

Estructuras de madera en grandes equipamientos públicos. El caso del centro escolar y médico-educativo en Orly

Timber structures in major public equipment. The case of the school and medico-educational center in Orly

Miquel Peiro Sendra^a, Anna Maria Bordas Geli^b, Bastian Ninino^c

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Arquitecto. Profesor Titular de Universidad (construcción) – Escuela de Arquitectura de Bretagne. Socio fundador bordas+peiro. miquel_peiro@ciccp.es

^b Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. Arquitecta. Catedrática de Universidad (proyectos) – Escuela de Arquitectura de Paris Val de Seine. Socia fundadora bordas+peiro. bp@bordaspeiro.eu

^c Civil Engineer. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées Paristech. Jefe de Proyecto bordas+peiro. ninino@bordaspeiro.eu

RESUMEN

El complejo escolar y médico-educativo situado en Orly está compuesto por dos edificios, ambos contruidos con estructura de madera. Los pilares y vigas estan fabricados con madera laminada encolada y soportan paneles de madera contralaminada (CLT). Las fachadas están conformadas por muros de entramado de madera, revestidos exteriormente con ladrillos. El presente artículo expone las particularidades que la construcción en madera implicó en el caso de una edificación pública de gran envergadura, tanto en el diseño como en la ejecución.

ABSTRACT

The school and medico-educational complex located in Orly consists of two buildings, both constructed with a timber structure. Columns and beams are made of glued laminated timber (GLT) and support cross laminated timber (CLT) panels. The facades consist of timber-framed walls externally clad with bricks. This article presents the particularities of timber construction in the context of a large-scale public facility, addressing both regarding the design and execution phases.

PALABRAS CLAVE: madera, ladrillos, forjado mixto madera hormigón, celosía de madera

KEYWORDS: timber structure, bricks, timber concrete composite panels, timber truss

1. Introducción

La construcción en madera de edificaciones públicas de gran envergadura presenta numerosos desafíos técnicos, relacionados con las luces estructurales, las cargas y las interfaces constructivas. Este artículo tiene como objetivo exponer, a través del ejemplo de la escuela y el complejo médico-educativo de Orly, los retos

asociados a la construcción de estructuras de madera en proyectos de equipamientos públicos complejos.

La escuela y el complejo médico-educativo ubicado en Orly se componen de dos edificios independientes, cada uno de ellos construido con estructura de madera. El sistema

estructural principal está conformado por pilares y vigas de madera laminada encolada, que soportan paneles de madera contralaminada (CLT).

El arriostramiento se resuelve mediante muros de madera, los cuales también soportan las fachadas de ladrillo.

Datos del proyecto :

- Superficie total: 11 900 m²
- 4 plantas, altura: 16 m
- Grupo escolar con 20 aulas
- Sala polivalente con 102 asientos

2. Ventajas e inconvenientes del uso de la madera como material estructural.

2.1 Propiedades de la madera

La madera es un material altamente relevante desde el punto de vista del desarrollo sostenible: si los bosques son gestionados de manera adecuada, se considera un recurso renovable y prácticamente inagotable. Además, funciona como un sumidero de carbono, lo que contribuye significativamente a la reducción del impacto ambiental del sector de la construcción en el calentamiento global.

También destaca por su ligereza, lo que facilita su manipulación y transporte, y se adapta especialmente bien a procesos de prefabricación.



Figura 1. Plano de conjunto del proyecto.

No obstante, la madera como material estructural también presenta ciertas limitaciones en comparación con otros materiales de construcción. En relación con el hormigón y el acero, la madera tiene una menor resistencia mecánica y rigidez, es susceptible a la fluencia, y requiere un diseño cuidadoso de las uniones estructurales debido a sus restricciones específicas.

2.2 Madera laminada encolada

La sección transversal de las vigas de madera maciza está limitada por el tamaño de los troncos empleados como materia prima. Por lo tanto, cuando se requiere una altura de sección superior a 30 cm o cuando las luces necesarias para una viga son considerables, es imprescindible utilizar madera laminada encolada.

