Diseño y ejecución de un edificio de madera para apartamentos, biblioteca y oficinas en Noruega

Design and construction of a timber building for apartments, library and offices in Norway

Manuel Sánchez-Solís Rabadán[*,a], Katie Overton[b], Fernando Ibáñez Climent[c], Pablo Tarín Benedito[d] y Alejandro Clemente Torrent[e]

[a] Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Degree of Freedom, Valencia, España

[b] Miembro de la Institución de Ingenieros de Estructuras (MIStructE), Degree of Freedom, Valencia, España

[c] Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Degree of Freedom, Valencia, España

[d] Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Degree of Freedom, Valencia, España

[e] Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Degree of Freedom, Valencia, España

RESUMEN

Degree of Freedom, en colaboración con los arquitectos Helen & Hard, ha diseñado un edificio para biblioteca, apartamentos y banco en la población de Nord Odal, Noruega. La ejecución del sótano de hormigón y de los tres niveles de la estructura de madera se encuentra actualmente en su fase final y se prevé su pronta apertura al público. Los pórticos de madera laminada encolada, con conexiones capaces de resistir momentos en las esquinas, se colocan de forma radial alrededor de un patio central que dota al edificio de su característica forma circular. Los paneles de CLT se usan tanto para los forjados como para los muros, constituyendo el mecanismo principal para la estabilidad lateral de la estructura.

ABSTRACT

Degree of Freedom, in collaboration with Helen & Hard architects, have designed a four-storey building containing a library, apartments and a bank in Nord Odal, Norway. The construction of the concrete basement and three storeys of timber framed structure is currently in its final stages and will shortly be open to the public. Glued laminated timber portal frames, with moment resisting corner connections, are placed radially around a central courtyard giving the building its distinctive circular geometry. CLT panels are used both for floor slabs and for walls providing lateral stability to the structure.

PALABRAS CLAVE: madera, conexiones, CLT, Glulam, edificio, biblioteca, apartamentos, oficinas.

KEYWORDS: timber, connections, CLT, Glulam, building, library, apartments, offices.

1. Introducción

El proyecto de Samling (conjunto en noruego) destaca por el uso de un material tradicional como es la madera, combinado con un diseño moderno, así como con técnicas de fabricación y detalles innovadores. En el presente artículo se resume el trabajo realizado en todas las fases junto con los arquitectos Helen & Hard, Creation Holz (especialistas en estructuras de madera), el Ayuntamiento de Nord Odal, el contratista principal Ø.M.Fjeld y los suministradores de los elementos de madera Aaneslands Limtre y Blumer-Lehmann. Cada

una de las diciplinas realiza un modelo BIM que se utiliza tanto para el análisis de conflictos como para la fabricación.

La geometría, los materiales y los espacios del edificio se han tratado como un conjunto para definir una armonía entre el interior y el exterior de la estructura, ya que se pretende que sea un lugar muy transitado y atractivo (Figura 1).

2. Requisitos de diseño

2.1 Concepto arquitectónico

El objetivo del edificio es el de reunir literatura, conocimiento, economía, personas, tradición e historia bajo una misma cubierta. Ello encaja con la multifunción con la que ha sido concebido.

Por otro lado, se pretende que la zona de la biblioteca sea una avenida más de Nord Odal, dotando a la entrada de una cristalera de 11 metros de altura.

Se trata de una estructura relativamente compacta, circular y con un atrio abierto en el centro que se percibe como un lugar tranquilo que conecta los diferentes usos. Su geometría característica permite definir toda la huella del edificio desde el centro del patio.

2.2 Selección de materiales

Por aspectos de funcionalidad y demanda estructural, se decide realizar el sótano del edificio en hormigón in situ.

