

ANÁLISIS CONSTRUCTIVO DE EDIFICACIONES CON ESTRUCTURA DE GRANDES LUCES DE MADERA LAMINADA

Trabajo Final de Grado - Grado en Fundamentos de la Arquitectura



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR DE
ARQUITECTURA

Autor: Jaume Lloret García
Tutor: Francisco José Cubel Arjona

E.T.S.A. Valencia - Curso académico 2018/2019
Valencia, Octubre de 2018



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

ABSTRACT

The following TFG constitutes an analysis and reflection on buildings with long-spans resolved in glued laminated timber. In it poses an introduction to the material of the **glued laminated timber** where we will know its origin, manufacturing, mechanical characteristics... And the study of **three cases of analyses**, that stand out from its structural and constructive singularity in which we will detain to explain their operation and most relevant characteristics.

KEYWORDS

- Construction.
- Glued laminated timber.
- Analysis.
- Detail.
- Long-spans.

RESUM

El següent TFG constitueix una anàlisi i reflexió al voltant de construccions amb grans llums resoltes en fusta laminada. En ell es planteja una introducció al material de la **fusta laminada encolada** on coneixerem el seu origen, elaboració, característiques mecàniques... I l'estudi de **tres casos d'anàlisi**, que destaquen per la seva singularitat estructural i constructiva en quina ens detindrem per explicar el seu funcionament i característiques més rellevants.

PARAULES CLAU

- Construcció.
- Fusta laminada.
- Anàlisi.
- Detall.
- Grans llums.

RESUMEN

El siguiente TFG constituye un análisis y reflexión a cerca de construcciones con grandes luces resueltas en madera laminada. En él se plantea una introducción al material de la **madera laminada encolada** donde conoceremos su origen, elaboración, características mecánicas... Y el estudio de **tres casos de análisis**, que destacan por su singularidad estructural y constructiva en la cuál nos detendremos para explicar su funcionamiento y características más relevantes.

PALABRAS CLAVE

- Construcción.
- Madera laminada.
- Análisis.
- Detalle.
- Grandes luces.

ÍNDICE

01_ INTRODUCCIÓN	7
01.1_ JUSTIFICACIÓN	8
01.2_ OBJETIVO	9
01.3_ METODOLOGÍA	10
02_ EL MATERIAL	13
02.1_ LA MADERA LAMINADA	15
02.2_ VENTAJAS Y DESVENTAJAS.....	20
02.3_ IMPACTO AMBIENTAL	22
02.4_ TIPOLOGÍAS ESTRUCTURALES.....	24
02.5_ UNIONES	26
03_ CASOS DE ESTUDIO	29
03.1_ BODEGAS PROTOS.....	30
03.2_ BIBLIOTECA EN VENNESLA	44
03.3_ ATSUSHI IMAI MEMORIAL GYMNASIUM	54
04_ CONCLUSIONES	65
05_ BIBLIOGRAFÍA.....	69

01_INTRODUCCIÓN

01_INTRODUCCIÓN

01.1_JUSTIFICACIÓN

Este trabajo nace de la curiosidad por aprender a construir con madera. Tras haber cursado la asignatura de Estructuras de madera en la Universidad de Chile, mi predisposición hacia este material constructivo se vio incrementada, dando como resultado nuevas preguntas, por ejemplo; ¿Es la madera un material sostenible?, ¿Qué maderas son las más apropiadas?, ¿Qué sistema constructivo debemos adoptar?

A éstas y otras preguntas se debe el TFG en cuestión, apostando por un modelo que integre el medio natural y la tecnología con el fin de contribuir al diseño de lo construido..

01_INTRODUCCIÓN

01.2_OBJETIVO

La aportación de este trabajo pasa por reconocer y analizar el sistema constructivo de edificios singulares realizados en madera laminada con grandes luces, dando a conocer las soluciones adoptadas en un sentido constructivo, material, estructural y compositivo.

Por otra parte, se pretende dar a conocer el material con el que son desarrollados estructuralmente estos edificios, la madera laminada, desde cómo este material es fabricado hasta las diferentes uniones que pueden producirse en las construcciones de madera laminada.

01_INTRODUCCIÓN

01.3_METODOLOGÍA

El trabajo se divide en tres partes diferenciadas, la primera de ellas es una introducción al material constructivo, LA MADERA LAMINADA, en ella conoceremos sus características más relevantes, además del impacto ambiental que supone y las diferentes posibilidades estructurales que ofrece.

Tras haber conocido un poco mejor el material, se desarrolla la segunda parte EL ANÁLISIS CONSTRUCTIVO de 3 casos de estudio, elegidos por su calidad constructiva, estructural, estética y compositiva. Sin embargo, cada cuál es muy diferente del resto, centrándonos en el análisis de sus aspectos más especiales. En este apartado podremos conocer el sistema estructural adoptado, montaje del sistema, uniones en la estructura, protección de la madera y demás detalles constructivos de relevancia.

El análisis se produce conforme a la legislación española DBSE-M y parámetros del pliego de condiciones facilitado por AITIM.

Por último se recogen las ideas y reflexiones extraídas durante la realización del trabajo en el apartado de CONCLUSIONES.

02_EL MATERIAL

02_EL MATERIAL

02.1_LA MADERA LAMINADA

La madera laminada encolada (MLE) es un producto derivado de la madera, formado por varias láminas de madera aserrada encoladas entre sí. Permite cantos variables, curvaturas, cambios de directriz y, sobre todo, piezas de mayor tamaño que sus componentes.

Las láminas se colocan una sobre otra, sin embargo, también lo pueden hacer en direcciones opuestas, dando como resultado un producto denominado CTL (madera contralaminada), el cuál esquiva el efecto anisotrópico de la madera. Los posibles defectos de la madera como los nudos, inclusiones de corteza o bolsas de resina pueden retirarse previamente a su encolado.

Las láminas pueden ser de la misma naturaleza y clase resistente (madera laminada homogénea), o distinta (madera laminada combinada). Esta opción es interesante para vigas, pues se disponen láminas extremas más resistentes que las interiores.

Para conocer la historia de la madera laminada “tenemos que remontarnos hasta 1548, donde Philibert Delorme realizó arcos compuestos por varias piezas de madera adosadas entre sí. Mucho después, a finales del siglo XIX, el coronel francés Emy ideó el sistema que lleva su nombre, láminas de madera acopladas con pernos y bridas metálicas.

Pero fue hacia 1906 cuando el maestro carpintero suizo Otoo Hetzer reemplaza los pernos metálicos por adhesivos naturales, probablemente caseína.”

Medina Sánchez, E., (2013), CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE MADERA, Madrid, España: Bellisco.



Fig. 1. Piezas de madera laminada. Fuente: ARAUCO. <www.arauco.cl>



Fig. 2. Madera laminada curva. Fuente: WARREN AND MAHONEY. <<https://warrenandmahoney.com>>



Fig. 3. Pino silvestre.
Fuente: ECONOTICIAS. <www.ecoticias.com>

La madera laminada encolada está compuesta de dos productos básicos: **madera maciza** y **cola**.

- Madera:

Para su elaboración se suele utilizar maderas de pináceas, perteneciente a la familia de las coníferas, como el abeto rojo, pino y alerce, son árboles robustos y resinosos, asegurando una buena adaptabilidad con las colas. Además, pueden utilizarse maderas de la familia de las frondosas (angiospermas) como el haya, fresno, roble, eucalipto o castaño.

Las láminas se pueden disponer horizontal o verticalmente. Las horizontales son las más habituales, porque con un ancho determinado se superponen hasta conseguir el canto necesario. Por razones de economía y de secado, las láminas suelen tener un espesor de entre 19 y 45 mm.

Las escuadrías⁽¹⁾ más utilizadas de madera laminada varían desde 80 x 230 mm hasta 220 x 2.400 mm. Para piezas de ancho superior a 220 mm se colocan dos filas contrapeadas de láminas horizontales.

La longitud de las piezas está limitada sólo por transporte, al superar los 12 - 13 m se necesita de un transporte especial, pudiendo transportarse piezas de hasta 42 - 45 m.

Antes del encolado se pueden curvar las láminas, obteniendo vigas de directriz curva, arcos, etc. Igualmente es muy habitual la fabricación de vigas de inercia variable.

A la madera laminada se le pueden aplicar productos de protección, igual que ocurre con la madera aserrada, es muy habitual aplicar el tratamiento a las láminas antes del encolado, por lo que, se deberá comprobar la compatibilidad entre ambos. El CTE recoge las exigencias de protección frente a agentes meteorológicos y bióticos.

(1) Conjunto de las dos dimensiones de la sección transversal de una pieza de madera que está o ha de ser labrada a escuadra.
Fuente: DICCIONARIO DE LA LENGUA ESPAÑOLA. <<http://dle.rae.es>>

- Colas:

El adhesivo más utilizado para encolar las láminas entre sí es una resina plástica a base de resorcina, debido a su neutralidad a los agentes químicos, su insensibilidad a la humedad y su buena resistencia al fuego. Sus moléculas se adhieren entre sí y con la celulosa, hemi-celulosa y lignina de la madera, estableciendo una continuidad resistente. Es de color marrón y los problemas que presenta vienen asociados a los residuos tóxicos y la emisión de fenol y formaldehído.

También se emplea con prestaciones similares, la melamina, generando menores problemas de residuos y emisiones, no obstante, requiere un proceso de encolado más estricto. Así como el poliuretano, cuyo inconveniente deriva del margen de encolado, que se establece en una hora.

Medina Sánchez, E., (2013), CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE MADERA, Madrid, España: Bellisco.

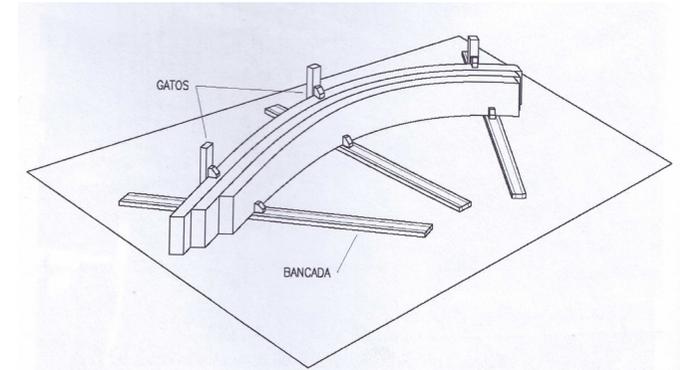
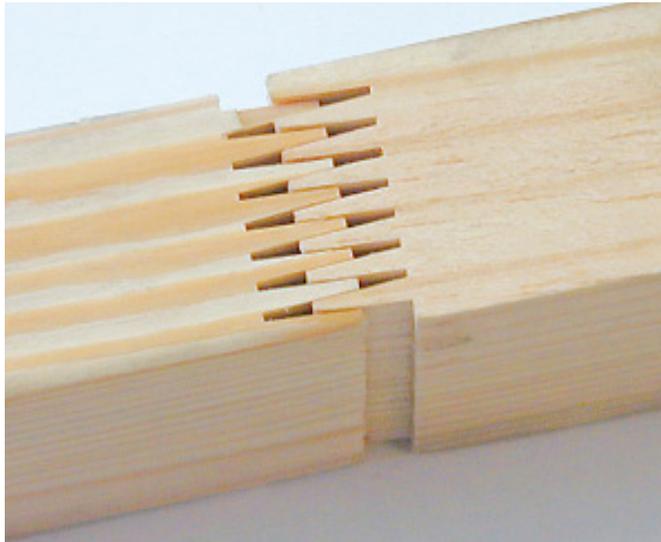


Fig. 4. Fabricación de viga curva. Fuente: Medina Sánchez, E., (2013), CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE MADERA, Madrid, España: Bellisco.



Fig. 5. Transporte especial. Fuente: EGOIN ANDALUCÍA. <<https://egoin-andalucia.com>>



La unión entre piezas hasta lograr la longitud deseada se realiza a través de la técnica *Finger Joint*. Una vez seleccionadas las láminas o tablas adecuadas, se procede a la realización de unas entalladuras en las testas de las mismas, dichas entalladuras suelen tener forma de cuña y sección trapezoidal.

La orientación más utilizada es la perpendicular, pues se obtienen mejores resistencias a flexión que con la orientación paralela o inclinada, respecto de la sección de madera.

La resistencia a flexión obtenida en las tablas empalmadas es aproximadamente y como mínimo un 75% del que tendría la tabla utilizada sin empalmar, suponiendo una pieza sin defectos y sana.

El tipo de entalladura que se realiza en MLE es la múltiple clásica, con una longitud de dientes entre 15 y 60 mm.

Sánchez Mazaira, A., (1992), LA MADERA LAMINADA ENCOLADA, Madrid, España: Fundación Escuela de Edificación.

Fig. 6. Finger Joint perpendicular. Fuente: AITIM. <infomadera.net>

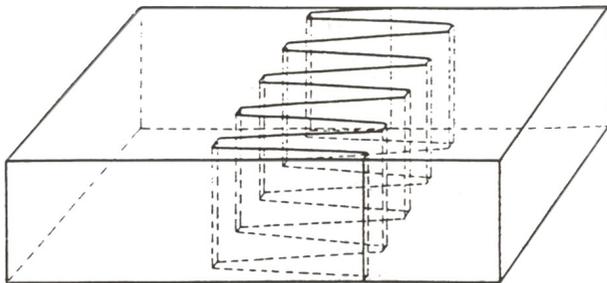


Fig. 7. Dibujo de Finger Joint perpendicular. Fuente: Sánchez Mazaira, A., (1992), LA MADERA LAMINADA ENCOLADA, Madrid, España: Fundación Escuela de Edificación.

PROPIEDADES	CLASE RESISTENTE							
	GL24h	GL28h	GL32h	GL36h	GL24c	GL28c	GL32c	GL36c
Resistencia característica [N/mm ²]:								
- Flexión: $f_{m,k}$	24	28	32	36	24	28	32	36
- Tracción paralela a la fibra: $f_{t,0,k}$	16,5	19,5	22,5	26	14	16,5	19,5	22,5
- Tracción perpendicular a la fibra: $f_{t,90,k}$	0,4	0,45	0,5	0,6	0,35	0,4	0,45	0,5
- Compresión paralela a la fibra: $f_{c,0,k}$	24	26,5	29	31	21	24	26,5	29
- Compr. perpendicular a la fibra: $f_{c,90,k}$	2,7	3,0	3,3	3,6	2,4	2,7	3,0	3,3
- Cortante: $f_{v,k}$	2,7	3,2	3,8	4,3	2,2	2,7	3,2	3,8
Rigidez [kN/mm ²]:								
- M. de elasticidad paralelo medio: $E_{0,medio}$	11,6	12,6	13,7	14,7	11,6	12,6	13,7	14,7
- M. de elast. paralelo 5º percentil: $E_{0,k}$	9,4	10,2	11,1	11,9	9,4	10,2	11,1	11,9
- M. de elast. perpendicular medio: $E_{90,k}$	0,39	0,42	0,46	0,49	0,32	0,39	0,42	0,46
- Módulo transversal medio: G_{medio}	0,72	0,78	0,85	0,91	0,59	0,72	0,78	0,85
Densidad característica [kg/m ³]: ρ_k	380	410	430	450	350	380	410	430

La madera laminada encolada, que se designa con las letras GL (Glulam: glued laminated timber), se clasifica en diferentes clases resistentes, que se dividen en dos grupos:

- **Madera laminada encolada homogénea:** Las láminas de madera aserrada que la componen son todas de la misma clase resistente. Se designa con la letra “h”.
- **Madera laminada encolada combinada:** Tiene listones de madera de dos clases resistentes. Las láminas de mejor clase resistente se colocan en los dos extremos del canto (mínimo dos láminas en cada extremo), y las de menor resistencia, en el centro. Se designa con la letra “c”.

Dentro de cada grupo se distinguen las siguientes clases resistentes: 42, 28, 32 y 36, números que corresponden con el valor de la resistencia característica a flexión, expresada en N/mm². La clase GL24h es la más utilizada.

Medina Sánchez, E., (2013), CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE MADERA, Madrid, España: Bellisco.

Tabla 1. Clases resistentes de la madera laminada encolada. Fuente: Medina Sánchez, E., (2013), CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE MADERA, Madrid, España: Bellisco.

02_EL MATERIAL

02.2_VENTAJAS Y DESVENTAJAS



Fig. 8. Oficinas Tamedia de Shigeru Ban Architects.
Fuente: PLATAFORMA ARQUITECTURA. < www.plataformaarquitectura.cl >

Las estructuras de madera laminada encolada resultan especialmente indicadas cuando se trabaja con grandes luces libres (25 a 70 m) o se quiera una estructura de cubierta con peso propio reducido.

“Las **ventajas** más significativas son:

- Muy buenas características mecánicas en relación a su densidad (500 kg/m³).
- Excelente comportamiento en flexión y compresión.
- Se puede diseñar cada elemento estructural con la forma más adecuada a los esfuerzos a los que va a estar sometido, economizando material.
- Conductividad térmica muy baja; lo que la hace muy adecuada para su utilización en estructuras donde se requiera una alta resistencia al fuego.
- Estabilidad dimensional en el sentido longitudinal muy buena con respecto a otros materiales como el acero y el hormigón armado.
- Muy resistente a los agentes químicos, tomando ciertas precauciones puede utilizarse sin problemas en industrias químicas, laboratorios, etc.
- Tiene un excelente comportamiento ante el fuego debido a la baja conductividad térmica, del orden de 0,04 W/m²oC.
- Las estructuras con MLE son muy fáciles de montar debido a su poco peso; las uniones de los elementos se realizan normalmente con herrajes metálicos que pueden ir atornillados, clavados y/o bulonados, lo que facilita en gran medida el montaje final.
- Su calidad estética y su belleza.”

Una consecuencia directa del uso de MLE es la reducción de esfuerzos transmitidos a la cimentación.

“La madera es un material higroscópico y tiende a equilibrar su contenido de humedad con el del ambiente que la rodea; esta característica de tomar y expulsar agua le puede acarrear diversos **problemas** como:

- Ataques de hongos de pudrición o de azulado.
- Cambios dimensionales importantes.

Además, los agentes atmosféricos también pueden atacarla por mediación de los rayos ultravioletas del sol o por la acción de la lluvia y el aire.”

Sánchez Mazaira, A., (1992), LA MADERA LAMINADA ENCOLADA, Madrid, España: Fundación Escuela de Edificación.

Medina Sánchez, E., (2013), CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE MADERA, Madrid, España: Bellisco.



Fig. 9. Madera atacada por hongos de pudrición blanda.

Fuente: ITM TRATAMIENTO DE LA MADERA. < <http://www.itmtratamientos.es>>

02_EL MATERIAL

02.3_IMPACTO AMBIENTAL

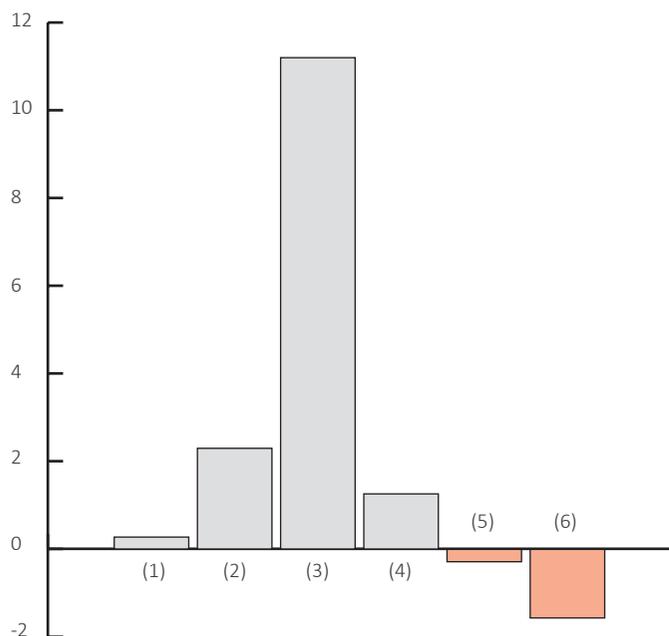


Fig. 10. Toneladas de CO₂ emitidas / toneladas de material.
Fuente: ELABORACIÓN PROPIA. Basado en (Universidad de Costa Rica, 2015)

(1) Cemento.....	0,28
(2) Acero.....	2,30
(3) Aluminio.....	11,20
(4) Vidrio.....	1,26
(5) Madera laminada.....	-0,29
(6) Madera.....	-1,57

Universidad de Costa Rica (2015), CÁLCULO DE HUELLA DE CARBONO PARA MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.