La normativa [1,2] establece diferentes clases de resistencia y rigidez para la madera laminada encolada, con secciones homogéneas y combinadas clasificadas en GL24, GL28, GL32 y GL36.. En la práctica, aunque estos materiales estén especificados en la normativa, la selección del tipo de madera para una estructura no depende únicamente de los resultados del cálculo estructural, sino también de la disponibilidad de suministro de la sección requerida.

Tabla E.3 Madera laminada encolada homogénea. Valores de las propiedades asociadas a cada Clase Resistente

Propiedades		GL24h	GL28h	GL32h	GL36h
Resistencia (característica), en N/mm²					
- Flexión	$f_{m,24}$	24	28	32	36
- Tracción paralela	$f_{t,24}$	16,5	19,5	22,5	26
- Tracción perpendicular	$f_{t,90,24}$	0,4	0,45	0,5	0,6
- Compresión paralela	$f_{c,24}$	24	26,5	29	31
- Compresión perpendicular	$f_{c,90,24}$	2,7	3,0	3,3	3,6
- Cortante	$f_{v,24}$	2,7	3,2	3,8	4,3
Rigidez, en kN/mm²					
- Módulo de elasticidad paralelo medio	$E_{0,mean}$	11,6	12,6	13,7	14,7
- Módulo de elasticidad paralelo 5 ^o percentil	$E_{0,5}$	9,4	10,2	11,1	11,9
- Módulo de elasticidad perpendicular medio	$E_{90,mean}$	0,39	0,42	0,46	0,49
- Módulo transversal medio	$G_{0,mean}$	0,72	0,78	0,85	0,91
Densidad, en kg/m³					
Densidad característica	$\rho_{k,24}$	380	410	430	450

Figura 2. Extracto del Documento Básico SE-M[1]: Clases de madera laminada encolada.

Para obtener madera laminada encolada de clase GL28, se necesita madera maciza de clase C30 y para madera de clase GL32 se necesita madera maciza de clase C40, la cual es

significativamente más escasa y costosa. Durante la fase de diseño y construcción del proyecto, no existía producción de GL36. Aunque este material esté descrito en la normativa, en la práctica resulta imposible obtenerlo.

Por lo tanto, el diseño de estructuras de madera laminada encolada debe realizarse considerando el uso de GL24, ya que las clases superiores presentan dificultades de suministro o son directamente inaccesibles, al menos en el contexto actual de la construcción en Francia.

También es relevante mencionar la existencia del GL70 (*BauBuche*), que actualmente es fabricado exclusivamente por la empresa austriaca *Pollmeier*, y que posee una resistencia característica a flexión de 70 MPa, muy superior a los 24 MPa del GL24. Este tipo de vigas se fabrica a partir de láminas delgadas de madera de haya encoladas y se empleó en algunas áreas del proyecto de Orly en aquellas vigas donde la optimización de la altura resultaba absolutamente necesaria.



Figura 3. Estructura interior del proyecto.

2.3 Fluencia

La madera es un material altamente susceptible al fenómeno de fluencia, es decir, a la deformación progresiva y diferida de los materiales sometidos a una tensión prolongada en el tiempo.

Las vigas de madera en flexión experimentan una deformación a largo plazo que

en la mayoría de los casos, supera un tercio de la deformación total. Como consecuencia, las vigas de madera suelen dimensionarse con base en criterios de rigidez en lugar de criterios de resistencia, especialmente cuando la luz aumenta.

2.4 Uniones

A diferencia del hormigón armado o del acero donde es relativamente sencillo lograr un empotramiento efectivo, en estructuras de madera, la consecución de uniones rígidas es considerablemente más compleja.

La experiencia demuestra que las uniones rígidas en madera deben considerarse como semirrígidas ya que tienden a desarrollar cierta flexibilidad con el tiempo.

En el proyecto las uniones son articuladas, la estabilidad y la rigidez vienen de elementos agregados al sistema de vigas y pilares: vigas en diagonal, paneles planos, núcleos de escaleras rígidos en hormigón.