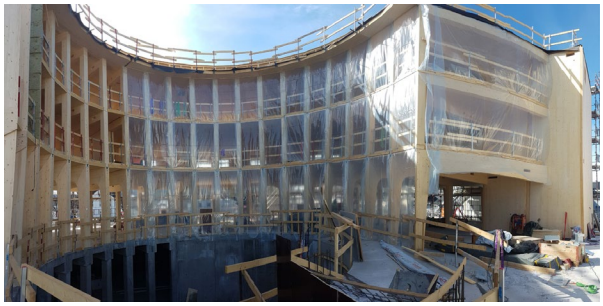
El resto de niveles se plantean en madera laminada encolada y paneles de madera contralaminada (Cross-laminated Timber). Desde el comienzo, el equipo de diseño tiene presente que la madera, como material de construcción, tiene beneficios intrínsecos medioambientales y saludables. Cuando se realiza una comparativa con otros materiales estructurales, la madera resulta ser una herramienta muy útil para ingenieros y arquitectos con el objetivo de reducir las emisiones de gases que provocan el efecto invernadero, es decir, la reducción de la huella de carbono. El ciclo del carbono en la madera realiza un círculo natural cerrado.

Por otro lado, la elevada componente estética de este tipo de construcciones (Figura 2), junto con una competitiva posición económica en el mercado nórdico, sitúan a la madera como clara ventaja frente a materiales convencionales.

2.3 Sistema estructural

El sistema estructural se divide en dos partes distintas. La zona de la biblioteca (Figuras 3 y 11) consiste en pórticos de madera laminada de hasta 12m de altura para crear un espacio abierto bajo la cubierta. Los pórticos están unidos parcialmente por una entreplanta que descansa en un sistema de doble vigas mixtas glulam-LVL en voladizo.

La zona de viviendas se realiza mediante un sistema estructural convencional a base de pórticos de madera laminada, mientras que se emplean pórticos rígidos en la zona del banco (Figura 4) que permite una planta baja diáfana sobre la que se encuentran las dos plantas de apartamentos con una estructura de columnas y vigas unidas mediante conexiones sencillas y articuladas (Figura 5).

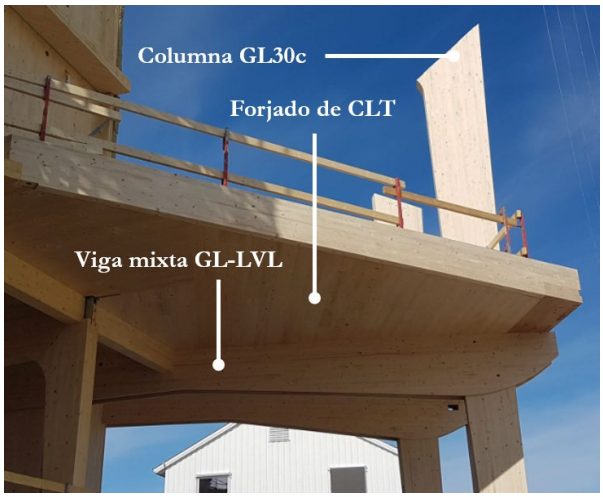


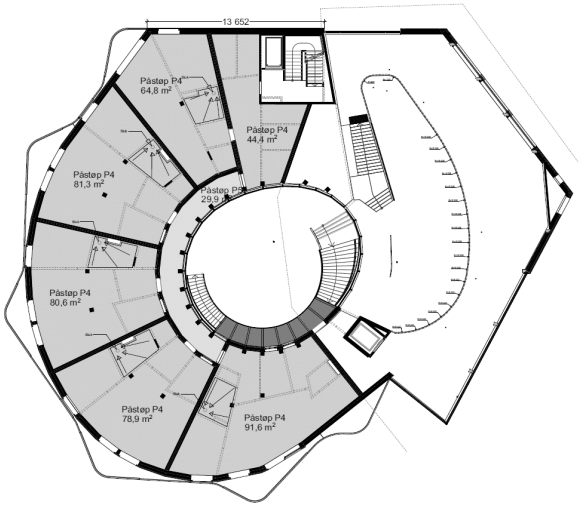
En la interfaz madera/hormigón, las columnas de madera encolada (Glulam) de los pórticos se fijan mediante placas de anclaje para transmitir cargas verticales y horizontales a la estructura del sótano (Figura 6).

