



REFUERZO DE VIGAS DE MADERA POR TESADO EN UNA NAVE INDUSTRIAL

Jose María VELASCO RIVAS
Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Amatria Ingeniería
velasco@amatria.com
Toni GOMILA SINTES
Ms Estructuras. Ing. Técnico Industrial
Amatria Ingeniería
gomila@amatria.com

ANTECEDENTES

Al realizar la ampliación de una nave con vigas de madera dedicada a la venta de productos deportivos en Mataró (Barcelona) se comprobó la capacidad resistente de dichas vigas. La del pórtico extremo estaba, en principio, diseñada para absorber las fuerzas que transmitirían las nuevas correas asociadas a los nuevos pórticos. El resultado fue que su diseño era insuficiente. Tanto en las vigas del pórtico extremo, sobre el que se ampliaba, como las vigas de los pórticos intermedios y el de la otra fachada opuesta apenas soportaban las cargas permanentes; sin aceptar las sobrecargas de uso

normalizadas, o de nieve y viento. Fue imposible encontrar el proyecto de construcción con los cálculos que justificaran el diseño, por lo que se ignora cuales fueron las condiciones para las que fue concebida. Por ello se extrajeron muestras de la madera de las vigas con el fin de caracterizar su resistencia, que se clasificó como GL28h.

Para la reparación era insuficiente con un refuerzo pasivo. Es decir, el refuerzo con láminas de fibras de carbono, aramida o vidrio (FRP), refuerzo con adhesión de una pletina o ejecución de barras de atirantamiento de acero. Tanto la fibra superior como la inferior estaban fuera del límite de su capacidad y los refuerzos absorberían los esfuerzos de las cargas posteriores. Por ello fue preciso recurrir a un refuerzo activo: Generar artificialmente un estado de tensiones contrario al actuante que permitiera descargar la viga, para lo que era preciso recuperar parte de su deformación vertical.

El refuerzo definido se basa en la creación de un postensado exterior, (en el artículo se consideran sinónimas a efectos prácticos, como es

usual, las palabras, tesado, postensado y pretensado), que restituye parte de los esfuerzos solicitantes de carga permanente reduciendo el estado tensional de la viga. Para conseguirlo se diseña una cama de apoyo del cable en el centro de vano que tendrá la función de desviador de los cables, así como unos anclajes en los extremos.

1. Descripción general de la estructura

La estructura existente consiste en una serie de pórticos separados entre sí 14.70 m. aproximadamente, dichos pórticos están compuestos por columnas de hormigón y vigas de madera biapoyadas en éstas, con luces de 22.20m en los extremos y 14.80m en el centro. Dicha geometría se puede observar la Figura 1.

Las vigas laterales tienen un canto variable comprendido entre 1185 mm en los apoyos y 1650 mm en el centro variando el canto de forma paraboloide. El espesor de estas vigas de madera es de 135 mm. Las vigas centrales también son de canto variable, comprendido entre

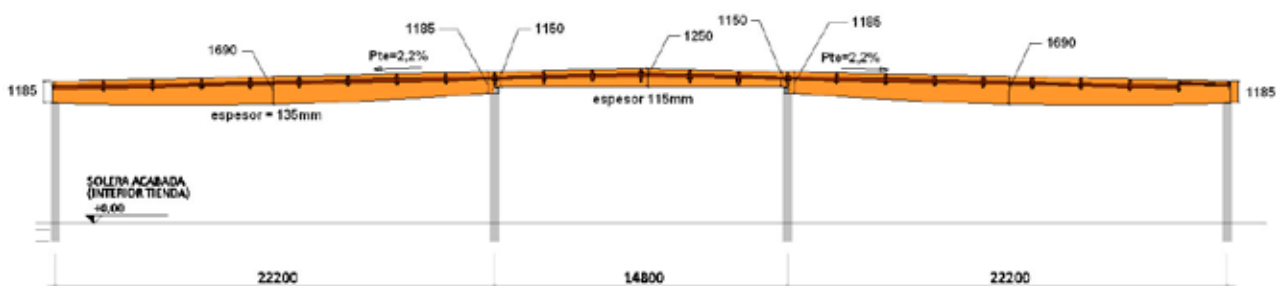


Figura 1: Alzado de un pórtico existente

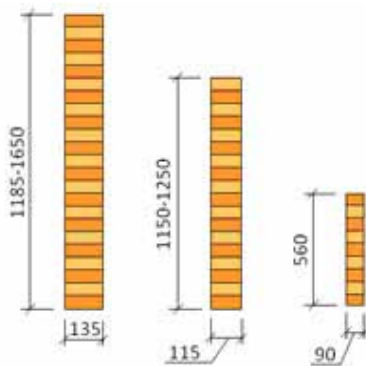


Figura 2. Secciones de las vigas

1150 mm en los apoyos y 1250 mm en el centro, variando el canto de forma triangular. El espesor es de 115 mm.

