



# CINCO PROYECTOS FIN DE CARRERA SOBRE ESTRUCTURAS DE MADERA

El campo de las estructuras de madera tiene asegurado su futuro al menos a nivel académico. Año tras año se gradúan nuevas generaciones de ingenieros que salen adecuadamente formados para enfrentarse con los más diversos trabajos en este campo. Seleccionamos en esta ocasión cuatro proyectos fin de carrera del curso 2011-2012 que tocan temas variados: obra nueva, análisis de patologías y puesta en servicio, aspectos medioambientales e investigación aplicada. Estos proyectos han sido realizados por alumnos de la ETSI Montes de Madrid y han sido dirigidos por profesores de la Unidad Docente de Cálculo de Estructuras pertenecientes al Grupo de Investigación "Construcción con madera" de la Universidad Politécnica de Madrid.

Autor	Directores	Título	Calificación
Juan Carlos Gómez Martín	Miguel Esteban y Guillermo Íñiguez	Proyecto de diseño y cálculo de una cubierta de madera laminada encolada para las ruinas del Hospital General de San Antón, Castrojeriz (Burgos)	Matrícula de Honor Premio AITIM
Mariano González Sanz	Miguel Esteban y Guillermo Íñiguez	Estudio sobre el estado de conservación de la cubierta del Martinete de Navafria (Segovia)	Sobresaliente 10 Propuesto para Matrícula de Honor
José Ignacio del Casar Sebastián	Francisco Arriaga	Estudio comparativo de las soluciones en madera y acero para una pasarela peatonal atendiendo al criterio de emisiones de CO2	Sobresaliente 10
Jaime de la Mata Jiménez	Guillermo Íñiguez y Miguel Esteban	Influencia de la humedad de la madera en la evaluación de las propiedades mecánicas del pino silvestre mediante técnicas no destructivas	Sobresaliente 10
Benito Arribas Daniel	Miguel Esteban	Catálogo de soluciones prácticas de pasarelas peatonales en el ámbito forestal. Proyecto de pasarela peatonal en el término municipal de El Espinar (Segovia)	Sobresaliente 10

## CUBIERTA DE MADERA LAMINADA ENCOLADA PARA LAS RUINAS DEL HOSPITAL GENERAL DE SAN ANTON, CASTROJERIZ (BURGOS)

A una jornada y media desde Burgos, el peregrino que recorre el Camino de Santiago ve su paso franqueado por las dos imponentes arcadas del pórtico del Real Xenodoquio de San Antonio Abad. Este hospital, fundado por el rey de León y Castilla Alfonso VIII en el año 1146, fue un importante centro de acogida de peregrinos a Santiago y de enfermos del "fuego de San Antonio". Hoy en ruinas, los restos que se conservan corresponden a la iglesia del convento, edificio de estilo gótico erigido en el siglo XIV, además del pórtico de doble arco construido sobre la ruta jacobea en el siglo XVI.

El proyecto "Proyecto de diseño y cálculo de una cubierta de madera laminada encolada para las ruinas del Hospital General de San Antón, Castrojeriz (Burgos)" desarrolla la idea de la creación de una cubierta de madera laminada, que en el estilo de las cubiertas de iglesias góticas del norte de Castilla, proteja las ruinas y ofrezca una percepción de la magnitud que alcanzó el edificio, sin intervenir de forma agresiva en

las ruinas. Con este planteamiento se diseñó una cubierta que descansa exclusivamente sobre las secciones de muro existentes, realizándose únicamente un saneamiento de la parte superior de los muros en forma de un zuncho de hormigón armado. Sobre dicho zuncho, se anclan pilares de acero formados por perfiles UPN 200 y UPN 80, soldados a cajón. Este sistema permite la retirada de la cubierta, en caso necesario, de forma que no se perciba ninguna alteración externa respecto al estado actual de conservación de las ruinas.

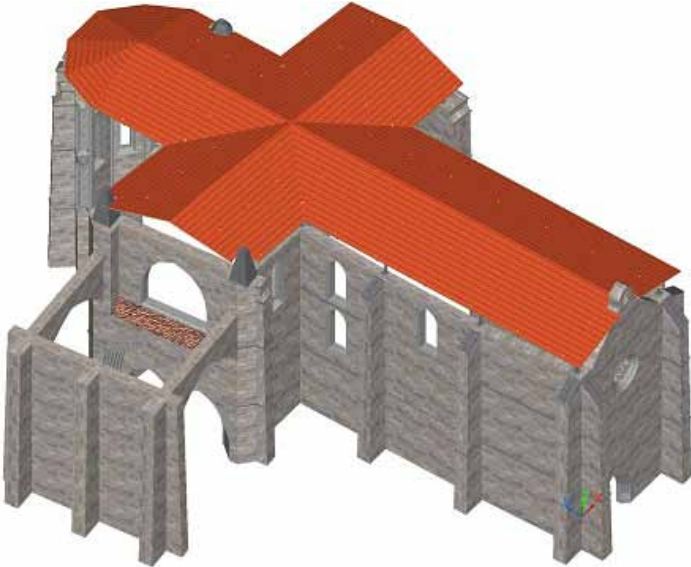
La estructura principal de la cubierta está compuesta por vigas de sección rectangular, de 200 mm de ancho por 1000 mm de canto. Estas vigas se disponen a lo largo de los muros de forma longitudinal, estando colocadas por pares sobre los muros de laterales de la nave y el transepto, dónde

forman perfiles dobles de 400x1000 mm. Las vigas longitudinales sobre el ábside y el muro inmediatamente contiguo se disponen de forma individual, como vigas simples. Todas las vigas longitudinales se encuentran a la misma cota, y por ello en el mismo plano. Los encuentros sobre el crucero se resuelven mediante la interrupción de unas y la continuidad de otras. El material de las vigas es madera laminada encolada de clase resistente GL-24h y GL-28h.

