

# PLACAS ALVEOLARES PREFABRICADAS DE MADERA PARA FORJADO Y CUBIERTA

*ALTERNATIVA DE UNIONES CON PASADORES DE MADERA SIN ADHESIVO*

Máster oficial universitario "Tecnología en la arquitectura", línea de Construcción y nuevas tecnologías  
Universitat Politècnica de Catalunya

Trabajo final de máster

Autor: Francisco Coronel Cárdenas  
Director Tesina: Jaume Avellaneda Diaz-Grande  
Codirector Tesina: Joaquín Montón Lecumberri

Barcelona, Diciembre 2014

## *RESUMEN*

Esta tesina investiga las aptitudes de las placas prefabricadas alveolares de madera para su uso en forjados mediante una comparación de las actualmente existentes en el mercado. Además, propone y comprueba por medio de software y en laboratorio la alternativa de un pasador de madera para las uniones entre elementos sin adhesivo, y de unos anillos de bambú, que situados en los puntos de más esfuerzo permiten ampliar la resistencia hasta un 240%. Esto, junto con la gran capacidad para solucionar grandes luces, la posibilidad de las placas para incluir aislantes acústicos, térmicos e instalaciones y la fácil deconstrucción y sostenibilidad de las mismas, hace de estas una alternativa que puede competir con los sistemas de construcción actuales.

## *ABSTRACT*

This thesis investigates the aptitudes of prefabricated timber hollow-box boards that are used as slabs by comparing those that are already present in the market. Moreover, I propose and test through a software and in the laboratory an alternative made of a timber fastener to unite its elements without adhesive. When bambu rings are placed where it exists more effort, resistance increase until 240%. This fact, combined with the hight capacity to solve long spans, its possibility to include acustic and termic isolators and installations and its easy deconstruction and sostenibility, makes of those wooden boards an alternative able to compete with present constructive systems.

## **AGRADECIMIENTOS**

Jaume Avellaneda Díaz-Grande.  
Joaquín Montón Lecumberri.  
Miriam Cárdenas Pesantez.  
Edgar Coronel Reinoso.  
Rosa Molinero Trías.

# ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	7
Entramados de madera para forjado y cubierta en los siglos XIX y XX	9
Sistemas Emy, Stephan y Hetzer	
La industrialización de la madera	
Forjados de madera	14
Definición	
Clasificación de los tipos estructurales de madera	
Placas prefabricadas de madera para forjado y modelos: Lignatur, Kielsteg, Lignotrend, Novatop element, Bresta	17
Descripción de materiales	23
Madera	
Adhesivos	
Fabricación de las placas	26
Principales características de las placas	31
Propiedades estructurales	
Uniones y tipos	
Comportamiento al fuego	
Rendimiento acústico	
Absorción acústica	
Instalaciones	
Obras de referencia	47
Escuela superior suiza para la ingeniería de la madera	
Waingels College	
Comparación entre los modelos de placas	61
Optimización de uniones	66
Propuesta	70
Análisis estructural	71
Ensayo	73
Conclusiones	75
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79

## INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción consume un alto nivel de recursos naturales y energía para producir materiales y componentes. Además, sus diferentes procesos, como la construcción, su uso y su mantenimiento generan una gran cantidad de residuos, muchos de ellos contaminantes. Para un desarrollo sostenible es necesaria la adecuada elección de materiales, de las técnicas de construcción y de los sistemas de gestión en el proceso de diseño porque pueden contribuir de manera decisoria en términos de reducción del impacto ambiental.

En Europa existe una gran aceptación de las placas prefabricadas alveolares de hormigón debido a su alta resistencia y relativamente poco peso y, también, por su rapidez de montaje. Pero si las comparamos con las placas prefabricadas alveolares (alivianadas) de madera, observamos que: las que están hechas de hormigón pesan 17 veces más que la madera y emiten 16 veces más  $\text{CO}_2$  que las placas de madera y no lo almacenan, mientras que la madera almacena una tonelada de  $\text{CO}_2$  por cada metro cúbico. Si las comparamos con los tableros contralaminados, tiene menor coste medioambiental la placa alveolar debido a que su sección optimizada hace que la cantidad de madera sea menor, a pesar de que necesite añadir aislamiento. Así tenemos que con luces de hasta 5m de longitud el coste energético del tablero contra-laminado es un 30% superior a la placa alveolar y para luces de 8 metros es un 50% superior y más aun si aumenta la longitud de la luz. Por lo que concierne a la obtención de la madera para uso estructural, es considerable la cantidad de la madera del árbol que se aprovecha, constituyendo un 28%. Para los elementos de escuadrías menores como rastreles se aprovecha hasta un 38% y en el caso de la madera contra-laminada y las placas alivianadas hasta un 49,5% de la madera del árbol (Wadel, 2010), lo que supone un aprovechamiento mucho mayor con respecto a otros tipos de estructuras de madera.

Teniendo en cuenta lo anterior, he llevado a cabo una investigación que se propone evidenciar las características de las placas prefabricadas de madera, analizando desde el material que se emplea, pasando por el proceso de construcción, hasta como se montan en la obra, lo cual me permitirá conocer a fondo a este tipo de estructuras para posteriormente proponer una alternativa optimizada de sus uniones.

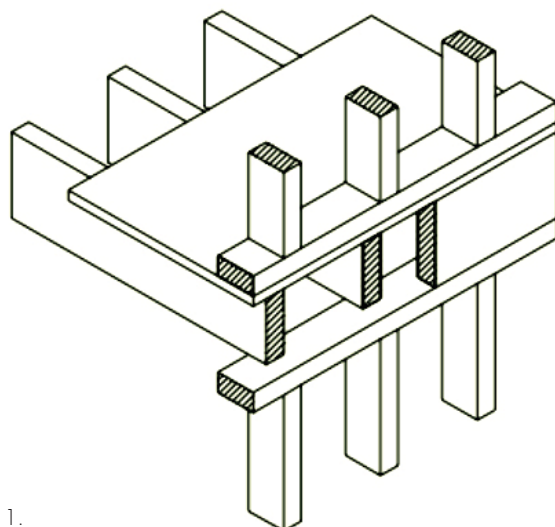
He estructurado la memoria de la investigación en nueve capítulos, aportando documentación suficiente sobre los distintos aspectos de las placas para, con solidez, poder ofrecer una propuesta. El primero trata de revisar los antecedentes de las placas de madera, aquellos sistemas que se llevaron a cabo entre los siglos XIX y XX, como los llamados Emy, Stephan y Hetzer. También abordo el tema de la industrialización de la madera y los nuevos productos de esta que se han derivado de los avances tecnológicos y de las necesidades contemporáneas. En el segundo capítulo me centro en la descripción de los forjados de

madera, detallando su funciones y requerimientos y clasificando los tipos de estructuras de madera con el objeto de poder ubicar y caracterizar según los esfuerzos las placas que nos ocupan. En este capítulo también identifiqué los distintos tipos de placas prefabricadas según los elementos que las compongan y la disposición de estos, a la par que describo dichos elementos. Seguidamente, doy una perspectiva de los modelos de placas presentes en la actualidad en el mercado, mencionando los nombres de las empresas que las fabrican y describiendo las características propias de cada una. En el tercer capítulo preciso cómo se fabrican las placas, en concreto, las de la empresa Lignatur, por ser la que mayor información ofrece sobre este proceso. En un cuarto capítulo describo con detalle los materiales que constituyen la placa: sus propiedades estructurales, en las que me fijé para saber el tipo de uniones que requiere la placa, el comportamiento al fuego, el rendimiento y la absorción acústicos y la ubicación de instalaciones. Tras este, el siguiente apartado muestra unas obras de referencia que emplearon las placas de madera para su estructura: la escuela superior suiza para ingeniería de la madera y el Waingels College. Entrando en la parte de aspectos más prácticos, en el sexto capítulo llevo a cabo una comparación entre factores de los modelos de placas estudiados, como son la resistencia y el peso, las posibilidades de producción, la elección del material, entre otros. En el séptimo capítulo hago observaciones sobre el modo de optimizar las uniones de las placas que he extraído por medio de un análisis estructural con software y seguidamente, en el octavo apartado, paso a hacer mi propuesta, de la que ofrezco gráficos y a la que someto a un análisis estructural y a un ensayo. Finalmente, encontraremos la discusión y las conclusiones de la investigación.

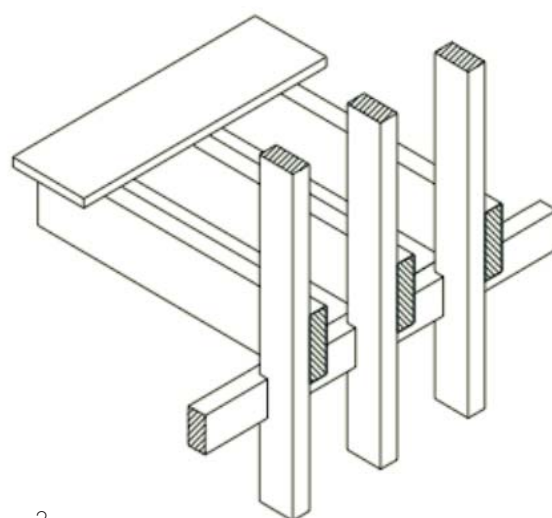
Si la mayoría de los capítulos son de cariz teórico, es porque se centran en investigar la elevada multiplicidad de características que hay que tener presentes en la construcción de la placa, por lo que debe tenerse presente este hecho si se nota cierto desequilibrio entre el volumen escrito de la parte teórica y la práctica. Aún así, mucho del valor de la parte práctica no se plasma en la escritura, sino en el tiempo y el esfuerzo empleado en la elaboración de la probeta, en las pruebas que he realizado y en el análisis de los resultados.

## **ENTRAMADOS DE MADERA PARA FORJADO Y CUBIERTA EN LOS SIGLOS XIX Y XX**

1. *Platform frame*
2. *Balloon frame*.



1.



2.

En 1830 Norteamérica desarrolló un sistema de entramados de madera que nació de la evolución de construcción de viviendas urbanas el cual ha perdurado hasta la actualidad. Estos sistemas consistían en entramados livianos de madera que podían ser de dos tipos:

- *Platform frame*. Este sistema permitía construir los entramados de pared de la primera planta que a su vez servían de apoyo para la planta superior.
- *Balloon frame*. Se construía un entramado de dos pisos en donde las jácenas del forjado de la segunda planta se clavaban en los montantes. La estabilidad de toda la estructura la conseguían por medio de la diagonalización de los montantes, los cuales también eran de madera.

Una vez construido el entramado se forraba con tablas de madera o con otros materiales ligeros que generalmente era en sentido horizontal, lo cual ayudaba aún más a resistir los movimientos horizontales. Este sistema se impulsó notablemente por el éxito que tenía la autoconstrucción en la arquitectura doméstica de Estados Unidos, ya que siendo un entramado ligero se empleaban listones relativamente pequeños, de 10mx5cm, de fácil manejo, de tal forma que el sistema podría ser totalmente construido por un sólo hombre con una sierra y un martillo. Esta técnica se extendió hasta los países escandinavos e incluso hasta gran Bretaña, donde Walter Segal ideó un procedimiento que consistía en usar los andamiajes y soportes incorporándolos en la estructura principal del entramado a medida que se completaba la obra.

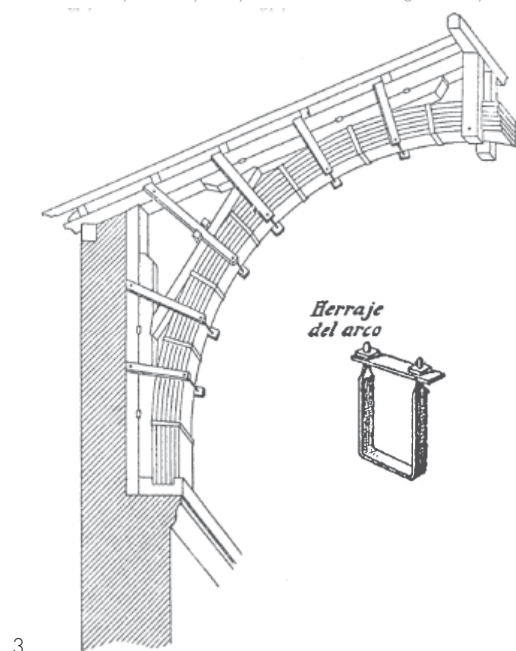
La industria de los prefabricados de madera como es la de los tableros es relativamente reciente (desde los años treinta y cuarenta). Como explicaré en el siguiente apartado, debido a las necesidades que demandaba la primera guerra mundial, se desarrollaron con gran fuerza e ingenio las estructuras de carpintería armada, utilizada desde la antigüedad para cubrir grandes luces (García Navarro, 2003). Estos sistemas se han ido perfeccionando y evolucionando a través de la tecnología, de modo que las diagonalizaciones se sustituyen por placas resistentes que funcionan como diafragmas, las estructuras de madera maciza por montantes y jácenas que funcionan a partir de tableros chapados de madera y aglutinados de viruta. Principalmente, los tableros de madera se emplean sobre todo para revestir y formar superficies lisas rápidamente y también se aprovechan como elemento estructural para proporcionar rigidez en un entramado relativamente flexible. En el sistema *balloon frame* es donde más se usan los tableros contrachapados los cuales están formados por láminas de números impares dispuestas de manera que la dirección de las fibras esté en sentido perpendicular a la lámina siguiente.

### SISTEMAS EMY, STEPHAN Y HETZER:

El coronel francés Emy en el siglo pasado ideó una forma para construir estructuras curvas mediante varias tablas que están unidas de plano, una encima de otras, enlazadas y trabadas con pasadores, tochos de madera y bridas metálicas. De esta manera se constituía la estructura inferior de la cercha con la parte superior curvo o recto que se encepaban con brazos dobles de madera (Figura 6).



## 3. Sistema Emy.

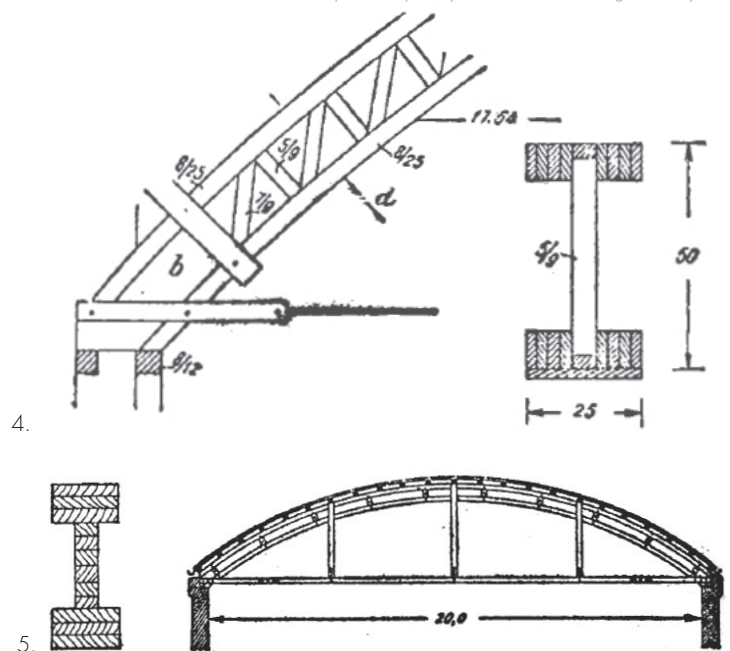


En 1912 los sistemas de Stephan y Hetzer (García Navarro, 2003) se basaron en las estructuras metálicas en donde con un consumo mínimo de material se lograron construir grandes naves industriales y estaciones de ferrocarriles. El sistema de celosía arqueada de Stephan consistía en unir entre sí dos arcos por una celosía encepada con tacos metálicos; las correas se asentaban en los arcos y el empuje que causaba el conjunto era absorbido por un tirante que iba de extremo a extremo (Figura 7). El ingenioso sistema del carpintero Hetzer significó un gran paso en este tipo de estructuras ya que reformuló la solución Emy.

El sistema de Hetzer (íbid), en lugar de unir láminas de tablas con pasadores y bridas metálicas, las unía con colas de caseína, con las que lograba estructuras sin límite dimensional que solucionaban luces mucho más grandes, unificando la pieza y haciendo que cada uno de sus elementos trabaje solidariamente, aprovechando mejor el material desde el punto de vista resistente. El conjunto de Hetzer se formaba por un elemento arqueado de sección en doble T que se lograba encolando tablas en posición horizontal. Todo el conjunto se fijaba en los extremos inferiores por un tirante metálico. También sacó partido de las distintas partes de la sección del tronco, aprovechando al máximo el material y disminuyendo secciones, ubicando la albura en la parte intermedia de la doble T y el duramen hacia los extremos, puesto que la albura flexiona más que el duramen. Hetzer seleccionaba distintas clases de madera según fueran los esfuerzos solicitados, de manera que para tracción empleaba abeto y para compresión usaba madera haya secada por medio de estufa. Con este sistema se construyeron estructuras en 1910 que llegaron a cubrir luces de hasta 45m con una articulación como es el caso de la sala de máquinas de la exposición de Bruselas (íbid). Este sistema es uno de los que más aportó a las estructuras actuales.

En la actualidad, en Norteamérica, para construir viviendas que requieren soluciones de menor envergadura el sistema no ha cambiado mucho, aunque para usar la parte de la cubierta como desván, se ha sustituido el pendolón central. También este sistema ha evolucionado de tal manera que se han mejorado notablemente sus propiedades mecánicas resultando un material prefabricado con altas prestaciones estructurales, como es el caso de los paneles contra laminados encolados.

4. Sistema Stephan
5. Sistema Hetzer



## LA MADERA INDUSTRIALIZADA

En la industria de la construcción una de las tecnologías que más ha avanzado es la de la madera, que ha producido elementos de gran formato a escala industrial y ha llevado a que se desarrollen nuevos sistemas en los últimos años. Una de los motores principales de este progreso es la necesidad de generar materiales con mejores prestaciones, hecho que ha llevado a conseguir productos prefabricados de madera. Cabe destacar que, además y en general, la tecnología nos ha brindado con los productos prefabricados elementos controlados numéricamente para un orden de transporte, montaje e instalación; con sus respectivos agujeros para cables y ductos de instalaciones, al igual que huecos para las puertas y ventanas. Veamos a continuación algunos casos de innovaciones en el terreno de los productos prefabricados de madera para la construcción.

Los paneles sándwich (figura 6), son prefabricados con cualidades que los sistemas de entramados ligeros no tenían. Generalmente, los forman tres capas: una interior que sirve de aislante térmico y acústico y otras dos exteriores que son superficies que quedan a la vista con mejores acabados. Dependiendo de si es para cubierta, pared o forjado, se pueden variar los espesores y materiales de este panel. Otros producto prefabricado que mantiene la solución de Hetzer pero adaptado a las nuevas tecnologías es la viga doble T que para las alas emplea el PSL (*Parallel Standard Lumber*) o el LVL (*Laminated Veneer Lumber*), y para el alma se usa el tablero contrachapado o el OSB (*oriented standard board*), los cuales tienen una longitud que por razones de manipulación y transporte no suele pasar de 24m. Sus cantos miden entre 15 y 76 metros.

El *Laminated Veneer Lumber* o madera microlaminada forma parte de una serie de productos estructurales que se han desarrollado mediante la elaboración de chapas de madera encolada en láminas que están una encima de la otra, con las direcciones de sus fibras en paralelo. Estas láminas, que miden entre 2,5 y 4,8 milímetros, son un material con el cual se fabrican cajas pueden trabajar como vigas y columnas con resistencias muy altas, llegando a compararse con soluciones metálicas. También se pueden elaborar vigas doble T con este producto, pero para el alma se usan tableros de fibras orientadas, (figura 7). La ventaja de estos elementos comparados con la madera maciza es que tienen una gran capacidad de resistencia a la flexión, la cual duplica a la resistencia de la madera maciza convencional. Una de las cualidades más sobresalientes es el poder gozar de gran rigidez con un peso propio muy reducido. Es precisamente, por este motivo que las soluciones con madera laminada han tenido un gran impacto en la construcción de Norteamérica, por lo que se ha llegado a preferir este material a la madera maciza en la elaboración de vigas secundarias de los forjados.

- 6. Panel sándwich.
- 7. Biguetas doble T



6.



7.

Existen elementos portantes prefabricados para paredes, forjados y cubiertas, que pueden ser macizos o por capas, resultando verdaderas estructuras sándwich. Utilizando el mismo concepto de la madera laminada y microlaminada se creó el tablero llamado *Cross laminated Timber* (TLC) el cual está conformado por varias láminas de madera pero con la dirección de las fibras perpendiculares entre ellas. Una de sus principales características es su resistencia, ya que todos sus elementos trabajan como una sola pieza, lo que les confiere gran aptitud para actuar como muros de carga, forjados o cubiertas, en viviendas o en construcciones industriales. Otra característica que sobresale es que son muy flexibles y permiten insertar puertas y ventanas durante e incluso después de que la obra haya finalizado. (García Navarro, 2003)

El caso que más nos interesa y que trabajaremos a fondo en este estudio es el de las placas prefabricadas de madera para forjado y cubierta que incluyen una mezcla de los sistemas antes descritos, con la posibilidad de seleccionar los tableros y placas más aptas para el uso específicamente en forjados.

## **FORJADOS DE MADERA**

## DEFINICIÓN

Los forjados de madera son entramados generalmente horizontales que constituyen la separación estructural entre plantas o cierre de las mismas, dando su cara superior el suelo y su cara inferior el techo.

Los forjados como elementos estructurales deben cumplir las siguientes exigencias:

1. El forjado debe resistir su propio peso y dependiendo del caso, la carga de uso, con el debido coeficiente de seguridad, debe producir una flecha que no exceda el trescientosavo de la luz.
2. Debe atar horizontalmente los muros y pilares y debe transmitir los esfuerzos horizontales a los puntos fijos y a la cimentación, trabajando como un sólo cuerpo garantizando la estabilidad del edificio.

A más de funciones estructurales los forjados de madera también deben cumplir otras funciones tales como:

1. Servir de apoyo a las capas del pavimento.
2. Proporcionar aislante térmico, acústico y húmedico.
3. Permitir el paso de conductos de instalaciones eléctricas, fontanería, calefacción, etc .
4. Servir de sustento para la colocación de cielorraso, el cual debe proporcionar una adecuada difusión de la luz artificial y natural.

Los entramados de madera para forjado son ligeros y de fácil construcción, pero existen factores que hay que tener en cuenta, como puede ser su baja durabilidad sin el apropiado mantenimiento y protección, y el alto costo (salvo en las construcciones rústicas) de un sistema que permita añadir un aislante acústico.

Los forjados han ido evolucionado mucho en los últimos años para satisfacer las exigencias de los diversos usos. Así, han ido apareciendo combinaciones con capas de diferentes materiales, como hormigón proyectado, placas de hormigón para aumentar su masa e incrementar su aislamiento acústico al ruido aéreo. También se han agregado: laminas elásticas para minimizar el ruido de impacto y vibraciones; mantas de fibra de vidrio para mejorar las cualidades térmicas y acústicas; planchas de cartón-yeso en su cara inferior para mejorar su comportamiento al fuego. Tanto el comportamiento al fuego como el aislamiento acústico constituyen dos de los temas que más se investigan en la actualidad, como podremos comprobar con los datos que ofreceré más adelante sobre las placas analizadas.

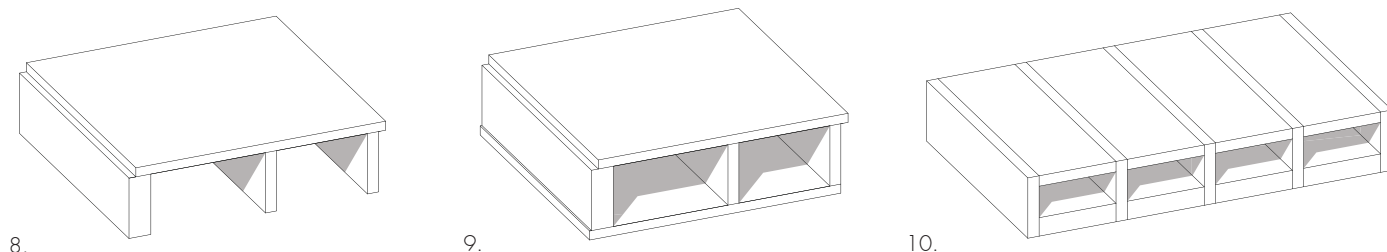
## CLASIFICACIÓN DE LOS TIPOS ESTRUCTURALES DE MADERA

Con el objeto de situar e identificar tipológicamente las placas prefabricadas de madera, a continuación se ha realizado una agrupación práctica sobre la población de estructuras existentes. La clasificación responde al tipo de esfuerzo (o conjunto de esfuerzos) que se ha considerado característico del grupo, en tanto tiende a ser el principal factor condicionante del diseño de la estructura.

Axial	Cerchas Básicas	Nervios curvos Nervios rectos
	Cerchas compuestas	Pórticos de celosía Cerchas peraltadas Arcos triangulados
	Triangulaciones planas no paralelas	Horizontales Verticales
	Triangulaciones Especiales	Sistemas de una superficie Sistemas de varias superficies Cerchas cruzadas
Axial + Cortante	Plegaduras	Elementos planos nervados Elementos planos superficiales Elementos planos triangulados
	Membranas	Nervadas Superficiales Reticuladas

Flexión	Sistemas tridimensionales ortogonales	Entramados pesados Entramados ligeros
	Pórticos paralelos	Elementos no doblados Elementos doblados
Flexión + Cortante	Emparrillados planos	Parrillas ortogonales Parrillas oblicuas
	Placas	Placas superficiales Placas nervadas
Flexión + axial	Miembros rectos	Pórticos básicos Sistemas en voladizo Formas de transición
	Miembros curvos	Elementos comprimidos Elementos tensionados
	Sistemas soportantes	Jabalconados Suspendidos
	Configuraciones básicas	Conf. elementales Elementos peraltados

- 8. Cajón simple abierto
- 9. Cajón simple cerrado
- 10. Cajón compuesto



## PLACAS PREFABRICADAS DE MADERA PARA FORJADO

### PLACAS NERVADAS

Las placas nervadas son piezas estructurales superficiales de fabricación industrial, que pueden funcionar como forjados o cubiertas. Son elementos multifuncionales con una alta capacidad resistente, de aislamiento acústico y térmico, inercia térmica y equilibrio higroscópico, que conforman, además, una superficie de cierre. Dada su sección optimizada, están especialmente indicados para salvar importantes luces con elevadas solicitaciones de carga. La transmisión de cargas de los elementos de forjados y cubierta se realiza de forma unidireccional.

La placa la forman los siguientes elementos: nervios, caras, hueco o *plenum* y aislantes (AITM, 2014), los cuales definimos seguidamente.

- Nervios: elementos verticales de madera aserrada estructural.
- Caras: elementos horizontales de madera empalmada. Los bordes de las tablas pueden ir machihembrados, para facilitar la formación de los paramentos vistos. Las tablas de las caras vistas pueden incorporar orificios o ranuras para mejorar las prestaciones acústicas.
- Hueco o *plenum*: espacio comprendido entre los nervios o caras, que puede quedar vacío o relleno con aislante.
- Aislante: material que se coloca en el *plenum* para mejorar las prestaciones acústicas y/o térmicas. Los aislantes termoacústicos: disgregantes, de fibra de celulosa, granulado de corcho o arcilla expandida granulada; o de manta o placa, de fibra de vidrio, lana de roca, espuma de poliuretano o poliuretano expandido.

Según AITM (2014) existen los siguientes tipos de placas:

- De cajón simple cerrado: elemento modular formado por dos nervios y dos paramentos que se unen entre sí mediante encolado a tope quedando enrasados los nervios con los paramentos. Se unen a los cajones mediante machihembrado, ranurado en un lado y lengüeta en otro.
- De cajón simple abierto: elemento modular similar al anterior pero solamente lleva el paramento inferior. Se unen a otros cajones simples mediante rebajes realizados en la parte donde se introducen lengüetas o llaves.
- De cajón compuesto: elemento modular formado por dos nervios y dos paramentos que se unen entre sí mediante encolado a tope quedando los nervios por debajo de los paramentos. Las tablas de los paramentos van machihembradas para unirse a otros módulos y formar paramentos continuos.

- 11. Elemento cajón
- 12. Elemento superficie
- 13. Elemento cáscara



## MODELOS

En el mercado europeo existen varios tipos de placas alveolares. Algunas están enfocadas a resistir luces más grandes como es el caso de la placa fabricada por Kielsteg, en la que se usan tableros contrachapados para sus nervios y madera maciza en las caras. Otras, como la de la empresa Lignatur, destacan por el alto rendimiento acústico, térmico y comportamiento al fuego de sus placas. En el caso de las placas de la empresa Lignotrend, estas facilitan el paso de instalaciones y se adaptan para combinar con aislamientos, láminas, hormigón, pisos flotantes, etc.

### LIGNATUR

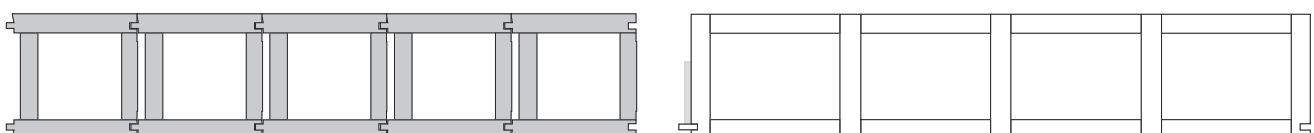
Son placas de madera prefabricadas que poseen altas cualidades estáticas y por su peso propio muy reducido pueden salvar grandes luces con elevadas exigencias de carga. Al ser piezas alveolares permiten incorporar instalaciones y materiales aislantes como lana mineral, fibras naturales u otros. Estos elementos pueden crear superficies continuas en donde no es necesario un revestimiento pero también trabajan como sustento para otro tipo de acabado. Se pueden aplicar como placas de forjado, cubierta y pared. El sistema es de tipo abierto el cual se adapta a otros sistemas constructivos de otros materiales tanto macizos como ligeros, gracias a la gran variedad de dimensiones disponibles (Lignatur AG, 2014).

Características:

- Resistencia al fuego hasta REI 90
- Propiedades acústicas
- Propiedades de aislamiento térmico

Elementos que la constituyen:

- Elementos en cajón (LKE): uniones machihembradas. Anchura 195 mm; longitud máxima: 12 m; canto: 80-320 mm. (Figura 11)
  - Elementos de superficie (LFE): uniones con lengüeta. Anchura: 514 o 1000 mm; longitud máxima: 16 m; canto: 120-320 mm. (Figura 12)
  - Elementos de cáscara (LSE): especialmente concebidos para cubiertas inclinadas. Uniones con lengüeta. Anchura: 514mm; longitud máxima: 12 m; canto 206 mm. Figura 13.
- Existen diseños específicos para bóvedas de cañón, techos acústicos, etc.





## 14. Placa Kielsteg



14.

**KIELSTEG**

La empresa austriaca Kielsteg ofrece un sistema de madera que tiene la capacidad de soportar cargas ligeras y cargas pesadas y que puede trabajar como elementos de cubierta y forjado, solucionando fácilmente grandes luces, pudiendo llegar a cubrir espacios hasta de 30m de largo. Tiene una configuración celular lineal sin refuerzos transversales que está formada por listones de madera de abeto en sus caras superior e inferior, conectadas en zigzag por tableros contrachapados o de OSB que inicialmente se clavan para montarlos, luego se encolan y prensan, adquiriendo su resistencia. Los tableros adquieren una forma similar al casco de un barco lo que les brinda estabilidad transversal. Estos elementos no permiten añadir aislantes entre sus cavidades.

