos de los requisitos, dentro de cada indicador, como por ejemplo, reducir las molestias en el entorno (debido a la disminución del tiempo de obra), reducción de la contaminación, optimización del uso de la energía, reciclaje o reutilización de los materiales una vez terminada la vida útil, utilización de materiales renovables, confort térmico e innovación en diseño.

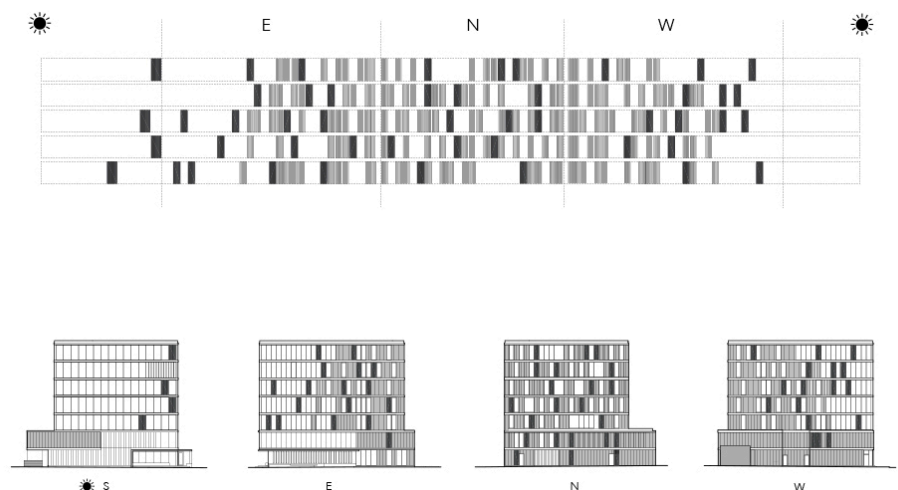


Fig 115 Estudio de orientaciones (Michael Green Architecture, 2016)

La envolvente del edificio, compuesta por una fachada de vidrio de triple acristalamiento y paneles de cedro, responde a un diseño energético. Los paneles de cedro están colocados según interés dependiendo de la orientación y creando una fachada atractiva [fig 39]. Además están aislados y su superficie tratada para el fuego.

La cubierta del edificio se realiza también en madera, utilizando el mismo forjado CLT que en el resto de plantas. Sin embargo, en este caso es necesaria protección contra la lluvia mediante una membrana bituminosa y el aislamiento térmico. El sistema de cubierta es un sistema convencional con la diferencia de que se deja un hueco sobre los paneles CLT para facilitar el secado en caso de que hubiera una fuga en la membrana bituminosa.

4.3.3. Evolución del sistema y réplica

The case for Tall Wood Buildings

GENERAL

Proyecto	The case for Tall Wood Buildings
Localización	Vancouver
Tipo de proyecto	Estudio de viabilidad
Arquitectos	Michael Green Architecture
Certificación	no especificada

GEOMETRÍA

Número de plantas	12-30
Altura total	¿
Superficie por planta	¿

El *Wood Innovation and Design Centre* no es sino el comienzo de la construcción en madera en zona urbana en Canadá. Se trata de una prueba, de demostrar que es posible, ya que sin embargo, los estudios e investigación le llevan mucha ventaja a la realidad. En 2012, Michael Green de *Michael Green Architecture* (MGA) y Erik Karsh de *Equilibrium Consulting* publican un estudio de viabilidad para edificación de hasta 30 plantas con estructura de madera. En este estudio desarrollan un concepto de diseño que llaman FFTT (*Finding the Forest Through the Trees*) y que detallan a través de diversos ejemplos concretos, con soluciones específicas y desarrolladas hasta un nivel de detalle muy alto.



fig 116. Diseño rascacielos, ejemplo de más de 20 plantas.