El impacto ambiental generado por la construcción se estima en torno a un 40% de las emisiones de CO₂ a nivel global. Además, debemos sumarle la contaminación de aguas, suelos...

La madera laminada, como cualquier otro material de construcción genera una huella ecológica, sin embargo, durante su ciclo de vida útil puede resultar ser beneficiosa ambientalmente.

Si comparamos la emisión de **dióxido de carbono** producida por materiales de construcción convencionales, encontramos que son los materiales derivados de la madera los únicos que generan un impacto positivo. La MLE, emite 1,55 (tonCO₂e/ton), sin embargo, absorbe una cantidad de 1,84 (tonCO₂e/ton), obteniendo una fijación de 0,29 (tonCO₂e/ton). Este valor es inferior que el de la madera de construcción ordinaria debido a los procesos de cepillado y encolado al que se ven sometidas las láminas de madera para MLE.

Universidad de Costa Rica (2015), CÁLCULO DE HUELLA DE CARBONO PARA MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.

Con frecuencia ocurre que agentes innovadores en el sector ambiental no son capaces de garantizar una economía que lo sustente. La madera laminada, en cambio, es capaz de integrarse en una **economía circular**, debido a su carácter renovable, reciclable, reutilizable y biodegradable.

A nivel global, la **superficie forestal** se ve reducida anualmente, mientras que en Europa los bosques son cada vez mayores en volumen y extensión. Esto se debe principalmente a las medidas adoptadas tanto a nivel legislativo como empresarial, especialmente a través de la tala controlada y la reforestación. De esta manera, se garantiza el inmanente carácter renovable de la madera.

Valiente. G., (2015) *LOS BOSQUES DE TALA CONTROLADA Y DEFORESTACIÓN*. Canexel. <<https://www.canexel.es>>

Algunos fabricantes españoles como Gabarró están apostando por maderas autóctonas como el castaño (*Castanea*), orientándose hacia un modelo de economía circular. Sin embargo, también existe el caso donde los fabricantes optan por maderas invasoras de rápido crecimiento como el eucalipto (*Eucalyptus*), que dificulta la biodiversidad de los bosques que coloniza.

Tras la **vida útil** de las piezas de MLE, éstas pueden ser reutilizadas (reparadas o no), recicladas para su uso como combustible fósil, reconvertidas en mobiliario o nuevos paneles de partículas, o simplemente desechadas haciendo las veces de material biodegradable.

En este sentido, cabe añadir que para una mejora ambiental, el proyectista debe asumir que su diseño sea fácilmente separable y desmontable para una correcta reutilización de los materiales constructivos.



Fig. 11. Pellets. Fuente: PALSER. <<https://www.palser.eu>>



Fig. 12. Tableros de OSB. Fuente: DIARIO DE UN ALECRÍN. <<http://diariodeunalecrin.blogspot.com>>

02_EL MATERIAL

02.4_TIPOLOGÍAS ESTRUCTURALES

La técnica desarrollada en torno a la madera laminada encolada permite confeccionar vigas y arcos planos capaces de alcanzar luces sólo limitadas por los condicionantes de transporte, acceso y puesta en obra.

Las tipologías más habituales de pórticos y arcos planos son las siguientes, siendo:

- h: canto del elemento estructural
- H: canto del elemento estructural en su valor máximo
- L: Luz

Basterra Otero, L., (2009), CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE MADERA, Valladolid, España: Universidad de Madrid.



Vigas rectas
(luz < 30 m; $h \approx L/17$)

Fig. 13. Vigas rectas. Fuente: ELABORACIÓN PROPIA. Basado en (Basterra Otero, 2009).



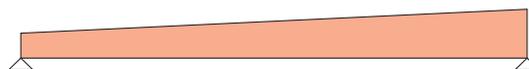
Vigas a dos aguas
(luz 10/25 m; pdte. 5/25 %;
 $h \approx L/30 - H \approx L/16$)

Fig. 14. Vigas a dos aguas. Fuente: ELABORACIÓN PROPIA. Basado en (Basterra Otero, 2009).



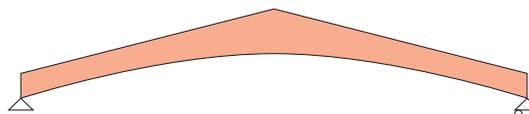
Vigas a dos aguas invertida
(luz 10/25 m; pdte. 5/25 %;
 $h \approx L/30 - H \approx L/16$)

Fig. 15. Vigas a dos aguas invertida. Fuente: ELABORACIÓN PROPIA. Basado en (Basterra Otero, 2009).



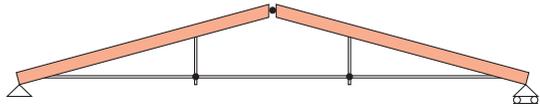
Vigas a un agua
(luz 10/25 m; pdte. 5/25 %)

Fig. 16. Vigas a un agua. Fuente: ELABORACIÓN PROPIA. Basado en (Basterra Otero, 2009).



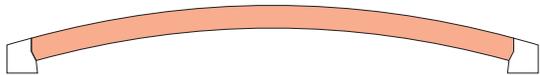
Vigas a dos aguas con intradós curvo
(luz 10/30 m; pdte. 10/25 %;
 $h \approx L/30 - H \approx L/16$)

Fig. 17. Vigas a dos aguas con intradós curvo. Fuente: ELABORACIÓN PROPIA. Basado en (Basterra Otero, 2009).



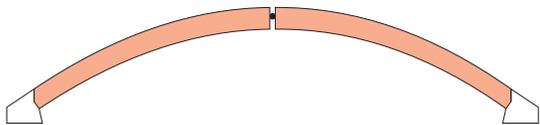
Pares con tirante metálico
(luz 12/50m; pdte. > 25 %; $h \approx L/30$)

Fig. 18. Pares con tirante metálico. Fuente: ELABORACIÓN PROPIA.
Basado en (Basterra Otero, 2009).



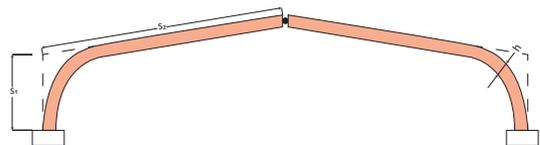
Arcos
(luz 10/30 m; $h \approx L/35$)

Fig. 19. Arcos. Fuente: ELABORACIÓN PROPIA.
Basado en (Basterra Otero, 2009).



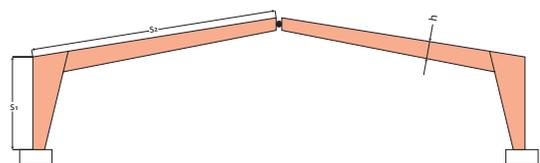
Arcos de tres articulaciones
(luz 20/100 m; $h \approx L/50$)

Fig. 20. Arcos de tres articulaciones. Fuente: ELABORACIÓN PROPIA.
Basado en (Basterra Otero, 2009).



Pórticos curvados de tres articulaciones
(luz 15/50 m; $h \approx (s_1 + s_2) / 15$)

Fig. 21. Pórticos curvados de tres articulaciones. Fuente: ELABORACIÓN PROPIA.
Basado en (Basterra Otero, 2009).



Pórticos de tres articulaciones
(luz 10/35 m; pdte. > 20%;
 $h \approx (s_1 + s_2) / 13$)

Fig. 22. Pórticos de tres articulaciones. Fuente: ELABORACIÓN PROPIA.
Basado en (Basterra Otero, 2009).

02_EL MATERIAL

02.5_UNIONES

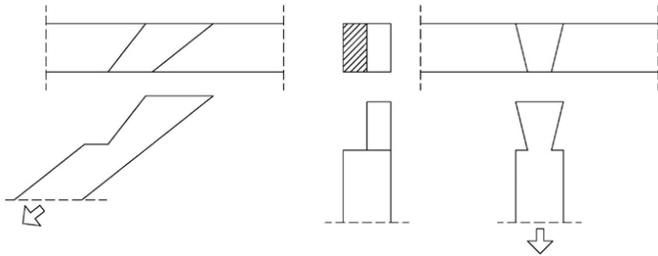


Fig. 23. Ensamblajes de cola de milano a media madera. Fuente: DISEÑO Y CÁLCULO DE UNIONES EN ESTRUCTURAS DE MADERA, Madrid, España: Maderia. Construcción.

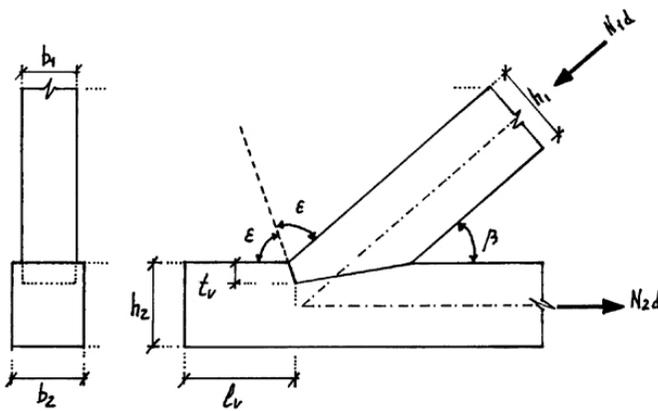


Fig. 24. Embarbillado frontal simple. Fuente: DISEÑO Y CÁLCULO DE UNIONES EN ESTRUCTURAS DE MADERA, Madrid, España: Maderia. Construcción.

Las posibilidades creativas en el diseño de las uniones son enormes y no es posible definir una solución única para cada situación. El éxito del diseño de una unión se basa en cumplir los tres requisitos siguientes:

- 1. Simplicidad:** cuanto más sencilla sea la unión mejor será el resultado estético y mecánico, así como su cálculo.
- 2. Mínimo material auxiliar:** cuantos menos herrajes se necesiten mejor será el comportamiento al fuego y más limpio será su aspecto.
- 3. Fabricación y montaje:** serán preferibles las soluciones que requieran un proceso de fabricación y de montaje más sencillo.

Los tipos de unión utilizados normalmente en estructuras de madera laminada, pueden resumirse en la siguiente clasificación:

- **Uniones tradicionales.** Se trata de uniones madera-madera en las que mediante un trabajo de talla se consigue realizar la unión de las piezas de madera sin necesidad de que intervengan otros elementos. En algunos casos puede ser necesario incluir algún elemento metálico que impida la descolocación de las piezas unidas. En este tipo de unión los esfuerzos se transmiten de una pieza a otra a través de cajas o rebajes y espigas o llaves, equilibrando los esfuerzos axiales mediante compresiones y esfuerzos tangenciales.

- **Uniones mecánicas.** Son aquellas uniones en las cuales intervienen elementos metálicos para la transmisión de esfuerzos. Existen dos subtipos de uniones mecánicas:
 - **Unión de clavija.** Corresponde a los clavos, grapas, tornillos, pernos y pasadores. El esfuerzo se transmite de una pieza a otra mediante cortante y flexión de la clavija, provocando tensiones de aplastamiento en la madera a través del área proyectada de la clavija.
 - **Unión de superficie.** Se utilizan conectores de anillo, placa, dentados y placa-clavo. El esfuerzo se transmite a través de una mayor superficie, aumentando su resistencia.

Dentro de las uniones mecánicas también encontramos los **herrajes**, es una evolución de las uniones mecánicas de tipo clavija, ya que el herraje permite aumentar la capacidad de carga en comparación con el único empleo de elementos clavijas (se incrementan las superficies de apoyo de las piezas de madera, por lo que el aplastamiento de la madera es menor). Además, la fijación de los herrajes a las piezas de madera se lleva a cabo por medio de elementos de unión del tipo clavija (clavos, pernos y pasadores).

Arriaga, F., Íñiguez, G., Esteban, M., Argüelles, R., Fernández, J.L., (2011), *DISEÑO Y CÁLCULO DE UNIONES EN ESTRUCTURAS DE MADERA*, Madrid, España: Maderia. Construcción.

Orradre, G., (2003), *UNIONES EN ESTRUCTURAS DE MADERA LAMINADA*, Navarra, España: Departamento de edificación; Servicio de Publicaciones de la Universidad de Navarra.

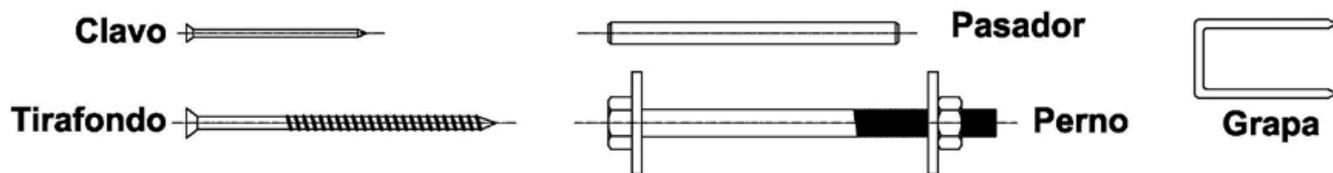


Fig. 25. Clavijas: Clavos, grapas, tiraferidos, pernos y pasadores. Fuente: *DISEÑO Y CÁLCULO DE UNIONES EN ESTRUCTURAS DE MADERA*, Madrid, España: Maderia. Construcción.

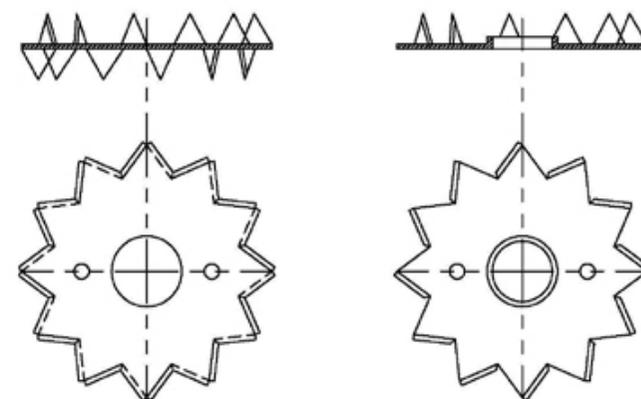


Fig. 26. Conectores dentados con púas. Fuente: *DISEÑO Y CÁLCULO DE UNIONES EN ESTRUCTURAS DE MADERA*, Madrid, España: Maderia. Construcción.



Fig. 27. Herraje metálico. Fuente: BRICOMARKT. <<http://www.bricomarkt.com>>

03_CASOS DE ESTUDIO

03_CASOS DE ESTUDIO

03.1_BODEGAS PROTOS

Obra:	Bodegas Protos.
Ubicación:	Peñafiel (Valladolid), España.
Año:	2008.
Arquitecto/a:	Richard Rogers, Alonso y Balaguer.
Coste:	36 M €.
Superficie:	22.000 m ² .



Fig. 29. Vista aérea. Fuente: BODEGAS PROTOS. <<https://www.metalocus.es>>



Fig. 28. Vista exterior.
Fuente: KATSUSHISA KIDA. <<https://www.metalocus.es>>



Fig. 30. Vista interior, tienda y zona de degustación. Fuente: AMPARO GARRIDO. <<https://www.metalocus.es>>



Fig. 31. Vista desde el castillo de Peñafiel.
Fuente: ARQUITECTURAS CERÁMICAS. <<http://www.ceramicarchitectures.com>>



Fig. 32. Esquemas de implantación. Fuente: ROGERS, STIRK, HARBOUR + PARTNERS. <<https://www.rsh-p.com>>

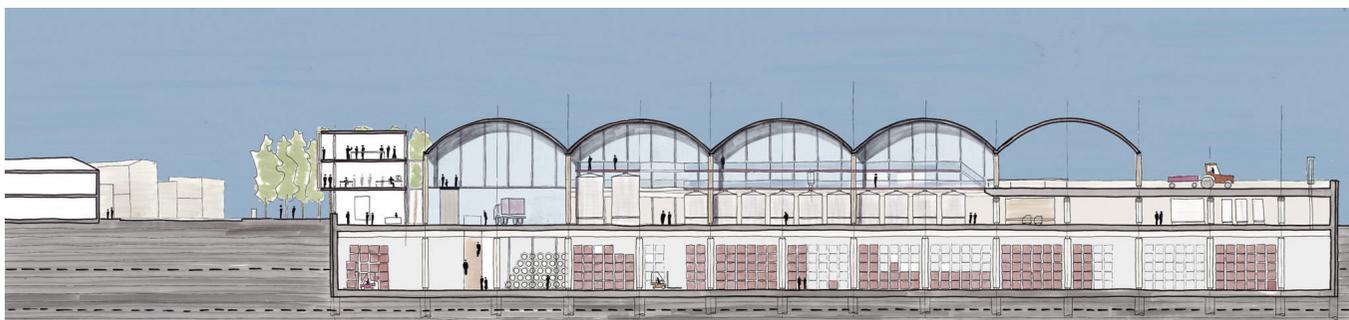


Fig. 33. Esquemas de funcionamiento. Fuente: ROGERS, STIRK, HARBOUR + PARTNERS. <<https://www.rsh-p.com>>

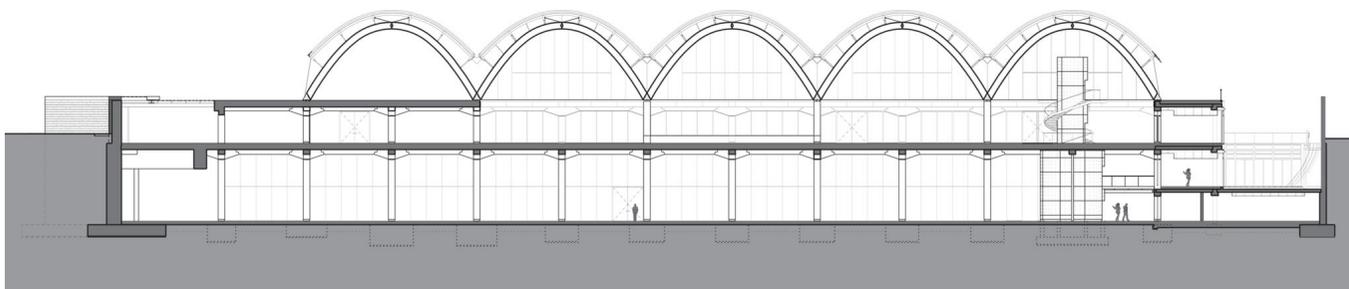


Fig. 34. Sección longitudinal. Fuente: ROGERS, STIRK, HARBOUR + PARTNERS. <<https://www.rsh-p.com>>

La bodega Protos, situada en la localidad vallisoletana de Peñafiel, responde al encargo de una bodega moderna, donde los procesos propios de la elaboración del vino pasan a formar parte de la experiencia vinícola.

Los arquitectos plantean la bodega con la lógica tradicional, es decir, los espacios oscuros y húmedos donde se producía la maceración, fermentación, crianza, etc. se transforman en espacios visitables e iluminados, sin embargo, quedan enterrados aprovechando la inercia térmica del terreno para reducir el consumo energético y minimizar los cambios de temperatura que se producen a lo largo del año.

Volumétricamente compuesta por 5 bóvedas de arco parabólico que descansan sobre un pedestal triangular, donde se desarrolla la mayor parte del programa. Las bóvedas son situadas en dirección norte-sur, permitiendo el contacto visual con el punto más reconocible de Peñafiel, su castillo. Además, esta orientación favorece un control del soleamiento, la propia forma arqueada de la cubierta otorga una cubrición horizontal a sur que se extiende más allá del espacio interior, mientras que a este y oeste lo hace con un ángulo más inclinado.