Las correas por su parte también de madera tienen un canto constante de 560 mm y 90 mm de espesor, considerándose apoyadas en ambos extremos en las vigas de madera de los pórticos. Ver Figura 2.

Para la obtención de esfuerzos se realizó un modelo numérico tridimensional que se presenta en las Figuras 3 y 4.

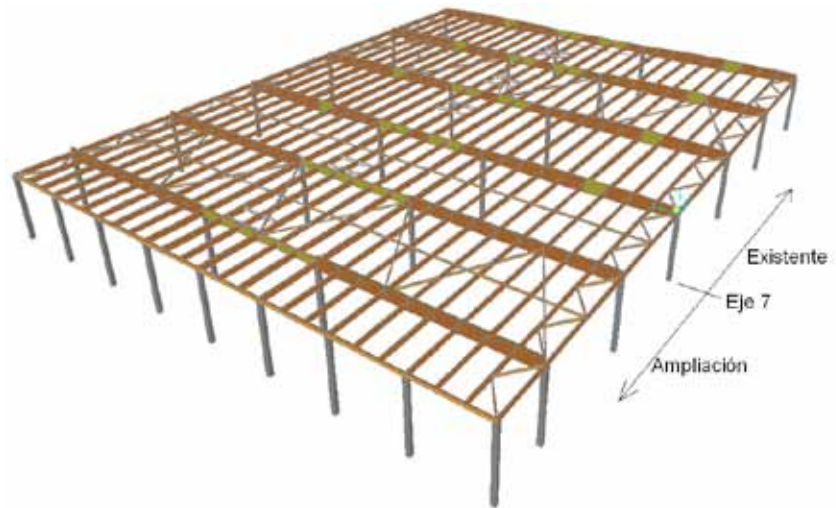


Figura 3: Modelo tridimensional de la nave completa (actual+ampliación)



Figura 4: Modelo de cálculo SAP2000. Perspectiva 3D

2. Propiedades del material

Las vigas a reforzar son de madera laminada encolada de calidad GL28h que se determinó mediante ensayos de laboratorio a partir de muestras extraídas de las vigas a un quinto de luz. Ver Figura 5.

La resistencia a flexión de la madera GL28h en función de su tipología es de:

Cargas permanentes	12,92 N/mm ²
Cargas de corta duración	19,38 N/mm ²

Los cordones de tesado utilizados para la formación de tendones están constituidos por 7 alambres trenzados de acero de baja relajación. El



Figura 5: Ensayo de la madera existente para determinar su calidad

diámetro de dicho cordón es de 0,6" (15mm) de calidad de acero Y1860 S7 con límite de rotura 1860 MPa y módulo de elasticidad, en la Tabla 1 se pueden observar las diferentes propiedades del cordón.

Cordones	Norma	Grado f_{pk}	Diámetro nominal (mm)	Sección nominal (mm ²)	masa (g/m)	Carga mínima de rotura F_{pk} (KN)	Relajación con 1000h al 70% F_{pk}	Carga mínima al 0,1% deformación (KN)
0,6 " (15 mm)	EN 10138-3	1860 MPa	16	150	1170	279	2,50%	240

Tabla 1: Características mecánicas del acero de pretensar



3. Refuerzo mediante tesado exterior, postensado.

Del estudio realizado para la obtención de los esfuerzos en cada una de las vigas se observa que las vigas principales de los pórticos existentes tienen una resistencia inferior a los esfuerzos solicitantes por lo que se procedió a evaluar un sistema de refuerzo que garantizara la viabilidad estructural de la cubierta.

De los esfuerzos obtenidos, indicados en la Tabla 2, ver figura 6, se observó que la resistencia de las vigas es inferior a los esfuerzos provocados por las acciones permanentes. Por ello se propuso un refuerzo de las vigas por medio de un tesado exterior que restituya gran parte de los esfuerzos y deformaciones producidas por dichas acciones permanentes.