Un aspecto importante de estas placas es su capacidad para salvar grandes luces lo cual maximiza la flexibilidad de distribución del espacio, hecho que satisface la demanda de la arquitectura de reorganizar los espacios a lo largo de la vida útil del edificio. Otro aspecto destacable es la capacidad para crear elementos en voladizo, también permiten incluir las instalaciones en el interior entre los nervios en zigzag. Se pueden crear superficies terminadas que no necesiten revestimientos. Para viviendas unifamiliares con condiciones de carga de  $4\text{kN/m}^2$  bastaría con paneles de 190mm de espesor, que podrían cubrir luces de 7,5 m.

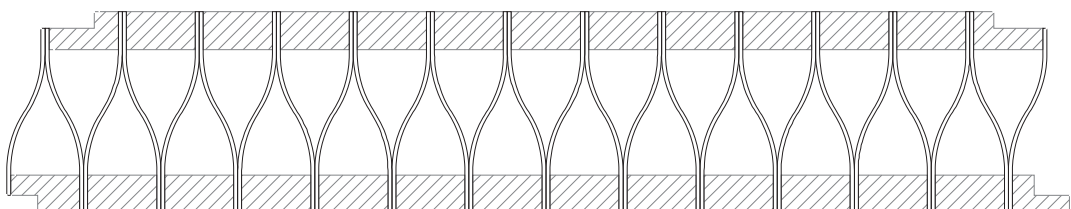
Los paneles Kielsteg vienen cortados y con control numérico, listos para ser montados en obra. Su ancho tipo es de 1,2 metros, simplificando la construcción de los forjados en los edificios.

Superficie de calidad industrial, calidad visible, cepillada y tratada.

Ancho del elemento: 1,200 mm

Altura de Elemento: 228 a 800 mm

Longitud de 5,00 hasta 30,00 m





La alemana Lignotrend ofrece un sistema que posibilita la producción industrial totalmente automatizada. Consisten en la unión mediante cola de elementos que pueden o no crear superficies lisas. Una característica destacable es que puede ser un semiproducto que sirve de sustento y que puede ser terminado en obra, pudiendo ser totalmente terminados si son cubiertos con tableros laminados, que no necesitan un posterior recubrimiento. Son elementos regularizados dimensionalmente para disminuir el desperdicio de corte, a diferencia de los anteriores productos las caras superiores e inferiores se crean mediante listones que van en sentido transversal a los nervios en el caso de los productos semiterminados. Forman superficies que pueden llegar a solucionar luces de hasta 18 metros y los semiterminados de hasta 12,5 metros. La transmisión de las cargas, como todos estos forjados, se transmiten principalmente de manera unidireccional y funcionan muy bien como elemento de arriostramiento.



## 17. Placa Novatop, montaje.



17.

**NOVATOP ELEMENT**

Novatop ofrece unos componentes huecos con una estructura de nervaduras elaborada. Esta placa destaca por un peso propio ligero y con una carga estática muy alta logrando solucionar luces de gran magnitud. No sólo puede trabajar unidireccionalmente; gracias a su entramado en sentido transversal también trabaja bidireccionalmente. Se puede usar como forjado y cubierta, que pueden ser suministrados con tableros en sus caras con calidad visual, comúnmente dotados con un revestimiento de tablero multicapa de abeto blanco acústico ya realizado en fase de su producción. Una característica destacable de estas placas es que por medio del uso de este tablero se logran gran resistencia con una gran optimización del material, haciendo de estas placas más ligeras que las anteriormente señaladas.

Las placas están formadas por tableros de SWP (*Solid Wood Panel*) en donde se construye un entramado de piezas unidas ortogonalmente a media madera, la altura de estas piezas puede variar según la luz requerida, este entramado se adhiere al tablero inferior mediante pasadores que actúan como guías para el montaje y colas. De la misma forma se añade la cara superior. La fabricación de estos elementos, el cual está casi totalmente automatizado, se hace en República Checa. Existe la posibilidad de fabricar placas singulares según sean las exigencias del proyecto.

**Anchos**

1 030, 2 090, 2 450, máx. 2 450 mm

**Largos**

Conforme a la documentación de proyecto, como estándar 6 000, máx. 12 000 mm

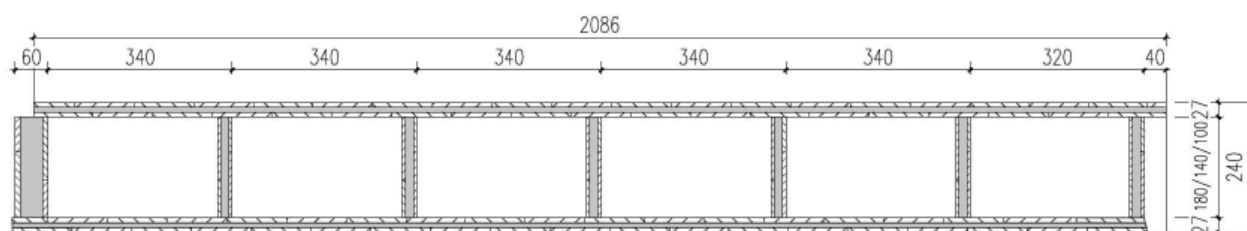
Los elementos tienen la certificación ETA hasta la longitud de 12 m.

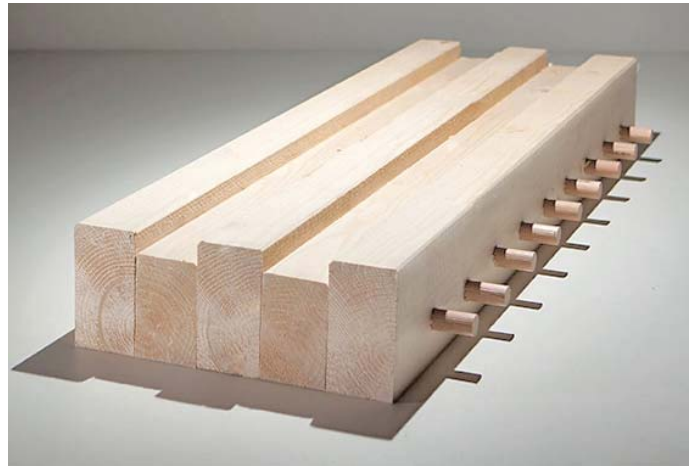
**Altos**

160, 180, 200, 220, 240, 280, 300, 320, máx. 400 mm

**Calidades del tablero inferior del elemento (SWP)**

Visual o constructiva (no visual)





18.

### BRESTA®

Este es un sistema de madera para vivienda unifamiliar. Lo conforman elementos de madera unidos verticalmente por una clavija que va de un extremo a otro de la placa, permitiendo una resistencia longitudinal y uniendo mediante presión todos los tablones. La clavija es de madera dura de modo que resiste las fuerzas de fijación entre elementos. Este sistema no utiliza colas ni uniones metálicas. La fabricación es totalmente automatizada: se disponen verticalmente los tablones y mecánicamente se perforan e introducen las clavijas o pasadores, lo cual permite una placa de cualquier ancho. Por ser un producto semielaborado permite una construcción ecológica, aspecto, probablemente, más importante de estas placas.

Sobre sus cualidades sostenibles cabe destacar que la placa Bresta:

- Se fabrica con maderas que están cerca de la fábrica por lo que las distancias de transporte están garantizadas.
- Los tablones son un subproducto de los aserraderos, por tanto, son muy baratos.
- El secado al aire de la madera permite un bajo consumo de energía.
- La unión de los tablones es sin pegamento ni metal.
- No utiliza químicos impregnados o tratados.
- Estos elementos pueden ser utilizados tanto para paredes como para forjados y cubiertas.
- Se realizan ranuras en su cara inferior para mejorar sus propiedades acústicas.

(Bresta, 2014)

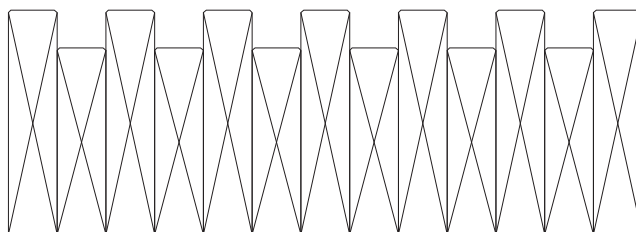
### Dimensiones

Pasador: desde 18mm

Ancho: de hasta 3m

Largo: hasta 11 metros económicamente recomendado, para luces más largas a pedido.

Espesor: Dependiendo de la luz de 8 a 36cm económicamente recomendado, más altas a pedido.



## **DESCRIPCIÓN DE MATERIALES**

19. Tabla 1 Medidas y clasificaciones más usadas de la madera aserrada de coníferas.

Tabla 1.

ESCUADRÍA	ESPEJOR (mm)	ANCHO (mm)
LISTÓN	10 - 20 - 30 - 40	10 - 20 - 30 - 40
TABLILLA	10 - 15 - 20 - 25 - 30	50 - 70 - 90
TABLA	20 - 30 - 40	100 - 120 - 150 - 180 - 200
TABLÓN	50 - 75 - 100	100 - 120 - 150 - 200 - 250 - 300
VIGA (para construcción)	150 - 200 - 250 -	150 - 200 - 250 - 300 - 350 - 400
	300 - 350 - 400	



## MADERA

La madera más empleada para este tipo de productos es la que se extrae de bosques de coníferas pero cada fábrica intenta nutrirse del tipo de árbol que se encuentra más cercano, según las leyes medio ambientales, nacionales e internacionales. Gracias a las regulaciones se usa madera de especies que tienen un rápido crecimiento (30 años) para que cumplan la condición para ser un recurso renovable. También llamadas maderas blandas, son maderas ligeras (500 Kg/m<sup>3</sup>) y deben ser definidas como estructural en el Eurodigo 5, del tipo C24.

Los tipos de madera que se utilizan algunas de las fabricas son:

- Abeto rojo (Picea abies Karst) procedente de Austria, Alemania, Suiza, en el caso de la empresa Lignatur.
- Abeto rojo procedente de Austria, en el caso de Kilesteg

Las dimensiones de las tablas son estandarizadas en los aserraderos y las encontramos definidas en el documento del Ministerio de Agricultura y Pesca, Confemadera, donde se usan tablas que se adaptan a las diferentes necesidades estructurales. A pesar de procurar que la extracción sea de la zona más cercana a los aserraderos, se pueden obtener maderas bajo pedido de cualquier punto de Europa.

Se pueden identificar cinco grupos de las medidas más demandadas por las industrias de este tipo de productos, como se señalan a continuación:

Pequeñas escuadrías: listón y tablilla.

Escuadrías medias: tabla.

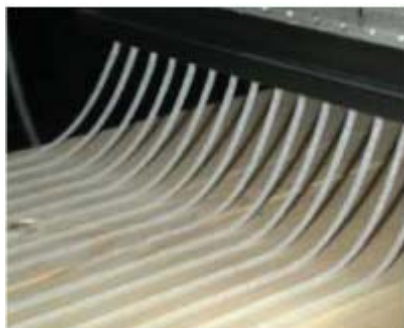
Grandes escuadrías: tablón.

Madera aserrada para la construcción: vigas.

En la tabla número 1 se detallan las dimensiones más empleadas por los productos más comunes de la industria de la madera. En cuanto al largo de madera aserrada no se ha tomado en cuenta, ya que se ajusta fácilmente por medio de una unión dentada. Los largos más comunes se ajustan para su fácil manipulación y sobre todo para que quepa en el transporte y minimizar gastos.

(Confederación Española de Empresarios de la Madera, 2005)

20. Aplicación del adhesivo.  
 21. Características de las colas más usadas para placas alveolares. (FPIInnovations)



20.

21.

Item	Units	Adhesive		
		PRF*	EPI**	PUR***
Cured adhesive colour		Dark	Light	Light
Component		Liquid, two components	Liquid, two components	Liquid, single component (isocyanate pre-polymer)
Solids content	(%)	50	43	100
Wood moisture content (MC)	(%)	6 - 15%	6 - 15%	> 8% optimal 12%
Target application rate (single spread)	(g/m <sup>2</sup> )	375 - 400 (75 - 80 lb/msf)	275 - 325 (55 - 65 lb/msf)	100 - 180 (20 - 35 lb/msf)
Assembly time	(min)	40	20	45
Pressing time	(min)	420 - 540	60	120
Applied pressure	(psi)	120	120	120 - 200
Cost ****	(\$/lb)	2.0	3.5	4.8

## ADHESIVOS

Una de las principales características de las placas objeto de este estudio es que como material de construcción es uno de los que menos afecta al medio ambiente y a la salud humana, siendo reciclable un 99.4% reciclable, siendo el 0.6% no reciclable debido al adhesivo. En consecuencia, los esfuerzos se centran en mejorar este tipo de materiales.

En la construcción los adhesivos certificados pueden ser de los siguientes tipos:

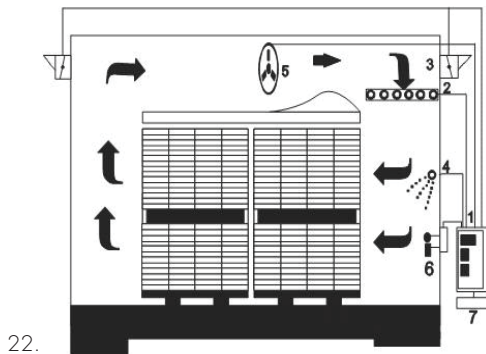
- Fenólicos y aminoplásticos (PRF) que son de color oscuro y se emplean para maderas laminadas.
- Emulsiones de polímeros de isocianato (EPI) que son de color oscuro y se usan para encolar vigas laminadas.
- Poliuretanos de un componente (PUR) son los que se emplean para este tipo de estructuras, así como para los tableros de madera contra laminada. Estos tienen un color blanco y reacciona con la humedad de la madera formando cierta espuma en el momento del encolado. Lignatur usa el pegamento PEGAMENOPUR sin disolventes ni formaldehídos conforme a la norma EN 15425 o EN 301. La cual posee una certificación B de su pegamento, emitido por MPA Stuttgart. En el caso de Kielsteg usa cola MUF que crea emisiones de clase E1.

Para la elección de las colas además del color debe tenerse en cuenta otros aspectos que afectan a la producción, como pueden ser el tiempo y la duración del proceso de encolado, ya que cada cola tiene unas necesidades específicas para el tiempo de presión y de secado. La empresa Suiza Purbond AG recomienda el uso de sus colas del tipo PUR por que no emiten formaldehídos ni compuestos orgánicos volátiles COV, permitiendo a las estructuras que emplean estas colas para que sean recicladas como tableros de partículas o para la generación de energía por medio de la combustión.

Si analizamos el coste, tiempos de secado, tiempos de prensado, color, emisiones, método de aplicación, presión necesaria, las colas del tipo PUR son las que más se ajustan a este tipo de productos, razones por las cuales es la más usada.



22. Ejemplo de cámara de secado de madera  
 23. Diferencia de madera secada natural y artificialmente.



22.



23.

## FABRICACIÓN DE LAS PLACAS

A continuación se han seleccionado las placas de la fábrica Lignatur para describir las fases de fabricación ya que es la que más información proporciona acerca de este tema.

### CORTE Y SECADO

Tanto la cara superior como la inferior están compuestas por tablas que tienen un espesor que va desde los 25 mm a 82 mm. Las tablas verticales tienen un espesor que va desde 27 mm a 80 mm, en algunos casos se usa madera contra-laminada como en la empresa Lignotrend, contrachapado y OSB en Kielsteg. La norma UNE define la madera según su contenido de humedad, en donde para este tipo de estructuras se clasifica como madera secada en cámara. Cuando la madera está recién cortada tiene un contenido de humedad que va desde el 50 al 110%, logrando reducirse hasta un 16 y 18% por medio del secado al aire libre. Para lograr bajar el contenido de humedad requerido en este caso, se realiza un proceso por medio de cámaras de secado que funcionan básicamente con aire caliente ventilado (Figura 22). La humedad de la madera es un factor muy importante a tener en cuenta para la construcción de las placas, puesto que la cualidad higroscópica de la madera causa movimientos si la humedad es diferente en los elementos que la conforman. Se recomienda que entre las tablas no existan diferencias mayores al 5%.

Hay que tomar en cuenta también el lugar y el espacio en donde van a emplearse, ya que puede variar la humedad relativa y la temperatura ambiente. En espacios cerrados y eventualmente calefactados, la humedad equilibrada de la madera debería estar entre el 12 y 14% y en locales donde la calefacción es continua la humedad ronda entre el 10 y 12%, lo que sucede en las zonas frías nórdicas.

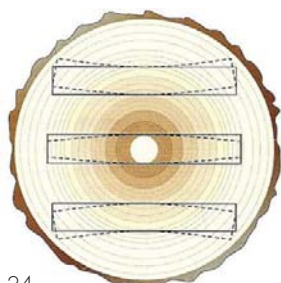
Además, debemos tener presente también el sentido y el tipo de deformaciones de las tablas según la zona del tronco de donde provengan (Figura 24).

### SELECCIÓN Y COLOCACIÓN

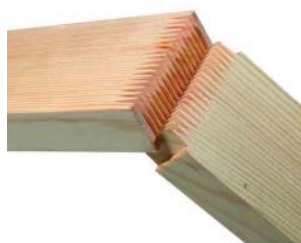
Para generar las diferentes partes de la placa se orientarán las fibras en la dirección principal para las tablas longitudinales de las capas superior e inferior. En estas capas también se toma en cuenta su apariencia. La dirección secundaria de las capas es en sentido transversal y estas irán verticalmente y al interior de la placa. Las capas de las tablas deben ser de las mismas características y propiedades. Lo deseable sería, ya que hay una selección pormenorizada, detectar las tablas de alta calidad y colocarlas en las zonas donde se conoce que irán los puntos de unión o las zonas donde se conoce que va a haber mayores esfuerzos. Hecha la selección de las tablas, se pasa al cepillado individual, lijado que se hace para reactivar la superficie de la madera y así mejorar el encolado (recordemos que el adhesivo PUR reacciona con la humedad de la madera). Para lograr una mejor coincidencia dimensional se debe cepillar las 4 caras. Los cantos de las tablas que van hacia el interior irán encolados manualmente; el rectificado



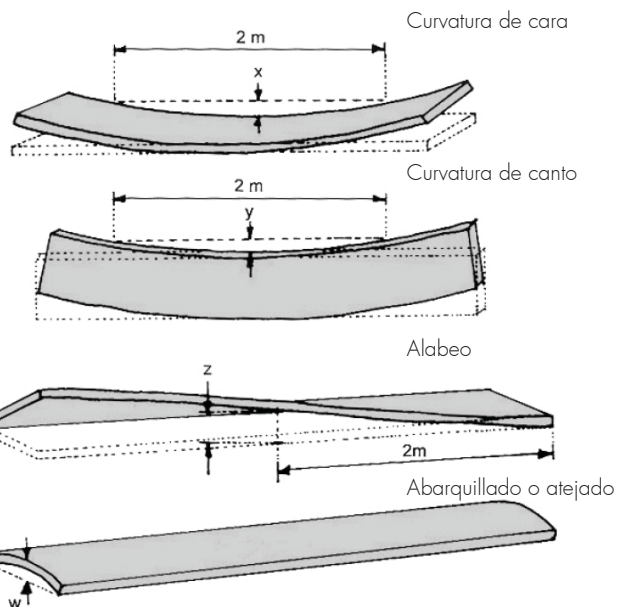
24. Deformación de tablas según las partes del tronco  
 25. Unión dentada.  
 26. Medición de deformaciones (UNE 56544)



24.



25.



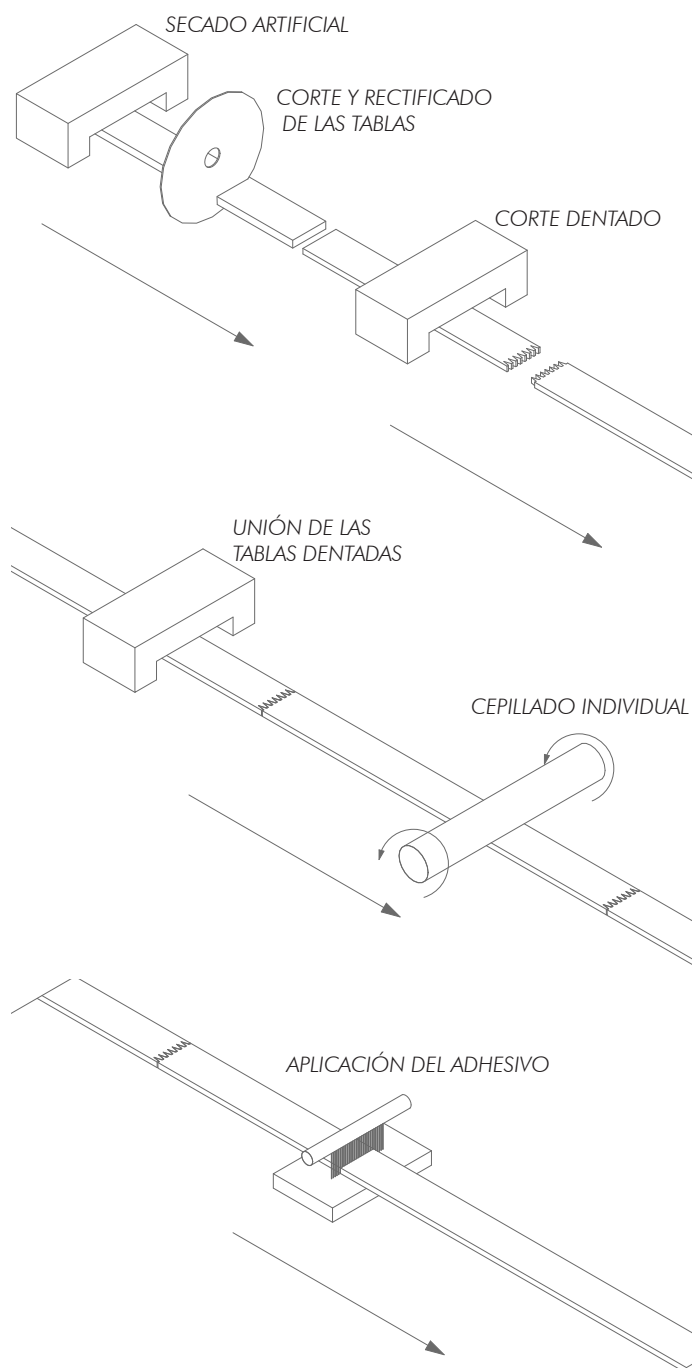
26.

suele ser entre unos 2,5mm y 4mm de grueso. Estas manipulaciones pueden alterar la humedad de las tablas en sus superficies de encolado por lo que se deben controlar y si fuera necesario rectificar. Para unir las tablas longitudinalmente se corta el canto de la punta de la tabla en forma dentada mediante una sierra de rodillo para posteriormente realizar las uniones. De esta manera no existen uniones de canto ni de otro tipo y son igual o más fuertes que cualquier sección de la tabla.

### APLICACIÓN DEL ADHESIVO

En esta fase se debe controlar que las superficies que serán adheridas estén lo más limpias posibles libres de polvo, serrines y libres de agentes repelentes como aceites, grasas que provocarían que bajara la calidad de la unión. El mismo cepillado es una buena limpieza. Se recomienda que la temperatura ambiente de la zona en donde se realiza el encolado no sea inferior a 15° C ya que si es menor podría afectar a su posterior rendimiento. Se debe seguir las recomendaciones de las empresas suministradoras de los adhesivos, ya que la proporción y el modo de aplicación viene muy relacionado con cual se escoge.

Otros aspectos que pueden afectar a la unión de las tablas pueden ser la presión la cual ya hemos comentado anteriormente, la deformación y la pérdida de superficie de contacto entre ellas. Los tipos de deformaciones que se pueden dar en esta fase son las curvaturas de las caras o los cantos estos pueden ser: el alabeo, abarquillamiento, y atejamiento (Figura 26). Lo aconsejable para compensar las deformaciones es alternar las tablas



27. Montaje manual de las tablas Lignatur  
28. Atado de la placa antes de prensar

27.



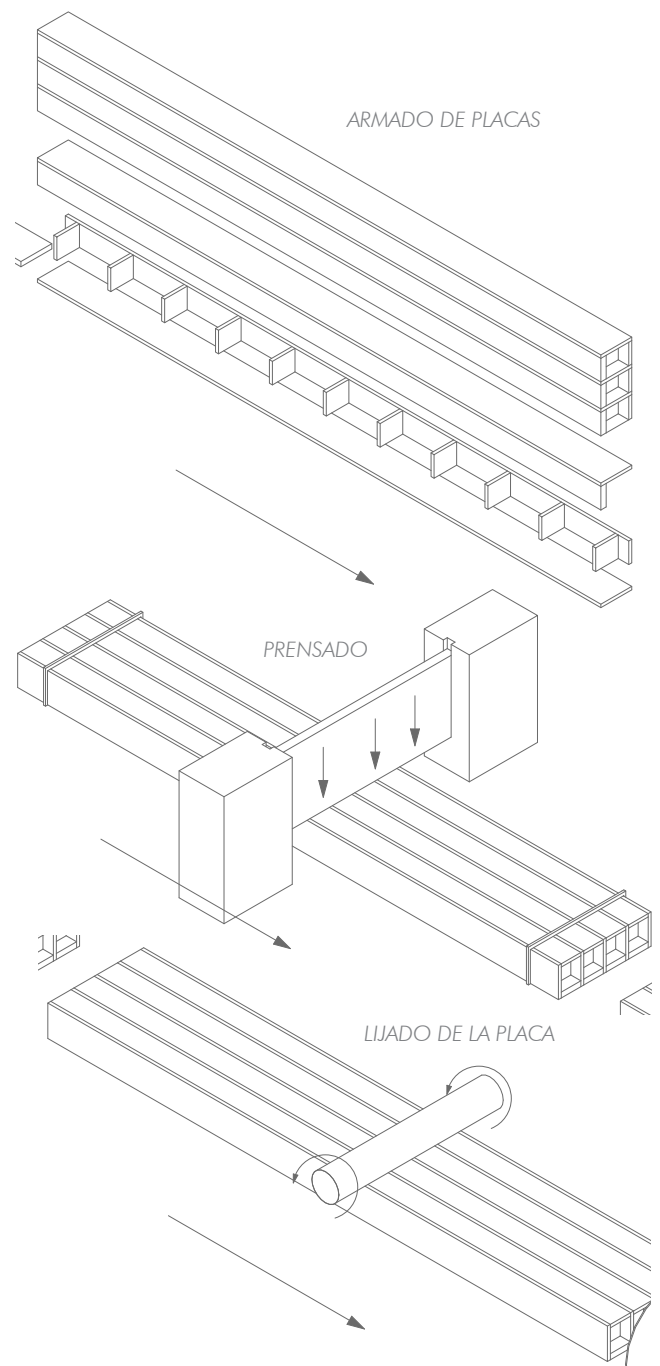
28.



entre la cara superior intermedia e inferior para evitar que se formen curvaturas en las placas. También se recomienda, para evitar grandes deformaciones, el control de la esbeltez y la limitación del largo de las tablas; su continuidad se garantiza por medio de la unión dentada, que se realiza cortando el canto con una sierra de rodillo y luego encolando y adhiriendo como se ha señalado anteriormente. Si se forman superficies continuas en las caras es importante que los cortes no coincidan y estén desfasados a distancias considerables. También la existencia de gemas o las irregularidades por no cepillar los cantos, provoca que la superficie de encolado se pueda ver reducida. Se recomienda que la superficie teórica de contacto no sea inferior a un 80%. A pesar de que se permita a nivel estructural una pérdida de superficie de un 20%, a nivel visual no sería aceptable y lo que se hace es reordenar las tablas de las caras exteriores.

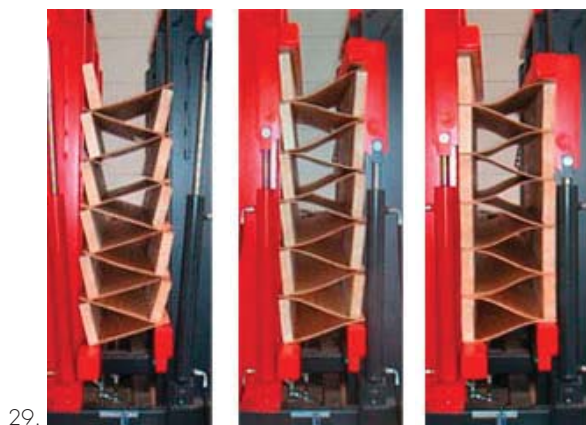
### ARMADO Y PRENSADO

En el caso de la empresa Lignatur el armado de las placas es manual: la placa se construye verticalmente, es decir, con las superficies exteriores hacia los costados; se arman cajas longitudinales con sus respectivos refuerzos transversales (encoladas manualmente), a distancias regulares las cuales estabilizan la placa final; se apilan uniando una con otra compartiendo las tablas contiguas hasta lograr la dimensión preestablecida; más tarde, se sujetan con bridas para voltearlas y dirigir las al paso posterior. En el caso de Kielsteg este procedimiento se logra mediante maquinaria automatizada en espesores de 228 a 800 mm y en longitudes de primas de 17,5 a 35,0 m.

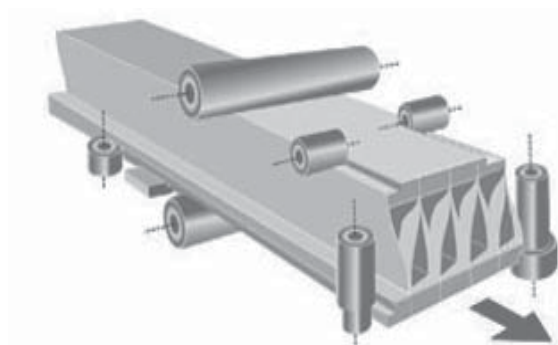


29. Armado mecanizado de placas Kielsteg

30. Esquema de cepillado y frezado de las placas Kielsteg



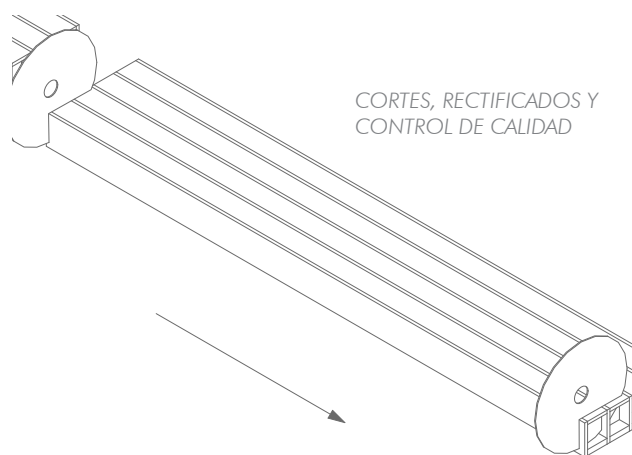
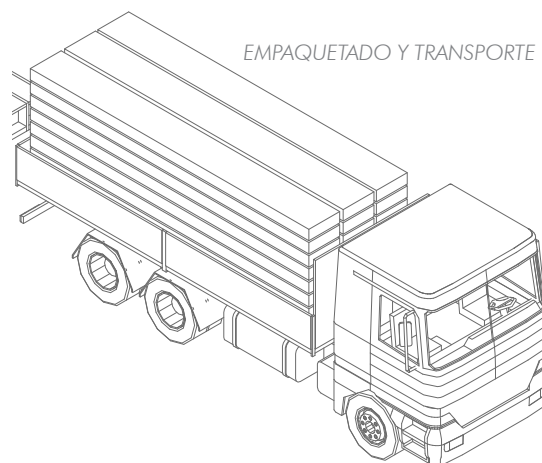
29.



30.

Kielsteg puede hacer los elementos planos o con una curvatura a lo largo de la longitud de los elementos. La máquina es operada por dos trabajadores y tiene una capacidad de producción de unos 40.000 m<sup>2</sup> por año.