La cubierta cerámica dialoga con el entorno en el que se desarrolla, obteniendo el carácter de fachada vista desde el castillo.

03. 1_BODEGAS PROTOS

DESCRIPCIÓN ESTRUCTURAL

La estructura de la bodega está compuesta por un sistema modular de madera laminada y hormigón. Éste material se utiliza *in situ* en los muros perimetrales, cimentación y forjados, mientras que los soportes, pilares y vigas son prefabricados, conformando los dos niveles de sótano y actuando como soporte de las cinco bóvedas. Esta estructura constituye un módulo cuadrado de 9 metros de lado.

La estructura principal de las bóvedas está formada por madera laminada encolada en forma de arco parabólico de tres articulaciones, salvando una luz de 18 m, la madera utilizada proviene de Pino Oregón. Sobre los arcos aparece una estructura secundaria de vigas y arcos, también de madera laminada, unida a la estructura principal a través de puntales y tensores en "V" de acero. A esta estructura le siguen las capas que forman la cubierta.

Los arcos de las bóvedas quedan unidos a la estructura prefabricada de hormigón a través de uniones mecánicas de acero inoxidable.

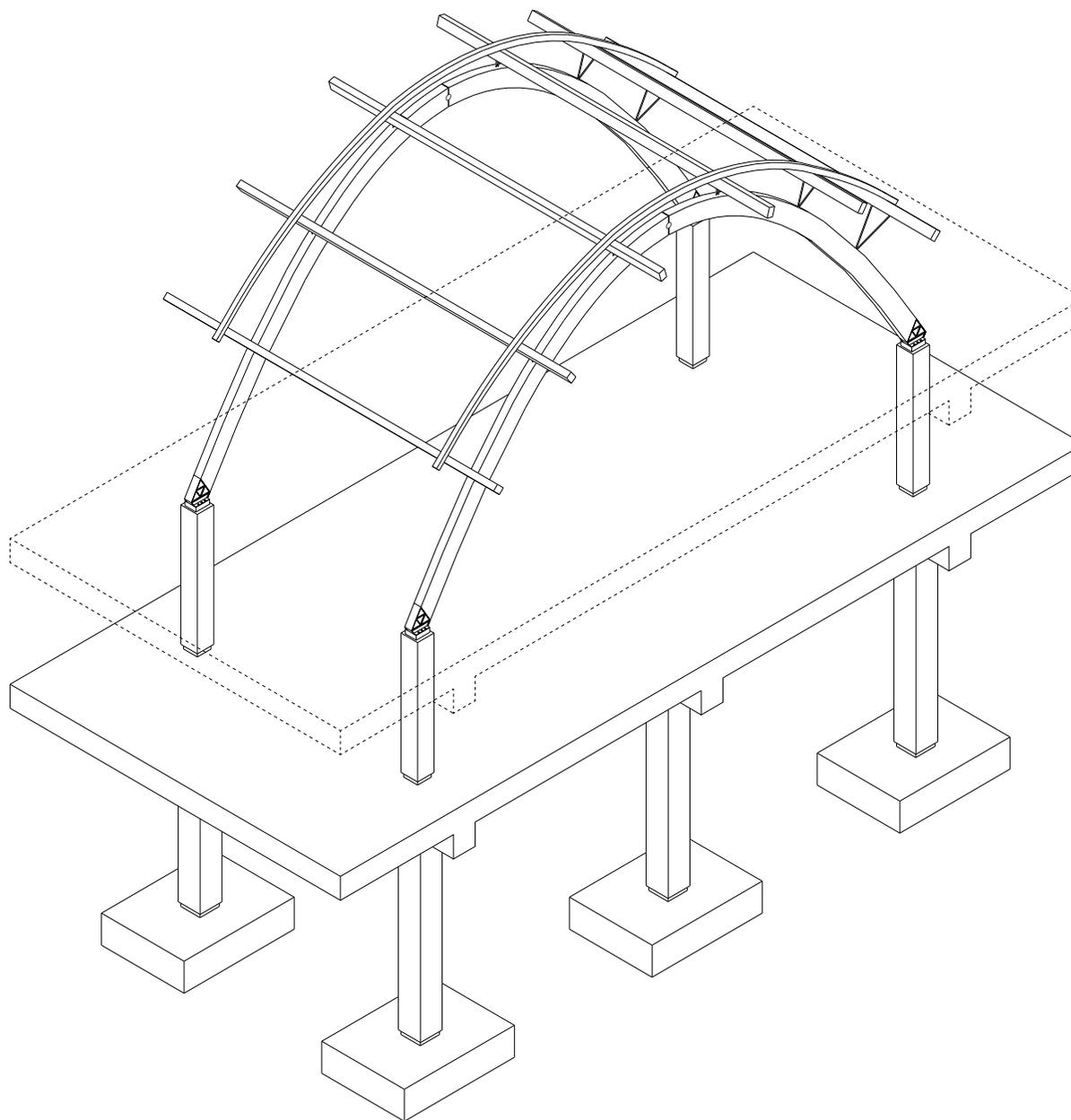
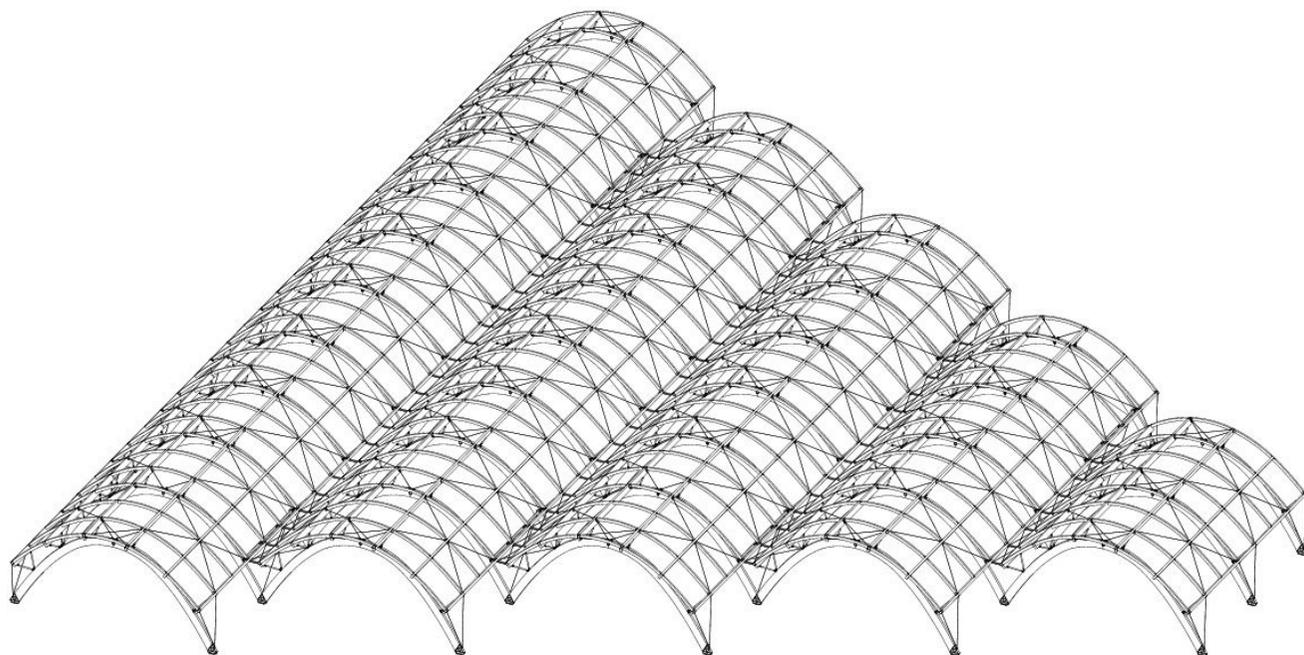


Fig. 35. Módulo estructural.
Fuente: ELABORACIÓN PROPIA.



Para asegurar la estabilidad del conjunto se diseña una trama de cables tensores que unen superiormente las distintas secciones de bóvedas, ejerciendo una fuerza de tracción colaborante frente a los movimientos producidos por tensiones internas de la estructura y cargas variables como el viento.

Fig. 36. Estructura principal de arcos parabólicos.
Fuente: METALOCUS. <<https://www.metalocus.es>>

La estabilidad estructural de la cubierta se consigue a través de elementos lineales de acero. Todos ellos se colocan por parejas en forma de "V". En los extremos laterales aparecen cables tensores (verde) ejerciendo una fuerza de tracción para impedir el movimiento lateral. Mientras que radial a la estructura secundaria se colocan puntales (naranja) que transmiten por compresión la carga generada por la cubierta, separando la estructura secundaria de los arcos parabólicos.

La cubierta está formada por una capa de panel sándwich recubierto de madera sobre el que descansan tableros de madera laminada curvada al que se anclarán las piezas cerámicas de cubierta.

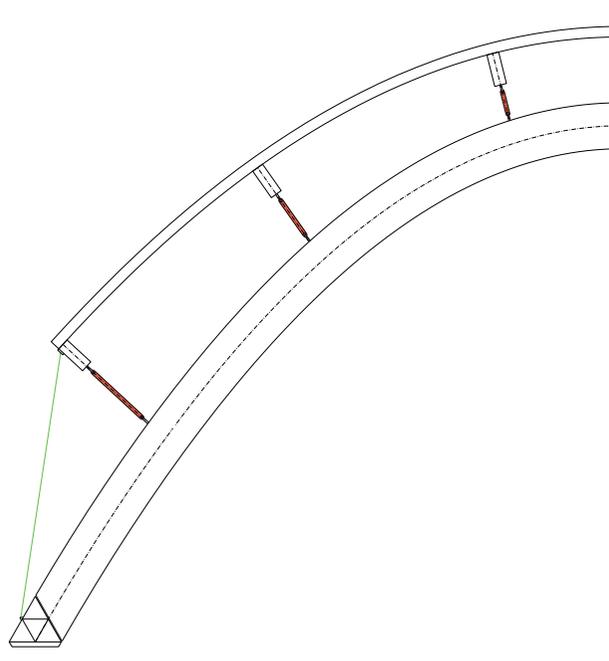


Fig. 37. Funcionamiento de la estructura de cubierta.
Fuente: ELABORACIÓN PROPIA. Basado en (Promateriales)

Piezas cerámicas

Tableros de MLE curvados

Panel Sandwich

Arco de MLE

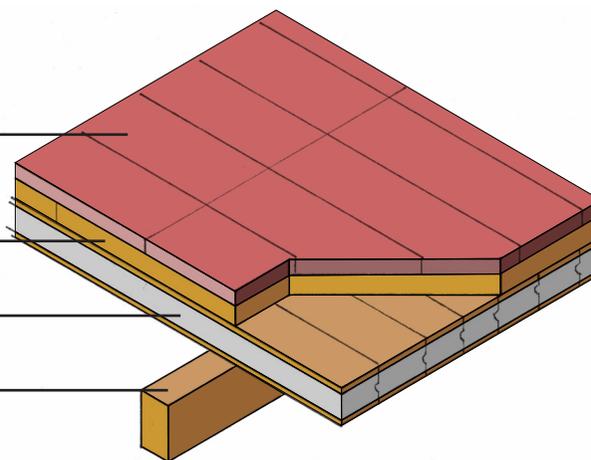


Fig. 38. Capas de cubierta.
Fuente: ELABORACIÓN PROPIA.

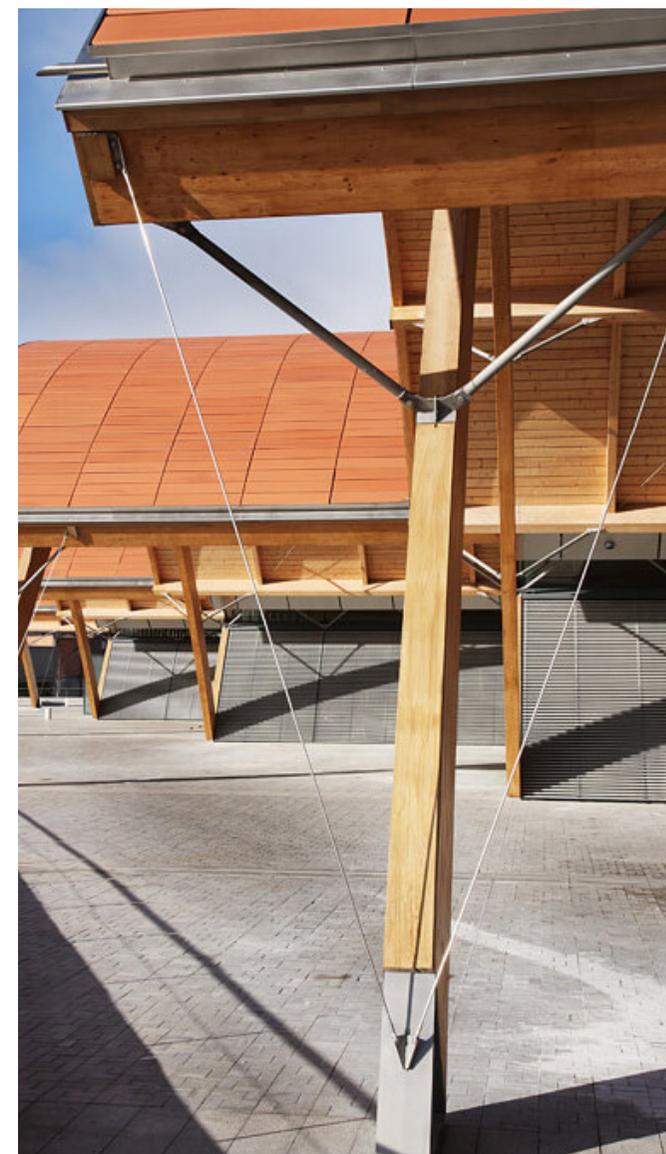


Fig. 39. Fotografía tensores laterales.
Fuente: ROGERS, STIRK, HARBOUR + PARTNERS. <<https://www.rsh-p.com>>

03. 1_BODEGAS PROTOS

UNIONES EN LA ESTRUCTURA



Fig. 40. Fotografía unión en la base del arco.

Fuente: ROGERS, STIRK, HARBOUR + PARTNERS. <<https://www.rsh-p.com>>

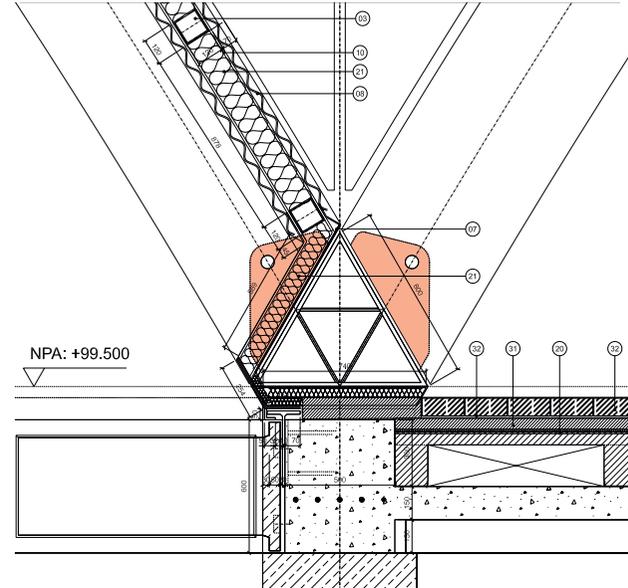


Fig. 41. Detalle unión en la base del arco.

Fuente: PROMATERIALES. <<https://promateriales.com>>

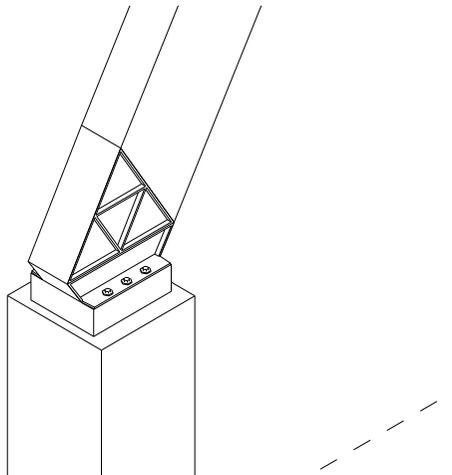


Fig. 42. Detalle unión.

Fuente: ELABORACIÓN PROPIA.



Fig. 43. Fotografía unión centro de arco.

Fuente: ARQUITECTURAS CERÁMICAS. <<http://www.ceramicarchitectures.com>>

Los arcos de las bóvedas quedan unidos a la estructura prefabricada de hormigón a través de uniones mecánicas de acero inoxidable. Está formada por una pieza triangular que se ancla mecánicamente mediante pernos a la estructura prefabricada de hormigón.

Para conseguir la unión de la pieza triangular con los arcos se disponen herrajes de alma oculta, “se dispone de una chapa que se introduce en el alma de la pieza de madera por medio de cajado y se sujeta ésta por medio de pasadores metálicos que quedan ocultos”.

Orradre, G., (2003), UNIONES EN ESTRUCTURAS DE MADERA LAMINADA, Navarra, España: Departamento de edificación; Servicio de Publicaciones de la Universidad de Navarra.

La unión de las dos mitades de arco se realiza de forma análoga, mediante herrajes de alma oculta, que se conectan entre sí a través de un bulón de acero, quedando parcialmente vista y permitiendo así una buena ventilación en la unión.

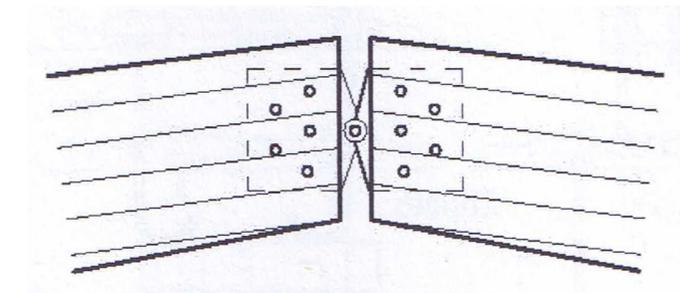


Fig. 44. Ejemplo de unión articulada con bulón. Fuente: Medina Sánchez, E., (2013), CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE MADERA, Madrid, España: Bellisco.

03. 1_BODEGAS PROTOS

DESARROLLO CONSTRUCTIVO

La construcción del edificio empezó en la primavera del año 2005 con la excavación del lugar para proceder a la construcción *in situ* de los muros de hormigón perimetrales y cimentación, mientras, se fabricaban los elementos de hormigón prefabricado.

Este sistema permitió un montaje rápido por la industrialización de los elementos constructivos, que se colocaron sin necesidad de recurrir a estructuras temporales, ejecutando la base del edificio en 9 meses. Permitiendo la instalación del primer arco en febrero del 2006. Los arcos de madera laminada fueron suministrados en dos piezas, asegurándolos primero en los apoyos triangulares de acero y luego conectándose en el centro del arco, formando una estructura autoportante.



Fig. 45. Construcción de muros perimetrales y cimentación.
Fuente: RSH + PARTNERS. <<https://www.metalocus.es>>

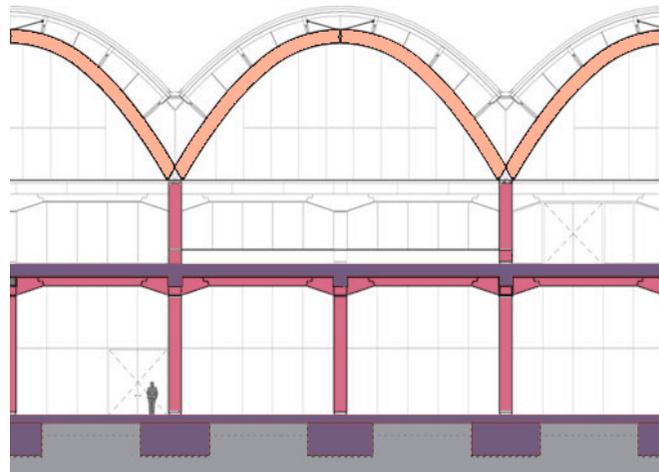


Fig. 46. Esquema de elementos en estructura principal.
Fuente: ELABORACIÓN PROPIA. Basado en (ROGERS, STIRK, HARBOUR + PARTNERS).