Al estirar los cables se produce el levantamiento del desviador, lo que se traduce en la descarga de la viga. Al mismo tiempo la viga queda comprimida en toda su longitud. Una vez alcanzada la fuerza prescrita los cables se anclan mediante cuñas que a su vez van unidas a placas de anclaje. De esta manera las tensiones de las fibras extremas de madera disminuyen y los nuevos esfuerzos que se puedan producir los absorberán conjuntamente la madera y el cable, que está diseñado al efecto.

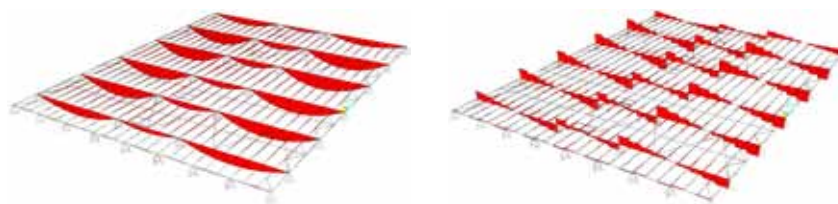


Figura 6: Momento flector (izquierda) y Cortante (derecha) en las diferentes vigas de la cubierta

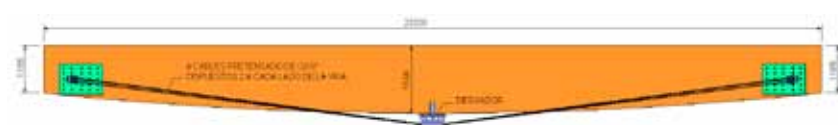


Figura 7: Esquema de refuerzo por cables de tesado vigas laterales

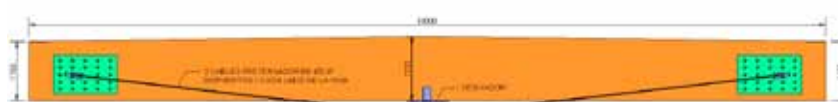


Figura 8: Esquema de refuerzo por cables de tesado vigas centrales.

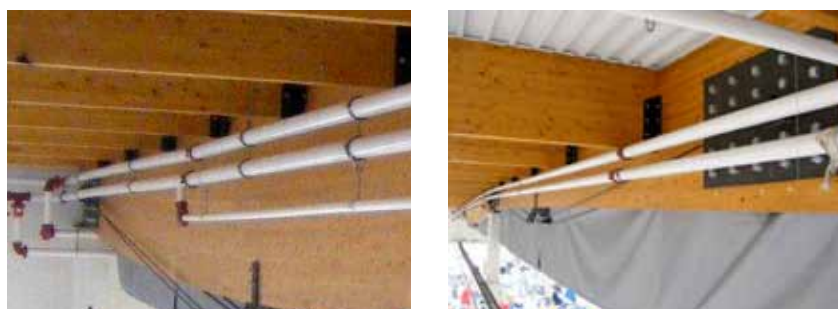


Figura 9: Imagen del refuerzo por cables de tesado viga extremo y viga central.

	Viga Lateral (L=22,20m)		Viga Central (L=14,80m)	
	Flector centro vano [kN•m]	Cortante en apoyo [kN]	Flecto en centro vano [kN•m]	Cortante en apoyo [kN]
Carga permanente	920,19	165,80	399,00	107,84
Carga corta duración	500,23	90,13	222,32	60,09

Tabla 2: Valores de los esfuerzos de cálculo, sin tesado

- Vigas laterales o exteriores, de 22,20 m de luz: Se realiza mediante 4 cordones de tesado de 0,6” pulgadas dispuestos 2 en cada uno de los lados de la viga. En la Figura 7 se puede observar el esquema de la solución propuesta.

- Vigas interiores, de 14,80 m de luz: La solución de refuerzo se ha diseñado por medio de 2 cordones de pretensado de 0.6” pulgadas dispuestos 1 en cada lado de la viga. En la Figura 8 se puede observar el esquema de la solución propuesta. El tesado de las vigas se realiza por

medio de unos gatos hidráulicos que transfieren una fuerza de tesado inicial P0 de 570 kN en la viga de extremo y de 300 kN en la central. Al soltar el gato el cable las cuñas de anclaje del mismo se introducen en su cápsula dando lugar, por acortamiento del cable, a una pérdida de tensión. Es lo que se denomina pérdida por penetración de cuñas, para compensar dicha fuerza los cables antes de ser soltados del gato se tensan a una fuerza superior que compense dicha pérdida. Éste valor, se ajustó a la tecnología de la empresa de tesado. Ver Figuras 9, 10, 11 y 12. En las vigas extremas el proceso de tesado se realizó en tres fases. Se procedió en primer lugar al tesado



Figura 10: Fase de tesado de los cables, se puede observar el gato de tesado, y detalle de la placa de anclaje.