Debemos tener presente otros aspectos, como la ubicación de los nudos, los tiempos de los procesos, la temperatura al encolar y el prensado. Al colocar las tablas se intenta que los nudos queden "repartidos" en la viga, y así se evitan posibles puntos débiles que puedan dar problemas de resistencia. Por lo que respecta a los tiempos de los procesos, son importantes en lo que a la producción depende, tiempo de montaje y tiempo de prensado, donde se controla el tiempo de secado de la cola. La temperatura durante el proceso de prensado debería no ser inferior a 15 ° porque hay colas que a temperaturas bajas tardan más en secarse como ya hemos señalado anteriormente. Con el fin de minimizar brechas y separaciones en la tabla, se usa una prensa hidráulica que puede ejercer una presión de hasta 6MPa, para aplicar entre 0,28MPa y 0,55MPa en los elementos de la placa.

CORTES, RECTIFICADOS Y  
CONTROL DE CALIDAD

EMPAQUETADO Y TRANSPORTE



- 31. Agujereado de placas para añadir aislamiento. Lignatur, 2014
- 32. Agujeros para el cuelgue. Lignatur, 2014
- 33. Corte de placas exigidas en el proyecto y almacenado. Lignatur, 2014
- 34. Empaquetado y transporte. Lignatur, 2014



31.

## LIJADO Y ACABADOS

En las últimas fases de la construcción se realiza distintos procesos. Se lleva a cabo un control de nudos y, si es necesario, la superficie es agujereada y se encola un fragmento de la misma madera. También se realizan el fresado de los costados de la placa, dotando de un machihembreado, para facilitar las uniones entre las placas, que también pueden ser de doble ranura y lengüeta añadida. Mediante una sierra de disco se rectifica el principio y el fin de las placas. Con rodillo se lijan las superficies para igualar espesores hasta llegar a la dimensión preestablecida, y para que la superficie sea continua y limpia (Figura 30). Para mejorar las propiedades acústicas, térmicas y de resistencia al fuego se realizan enrejados, perforaciones, cortes para añadir aislantes y material deseado (Figura 31). Se hacen los cortes exigidos de acuerdo al proyecto con maquinaria de control numérico. Para el proceso de colocación del tablero en obra, se realizan agujeros, los cuales facilitaran el cuelgue de las placas para las grúas (Figura 32). Finalmente se realiza un control de calidad visual y control automatizado de la humedad de la placa y se empaquetan y protegen para que siempre estén en condiciones de sequedad durante el transporte y almacenamiento o puesta en obra en el emplazamiento (Figura 34)



32.



33.



34.

## **PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LAS PLACAS**

35. Fotografía de Cubierta Lignatur.  
 36. Ensayo de resistencia de placa Kielsteg.  
 37. Propiedades de maderas coníferas y chopo.  
 38. Tabla de resistencia de la placa Kielsteg con L/300

## PROPIEDADES ESTRUCTURALES

Las propiedades físicas y mecánicas en la madera no son las mismas en todas las direcciones. Se pueden definir tres direcciones principales: axial, radial y tangencial. La axial es la dirección de crecimiento de un árbol, la radial es la perpendicular a la anterior y la tangencial es la normal a las dos anteriores. La resistencia de la madera depende directamente del sentido de sus fibras.

La madera tiene una resistencia a flexión que es muy elevada tomando en cuenta su densidad. En el caso de las coníferas su resistencia se clasifica como C24 (Figura 37) y puede resistir hasta 140 y 300 Kp/cm<sup>2</sup>, la tracción en sentido paralelo a las fibras clasificando la madera resiste entre 80 y 180 kp/cm<sup>2</sup> y en sentido perpendicular a las fibras 30 o 70 veces menos, o sea entre 3 y 4 Kp/cm<sup>2</sup>. La diferencia de comportamiento se la denomina "economía de esfuerzos" ya que en la dirección perpendicular a las fibras un árbol no necesita resistir muchos esfuerzos. Para los esfuerzos de compresión en sentido paralelo a las fibras los valores están entre 160 y 230 Kp/cm<sup>2</sup>, teniendo en cuenta su bajo módulo de elasticidad, que hace que la resistencia a compresión dependa directamente de la esbeltez de la pieza. En el sentido perpendicular a las fibras los valores rondan entre 43 y los 57 Kp/cm<sup>2</sup>, siendo la cuarta parte de la resistencia paralela a la fibra (Peraza y Peraza, 2010).

Las placas prefabricadas objeto de este estudio, que son un producto de madera totalmente industrializado, del que las fábricas productoras proporcionan información detallada obtenida por



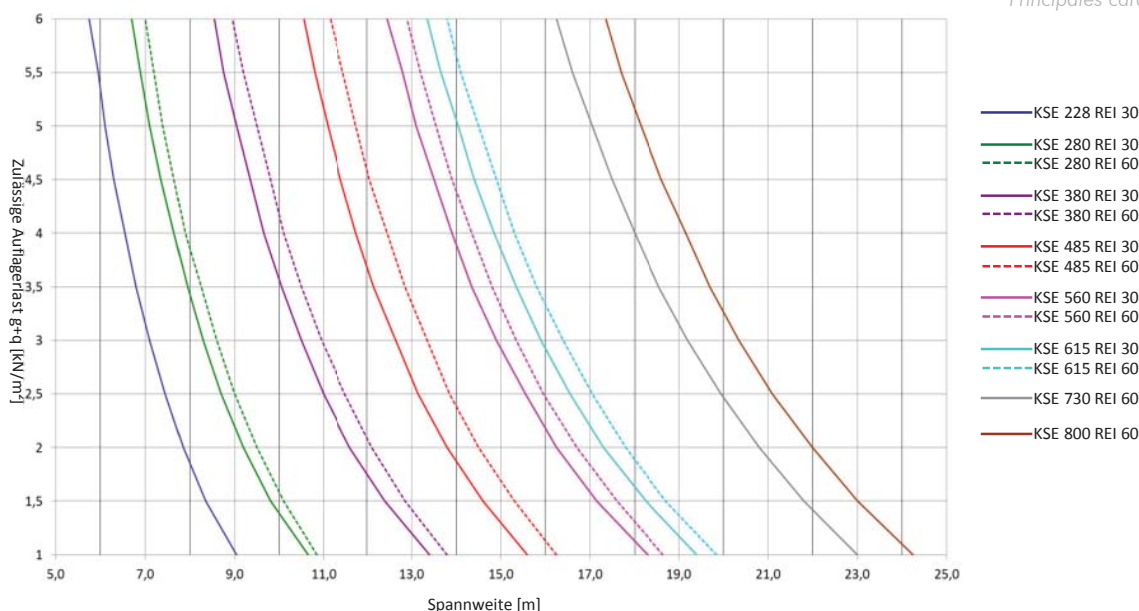
35.



36.

	Especies de coníferas y chopo										Especies frondosas									
	C14	C16	C18	C22	C24	C27	C30	C35	C40		D30	D35	D40	D50	D60	D70				
<b>Propiedades resistentes en N/mm<sup>2</sup></b>																				
Flexión	$f_{b,0}$	14	16	18	22	24	27	30	35	40	30	35	40	50	60	70				
Tracción paralela	$f_{t,0}$	8	10	11	13	14	16	18	21	24	18	21	24	30	36	42				
Tracción perpendicular	$f_{t,90}$	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,9				
Compresión paralela	$f_{c,0}$	16	17	18	20	21	22	23	25	26	23	25	26	29	32	34				
Compresión perpendicular	$f_{c,90}$	4,3	4,6	4,8	5,1	5,3	5,6	5,7	6,0	6,3	9,0	9,4	9,8	9,7	10,5	13,5				
Cortante	$f_{v,0}$	1,7	1,8	2,0	2,4	2,5	2,8	3,0	3,4	3,8	3,0	3,4	3,8	4,6	5,3	6,0				
<b>Propiedades de rigidez en kN/mm<sup>2</sup></b>																				
Módulo de elasticidad paralelo medio	$E_{0,0505}$	7	8	9	10	11	12	12	13	14	10	10	11	14	17	20				
Módulo de elasticidad paralelo 5º percentil	$E_{0,0505}$	4,7	5,4	6,0	6,7	7,4	8,0	8,0	8,7	9,4	8,0	8,7	9,4	11,8	14,3	16,8				
Módulo de elasticidad perpendicular medio	$E_{0,0505}$	0,23	0,27	0,30	0,33	0,37	0,40	0,40	0,43	0,47	0,64	0,69	0,75	0,93	1,13	1,33				
Módulo de cortante medio	$G_{0,0505}$	0,44	0,50	0,56	0,63	0,69	0,75	0,75	0,81	0,88	0,90	0,95	1,00	1,08	1,16	1,25				
<b>Densidad en Kg/m<sup>3</sup></b>																				
Densidad	$\rho_k$	290	310	320	340	330	370	380	400	420	330	360	390	450	500	560				
Densidad media	$\rho_{med}$	350	370	380	410	420	450	460	480	500	440	470	500	580	640	700				

37.



38. Resistencias de las placas Kielsteg L/300

medio de ensayos y podemos verla en el anexo, apartado A. Esta información nos brinda una base para un correcto uso en la construcción. En la figura 38 se muestra las resistencias de las placas Kielsteg. Las empresas proveedoras también facilitan software con el que se pueden hacer cálculos básicos para dimensionar las placas según sean los requisitos. Para el estudio y análisis estructural de la propuesta descrita posteriormente se usará RFEM de Dlubal que es un software alemán especialmente diseñado para este tipo de placas. Así mismo, las empresas ofrecen acompañar al diseñador durante el proceso de diseño. El diseño de los productos puede ser dimensionado de acuerdo a la norma EN 1995-1-1 y EN 1995-1-2, teniendo en cuenta las Cláusula 3.1 de la evaluación técnica europea y la norma DIN 1052, punto 10.5.1.

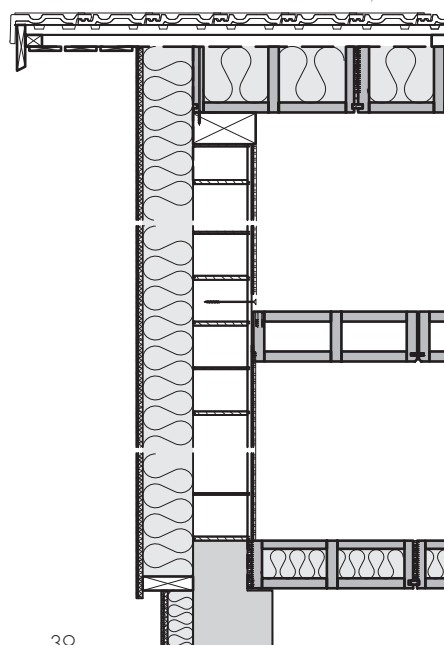
Las placas se destacan por sus características de soporte de carga muy rígida. La capacidad de carga es comparable a la de un piso de hormigón armado. Lo complejo del análisis de las placas depende de la resistencia de las diferentes materiales como es el caso de Kielsteg (Figura 36), que emplea madera maciza de conífera con tableros OSB. Las propiedades de la madera usada en las placas varían según el productor. Los más importantes productores califican su producto como C24 (o S10 respecto Din). Igualmente debe considerarse la resistencia del adhesivo para unir las superficies.

Así mismo, el comportamiento entre las diferentes partes que lo conforman necesita un análisis preciso porque, por ejemplo, se da el caso que las tablas que están verticalmente tienen mayor capacidad portante que las que poseen menor espesor. Las caras verticales actúan como viguetas de gran canto arriostradas por sus paramentos y funcionan como una sucesión de vigas cajón. Su sección presenta una gran inercia, por lo tanto, son muy resistentes en un rango de luces determinado. La configuración de perfil cerrado del cajón reduce, por otro lado, la necesidad de arriostramiento vertical. Estudios realizados en la Universidad de British Columbia (CHEN, Yue. 2011), muestran la posibilidad de mejorar los rendimientos de este tipo de placas mediante diversas combinaciones con tableros de madera encolada laminada en las que se rotan sus listones en el lugar en donde más sufre la placa. Esta configuración ha demostrado un mejor desempeño a la flexión y a la vibración.

Como hemos anotado la placa nervada alivianada consta de: dos superficies, una superior, inferior y el alma (tablas verticales), en donde las fibras de la madera están dispuestas longitudinalmente y contrariamente en los refuerzos que tienen las fibras en el sentido transversal de la placa. Esta condición hace que este tipo de elementos trabajen unidireccionalmente. La evaluación técnica Europea solo se aplica a la elaboración y al uso de este tipo de placas. Por contra, lo que respecta a la estabilidad de las obras, incluyendo la aplicación de cargas en este tipo de productos, no está sujeta a la evaluación técnica europea.



- 39. Balloom Board
- 40. Platraform Board y Unión de muro con forjado.
- 41. Fijación mediante tornillo autoroscante



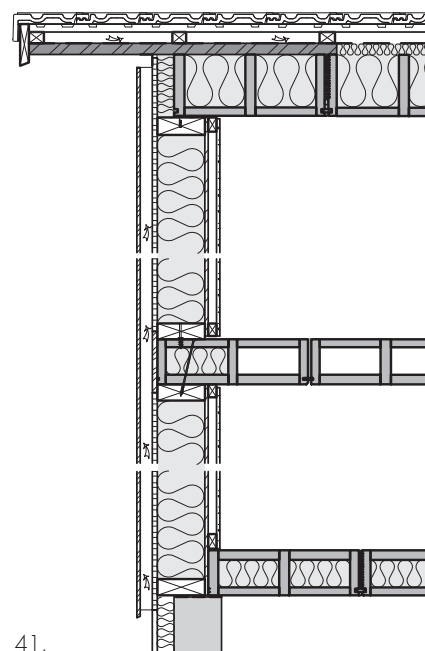
39.

## UNIONES

El sistema estructural prefabricado de placas nervadas de madera está compuesto por dos elementos: las placas y las uniones. Tanto las placas como las uniones tienen la misma importancia, incluso en aspectos como su comportamiento en un sismo, son las uniones, las que le otorgan su buen comportamiento por la ductilidad que da al sistema.

Para la elección del tipo de unión depende si se trata de la construcción en madera "Platform" o la "Balloon". Como hemos dicho anteriormente existen estos dos tipos de construcción en madera: El "platform board", sería el sistema en que los forjados se apoyan sobre los muros de la planta inferior y los siguientes muros se apoyan sobre el forjado. Este sistema es sencillo y permite construir planta por planta con conexiones entre paneles simples, de igual forma con un funcionamiento estructural sencillo. El "balloon board", donde los muros se construyen continuos para varias plantas y los forjados se anclan a estos. Este tipo sería para construcciones de baja altura y es poco común. Las conexiones son más complejas son las que transmiten las cargas hacia los muros. Para el anclaje normalmente lo más utilizado es el tornillo autoroscante, por la facilidad de colocación y su gran capacidad de resistencia a diferentes esfuerzos y por que no necesita un pretalado si no que él mismo se autoperfora.

Clavos y remaches, no son comunes en las placas, pero cuando se usan son para sujeción de pletinas u otros elementos, siempre en combinación de



41.



40.



42. Unión cubriendo toda la superficie de las placas con tableros. Lignatur, 2014  
 43. Unión de placas solo en las juntas. Kielsteg, 2014

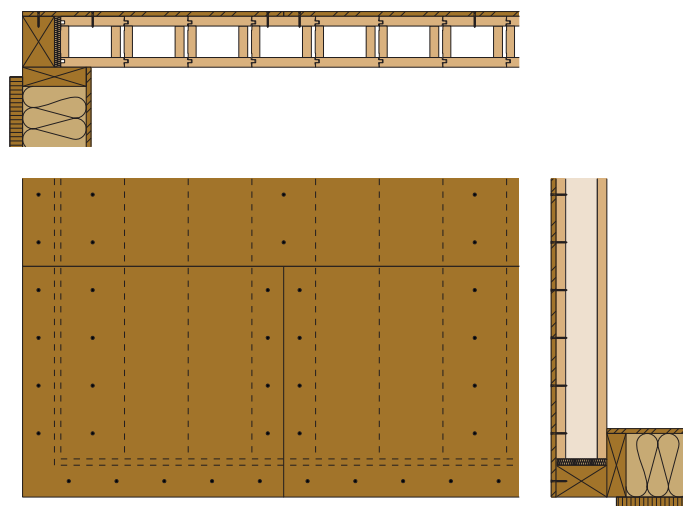
placas metálicas o soportes. Los clavos usados para fijar las placas, son de superficies específicas como con rosca helicoidal o clavos ranurados. Los pernos que son muy usados en estructuras de madera no lo son tanto en este tipo de placas, pero sí podríamos encontrarlos en zonas con gran carga lateral que se necesitara el uso de secciones potentes de metal ("Handbook 1 - timber structures", TEMTIS; 2008).

### UNIÓN DE MURO CON FORJADO

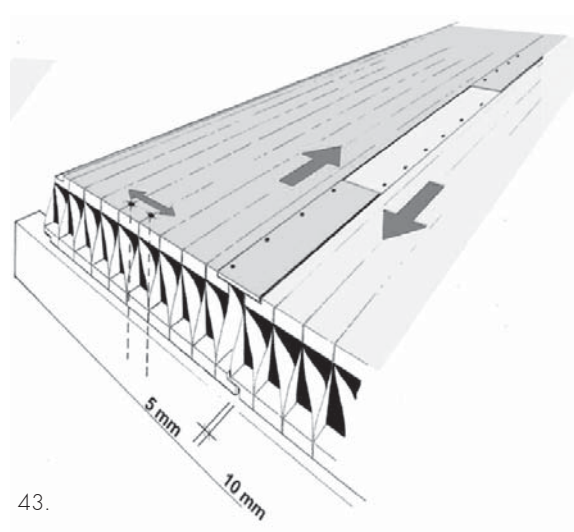
Son uniones que deben responder a la transmisión de la carga vertical ejercida por el forjado en el muro. En este tipo de uniones donde la elección de la tipología estructural, entre *balloon* o *platform frame*, es fundamental y determinante para el tipo de unión que se usará.

Para tipologías de placas platforms se puede plantear: como unión a partir de tornillos autoroscantes, que es la unión más sencilla, en la que se une el forjado verticalmente con las paredes inferiores, a partir de tornillos; o como unión a partir de pletinas, un tipo de unión que transmite de mejor manera del forjado al muro, basada en usar pletinas metálicas en ángulo que fijan muro inferior con forjado y después el muro superior con el forjado.

El sellado hermético de las juntas entre elementos se garantiza mediante un cordón de EPDM (caucho de butilo) adherido a las caras de las placas. Es una unión rápida y fácil de ejecutar e incluso se pueden usar clavos, pero en las uniones de la pletina con el forjado estaría bien usar tornillo porque así reforzamos la zona de mayor cortante ("Handbook.

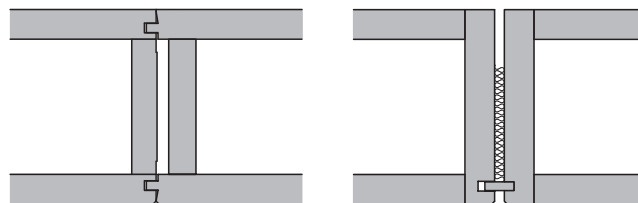


42.

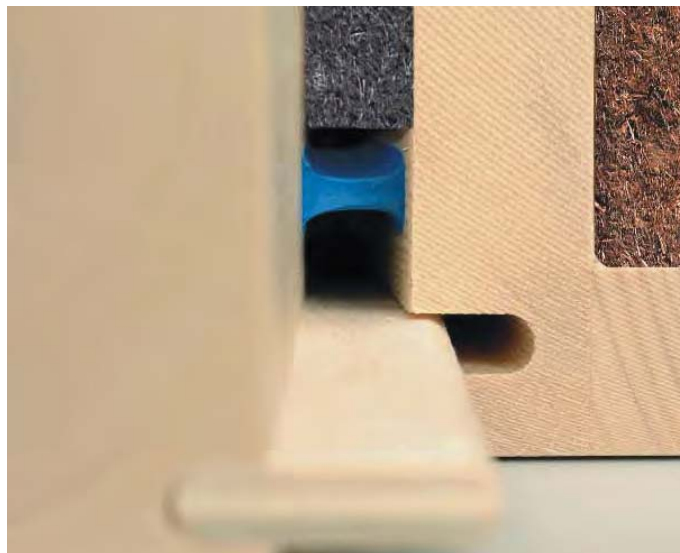


43.

- 44. Juntas machihembreado y rebaje - lengüeta.
- 45. Junta tipo rebaje y lengüeta.
- 46. Unión de tubo.
- 47. Unión por medio de conectores.



46.

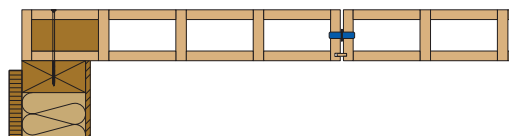


47.

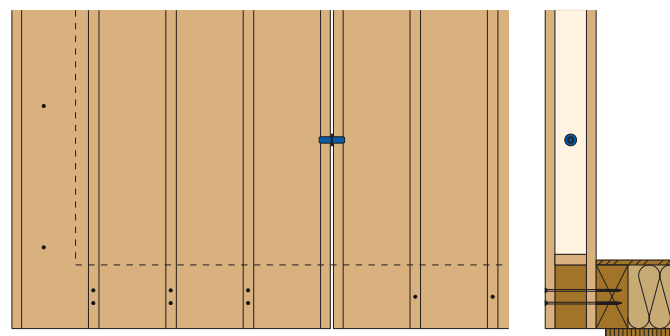
Cross-Laminated Timber". FPLInnovations. 2011).

### UNIONES DE PLACA CON PLACA

Se ejecutan a lo largo de todo el canto. Son uniones que deben resistir esfuerzos a flexión o, mejor dicho, de pandeo. La manera de resolverse son a partir de incorporar un tablero a modo de conector, bien cubriendo todas las placas o solo la junta como es el caso de las placas Kielteg.



En las uniones a partir de conector, la tabla de conexión o "mecha" puede ser de tablero contrachapado en la que vayan atornillados y si se requiere, previamente se pueden encolar (Figura 43). En otros casos, se puede usar el machihembreado o por rebaje y lengüeta, (ver fabricación de las placas). También se recomienda reforzar la unión colocando cada 10 o 15 cm un tornillo autorroscante a modo de refuerzo. Existe la unión de tubo *Tube connection system* desarrollado en Austria por Traetta y Schickhofer. Esta unión se basa en que los tableros llegan a la obra con unas barras con rosca encoladas y cuando se enfrentan placa con placa, estas barras, coincidentes en su posición, se sujetan a partir de un anillo metálico que con unas simples rosas se fijan, e incluso se puede dar una cierta tensión a la unión, como un postensado. Otro tipo de unión innovadora es la *KNAPP system*, desarrollado en Alemania, funciona partir de insertar unas piezas que a modo de pasador fijan la posición de los tableros (Figura 47).

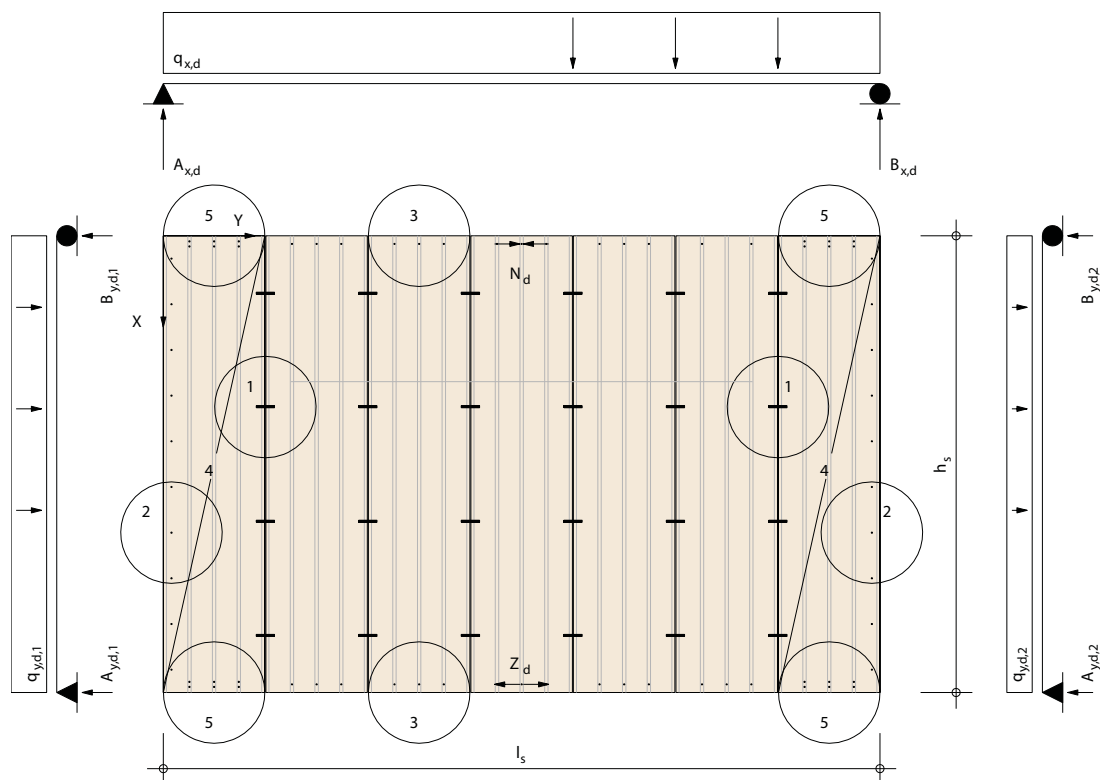


44.



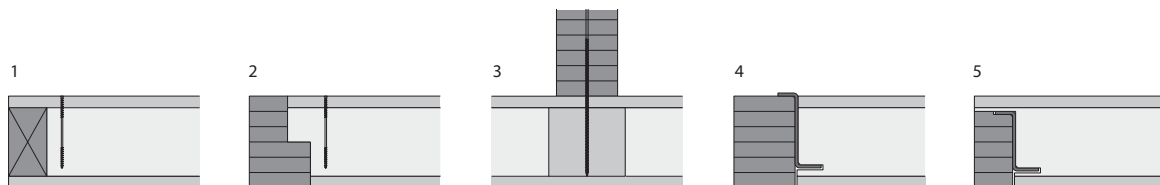
45.

## Esquema de unión y fijado de las placas

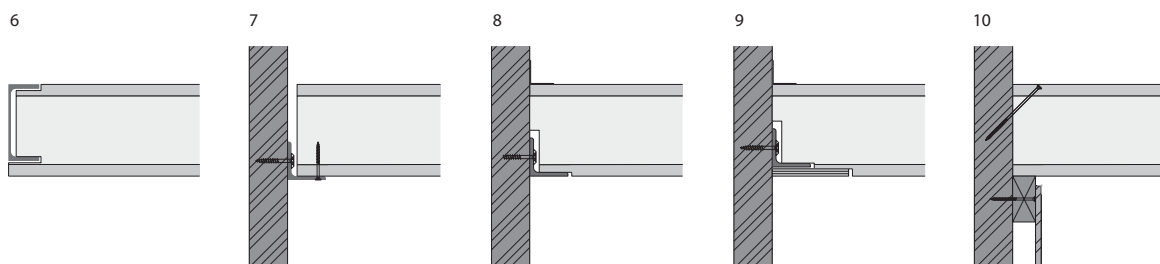


## TIPOS DE APOYOS

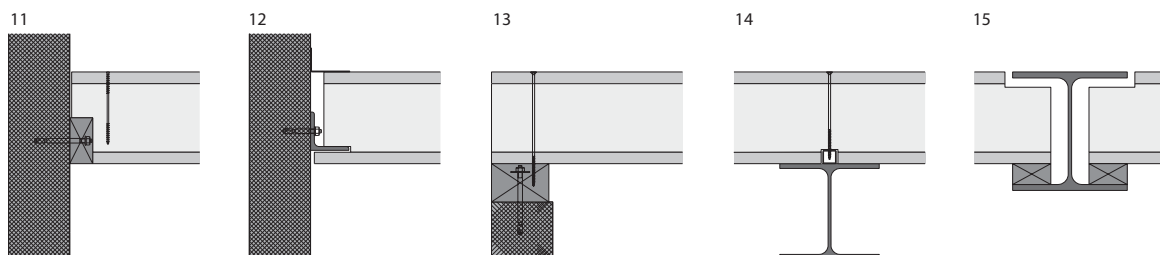
Tipos de apoyos en construcción con madera



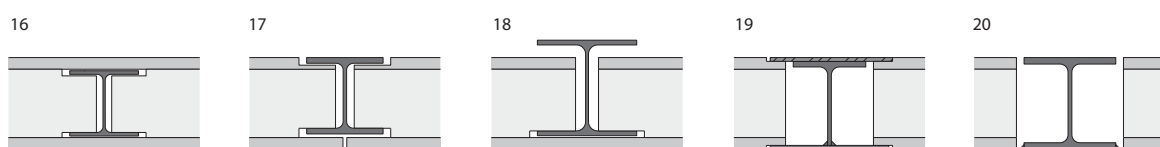
Tipos de apoyos en construcción con obra de fábrica

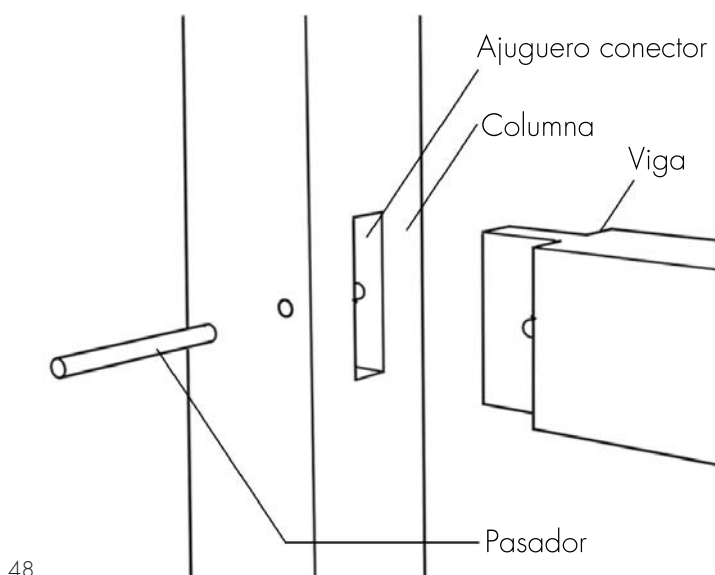


Tipos de apoyos en construcción con obra de fábrica y acero



Tipos de apoyos en construcción con acero





48.

### UNIÓN CON PASADOR

Para delinear el estudio nos hemos centrado en los sistemas de uniones no metálicas y sin adhesivos por razones de coste energético, medio ambientales y de resistencia al fuego entre otros motivos que explico brevemente a continuación.

Hoy en día las conexiones no metálicas se desarrollan principalmente en el sector de la carpintería tradicional. Muchas de estas conexiones emplean conectores de clavija de madera que se puede encontrar en todo el mundo; en particular marcos de roble verde se usan en el Reino Unido (Figura 48 ). Las ventajas de utilizar conexiones tradicionales de roble verde se asocian con mayor regularidad con la resistencia a la corrosión, aunque las conexiones también proporcionan resistencia al fuego y buen rendimiento acústico (Ross et al., 2007). Las estructuras hechas con maderas duras tienen un alto contenido de ácidos que atacan a los materiales ferrosos por lo que el uso de clavijas de uniones de madera elimina esta incompatibilidad entre los materiales. En el uso contemporáneo de placas de madera dura laminada como es el caso de las placas prefabricadas que nos ocupan, también es un problema que hay que tener en cuenta. En estos casos se usa acero galvanizado para evitar la corrosión. Se ha demostrado que el uso de pasadores de madera aumenta el periodo de resistencia al fuego, a diferencia de las uniones metálicas atornilladas o roscadas con la cabeza expuesta las cuales contribuyen a la conducción del calor al centro de la madera y la pérdida de fuerza del elemento de fijación metálico (en este caso lo recomendable sería protegerlas con tapones de madera) (Ross et al., 2007). Una

de las ventajas de este sistema es que existe un mejor acoplamiento del pasador de madera por su capacidad de absorber esfuerzos de presión y de movimientos que ejerce la madera reduciendo la posibilidad de inducir fracturas como es el caso de los pasadores de madera.