Fig. 47. Elementos prefabricados de hormigón.
Fuente: RSH + PARTNERS. <<https://www.plataformaarquitectura.cl/>>



Fig. 48. Instalación de los arcos.
Fuente: RSH + PARTNERS. <<https://www.rsh-p.com>>



Fig. 49. Construcción de la cubierta.
Fuente: RSH + PARTNERS. <<https://www.rsh-p.com>>



Fig. 50. Construcción de la cubierta.
Fuente: RSH + PARTNERS. <<https://www.rsh-p.com>>

El diseño de la cubierta continúa con la filosofía de contar con elementos prefabricados que permitan una construcción por fases. Tal es la rapidez que en mayo de 2006 la estructura estaba acabada, quedando por construir las fachadas, tabiques, servicios y maquinaria, estructuras ligeras como escaleras y pasarelas, acabados y elementos de equipamiento.

La construcción terminó a tiempo para verano de 2008.

Fuente: ROGERS, STIRK, HARBOUR + PARTNERS. <<https://www.rsh-p.com>>

03. 1_BODEGAS PROTOS

CONSIDERACIONES Y PROTECCIÓN DE LA MADERA

Las consideraciones desarrolladas a continuación han sido extraídas del Documento Básico de Seguridad estructural en Madera (DBSE-M) perteneciente al Código Técnico de la Edificación.

CLASES DE DURACIÓN DE LAS ACCIONES

Permanente (más de 10 años).

CLASES DE SERVICIO

Clase de servicio 2. Se caracteriza por un contenido de humedad en la madera correspondiente a una temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ y una humedad relativa del aire que sólo exceda el 85% unas pocas semanas al año. En este caso, se encuentran en general, estructuras de madera a cubierto, pero abiertas y expuestas al ambiente exterior.

CLASES DE USO

Clase de uso 3.1. El elemento estructural se encuentra al exterior, por encima del suelo y protegido, es decir, sujeto a medidas de diseño y constructivas destinadas a impedir una exposición excesiva a los efectos directos de la intemperie, inclemencias atmosféricas o fuentes de humedad. En estas condiciones la humedad de la madera puede superar ocasionalmente el contenido de humedad del 20%.

ELECCIÓN DEL TIPO DE PROTECCIÓN FRENTE A AGENTES BIÓTICOS

NP2 - Al menos 3 mm en la albura de todas las caras de la pieza. El tratamiento protector podrá realizarse sobre la pieza terminada o sobre las láminas previamente a su encolado.



Fig. 51. Fachada norte.

Fuente: BODEGAS PROTOS. <<https://www.metalocus.es>>

Tabla 3.1 Elección del tipo de protección

Clase de uso		Nivel de penetración NP (UNE-EN 351-1)
1	NP1 ⁽¹⁾	Sin exigencias específicas. Todas las caras tratadas
2	NP1 ⁽²⁾⁽³⁾	Sin exigencias específicas. Todas las caras tratadas
3.1	NP2 ⁽³⁾	Al menos 3 mm en la albura de todas las caras de la pieza.
3.2	NP3 ⁽⁴⁾	Al menos 6 mm en la albura de todas las caras de la pieza. Todas las caras tratadas.
4	NP4 ⁽⁵⁾	Al menos 25 mm en todas las caras
	NP5	Penetración total en la albura. Todas las caras tratadas
5	NP6 ⁽⁴⁾	Penetración total en la albura y al menos en 6 mm en la madera de duramen expuesta.

⁽¹⁾ Se recomienda un tratamiento superficial con un producto insecticida

⁽²⁾ El elemento de madera deberá recibir un tratamiento superficial con un producto insecticida y fungicida.

...

Tabla 2. Elección del tipo de protección.

Fuente: CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN, (2009), Documento Básico SE-M.

PROTECCIÓN PREVENTIVA FRENTE A AGENTES METEOROLÓGICOS

El mejor protector frente a los agentes meteorológicos es el diseño constructivo, especialmente las medidas que evitan o minimizan la retención de agua. **En nuestro caso, la estructura de madera se ha diseñado para que no entre en contacto con el agua de precipitación, en el mismo sentido, se han dispuesto vierte aguas metálicos entre las diferentes crujías.**

Si la clase de uso es igual o superior a 3 los elementos estructurales deben estar protegidos frente a los agentes meteorológicos. En elementos estructurales situados al exterior deben usarse productos que permitan el intercambio de humedad entre el ambiente y la madera. Se recomienda el empleo de protectores superficiales que no formen una capa rígida permitiendo el intercambio de vapor de agua entre la madera y el ambiente. En el caso de emplear productos que formen una película como las pinturas y los barnices, deberá establecerse y seguirse un programa de mantenimiento posterior. **En nuestro caso, se ha optado por la aplicación de un barniz a poro abierto para maderas a base de resinas acrílicas con pigmentos de colores transparentes. Indicado para la protección de maderas exteriores sometidas a condiciones extremas.**

DOCTOR MADERA. <<https://doctor-madera.com>>

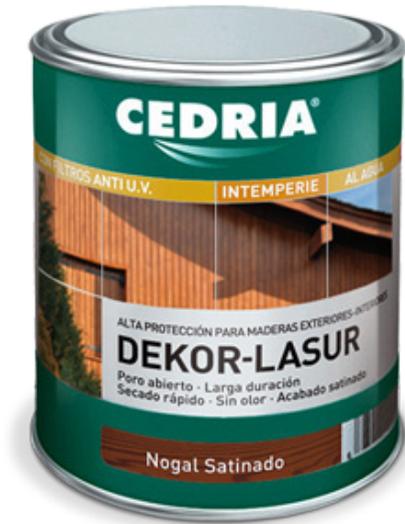


Fig. 52. Barniz DEKOR-LASUR de Cedria.
Fuente: CEDRIA. <<http://www.cedria.es>>

PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN DE LOS ELEMENTOS METÁLICOS



Fig. 53. Pasador galvanizado.
Fuente: RS COMPONENTS. <<https://es.rs-online.com>>

Tabla 3.2 Protección mínima frente a la corrosión (relativa a la norma ISO 2081), o tipo de acero necesario

Elemento de fijación	Clase de servicio		
	1	2	3
Clavos y tirafondos con $d \leq 4$ mm	Ninguna	Fe/Zn 12c ⁽¹⁾	Fe/Zn 25c ⁽²⁾
Pernos, pasadores y clavos con $d > 4$ mm	Ninguna	Ninguna	Fe/Zn 25c ⁽²⁾
Grapas	Fe/Zn 12c ⁽¹⁾	Fe/Zn 12c ⁽¹⁾	Acero inoxidable
Placas dentadas y chapas de acero con espesor de hasta 3 mm	Fe/Zn 12c ⁽¹⁾	Fe/Zn 12c ⁽¹⁾	Acero inoxidable
Chapas de acero con espesor por encima de 3 hasta 5 mm	Ninguna	Fe/Zn 12c ⁽¹⁾	Fe/Zn 25c ⁽²⁾
Chapas de acero con espesor superior a 5 mm	Ninguna	Ninguna	Fe/Zn 25c ⁽²⁾

⁽¹⁾ Si se emplea galvanizado en caliente la protección Fe/Zn 12c debe sustituirse por Z 275, y la protección Fe/Zn 25c debe sustituirse por Z 350.

⁽²⁾ En condiciones expuestas especialmente a la corrosión debe considerarse la utilización de Fe/Zn 40c, un galvanizado en caliente más grueso o acero inoxidable

Tabla 3. Protección mínima frente a la corrosión.
Fuente: CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN, (2009), Documento Básico SE-M.

Los elementos metálicos deben estar sometidos a una protección a base de galvanizado de zinc de al menos 12 micras de espesor.

CONSIDERACIONES RELATIVAS A LAS UNIONES

Las uniones exteriores expuestas al agua deben diseñarse de forma que se evite la retención del agua. En las estructuras que no estén en Clase de Servicio 1 ó 2, además de la consideración del tratamiento de la madera y la protección de otros materiales, las uniones deben quedar ventiladas y con capacidad de evacuar el agua rápidamente y sin retenciones.

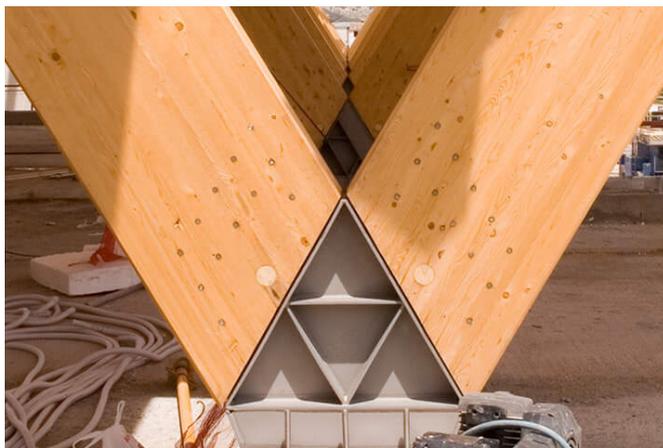


Fig. 54. Unión basal.
Fuente: RSH + PARTNERS. <<https://www.rsh-p.com>>

TIPOS DE ADHESIVOS

Tabla 4.1 Tipos de adhesivos en madera para uso estructural y su adecuación con la clase de servicio

Tipo de adhesivo	Abreviatura	Clase de servicio		
		1	2	3
Fenol-formaldehído ¹⁾	PF	apto	apto	apto
Resorcina-fenol-formaldehído ¹⁾	RPF	apto	apto	apto
Resorcina-formaldehído ¹⁾	RF	apto	apto	apto
Melamina-urea-formaldehído ²⁾	MUF	apto	apto	apto
Urea-formaldehído ²⁾	UF	apto	no apto	no apto
Poliuretano ²⁾	PU	apto	apto	apto
Resinas epoxi ²⁾	EP	apto	apto	apto

Nota general: en todo caso es necesario que los adhesivos para uso estructural estén certificados por organismos de reconocido prestigio, como por ejemplo el CTBA (Francia), MPA (Alemania) y el NTI (Noruega).

- 1) Líneas de cola de color marrón oscuro.
- 2) Líneas de cola transparentes.



Fig. 55. Fabricación de piezas en Holtza.
Fuente: Camacho Atalaya, A., INGENIERÍA DE LA MADERA HOLTZA S.A. AITIM.

Tabla 4. Tipos de adhesivos en madera para uso estructural y su adecuación con la clase de servicio..
Fuente: CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN, (2009), Documento Básico SE

La empresa Holtza, encargada de la fabricación de la estructura de madera laminada, utiliza para sus piezas un adhesivo a base de Resorcina.

Camacho Atalaya, A., INGENIERÍA DE LA MADERA HOLTZA S.A.: AITIM

03. 1_BODEGAS PROTOS

REFLEXIONES

Esta obra destaca esencialmente por tres aspectos, relativos a la elección tipológica:

- La elección de la tipología estructural deriva de la necesidad impuesta por el programa de resolver un gran contenedor capaz de aglutinar la doble función industrial y turística. Por ello se opta por la madera como material protagonista, abandonando la aséptica imagen que suele acaecer en las naves industriales.
- Esta tipología permite la industrialización de los elementos constructivos , prefabricando la gran parte de las piezas que lo conforman. Dos consecuencias directas de esta elección son:
 - El control de calidad de los productos.
 - La disminución del tiempo de ejecución.
- Otro aspecto por el que se ha producido esta elección tipológica es la integración con el entorno, tanto desde el exterior, generando una cubierta cerámica que se mimetiza con lo tradicional, como desde el interior, permitiendo la abertura de grandes ventanales que nos vincula con el entorno inmediato.

Algo reseñable en este edificio es el diseño de los herrajes metálicos que aseguran los arcos en su base y centro de arco, ambas piezas han sido pensadas para cumplir la función de unión y además, integrarse en la naturaleza formal del arco.

03_CASOS DE ESTUDIO

03.2_BIBLIOTECA EN VENNESLA

Obra: Vennesla library & Cultural Center.
Ubicación: Vennesla, Noruega.
Año: 2011.
Arquitecto/a: Helen & Hard.
Coste: 8,4 M €.
Superficie: 1.938 m².

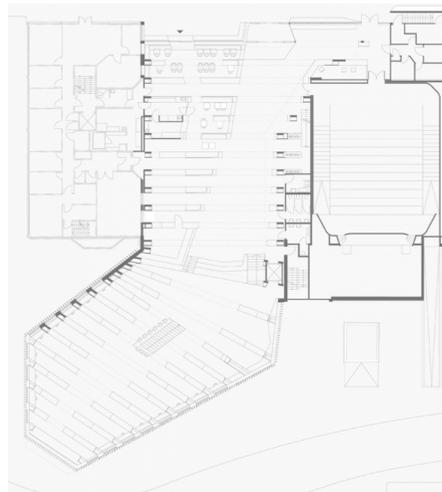
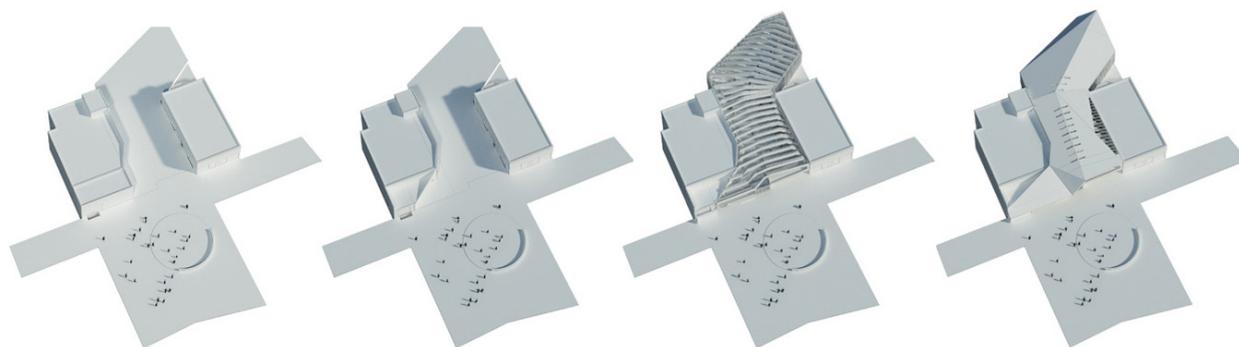
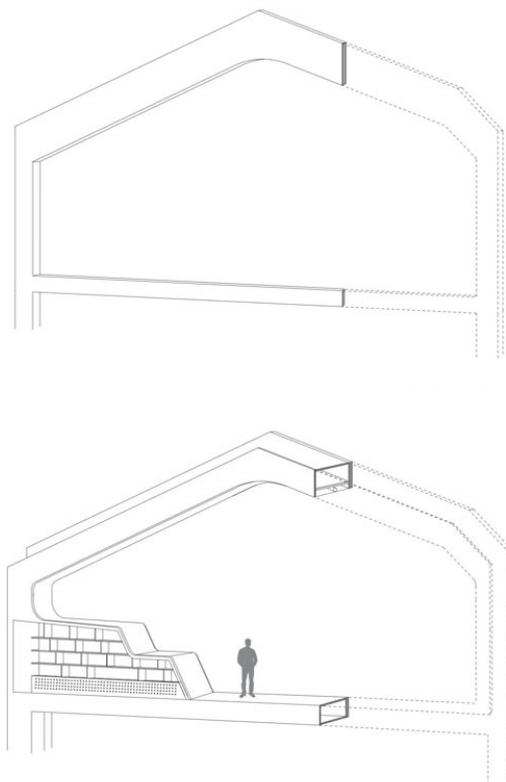
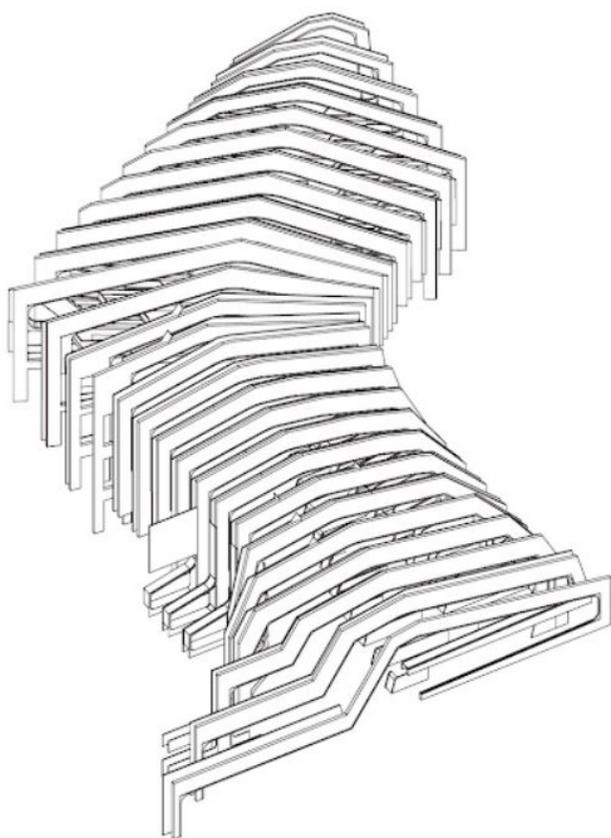


Fig. 57. Fachada nordeste. Fuente: HELEN & HARD. <<http://www.helenhard.no>>

Fig. 58. Plano de planta baja. Fuente: HELEN & HARD. <<http://www.helenhard.no>>

Fig. 59. Fachada sur. Fuente: HELEN & HARD. <<http://www.helenhard.no>>

Fig. 56. Vista interior. Fuente: HELEN & HARD. <<http://www.helenhard.no>>



El edificio en cuestión, situado en la ciudad Noruega de Vennesla, responde al encargo público de un equipamiento capaz de reunir una librería, cafetería, lugares de reunión y área administrativa, además de conectarse con la casa de la cultura y el centro de aprendizaje comunitario.

Una de las premisas para su concepción fue dar lugar a un espacio público atractivo tanto en el interior como exterior. Por ello se optó por el diseño de una gran fachada acristalada que permitiese la vista desde el vial norte hacia un llamativo interior compuesto a base de costillas de madera laminada.

Este edificio destaca por la capacidad que presenta su estructura para adaptarse al entorno donde se inserta. Así como la integración de iluminación y mobiliario a dicha estructura, el cuál no puede negar su inspiración en el sistema compositivo que desarrolló Miguel Ángel en la Biblioteca Laurenciana (s. XVI).

Fig. 60. Esquema estructural.
Fuente: HELEN & HARD. <<http://www.helenhard.no>>

Fig. 61. Esquema relación estructura - mobiliario.
Fuente: HELEN & HARD. <<http://www.helenhard.no>>

Fig. 62. Implantación volumétrica.
Fuente: COMPETITIONLINE. <<http://www.competitionline.com>>

03. 2_BIBLIOTECA VENNESLA

DESCRIPCIÓN ESTRUCTURAL

La estructura principal se compone de 27 pórticos de madera laminada que cubren una luz que varía desde los 22 m en la zona más ancha, hasta 8 m en la zona sur más estrecha. La amplitud del vano suele ser cercana a los 20 m.

Son las 27 costillas de madera laminada el aspecto más relevante del proyecto, pues sirviendo de sustento estructural, se integran en ellas iluminación y mobiliario, permitiendo una lectura del espacio rítmica y limpia. Las costillas cambian de forma para adaptarse a los edificios colindantes a los que se vincula.