DATOS TÉCNICOS

Sistemas constructivo	Esqueleto, reforzado con paredes portantes interiores o exteriores
Estructura	Madera
Podio de hormigón	No
Núcleo de comunicaciones	CLT
Estructura vista	Si

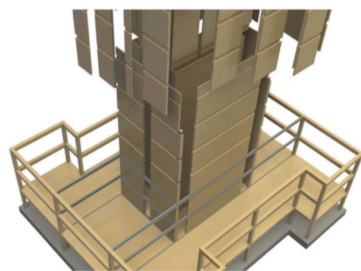


Fig. 117 (Green, 2012)

Los resultados del análisis muestran que una estructura de esqueleto, similar a la que aparece en el WIDC, sería posible hasta una altura de 12 pisos sin necesidad de una estructura de paredes portantes auxiliar. De los 12 a los 20 existirían dos opciones. La primera sería, además de la estructura de pilares y el núcleo, realizar paredes estructurales interiores con madera contralaminada y cierto apoyo de elementos de acero. La segunda sería, manteniendo solo el núcleo, añadir una estructura exterior de paredes estructurales. Esta última

opción sería la utilizada para realizar hasta 30 plantas, o bien en vez de la estructura exterior, otra de paredes portantes interiores, además del núcleo.

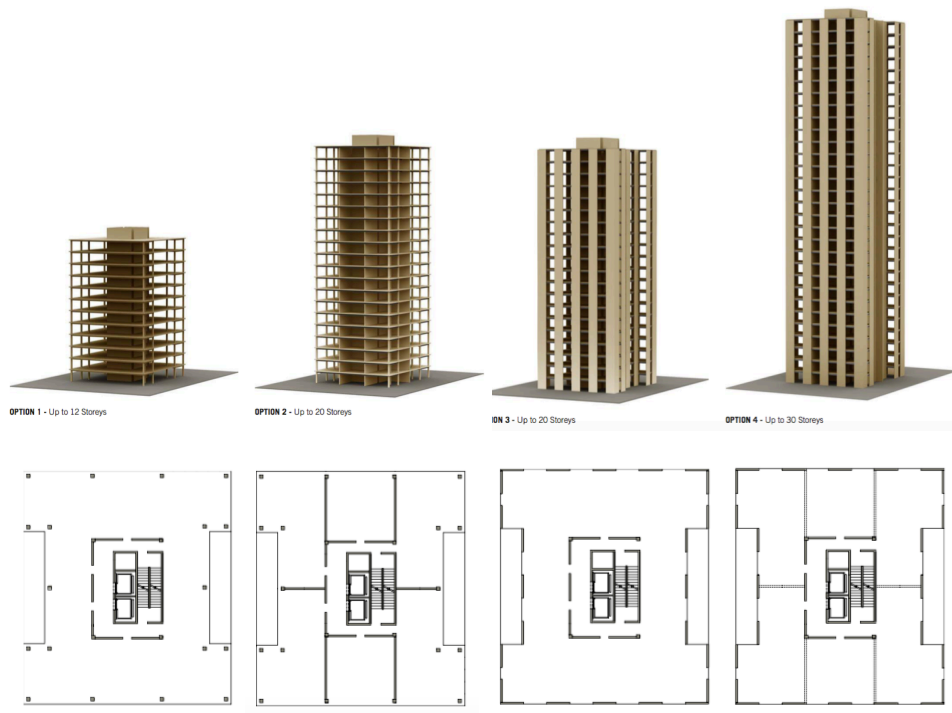


fig 118-119. Casos de estudio desde 12 hasta 30 plantas (Green, 2012).

No solo se tiene en cuenta el diseño estructural y arquitectónico, sino también las complicaciones en caso de incendio y el comportamiento acústico, ya que se estudia el caso residencial. El mayor reto es la protección contra incendio. Por ello se analizan los requerimientos de la norma, los cuales hoy por hoy imposibilitan la construcción de edificios tan altos con material combustible. Sin embargo, lo que se busca es cumplir el resto de requerimientos, para dar con una construcción que posea las mismas garantías de seguridad que una realizada con materiales no combustibles. Entre estos requisitos está la resistencia al fuego de 2 horas de todos los elementos estructurales, el uso de rociadores de incendio, ascensor antiincendio, generador de energía de emergencia...