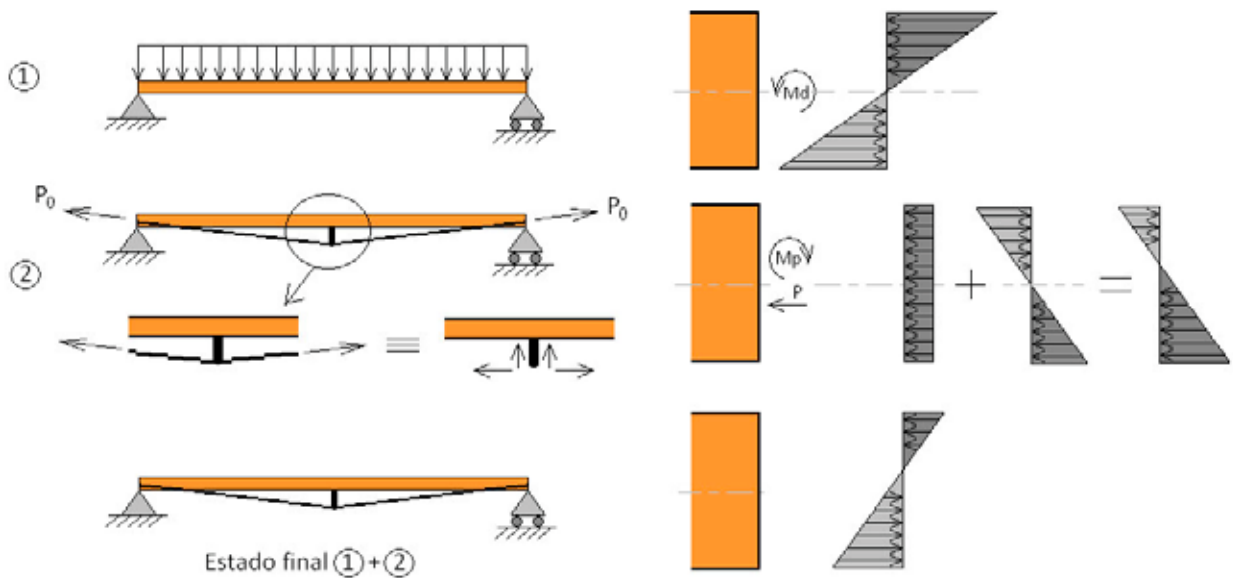


Figura 11: Esquema de cálculo del refuerzo de tesado.

simultáneo de dos cables, uno a cada lado de la viga con el fin de evitar esfuerzos descompensados. Seguidamente se tensaban los otros dos, que originaban un acortamiento de la viga que se traducía en pérdida de tensión de los dos primeros. Por ello, se procedía al retesado de los dos primeros por lo que se procedía a su retesado. Es decir, dos operaciones de tesado más una de retesado. Se han considerado los efectos diferidos, tales como la relajación del acero y la fluencia de la madera, lo que representa una pérdida de tensión de un 10%. También se han considerado las variaciones dimensionales del cable de acero por efectos térmicos, variación térmica

de 20°C entre verano e invierno en interior, y su influencia en el estado tensional de la madera. Se traduce en una variación del 4% de las fuerzas y tensiones, que carece de significación práctica. En caso de incendio el cable queda fuera de servicio, pues carece de protección contra fuego, así como

por dilatación excesiva. Considerando los coeficientes de mayoración de cargas para acciones accidentales, que dejan de multiplicar las mismas, la viga es suficientemente resistente en este caso. En la Tabla 3 se pueden observar los esfuerzos producidos por el efecto del tesado exterior con estabilidad térmica, sin variación de temperatura.