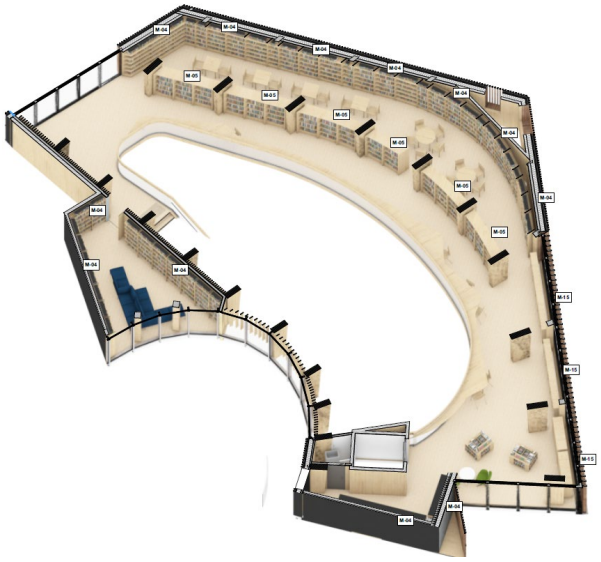
El sistema de transferencia de carga vertical, en las dos zonas, está formado por los forjados de madera contralaminada que descansan sobre los pórticos localizados en cada eje del edificio. Destaca también la forma en la que se ha realizado el perímetro de los balcones empleando cortes curvos en el CLT en voladizo (Figura 7).

Para asegurar la estabilidad lateral de los pórticos se realizan unas conexiones capaces de transmitir momento (situación poco común en las construcciones de madera), de manera que el marco rígido concebido actúa también frente a solicitaciones horizontales procedentes de las fuerzas de membrana en las losas de CLT. El conjunto resulta ser muy rígido en planta gracias a la disposición de dos núcleos de ascensores (Figuras 8) realizados con muros de CLT, así como los muros de partición entre las viviendas (Figura 10).

La madera empleada para vigas y columnas es de diferente calidad, apareciendo las calidades GL24c, GL28c, GL28h y GL30c, combinadas con láminas de LVL (de mayor rigidez y resistencia) en las vigas del nivel de la entreplanta de la biblioteca para controlar las deformaciones verticales (Figura 9). Los paneles de madera contralaminada están constituidos por capas de listones de madera C24 dispuestas de forma alterna, lo que permite un comportamiento de forjado bidireccional. La orientación de estas láminas tiene también un importante efecto arquitectónico.







3. Conexiones

Las conexiones entre los elementos de madera se realizan con diferentes geometrías, tipologías y número de conectores en función de los elementos a conectar, así como los requisitos estructurales establecidos por el compromiso entre las fuerzas de diseño y la rigidez deseada (Figura 12).

Los elementos de unión (pasadores o tornillos) experimentan un deslizamiento cuando son sometidos a una acción, lo que condiciona el comportamiento global de la estructura.

En las situaciones en las que se buscan soluciones rígidas, se suele recurrir a piezas encoladas como es el caso de las inserciones de LVL en las vigas de la biblioteca o las barras embebidas en las esquinas de los pórticos, siendo estas últimas las conexiones de diseño más innovador. Tal y como se ha mencionado anteriormente, se debe garantizar la transferencia de momento entre ambas piezas para el correcto funcionamiento de la estructura.

Como primera alternativa, se propone el emplear placas de madera más rígida (LVL) pegadas a ambas partes del pórtico. Sin embargo, esta solución supone el transporte de piezas de grandes dimensiones, así como la definición de una serie de juntas de montaje en los dinteles, lo que afecta a la estética final del pórtico.