La mayoría de los pórticos están formados por 4 piezas de madera laminada que se unen entre sí mediante uniones mecánicas. Los herrajes metálicos son fijados a las piezas de madera a través de clavijas metálicas. La unión entre el pórtico de madera y la cimentación se realiza de forma análoga a la unión madera-madera, es decir, mediante unión mecánica de herraje metálico.

Las piezas de madera oscilan entre 220 mm x 1200 mm hasta 260 mm x 1400 mm (espesor x ancho).

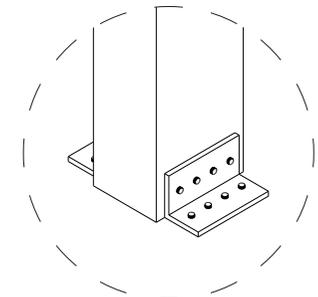
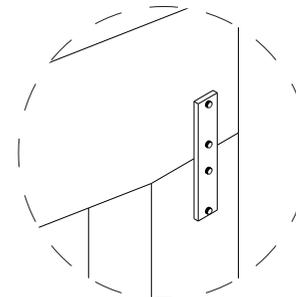
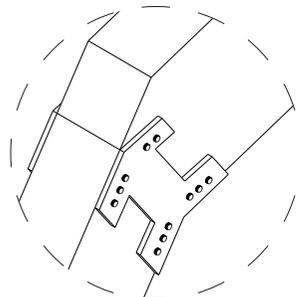
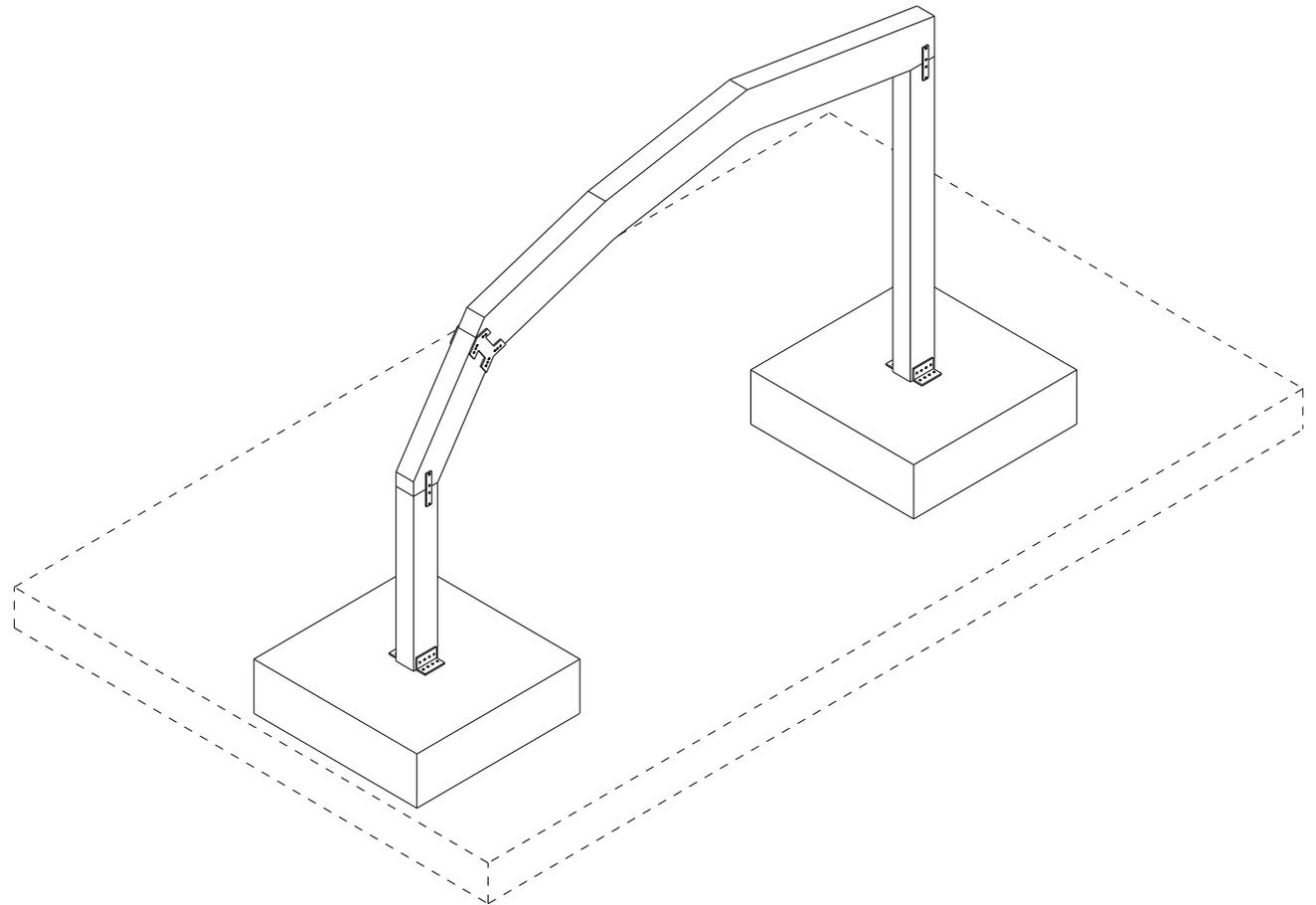


Fig. 63. Pórtico estructural.
Fuente: ELABORACIÓN PROPIA.

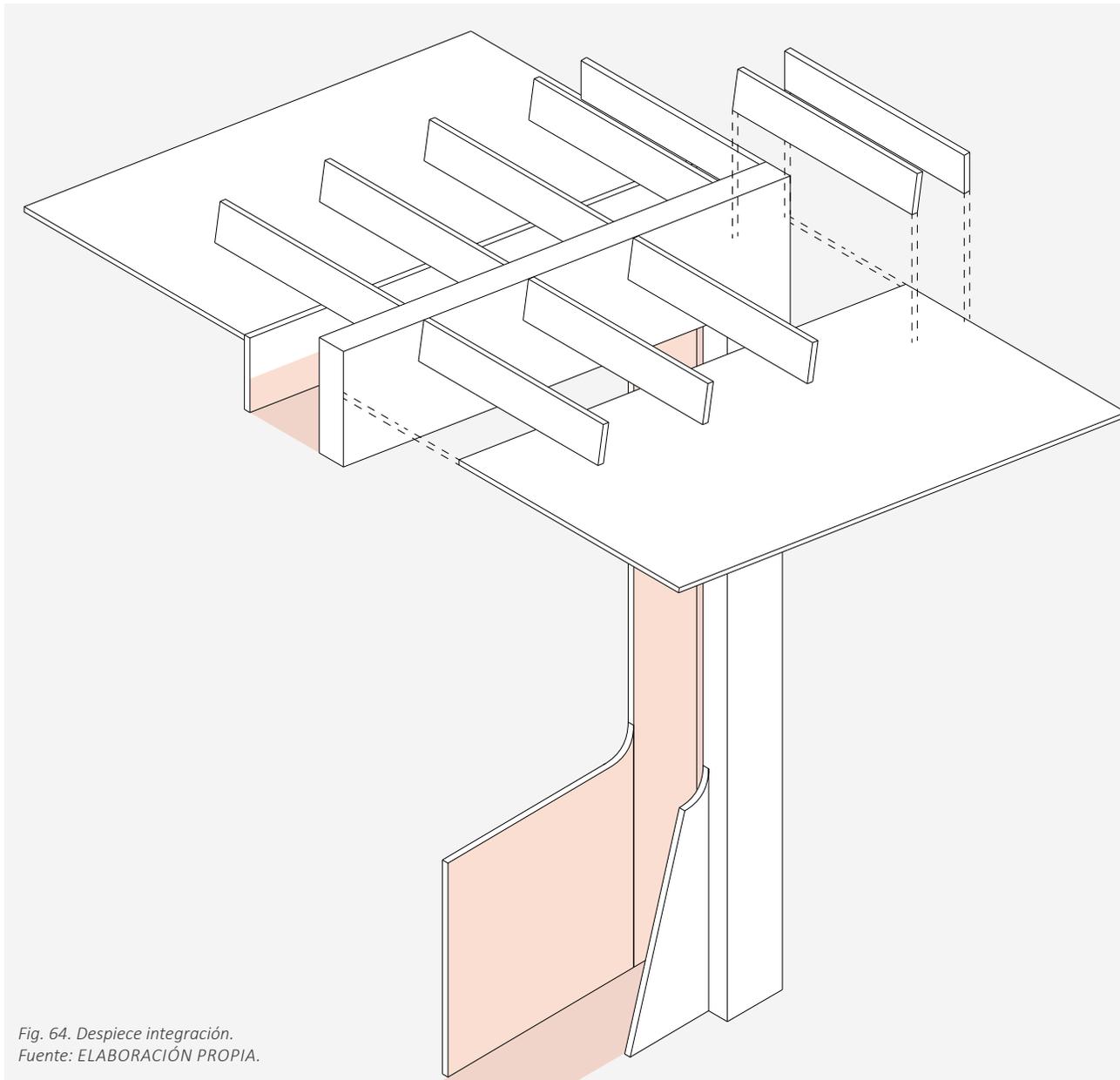
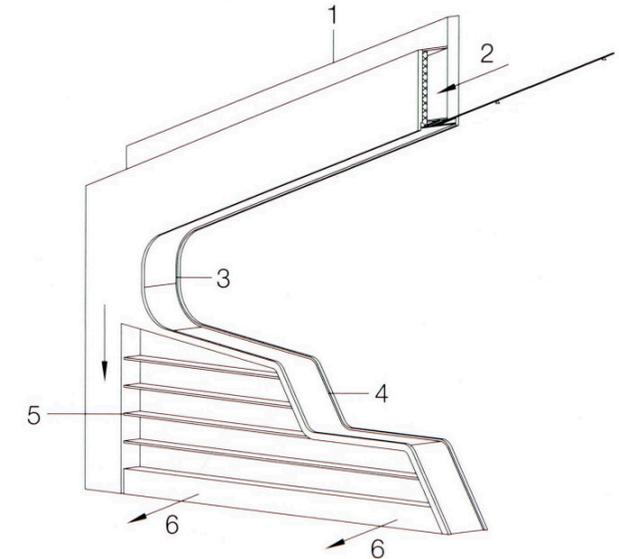


Fig. 64. Despiece integración.
Fuente: ELABORACIÓN PROPIA.

Con el fin de generar el espacio suficiente para formar el mobiliario y albergar las instalaciones de iluminación y acondicionamiento térmico, se disponen tableros CTL (madera contra laminada) de 50 mm de espesor. Éstos aparecen enfrentados, uno paralelo al pórtico de MLE y el otro tangente a éste. Conjuntamente forman la estructura integrada del mobiliario. A estas superficies acomete el cielo de madera del interior.



1. Viga de madera laminada.
2. Toma de aire.
3. Difusor de luz de policarbonato.
4. Revestimiento de madera contrachapada.
5. Estantería.
6. Salida de aire.

Fig. 65. Esquema de integración del mobiliario. Fuente: Schittich, C., Lenzen, S., Dondelinger, M., Kohl-Kastner, A., Leitte, S., Meyer, K., Schönbrunner, Eva., (2014), HOLZ = WOOD, Munich, Alemania: DETAIL.

03. 2_BIBLIOTECA VENNESLA

DETALLE CONSTRUCTIVO

1. Cubierta de duramen de pino:
Pino al exterior 23/98 mm
Pino bajo junta 23/69 mm
Listones 36/48 mm
Chapa metálica sección trapezoidal 25 mm
Listones 48 mm
Listones 25 mm
Capa sellante
Listones 50 mm/50 mm Aislamiento
Viga interior 300 mm, entre capas corta vapor
Listones 50 mm/50 mm Aislamiento
Capa acústica
Techo acústico hecho de diferentes piezas de madera, aprox. 36/36 mm
2. Viga de madera laminada. De 220/1200 a 260/1400 mm.
3. Panel acústico de chapa de abedul 12 mm.
4. Conducto de ventilación integral con pintura resistente al fuego.
5. Iluminación LED.
6. Chapa de policarbonato resistente al fuego y acabado satinado.
7. Protector solar vertical de pino 50/250 mm
Revestimiento de pino 23/148 mm
Listones horizontales 48/48 mm
Listones verticales 36/98 mm
Aislamiento lana de roca 200 mm
Madera contralaminada 95 mm
8. Revestimiento de madera contrachapada con fijaciones ocultas 9mm, pintado.

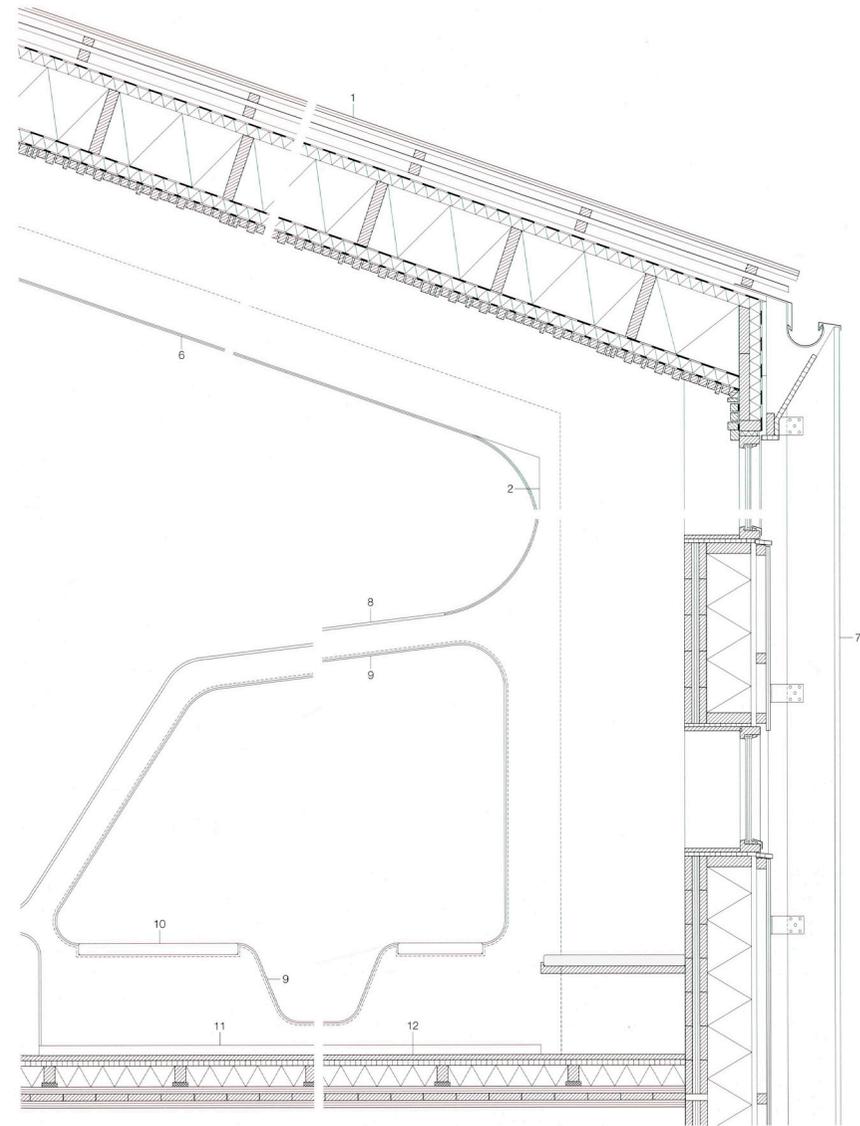


Fig. 66. Detalle constructivo, sección transversal. Fuente: Schittich, C., Lenzen, S., Dondelinger, M., Kohl-Kastner, A., Leitte, S., Meyer, K., Schönbrunner, Eva., (2014), HOLZ = WOOD, Munich, Alemania: DETAIL.

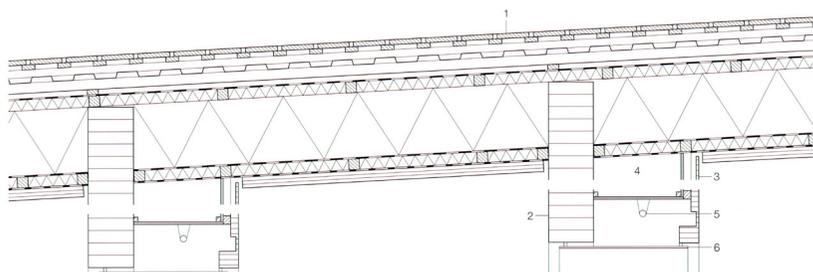


Fig. 67. Detalle constructivo, sección longitudinal. Fuente: Schittich, C., Lenzen, S., Dondelinger, M., Kohl-Kastner, A., Leitte, S., Meyer, K., Schönbrunner, Eva., (2014), HOLZ = WOOD, Munich, Alemania: DETAIL.

9. Revestimiento de linóleo 4 mm.
Madera contrachapada 9 mm.
10. Cojín integrado en el mueble.
11. Tira de roble 12/58 mm.
12. Parquet industrial de roble rojo 28 mm.
Tablero de DM 22 mm.
Listones de madera 48/73 mm sobre neopreno con aislamiento entre ellos.
Madera contralaminada 95 mm.
Vigas de madera laminada 200/400 mm.

C., Lenzen, S., Dondelinger, M., Kohl-Kastner, A., Leitte, S., Meyer, K., Schönbrunner, Eva., (2014), HOLZ = WOOD, Munich, Alemania: DETAIL.

La cubierta responde a un esquema tradicional. Como acabado interior se dispone una capa acústica formada por listones variables de madera que se colocan a tope entre los módulos estructurales. Esta capa va anclada mecánicamente a unos listones cuadrados de madera de 5 cm que se colocan en la otra dirección y entre los cuales se dispone aislamiento térmico junto con una barrera de vapor.

A continuación, una serie de vigas de madera laminada con 30 cm de ancho aparecen entre costillas estructurales, estas vigas actúan como soporte a las capas inferiores (ya comentadas) y superiores, las cuales se aseguran mecánicamente a las vigas. Las vigas se unen a las costillas mediante herrajes metálicos, entre ellas se coloca aislamiento térmico. Nuevamente aparece una capa de listones cuadrados de 5 cm con aislamiento no combustible entre ellos, junto con una barrera contra el agua. Sobre esta capa aparecen listones que actúan como separadores para un segundo entramado de listones con más sección, con el fin de proteger las capas de aislamiento y generar un espacio donde el vapor generado por el interior no quede estancado.

Al entramado de listones le sigue una chapa metálica que actúa como impermeabilizante, se prolonga hasta desembocar en el conducto metálico de evacuación pluvial que se dispone en el perímetro del edificio. De nuevo aparece una trama de listones de madera, sirviendo como estructura para la capa de protección a base de pino que se coloca al exterior.

Cabe resaltar la eficiencia energética conseguida en el edificio debido a la gran cantidad de aislamiento térmico y su buen diseño, otorgándole la máxima categoría (A) en calificación energética.

03. 2_BIBLIOTECA VENNESLA

CONSIDERACIONES Y PROTECCIÓN DE LA MADERA

Las consideraciones desarrolladas a continuación han sido extraídas del Documento Básico de Seguridad estructural en Madera (DBSE-M) perteneciente al Código Técnico de la Edificación.

CLASES DE DURACIÓN DE LAS ACCIONES

Permanente (más de 10 años).

CLASES DE SERVICIO

Clase de servicio 1. Se caracteriza por un contenido de humedad en la madera correspondiente a una temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ y una humedad relativa del aire que sólo exceda el 65% unas pocas semanas al año.

CLASES DE USO

Clase de uso 1. El elemento estructural está a cubierto, protegido de la intemperie y no expuesto a la humedad. En estas condiciones la madera maciza tiene un contenido de humedad menor que el 20%. Ejemplos: vigas o pilares en el interior de edificios. **En nuestro caso, la totalidad de estructura de madera se encuentra en el interior del edificio acondicionado.**

ELECCIÓN DEL TIPO DE PROTECCIÓN FRENTE A AGENTES BIÓTICOS

NP1 - Sin exigencias específicas. Todas las caras tratadas. Se recomienda un tratamiento superficial con un producto insecticida.