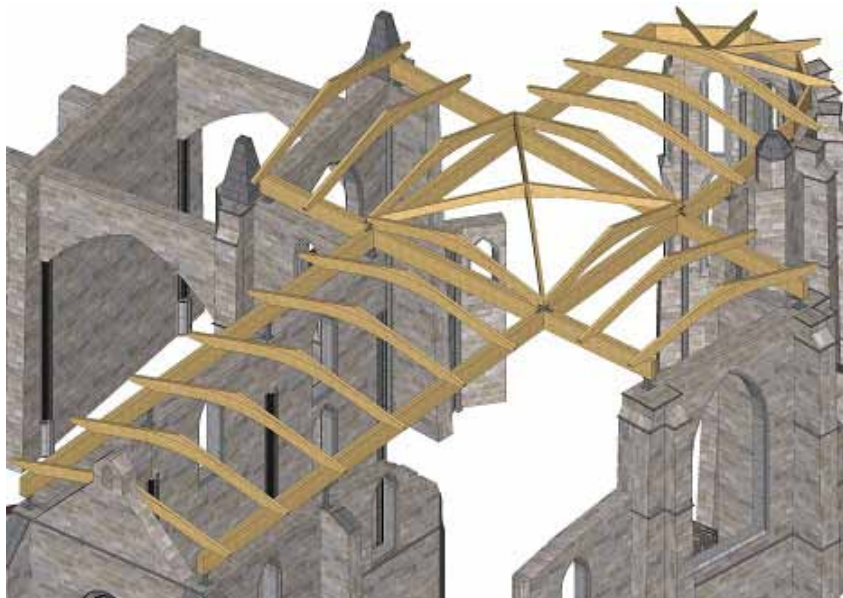
La estructura secundaria está compuesta por vigas transversales con copete de intradós curvo-recto, limahoyas sobre el crucero y limetasas en el ábside, todas ellas de madera laminada GL-24h, que salvan las luces entre las vigas longitudinales. El cerramiento se completa por medio de paneles de madera contralaminada de 112 mm de espesor, compuestos por 3 capas, que se fijan a las vigas



Vista general de las ruinas



Axonométrica



Vigas transversales



Vista noreste



Vista suroeste

curvas, a las limahoyas y a las limatesas, inmovilizándolas y evitando su vuelco. Sobre estos paneles, se coloca una membrana de ventilación, un enrastrelado y tejas mixtas de cerámica. La estructura presenta un gran número de elementos de unión distintos. Unos tienen la función exclusiva de mantener las piezas en su plano, mientras que otros también soportan carga de forma directa. Todas las uniones son de tipo madera-acero-madera o madera-acero. Donde el grosor de las piezas lo permite, se utilizan pasadores autoperforantes, a fin de facilitar el montaje. En el resto de casos se emplean pernos o tornillos. El presupuesto de licitación del proyecto es de 363.634,94 € incluyendo, además de los costes de la estructura de la cubierta, el derribo de construcciones ajenas a las ruinas, la limpieza de estas y el nivelado del terreno. El tiempo total de ejecución es de 58 días.

Las mediciones para el diseño de la cubierta se realizaron in situ, empleando un distanciómetro láser. Los diseños e infografías se realizaron con CADWork, empleándose para los cálculos los programas ESTRUMAD y CLTdesigner, según el CTE.

#### DATOS DEL PROYECTO

Autor: Juan Carlos Gómez Martín  
Directores: Miguel Esteban Herrero y Guillermo Íñiguez González  
Fecha: Julio 2012

Juan Carlos Gómez Martín  
Ingeniero de Montes



Pilar doble

# EL MARTINETE DE NAVAFRÍA

## ESTUDIO SOBRE SU ESTADO DE CONSERVACION

Mariano González  
Ingeniero de montes

El Martinete de Navafría se encuentra enclavado en el término municipal de Navafría. Situado a la vera de la sierra de Guadarrama, al sur-este de la provincia de Segovia.

La importancia de este martinete radica en que es el único martinete de cobre que queda en Europa. El Martinete de Navafría es un edificio antiguo muy singular, no por el edificio en sí, sino por el ingenio que alberga en su interior. Tal es su importancia que ha sido declarado Bien de Interés Cultural por la Junta de Castilla y León en 1998. (BOCYL-D-18061998-21).

En el conjunto del Martinete se pueden distinguir varias áreas:

- El área de acceso al taller, que se utilizaba para la preparación de carbón vegetal de pino y como lugar de acopio del material usado en el Martinete.
- El área de captación del agua del río Cega y su canalización hasta el edificio del Martinete.
- El área del edificio, donde se alberga toda la instalación y maquinaria, tanto exterior como interior, que constituye el Martinete. Es en esta última área en la que se centrará el estudio.