2.5 Luces

En edificaciones públicas, como el complejo escolar presentado en el artículo, el programa arquitectónico requiere grandes espacios abiertos. En particular, las aulas presentan luces tipo de 6,5 m, mientras que algunas salas de actividades alcanzan luces de aproximadamente 10 m. Además, el proyecto incluye la incorporación de grandes ventanales en las aulas.

Estas dimensiones ya son considerables, y en la construcción convencional en madera, la estrategia habitual consiste en aumentar el número de soportes verticales para reducir la luz de los elementos sometidos a flexión. Sin embargo, esta solución no es viable cuando se busca generar grandes volúmenes diáfanos, ya que requieren vigas capaces de salvar las luces mediante flexión.

No obstante, el diseño debe optimizar la alineación de los postes; dado que las cargas puntuales sobre las vigas generan esfuerzos de

cizallamiento desfavorables, debido a la baja resistencia de la madera en direcciones perpendiculares a la fibra.

2.6 Acústica

Un proyecto de equipamiento escolar plantea importantes desafíos acústicos. Por esta razón, todos los forjados incorporan una capa de hormigón, con un aislamiento acústico interpuesto entre el panel de CLT y dicha capa.

Esta solución acústica introduce de manera inmediata una limitación estructural ya que la capa de hormigón añade un peso propio adicional a los forjados, lo que debe ser considerado en su dimensionamiento.

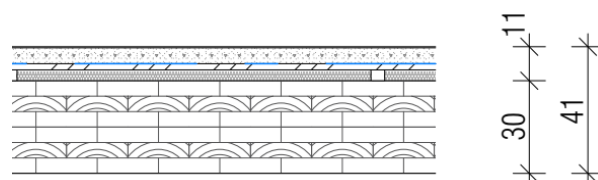


Figura 4. Sección del complejo de suelo.

2.7 Seguridad en caso de incendio

Dado que se trata de un proyecto con estructura de madera de varios pisos, los edificios están sujetos a estrictos requisitos de seguridad contra incendios, los cuales deben considerarse cuidadosamente, especialmente porque los cuerpos de bomberos muestran una gran desconfianza hacia la carga combustible representada por la estructura de madera. La altura de 16 m del centro médico-educativo supera los 8 m a partir de aquellos requisitos específicos se aplican.

El proyecto incorpora soluciones específicas de seguridad contra incendios, particularmente para mitigar la propagación del fuego entre niveles a través de las fachadas.

3. Singularidades del proyecto

A diferencia de un proyecto de viviendas o de oficinas, el centro escolar y el centro médico-educativo presentan un programa arquitectónico

con una gran diversidad de espacios tales como aulas, polideportivos, refectorios y salas de actividades. La distribución de estos espacios exige la integración de soluciones estructurales para resolver las configuraciones específicas derivadas del proyecto.

Otra característica clave del proyecto es el revestimiento de las fachadas con una pared de ladrillo, lo que genera cargas excéntricas sobre los muros de madera.

3.1 Forjados

Los forjados del edificio están compuestos principalmente por madera contralaminada (CLT), material que fue seleccionado por su composición 100% de madera y su facilidad de ejecución. Sin embargo, las cargas asociadas al peso propio de las capas acústicas, combinadas con las mayores cargas variables en los centros educativos, han requerido forjados de 30 cm de espesor para paneles de CLT con una luz de 6,5 m.



Figura 5. Montaje de los forjados de madera contralaminada.

No obstante, al igual que ocurre con las clases de resistencia de la madera, la selección de materiales está determinada en gran medida por la capacidad de producción de los proveedores. Hasta la fecha, el espesor máximo disponible para paneles CLT es de 32 cm y, en general, el espesor estándar se limita a 28 cm.

Por lo tanto, en algunos forjados fue necesario emplear una solución alternativa. La opción adoptada fue un sistema de forjado mixto de madera y hormigón, el cual permite incrementar la inercia del conjunto estructural al aumentar el espesor total del forjado.

Este sistema se implementó en particular en la sala de deportes del centro médico-educativo, donde la luz de 7 m combinada con las elevadas cargas variables, hacían técnicamente inviable el uso exclusivo de CLT. Además, las instalaciones de la planta baja impedían la incorporación de vigas, ya que estas habrían reducido significativamente la luz.