	Viga Lateral (L=22,20m)	Viga Central (L=14,80m)
	Flector en centro de vano [kN•m]	Axil (Compresión) [kN]
	Axil (Compresión) [kN]	Flector en centro de vano [kN•m]
Tesado	-660,52	522,84
		-266,94
		278,72

Tabla 3: Esfuerzos introducidos por el tesado



Figura 12: Detalle del gato de tesado y elemento desviador de los cables. El diseño final del desviador fue realizado por el departamento técnico de Mekano 4.

En la Tablas 4 y 5 se pueden observar los valores resumidos de la variación tensional que sufre la viga de madera.

		VIGAS LATERALES			
		Carga permanente		Carga de corta duración	
		Incremento Tensión [N/mm ²]	Tensión acumulada [N/mm ²]	Tensión [N/mm ²]	Tensión acumulada [N/mm ²]
Estado inicial	Fibra superior		-14,32	-7,78	-7,78
	Fibra inferior		14,32	7,78	7,78
Tesado	Fibra superior	7,99	-6,33	----	-7,78
	Fibra inferior	-12,57	1,75	----	7,78
Estado final	Fibra superior		-6,33	-7,78	
	Fibra inferior		1,75	7,78	

Tabla 4: Vigas laterales. Tensiones iniciales antes del tesado, incremento por el tesado y valor final.

		VIGA CENTRAL			
		Carga permanente		Carga de corta duración	
		Incremento Tensión [N/mm ²]	Tensión acumulada [N/mm ²]	Tensión [N/mm ²]	Tensión acumulada [N/mm ²]
Estado inicial	Fibra superior		-13,32	-7,42	-7,42
	Fibra inferior		13,32	7,42	7,42
Tesado	Fibra superior	6,97	-6,35	----	-7,42
	Fibra inferior	-10,85	2,47	----	7,42
Estado final	Fibra superior		-6,35	-7,42	
	Fibra inferior		-2,47	7,42	

Tabla 5: Vigas centrales. Tensiones iniciales antes del tesado, incremento por el tesado y valor final.



La comprobación final se realiza a partir de la ecuación [1], en la que se relacionan las tensiones permanentes y de larga duración junto con las de corta duración. La fórmula se ha planteado a partir de la misma filosofía de los índices de resistencia de uso general en los Eurocódigos.

$$\frac{\sigma_{\infty}}{f_{my\infty}} + \frac{\sigma}{f_{my0}} \leq 1$$

4. Conclusión

El tesado exterior de vigas de madera como refuerzo activo ha permitido incrementar la capacidad resistente de las vigas de madera, garantizar la estabilidad y durabilidad de los elementos estructurales de la cubierta de madera, disminuyendo el tiempo de trabajo y la afección al servicio de la nave, punto importante dado que los trabajos debían ser nocturnos y con la mínima incidencia visual en la tienda.

El tesado activo; es decir, la introducción de un estado de tensiones controlado que contrarresten parcial o totalmente el efecto de las acciones gravitatorias permite incrementar la capacidad resistente de las piezas estructurales de madera. El sistema es un paso más allá del refuerzo pasivo, en que la adición de barras, cables metálicos o refuerzos con bandas de Plástico Reforzado con Fibras (FRP) recogen las acciones posteriores a su colocación. Las variaciones de dilatación entre madera y acero tienen un efecto aceptable y controlado sobre los esfuerzos permanentes.

5. Relación de participantes

Propiedad: Decathlon

Dirección de la obra e ingeniería principal

Empresa: Greccat

Director: Bruno Cuevas

Adjunto a Dirección: Elisabet Garrote

Proyecto de refuerzo y asistencia técnica a D.O.:

Empresa: Amatria Ingeniería, S.L.

Autores: José M^a Velasco (Dr. Ingeniero de Caminos) y Toni Gomila (Ingeniero Técnico Industrial)


Empresa Constructora: OCP

Empresa refuerzo de tesado: Mekanod4 (MK4)

Laboratorio: SCQ. Control i Qualitat

6. Referencias

[1] Argüelles R., Arriaga F., Martínez Juan J., "Estructuras de madera. Diseño y cálculo", Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y Corcho, 2^a Ed, Madrid 2000.

[2] Mekanod4 (MK4), "Catálogo de Pretensado MK4" 


madera aserrada de abeto, pino, alerce
madera mecanizada


DUO-/TRIO-/MULTILAM

vigas curvadas

estructuras prefabricadas de madera

tablero contralaminado

madera empalmada con certificado 

tableros alistonados y tricapa 

pellets