En los últimos años el uso de otras técnicas de carpintería similares han sido impulsadas por el interés en el uso de estructuras totalmente naturales y materiales con bajo consumo de energía en la conversión de materiales (Shanks, 2005). Sin embargo a pesar de esto, a través de los años esta técnica ha quedado restringida a métodos tradicionales y con pocos casos de investigación en la construcción contemporánea.

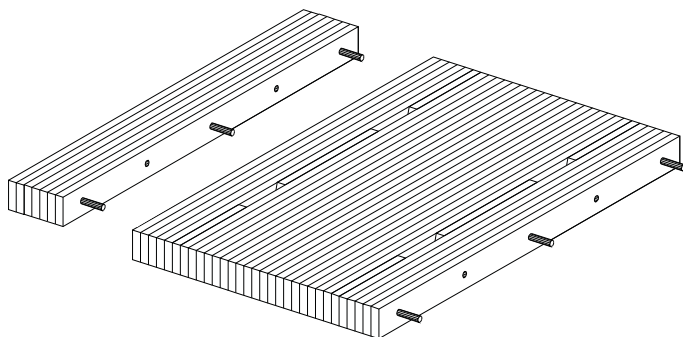
Existen algunos sistemas de unión como los de las fabricas Bresta (1994) y Inholz (1996) por los que mecánicamente se unen varios tablones de madera con una espiga larga que los atraviesa y los mantiene unidos por la presión que ejerce la clavija en la superficie de contacto, sin necesidad de adhesivo. Este sistema funciona juntando verticalmente todos los tablones de madera maciza los que, una vez juntos, se colocan verticalmente formando una pila. Posteriormente se agujerean y seguidamente se introduce un pasador largo. Para que el pasador no se rompa y sea capaz de unir a presión todos los tablones, el pasador es de una madera mas dura. De esta manera se introducen los pasadores mecánicamente haciendo posible que las dimensiones (tanto el diámetro como el largo) no sean un impedimento (Bresta, 1994). De esta modo, el sistema proporciona placas de hasta dos metros de ancho con pasadores que van de

- 49. Placa Bresta
- 50. Sistema de unión de placas y traslape de pasadores.
- 51. Placa Bresta con aislante térmico.
- 52. Placa Bresta con junta canal, para balcón.



49.

extremo a extremo y si se requieren placas más anchas se deja un agujero libre y otro para el traslape como indica la figura 50, lo cual también permite unir en obra una losa totalmente continua. En algunos casos el pasador está tan presionado que fisura la madera de las esquinas.

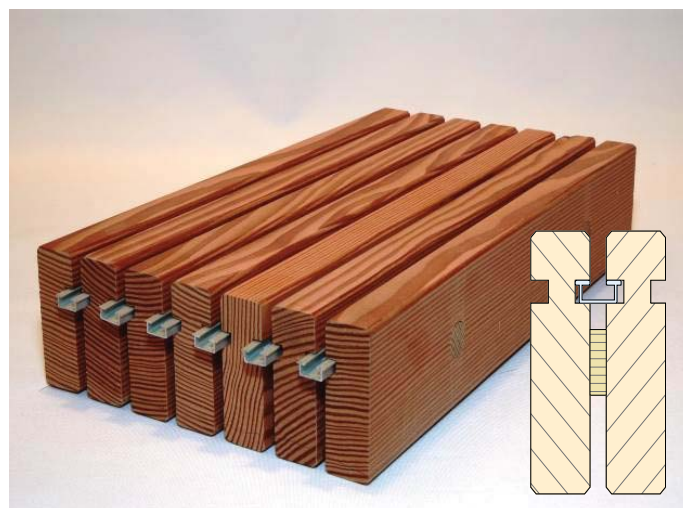


50.

Para el forjado se alterna con bloques de material de aislamiento acústico y térmico, esta solución también aligera la estructura del forjado. Dependiendo del alto de cada tablón y de la separación entre ellos se pueden hacer elementos para forjado, muro, pérgolas y lamas. Figura 52



51.



52.

## COMPORTAMIENTO AL FUEGO

Un incendio necesita un material combustible para su desarrollo y evolución. La estructura como tal normalmente contribuye muy poco a su desarrollo y son el resto de materiales que hay en el espacio lo que contribuye más al avance del incendio. En la Guía para la construcción de la madera, Aitim, 1994, se defiende la madera afirmando que esta es menos peligrosa como material estructural a pesar de su inflamabilidad a bajas temperaturas por tres razones:

- Su baja conductividad térmica hace que la temperatura disminuya hacia el interior.
- La carbonización superficial que se produce dificulta la salida de gases y la penetración del calor, al tener una conductividad menor que de la misma madera. "La alta capacidad aislante de la capa carbonizada, del orden de unas seis veces superior a la de la madera a temperatura ambiente, permite que el interior de la pieza se mantenga a una temperatura mucho menor y con sus propiedades físico-mecánicas constantes." (Confemadera. Cap.3. 2005)
- Al ser despreciable su dilatación térmica no provoca desplomes ni deformaciones peligrosas.

Hay que reconocer que la madera arde y con cierta ignifugación se puede resolver el problema de seguridad, pero los materiales que no arden se comportan peor que la madera ante el fuego, como las estructuras metálicas, que sufren grandes dilataciones y contracciones en un incendio y que su resistencia se reduce drásticamente con el aumento de temperatura o, como el hormigón, que se resquebraja y aún más cuando se le aplica el agua de las mangueras generando un brusco enfriamiento. Es decir, la madera no es un mal material para estructuras, a nivel de fuego, simplemente tiene un comportamiento distinto y a la vez tiene ventajas respecto los otros materiales.

El comportamiento de la madera en caso de incendio puede variar dependiendo de factores como los que se apuntan a continuación:

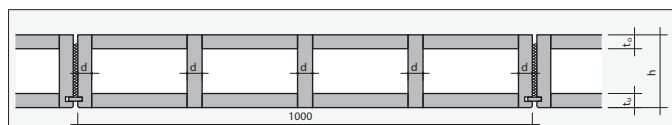
- La relación entre la superficie y el volumen de la pieza. Las secciones estrechas y con aristas vivas aumentan esta relación, conduciendo a un comportamiento frente al fuego menos favorable.
- La existencia de fendas. Las hendiduras en el sentido de las fibras de la madera incrementan los efectos del fuego.
- La densidad de la madera. Las diferentes especies de madera se comportan frente al fuego de forma diferente en función de su densidad.
- El contenido de humedad. En edificación, la mayoría de las estructuras de madera presentan un contenido de humedad que varía entre el 8% y el 15% aproximadamente, lo que implica que por cada tonelada de madera deben evaporarse entre 80 y 150 Kg de agua antes de que entre en combustión.

En la Guía de la Construcción de la Madera, editado por Confemadera, 2005, nos introduce a la problemática generada desde la aplicación de la normativa de Código Técnico, y lo que hay que



53. Dimensionamiento para R30 Lignatur.

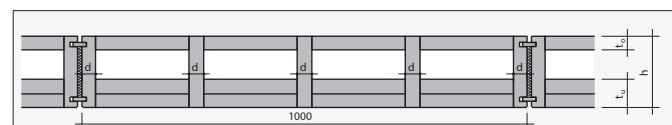
54. Dimensionamiento para R60 Lignatur



Tipo	Dimensiones					Resistencias		
	h mm	d mm	t <sub>0</sub> mm	t <sub>u</sub> mm	t <sub>u,li</sub> mm	R <sub>Li,d8</sub> kN/m <sup>2</sup>	R <sub>u,d8</sub> kN/m <sup>2</sup>	R <sub>u,d8</sub> kNm/m <sup>2</sup>
120	120	31	31	31	0	560	19	7.1
140	140	31	31	31	0	603	24	10.6
160	160	31	31	31	0	647	29	14.8
180	180	31	31	31	0	690	35	19.9
200	200	31	31	31	0	734	40	25.6
220	220	31	31	31	0	777	45	32.0
240	240	31	31	31	0	820	50	39.0
280	280	31	31	31	0	907	60	55.1
320	320	31	31	31	0	994	71	73.6

R30  
Largo de referencia 1.00 m  
Placas Lignatur

53.



Tipo	Dimensiones					Resistencias		
	h mm	d mm	t <sub>0</sub> mm	t <sub>u</sub> mm	t <sub>u,li</sub> mm	R <sub>Li,d8</sub> kN/m <sup>2</sup>	R <sub>u,d8</sub> kN/m <sup>2</sup>	R <sub>u,d8</sub> kNm/m <sup>2</sup>
160	160	31	31	64	9	701	22	14.7
180	180	31	31	64	9	745	27	19.0
200	200	31	31	64	9	788	32	23.8
220	220	31	31	64	9	831	38	28.9
240	240	31	31	64	9	875	43	34.4
280	280	31	31	64	9	962	53	46.5
320	320	31	31	64	9	1048	63	59.9

R60  
Largo de referencia 1.00 m  
Placas Lignatur

54.

diferenciar son dos conceptos básicos que son los de la reacción y la resistencia. Como reacción al fuego se entiende la respuesta de un material al fuego medida en términos de su contribución al desarrollo del incendio con su propia combustión. En cambio, la resistencia al fuego es la capacidad de un elemento constructivo para mantener durante un periodo de tiempo determinado la función portante que se le había exigido (R), su integridad (E), y/o aislante térmico (I).

Las clases de reacción al fuego para los materiales de construcción, con excepción de los suelos, para los productos lineales para aislamiento térmico de tuberías y para los cables eléctricos, son: A1, A2, B, C, D, E y F, de mejor a peor comportamiento al fuego. Estas clases representan un índice de la inflamabilidad del material y su contribución al fuego. En algunos casos, van acompañadas de otros dos subparámetros que dan información sobre la producción de humo, de mayor a menor velocidad de propagación y producción total: s1, s2 y s3, y sobre la caída de partículas o gotas inflamadas: d0, d1 y d2. La norma exigirá que los diferentes espacios (pasillos, escaleras, etc..) estén contruidos con materiales que sea A, B, C, D o S1 o d2. Los parámetros de clasificación de resistencia al fuego están relacionados con la función que tienen los diferentes elementos constructivos en el conjunto del edificio (por ejemplo si son elementos sustentantes, separadores de sectores de incendio, etc).

Existen tres nomenclaturas para describir el comportamiento al fuego de un material, que son:

- R representa la capacidad portante de un elemento estructural, es decir, la capacidad de dicho elemento de soportar durante un período de tiempo y sin pérdida de la estabilidad estructural la exposición al fuego en una o más caras, bajo acciones mecánicas definidas.
- E representa la integridad de un elemento constructivo con función separadora, es decir, la capacidad de no dejar paso a llamas o gases calientes que puedan producir la ignición de la cara no expuesta al fuego del mismo o de cualquier material adyacente a esa superficie. El fallo del criterio de capacidad portante también se considera fallo de la integridad.
- I representa el aislamiento de un elemento constructivo con función separadora, es decir, la capacidad de dicho elemento de soportar la exposición al fuego en un solo lado, de forma que no se supere una temperatura determinada en la cara no expuesta al fuego.

Estos parámetros van acompañados de un valor que es el período de tiempo en minutos durante el cual se mantienen los requisitos de comportamiento: 10, 15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 240 o 360. La condición de reacción es intrínseca al material y poco se puede hacer para mejorar su comportamiento si no es con cierta ignifugación para cumplir lo exigido según los espacios. En cambio la resistencia del material en un periodo de tiempo, se resuelve la mayoría de veces con un sobredimensionado de la pieza sin necesidad de adoptar otras acciones. Los elementos de las placas Lignatur pueden estar dimensionados de tal manera que pueden llegar a la clasificación de resistencia al fuego REI 90 (Lignatur AG, 2014).

55. Dimensionamiento para R90 Lignatur.

56. Ensayo de comportamiento al fuego Lignatur

Tipo	Dimensiones					Resistencias		
	h mm	d mm	t <sub>0</sub> mm	t <sub>1</sub> mm	t <sub>2</sub> mm	R <sub>12,d</sub> kN/m <sup>2</sup>	R <sub>12,d</sub> kN/m <sup>2</sup>	R <sub>90,d</sub> kN/m <sup>2</sup>
LFE								
180	180	31	31	97	18	799	20	21.9
200	200	31	31	97	18	842	25	28.0
220	220	31	31	97	18	886	30	34.5
240	240	31	31	97	18	929	35	41.5
280	280	31	31	97	18	1016	46	56.3
320	320	31	31	97	18	1103	56	72.5

R90

Largo de referencia 1.00 m

Placas Lignatur



55.

56.

Así como también estén en la clasificación de Euroclasses D,s2, d0 (2 a 10 minutos de *flash over* en el *room corner test* producción de humo medio, sin *drop-lets*). En Suiza pertenecen al índice de fuego 4.3 (inflamable medio, bajo producción de humo). Estos han sido los resultados que han demostrado las siguientes pruebas:

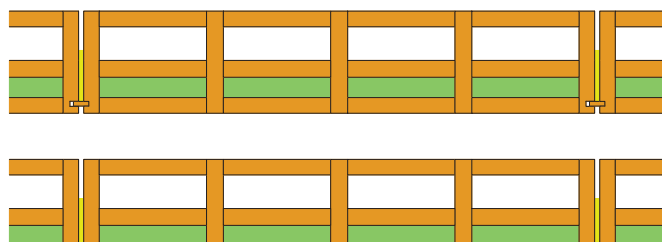
-1999: "Verification of the Eurocode 5 calculation models and examination of the butt joints based on tests for REI 60 and REI 90" (IBK informe n°244, ETH Zurich).

-2003: "Verification of the burning behavior of LIGNATUR elements with acoustics perforations and incorporated sound absorbers" (IBK informe n°283, ETH Zurich).

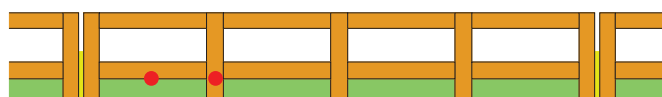
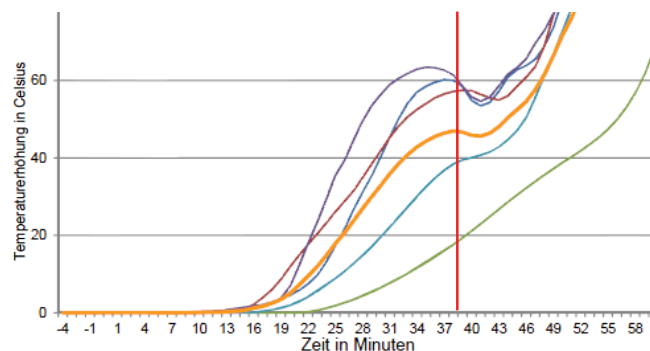
-2004: "Verification of the burning behavior of LIGNATUR elements without double slat and with insulated hollow sections" (IBK report n°283, ETH Zurich).

Las figuras de la derecha indican la prueba de comportamiento al fuego y la idoneidad de las placas Lignatur para REI 60 y K260. (Lignatur, 2014)

Las placas Kielsteg no requieren medidas adicionales, tales como paneles o similares en el lado visible de la placa, con dimensiones adecuadas de los listones de madera se logra una resistencia al fuego REI 30 y REI 60. En este tipo de sección la cara que no esta expuesta al fuego permanece protegida por la forma de las cavidades de OSB, produciendo un desacoplamiento térmico que detiene momentáneamente el calentamiento.

Resistencia al fuego REI 60, k<sub>2</sub>60

Luego de 39 minutos de exposición al fuego.



Luego de 39 minutos de exposición al fuego.

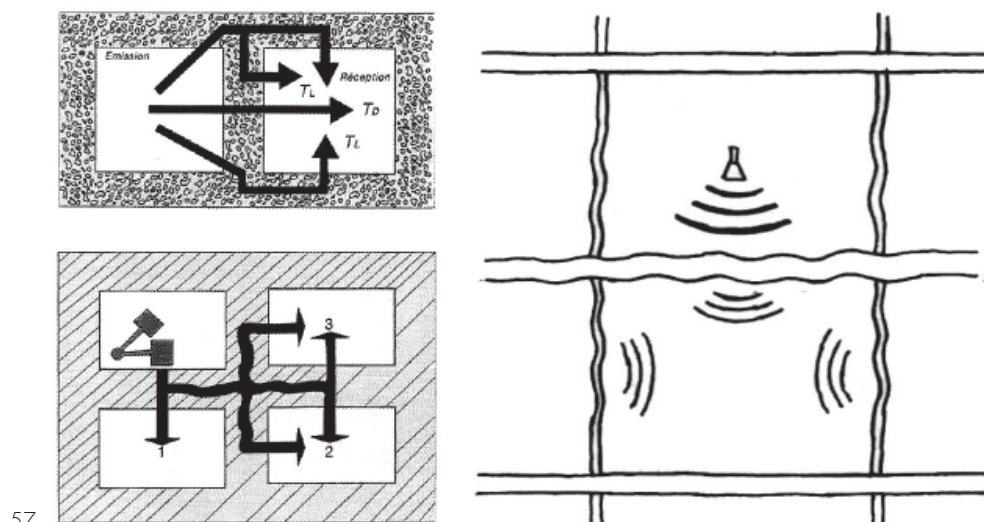


Luego de 60 minutos de exposición al fuego.



Luego de 60 minutos de exposición al fuego.





57.

## RENDIMIENTO ACÚSTICO

Existen dos tipos de ruidos que afectan a este tipo de estructuras: el aéreo y el de impacto. El de impacto se propaga a gran velocidad a través de los materiales con poca pérdida de energía y este tipo de vibración finalmente provoca ruido aéreo. El aéreo, para entenderlo hay que ver como se transmite, en la revista *Tectónica* nº14, en el artículo de Gabriela Roselló y Jose Maria Marzo (2002) nos hablan de la transmisión del ruido y de cómo aislarlo y dan tres opciones de transmisión: vía directa por los paramentos, transmisiones laterales y por impacto. Es decir, el aéreo se transmite por vía directa y por transmisiones laterales o emisores secundarios y esta transmisión será mayor o menor dependiendo de cómo sean los encuentros de los diferentes acabados o materiales que componen los cerramientos. El tema acústico ya no se puede valorar desde los materiales de construcción sino desde el conjunto que componen un espacio e incluso conceptos de ruido del día hacen que soluciones aptas para un lugar no lo sean para otro; es el caso si una fachada esta ubicada mas cerca del ruido y la otra no lo está del mismo edificio.

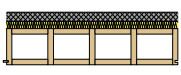
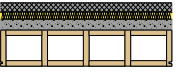
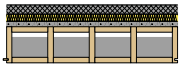
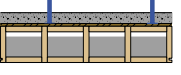
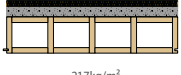
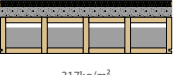
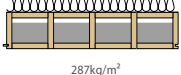
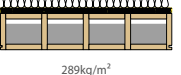
En la guía de construir con madera, editada por Confemadera 2005, se habla de los requerimientos acústicos, desde el punto de vista normativo del "Código Técnico", y lo aborda en relación con la localización del edificio (aéreo exterior-interior) y en relación con el edificio (aéreo entre espacios, impacto y reverberación). Es decir, en relación al ruido que llega desde el exterior del edificio al interior o en relación del ruido que llega de una estancia a otra y esto bajo dos ideas: sobre cuántos dB se ha podido atenuar (cuanto más alto en dB sea más restrictiva será la norma) y cuánto menos ruido llega desde una fuente (siempre la misma) que sería de impacto (cuanto menos valor de dB más restrictiva será la norma). Lo que se busca ahora es un resultado y no cómo se consigue éste.

La madera es un material que presenta un bajo aislamiento al ruido aéreo pero que, en cambio, su porosidad asegura una buena absorción de las ondas acústicas, disminuyendo el tiempo de reverberación. Normalmente, debido a la densidad, materiales que presentan unas características de buenos absorbentes tienen un mal aislamiento al ruido aéreo. Por este motivo, se desaconseja para la construcción con madera la utilización de elementos constructivos homogéneos (de una sola capa) salvo en los sistemas de entramado pesado en donde materiales de gran densidad queden intercalados entre los elementos estructurales de madera. Es así que las placas objeto de este estudio permiten regular la falencia de este tipo de estructuras.

El aislamiento acústico de las placas depende de las propiedades de cada una de las capas que lo componen, de la unión entre ellas y de la atenuación debida al espacio vacío entre cada una de las capas. En la construcción con madera conviene respetar los siguientes principios:

- Utilización de capas flexibles (por ejemplo, placas de yeso laminado).

## 58. Tipos de sistemas constructivos ensayados Lignatur.

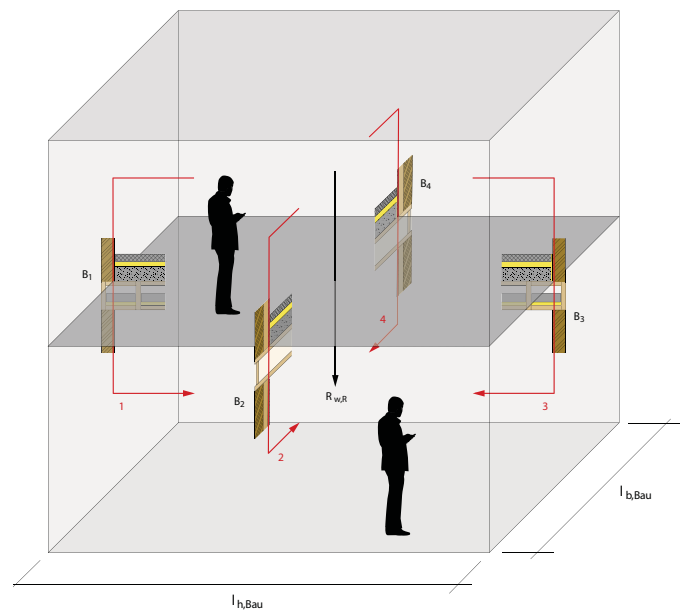
		$R_{w,P}$	$L_{n,w,P}$ C <sub>1</sub> 100-2500 C <sub>2</sub> 100-2500		$R_{w,P}$	$L_{n,w,P}$ C <sub>1</sub> 100-2500 C <sub>2</sub> 100-2500
3 13 84		60 dB	62 dB +1 dB 53 dB	3 13 84		45 dB +6 dB -1 dB 42 dB +9 dB ±0 dB
3 13 21 85		74 dB	39 dB +12 dB ±0 dB 36 dB +13 dB +1 dB	5 22 31 85		64 dB -10 dB -12 dB 45 dB +5 dB +1 dB
4 14 22 84		67 dB	51 dB +3 dB -2 dB 47 dB +6 dB -1 dB	4 14 22 85		42 dB +10 dB +1 dB 41 dB +11 dB +1 dB
41 51 61 71 85		61 dB	47 dB +4 dB -1 dB	41 51 62 71 85		39 dB +14 dB -1 dB

58.

- Separación de la unión entre las diferentes capas por medio de uniones elásticas (ejemplo, techos suspendidos).
- Empleo de material poroso y fibroso para rellenar las cavidades, como la lana mineral. Cuanto mayor sea la resistencia al flujo de aire, presentará un mejor aislamiento acústico. Los aislantes consistentes en espumas con estructura de célula cerrada, como la espuma de poliestireno, son malos absorbentes acústicos y por lo tanto no mejoran el aislamiento acústico.
- Utilización de masa flexible (incluso con el empleo de grava o arena).
- Garantizar un buen hermetismo.
- Evitar los puentes sonoros.
- Empleo de bandas o capas de aislamiento al impacto en el caso de forjados.

Concretamente, en las placas en cuestión una de las características que más se destaca es el rendimiento acústico, los espacios que se generan entre la superficie superior e inferior da lugar a que se puedan incluir material aislante, que mejore su rendimiento acústico. Los estudios de sonido realizados en laboratorio muestran que las placas son capaces de competir con los pisos de concreto libres de defectos en términos de insonorización.

Ejemplo pronóstico de transmisión de ruido aéreo y de impacto vertical de las placas alveolares.



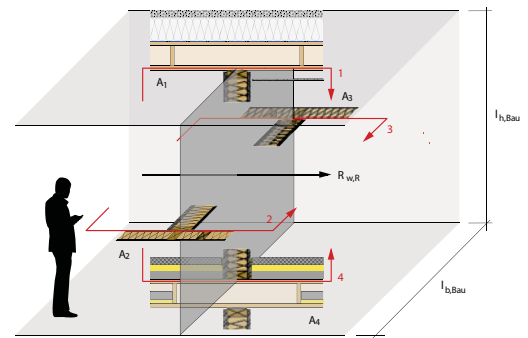
Condiciones Básicas  
 $l_{lab} = 4.5m$ ,  $l_{h,lab} = 4.5m$   
 $l_{Bau} = 6.0m$ ,  $l_{h,Bau} = 5.0m$   
 $A_0 = 10.0m^2$ ,  $S_0 = 30.0m^2$

Sistema escogido para piso  
 cement screed, mineral fibre insulation,  
 bonded chippings, LIGNATUR silence12  
 $R_w = 72dB$   
 $L_{n,w} = 44dB$

Elementos verticales  
 $B_1, B_3$  cross laminated timber  
 $\cdot R_{f,w,R,1+3} = 64dB$   
 $\cdot R_{f,d,w,R,1+3} = 63dB$   
 $\cdot R_{o,d,w,R,1+3} \sim 85dB$   
 $B_2, B_4$  cross laminated timber y GF  
 $\cdot R_{f,w,R,2+4} = 72dB$   
 $\cdot R_{f,d,w,R,2+4} = 70dB$   
 $\cdot R_{o,d,w,R,2+4} \sim 85dB$

Pronóstico  
 $R'_w = 61dB$   
 $L'_{n,w} = 44dB + 4dB + 2 = 50dB$

## Ejemplo pronóstico de transmisión horizontal y ruido aéreo con placas alveolares



Condiciones Básicas  
 $l_{b,lab} = 4.5m$ ,  $l_{h,lab} = 2.8m$   
 $l_{b,Bau} = 6.0m$ ,  $l_{h,Bau} = 2.8m$   
 $A_0 = 10.0m^2$ ,  $S_0 = 16.8m^2$

Sistema escogido para pared  
 2 · gypsum fibreboard (GF), timber frame (TF)  
 construction insulated, 2 GF  
 $R_w = 46dB$

Elementos.  
 $A_1$  LIGNATUR, one-sided suspended ceiling, gravel roof  
 $R_{F,w,R,1} = 53dB$ ,  $R_{F,d,w,R,1} = 47dB$ ,  $R_{D,w,R,1} = 57dB$   
 $A_2, A_3$  timber wall, panelling separated  
 $R_{F,w,R,2-3} = 54dB$ ,  $R_{F,d,w,R,2-3} = R_{D,w,R,2-3} \approx 57dB$   
 $A_4$  LIGNATUR silence12, screed  
 $R_{F,w,R,4} = 70dB$ ,  $R_{F,d,w,R,4} = R_{D,w,R,4} = 80dB$

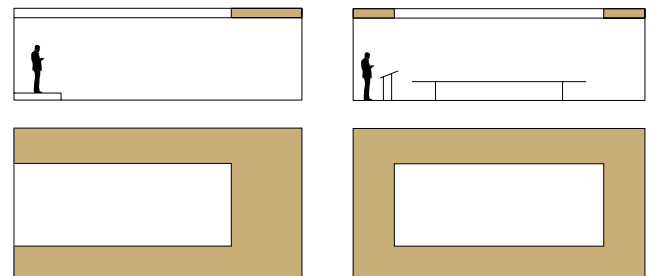
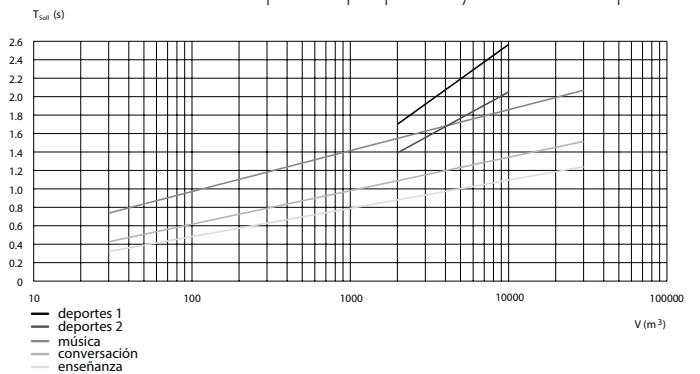
Pronóstico  
 $R'_w = 43dB$

## ABSORCIÓN ACUSTICA

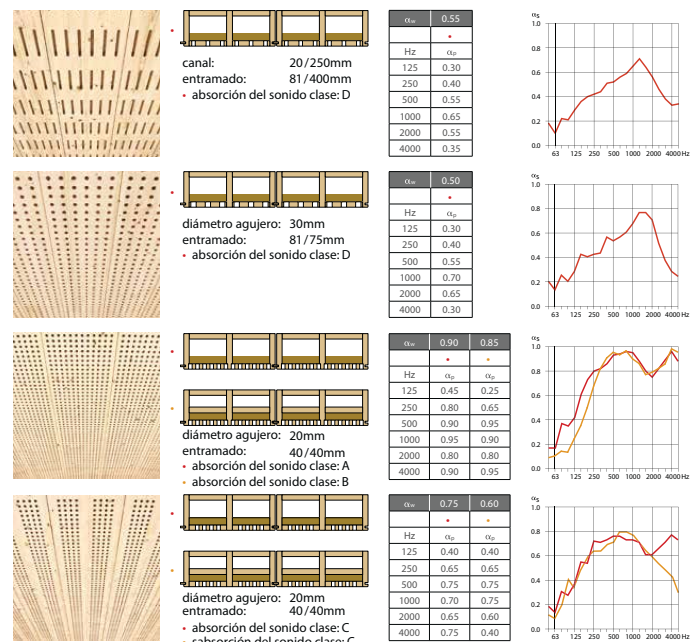
En función del tipo de panel y del material de aislamiento que incorporen o el tipo de perforación o ranurado que se realice en la cara vista, junto con el material situado en el *plenum* se puede obtener los siguientes valores (AITIM. 2014):  $R_w(C;Ctr)$  índice global de reducción acústica (dB) = 68 (-1;-4).

Para la absorción del sonido existen placas con perforaciones o ranuras en su superficie inferior y materiales instalados en los espacios libres intermedios. El tiempo de reverberación  $T$  (s) es el período de tiempo que se tarda una señal en una habitación hasta 60dB. El valor destinado para el tiempo de reverberación ( $T_{soll}$ ) en las frecuencias medias, dependiendo de la clase del uso y el volumen efectivo del espacio  $V$ .