Figura 6. Forjados mixtos madera y hormigón.

El sistema empleado es el *Hybridal*, desarrollado por la empresa *Cruard*. A diferencia de los forjados mixtos tradicionales, en los que el hormigonado in situ se realiza mediante conectores mecánicos, este sistema es completamente prefabricado y transfiere casi el 100% del esfuerzo de cizallamiento longitudinal entre la madera y el hormigón gracias a un tratamiento superficial específico y a un sistema de pegado aplicado sobre la cara superior de todas las viguetas.



Figura 7. Forjados mixtos madera hormigón.

3.2 Viga en celosía

La sala de motricidad está ubicada en la planta baja del grupo escolar y tiene una superficie de 10 m x 11 m, completamente libre de soportes. Estas luces son significativas para los sistemas de forjados empleados en el proyecto, por lo que se optó por la implementación de una viga en celosía de 15 m de luz y la altura equivalente a un piso completo, ubicada sobre la sala de motricidad, con el objetivo de soportar los pisos superiores y, al mismo tiempo limitar la luz de los forjados a aproximadamente 7 m.



Figura 8. Viga en celosía.

Este ejemplo pone de manifiesto que las estructuras de madera de grandes luces requieren secciones con alturas significativas. Integrar toda la rigidez en el espesor de un único forjado habría resultado en un aumento del espesor total de la estructura, lo que incrementaría los costos del edificio, ya que las alturas entre niveles aumentarían, repercutiendo en un mayor consumo de material en fachadas y particiones. Por lo tanto, esta solución permite reducir el espesor de los forjados y optimizar el volumen de material utilizado.



Figura 9. Montaje de la viga en celosía prefabricada en taller.

3.3 Muros de madera

Las fachadas del edificio están compuestas por muros de entramado de madera, los cuales contribuyen parcialmente al arriostramiento del edificio. Esos muros se fabrican en taller integrando directamente el aislamiento térmico, compuesto por una mezcla de algodón, cáñamo y lino de origen biológico, con excelente comportamiento en la regulación de la humedad.

Todas las fachadas del edificio están revestidas con un muro macizo de ladrillo, separado de la fachada portante por una cámara de aire. Los ladrillos se apoyan directamente sobre la fachada, colocándose mediante ángulos anclados en las vigas de madera o en los muros de entramado, que en este caso incorporan refuerzos estructurales.

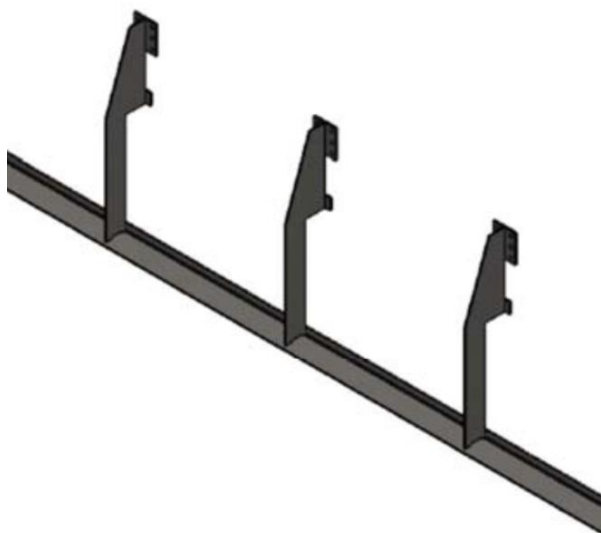


Figura 10. Ángulos de soporte de los ladrillos.

La implementación de este sistema de fachada requirió cálculos específicos de seguridad contra incendios, con el fin de garantizar la adecuada protección contra la propagación del fuego a través de las fachadas.

Se llevaron a cabo análisis térmicos para verificar la resistencia al incremento de temperatura en caso de incendio, cumpliendo con los tiempos de resistencia requeridos por la normativa del proyecto: 30 minutos para el grupo escolar y 60 minutos para el instituto médico-educativo.



Figura 11. Revestimiento de ladrillos de la fachada.