GENERAL

Proyecto	The office building of the future
Localización	Vancouver
Tipo de proyecto	Privado. Oficinas
Arquitectos	CEI Architecture
Certificación	no especificada

GEOMETRÍA

Número de plantas	40
Altura total	¿
Superficie por planta	¿

La oficina de arquitectura *Michael Green Architecture* no es la única potenciando la construcción en madera. En la primavera de 2013 el departamento *Natural Resources Canadá* (NRC) del gobierno canadiense, en colaboración con *the Canadian Wood Council* (CWC), lanzaron la iniciativa *Tall Wood Building Demonstration*. El interés era explorar las posibilidades de la industria de la madera de Canadá para construcciones de más de 10 plantas. Fueron recibidas 8 propuestas y de ellas 3 se están estudiando de manera más profunda y se invertirán un total de 5 millones para apoyar estos proyectos. Uno ejemplo de propuesta es la realizada por los arquitectos del equipo *CEI Architecture*.



Fig 120. Concepto de rascacielos de madera de 30 plantas. NAIOP Office Building of the Future Design Competition (CEI Architecture, 2016).

DATOS TÉCNICOS

Sistemas constructivo	Vigas celosía
Estructura	Madera
Podio de hormigón	No
Núcleo de comunicaciones	Madera
Estructura vista	Si

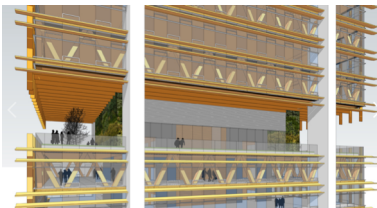


Fig. 122 (CEI Architecture, 2016)



Fig 121. Concepto de rascacielos de madera de 30 plantas. NAIOP Office Building of the Future Design Competition.

5. Conclusiones

Como resultado del análisis, primero de la madera como material tradicional, y segundo como material moderno, se han encontrado dos puntos de inflexión: la revolución industrial y la aparición de la normativa medioambiental.

La modernidad y la revolución industrial pudieron suponer un gran avance para la construcción en madera, pues las propiedades de ésta la hacen óptima para procesos de taller e industria, pero esto no fue así. El comportamiento ante el fuego y su ligereza, en un contexto donde la guerra estaba todavía presente y la economía estaba en auge, fueron algunas de las razones que provocaron que la sociedad eligiera como materiales favoritos otros menos ligeros como el hormigón y el acero. Hasta entonces la madera había sido utilizada para prácticamente todo, si bien como material tradicional, y sin embargo, su gran potencialidad como material moderno se vio frustrada y su uso pasó un segundo plano.

Se ha comprobado que en la actualidad los intereses han cambiado, y la preocupación por el medio ambiente ha pasado a tener un papel protagonista. El continuo desarrollo de normativa al respecto hace que sea necesario un cambio en la manera de construir, y que la innovación con madera, si bien no la única, sea una buena elección. Se ha constatado que los prejuicios existentes ante la utilización de este material van desapareciendo poco a poco, y que los retos son cada vez mayores. La madera sigue ardiendo y sigue siendo ligera, pero poco a poco se va abriendo camino en la ciudad, demostrando que tiene muchas posibilidades. No obstante, la normativa sigue haciendo difícil este camino, puesto que existe un gran desconocimiento o grandes restricciones. Lo interesante del estudio global realizado, son los diferentes enfoques a la hora de realizar las normas que rigen la construcción, los cuales determinan la velocidad del desarrollo.

El estudio de los casos concretos pone de manifiesto las posibilidades técnicas y la aplicación exitosa de los nuevos productos desarrollados para la construcción en altura, como la madera laminada y contralaminada, así como los productos prefabricados e híbridos. Este éxito pasa, en todos los casos, por ciertos incumplimientos de la norma, los cuales son aceptados tras un minucioso análisis de la viabilidad del proyecto y de la seguridad en caso de incendio. Por otro lado, la tendencia hacia lo prefabricado y hacia la disminución del tiempo en obra, son evidentes. Ante una complejidad en la obra cada vez mayor, se busca trasladar esas dificultades a la precisión del taller, minimizando los problemas y costes, tanto económicos como ecológicos.

En conclusión, la construcción urbana con madera ha demostrado estar en un momento de desarrollo y responder a las inquietudes de la sociedad. En lugares donde los enfoques son menos restrictivos, la construcción en madera ha crecido mas alto, como son el ejemplo de Noruega o Gran Bretaña. Noruega entra dentro del grupo de países productores de madera pero Gran Bretaña es un país importador. El caso de Gran Bretaña demuestra que no solo los países productores de madera están interesados en esta industria. La política sostenible existente es la que ha generado este interés. En este sentido España, con una normativa menos restrictiva que otros países, tiene la oportunidad de desarrollar estas técnicas y proponer soluciones innovadoras.