La solución final consiste en una serie de barras encoladas embebidas en cada elemento a

unir y que se sueldan a chapas metálicas ranuradas (Figura 14). Este conjunto se diseña para la transferencia de axiles y momentos (descompuesto, a su vez, en axiles de tracción / compresión).

Estas chapas se unen mediante tornillos a una sección metálica hueca orientada según la dirección de la junta y que se conecta en el centro con otras barras encoladas concebidas para la transmisión de esfuerzos cortantes (Figura 13).

Esta conexión permite que las piezas puedan ser ensambladas en obra, a partir de los tornillos de conexión con el elemento tubular central que viene previamente instalado de fábrica, resultando un impacto estético mínimo (Figura 15).

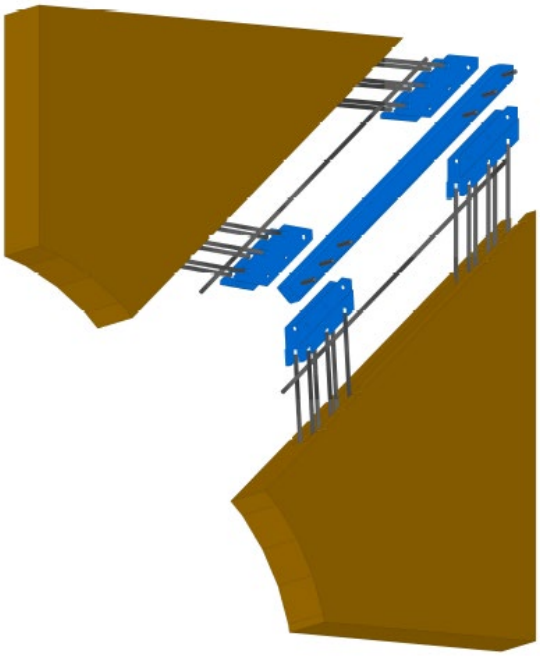


Figura 13. Conexión de los pórticos (© Blumer-Lehmann)

Figura 14. Conexión de los Pórticos en taller (© Blumer-Lehmann)

Figura 15. Pórticos ensamblados en obra (© Emma Sukalic)

4 Resistencia a fuego

La resistencia a fuego especificada en proyecto es R60. La madera muestra un buen comportamiento frente a esta acción accidental pues se genera una capa carbonizada que protege el núcleo interior. Por ello, todos los elementos se diseñan de acuerdo con el método de la sección transversal reducida descrito en la parte 2 del Eurocódigo 5 [1]. El núcleo de la sección remanente conserva por completo las capacidades resistentes y se verifica para los esfuerzos obtenidos bajo la combinación de acciones accidentales de fuego según el Eurocódigo 0 [2].

5 Acústica

La acústica siempre es una consideración importante en edificios de madera con especial énfasis en las losas y muros de CLT que son visibles desde el interior de los apartamentos que condicionan el diseño de las conexiones (Figura 16), en particular el caso de las particiones entre apartamentos. Para garantizar un adecuado amortiguamiento del sonido, se plantean muros dobles con aislamiento interior totalmente desconectados. Los forjados también son interrumpidos en dichas posiciones, por lo que el edificio queda seccionado en una serie de

sectores independientes. Para garantizar la estabilidad lateral y la transferencia de fuerzas horizontales, se disponen chapas de acero a ambos lados de la junta, conectadas con tornillos en el centro con capas de material elastomérico.

Figura 16. Conexión entre módulos independientes (© Emma Sukalic)

6 Modelo de elementos finitos

El modelo de elementos finitos se desarrolla a partir de la geometría implementada en el modelo BIM (Figura 24), empleando elementos tipo barra para vigas y columnas y elementos tipo lámina para losas y muros (Figura 18).

La madera es un material ortótropo, por lo que se debe modificar las propiedades elásticas de los elementos finitos en las direcciones transversales. Por otro lado, se debe aplicar la correspondiente rigidez a cada tipología de conexión de acuerdo con el módulo de deslizamiento (k_{serv}).