Fig. 68. Imagen interior.

Fuente: PLATAFORMA ARQUITECTURA. <<https://www.plataformaarquitectura.cl/>>

Tabla 3.1 Elección del tipo de protección

Clase de uso	Nivel de penetración NP (UNE-EN 351-1)	
1	NP1 ⁽¹⁾	Sin exigencias específicas. Todas las caras tratadas
2	NP1 ⁽²⁾ ⁽³⁾	Sin exigencias específicas. Todas las caras tratadas
3.1	NP2 ⁽³⁾	Al menos 3 mm en la albura de todas las caras de la pieza.
3.2	NP3 ⁽⁴⁾	Al menos 6 mm en la albura de todas las caras de la pieza. Todas las caras tratadas.
4	NP4 ⁽⁵⁾	Al menos 25 mm en todas las caras
	NP5	Penetración total en la albura. Todas las caras tratadas
5	NP6 ⁽⁴⁾	Penetración total en la albura y al menos en 6 mm en la madera de duramen expuesta.

⁽¹⁾ Se recomienda un tratamiento superficial con un producto insecticida

⁽²⁾ El elemento de madera deberá recibir un tratamiento superficial con un producto insecticida y fungicida.

⁽³⁾ Los elementos situados en cubiertas ventiladas se asignarán a la clase 2. En cubiertas no ventiladas, se asignarán a la clase

Tabla 5. Elección del tipo de protección.

Fuente: CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN, (2009), Documento Básico SE-M.

PROTECCIÓN PREVENTIVA FRENTE A AGENTES METEOROLÓGICOS

El mejor protector frente a los agentes meteorológicos es el diseño constructivo, especialmente las medidas que evitan o minimizan la retención de agua. **En nuestro caso, la estructura de madera se ha diseñado para que no entre en contacto con el agua de precipitación, en el mismo sentido, se han dispuesto vierte aguas metálicos perimetral al nuevo edificio, evitando el transcurso del agua a través del paramento vertical o, en su caso, a los edificios con los que se vincula.**

PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN DE LOS ELEMENTOS METÁLICOS

Tabla 3.2 Protección mínima frente a la corrosión (relativa a la norma ISO 2081), o tipo de acero necesario

Elemento de fijación	Clase de servicio		
	1	2	3
Clavos y tirafondos con $d \leq 4$ mm	Ninguna	Fe/Zn 12c ⁽¹⁾	Fe/Zn 25c ⁽²⁾
Pernos, pasadores y clavos con $d > 4$ mm	Ninguna	Ninguna	Fe/Zn 25c ⁽²⁾
Grapas	Fe/Zn 12c ⁽¹⁾	Fe/Zn 12c ⁽¹⁾	Acero inoxidable
Placas dentadas y chapas de acero con espesor de hasta 3 mm	Fe/Zn 12c ⁽¹⁾	Fe/Zn 12c ⁽¹⁾	Acero inoxidable
Chapas de acero con espesor por encima de 3 hasta 5 mm	Ninguna	Fe/Zn 12c ⁽¹⁾	Fe/Zn 25c ⁽²⁾
Chapas de acero con espesor superior a 5 mm	Ninguna	Ninguna	Fe/Zn 25c ⁽²⁾

⁽¹⁾ Si se emplea galvanizado en caliente la protección Fe/Zn 12c debe sustituirse por Z 275, y la protección Fe/Zn 25c debe sustituirse por Z 350.

⁽²⁾ En condiciones expuestas especialmente a la corrosión debe considerarse la utilización de Fe/Zn 40c, un galvanizado en caliente más grueso o acero inoxidable

Tabla 6. Protección mínima frente a la corrosión.

Fuente: CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN, (2009), Documento Básico SE-M.

Los elementos metálicos deben estar sometidos a una protección a base de galvanizado de zinc de al menos 12 micras de espesor.

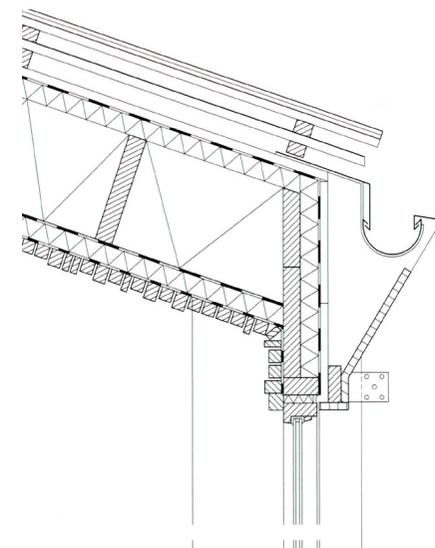


Fig. 69. Detalle vierte aguas metálico.

Fuente: Schittich, C., Lenzen, S., Dondelinger, M., Kohl-Kastner, A., Leitte, S., Meyer, K., Schönbrunner, Eva., (2014), HOLZ = WOOD, Munich, Alemania: DETAIL.

CONSIDERACIONES RELATIVAS A LAS UNIONES

Ninguna de las uniones está expuesta al agua y la Clase de servicio es 1, por lo tanto, no es necesario asumir consideraciones relativas a las uniones.

TIPOS DE ADHESIVOS

Tabla 4.1 Tipos de adhesivos en madera para uso estructural y su adecuación con la clase de servicio

Tipo de adhesivo	Abreviatura	Clase de servicio		
		1	2	3
Fenol-formaldehído ¹⁾	PF	apto	apto	apto
Resorcina-fenol-formaldehído ¹⁾	RPF	apto	apto	apto
Resorcina-formaldehído ¹⁾	RF	apto	apto	apto
Melamina-urea-formaldehído ²⁾	MUF	apto	apto	apto
Urea-formaldehído ²⁾	UF	apto	no apto	no apto
Poliuretano ²⁾	PU	apto	apto	apto
Resinas epoxi ²⁾	EP	apto	apto	apto

Nota general: en todo caso es necesario que los adhesivos para uso estructural estén certificados por organismos de reconocido prestigio, como por ejemplo el CTBA (Francia), MPA (Alemania) y el NTI (Noruega).

1) Líneas de cola de color marrón oscuro.

2) Líneas de cola transparentes.

Tabla 7. Tipos de adhesivos en madera para uso estructural y su adecuación con la clase de servicio.

Fuente: CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN, (2009), Documento Básico SE-M.

La empresa Moelven, encargada de la fabricación de la estructura de madera laminada, utiliza para sus piezas un adhesivo a base de Fenol-formaldehído.

Mestä Wood, ENVIROMENTAL PRODUCT DECLARATION: Moelven

La reflexión más contundente que puede extraerse de este edificio tiene que ver con el gran avance que ha supuesto el diseño BIM en el ámbito de la arquitectura. Ciertamente, este edificio (imagen de ARCHICAD 16) hubiese sido difícilmente realizable sin la ayuda de dicho programa.

Se convirtió en la herramienta de diseño de carpinteros, ingenieros, iluminadores y arquitectos, con el fin de lograr un proyecto compuesto por elementos estructurales de diferente forma, pero mismo contenido, el cuál integra el programa previamente expuesto.

Por lo tanto, podemos definir el edificio como un compuesto donde los elementos, tradición maderera y tecnología informática, se unen para dar forma a una nueva manera de entender la construcción.

Por otra parte, un punto fuerte de esta obra es la utilización de la madera para resolver cualquier exigencia constructiva y/o estructural, a excepción de la función de aislamiento térmico e impermeabilización. Podemos ver la madera como revestimiento interior y exterior, acondicionamiento acústico, estructura principal y secundaria, pavimento... Todas ellas de una manera integrada y muy bien resuelta, exponiendo el conocimiento y tradición de los países nórdicos en este tipo de construcciones.

03_CASOS DE ESTUDIO

03.3_ATSUSHI IMAI MEMORIAL GYMNASIUM

Obra: Atsushi Imai Memorial Gymnasium.
Ubicación: Odate, Japón.
Año: 2002.
Arquitecto/a: Shigeru Ban Architects.
Coste: Desconocido.
Superficie: 981 m².



Fig. 70. Vista exterior. Fuente: ARTIUM. <catalogo.artium.org>



Fig. 71. Vista interior. Fuente: ARTIUM. <catalogo.artium.org>

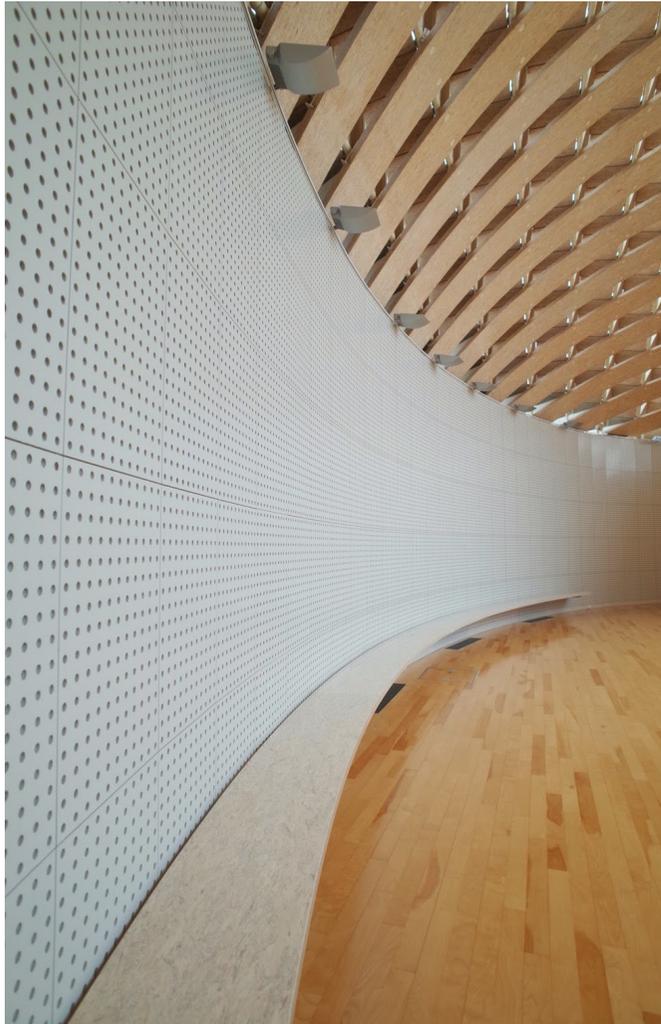


Fig. 72. Fotografía interior. Fuente: Futagawa, Yukio., (2007), *SPORTS. GA contemporary architecture.*, Tokio, Japón: A.D.A. Edita.



Fig. 73. Imagen exterior. Fuente: Futagawa, Yukio., (2007), *SPORTS. GA contemporary architecture.*, Tokio, Japón: A.D.A. Edita.



Fig. 74. Laminated Strand Lumber (LSL).
Fuente: FORRESIDENTIALPROS <<http://www.forresidentialpros.com>>

El edificio se encuentra en la ciudad japonesa de Odate, ubicado en un barrio residencial de baja densidad y junto a un centro de salud público, por ello se plantea parcialmente la construcción enterrada de la mayor parte del edificio, quedando en la superficie los accesos y la cubierta. Su función es la de gimnasio y piscina. La grandeza de este edificio reside en la capacidad para crear una atmósfera tan especial a través de un trabajo de diseño e investigación estructural y material, comparable a la carpintería tradicional nipona.

El material utilizado para formar los arcos (LSL - Laminated Strand Lumber) “es una madera reconstituida a base de virutas gruesas y anchas, cuya anchura varía de 5 a 25 mm mientras que su longitud suele ser de 300 mm.[...]Sus propiedades mecánicas son elevadas y homogéneas. [...] Similares a las que tienen las piezas de madera aserrada encolada, la madera laminada encolada o la madera micro laminada. Se suelen fabricar en forma de tableros, con anchos de 2,4 m y longitudes de 15 m.”

Aitím. PERFILES ESTRUCTURALES DE MADERA RECONSTITUIDA (PSL,LSL, OSL, SPSL)

03. 3_ATSUSHI IMAI

DESCRIPCIÓN ESTRUCTURAL

Shigeru Ban es conocido por el uso de materiales poco convencionales, permitiendo el acceso a la arquitectura a personas con pocos recursos. La utilización de tableros de LSL, es una muestra más de la creatividad del arquitecto, cubriendo grandes luces a través de un elemento fundamentalmente delgado.

Para ello crea una cúpula ovalada de 20 x 28 m con capacidad para resistir importantes sobrecargas de nieve durante el invierno. Optó por diseñar un armazón de fibra de madera laminada (LSL) con arcos de madera sucesivos, componiendo una estructura espacial en ambas direcciones, convirtiendo así un material naturalmente bidimensional en una estructura tridimensional.

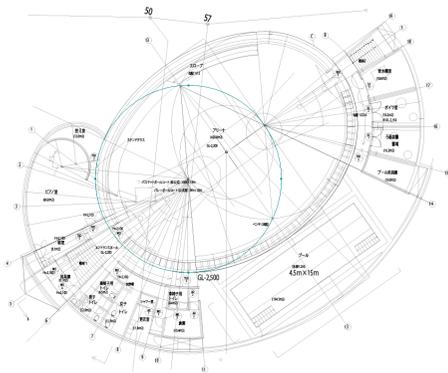
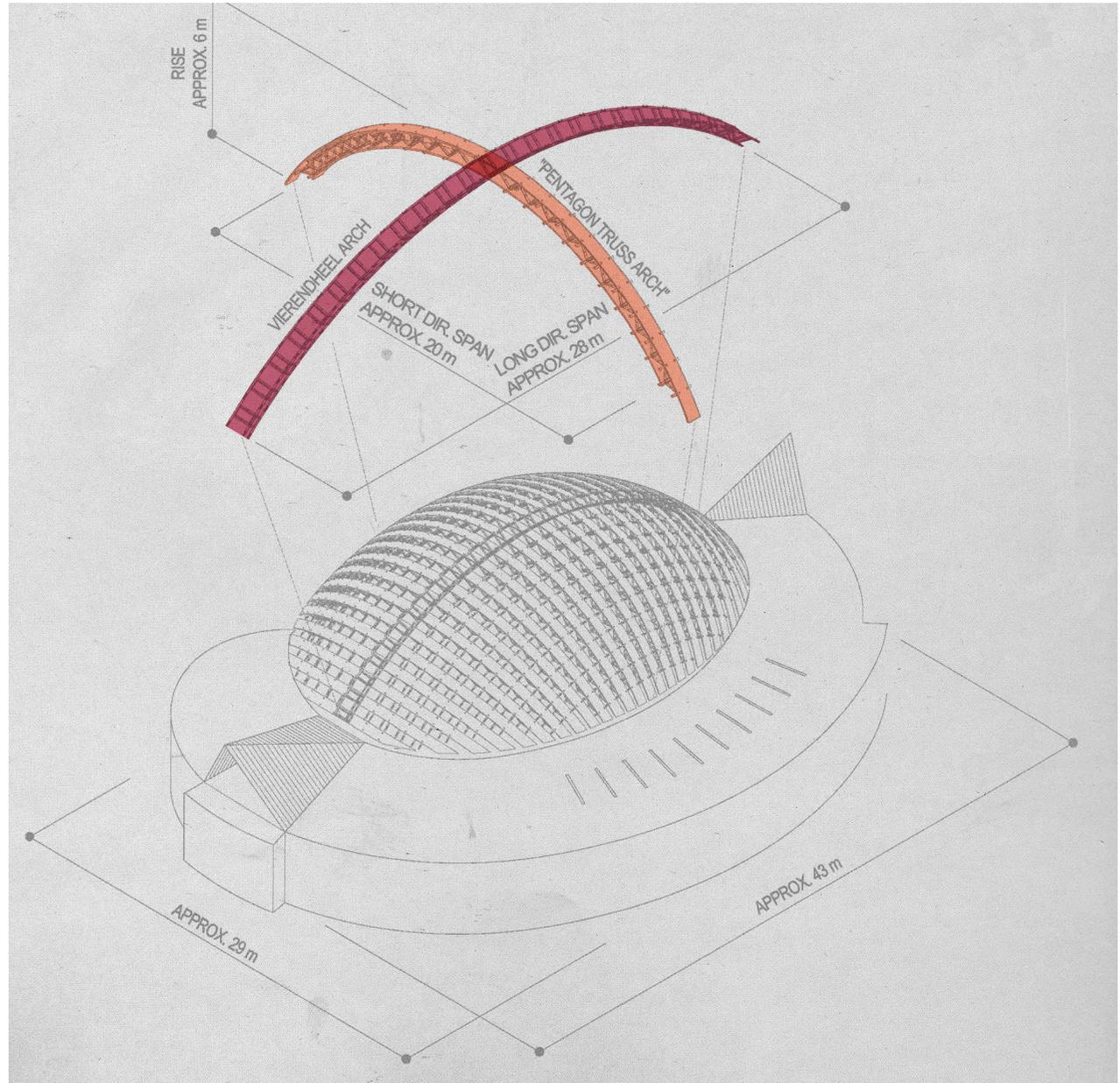


Fig. 75. Planta descriptiva. Fuente: Futagawa, Yukio., (2007), *SPORTS. GA contemporary architecture.*, Tokio, Japón: A.D.A. Edita.

Fig. 76. Volumetría general. Fuente: Futagawa, Yukio., (2007), *SPORTS. GA contemporary architecture.*, Tokio, Japón: A.D.A. Edita.



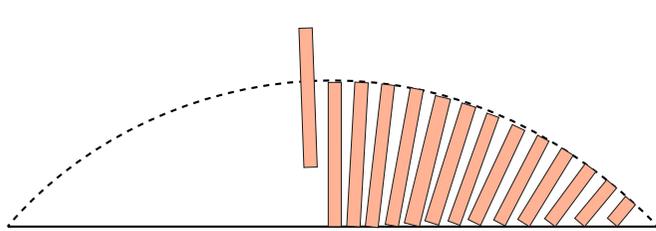


Fig. 77. Arcos triangulados.
Fuente: ELABORACIÓN PROPIA.

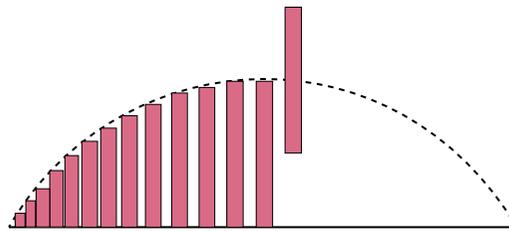


Fig. 78. Arcos Vierendeel.
Fuente: ELABORACIÓN PROPIA.

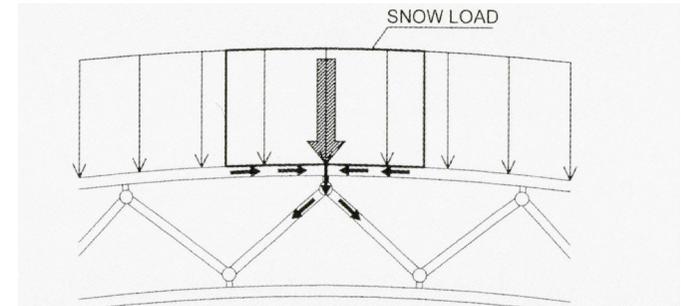


Fig. 80. Comportamiento de las cargas de nieve. Fuente: McQuaid, Matilda., (2006), SHIGERU BAN. GA contemporary architecture., Londres, Reino Unido: Phaidon.