Otras posibles vías de investigación podrían ser, la revisión de la normativa y la importancia de la implicación de las escuelas de arquitectura. La complejidad actual hace que sea necesaria una mayor flexibilidad en la norma. Cada país es responsable de su propia normativa, y esta es la que facilita o dificulta el desarrollo en algunos aspectos. En esta línea, es interesante como los países del norte avanzan hacia normativas menos prescriptivas y más experimentales, posibilitando un avance más rápido. Por otro lado, el estudio de las estructuras de madera en las universidades es un tema de importancia puesto que hace que el desconocimiento sobre este material desaparezca. En España escuelas como las de A Coruña o Navarra comienzan a introducir Cátedras Madera en sus planes de estudio.

Por último, podemos concluir que la madera se ha convertido en un material tecnológico y moderno, apto para cualquier clase de diseño de alta calidad, tanto plástica como técnica. Esto abre un camino de reflexión sobre la manera en la que construimos y nuevas posibilidades que ayudan a recuperar el equilibrio entre el ser humano y el entorno.

Bibliografía

Architect (Hanley Wood Media Inc). (2016). *Architect*. Retrieved Septiembre de 2016 from <http://www.architectmagazine.com/>

Aarstad, J. (2011). Mulighetsstudie av verdens høyeste trehus . *Treteknisk* .

Abrahamsen, R. B. (23 de Enero de 2014). Bergen in a wood construction fever - the first 14 storey building . *2014 International Wood Symposium. Vancouver* . Vancouver, Canadá.

Abrahamsen, R. B., & Malo, K. A. (Agosto de 2014). STRUCTURAL DESIGN AND ASSEMBLY OF "TREET" - A 14-STOREY TIMBER RESIDENTIAL BUILDING IN NORWAY . *World Conference of Timber Engineering* . Quebec City, Canadá.

Acosta Jaramillo, L. (Diciembre de 2014). La incorporación de materiales sostenibles en el proceso constructivo. *AITIM Boletín de Información Técnica nº 292* , 44-47.

AITIM . (18 de Julio de 2011). Madera laminada encolada .

American Wood Council. (n.d.). *American Wood Council*. Retrieved Septiembre de 2016 from <http://www.awc.org/>

Arbeitsgruppe Urbaner Holzbau. (2014). *Urbaner Holzbau*. (K. S. Peter Cheret, Ed.) Berlín: DOM publishers.

Architecture&Design. (n.d.). Retrieved Septiembre de 2016 from <http://www.architectureanddesign.com.au/>

Architekten Hermann Kaufmann ZT GmbH. (2016). *Architekten Hermann Kaufmann ZT GmbH*. Retrieved Septiembre de 2016 from <http://www.hermann-kaufmann.at/>

Binational Softwood Lumber Council. (Junio de 2015). BULLETIN: WOOD INNOVATION AND DESIGN CENTRE .

bygg.no. (2014). Retrieved Septiembre de 2016 from <http://www.bygg.no/>

Campbell, J., & Pryce, W. (2005). *Die Kunst der Holzarkitektur. Eine Weltgeschichte*. Leipzig: E.A. Seeman.

Canadian Wood Council. (2015). Wood Innovation and Design Centre. A technical case study.

CEI Architecture. (2016). Retrieved Septiembre de 2016 from <http://www.ceiarchitecture.com/>

CEI-Bois. (2011). Tackle Climate Change: Use Wood.

CEN. (2004). Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-2: General - Structural fire design .

Cervera, P. (3 de Noviembre de 2011). From Sistema AA, Alvar Aalto, Finlandia, 1940: <https://proyectos4etsa.wordpress.com/2011/11/03/sistema-aa-alvar-aalto-finlandia-1940/>

Comisión Europea. (2013). *Medio Ambiente*. Retrieved Septiembre de 2016 from <http://ec.europa.eu/environment>