## Calidad acústica en espacios pequeños y medianos espacios



## Estadística de los coeficientes de absorción del sonido.

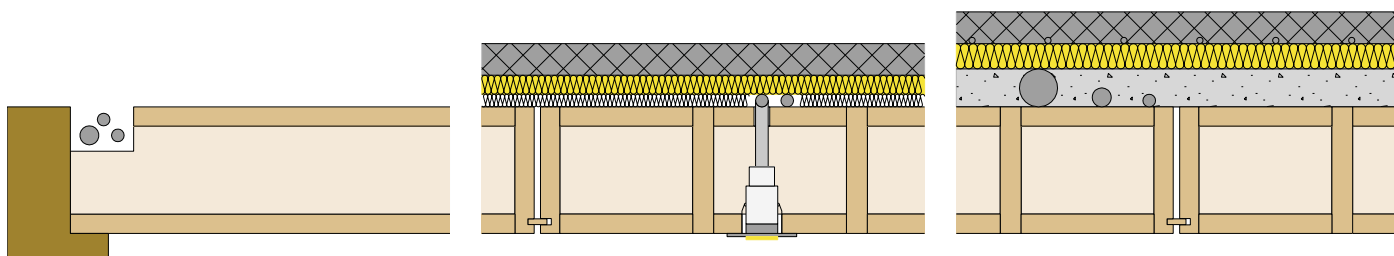
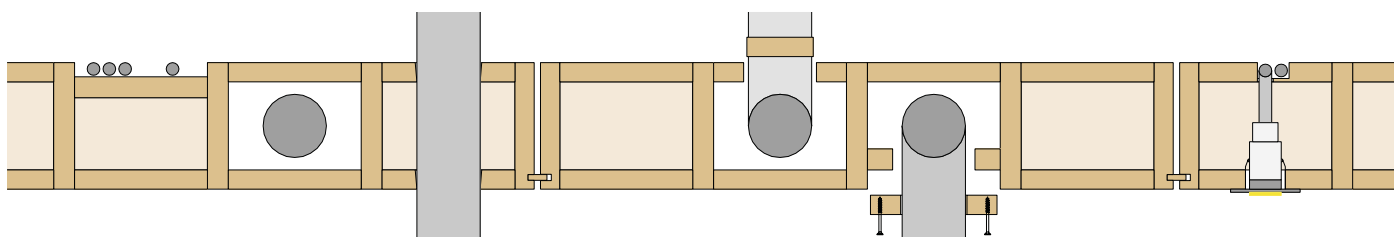
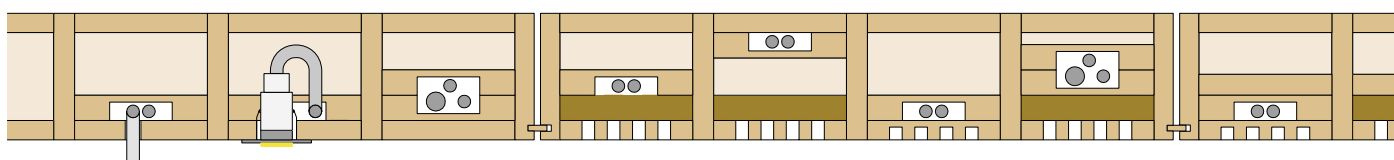
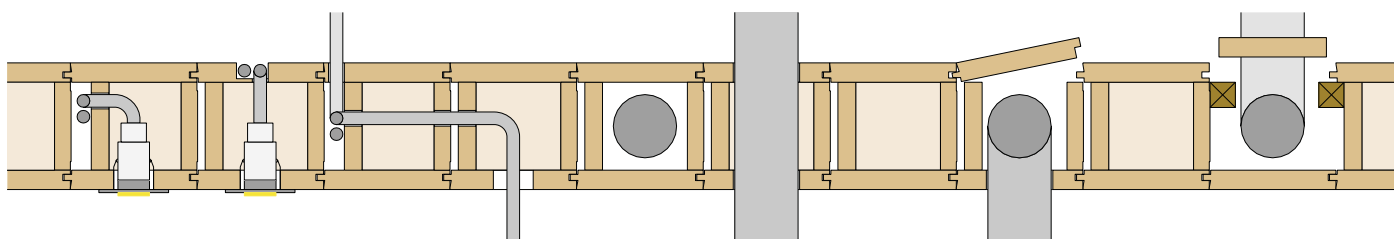




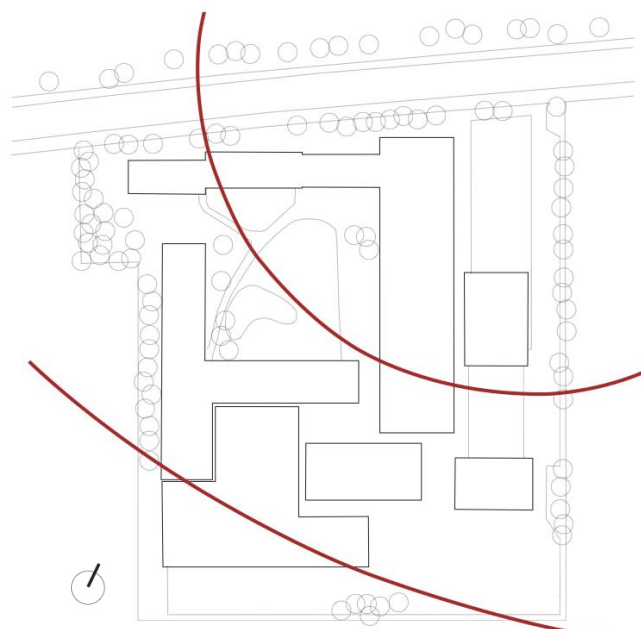
59.

## INSTALACIONES

Los conductos de instalaciones pueden colocarse en las juntas entre elementos o en las mismas cámaras.



## **OBRAS DE REFERENCIA**



60.

## ESCUELA SUPERIOR SUIZA PARA LA INGENIERÍA DE LA MADERA

Concurso convocado en 1990 para la ampliación de la antigua escuela de formación profesional, que había pasado a ser un centro de enseñanza superior. Era necesario densificar la disposición existente, diseñada durante la posguerra: naves, almacenes y cobertizos de una altura, así como edificios docentes de dos plantas con cubiertas a dos aguas. Estas piezas dispersas y en estrecha relación con la naturaleza, se encontraban en un área situada entre una zona residencial de las afueras de la ciudad de Biel. Se decidió no tocar los viejos pabellones y renovar la nave de producción y procesamiento en la zona sur conectándola con los antiguos locales, agrupando así lo viejo y lo nuevo. Las actividades docentes se concentraron en una construcción en madera, de cuatro plantas, que se levanta como nuevo punto de referencia en el territorio.

Las proporciones y dimensiones de este edificio corresponden a un lenguaje ajeno a la imagen preconcebida de lo que ha de ser la construcción con madera. A diferencia a la imagen familiar que, en cambio, se reconoce inmediatamente en el paisaje que dibujan las pequeñas construcciones de estilo tradicional. Todo parece fuera de escala: las grandes luces, las aberturas sobre dimensionadas, los gigantescos pilares y vigas que sostienen la cubierta. Esto también sucede con los elementos que conforman el interior, una gran espacio de madera de once metros de altura que aloja el vestíbulo. Grandes paneles de roble organizan la fachadas



61.

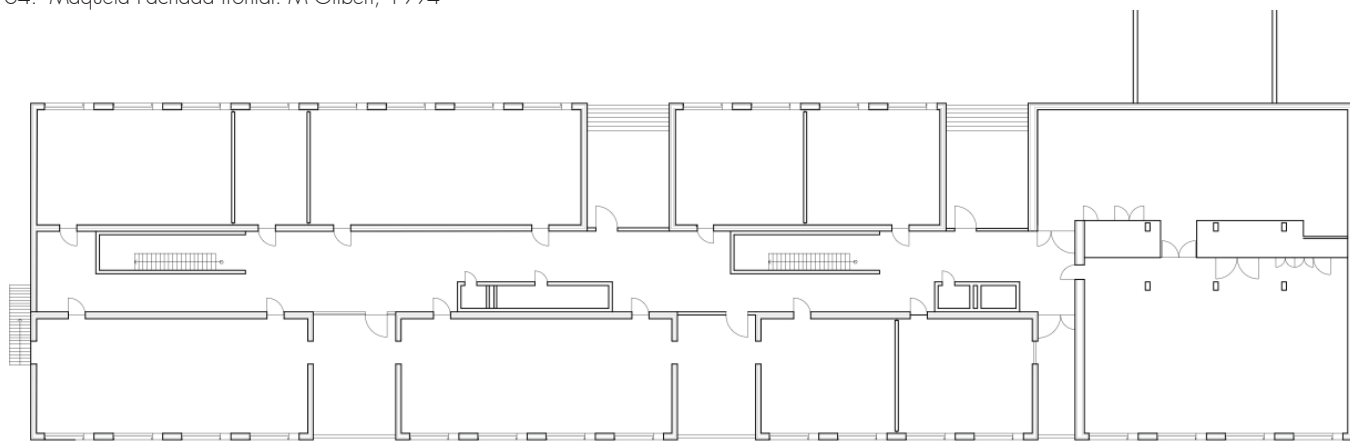
Localización: Biel  
Competición: 1990–1991  
Proyecto: 1994–1997  
Construcción: 1997–1999  
Cliente: Kantonales hochbauamt Bern  
Arquitectos: Meili, Peter Architekten: Marcel Meili, Markus Peter, Zeno Vogel; Thomas Kühne, Marc Loeliger, Andreas Schmidt, Thomas Schnabel, Urs Schönenberger, Othmar Villiger  
Ingenieros: Conzett, Bronzini, Gartmann Engineers,  
Constructores: Hofmann + Huggler, Bern/Thun



62. Planta Baja.

63. Integración con edificación existente. Meili, Peter Architekten

64. Maqueta Fachada frontal. M Gilbert, 1994



62.

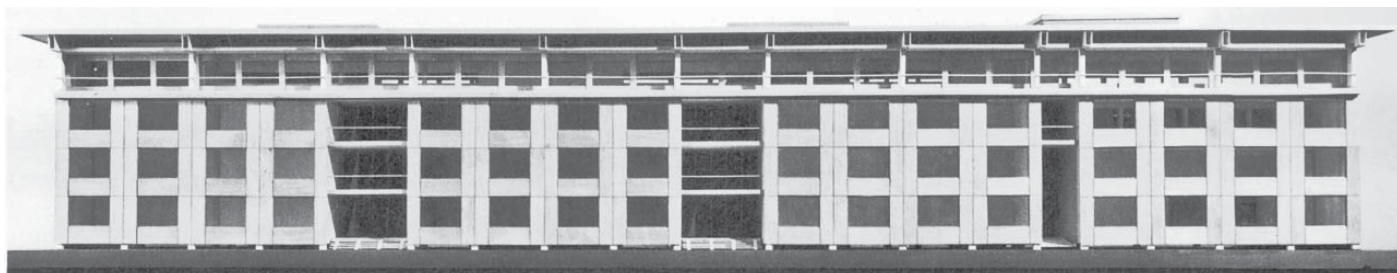
en bandas horizontales y verticales. A diferencia de lo habitual en la construcción con madera, el funcionamiento de la estructura no queda aquí oculto tras el revestimiento.

Las piezas centrales son de una estructura monolítica de hormigón. Las losas placas de madera descansan sobre estos núcleos que alojan circulaciones verticales y espacios húmedos. Por normativa estos núcleos no podían ser de madera puesto que en caso de incendio funcionan como vía de evacuación. Tanto los núcleos de hormigón como las placas de madera se asientan sobre pilotes prefabricados, ya que el terreno firme se encuentra a más de cinco metros bajo la superficie.

En el proyecto coexisten dos esquemas estructurales independientes asociados al uso de los materiales básicos que se complementan: la madera y el hormigón. Se pedían una racionalización de la producción, un montaje rápido y sencillo, por lo que se hizo hincapié en el uso masivo de los elementos estándar y de los prefabricados de madera.



63.

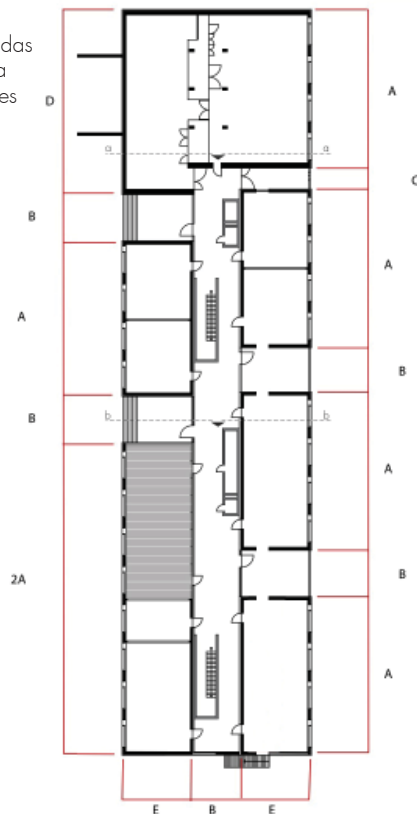
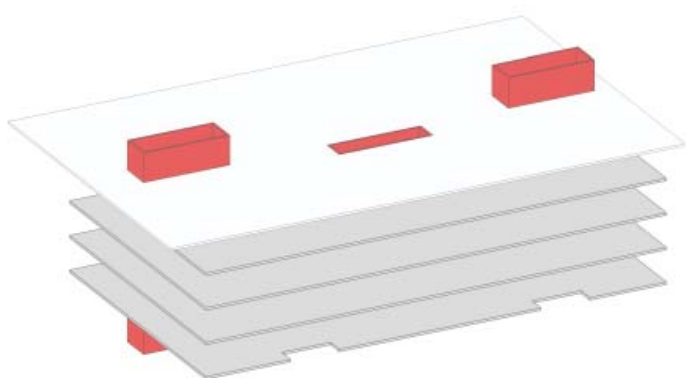


64.



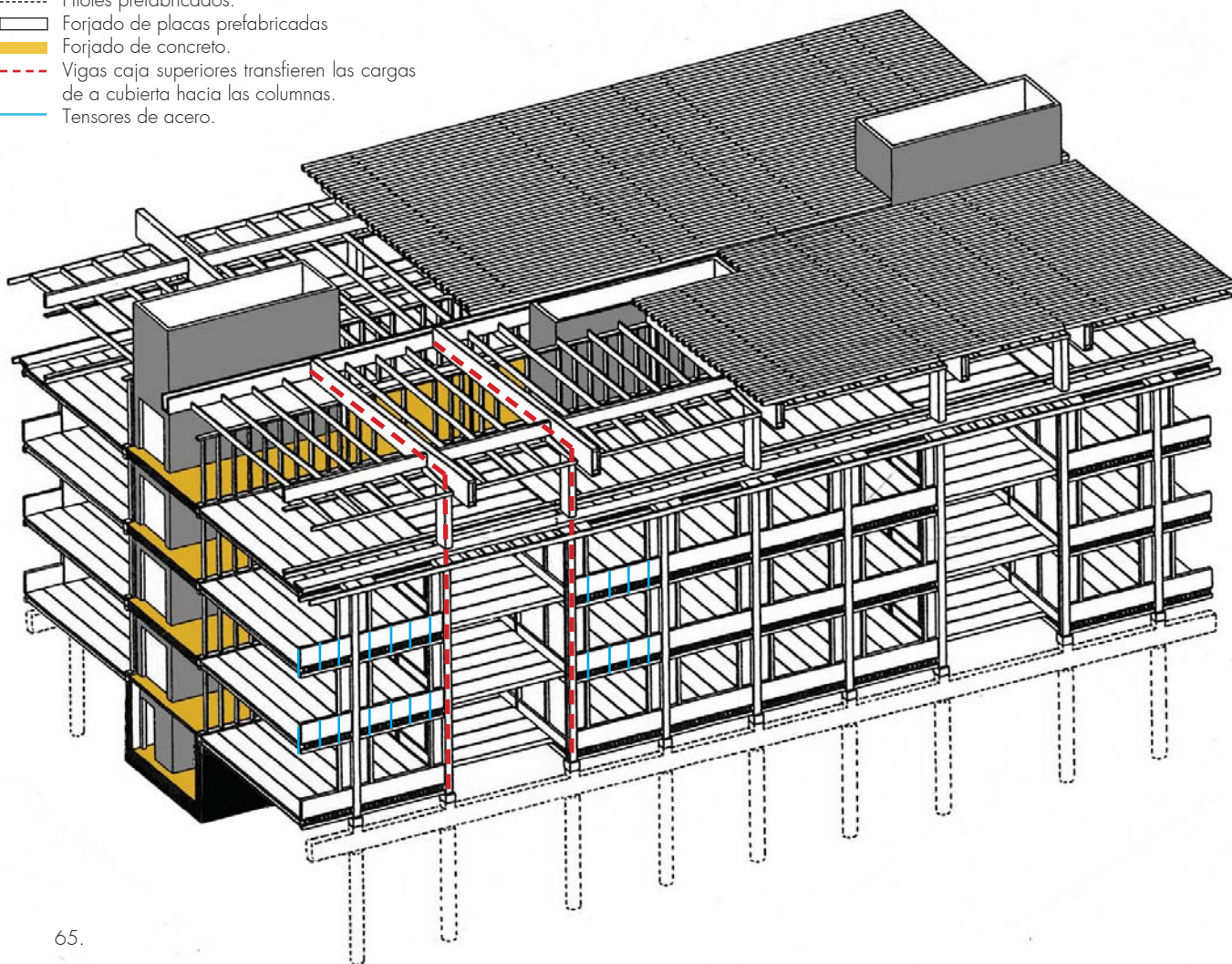
65. Axonometría. Adam Caruso 1995.

MÓDULOS  
A = 18 Placas prefabricadas  
alveolares de madera  
B = Corredores / Balcones



#### ESTRUCTURA

- Diafragmas de concreto. En el nivel inferior sirve de escape en caso de incendio.
- ..... Pilotes prefabricados.
- Forjado de placas prefabricadas
- Forjado de concreto.
- - - Vigas caja superiores transfieren las cargas de a cubierta hacia las columnas.
- Tensores de acero.



65.

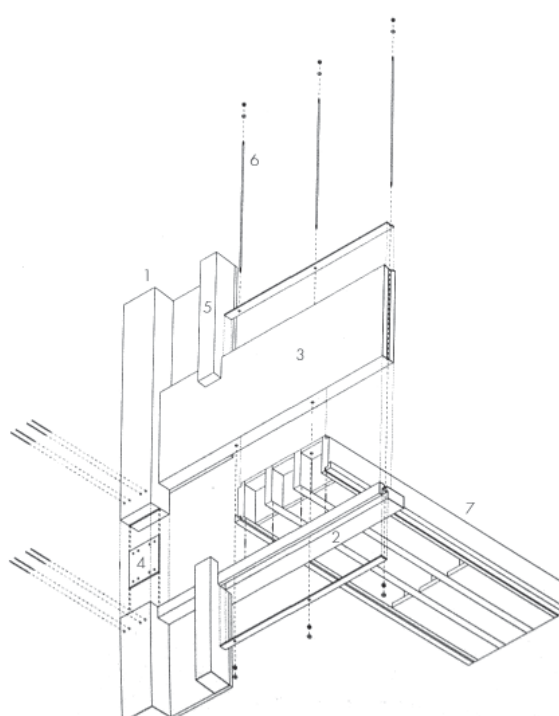
66. Axonometría despiece de unión forjado - fachada . Tectónica 13.

67. Axonometría Módulo. Tectónica 13.

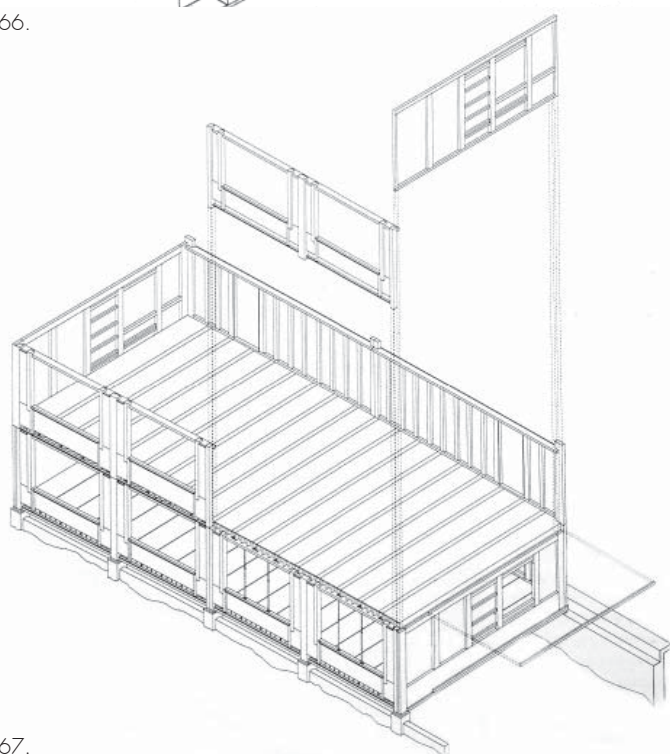
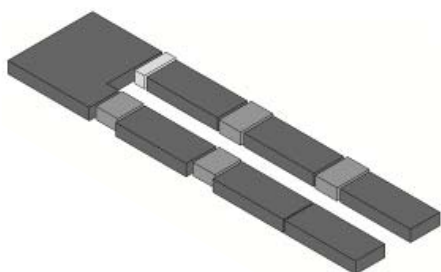


Las seis cajas de madera son estructuralmente independientes y auto portantes. En ellas están contenidas las aulas, cuyo volumen se ajusta al modulo estructural, siendo así tratadas como unidades individuales.

Los muros que cierran cada una de las cajas son de carga. Los forjados interiores apoyan sobre los de fachada y los que cierran los pasillos, mientras que los laterales sostienen las terrazas. Las particiones interiores que dividen los módulos no son portantes, de modo que pueden colocarse según el tamaño requerido para cada espacio. Los petos de madera laminada de la fachada trabajan como vigas, a través de ellos pasan tensores de los cuales cuelgan los dinteles en donde reposan las placas prefabricadas. De esta manera, se eliminan las particiones en las ventanas, pero sin aumentar el canto de los dinteles (este corresponde al mínimo exigido por los requerimientos de protección frente al fuego) para que no entorpecieran la entrada de luz a las aulas. Los muros que dan al pasillo, en cambio responden a la tradicional estructura de plataforma, en la que la estructura de montantes descansa sobre el forjado inferior y sostiene el peso del piso superior.



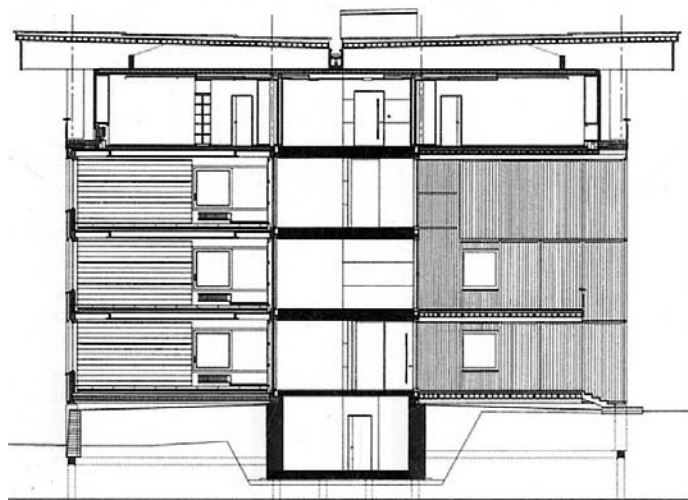
66.



67.

68. Sección. AV Monografías 89.

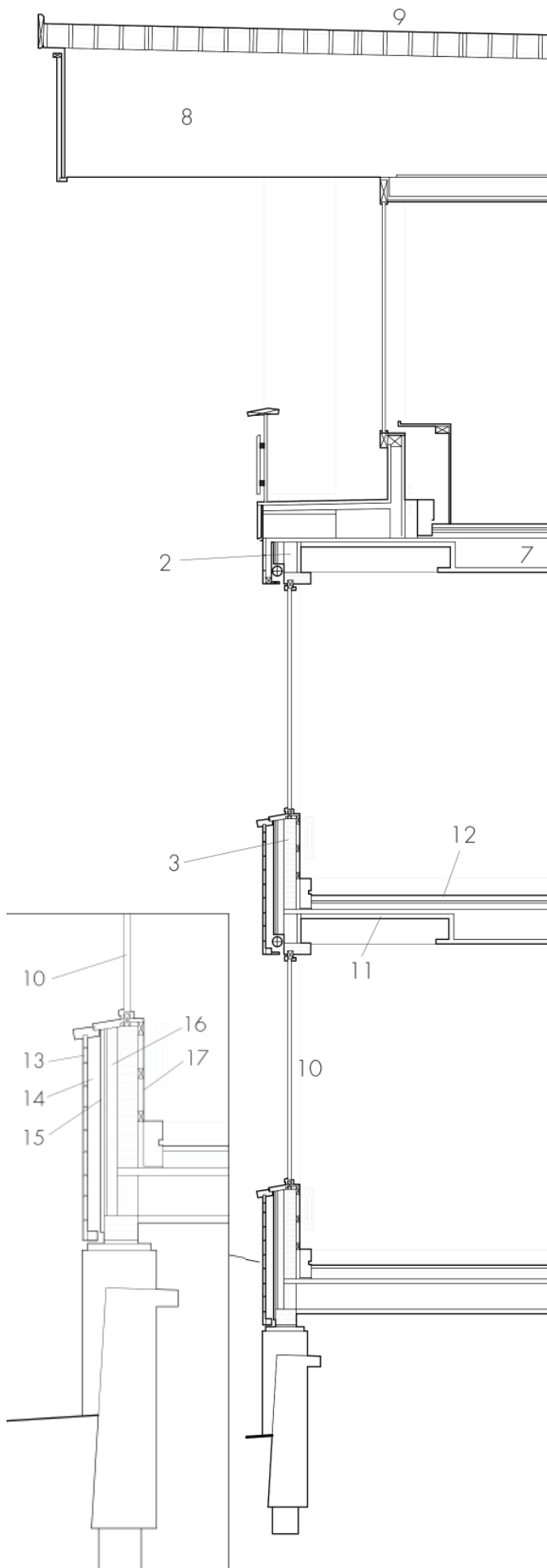
69. Sección Fachada.



68.

*Sección Constructiva*

1. Pilares de madera laminada de 33x20 cm centrales y 16,5x20cm los laterales
2. Dintel
3. Vigas-petos de madera laminada de 82,5cm de canto.
4. Fijaciones de pilares de chapas de 10mm embutidas perforadas
5. Montantes laterales de 16,5x20cm reducen la luz que han de salvar los petos
6. Tensores
7. Placas alveolares de 26cm de canto
8. Viga cajón de 110x45cm construida con madera laminada y tablero tricapa
9. Placas alveolares de 26cm de canto para cubierta
10. Doble capa de vidrio celular aislante
11. Tablero de fibras de madera de baja densidad  $e=4\text{cm}$  para aislamiento acústico
12. Aislante acústico y una base de arena, evitan los puntos de contacto entre estructura y pavimento, eliminando la transmisión de ruidos de impacto
13. Paneles a base de tablas de roble sin tratar de 3x12cm de sección, inscrita en un bastidor de madera
14. Cámara de ventilación
15. Tablero de fibras de baja densidad de 16mm con impregnación bituminosa
16. Protección contra el fuego, barrera de vapor
17. Contrachapado de madera de roble de 8mm sobre rastreles, barnizado

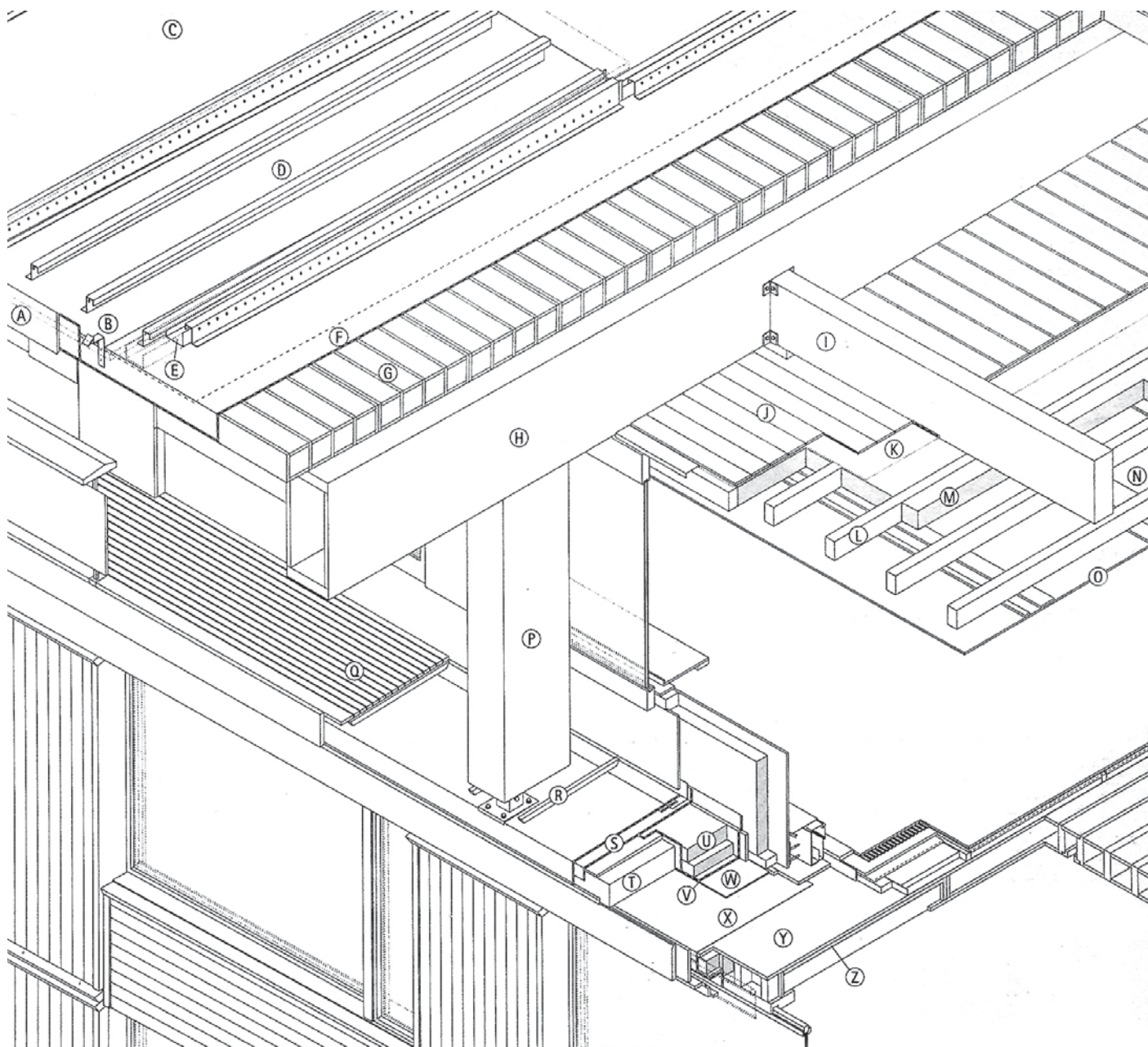


69.



## Axonometría

- |  |   |
|--|---|
| A. Remate de madera de roble de 40mm transventilado delante del goterón    | I. Viga de madera laminada de 65x22cm                                       |
| B. Perfil de fijación de acero galvanizado de 3 mm para remate de bandejas | J. Entablado  |
| C. Bandeja de aluminio e=2mm   | K. Lámina cortaviento de polietileno  |
| D. Perfiles de sujeción en S de 2mm en acero galvanizado, perforados       | L. Vigüeta de madera de 18x10cm   |
| E. Canalón de aluminio   | M. Aislamiento térmico mineral de 18cm                                      |
| F. Lámina impermeabilizante bituminosa bajo geotextil                      | N. Absorbente acústico textil   |
| G. Placas alveolares de 26cm de canto                                      | O. Placas de yeso laminado perforadas e=1.5cm                               |
| H. Viga-cajón de 110x45cm construida con madera laminada y tablero tricapa | P. Pilar-cajón de 72x40cm. Construido con madera laminada y tablero tricapa |



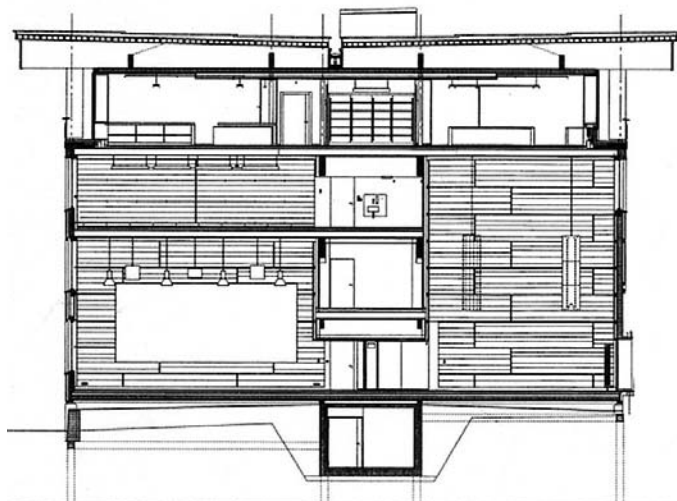
71. Fachada lateral. AV  
Monografías 89.  
72. Sección. AV Monografías 89.  
73. Interior. AA Files 39.