El edificio se construyó en torno a 1940, es de planta rectangular con unas dimensiones exteriores de 15x10 m. Los muros son de mampostería, con un espesor de unos 60 cm y la cubierta a tres aguas con teja segoviana. El paramento Sur forma parte de la antepara y tiene en el muro una abertura por donde sale el eje de la rueda. En la fachada Norte se encuentra la puerta de entrada y en el muro Oeste hay dos pequeñas ventanas. En el lado Este es el propio terreno el encargado del cerramiento, más un pequeño hastial. El interior está ocupado principalmente por el ingenio, a la izquierda de la entrada está la fundición y la carbonera y a la derecha la oficina y donde se acumula

la escoria.

Se realizó un estudio de la cubierta para evaluar el estado en el que se encontraba y poder aportar soluciones a la conservación del edificio.

Primero se procedió a realizar un levantamiento de planos de la cubierta ya que no había ningún plano de ésta. Mediante medidor laser y cinta métrica se realizaron los croquis que posteriormente se pasaron a un modelo 3D en Cadwork®. Se codificó todas las piezas de la estructura para su posterior análisis patológico.

### Análisis inicial

Una vez realizado el levantamiento de planos y nombradas todas las piezas se procedió a realizar una inspección inicial mediante punzón para evaluar e identificar las diferentes patologías que presentaba la estructura.

En este análisis se detectó un alto grado de patologías en la estructura presentando ataque importante de

anóridos, pudriciones que en algunos casos eran muy avanzadas y había también la presencia de cerambícidos. La identificación de los ataques se realizó en el laboratorio de Industrias de la madera de la E.U.I.T. Forestal de la UPM mediante el análisis de los restos encontrados.

También se detectó en la primera visita la rotura de una de las piezas principales de la estructura.

Una vez realizada esta primera inspección se realizó una compilación de la información y se representó gráficamente.

Posteriormente se procedió a emplear Técnicas No Destructivas para estimar las propiedades resistentes de la madera. Se realizaron análisis con Pilodyn, Microsecond Timer Fakkop y Técnica de Arranque de Tornillo (MAT) y se determinó el contenido de humedad de la madera mediante xilohigrómetro de resistencia eléctrica. Con los datos obtenidos y los resultados de la tesis de Guillermo Íñiguez se obtuvo:

TIPO	ρ media						E medio			R media	
	PILODYN			MAT			Nº	E medio	CV	R media	CV
	Nº	ρ media	CV	Nº	ρ media	CV					
11	2	490	31,6	2	417	34,2	1	10675	2057,3	40,34	9,3
12	1	461	44,6	-	-	-	-	-	-	-	-
13	18	479	10,5	10	398	15,3	9	7227	685,7	24,72	3,1
14	10	494	14,1	2	403	34,2	2	11714	1454,7	45,05	6,6
Total	31	484	-	14	402	-	12	8262	-	29,41	-

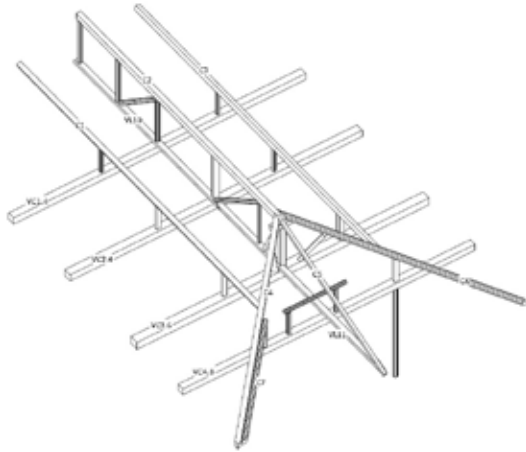
Donde:

- Nº: hace referencia al número de valores tenidos en cuenta.
- Tipo: indica el grupo estructural al que corresponde.
- ρ media: valor de densidad medio estimado expresado en kg/m<sup>3</sup>.
- E medio: Valor de módulo de elasticidad medio expresado en N/mm<sup>2</sup>.
- R media: corresponde con la tensión de rotura N/mm<sup>2</sup>.

Tipo	Parámetro estimado	Clase resistente asignada
------	--------------------	---------------------------



# estructuras



Vista exterior (Foto: Miguel Esteban)



Noria A



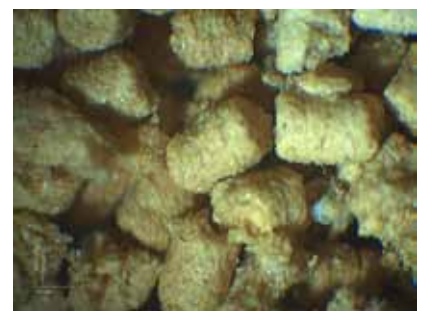
Rotura 1



Noria B



Detalle de restos dejados por anódidos, poseen una forma ahusada. (Foto: Ignacio Bobadilla)



Detalle de restos dejados por cerámicos, poseen una forma cilíndrica. (Foto: Ignacio Bobadilla)

11	Densidad Pilodyn®	C35
	Densidad MAT	C22
	Módulo de elasticidad medio	C22
13	Densidad Pilodyn®	C30
	Densidad MAT	C20
	Módulo de elasticidad medio	C14
14	Densidad Pilodyn®	C35
	Densidad MAT	C20
	Módulo de elasticidad medio	C27
Medio	Densidad Pilodyn®	C35
	Densidad MAT	C20
	Módulo de elasticidad medio	C16
	Tensión de rotura	C18

Con estos datos se tiene una clase resistente más desfavorable de C14.

### Cálculo estructural

Se realizaron dos modelos tridimensionales mediante el programa Estru-mad para estudiar el comportamiento de la estructura.