- Comisión Europea. (2016). *Medio ambiente*. Retrieved Septiembre de 2016 from ec.europa.eu
- Documento Básico SI. Seguridad en caso de incendio. (Febrero de 2010). *Código Técnico de la Edificación*.
- Echaide, R. (Julio de 1990). La cabaña primitiva en la arquitectura actual. *Revista de Edificación*.
- Entrevista a Reinhard Wiederkehr. 'Holz kann sehr viel'. (2015). *proholz*.
- Fernández Rodríguez, L., & Soler Monrabal, C. (26-29 de Octubre de 2011). El General Panel System de Konrad Wachsmann y Walter Gropius, 1941. *Actas del séptimo Congreso Nacional de Historia de la Construcción*. Santiago de Compostela, España.
- Freigang, C. (2016). Wörterbuch der Architektur. Stuttgart, Alemania: Reclam Sachbuch.
- Giedion, S. (2009). *Espacio, tiempo y arquitectura: origen y desarrollo de una nueva tradición*. (J. Sainz, Trans.) Barcelona: Reverté.
- Government of Canadá. (n.d.). *Natural Resources Canadá*. Retrieved Septiembre de 2016 from <http://www.nrcan.gc.ca/>
- Green, M. (2012). The Case for Tall Wood Buildings. British Columbia, Estados Unidos.
- Grobbauer, M. (2008). Wärmeschutz Glossar bauphysikalischer Eigenschaften von Holz. *Proholz*, 6-7.
- Guttmann, E. (2008). Im Energiesparen liegt die Zukunft. 2-3.
- Henderson, J. (Febrero de 2009). Brettstapel. An investigation into the properties and merits of Brettstapel construction within the UK market. Glasgow.
- International Code Council. (2015). International Building Code. Estados Unidos.
- International Code Council. (n.d.). *International Code Council*. Retrieved Septiembre de 2016 from <http://www.iccsafe.org/>
- Isopp, A. (2008). Energiestandards. Ein Blick über die Grenze. *Proholz*, 16.
- Isopp, A. (2015). 'Wir brauchen andere Fertigungstechniken'. Der Holztechnologe Alfred Teischinger im Gespräch. *Proholz*, 24.
- Jacobo, G. (2004). Edificación con madera: prehistoria de una tecnología ecológica. *Comunicaciones Científicas y Tecnológicas*. Universidad Nacional del Nordeste. Provincia del Chaco, Argentina.
- Jensenius, J. H. (2015). *Stavkirke.info*. From <http://www.stavkirke.info/artikler/>
- Jensenius, J. H. (2015). *Stavkirke.info*. From <http://www.stavkirke.info/artikler/>
- Jiménez Landi, A. (1985). Arquitectura popular española.
- Joint Research Centre. (2016). *Eurocodes. Building the future*. Retrieved Septiembre de 2016 from <http://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/>
- Kaufmann, H. (2012). Der LiveCycle Tower One im Bau. *Forum Holzbau*. Beaune, Francia.

kaufmann, H., & Nerdinger, W. (2011). *Bauen mit Holz: Wege in die Zukunft*. München, Alemania: Prestel.

Kelly, B. (1951). *The prefabrication of houses*. (MIT Press, & John Willey and Sons, Inc., Nueva York, Eds.) Cambridge, Massachusetts: Chapman & Hall, Ltd.

Kolb, J. (2010). *Holzbau mit System*. (L. -H. Schweiz, & D. D. Holzforschung, Eds.) Zürich: Birkhäuser.

Kolb, J. (1992). *Systembau mit Holz*. Zurich, Suiza.

Kollar, M. (Agosto de 2014). *Innovation processes in energy - efficient timber construction in Austria*. Viena, Austria.

Korvenmaa, P. (1990). *The Finnish Wooden House Transformed: American prefabrication, war-time housing and Alvar Aalto*. In R. Thorne, C. Powell, & S. Pepper (Eds.), *Construction History. Journal of the Construction History Society, vol.6*. Cambridge: Carfax publishing company.

Kuhn, G. (2014). *Gemeinschaftliches Wohnen im Holzhaus*. In A. U. Holzbau, *Urbaner Holzbau*. Berlín: DOM publishers.

Medina, G. (2016). *NOTICIAS DE NORMALIZACIÓN NORMA EUROPEA DE LA MADERA CONTRALAMINADA: UNE-EN 16351*. (AITIM, Ed.)