Además, con el objetivo de mejorar la seguridad contra incendios, la cara exterior de los muros de madera se fabricó con paneles de fibra y yeso *Fermacell*, en lugar de OSB, como es habitual en este tipo de construcciones.

Esta elección permite que los paneles laterales de las ventanas estén completamente revestidos con *Fermacell*, proporcionando un detalle de fachada optimizado que impide la propagación del fuego a través de las aberturas.

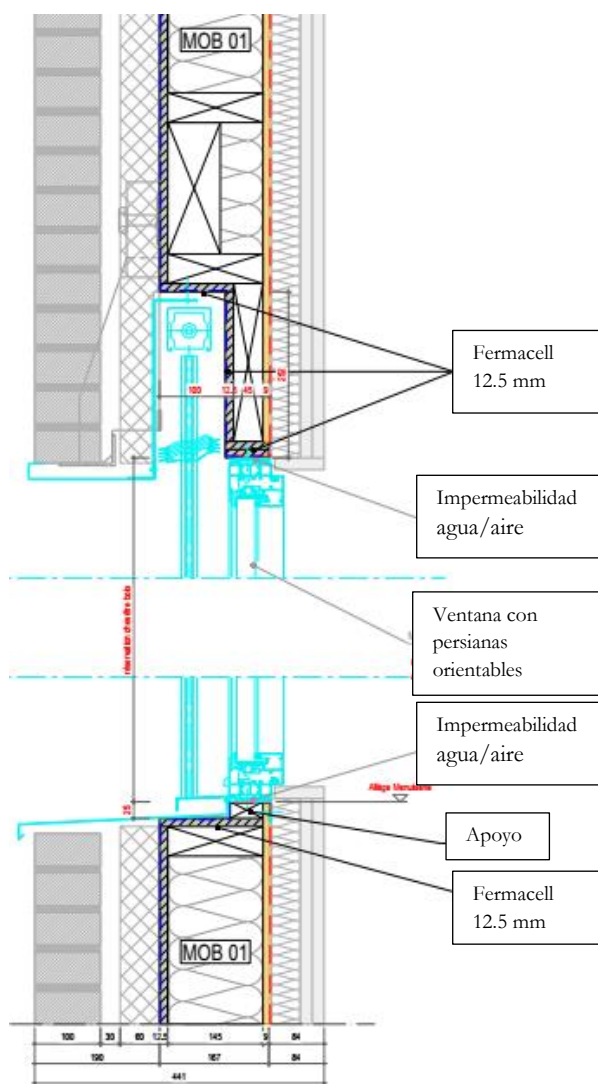


Figura 12. Detalle de la fachada a nivel de una abertura.

4. Desafíos de la ejecución

El proyecto se desarrolló en lotes independientes, con diferentes empresas, cada una especializada en una disciplina específica. La construcción con estructura de madera requiere una reorganización fundamental de la planificación de obra y de los métodos de trabajo de todas las empresas involucradas. Si se aplicaran los mismos métodos utilizados en estructuras de hormigón, es altamente probable que la mayoría de las interfaces con la estructura presentaran problemas significativos.

4.1 Instalaciones

En estructuras de hormigón o acero, es posible perforar vigas para permitir el paso de instalaciones. Sin embargo, en estructuras de madera, esta opción no es viable, lo que exige una planificación previa meticulosa en la fase de diseño y preparación de obra.

Dado que las estructuras de madera son prefabricadas, todos los recorridos de instalaciones deben preverse, ya que será muy difícil realizar perforaciones o modificaciones en la estructura durante la ejecución