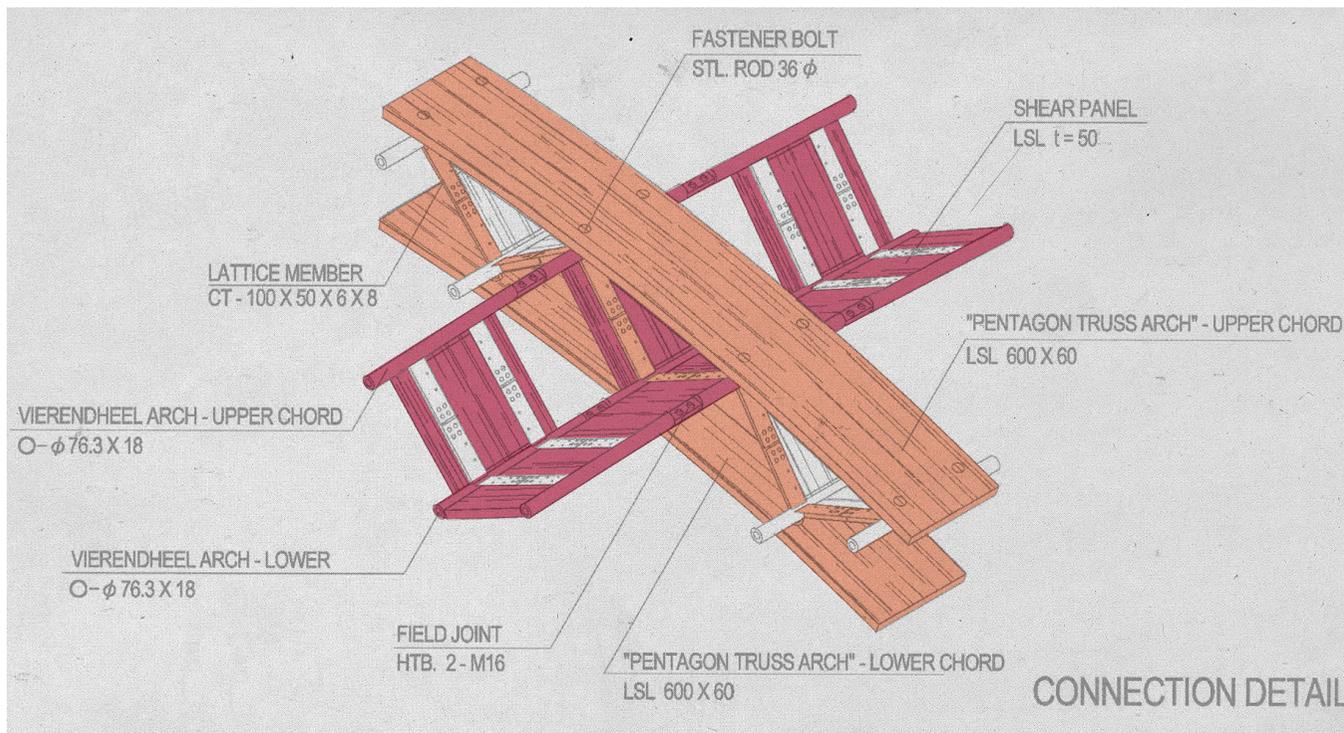


Fig. 79. Integración de los arcos. Fuente: Futagawa, Yukio., (2007), SPORTS. GA contemporary architecture., Tokio, Japón: A.D.A. Edita.

La planta de la bóveda es elíptica, soportada por arcos triangulados y Vierendeel⁽²⁾. Los arcos cerchados fueron organizados paralelos al eje menor de la elipse, mientras que los arcos Vierendeel lo hacen paralelos al eje mayor.

- **Arcos triangulados:**
 - Tableros de LSL.
 - Diagonales metálicas.
- **Arcos Vierendeel:**
 - Tubos horizontales metálicos.
 - Piezas verticales de acero.
 - Tableros de LSL.

(2) En honor al ingeniero belga A. Vierendeel, tiene como características principales las uniones obligatoriamente rígidas y la ausencia de diagonales inclinadas. De esta manera, en una celosía Vierendeel, no aparecen formas triangulares como en la mayoría de celosías, sino una serie de marcos rectangulares. Se trata por tanto de una celosía empleada en edificación por el aprovechamiento de sus aperturas.

Fuente: Goñi Lasheras, Rufino., CÓMO CONSTRUIR UN EDIFICIO-PUENTE. ASPECTOS ESTRUCTURALES. Logrono, España: Universidad de Navarra.

03. 3_ATSUSHI IMAI

ANÁLISIS CONSTRUCTIVO

Los paneles de LSL que forman los arcos superior e inferior del arco triangulado tienen un espesor de 60 mm, éstos fueron curvados cuando tenían un espesor de 20 mm y luego relaminados, colocándose dos tableros superpuestos en cada cara del arco, unidos entre sí mediante tirafondos de 12 mm de diámetro.

Una barra de acero de 36 mm de diámetro, fue utilizada para la conexión entre el elemento diagonal y los arcos superior e inferior del arco triangulado. El espacio entre la barra de acero y el panel de LSL fue rellenado con resina epoxi. A esta barra le fue soldada superior e inferiormente un tubo de acero que forma parte del arco Vierendeel. A su vez, se sueldan a éstos “Cut-Tees” de acero al que se le adhieren paneles de LSL de 50 mm de espesor mediante tirafondos, los cuales formarán conjuntamente el elemento diagonal en los arcos triangulados y definirán el arco Vierendeel.

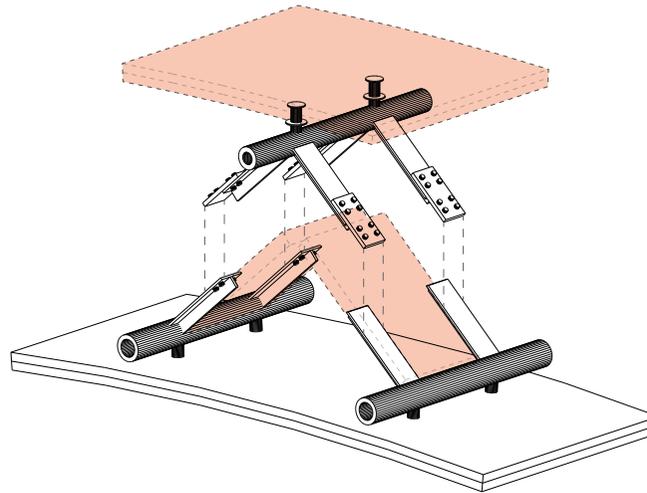


Fig. 81. Esquema arco triangulado.
Fuente: ELABORACIÓN PROPIA.

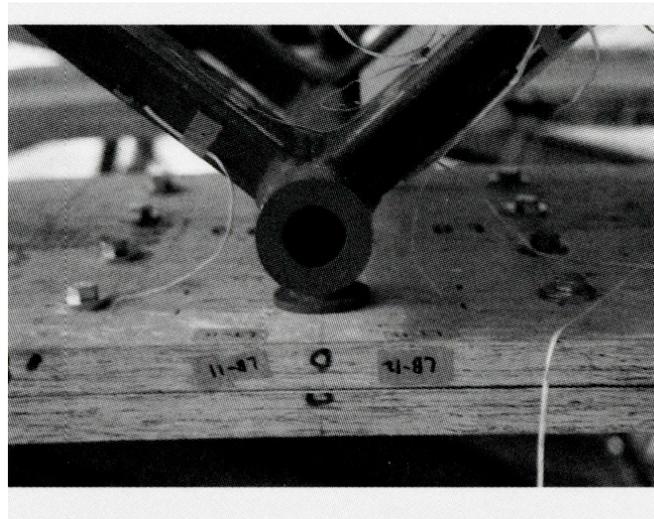


Fig. 83. Fotografía estructura metálica. Fuente: McQuaid, Matilda., (2006), SHIGERU BAN, Londres, Reino Unido: Phaidon.

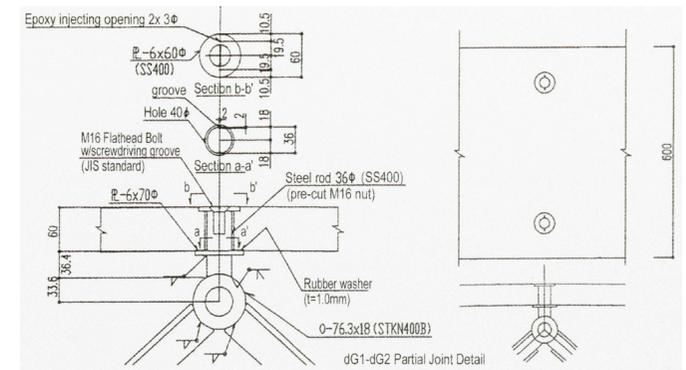


Fig. 82. Conexión entre la diagonal y los arcos superior e inferior. Fuente: McQuaid, Matilda., (2006), SHIGERU BAN, Londres, Reino Unido: Phaidon.

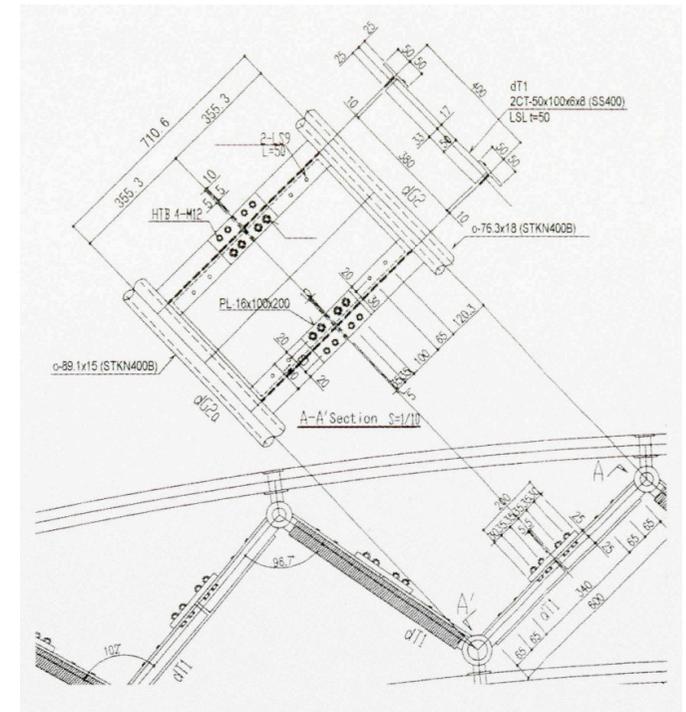


Fig. 84. Conexión de los paneles a cortante. Fuente: McQuaid, Matilda., (2006), SHIGERU BAN, Londres, Reino Unido: Phaidon.



Fig. 85. Montaje parcial del arco. Fuente: McQuaid, Matilda., (2006), SHIGERU BAN, Londres, Reino Unido: Phaidon.



Fig. 87. Colocación del arco. Fuente: McQuaid, Matilda., (2006), SHIGERU BAN, Londres, Reino Unido: Phaidon.

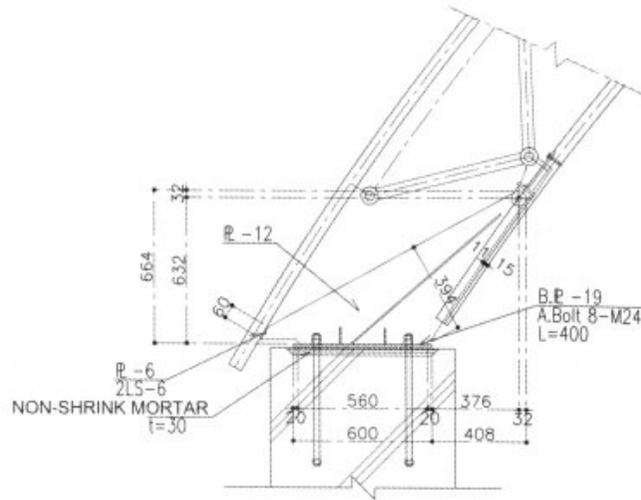


Fig. 86. Detalle del arranque de la estructura de arcos. Fuente: Futagawa, Yukio., (2007), SPORTS. GA contemporary architecture., Tokio, Japón: A.D.A. Edita.



Fig. 88. Fotografía estructura metálica. Fuente: McQuaid, Matilda., (2006), SHIGERU BAN, Londres, Reino Unido: Phaidon.

Los arcos triangulados son los responsables de transmitir las cargas generadas en la cubierta, mientras que los arcos Vierendeel tienen una función de arriostramiento sobre éstos, los cuales se unen entre sí mecánicamente a través de piezas soldadas a los tubos de acero (Fig. 80 y 89).

Los arcos triangulados se montan parcialmente para posteriormente ser colocados (Fig. 86), los tableros de LSL lo hacen a testa (Fig 88), mientras que las piezas metálicas que forman la triangulación lo hacen mediante herrajes metálicos de tipo placa, asegurados mediante pernos metálicos. Los arcos descansan en su base sobre piezas metálicas de sección triangular, (Fig 87 y 89) que transmiten los esfuerzos hasta la estructura de hormigón armado que forma el perímetro elíptico en el cual se inserta el gimnasio. Éstos apoyos metálicos se anclan mecánicamente al muro de hormigón (Fig. 87).

03. 3_ATSUSHI IMAI

CONSIDERACIONES Y PROTECCIÓN DE LA MADERA

Las consideraciones desarrolladas a continuación han sido extraídas del Documento Básico de Seguridad estructural en Madera (DBSE-M) perteneciente al Código Técnico de la Edificación.



Fig. 89. Piscina cubierta. Fuente: Futagawa, Yukio., (2007), SPORTS. GA contemporary architecture., Tokio, Japón: A.D.A. Edita.

CLASES DE DURACIÓN DE LAS ACCIONES

Permanente (más de 10 años).

CLASES DE SERVICIO

Clase de servicio 2. Se caracteriza por un contenido de humedad en la madera correspondiente a una temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ y una humedad relativa del aire que sólo exceda el 85% unas pocas semanas al año.

CLASES DE USO

Clase de uso 2. El elemento estructural está a cubierto y protegido de la intemperie pero, debido a las condiciones ambientales, se puede dar ocasionalmente un contenido de humedad de la madera mayor que el 20 % en parte o en la totalidad del elemento estructural. Ejemplos: estructura de una piscina cubierta en la que se mantiene una humedad ambiental elevada con condensaciones ocasionales y elementos estructurales próximos a conductos de agua. [...] Las piscinas cubiertas, debido a su ambiente húmedo, encajan también en esta clase de servicio.

ELECCIÓN DEL TIPO DE PROTECCIÓN FRENTE A AGENTES BIÓTICOS

NP2 - Al menos 3 mm en la albura de todas las caras de la pieza. El tratamiento protector podrá realizarse sobre la pieza terminada o sobre las láminas previamente a su encolado.

Tabla 3.1 Elección del tipo de protección

Clase de uso		Nivel de penetración NP (UNE-EN 351-1)
1	NP1 ⁽¹⁾	Sin exigencias específicas. Todas las caras tratadas
2	NP1 ⁽²⁾⁽³⁾	Sin exigencias específicas. Todas las caras tratadas
3.1	NP2 ⁽³⁾	Al menos 3 mm en la albura de todas las caras de la pieza.
3.2	NP3 ⁽⁴⁾	Al menos 6 mm en la albura de todas las caras de la pieza. Todas las caras tratadas.
4	NP4 ⁽⁵⁾	Al menos 25 mm en todas las caras
	NP5	Penetración total en la albura. Todas las caras tratadas
5	NP6 ⁽⁴⁾	Penetración total en la albura y al menos en 6 mm en la madera de duramen expuesta.

⁽¹⁾ Se recomienda un tratamiento superficial con un producto insecticida

⁽²⁾ El elemento de madera deberá recibir un tratamiento superficial con un producto insecticida y fungicida.

Tabla 8. Elección del tipo de protección.

Fuente: CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN, (2009), Documento Básico SE-M.

PROTECCIÓN PREVENTIVA FRENTE A AGENTES METEOROLÓGICOS

El mejor protector frente a los agentes meteorológicos es el diseño constructivo, especialmente las medidas que evitan o minimizan la retención de agua. **En nuestro caso, la estructura de madera se ha diseñado para que no entre en contacto con el agua de precipitación, como se puede observar en la Figura 91, la madera queda protegida del exterior mediante paneles translúcidos de policarbonato, asegurados por bandas metálicas.**

McQuaid, Matilda., (2006), SHIGERU BAN, Londres, Reino Unido: Phaidon.

PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN DE LOS ELEMENTOS METÁLICOS

Tabla 3.2 Protección mínima frente a la corrosión (relativa a la norma ISO 2081), o tipo de acero necesario

Elemento de fijación	Clase de servicio		
	1	2	3
Clavos y tirafondos con $d \leq 4$ mm	Ninguna	Fe/Zn 12c ⁽¹⁾	Fe/Zn 25c ⁽²⁾
Pernos, pasadores y clavos con $d > 4$ mm	Ninguna	Ninguna	Fe/Zn 25c ⁽²⁾
Grapas	Fe/Zn 12c ⁽¹⁾	Fe/Zn 12c ⁽¹⁾	Acero inoxidable
Placas dentadas y chapas de acero con espesor de hasta 3 mm	Fe/Zn 12c ⁽¹⁾	Fe/Zn 12c ⁽¹⁾	Acero inoxidable
Chapas de acero con espesor por encima de 3 hasta 5 mm	Ninguna	Fe/Zn 12c ⁽¹⁾	Fe/Zn 25c ⁽²⁾
Chapas de acero con espesor superior a 5 mm	Ninguna	Ninguna	Fe/Zn 25c ⁽²⁾

⁽¹⁾ Si se emplea galvanizado en caliente la protección Fe/Zn 12c debe sustituirse por Z 275, y la protección Fe/Zn 25c debe sustituirse por Z 350.

⁽²⁾ En condiciones expuestas especialmente a la corrosión debe considerarse la utilización de Fe/Zn 40c, un galvanizado en caliente más grueso o acero inoxidable

Tabla 9. Protección mínima frente a la corrosión.

Fuente: CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN, (2009), Documento Básico SE-M.

Los elementos metálicos deben estar sometidos a una protección a base de galvanizado de zinc de al menos 12 micras de espesor.



Fig. 90. Fotografía exterior de cubierta.

Fuente: Futagawa, Yukio., (2007), SPORTS. GA contemporary architecture., Tokio, Japón: A.D.A. Edita.



Fig. 91. Tirafondo protegido con zinc Hex Head Bolt M24.

Fuente: THEFASTENER WAREHOUSE. <http://www.ebaystores.com.au/The-Fastener-Warehouse?_rdc=1>

CONSIDERACIONES RELATIVAS A LAS UNIONES

Ninguna de las uniones está expuesta al agua y la Clase de servicio es 2, por lo tanto, no es necesario asumir consideraciones relativas a las uniones.

TIPOS DE ADHESIVOS

Tabla 4.1 Tipos de adhesivos en madera para uso estructural y su adecuación con la clase de servicio

Tipo de adhesivo	Abreviatura	Clase de servicio		
		1	2	3
Fenol-formaldehído ¹⁾	PF	apto	apto	apto
Resorcina-fenol-formaldehído ¹⁾	RPF	apto	apto	apto
Resorcina-formaldehído ¹⁾	RF	apto	apto	apto
Melamina-urea-formaldehído ²⁾	MUF	apto	apto	apto
Urea-formaldehído ²⁾	UF	apto	no apto	no apto
Poliuretano ²⁾	PU	apto	apto	apto
Resinas epoxi ²⁾	EP	apto	apto	apto

Nota general: en todo caso es necesario que los adhesivos para uso estructural estén certificados por organismos de reconocido prestigio, como por ejemplo el CTBA (Francia), MPA (Alemania) y el NTI (Noruega).

1) Líneas de cola de color marrón oscuro.

2) Líneas de cola transparentes.

*Tabla 10. Tipos de adhesivos en madera para uso estructural y su adecuación con la clase de servicio.
Fuente: CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN, (2009), Documento Básico SE-M.*

OBRA DE ARTE, son las palabras que merece esta construcción.