Michael Green Architecture. (2016). *Michael Green Architecture*. Retrieved Septiembre de 2016 from <http://mg-architecture.ca/>

Ministerio de Fomento. Gobierno de España. (2016). Retrieved Septiembre de 2016 from <http://www.fomento.gob.es/>

Multy Story Wood Construction. (Marzo de 2012). *Rethink Wood*. Retrieved Septiembre de 2016 from <http://www.rethinkwood.com/>

Natterer, J., Herzog, T., & Volz, M. (1996). *Holzbau Atlas Zwei*. (D. Arbeitsgemeinschaft Holz e. V., & M. nstitut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH, Eds.) München.

Nuere, E. (Julio de 2014). *Enrique Nuere. Conferencias y Estudios sobre la Carpintería de armar en España*. Retrieved Septiembre de 2016 from <http://enrique.nuere.es/blog/>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2012). *El estado de los bosques en el mundo. 2012*. Roma, Italia.

Passivhaus.de. (2016). Retrieved Septiembre de 2016 from <http://www.passivhaus.de/>

Pousette, A., Gustafsson, A., Fynholm, P., & Edvardsen, D. F. (Septiembre de 2008). *Harmonisation of building regulations in the Nordic countries. Main Report*. Oslo: Nordic Innovation.

proholz Austria. (2001). *Encuesta: Hat der Holzsystembau eine Zukunft in der Wohnungsproduktion? Ist Holz überhaupt ein Baustoff für verdichtetes Wohnen in der Stadt?* *proholz*.

Reiulf Ramstad Arkitekten. (2009). Retrieved Septiembre de 2016 from <http://www.reiulframstadarchitects.com/>

Sandek, K. (Mayo de 2001). Modellvorhaben Bayern Aus der ruhigen Nische des Experiments an die zugige Kante der landläufigen Praxis. Mietwohnungen in Holzsystembauweise 1992-2000. *Proholz* , 8-9.

Sauer, M. (Ed.). (2015). *Hermann Kaufmann – Illwerke Zentrum Montafon*. München, Alemania: DETAIL, Institut für internationale Architektur-Dokumentation.

Schauerte, T. (2010). Wooden house construction in Scandinavia – a model for Europe . *Internationales Holzbauforum* .

Secretaría de estado de Energía, Gobierno de España. (2016). www.minetur.gob.es. From www.minetur.gob.es

Snølys.no. (2015). *Treet*. Retrieved Septiembre de 2016 from <http://treetsameie.no/>

Staib, G., Dörrhöffer, A., & Rosenthal, M. (2008). *Modulares Bauen: Elemente+ Systeme*. Berlín: Birkhäuser.

Tectónica online. (2013). Office building in Dornbirn. Hermann Kaufmann ZT GmbH. *Tectónica online* (<http://www.tectonica-online.com/>) .

Tectónica-online. (13 de Marzo de 2013). *tectónicablog*. Retrieved Septiembre de 2016 from <http://tectonicablog.com/>

Teibinger, M. (Junio de 2015). Zuschnitt Attachment-Brandschutzvorschriften in Österreich Anforderungen nach OIB-Richtlinie 2. *proHolz* .

Thureson, P., Sundström, B., Mikkola, E., Bluhme, D., Hansen, A. S., & Karlsson, B. (2008). The use of fire classification in the Nordic countries – Proposals for harmonisation . (S. T. Sweden, Ed.)

Trifkovic, M. (2015). Treet-Verdens Høyeste Trehus. *Conferencia buildingSmart* . Oslo, Noruega.

Turan, M. (2009). Reconstructing the balloon frame: a study in the hystory of architectonics. *METU Journal of the Faculty of Architecture* .

Wachsmann, K. (1930). *Holzhausbau: Technik und Gestaltung*. Berlín: Ernst Wasmuth Verlag AG.

Wachsmann, K. (1961). *The turning point of Architecture: structure and design*. (T. E. Burton, Trans.) Nueva York: Reinhold Pub. Corp.

Wildman, M. (22 de Noviembre de 2000). An historical view of Frank Lloyd Wright's Usonian Concept.

Wright, F. L. (1928). In the cause of Arquitecture IV. *The architectural record* .

Zangerl, M., Kaufmann, H., & C.Hein. (2010). LifeCycle Tower Energieeffizientes Holzhochhaus mit bis zu 20 Geschossen in Systembauweise .

Zero Carbon Hub. (2016). From <http://www.zerocarbonhub.org>