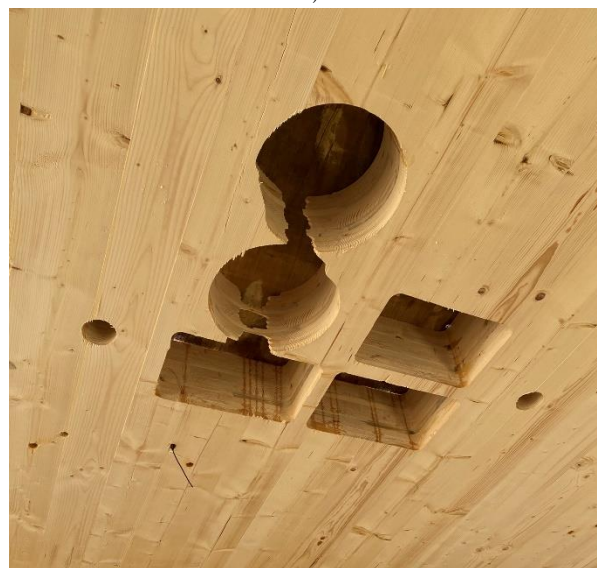


Figura 13. Huecos en el forjado ya anticipados en taller.

4.2 Cubierta

Las estructuras de madera no reciben tratamiento para permanecer expuestas a la intemperie durante largos períodos. Por lo tanto, es imprescindible coordinar la instalación de la cubierta inmediatamente después del montaje de la estructura de madera.

En la obra de Orly, la empresa encargada de la cubierta no cumplió con los estándares esperados, y la mala calidad de ejecución provocó filtraciones significativas en el edificio, lo que requirió trabajos adicionales para permitir el secado de la madera.

La principal lección aprendida es que, para proteger eficazmente la integridad de las

estructuras de madera frente a la intemperie, la mejor estrategia consiste en exigir que los trabajos de estructura y cubrición sean ejecutados por la misma empresa.

4.3 Ventanas

Las interacciones entre la estructura de madera y los sistemas de carpintería requirieron un ajuste específico durante la obra ya que la empresa encargada de las ventanas no tenía experiencia en la instalación sobre marcos de madera.

En particular, el fenómeno de fluencia debía considerarse en el diseño de los muros cortina y ventanas. En el caso de ventanales de grandes dimensiones, los cálculos de deflexión final indicaban aproximadamente 20 mm de desplazamiento, parte del cual corresponde a la fluencia, por lo que no está presente en el momento de la instalación.

Por esta razón, el montaje de la carpintería debe permitir la libre deformación de la estructura sin afectar el acristalamiento. De lo contrario, podrían surgir problemas en el funcionamiento de ventanas y puertas, impidiendo su correcta apertura o cierre, o, en el peor de los casos, provocando la rotura del acristalamiento.



Figura 14. Ventanales. La viga del dintel es integrada al muro de madera.

En la fachada del instituto médico-educativo, un muro cortina cubre toda la planta baja. Del mismo modo, el detalle de conexión en la parte superior del muro cortina debió adaptarse de manera específica para permitir una

expansión considerable, absorbiendo tanto la fluencia como las deformaciones a largo plazo de la estructura.

4.4 Paredes ligeras interiores

La interacción con las paredes interiores presenta un problema similar al del acristalamiento: las deformaciones por fluencia a largo plazo no deben generar compresión sobre las particiones, ya que esto podría impedir el cierre de puertas o causar daños estructurales.

Para gestionar esta interfaz, la empresa encargada de los acabados se basó en un plan específico de deformaciones calculadas, el cual permitió determinar el tipo de estructura de pared a implementar según la magnitud de las deformaciones a absorber.

5. Conclusión

El uso de la madera como material estructural está en constante crecimiento, aunque aún no puede considerarse una solución tan extendida como el hormigón o el acero. Su aplicación en proyectos de gran envergadura evidencia casos específicos que requieren el desarrollo de soluciones adaptadas.

La experiencia adquirida en este proyecto demuestra que la construcción con madera no solo requiere la intervención de carpinteros, sino que todos los actores involucrados en la obra deben replantear sus métodos de trabajo y su enfoque en la planificación y ejecución de la construcción. Este enfoque demanda una planificación y coordinación significativamente más detalladas antes de iniciar la ejecución.

Agradecimientos

Agradecemos a la agencia GPAA, arquitecto del proyecto, y a la empresa Cruard, encargada de la construcción de la estructura de madera del conjunto de edificios.

Referencias

- [1] Documento Básico SE-M, Seguridad estructural Madera, Ministerio de Fomento, Madrid, 2019.
- [2] NF EN 1995-1-1, Eurocode 5: Calcul des structures en bois, 2005.