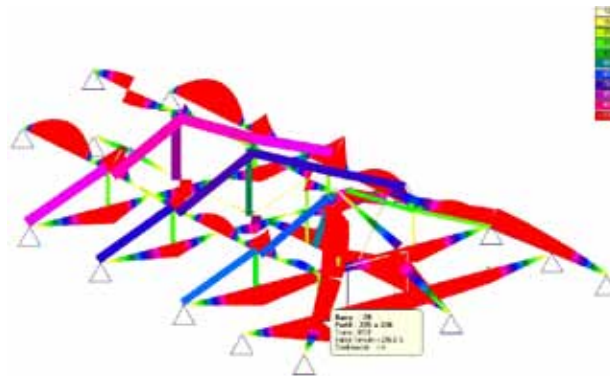
En uno se buscó representar el comportamiento de los pares. Los pares se encuentran apoyados sobre unas correas que descansan sobre las vigas principales, este apoyo intermedio no es rígido, sino que presenta cierta flexibilidad. Esta disposición se ha modelizado representando las vigas principales con los enanos, la correa y los pares de uno de los dos faldones longitudinales de la cubierta. En las vigas principales, se han incluido las cargas correspondientes a las generadas por el otro agua de la cubierta que no se ha modelizado.

De este modo se consigue que el modelo actúe como ocurre en la realidad, es decir, que los apoyos presenten cierta flexibilidad en función de la carga que reciben.

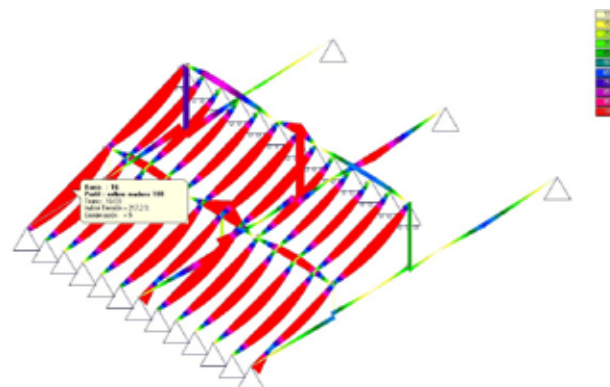
Y en el otro se busca explicar el funcionamiento general de la estructura y justificar la rotura.

Se han empleado ambos modelos suponiendo diferentes condiciones de clase resistente desde una C14 hasta una C22 y se han obtenido como conclusiones finales que en base a los resultados obtenidos, tanto en la inspección como con los análisis

no destructivos empleados y con la comprobación del cálculo estructural, se llega a la conclusión de que es necesaria la realización de una restauración de la cubierta del Martinete si se quiere garantizar su conservación. Se ha concluido que la restauración



Índices de agotamiento modelo general de la estructura



Índices de agotamiento modelo de los pares

debe ser total de la cubierta y que dado el mal estado de conservación de las piezas debido a las diversas patologías que presentan no se pueden reutilizar en la restauración. Además se recomienda que la madera que se emplee en la restauración esté tratada para, al menos una clase de uso 3. En la rehabilitación se deberán tener en cuenta las medidas de diseño constructivo necesarias para la buena conservación de la madera, entre otras una buena ventilación de las piezas y que no se produzcan acumulaciones de agua ni transferencia de humedad por capilaridad. Esto último es especialmente importante en el muro de la antepara.



## ESTUDIO COMPARATIVO DE LAS SOLUCIONES EN MADERA Y ACERO PARA UNA PASARELA PEATONAL ATENDIENDO AL CRITERIO DE EMISIONES DE CO2

Autor: José Ignacio del Casar Sebastián  
Director: Francisco Arriaga Martitegui

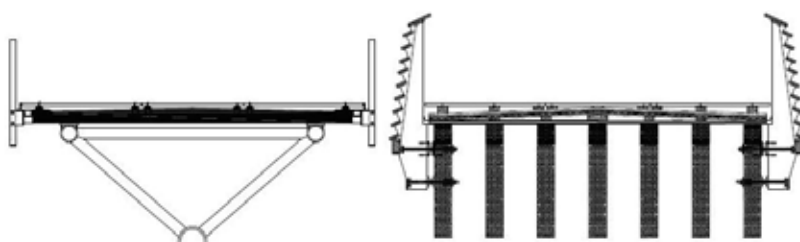


Pasarela metálica



Pasarela de madera

La razón por la cual surge la idea de este proyecto es debido a que a diferencia del acero (Instrucción EAE del Ministerio de Fomento. Anejo 11: Índice de contribución de la estructura a la sostenibilidad) y del hormigón (Instrucción EHE 08 del Ministerio de Fomento. Anejo 13: Índice de contribución de la estructura a la sostenibilidad), no existe ningún documento técnico que especifique que utilizar madera es sostenible, pese a que es bien sabido por todos que, gracias a la fotosíntesis, los árboles de un bosque pueden atrapar grandes cantidades de CO<sub>2</sub> y almacenarlas en forma de madera. En este trabajo fin de carrera no sólo se da un valor de emisiones de CO<sub>2</sub> para cada uno de los materiales de



Sección transversal de pasarela de metal (izquierda) y de madera (derecha)

la construcción, también se realiza un análisis comparativo entre dos soluciones constructivas para una pasarela peatonal, una existente con estructura de acero y otra con estructura de madera con las mismas prestaciones. La pasarela de metal existe, es la denominada Pasarela Peatonal Arganzuela III que se encuentra en Madrid, más concre-

tamente en la zona de Madrid Río y sirve de paso sobre el río Manzanares uniendo los barrios situados a ambos márgenes del río. La pasarela de madera se diseñó y calculó de tal forma que soportara la mismas cargas que la pasarela de metal (peso propio, uso y viento) y que su apariencia en el entorno fuera similar a la pasarela existente.