La matriz de rigidez de los elementos lámina se ensambla a partir de las propiedades eficaces en cada dirección definidas por los fabricantes, despreciando la colaboración de las capas transversales y cuya formulación se indica en manuales de madera [3] (Figura 17).

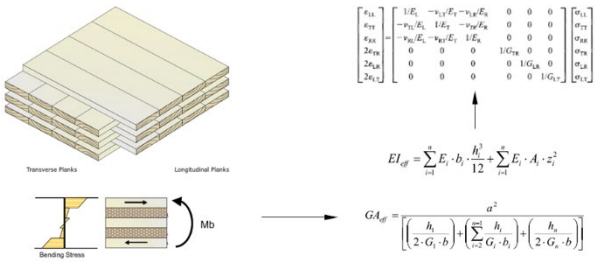


Figura 17. Matriz de rigidez del CLT

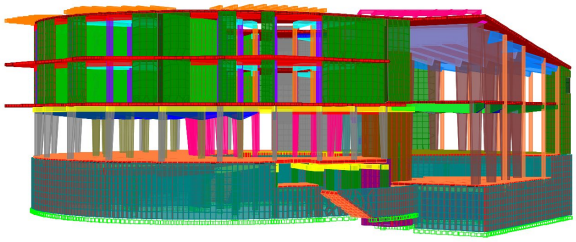


Figura 18. Vista general del modelo FEM

El diseño de los paneles de madera contralaminada no queda recogido en la versión actual del Eurocódigo 5 [4], por lo que son pocos los softwares comerciales que incorporan las verificaciones de estos elementos. Por ello, se desarrollan una serie de herramientas de post-proceso (Figura 19) a partir de referencias principalmente procedentes de la Universidad de Graz [5].

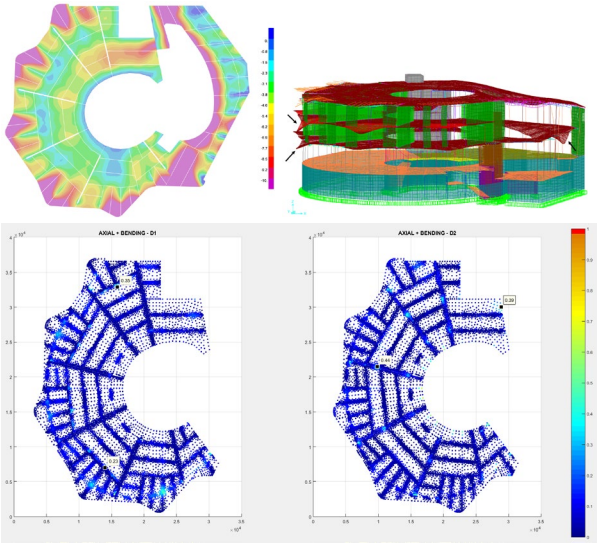


Figura 19. Post-proceso de resultados

6 Modelo BIM

Figura 20. Modelo BIM conjunto

El modelo BIM (Figura 20) se ha utilizado desde la fase inicial del proyecto empleándose como una herramienta de diseño y de coordinación

para todas las disciplinas a través de análisis de conflictos (clash tests) con resultados periódicos. En particular, el requisito de ocultar numerosas instalaciones entre los elementos de madera ha requerido de un modelado preciso y de la definición de una diversidad de huecos (Figura 21).