71.

Las aulas están formadas por forjados de placas alveolares de madera de abeto sin revestir, solamente cepillada, que se van colocando una junto a la otra creando una superficie continua. Por debajo las juntas quedan abiertas, permitiendo integrar las instalaciones en la estructura. Los nervios en las zonas de apoyo quedan al descubierto, lo que lleva a percibir a los elementos como auténticos forjados nervados. Estas aberturas actúan como cámaras acústicas, mejorando el confort de las aulas.

El canto máximo de los forjados no podían superar los 32cm, por razones de prefabricación y estandarización. En este caso la rigidez de un elemento apoyado en sus dos extremos es suficiente para salvar el vano de 8,40m de las aulas. En la zona de la última planta el mismo elemento ha de salvar 9,50m, lo que se consigue colocándolo como un elemento pasante. En la zona de las terrazas exteriores salvan el vano entre cajas de las aulas, de modo que la dirección de la carga corre paralela a la de los forjados interiores, evitando la necesidad de montantes que interrumpieran la visión en la zona de la circulación central. Las placas de la cubierta son también placas alveolares pero como en el caso de la planta baja, mucho más sencillas.



72.



73.



- 74. Aula. Meili, Peter Architekten.
- 75. Interior. Meili, Peter Architekten.
- 76. Terraza interior. AV Monografías 89.



74.



75.

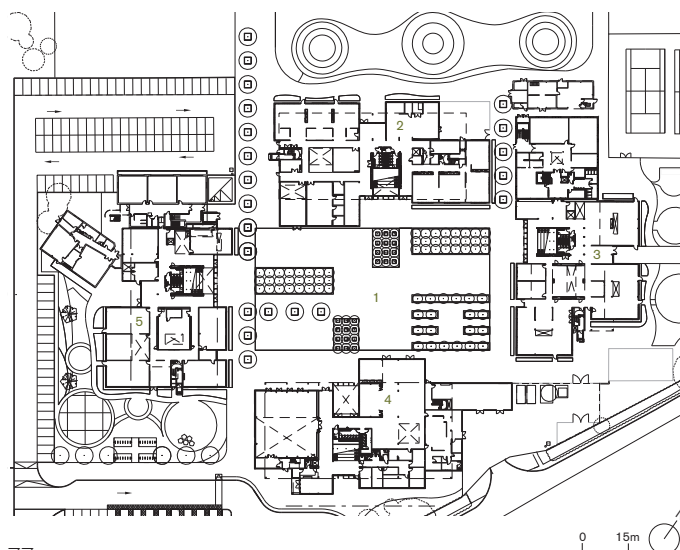


76.

77. Emplazamiento. AJ Specification 2010

78. Maqueta. AJ Specification 2010

79. Patio. Sheppard Robson 2011



77.

## WAINGELS COLLEGE

Datos del proyecto

Construcción:

Abril del 2009 - septiembre del 2011

Área: 12.925m<sup>2</sup>

Costo: £24 millones

Costo por m<sup>2</sup>: £1.630 (basado en un valor de construcción)

Arquitecto: Sheppard Robson

Cliente: Wokingham Borough Council

Ingeniero Estructural: Carbon Eng, Ramboll

Estudio Acústico: SC Acoustic

Estructuras de madera, construcción y ensamblaje: Eurban Construction

Premios: British Council for School Environments  
Architecture award for Excellence in Design for Teaching and Learning

La escuela combina placas de madera contra laminada encolada con placas nervadas prefabricadas de madera. Más de 6.500 toneladas de CO<sup>2</sup> se captura de la atmósfera por la estructura de madera de la escuela. Un subproducto del procesamiento de fibra de madera comprimida es utilizado en el aislamiento. El acabado de los muros y forjados son solamente cepillados lo cual aumenta su lectura estructural del interior. La madera fue tratada a lo largo de las rutas de escape, para controlar su comportamiento al fuego.

La idea de la planta abierta del teatro con la circulación exige una atenuación acústica, la cual fue incorporada en la cara inferior de las placas prefabricadas de madera en el forjado.



78.



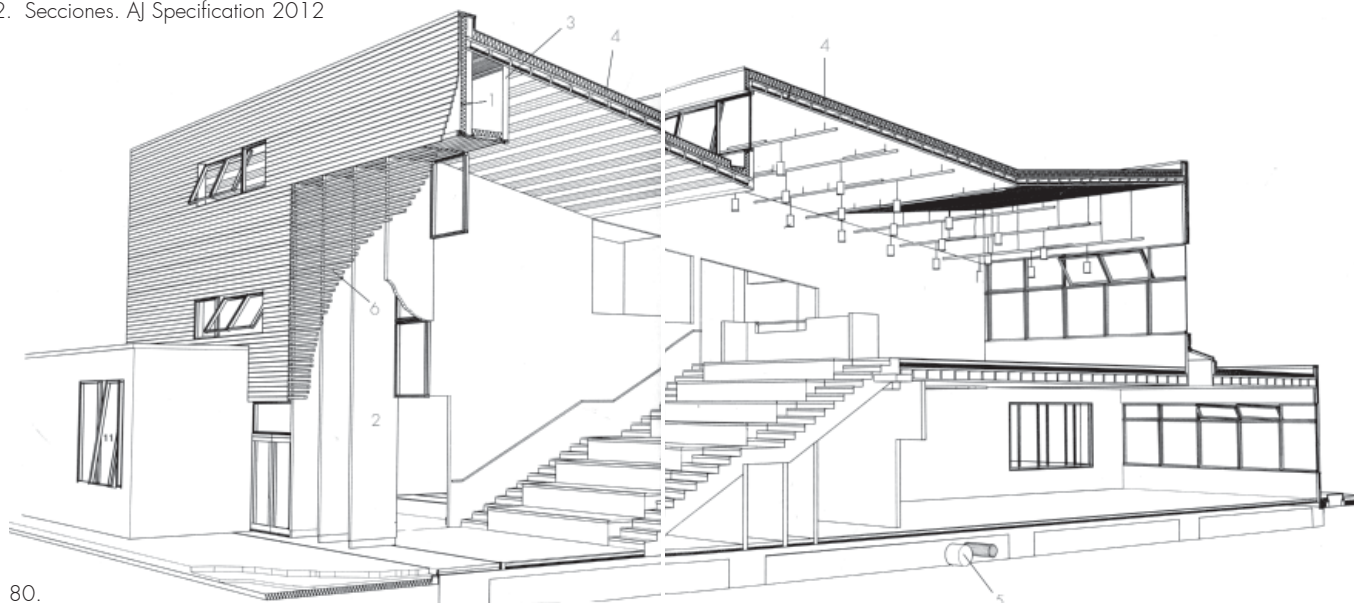
79.



80. Perspectiva sección auditorio. AJ Specification 2010

81. Maqueta. AJ Specification 2012

82. Secciones. AJ Specification 2012



80.

La ingeniería de la estructura de madera es capaz de lograr una serie de espacios libres de columnas. El bloque A incluye una gran sala de 11 m de ancho por 18 m de largo y 9 m de alto donde se encuentra suspendida la biblioteca. Con un sitio apretado y la construcción por etapas, la universidad existente se mantuvo en uso durante todo el período de construcción. Esto fue posible gracias a la velocidad del montaje e instalación relativamente tranquila de los paneles de madera en comparación con los métodos habituales de construcción. Construir con madera prefabricada significa costos bajos y una construcción rápida.

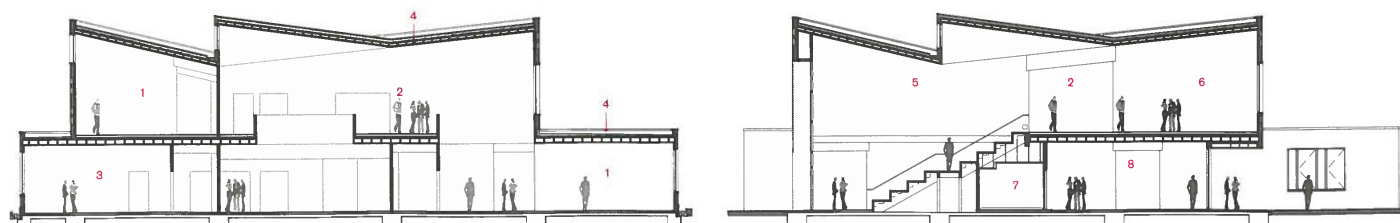
La escuela está organizada en cuatro bloques en torno a un centro de tenis al aire libre, yendo contra la tendencia de un atrio central cerrado, a favor de ofrecer a los estudiantes un soplo de aire fresco entre las lecciones. Una paleta de revestimiento de madera y de color envuelve cuatro edificios (un edificio de entrada al salón principal y tres edificios de la biblioteca y del aula especializada) que son casi idénticos diferenciados por colores que sutilmente representan las cuatro estaciones. En esta escuela los maestros eran vistos como modelos

#### *Perspectiva de la sección del auditorio*

1. Aislamiento de fibra de madera crea una fachada transpirable
2. Placas estructurales de madera conta-laminada encolada
3. Vigas de madera maciza
4. Placas estructurales alveolares prefabricadas de madera perforadas en su cara interior
5. Calefacción alimentada con por biomasa
6. Lamas de madera



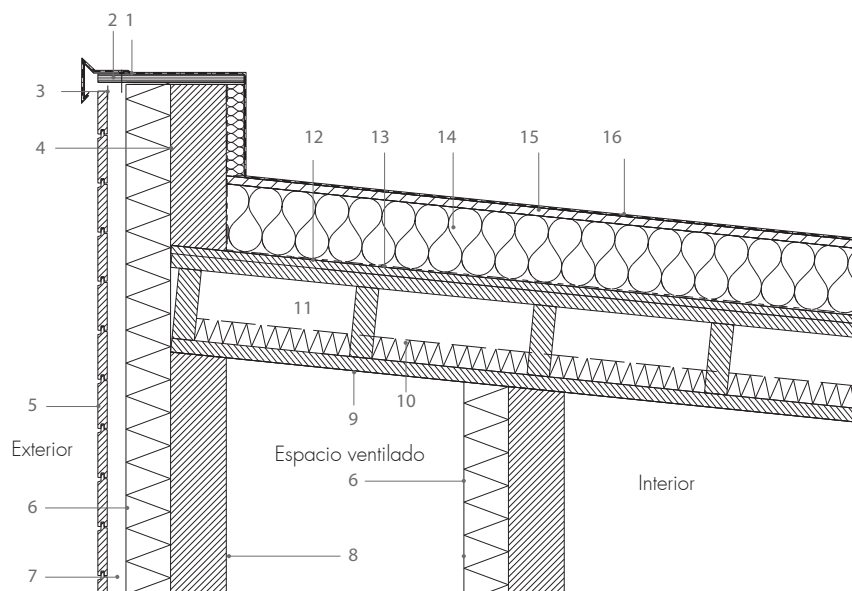
81.



- |                           |   |
|---------------------------|---|
| 1. Laboratorio de ciencia | 6. Internet/café, centro de recursos de aprendizaje |
| 2. Circulación            | 7. WC   |
| 3. Cuarto de tecnología   | 8. Internet/café                                    |
| 4. Terraza de juegos      |   |
| 5. Foro                   |   |

82.

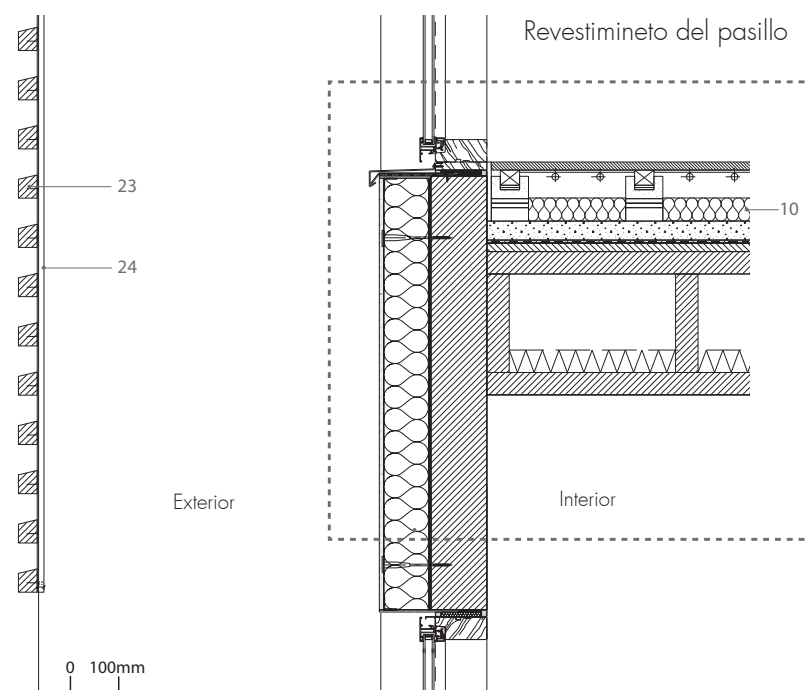
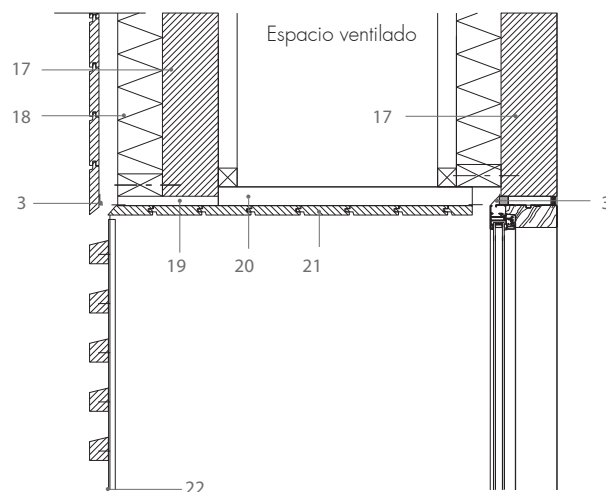
## 83. Sección Fachada. AJ Specification 2010



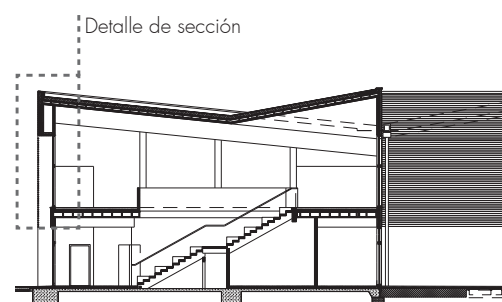
Sección típica del primer nivel

*Detalle constructivo de fachada auditorio*

1. Lámina impermeable
2. Revestimiento con tablero plywood de 18mm
3. Malla contra insectos
4. Placa contra-laminada estructural
5. Madera de revestimiento sobre subestructura de listones verticales
6. Aislamiento de fibra de madera
7. Cámara de aire
8. Viga de madera maciza exterior
9. Techo perforado
10. Aislamiento acústico
11. Placas prefabricadas alveolares estructurales
12. Tablero OSB
13. Barrera de vapor
14. Aislamiento
15. Tablero plywoo de 18mm
16. Membrana monocapa
17. Viga de madera maciza interior
18. Aislamiento de fibra de madera
19. Listones de 42x42mm
20. Listones de 42x42mm
21. Soffit revestimiento de madera
22. Correa intermedia de soporte de acero
23. Lamas de madera
24. Correos de fijación metálicas



83.



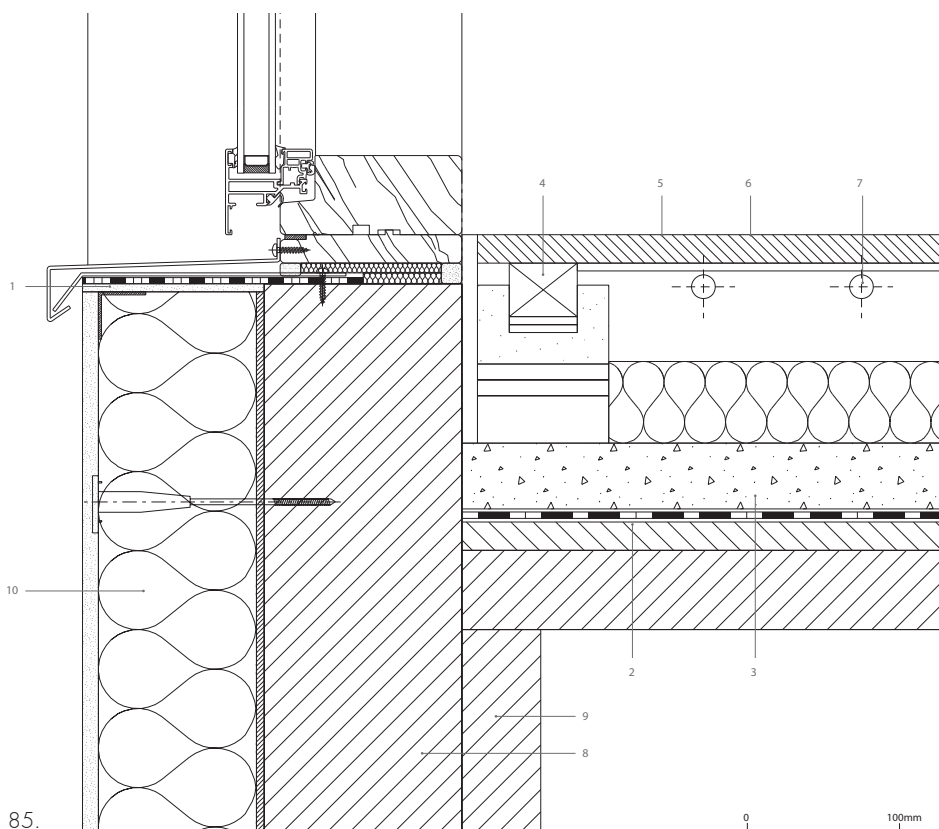
84. Pasillo. Sheppard  
Robson 2011  
85. Detalle pasillo. AJ  
Specification 2010



84.

a seguir y mentores, no disciplinarios, y esto se da gracias a edificios que permitan la supervisión pasiva y borrar la distinción entre la enseñanza y el aprendizaje. Los arquitectos, frente a esto, propusieron minimizar las aulas celulares y maximizar las áreas de aprendizaje abiertas organizadas en torno a foros centrales, inspirada en los auditorios escalonados Hertzberger, en donde cada uno tiene capacidad para 250 estudiantes. Si bien esta idea es diferente, la flexibilidad a largo plazo de estos espacios escalonados es cuestionable, ya que podría representar una camisa de fuerza a través del tiempo, en comparación con las salas de tamaño similar en un solo nivel.

Los foros están rodeados por áreas de aprendizaje abiertas altamente flexibles, siendo posibles gracias al uso de la gran estructura de madera laminada. El resultado son edificios con plantas que facilitan la luz del día, la ventilación natural y la acústica. Los ingenieros de Skelly & Couch, desarrollaron un diseño robusto que utiliza el peso ligero de la madera: techos con cubiertas invertidas y volúmenes de aproximadamente un piso y medio de alto permiten la circulación y el cambio del aire suficientes para ventilar de forma natural las áreas de enseñanza controlando un potencial sobrecalentamiento.



85.

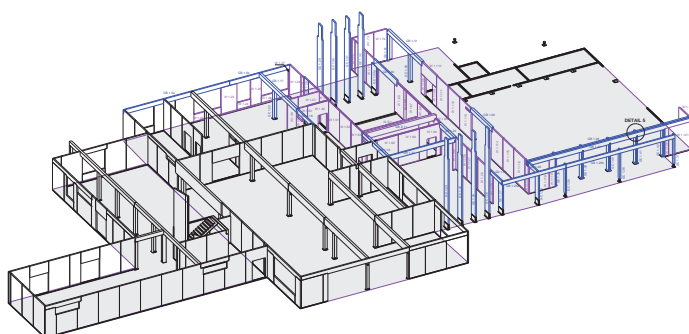
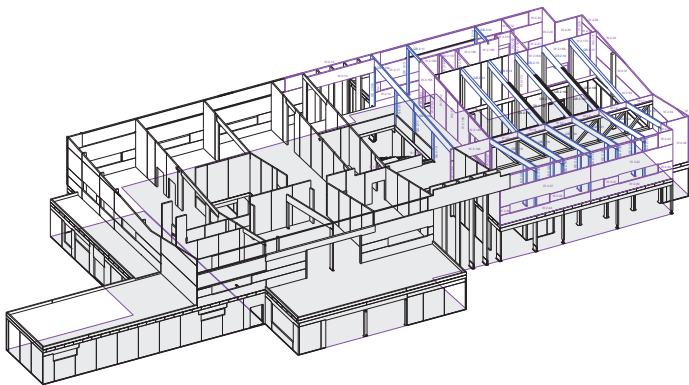
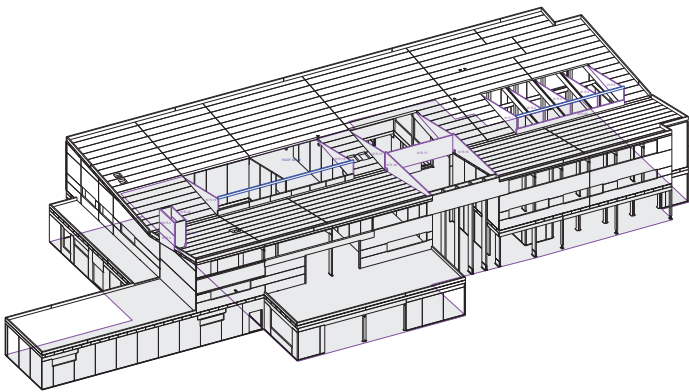
#### Detalle del pasillo

1. Lámina impermeable auto-adhesiva
2. Lamina aislante anti-vibraciones
3. Capa de compresión
4. Sistema de suelo suspendido
5. Acabado de suelo final
6. Tablero de plywood
7. Sistema de calefacción
8. Madera maciza
9. Placas prefabricadas alveolares de madera
10. Madera maciza



86. Orden de piezas bloque A. URBAN 2014  
 87. Interior. URBAN 2014  
 88. Auditorio principal. Sheppard Robson 2011

*Orden de instalación de las piezas del bloque A*



86.



87.



88.

## **COMPARACIÓN ENTRE MODELOS DE PLACAS**

## RESISTENCIA Y PESO

Seguidamente detallo una comparación que he llevado a cabo entre las placas indicadas anteriormente que servirá para ilustrar su eficiencia. Se han medido cada uno de los elementos que las conforman, para salvar luces de 5m, 7,5m y 10m; las medidas de los cantos se han tomado de las especificaciones de los fabricantes y son las siguientes (apartado A del anexo):

Densidad estipulada en el Código Técnico de  $5.0 \text{ KN/m}^3 = 101,97 \text{ Kg/m}^3$

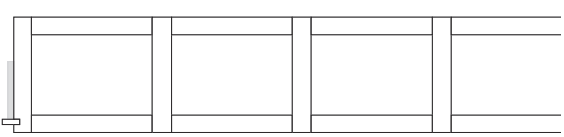
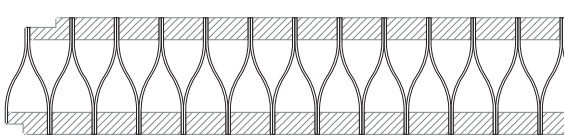
Carga mortero 5cm + pavimento:  $1,0 \text{ KN/m}^2$

Tabiquería:  $1,0 \text{ KN/m}^2$

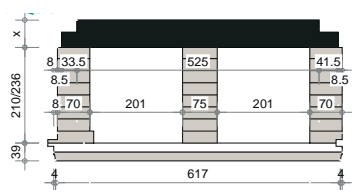
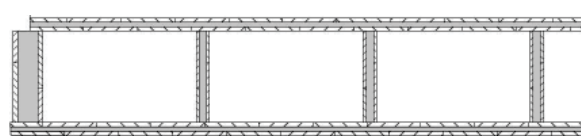
Uso (vivienda):  $2,0 \text{ KN/m}^2$

Total carga:  $4,0 \text{ KN/m}^2$

L / 300

Luz	Lignatur		Kielsteg	
				
m	Canto (m)	Peso ( Kg/m2)	Canto (m)	Peso ( Kg/m2)
5	0.16	52.6	0.19	52.62
7.5	0.24	66.49	0.28	77.54
10	0.32	88.65	0.38	105.24

	Lignotrend		Novatop	
				
m	Canto (m)	Peso ( Kg/m2)	Canto (m)	Peso ( Kg/m2)
5	0.182	65.21	0.18	48
7.5	0.262	93.87	0.3	53
10	0.302	108.2	0.4	70.66

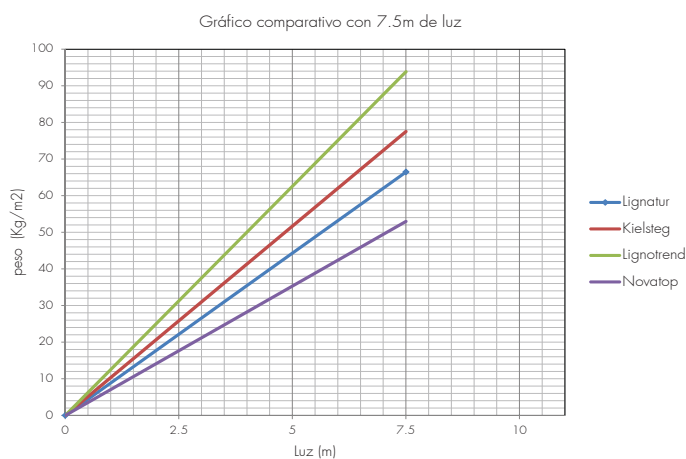
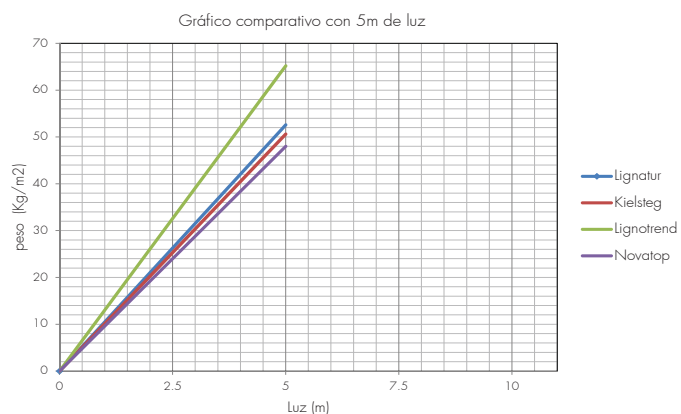
Para la comparación se han tenido en cuenta aspectos como la configuración de sus elementos, peso y resistencia.

Los gráficos indican que a mayor ángulo de inclinación menor es su eficiencia desde el punto de vista peso/luz, las placas Novatop son las más eficientes.

Los datos obtenidos revelan que las placas Lignotrend por su configuración de los nervios con tablas encoladas horizontalmente resultan más pesadas, pero su fabricación es mas sencilla porque se usan varias placas de las mismas medidas. El refuerzo transversal de la placa están en la cara superior.

Las placas Kielsteg, menos pesadas que las anteriores, combinan tablas de madera maciza en las caras superior e inferior y tableros contrachapados para los nervios. Si bien con esta combinación se logran resolver luces de hasta 27m, las luces que hemos analizado no son las más eficientes. Su fabricación en este análisis comparativo es el más lento puesto que ordenar y montar cada tabla requiere más tiempo que las anteriores, a pesar que es automatizado. También solicitan más cantidad de nervios aumentando su peso. Este tipo de placas no tienen refuerzo transversal.

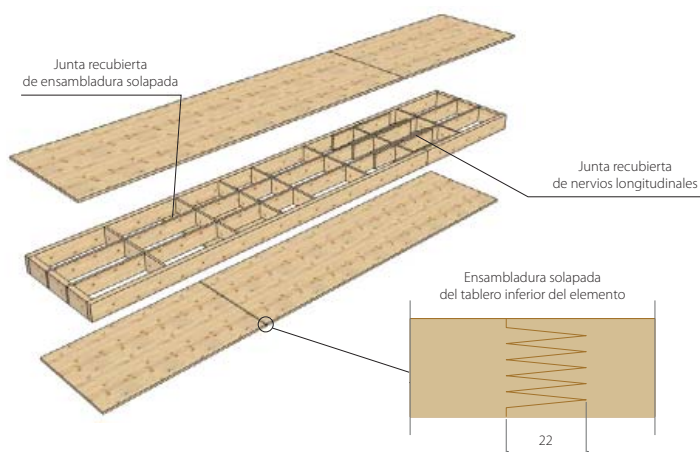
Lignatur es el tercero más pesado, encolando varias tablas con un rango de dimensiones que, si bien no son iguales, son estandarizadas según el canto solicitado. Para su fabricación es necesario ordenarlas y montarlas pieza por pieza, lo requiere más tiempo. Este montaje se realiza manualmente. Existen nervios colocados transversalmente cada cierta distancia.





Las placas Novatop usan tableros multicapa SWP portantes para todos sus elementos logrando mayor resistencia y menor peso. En este análisis son los más eficientes. Son necesarios menos elementos disminuyendo las etapas de montaje y agilizando su producción. Las caras superior e inferior son continuas y para alargar las placas se solapan las juntas, como se muestra en el gráfico. Esta es una solución a destacar en este sistema. La placas Novatop también requieren de refuerzos transversales que están colocados a distancias iguales. Cabe recalcar que este sistema es menos sostenible que los otros fabricantes por usar tableros procesados.

En conclusión, la eficiente configuración estructural, el uso correcto uso de los tableros tomando en cuenta el costo energético y rigidez de los tableros y una sencilla y ágil fabricación son aspectos clave que serán tomados en cuenta en el diseño propuesto a continuación.



## PRODUCCIÓN

La producción de las alternativas será juzgada por el tipo de proceso de producción que se utiliza y el número de operaciones requeridas para hacer el producto. Un proceso de producción depende de algunas cualidades, es decir, producción en serie, producción en masa y la automatización de la producción proceso (Botter, 1999), que veremos a continuación.

## PRODUCCIÓN EN SERIE

Para proyectos en los que se requieren elementos que no son iguales es necesario poder añadir elementos pequeños que faciliten alcanzar las dimensiones necesarias, en este caso no todas las soluciones analizadas lo permiten una producción en serie. Lignatur ofrece un producto que es el más pequeño de 20x20cm por lo que marca un valor de 1. Por detrás, Lignotrend tiene una los elementos más pequeños de 60cm y se marca con un valor de 2. Los elementos Kielsteg se pueden hacer hasta de 120cm por lo que se marca el valor de 3. Novatop se marca con 4 por tener los elementos más grandes de 209cm.

## PRODUCCIÓN EN MASA

Lo recomendable es que el elemento se fabrique incluso en horas no laborables, debido a las muchas dimensiones que puede requerir un proyecto. Pero un solo elemento estándar no puede hacerse, esto hace que la producción en masa no sea aconsejable. Hacer un solo elemento con dimensiones incorrectas no permitiría tener una ventaja en la construcción por lo que el coste se elevaría. Por lo tanto ninguna de estas alternativas puntúan un valor para la producción en masa.

## AUTOMATIZACIÓN

El proceso de producción de los elementos Novatop y Lignotrend está totalmente automatizado por tanto se marcan con un valor de 1. El proceso de producción de las placas Kielsteg está en parte automatizado, el proceso de montaje y pegado de los elementos se lo hace manualmente por tanto se marca con un valor de 2. En el caso de las placas Lignatur el montaje y el aplicado de la cola se lo hace manualmente, se marca con 3.