Como consecuencia de estas consideraciones, la pasarela de madera resultante consta de siete vigas de madera lamina GL 32 h, de sección variable (240x1.680 mm en los apoyos y 240x900 mm en el centro de la viga) a lo largo de los 45 m de luz libre. La sección transversal tiene un ancho de 5,6 m que permite alojar una estructura de 4,8 m que hace la función de pavimento y que da protección por diseño a las siete vigas que lo soportan.

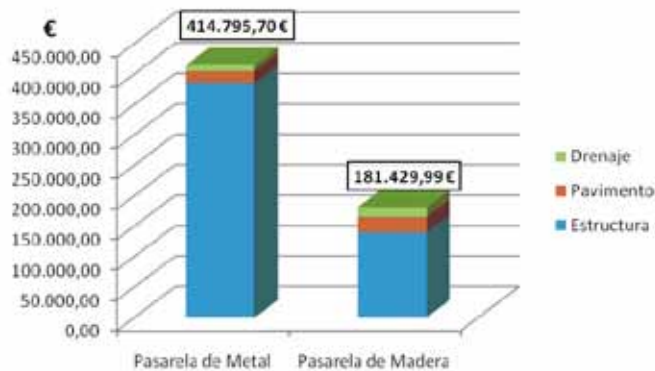
En términos económicos, el costo total de los materiales de la pasarela de madera resultó un 56,26 % más barato que el costo total de los materiales de la pasarela de acero.

Para realizar la comparación de emisiones de CO<sub>2</sub> se utilizaron diversos estudios realizados por distintos organismos de diferentes países en los cuales se cuantificaba las emisiones de CO<sub>2</sub> de los distintos materiales de la construcción a través del Análisis del Ciclo de Vida. En dichos estudios se consideraban todas las etapas de fabricación del producto desde la extracción de las materias primas hasta el final de su vida útil. Debido a la gran controversia entre los estudios, se utilizaron únicamente aquellos que al cruzarlos entre sí, mostraban datos comunes, de tal forma que se obtuvo una gráfica resumen de emisiones y absorciones de CO<sub>2</sub> para los distintos materiales de la construcción.

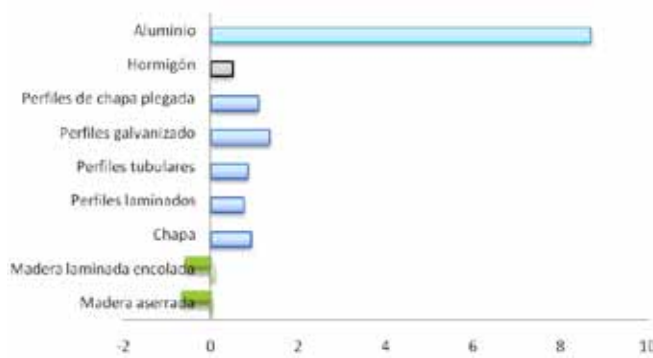
Los estudios utilizados para obtener dicha gráfica fueron:

- Environmental Properties of Timber Summary Report (Forest and Wood Products Research and Development Corporation, 1997).
- Life cycle assessment in the steel industry (Worldsteel Association, 2010).
- Comparative analysis of available life cycle inventories of cement in the EU (Josa et al, 2007).
- L'avantages environnemental des systèmes de construction en bois dans le contexte des changements climatiques (Cecobois, 2011).

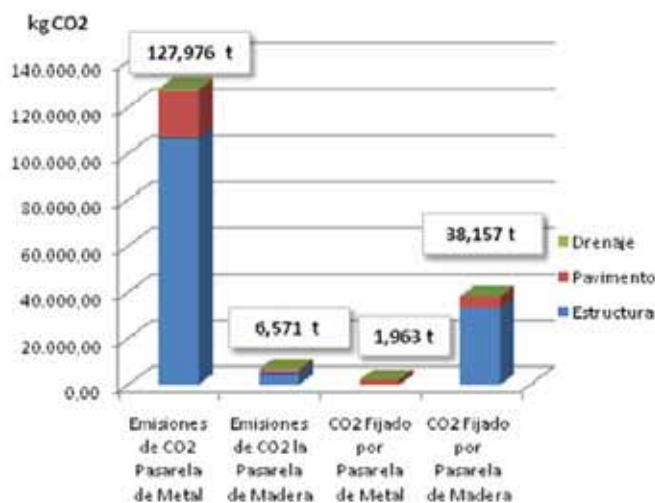
En relación al criterio de emisiones de CO<sub>2</sub>, las emisiones de la solución metálica eran de 127,976 toneladas de CO<sub>2</sub> y para la solución con madera de 6,571 toneladas de CO<sub>2</sub>, es decir, la



Coste total de los materiales para ambas pasarelas



Emisiones (≥ 0) y fijaciones (≤ 0) de CO<sub>2</sub> de los distintos materiales de construcción (kg CO<sub>2</sub> / kg de producto).