Tres son los aspectos que definen este edificio:

- La implantación. Se resuelve la inserción en el lugar mediante el enterramiento del programa, evitando rivalizar en escala con el entorno inmediato. De esta manera, deriva el uso de muros de hormigón perimetrales que hacen las veces de muros de sótano y apoyo para la estructura de cubierta.
- El material. Invitado por las exigencias climáticas a idear una cubierta ligera y resistente, Shigeru Ban se embarca en la aventura de investigar un material ligero para resolver una gran luz que frecuentemente habíamos visto resolver con piezas de canto mayor.
- La luz. Es un material más, puesto que dialoga a la perfección con la estructura en la que se fusionan dos tipos de arcos, creando una atmósfera única.

La reflexión más valiosa que se puede extraer de esta obra es, que pese a que todo parezca ya inventado o construido, lo conocido puede tener una nueva función.

04_CONCLUSIONES

04_CONCLUSIONES

Cómo hemos podido observar, la madera laminada ofrece soluciones efectivas, especialmente cuando de grandes luces se trata. Hay ciertos aspectos que se reproducen en los tres casos de estudio:

- El primero de ellos sería que responden a una necesidad derivada del programa y su interpretación, dando como resultado edificios con luces considerables que actúan como grandes contenedores.
- El segundo aspecto que comparten es el motivo de la elección tipológica, los tres encargos responden de esta manera a una relación con el entorno, el cuál puede devenir de una perspectiva de composición e inserción en el lugar, y/o hacerlo como respuesta a las exigencias climatológicas. Aprovechando este aspecto a su favor, para dar continuidad y sentido a la estructura.
- El tercer punto en el que confluyen es en la estandarización e industrialización de los materiales utilizados, siendo ésta una de las grandes ventajas que ofrece el trabajo con madera laminada, disminuyendo los plazos de ejecución notablemente al realizarse la mayoría de las piezas en taller para luego ser transportadas y montadas.
- Otro aspecto en el que coinciden es el empleo de uniones metálicas, necesarias en la construcción de grandes luces, que pueden provocar un déficit en su seguridad estructural en caso de incendio. Sin embargo, renunciar a éstas uniones significaría asumir que los apoyos de arcos y pórticos se conviertan en grandes piezas de madera u hormigón, sometidas en su diseño a una revisión de la carpintería escandinava y japonesa.

Una vez introducidos en la madera laminada y conocedores de la capacidad y posibilidades que este material ofrece, parece adecuado reflexionar a cerca del proceso constructivo en el que se desarrolla nuestra actividad.

Quizás sea necesaria una revisión de materiales y tipologías constructivas, que permita responder sosteniblemente a la demanda material y proyectual que exige la arquitectura. Una buena contestación sería la de apostar por un modelo circular, donde la madera, el diseño y el usuario se relacionen de una manera equilibrada y responsable.

05_BIBLIOGRAFÍA

05_BIBLIOGRAFÍA

Aitim. PERFILES ESTRUCTURALES DE MADERA RECONSTITUIDA (PSL,LSL, OSL, SPSL)

AITIM. <infomadera.net>

AMPARO GARRIDO. <<https://www.metalocus.es>>

ARAUCO. <www.arauco.cl>

ARQUITECTURAS CERÁMICAS. <<http://www.ceramicarchitectures.com>>

Arriaga, F., Íñiguez, G., Esteban, M., Argüelles, R., Fernández, J.L., (2011), DISEÑO Y CÁLCULO DE UNIONES EN ESTRUCTURAS DE MADERA, Madrid, España: Maderia. Construcción.

ARTIUM. <catalogo.artium.org>

Basterra Otero, L., (2009), CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE MADERA, Valladolid, España: Universidad de Madrid.

BODEGAS PROTOS. <<https://www.metalocus.es>>

BRICOMARKT. <<http://www.bricomarkt.com>>

Camacho Atalaya, A., INGENIERÍA DE LA MADERA HOLTZA S.A. AITIM.

CEDRIA. <<http://www.cedria.es>>

Código Técnico de la Edificación, (2009), Documento Básico SE-M.

COMPETITIONLINE. <<http://www.competitionline.com>>

DIARIO DE UN ALECRÍN. <<http://diariodeunalecrin.blogspot.com>>

DICCIONARIO DE LA LENGUA ESPAÑOLA. <<http://dle.rae.es>>

DOCTOR MADERA. <<https://doctor-madera.com>>

ECONOTICIAS. <www.ecoticias.com>

EGOIN ANDALUCÍA. <<https://egoin-andalucia.com>>

FORRESIDENTIALPROS <<http://www.forresidentialpros.com>>

Futagawa, Yukio., (2007), SPORTS. GA contemporary architecture., Tokio, Japón: A.D.A. Edita.

Goñi Lasheras, Rufino., *CÓMO CONSTRUIR UN EDIFICIO-PUENTE. ASPECTOS ESTRUCTURALES*. Logrono, España: Universidad de Navarra.

HELEN & HARD. <<http://www.helenhard.no>>

KATSUSHISA KIDA. <<https://www.metalocus.es>>

McQuaid, Matilda., (2006), *SHIGERU BAN*, Londres, Reino Unido: Phaidon.

Medina Sánchez, E., (2013), *CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE MADERA*, Madrid, España: Bellisco.

Mestä Wood, *ENVIROMENTAL PRODUCT DECLARATION: Moelven*. <<https://www.moelven.com/>>

METALOCUS. <<https://www.metalocus.es>>

Orradre, G., (2003), *UNIONES EN ESTRUCTURAS DE MADERA LAMINADA*, Navarra, España: Departamento de edificación; Servicio de Publicaciones de la Universidad de Navarra.

PALSER. < <https://www.palser.eu> >

PLATAFORMA ARQUITECTURA. <<https://www.plataformaarquitectura.cl>>

PROMATERIALES. <<https://promateriales.com>>

ROGERS, STIRK, HARBOUR + PARTNERS. <<https://www.rsh-p.com>>

RS COMPONENTS. <<https://es.rs-online.com>>

RSH + PARTNERS. <<https://www.metalocus.es>>

Sánchez Mazaira, A., (1992), *LA MADERA LAMINADA ENCOLADA*, Madrid, España: Fundación Escuela de Edificación.

Schittich, C., Lenzen, S., Dondelinger, M., Kohl-Kastner, A., Leitte, S., Meyer, K., Schönbrunner, Eva., (2014), *HOLZ = WOOD*, Munich, Alemania: DETAIL.

THEFASTENER WAREHOUSE. <http://www.ebaystores.com.au/The-Fastener-Warehouse?_rdc=1>

Universidad de Costa Rica (2015), *CÁLCULO DE HUELLA DE CARBONO PARA MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN*.

Valiente. G., (2015) *LOS BOSQUES DE TALA CONTROLADA Y DEFORESTACIÓN*. Canexel. <<https://www.canexel.es>>

WARREN AND MAHONEY. <<https://warrenandmahoney.com>>

05_BIBLIOGRAFÍA

REFERENCIAS DE IMÁGENES

- Fig. 1. Piezas de madera laminada. Fuente: ARAUCO. <www.arauco.cl>
- Fig. 2. Madera laminada curva. Fuente: WARREN AND MAHONEY. <<https://warrenandmahoney.com>>
- Fig. 3. Pino silvestre. Fuente: Econoticias. <www.ecoticias.com>
- Fig. 4. Fabricación de viga curva. Fuente: Medina Sánchez, E., (2013), CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE MADERA, Madrid, España: Bellisco.
- Fig. 5. Transporte especial. Fuente: Egoín Andalucía. <<https://egoín-andalucía.com>>
- Fig. 6. Finger Joint perpendicular. Fuente: AITIM. <infomadera.net>
- Fig. 7. Dibujo de Finger Joint perpendicular. Fuente: Sánchez Mazaira, A., (1992), LA MADERA LAMINADA ENCOLADA, Madrid, España: Fundación Escuela de Edificación.
- Tabla 1. Clases resistentes de la madera laminada encolada. Fuente: Medina Sánchez, E., (2013), CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE MADERA, Madrid, España: Bellisco.
- Fig. 8. Oficinas Tamedia de Shigeru Ban Architects. Fuente: Plataforma Arquitectura. <www.plataformaarquitectura.cl>
- Fig. 9. Madera atacada por hongos de pudrición blanda. Fuente: ITM Tratamiento de la Madera. <<http://www.itmtratamientos.es>>
- Fig. 10. Toneladas de CO₂ emitidas / toneladas de material. Fuente: Elaboración propia. Basado en (Universidad de Costa Rica, 2015)
- Fig. 11. Pellets. Fuente: PALSER. <<https://www.palser.eu>>
- Fig. 12. Tableros de OSB. Fuente: Diario de un Alecrín. <<http://diariodeunalecrin.blogspot.com>>
- Fig. 13. Vigas rectas. Fuente: Elaboración propia. Basado en (Basterra Otero, 2009).
- Fig. 14. Vigas a dos aguas. Fuente: Elaboración propia. Basado en (Basterra Otero, 2009).
- Fig. 15. Vigas a dos aguas invertida. Fuente: Elaboración propia. Basado en (Basterra Otero, 2009).
- Fig. 16. Vigas a un agua. Fuente: Elaboración propia. Basado en (Basterra Otero, 2009).
- Fig. 17. Vigas a dos aguas con intradós curvo. Fuente: Elaboración propia. Basado en (Basterra Otero, 2009).
- Fig. 18. Pares con tirante metálico. Fuente: Elaboración propia. Basado en (Basterra Otero, 2009).
- Fig. 19. Arcos. Fuente: Elaboración propia. Basado en (Basterra Otero, 2009).
- Fig. 20. Arcos de tres articulaciones. Fuente: Elaboración propia. Basado en (Basterra Otero, 2009).
- Fig. 21. Pórticos curvados de tres articulaciones. Fuente: Elaboración propia. Basado en (Basterra Otero, 2009).
- Fig. 22. Pórticos de tres articulaciones. Fuente: Elaboración propia. Basado en (Basterra Otero, 2009).
- Fig. 23. Ensamblajes de cola de milano a media madera. Fuente: DISEÑO Y CÁLCULO DE UNIONES EN ESTRUCTURAS DE MADERA, Madrid, España: Maderia. Construcción.
- Fig. 24. Embarbillado frontal simple. Fuente: DISEÑO Y CÁLCULO DE UNIONES EN ESTRUCTURAS DE MADERA, Madrid, España: Maderia. Construcción.
- Fig. 25. Clavijas: Clavos, grapas, tirafondos, pernos y pasadores. Fuente: DISEÑO Y CÁLCULO DE UNIONES EN ESTRUCTURAS DE MADERA, Madrid, España: Maderia. Construcción.
- Fig. 26. Conectores dentados con púas. Fuente: DISEÑO Y CÁLCULO DE UNIONES EN ESTRUCTURAS DE MADERA, Madrid, España: Maderia. Construcción.
- Fig. 27. Herraje metálico. Fuente: Bricomarkt. <<http://www.bricomarkt.com>>
- Fig. 28. Vista exterior. Fuente: Katsushisa Kida. <<https://www.metalocus.es>>
- Fig. 29. Vista aérea. Fuente: Bodegas Protos. <<https://www.metalocus.es>>
- Fig. 30. Vista interior, tienda y zona de degustación. Fuente: Amparo Garrido. <<https://www.metalocus.es>>
- Fig. 31. Vista desde el castillo de Peñafiel. Fuente: Arquitecturas cerámicas. <<http://www.ceramicarchitectures.com>>
- Fig. 32. Esquemas de implantación. Fuente: Rogers, Stirk, Harbour + Partners. <<https://www.rsh-p.com>>
- Fig. 33. Esquemas de funcionamiento. Fuente: Rogers, Stirk, Harbour + Partners. <<https://www.rsh-p.com>>
- Fig. 34. Sección longitudinal. Fuente: Rogers, Stirk, Harbour + Partners. <<https://www.rsh-p.com>>
- Fig. 35. Módulo estructural. Fuente: Elaboración propia.
- Fig. 36. Estructura principal de arcos parabólicos. Fuente: Metalocus. <<https://www.metalocus.es>>
- Fig. 37. Funcionamiento de la estructura de cubierta. Fuente: Elaboración propia. Basado en (Promateriales)
- Fig. 38. Capas de cubierta. Fuente: Elaboración propia.
- Fig. 39. Fotografía tensores laterales. Fuente: Rogers, Stirk, Harbour + Partners. <<https://www.rsh-p.com>>
- Fig. 40. Fotografía unión en la base del arco. Fuente: Rogers, Stirk, Harbour + Partners. <<https://www.rsh-p.com>>
- Fig. 41. Detalle unión en la base del arco. Fuente: Promateriales. <<https://promateriales.com>>
- Fig. 42. Detalle unión. Fuente: Elaboración propia.

- Fig. 43. Fotografía unión centro de arco. Fuente: Arquitecturas cerámicas. <<http://www.ceramicarchitectures.com>>
- Fig. 44. Ejemplo de unión articulada con bulón. Fuente: Medina Sánchez, E., (2013), CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE MADERA, Madrid, España: Bellisco.
- Fig. 45. Construcción de muros perimetrales y cimentación. Fuente: RSH + Partners. <<https://www.metalocus.es>>
- Fig. 46. Esquema de elementos en estructura principal. Fuente: Elaboración propia. Basado en (Rogers, Stirk, Harbour + Partners).
- Fig. 47. Elementos prefabricados de hormigón. Fuente: RSH + Partners. <<https://www.plataformaarquitectura.cl>>
- Fig. 48. Instalación de los arcos. Fuente: RSH + Partners. <<https://www.rsh-p.com>>
- Fig. 49. Construcción de la cubierta. Fuente: RSH + Partners. <<https://www.rsh-p.com>>
- Fig. 50. Construcción de la cubierta. Fuente: RSH + Partners. <<https://www.rsh-p.com>>
- Fig. 51. Fachada norte. Fuente: Bodegas Protos. <<https://www.metalocus.es>>
- Fig. 52. Barniz DEKOR-LASUR de Cedria. Fuente: Cedria. <<http://www.cedria.es>>
- Fig. 53. Pasador galvanizado. Fuente: RS Components. <<https://es.rs-online.com>>
- Fig. 54. Unión basal. Fuente: RSH + Partners. <<https://www.rsh-p.com>>
- Fig. 55. Fabricación de piezas en Holtza. Fuente: Camacho Atalaya, A., INGENIERÍA DE LA MADERA HOLTZA S.A. AITIM.
- Fig. 56. Vista interior. Fuente: Helen & Hard. <<http://www.helenhard.no>>
- Fig. 57. Fachada nordeste. Fuente: Helen & Hard. <<http://www.helenhard.no>>
- Fig. 58. Plano de planta baja. Fuente: Helen & Hard. <<http://www.helenhard.no>>
- Fig. 59. Fachada sur. Fuente: Helen & Hard. <<http://www.helenhard.no>>
- Fig. 60. Esquema estructural. Fuente: Helen & Hard. <<http://www.helenhard.no>>
- Fig. 61. Esquema relación estructura - mobiliario. Fuente: Helen & Hard. <<http://www.helenhard.no>>
- Fig. 62. Implantación volumétrica. Fuente: Competitionline. <<http://www.competitionline.com>>
- Fig. 63. Pórtico estructural. Fuente: Elaboración propia.
- Fig. 64. Despiece integración. Fuente: Elaboración propia.
- Fig. 65. Esquema de integración del mobiliario. Fuente: Schittich, C., Lenzen, S., Dondelinger, M., Kohl-Kastner, A., Leitte, S., Meyer, K., Schönbrunner, Eva., (2014), HOLZ = WOOD, Munich, Alemania: DETAIL.
- Fig. 66. Detalle constructivo, sección transversal. Fuente: Schittich, C., Lenzen, S., Dondelinger, M., Kohl-Kastner, A., Leitte, S., Meyer, K., Schönbrunner, Eva., (2014), HOLZ = WOOD, Munich, Alemania: DETAIL.
- Fig. 67. Detalle constructivo, sección longitudinal. Fuente: Schittich, C., Lenzen, S., Dondelinger, M., Kohl-Kastner, A., Leitte, S., Meyer, K., Schönbrunner, Eva., (2014), HOLZ = WOOD, Munich, Alemania: DETAIL.
- Fig. 68. Imagen interior. Fuente: Plataforma Arquitectura. <<https://www.plataformaarquitectura.cl>>
- Fig. 69. Detalle vierte aguas metálico. Fuente: Schittich, C., Lenzen, S., Dondelinger, M., Kohl-Kastner, A., Leitte, S., Meyer, K., Schönbrunner, Eva., (2014), HOLZ = WOOD, Munich, Alemania: DETAIL.
- Fig. 70. Vista exterior. Fuente: Artium. <<catalogo.artium.org>>
- Fig. 71. Vista interior. Fuente: Artium. <<catalogo.artium.org>>
- Fig. 72. Fotografía interior. Fuente: Futagawa, Yukio., (2007), SPORTS. GA contemporary architecture., Tokio, Japón: A.D.A. Edita.
- Fig. 73. Imagen exterior. Fuente: Futagawa, Yukio., (2007), SPORTS. GA contemporary architecture., Tokio, Japón: A.D.A. Edita.
- Fig. 74. Laminated Strand Lumber (LSL). Fuente: ForResidentialPros <<http://www.forresidentialpros.com>>
- Fig. 75. Planta descriptiva. Fuente: Futagawa, Yukio., (2007), SPORTS. GA contemporary architecture., Tokio, Japón: A.D.A. Edita.
- Fig. 76. Volumetría general. Fuente: Futagawa, Yukio., (2007), SPORTS. GA contemporary architecture., Tokio, Japón: A.D.A. Edita.
- Fig. 77. Arcos triangulados. Fuente: Elaboración propia.
- Fig. 78. Arcos Vierendeel. Fuente: Elaboración propia.
- Fig. 79. Integración de los arcos. Fuente: Futagawa, Yukio., (2007), SPORTS. GA contemporary architecture., Tokio, Japón: A.D.A. Edita.
- Fig. 80. Comportamiento de las cargas de nieve. Fuente: McQuaid, Matilda., (2006), SHIGERU BAN. GA contemporary architecture., Londres, Reino Unido: Phaidon.
- Fig. 81. Esquema arco triangulado. Fuente: Elaboración propia.
- Fig. 82. Conexión entre la diagonal y los arcos superior e inferior. Fuente: McQuaid, Matilda., (2006), SHIGERU BAN, Londres, Reino Unido: Phaidon.
- Fig. 83. Fotografía estructura metálica. Fuente: McQuaid, Matilda., (2006), SHIGERU BAN, Londres, Reino Unido: Phaidon.
- Fig. 84. Conexión de los paneles a cortante. Fuente: McQuaid, Matilda., (2006), SHIGERU BAN, Londres, Reino Unido: Phaidon.
- Fig. 85. Montaje parcial del arco. Fuente: McQuaid, Matilda., (2006), SHIGERU BAN, Londres, Reino Unido: Phaidon.

-
- Fig. 86. Detalle del arranque de la estructura de arcos. Fuente: Futagawa, Yukio., (2007), *SPORTS. GA contemporary architecture.*, Tokio, Japón: A.D.A. Edita.
 - Fig. 87. Colocación del arco. Fuente: McQuaid, Matilda., (2006), *SHIGERU BAN*, Londres, Reino Unido: Phaidon.
 - Fig. 88. Fotografía estructura metálica. Fuente: McQuaid, Matilda., (2006), *SHIGERU BAN*, Londres, Reino Unido: Phaidon.
 - Fig. 89. Piscina cubierta. Fuente: Futagawa, Yukio., (2007), *SPORTS. GA contemporary architecture.*, Tokio, Japón: A.D.A. Edita.
 - Fig. 90. Fotografía exterior de cubierta. Fuente: Futagawa, Yukio., (2007), *SPORTS. GA contemporary architecture.*, Tokio, Japón: A.D.A. Edita.
 - Fig. 91. Tirafondo protegido con zinc Hex Head Bolt M24. Fuente: Thefastener Warehouse. <http://www.ebaystores.com.au/The-Fastener-Warehouse?_rdc=1>