Producción				
Sub-criterio	Lignatur	Kielsteg	Lignotrend	Novatop
P. en serie	1	3	2	4
P. en masa	-	-	-	-
Automatización	3	2	1	1
Operaciones	8	7	5	6

Operaciones			
Lignatur	Kielsteg	Lignotrend	Novatop
Rigurosa	Rigurosa	Rigurosa	Rigurosa
Clasificación de la madera	Clasificación de la madera	Clasificación de la madera	Clasificación de la madera
Unión dentada de las tablas	Unión dentada de las tablas	Unión dentada de las tablas	Unión dentada de las tablas
Aplicación del adhesivo a mano	Cortado de tableros contrachapados	Aplicación del adhesivo y montaje	prensado de tableros swp
Montaje de los elementos (a mano)	Clavado de elementos	Presado	corte de tableros
Presado	Montaje y prensado	Cepillado	Montaje
Cepillado	Cepillado y machihembreado		Prensado y pegado
Fresado de cantos	Rectificado		
Rectificado			

## POSIBILIDADES DE OPTIMIZACIÓN

El análisis de las placas a producido que se evidencien las ventajas y falencias de cada fabricante señalado, con lo que he visto pertinente señalar los siguientes puntos:

## ELECCIÓN DEL MATERIAL

Para elegir el material es necesario tomar en cuenta su impacto ambiental (tanto desde el punto de vista de consumo de energía como de emisiones). Así mismo, debe usarse solamente madera, evitando combinarla con metal u hormigón, por ejemplo, y tampoco adhesivos o uniones metálicas. Es conveniente el uso de madera maciza puesto que la energía necesaria para la fabricación de placas de madera laminada encolada se duplica y en el caso de tableros se multiplica por 6. (Göran Sandberg, 2003) (apartado B del anexo).

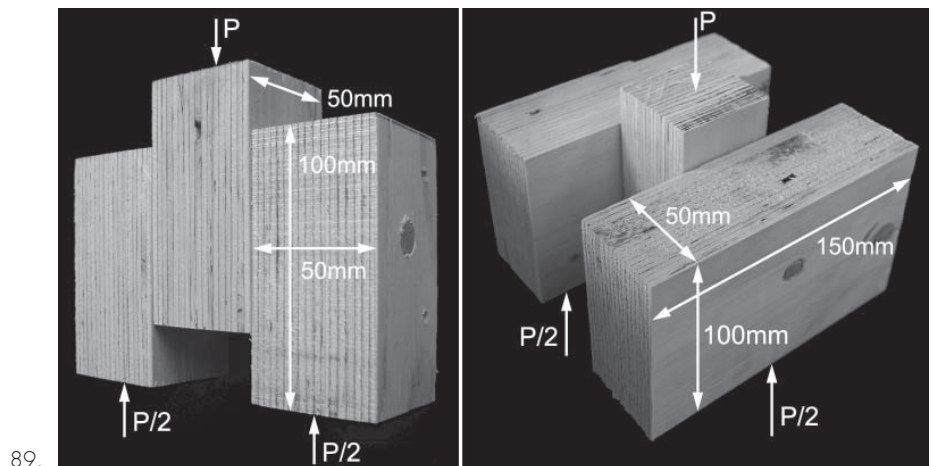
## ÁGIL PRODUCCIÓN

El método de prensado de las placas tiene desventajas al momento de montar los elementos, que en la mayoría de los casos se realiza manualmente. Se debe encontrar un nuevo método o suprimirlo. Este nuevo método debe mantener los elementos juntos entre ellos. En suma, se debe reducir: la mano de obra al mínimo, el número de operaciones de fabricación y el de los elementos que conforman la placa.

## DIMENSIÓN Y RELACIÓN ENTRE ELEMENTOS

Hay que tener presente los distintas cuestiones. Primeramente, las placas deben permitir la incorporación de aislantes en su interior. En segundo lugar, el número de elementos necesarios para conformar las placas tiene que ser el mínimo. Otro factor importante es la reducción de los cortes a los estrictamente necesarios y realizar un esfuerzo para evitar los desperdicios. Además, se deben poder dejar las caras vistas, sin añadiduras.

## **OPTIMIZACIÓN DE UNIONES**



89.

Se ha optado por el método de unir los elementos con espiga para la conformación de las superficies, sin adhesivo. Esta solución permite una fabricación totalmente mecanizada (Bresta, 1994; Inholz, 1996). Para la selección de las uniones y el diseño de las placas hemos realizado un análisis de las uniones entre los elementos.

Por lo que respecta a la selección de materiales para el pasador y vigas principales, nos hemos basado en la investigación experimental "The Structural Performance of Non-metallic Timber Connections", por A. Thomson (2010). Esta investigación incide sobre el uso de diferentes pasadores y vigas de materiales no metálicos y el objetivo del estudio fue determinar experimentalmente la respuesta de carga comparativa de las conexiones realizadas con diferentes materiales y pasadores antes de investigar el uso de diferentes materiales de placa. En base a los resultados del estudio se seleccionó un solo sistema de conexión para una mayor investigación y desarrollo.

Tres materiales diferentes no metálicos fueron seleccionados para los pasadores para las pruebas comparativas: el roble europeo, la fibra de vidrio reforzada con polímero (GFRP) y la chapa de madera densificada (DVW). También fueron probados pasadores de acero inoxidable para proporcionar una referencia en términos de modo de conexión, rigidez, resistencia y el fracaso. En la figura 89 se muestran los dos casos de las pruebas en dónde se usa tableros Kerto-S LVL (placa de chapa laminada) de 46mm para la madera de apoyo, ya que proporciona un sistema más uniforme, y puede

ser comparable a lo que puede esperarse de la madera maciza aserrada. Las disposiciones de los pasadores con respecto a los bloques de madera son paralelos a la fibra y perpendiculares a la fibra. La sección de las espigas son de 12mm de ancho. Los pasadores de acero inoxidable evidentemente tienen mayor rendimiento por su capacidad de resistencia. No obstante los de DVW y GFRP proporcionaron una capacidad favorable de rendimiento a la conexión de aproximadamente dos tercios de la capacidad del acero inoxidable. Los valores de resistencia y rigidez registrados para los pasadores de roble fueron significativamente menores que los registrados en los otros materiales para el pasador. Esto era de esperar, porque los tacos de madera son un producto no procesado de relativamente de baja resistencia.

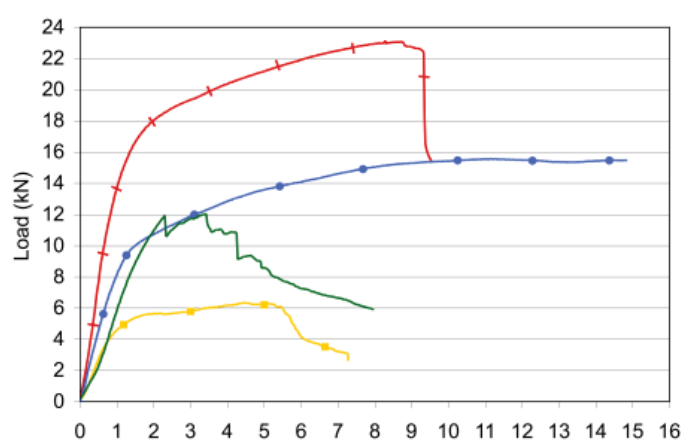
Existen variaciones de los resultados que generalmente se pueden atribuir a la variación en los materiales de los pasadores en los que, en ciertos casos, se presentan valores significativamente altos, situaciones que generalmente están atribuidas a la variación de la fibra, la densidad, la orientación, de la espiga y la presencia de defectos naturales. Estas variaciones aumentan cuando el diámetro de la espiga es más pequeño; en este caso son de 12mm.

En la figura 91 se evidencia como los materiales se comportan y nos dan una idea de los que podríamos usar para la conformación de la placa, que dependiendo del análisis estructural tentativamente podrían usarse pasadores de madera de DVW por su favorable rendimiento o las de roble por ser

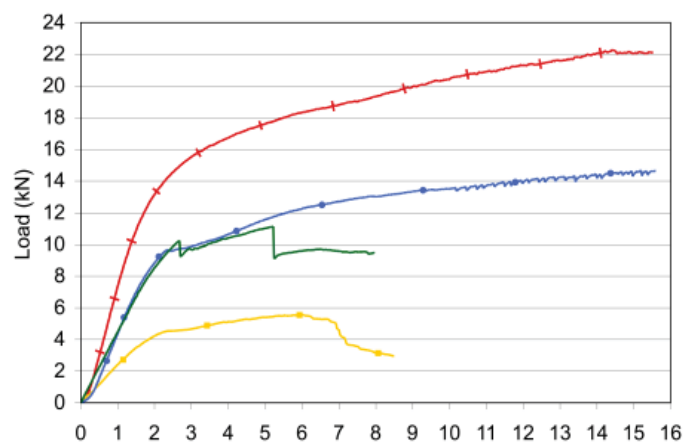
90. Gráfico con pasador paralelo a la fibra. Thomson, 2010

91. Gráfico con pasador perpendicular a la fibra. Thomson, 2010

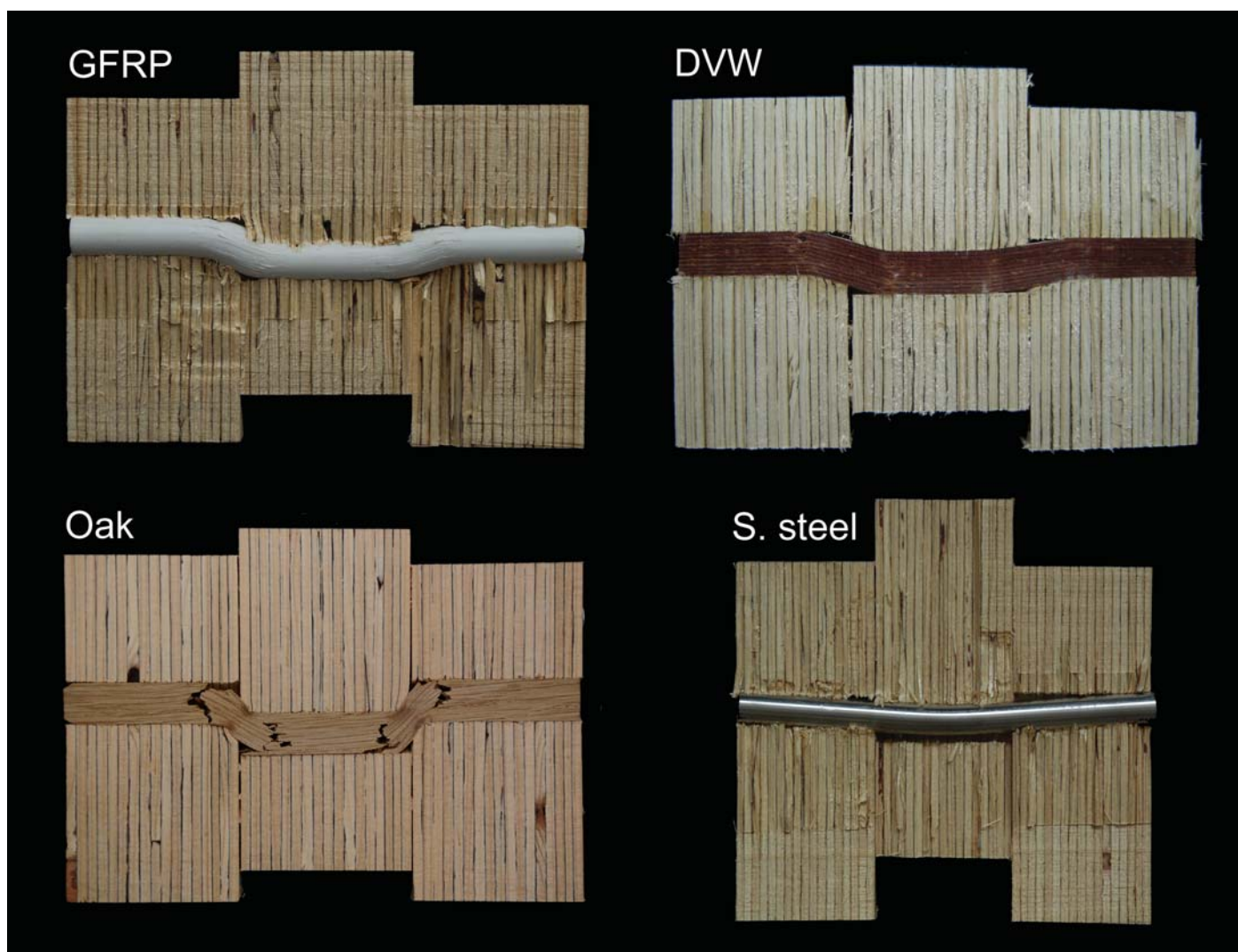
92. Ensayos seccionados con pasadores de polímero con fibra de vidrio (GFRP), madera microlaminada enchapada (DVW), roble Europeo (OAK), acero inoxidable, Thomson, 2010



90. Displacement (mm) —+— Stainless Steel —●— Oak —●— GFRP —●— DVW

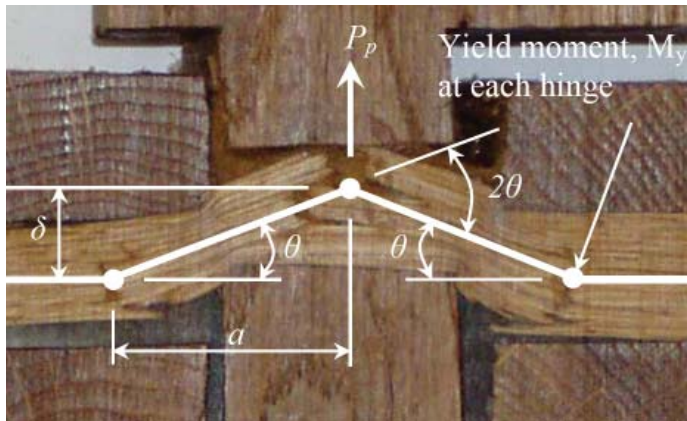


91. Displacement (mm) —+— Stainless Steel —●— Oak —●— GFRP —●— DVW

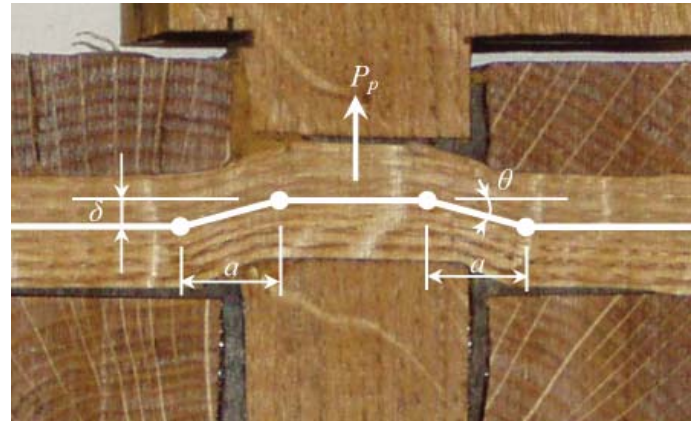


92.





93.



un material no procesado a pesar de que en la tabla tienen el peor rendimiento. Eliminamos, pues, las otras dos opciones de fibra de vidrio y acero. También se puede apreciar que los materiales se comportaron mejor paralelos a la fibra de la madera pero si se tratara de madera maciza, como es el caso de las tablillas de madera que nosotros proponemos para la placa, se pueden separar las fibras haciendo fracasar al elemento. La figura 92 muestra fotografías de los modelos que fueron sometidos hasta el punto de máximo desplazamiento de los bloques de madera comunes en este tipo de ensayo y luego fueron cortados para la inspección del pasador.

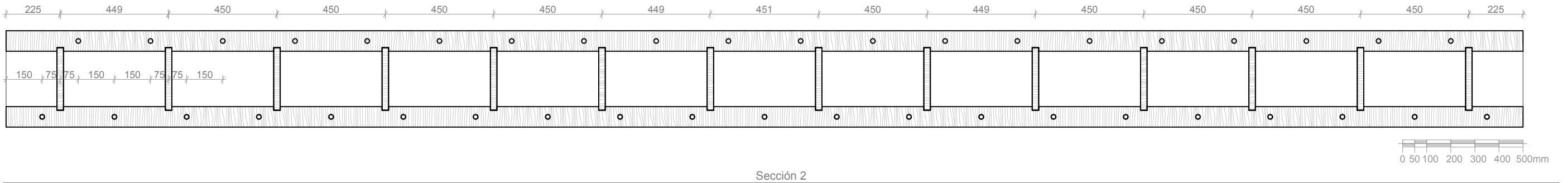
También nos hemos basado en la investigación experimental de Shanks (2005), que desarrolló un método para evaluar la rotura de una conexión con madera de roble. Los ensayos revelan que los fallos definidos por los modelos se debían casi exclusivamente por el pasador, con muy poco daño en la madera de apoyo. El método propuesto define la distancia en donde el pasador se fisura, en donde el espaciamiento de las bisagras puede variar entre  $0,75D$  y  $1,5D$  en donde  $D$  es el diámetro del pasador, como indica la figura 93 sin importar los anchos de los bloques de madera. Este método que puede ser aplicable para analizar nuestra propuesta.

**PROPUESTA**



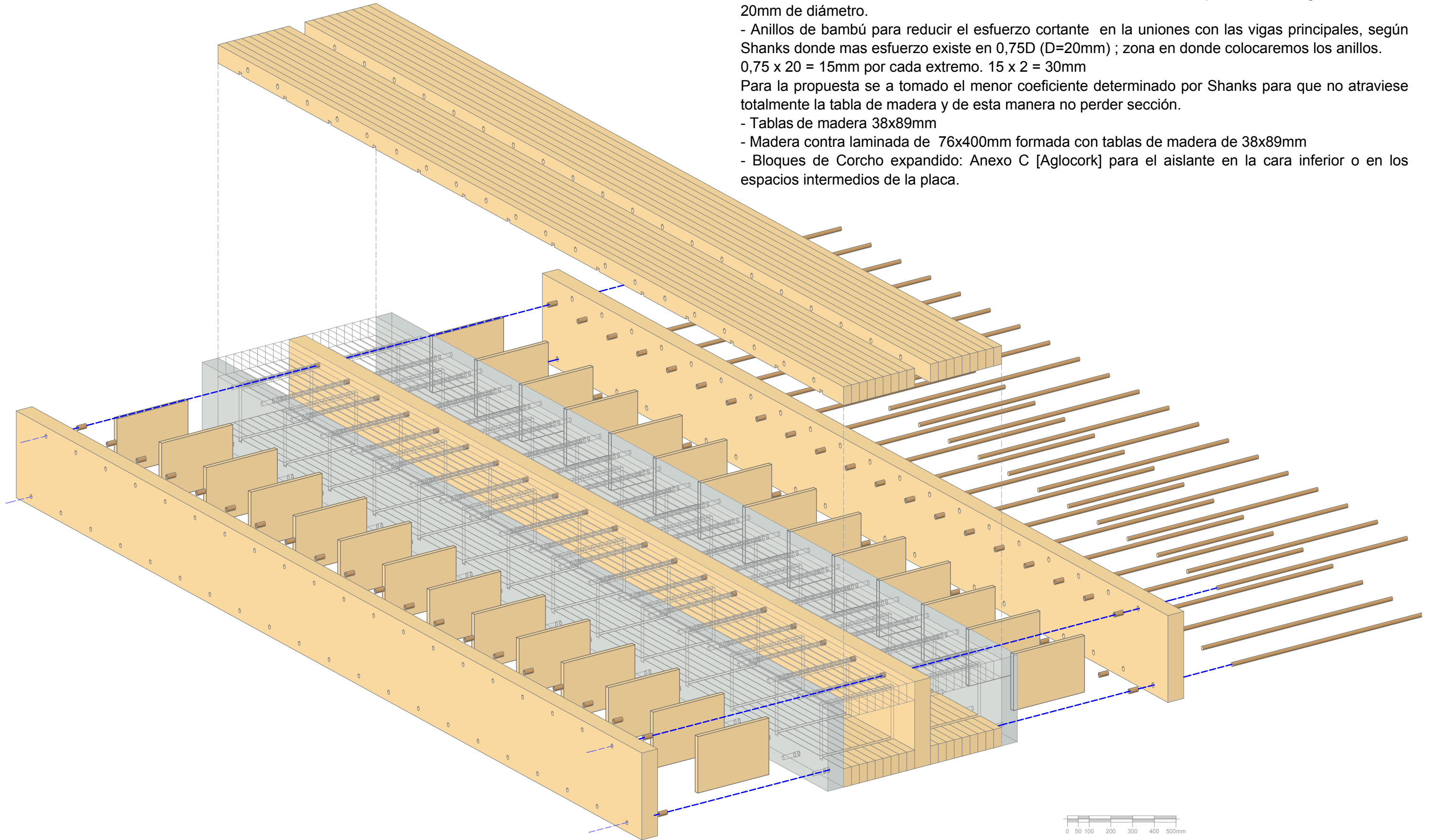
Para la propuesta de una placa alternativa hemos visto conveniente rescatar los puntos positivos de cada una de las placas señaladas anteriormente entre los principales están:

Modulación y racionalización con el mínimo de elementos de distintas dimensiones para conformar la placa de Lignotrend, evitando el desperdicio. Sistema de unión de los elementos de las placas Bresta.



#### Materiales:

- Pasadores de madera maciza o de madera microlaminada enchapada DVW, según cálculo de 20mm de diámetro.
- Anillos de bambú para reducir el esfuerzo cortante en la uniones con las vigas principales, según Shanks donde mas esfuerzo existe en  $0,75D$  ( $D=20\text{mm}$ ) ; zona en donde colocaremos los anillos.  $0,75 \times 20 = 15\text{mm}$  por cada extremo.  $15 \times 2 = 30\text{mm}$
- Para la propuesta se a tomado el menor coeficiente determinado por Shanks para que no atravesie totalmente la tabla de madera y de esta manera no perder sección.
- Tablas de madera 38x89mm
- Madera contra laminada de 76x400mm formada con tablas de madera de 38x89mm
- Bloques de Corcho expandido: Anexo C [Aglocork] para el aislante en la cara inferior o en los espacios intermedios de la placa.



Axonometría Despiece

### Montaje y producción

1. Se rebajan las tablas de las caras para la inclusión de los refuerzos transversales.  
Se pueden fresar los cantos de las tablas de la cara inferior para mejorar la absorción acústica.  
Dependiendo del tipo de proyecto, para esta superficie también se pueden usar bloques de corcho expandido por sus propiedades acústicas, térmicas y buen comportamiento al fuego, de esta manera se aligera aun más la placa.
  2. Se colocan las tablas en posición horizontal y de plano, incluyendo la viga principal y los refuerzos de bambú (esta operación es ágil e incluye la viga principal optimizando la producción).
  3. Se montan los refuerzos transversales a distancias iguales.
  4. Se monta la ultima viga principal.
- Los procesos 1, 2, 3, 4 se repiten hasta obtener el ancho y numero de vigas principales deseadas en la placa.
5. Luego se ensamblan las tablas mediante uniones sucesivas con pasadores encajados mecánicamente a presión. Las pasadores están en dirección transversal a las distintas capas de madera, con lo que se consigue que los movimientos debido a desplazamientos, retracciones o hinchazones se reduzcan prácticamente del todo. [DEPLAZES, 2010]
  6. Cepillado y rectificado final de la placa.

### Optimización de operaciones

- Ágil montaje de los nervios que permite una total automatización.
- Eliminación del pegado y prensado.
- Esta solución no hace uso de ningún tipo de colas o articulaciones metálicas, lo que hace a esta placa fácilmente realizable. Facilita la deconstrucción.

### Aislamiento

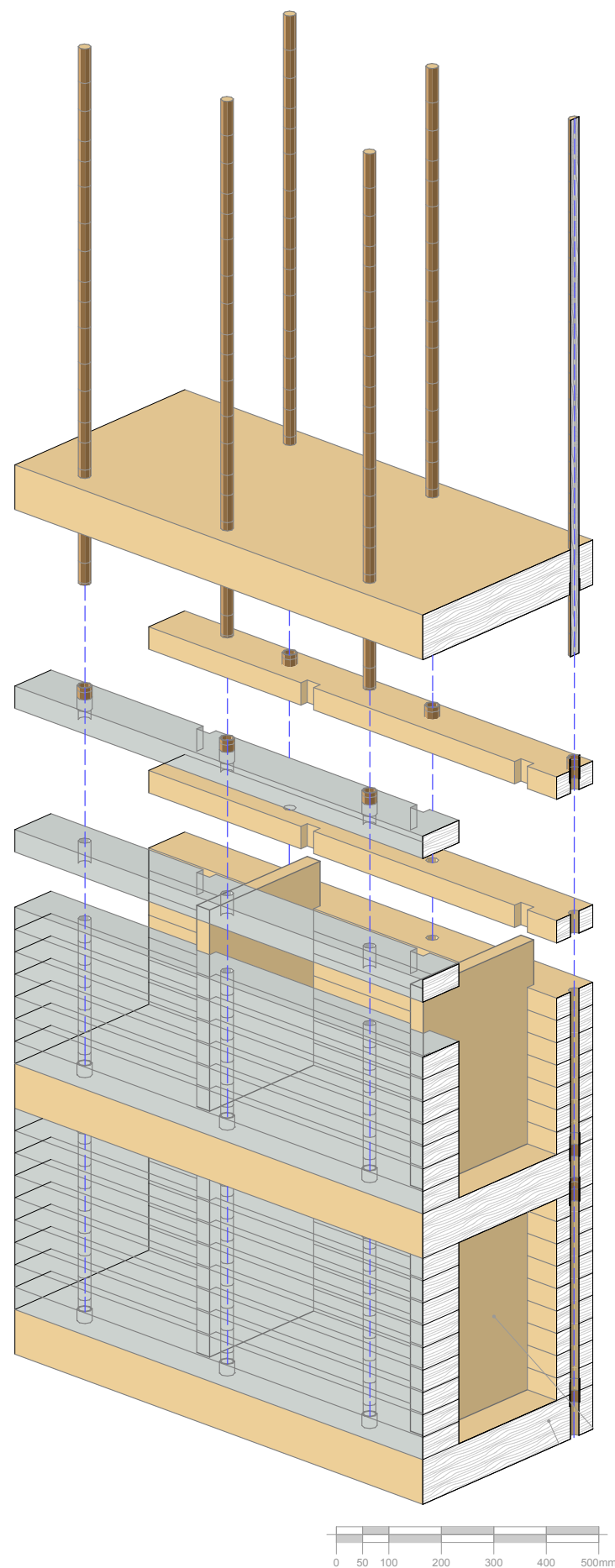
Permite colocar aislamiento en el interior de la placa o reemplazando la superficie inferior.

### Comportamiento al fuego

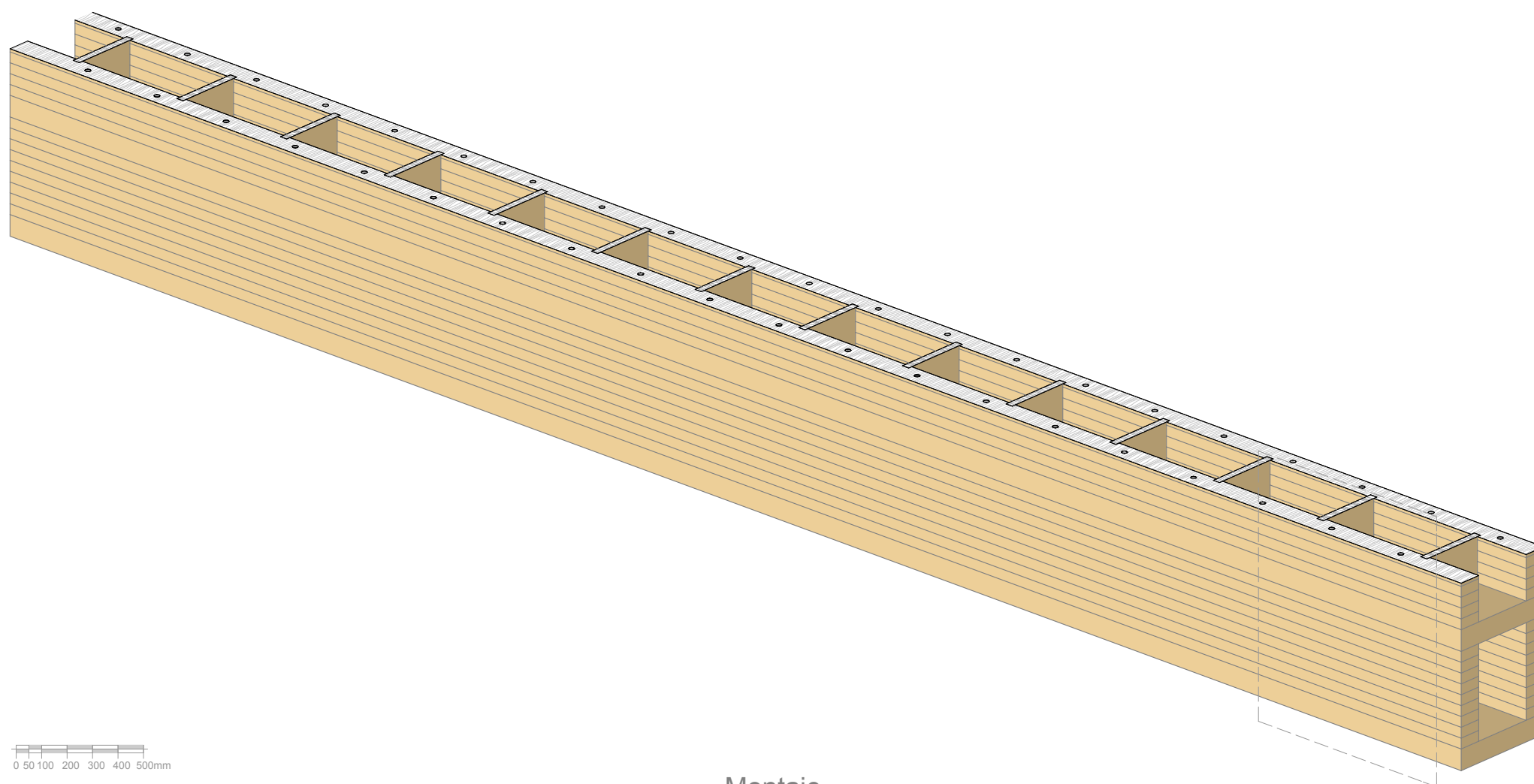
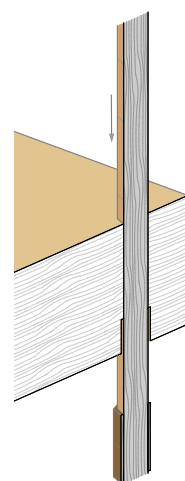
Permite variar el espesor de la capa inferior.

### Acústica

Posibilidad de fresar las tablas de la cara inferior para mejorar sus propiedades acústicas.



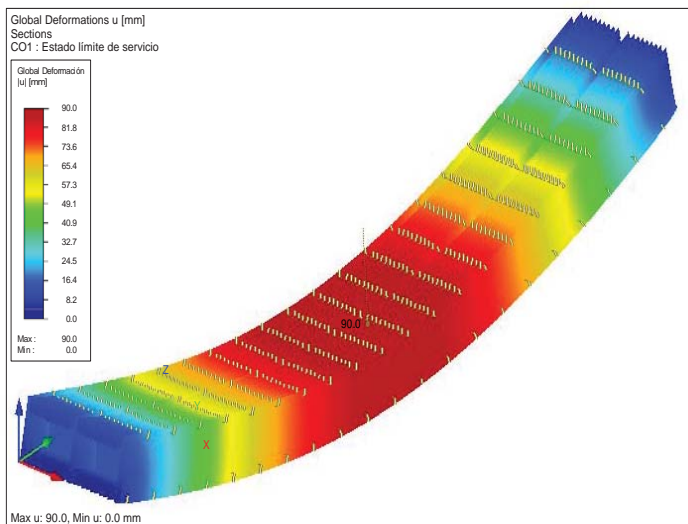
Detalle de montaje



Montaje



94. Deformaciones Globales  
95. Esfuerzos internos.



94.