Representación de emisiones de CO<sub>2</sub> y de CO<sub>2</sub> fijado por ambas pasarelas.

madera presenta un 94,86 % menos de emisiones que la solución metálica. En relación a la cantidad de CO<sub>2</sub> fijado, la cantidad fijada por la solución metálica era de 1,963 toneladas de CO<sub>2</sub> y para la solución con madera de 38,157 toneladas de CO<sub>2</sub>. Por tanto, el ahorro total de emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, si se hubiera llevado a cabo la pasarela de madera, hubiera sido de 157,59 toneladas de CO<sub>2</sub>.

Atendiendo a los valores de emisiones de CO<sub>2</sub> obtenidos para cada uno de los materiales de la construcción, así como a los resultados obtenidos de la comparación entre ambas pasarelas, se llega a la conclusión de que no existe ningún material más sostenible que la madera. Y por lo tanto, si aumentaran el número de construcciones en madera, no sólo se produciría un aumento en la superficie forestal





## INFLUENCIA DE LA HUMEDAD DE LA MADERA EN LA EVALUACION DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL PINO SILVESTRE MEDIANTE TECNICAS NO DESTRUCTIVAS

debido a la necesidad de cubrir la demanda, si no que se reducirán el número de emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmosfera a causa de la construcción.

### Bibliografía principal:

- CEI-Bois. (2009) Frente al cambio climático: Utiliza madera. ANFTA, Cis Madeira, Xunta de Galicia. Tercera edición revisada, [s.l].
- ISO 14040-2006: Gestión ambiental –Análisis del ciclo de vida –Principios y marco de referencia. Organización Internacional para la normalización, Ginebra.
- ISO 14044-2006: Gestión ambiental –Análisis del ciclo de vida –Requisitos y directrices. Organización Internacional para la normalización, Ginebra.
- LLORENTE DÍAZ, I.M. (2011). Análisis del Ciclo de Vida de la ventana de madera. Madrid. Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Forestal. 159p.
- FOREST AND WOOD PRODUCTS RESEARCH AND DEVELOPMENT CORPORATION. (1997). Environmental properties of timber summary report. AUSTRALIAN GOVERNMENT, 16p. Project No PNO05.95
- JOSA, A.; AGUADO, A.; HEINO, A.; BYARS, E.; CARDIM, A. (2007). Comparative analysis of available life cycle inventories of cement in the EU. United Kingdom. The University of Sheffield, Department of Civil and Structural Engineering. 10p.
- CECOBOIS. (2011). L'avantages environnemental des systèmes de construction en bois dans le contexte des changements climatiques, Quebec. 8p.
- WORLDSTEEL ASSOCIATION. (2010). Life cycle assessment in the steel industry. United Kingdom. Worldsteel association. 4p.

Autor: Jaime de la Mata Jiménez  
Directores: Guillermo Íñiguez  
González y Miguel Esteban Herrero

### Introducción

Este estudio comprende un análisis de la influencia del contenido de humedad de madera aserrada de pino silvestre sobre sus propiedades mecánicas, estimadas mediante técnicas no destructivas (END).

Durante el secado natural de la madera, se clasificó visualmente y se llevaron a cabo los diferentes ensayos no destructivos: se midió su contenido de humedad, la velocidad de propagación de ondas acústicas a través de las probetas así como la velocidad natural de vibración de las mismas.

Con los datos obtenidos, se analizó la relación existente entre el contenido de humedad y la velocidad, así como con el módulo de elasticidad dinámico obtenido a través de ésta. Finalizado el secado de la madera, se procedió a ensayar a flexión, cuyos resultados fueron comparados con los END.

### Objetivos

Estudiar el nivel de precisión de las técnicas no destructivas en la estimación de las propiedades mecánicas de la madera.

Analizar los valores de contenido de humedad y las variables obtenidas a través de END durante el secado natural de la madera. Proponer un factor de corrección que permita estimar las propiedades mecánicas en función de diferentes contenidos de humedad.

Comparar las variables relativas a las técnicas no destructivas (ensayos dinámicos) y las correspondientes al ensayo mecánico a flexión (ensayo estático).

### Antecedentes

La aplicación de técnicas no destructivas sobre madera estructural, desde aserraderos a estructuras antiguas en pie, permite realizar una estimación acerca de sus propiedades físicas y mecánicas.

De esta forma, el uso de la velocidad de propagación de ondas acústicas a través de la madera, así como la velocidad de vibración de la misma, permiten estimar propiedades mecánicas de ésta, como el modulo de elasticidad dinámico.

A su vez, dicha velocidad se encuentra influenciada por diversos factores: calidad de la madera, dimensiones de la pieza, temperatura y contenido de humedad. En este sentido, el contenido de humedad que presenta la madera produce un incremento de la velocidad a medida que el contenido de humedad disminuye.

El ensayo mecánico a flexión se trata de una técnica destructiva utilizada para determinar propiedades mecánicas de la madera, como el módulo de elasticidad estático o la resistencia.

### Material y métodos

El material sobre el que han tenido lugar los ensayos ha sido 26 probetas de madera aserrada de pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.), de procedencia El Espinar, Segovia y con una dimensión nominal de 3000 x 150 x 100 mm.

La selección de la madera en verde se realizó en el aserradero, asegurando la mayor homogeneidad posible en torno a la clase visual MEG, según la norma UNE 56544. El proceso de secado natural tuvo lugar en un recinto cubierto y cerrado, permaneciendo



Figura 1. Detalle de la pila de probetas.