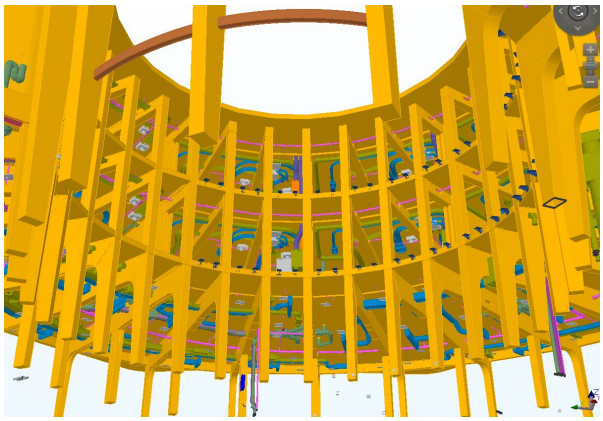


Figura 21. Modelos BIM estructura e instalaciones

Por lo que respecta a la estructura de hormigón (Figura 22), se ha definido toda la armadura en 3D (Figura 23), a partir de la cual se generan planos en dos dimensiones.

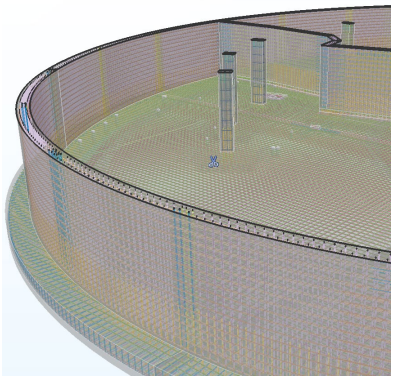


Figura 22. Modelo BIM de armadura

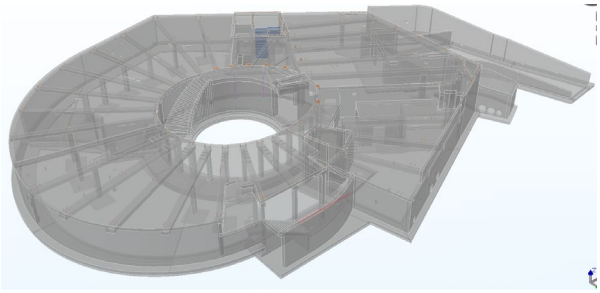


Figura 23. Modelo BIM de hormigón

El modelo de madera se utiliza para ser importado en softwares de tecnología CNC conectados a las máquinas que realizan los cortes en los elementos.

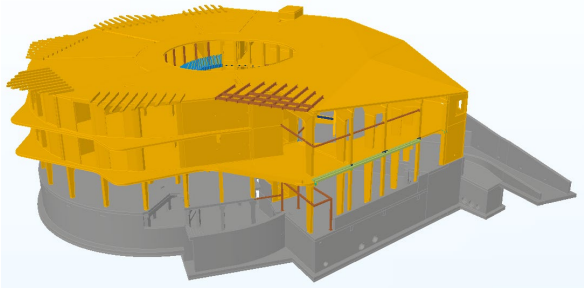


Figura 24. Modelo BIM completo de estructura

7 Conclusiones

El diseño del proyecto de Samling resulta ser innovador, empleando un material tradicional como es la madera. El planteamiento arquitectónico supone un interesante reto de ingeniería estructural enfocado principalmente en el cuidado de los detalles de conexión entre diferentes piezas. Se ha alcanzado una elevada precisión con tolerancias de ejecución mínimas apoyado por la tecnología BIM, lo que agiliza la fase de montaje.

Referencias

[1] EN 1995-1-2:2004+NA:2010 Eurocódigo 5: Proyecto de estructuras de madera - Parte 1-2: Proyecto de estructuras sometidas a fuego.

[2] EN 1990 Eurocódigo 0: Bases de cálculo de estructuras.

[3] Karacabeyli, Erol, and Brad Douglas, et al., CLT handbook: cross-laminated timber, FPInnovations, 2013.

[4] EN 1995-1-1:2004+NA:2010 Eurocódigo 5: Proyecto de estructuras de madera - Parte 1-1: Reglas generales y reglas para la edificación.

[5] Augustin et al., BSPhandbuch, Holz-Massivbauweise in Brettsperrholz, Graz University of Technology, 2010.