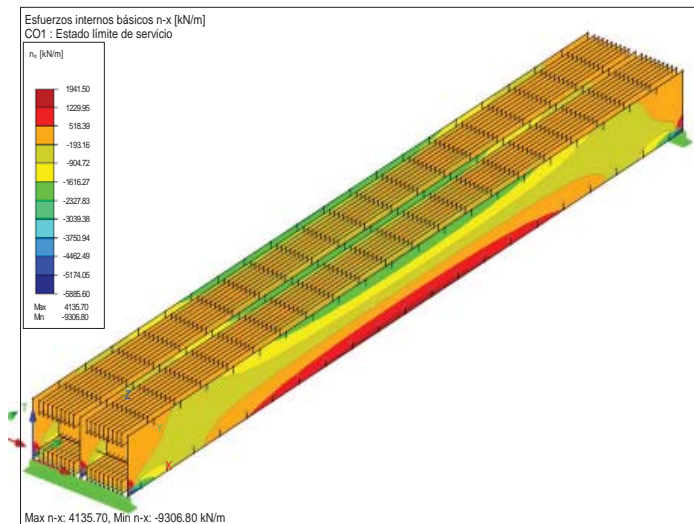
## ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Para comprender mejor los esfuerzos que sufren los distintos elementos de la placa, he desarrollado un modelo para el cálculo de elementos finitos en el software alemán Rfem de Dlubal, el cual es específico para este tipo de placas, y trabaja bajo la norma EN 1990.

Se ha construido el modelo con las especificaciones de la madera C24 de acuerdo al código técnico y hemos dispuesto las fibras de la madera en sentido longitudinal para aprovechar la mayor resistencia. Quizá una de las configuraciones más importantes para el análisis del modelo es el tipo de esfuerzo que se crea en los nudos y las uniones, entre los pasadores y las tablas de madera. Por eso se han tomado en cuenta el deslizamiento, los momentos y los esfuerzos cortantes que sufre el pasador.

Según los el análisis que hemos anotado anteriormente de las uniones de Thomson (2010) hemos decidido tomar la carga máxima soportada por el pasador de madera microlaminada para el análisis (Anexo. Apartado D - Análisis Estructural. Detalles límite Número 1. p.8), aunque también se ha considerado una madera de la clase coníferas C50, con un diámetro de 20mm. En nuestro caso el pasador atraviesa perpendicularmente las fibras de la madera y soportaría aproximadamente una carga de 9.5 kN (figura 91).

Se ha aplicado una carga distribuida uniforme a lo largo de las caras superiores de las tablas y de las vigas principales que tiene una magnitud del peso propio (en este caso es muy liviano) y una sobrecarga

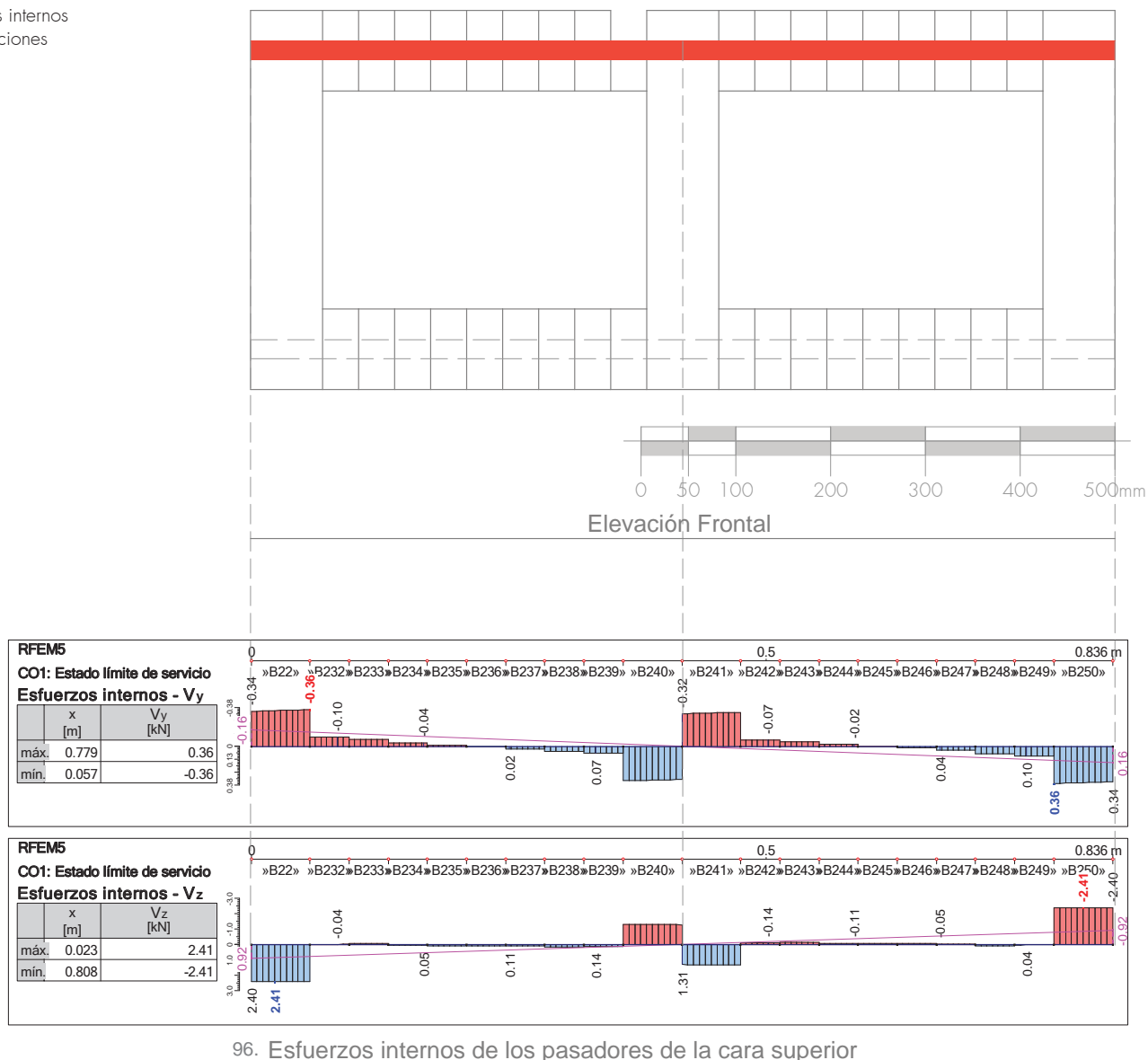


95.

de uso, que sumados dan 2 kN/m, suponiendo que no se recubrirá con otras capas adicionales. El análisis del prototipo demuestra que mientras más canto tengan las vigas principales menor será el esfuerzo en el sentido Y (horizontalmente) porque se pandea menos la placa, haciendo que las distancias entre los pasadores varíen menos.

Hemos puesto especial atención en los pasadores, ya que son los que unen todo el conjunto. Tras diseñar la placa para salvar una luz de 6,3 metros observamos que la cara superior recibe la carga de uso y la carga muerta, por lo tanto los pasadores de esta cara sufren más que los que se encuentran en la cara inferior. Además los mayores esfuerzos ocurren cuando los pasadores están más cerca de las vigas principales como demuestra la figura 95 y 96.

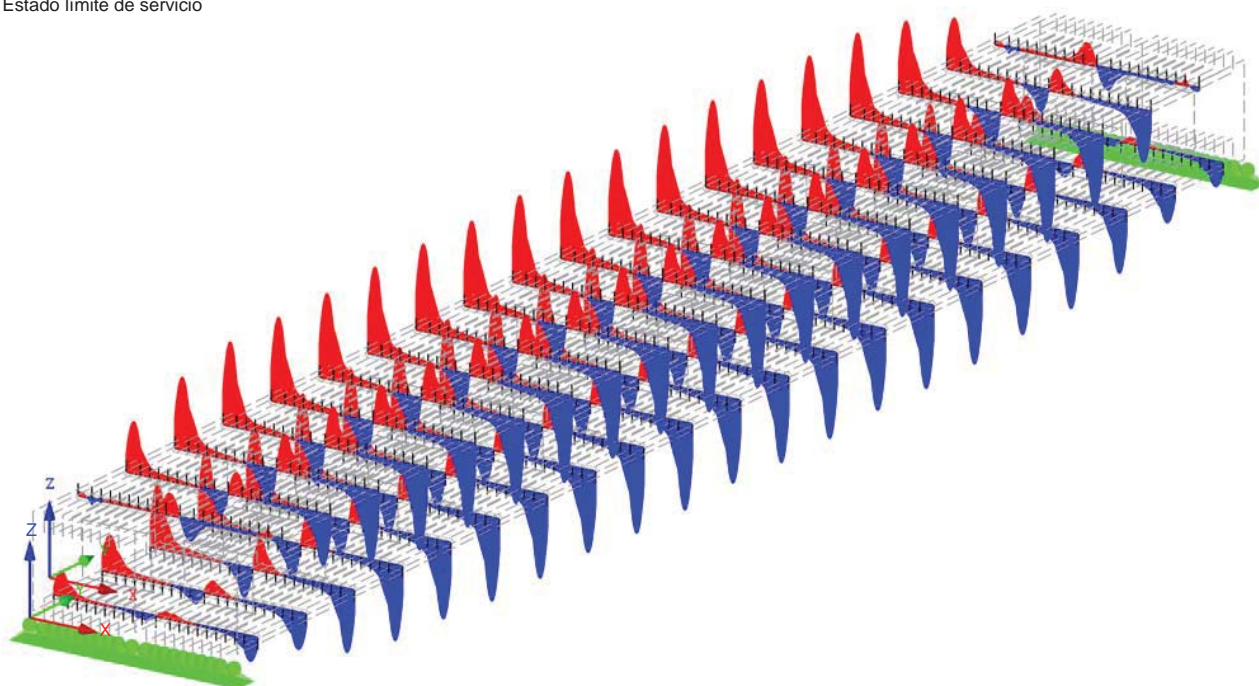
El cálculo revela que el valor máximo del esfuerzo cortante Vz (sentido vertical) en los pasadores es de 4,75 kN (Anexo. D - Análisis Estructural. Cálculo de límites. 2.1 Cálculo por cargas. pag 8), el cual es casi la mitad del máximo admitido por los pasadores de madera microlaminada propuestos.



96. Esfuerzos internos de los pasadores de la cara superior

Deformaciones locales Phi-y [mrad]  
CO1 : Estado límite de servicio

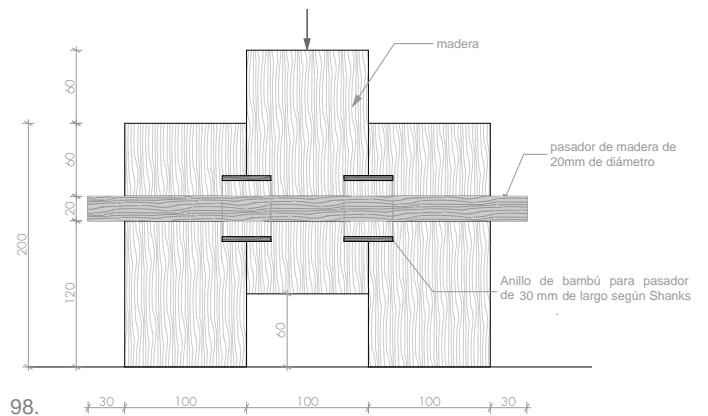
Isométrico



Max Phi-y: 19.3, Min Phi-y: -19.3 mrad

## 97. Deformaciones de los pasadores

- 98. Probeta
- 99. Construcción
- 100. Detalle de probeta construida
- 101. Prensado.

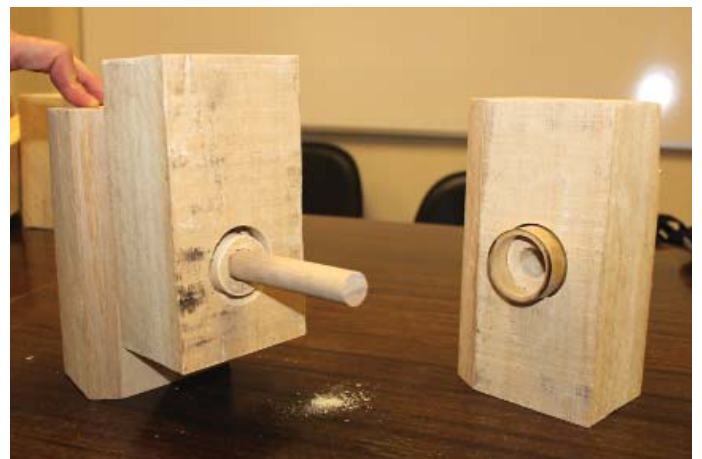


## ENSAYO

Para evitar usar materiales procesados y de fácil obtención y según los resultados del cálculo, hemos desarrollado una opción en donde se podrían usar pasadores que sean de madera de haya. Para mayor seguridad en los lugares más cercanos a las vigas principales lo hemos reforzado con anillos de bambú.

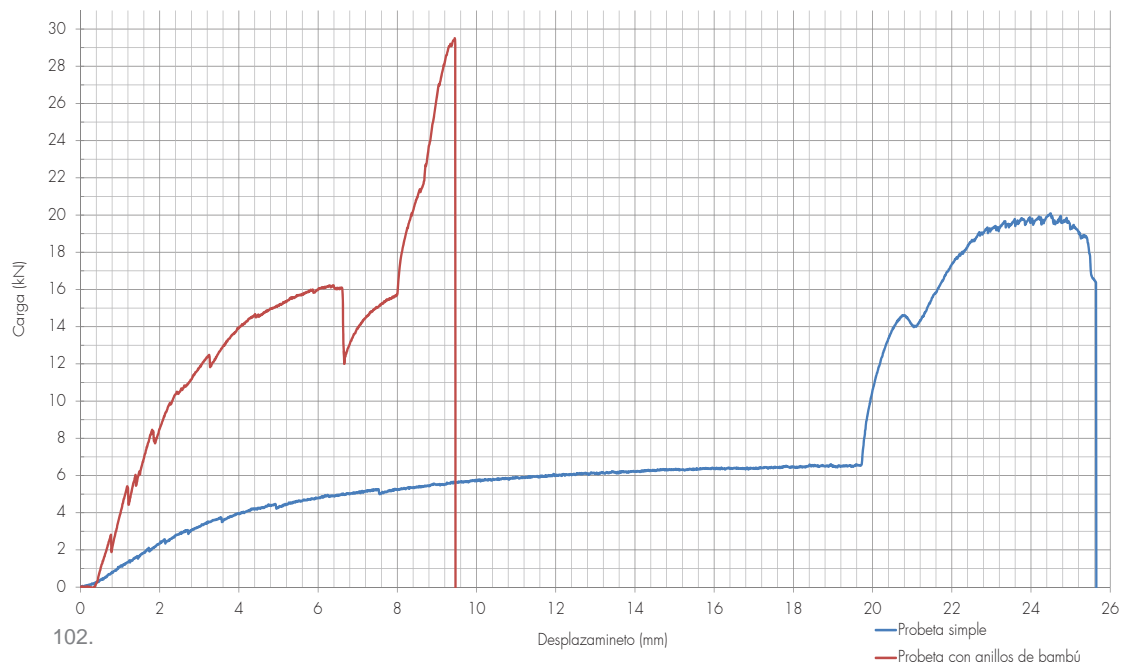
Para esta solución se han construido dos probetas, una solo con el pasador y otra con el pasador y refuerzo, las cuales fueron sometidas a compresión en el Laboratorio de Materiales del ETSEB (UPC).

- Los bloques de madera son de madera Koto (Anexo apartado E).
- El pasador es de madera haya de 20mm de diámetro.
- Los anillos son de bambú y miden 30 mm de largo y 50 de diámetro.





102. Gráfico de comportamiento de probetas  
 103. Detalle del pasador posterior al ensayo  
 104. Probeta con refuerzo posterior al ensayo



La probeta sencilla sin refuerzo resistió una carga de 6,5 kN con un desplazamiento que fue en aumento desde 16mm hasta 19,5mm. Manteniéndose la misma carga, posteriormente resultó una resiliencia del material donde llegó a resistir 20 kN, desplazándose 24,5mm en total (Figura 102). Se puede observar que se forman picos en la línea de la relación entre carga y distancia; esto sucede porque la superficie del pasador se ajusta al bloque de madera.

La resiliencia se puede explicar debido a que el pasador se fisura y luego las fibras se comprimen entre los elementos resultando en que puede seguir aguantando más carga hasta que se rompa totalmente. Figura 103



103.

En la probeta reforzada se puede apreciar que en 3 kN casi sin desplazamiento, se rompe el bambú (se escucharon crujidos que evidenciaron rotura), continúa rompiéndose hasta 12,5 kN, por esta razón se explican los picos en la línea de relación entre carga y distancia del gráfico 102. Sin embargo sigue resistiendo hasta 16 kN antes que su desplazamiento aumente considerablemente. También existe una resiliencia del material llegando a resistir hasta 29,5kN (Figura 98). Como se ha señalado en la primera probeta, la superficie del pasador se adaptó a los bloques de madera para luego comprimir y fisurar el pasador hasta que se rompió totalmente. Gráfico 104

(Detalle fotográfico de construcción y mediciones en Anexo, apartado F)



104.

## CONCLUSIONES

En el presente estudio se han analizado las placas existentes en el mercado europeo en donde se han evidenciado sus virtudes y falencias. Como respuesta a la visión general de las placas se ha propuesto una alternativa que ha intentado rescatar los mejores puntos de cada una y se ha ensayado una unión optimizada de madera sin adhesivo.

Hemos visto cómo el sistema propuesto por Hetzer es el antecedente directo de este tipo de forjados de madera y el que más continuidad ha tenido y cómo la industrialización de la madera ha significado un avance tecnológico de importancia fundamental para la industria de la construcción, por la mejora de los sistemas y por la innovación en productos como las vigas doble T y el tablero contralaminado. Una de estas innovaciones han sido las placas que según la clasificación por esfuerzo, siendo de flexión y cortante el de estas, las llamamos nervadas.

La extensión de la fabricación de placas de este tipo es notable, ya que las fabrican con ligeras variaciones bastantes empresas europeas: Lignatur, Kielsteg, Lignotrent, Novatop element y Bresta. Estas emplean distintos productos de madera, como es la madera maciza, la madera laminada, la madera contralaminada, la madera contrachapada y el OSB, empleando principalmente adhesivos de tipo PUR. Por lo que respecta a la fabricación de placas, cabe destacar que estas empresas han automatizado la mayoría de los procesos. Lo único que debe hacerse manualmente es el ensamblado de las placas y sus elementos. El secado de la madera se hace en cámara y en la selección de

la madera se valora la ausencia de nudos y otras imperfecciones. Vemos, también, como existe un gran cuidado en la etapa de aplicación de los adhesivos y debe tenerse siempre presente el respeto por el medioambiente en la selección de los materiales.

En el análisis de las propiedades estructurales de las placas, concluimos que es de elevada importancia usar la madera en dirección paralela a la fibra para dotar el conjunto de mayor resistencia. Así mismo, se ha indicado cómo la madera presenta gran resistencia a esfuerzos de flexión y una rigidez comparable a la del hormigón armado. Esto nos ha llevado, cuando hemos hablado de uniones, a destacar la aptitud de la madera para actuar como unión entre elementos de la placa y entre placas frente a otras uniones que también hemos descrito, como las de tipo metálico que se emplean para conectar con otros elementos estructurales. Por otro lado, los tornillos autorroscantes que se emplean para la unión entre placa - muro y entre placas, las mechas o el KNAPP System son otras opciones metálicas frente al machihembrado, ranura - lengüeta y la unión por medio de pasador de madera introducido a presión. Siguiendo con las propiedades estructurales de la placa, la investigación ha aportado datos sobre la buena resistencia al fuego. Si bien la madera se incendia, su combustión es suficientemente lenta como para permitir la evacuación del espacio. Por contra, las uniones metálicas conducen el calor hacia el centro de la estructura, debilitándola más rápidamente, otro motivo de peso por el que se verifica la capacidad de un pasador de madera para esta placa. Según

los estudios consultados, la madera aguanta entre 30 y 90 REI, en donde las estructuras de madera mejoran su comportamiento al fuego aumentando la sección de sus elementos. Otro aspecto analizado de las propiedades estructurales de la placa es el rendimiento y la absorción acústicos. A pesar de que la madera tiene un bajo aislamiento frente al ruido aéreo y de impacto, la solución se encuentra fácilmente, si introducimos un aislante competente en las cavidades de las placas, y añadimos laminas elásticas. Para mejorar la absorción acústica se realizan cortes, ranuras o agujeros en la su cara inferior. Del mismo modo, las placas también permiten el paso de las instalaciones entre juntas o en su cámara.

Tras el análisis de las propiedades, hemos pasado a ver cómo la arquitectura ha usado este tipo de forjados de madera contemporáneamente, con los casos de la Escuela superior suiza para la ingeniería de la madera y el Waingels College. De estas edificaciones hemos aprendido que para cumplir con las normas de seguridad, las vías de evacuación en caso de alarma son de hormigón.

En la comparación de las placas, ha resultado que la placa de la empresa Novatop element ha obtenido un mejor desempeño teniendo en cuenta los valores peso-resistencia, gracias al uso de los tableros multicapa SWP. La placa de producción más ágil ha sido la Lignotrend, ya que la mayoría de piezas tienen la misma sección, seguida de la placa Novatop element, que tiene pocos elementos que montar. Principalmente, lo que ralentiza la producción de las placas es que el montaje de sus

elementos en la fábrica debe hacerse manualmente. En suma, la comparación de todas las placas nos ha ofrecido las características de una placa óptima, que son: emplear solamente madera maciza, disminuir la mano de obra, las operaciones de fabricación, el número de elementos y los cortes para evitar desperdicios.

Gracias a la investigación de las placas existentes en el mercado y a tesis estudiadas donde se investiga el comportamiento de distintos tipos de pasadores y de materiales hemos podido proponer un tipo de unión optimizada, en la que se trata de construir uniones con pasadores de madera que se encajaban a presión, sin necesidad de adhesivo. Esta unión es decisiva en la propuesta que he elaborado para una placa hecha únicamente con madera para dotar de estabilidad y seguridad al forjado. Para esto he usado el software Dlubal que me ha permitido llevar a buen término un cálculo del esfuerzo de los elementos con tal de comprender cuáles eran los puntos críticos, que han sido los pasadores y las uniones entre elementos. Estos resultados me han sugerido hacer ensayos de la unión, por lo que he realizado dos probetas con bloques de madera de koto con pasadores de madera de haya, una sin refuerzo y otra con un refuerzo de bambú que serviría para las zonas próximas a las vigas principales de la propuesta. La probeta que ha tenido el refuerzo de bambú ha visto cómo este se rompía con poca carga sin embargo ha resistido hasta 16 kN frente a 6,5 kN de la probeta sin bambú. En resumen, el uso del bambú llega a ampliar la resistencia al esfuerzo cortante que existe entre los elementos en un 240%

si lo ubicamos en las zonas donde se concentran más los esfuerzos. También los resultados revelan que los pasadores aumentan considerablemente su resistencia y factibilidad con el incremento de su sección y el empleo de una madera adecuada. Los resultados de los ensayos también nos muestran que existen resiliencias en las probetas que hacen que den total seguridad con magnitudes de cargas muy elevadas, evitando derrumbamientos por eventuales roturas en el forjado.

Es recomendable realizar ensayos variando el diámetro de los pasadores para optimizarlos, así como también variando el diámetro y el largo de los refuerzos de bambú. Debe ajustarse el diámetro del bambú al diámetro del pasador, para minimizar los cortes en la madera, sin dejar de lado la agilidad de los procesos de construcción. También se deberían realizar ensayos de la capacidad exacta que tienen los pasadores para mantener juntos a los elementos, teniendo en cuenta los datos de presión ejercida mecánicamente para introducir los pasadores que proporciona la tecnología de la fábrica Bresta. Del mismo modo, se debe tomar consciencia de la cualidad higroscópica de la madera, la cual hace que se produzcan cambios en esta. Estas fuerzas se podrían emplear para trabar aun más los pasadores introducidos entre las vigas y listones de este tipo de estructuras. Por otro lado, se aconseja también hacer un estudio de comportamiento al fuego y vibraciones. Como sugieren todas estas variantes de la madera evidenciadas a lo largo del estudio lo aconsejable sería realizar un prototipo de todo el conjunto. En conclusión el uso de las uniones con pasadores

son una alternativa a las uniones que emplean cola o metal. Permiten prefabricar placas que se pueden emplear para la construcción de forjados de viviendas, siendo estos forjados totalmente reciclables y deconstruibles. Del mismo modo, permiten reducir el costo de producción en las fábricas ya que prescinde y optimiza la utilización de máquinas como una prensa y para controlar la temperatura en el momento de adherir los elementos unos con otros. Cabe destacar que si se da el caso en la obra permiten flexibilidad dimensional.

Ha sido de gran utilidad la consulta de información de Aitim, de la revista Tectónica, de las webs de las empresas que fabrican placas estructurales de madera y de las tesis de Umberto Viotto, Andrew Thomson y Gordon Grand.



# REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

## Libros y revistas

Architecture d'Aujourd'hui. Ecole technique à biel. No. 299/1995

AV MONOGRAFÍAS. Escuela de ingeniería maderera. Biel. , No. 89/2001

ARQUITECTURA VIVA. La presencia de las cosas. No. 41/1995

BOTTER, C.H. *Production Management*. Deventer, Kluwer, 1999.

CHINELLATO, P., & MARA, F. . *Blonde on blonde waingels college*. Architects' Journal, 235(10), 38-41. Retrieved. 2012

BERGE, Bjorn. *The ecology of building materials*. Routledge. Material Architecture, J. Fernández. Ed. Architectural Press, 2009.

DA SOUSA CRUZ, Paulo J. (ed.). *Structures and Architecture: New concepts, applications and challenges*. CRC Press, 2013.

HERZOG, Thomas (et al.). *Timber construction manual*. Basel: Birkhaü-ser, 2004.

KOLB, Josef. *Systems in timber engineering: loadbearing structures and component layers*. Walter de Gruyter, 2008.

MOSTAFAVI, Mohsen. *The swiss school of engineering for the wood industry* , AA files, Nr. 39/1999.

PUIG, Ramiro. *Las colas para madera y su empleo*. CTB nº 55 1975.

SERON-PIERRE, Catherine. *Construction Bois*. AMC Le Moniteur Architecture, No. 59/1995.

THELANDERSSON, Sven; LARSEN, Hans J. (ed.). *Timber engineering*. John Wiley & Sons, 2003.

WAA. *Guía de la madera I-II Construcción y estructuras*. AITIM, 2014.

WAA . Marcel meili, Markus Peter Architects. *Swiss school of engineering for the wood industry*. Architecture and urbanism, nr. 366/2001.

## Tesis y tesinas

Andrew Thomson. *The Structural Performance of Non-metallic Timber Connections*. Tesis de doctorado en la University of Bath, 2010.

CHEN, Yue. *Structural performance of box based cross laminated timber system used in floor applications*. University of British Columbia, 2011.

GORDAN, Grand. *Evaluation of timber floor systems for fire resistance and other performance requirements*. Director: Profesor Andrew Buchanan, "Fire Engineering Research Report. Department of Civil Engineering", University of Canterbury. Christchurch, Nueva Zelanda, 2010.

Shanks, J. *Developing rational guidelines for traditional joints in oak frame construction*. Tesis de doctorado en la University of Bath, 2005.

VIOTTO, Umberto. *El tablero contralaminado. Actualidad de una alternativa para la media altura*, Director: Jaume Avellaneda Diaz-Grande. Máster oficial universitario "Tecnología en la arquitectura", línea de construcción y nuevas tecnologías. Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona, Septiembre 2013.

WADEL, Gerardo. *La sostenibilidad en la construcción industrializada la construcción modular ligera aplicada*

a la vivienda. Director de tesis: Jaume Avellaneda. Programa de doctorado Ámbitos de Investigación en la Energía y el Medio ambiente en la Arquitectura. Universidad Politécnica de Cataluña, Julio del 2009.

#### Artículos científicos

COSTAFREDA, J., PARRA, J., CALVO, B. *Materiales de construcción: Criterios de sostenibilidad y desarrollo*. VIII Jornadas Iberoamericanas de Materiales de Construcción. Lima - Perú. Agosto de 2010.

DU PLESSIS, Chrisna. *A strategic framework for sustainable construction in developing countries*. Construction Management and Economics, 2007, vol. 25, no 1, p. 67-76

FRANKE, S., HAUSAMMANN, R. *A modular timber construction system made with ribbed-box or rather hollow-box elements*. Bern University of Applied Sciences, Biel, Switzerland. 2013.

HORMIAS, E.; BESTRATEN, S. *Madera y prefabricación escolar: los paneles de madera contralaminada KLH como solución en la construcción de módulos escolares prefabricados*. AITIM: boletín de información técnica, Abril 2009, vol. Noviembre-diciembre 2009, nº262.

#### Artículos

GÖRAN SANDBERG, Lars. *Ventajas ecológicas de la madera como materia prima*. Aitim Boletín de información técnica nº 218, pag 50, julio-agosto de 2002

GARCÍA NAVARRO, Justo; DE LA PEÑA, Eduardo. *Breve Historia de la madera en la construcción*. AITIM. Boletín de información Técnica Nº 224. Barcelona. Julio - Agosto 2003.

#### Sitios web

- Lignatur AG. [www.lignatur.ch/](http://www.lignatur.ch/). Visitada en diciembre 2014

- Vídeo de la fabricación de los productos Lignatur. [https://www.youtube.com/watch?v=E--f\\_xwRY5c](https://www.youtube.com/watch?v=E--f_xwRY5c). Visitada en diciembre 2014

- Kielsteg GmbH. [www.kielsteg.at/](http://www.kielsteg.at/). Visitada en diciembre 2014

- Vídeo de la fabricación de los productos Kielsteg. <https://www.youtube.com/watch?v=KhakLw3xAQU>. Visitado en diciembre 2014

- Lignotrend - Für eine nachhaltige Holz-Baukultur. [www.lignotrend.de/](http://www.lignotrend.de/). Visitada en diciembre 2014

- Novatop. [www.novatop-system.cz/es/](http://www.novatop-system.cz/es/). Visitada en diciembre 2014

- Vídeo de la fabricación de los productos Novatop. <https://www.youtube.com/watch?v=pkWOkeTZrtU>. Visitada en diciembre 2014.

- BRESTA®. <http://www.tschopp-holzbau.ch/>. Visitada en diciembre 2014

- Detalle técnico de los productos Bresta. [http://www.tschopp-holzbau.ch/w\\_1/cgi-bin/cc/files/download/1.11.%20planungsordner/1.11.2%20oberfl%C3%A4chen/profil-%20und%20behandlungshandbuch%20version%202003.7.2014%20fuer%20homepage.pdf](http://www.tschopp-holzbau.ch/w_1/cgi-bin/cc/files/download/1.11.%20planungsordner/1.11.2%20oberfl%C3%A4chen/profil-%20und%20behandlungshandbuch%20version%202003.7.2014%20fuer%20homepage.pdf) Visitado en diciembre 2014.

- Vídeo de la fabricación de los productos Bresta. [https://www.youtube.com/watch?v=3LFo\\_fQKBMU](https://www.youtube.com/watch?v=3LFo_fQKBMU). Diciembre 2014

- <http://www.inholz.de/produkte/brettstapel-elemente/plusminus-20-si>. Visitada en diciembre 2014

-Swiss school of engineering for the wood industry Bienne

<http://www.meilipeter.ch/de/>. Visitada en diciembre 2014

<http://www.meilipeter.ch/portfolio/schweizerische-hochschule-fur->. Visitada en junio-2014

- RFEM Software para calculo de elementos finitos y diseño de estructuras de madera. <https://www.dlubal.com/es/>. Visitada en junio-2014