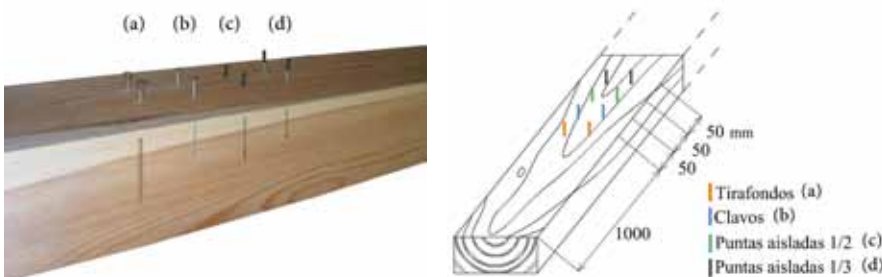


Figura 2. Colocación de los electrodos en las probetas: (a) 26 pares de tirafondos introducidos a una profundidad de 2/3 del canto, (b) 26 pares de clavos convencionales clavados a 1/3 del canto, (c) 5 pares de puntas aisladas introducidas a una profundidad de 1/2 del canto y (d) 4 pares de puntas aisladas clavadas a un 1/3 de profundidad.

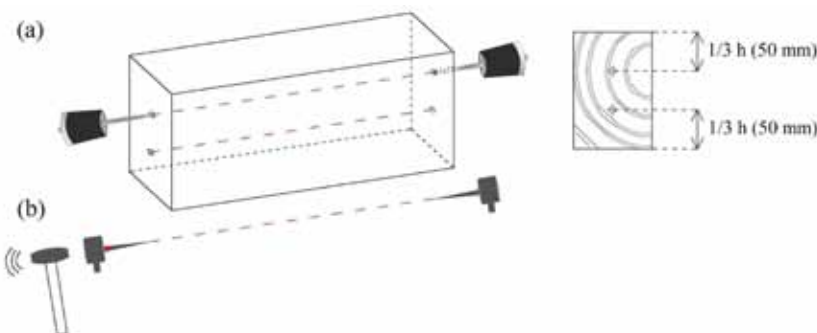


Figura 3. Ensayo mediante métodos acústicos: onda ultrasónica (a) y onda sónica o de impacto (b).

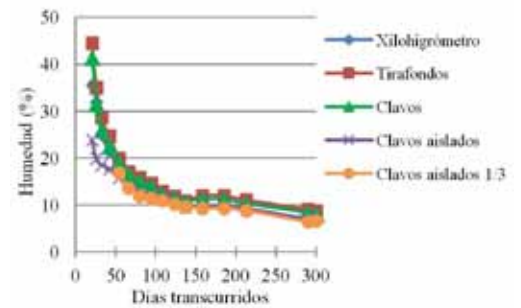


Figura 4. Evolución del contenido de humedad medio según el tipo de electrodos.

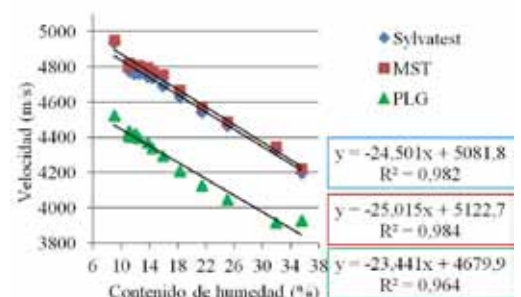


Figura 5. Relación lineal entre los valores medios de contenido de humedad y velocidad de las probetas, para los tres equipos de END.

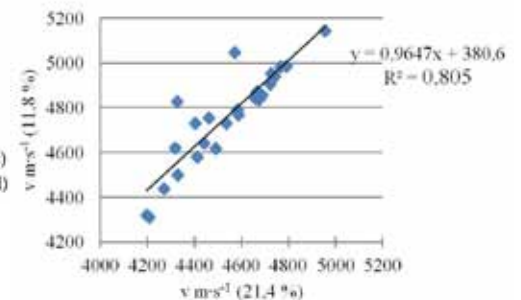


Figura 6. Relación lineal entre las velocidades de propagación de ultrasonidos en dos contenidos de humedad diferentes.

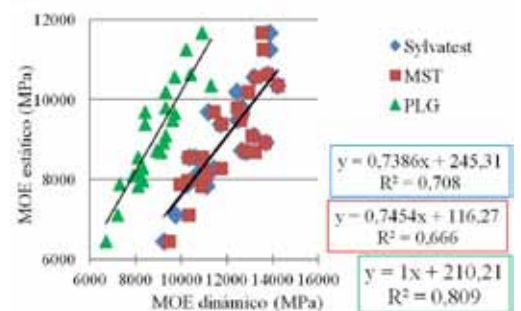


Figura 7. Relación lineal entre el MOE estático y MOE dinámico estimado a través de END.



las probetas debidamente apiladas para asegurar su secado uniforme (Fig. 1). Una vez que el material llegó a dicho lugar, se procedió a realizar regularmente diferentes ensayos no destructivos.

La clasificación visual de madera aserrada se realizó según la norma UNE 56544:2009 y el contenido de humedad fue medido en la sección central de las probetas a través de la resistencia eléctrica que ofrece la madera (norma UNE-EN 13183-2:2002), mediante un xilohigrómetro GANN Hydromette HTR 300, haciendo uso de diferentes electrodos clavados a distintas profundidades (Fig. 2).

La estimación de la velocidad de propagación de la onda a través de las probetas se realizó mediante los equipos Sylvatest Trio y Microsecond Timer de Fakopp (MST), que utilizan onda ultrasónica y sónica respectivamente.

Los equipos constan de dos transductores, emisor y receptor, que se colocan enfrentados en las testas de las probetas y entre los que se emite una serie de pulsos de onda que recorren la longitud de las mismas. El tiempo empleado por la onda es recogido por una consola a la que se unen los dos transductores. En el caso de Sylvatest Trio los pulsos son generados eléctricamente mientras que en el Microsecond Timer son generados mediante excitación mecánica del transductor emisor. Se realizaron dos mediciones en cada pieza (Fig. 3), utilizándose la media aritmética para obtener la velocidad de propagación (Eq. 1) y el MOE dinámico (Eq. 2).

$$v = L / t \quad [1]$$
$$\text{MOE dinámico} = \rho \cdot v^2 \quad [2]$$

El Portable Lumber Grader (PLG) es el equipo que se utilizó para estimar la frecuencia de vibración natural de las piezas. El equipo consta de un micrófono y de dos soportes sobre los que se coloca la probeta, siendo uno de ellos una balanza que permite conocer el peso de las probetas. La vibración es generada mediante un impacto con martillo sobre la testa contraria a donde se ha ubicado un micrófono, que se conecta a un

software y que recoge la señal. Por medio de la Eq. 3 se estimó la velocidad de vibración natural, conociendo de la longitud de la probeta (L) y la frecuencia de vibración (f).

$$v = 2 \cdot L \cdot f \quad [3]$$

El ensayo estático corresponde a un ensayo mecánico a flexión en el que se utilizó un pórtico de ensayos hidráulico Ibertest PFIB 600-300W dotado de una célula de carga de 600 kN a escala 1/5 y 1/1, así como unos extensómetros HBM WA de 20 mm y de 50 mm para la medida de las deformaciones (norma UNE-EN 384:2011).

## Resultados y discusión

Se realizaron un total de 14 ensayos no destructivos a lo largo del proceso de secado natural de las probetas, desde valores por encima del punto de saturación de la fibra, 35,5%, hasta que alcanzan el contenido de humedad de equilibrio, en torno al 9,0%. No obstante, la evolución que se produce en el contenido de humedad de las probetas se ha seguido desde su selección en aserradero. Durante el secado, se produce un descenso relativamente brusco de contenido de humedad cuando éste se encuentra por encima del punto de saturación de la fibra, mientras que por debajo del mismo la disminución es más lenta (Fig. 4).

Por otro lado, al analizar los valores medios de las variables velocidad de propagación y/o vibración, según el equipo, y contenido de humedad de las 26 probetas, existe una fuerte relación entre ambas variables, con un alto coeficiente de determinación (Fig. 5). Esto hace que, comparando la velocidad de propagación ultrasónica a través de las probetas en dos contenidos de humedad diferentes, es decir, en contenidos de humedad de 11,8% y 21,4 %, se obtiene un buen R2 entre ambas velocidades (Fig. 6). De esta forma, se produce un descenso en la velocidad de 0,53% por cada punto porcentual de contenido de humedad que aumente, para valores comprendidos entre el rango estudiado.


De la misma manera y para el rango de humedad anterior, en el caso de la velocidad de propagación de onda sónica y la velocidad de vibración se alcanzan coeficientes de determinación de 0,71 y 0,84 respectivamente. Esto hace que el descenso en la velocidad sea de un 0,54% y un 0,71% respectivamente, por cada punto porcentual de contenido de humedad que aumente.

Al comparar el MOE dinámico obtenido a través de los END (Eq. 2) con el MOE estático determinado mediante ensayo mecánico a flexión, se obtienen R2 relativamente altos (Fig. 7). Esto hace indicar que la estimación del módulo de elasticidad de la madera a través de los equipos END es una buena alternativa.

## Conclusiones

Los electrodos de puntas aisladas miden el contenido de humedad a la profundidad exacta que indica la norma por lo que, teóricamente, la medición sería más exacta que la del resto. No obstante, con los otros tipos de electrodos, cuya profundidad de medida no es tan clara, los valores de humedad son mayores, hecho que no parece adecuarse a la teoría. Debido a la fuerte relación entre contenido de humedad y velocidad, existe una constante que hace que la velocidad de propagación de ondas ultrasónicas disminuya un 0,53% por cada 1% de contenido de humedad que aumente la madera. En la velocidad de onda sónica y en la velocidad de vibración el descenso es de 0,54% y 0,71% respectivamente. La relación lineal que existe entre el MOE estático y el MOE dinámico estimado a través de END es fuerte, con un R2 de 0,71 para onda ultrasónica, 0,67 para onda sónica y 0,81 para el análisis de vibraciones.

## Agradecimientos

El presente Proyecto Fin de Carrera ha sido realizado gracias a las facilidades prestadas por el Laboratorio de Madera del Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias (INIA) 

# CATÁLOGO DE SOLUCIONES PRÁCTICAS DE PASARELAS PEATONALES EN EL ÁMBITO FORESTAL

## PROYECTO DE PASARELA PEATONAL EN EL TERMINO MUNICIPAL DE EL ESPINAR

Autor: Daniel Benito Arribas  
 Director: Miguel Esteban Herrero

La presencia de pequeños ríos en nuestro entorno natural es un hecho tan frecuente y común que es indispensable la construcción de puentes, pasarelas y pequeñas obras de paso que faciliten el acceso a los diferentes márgenes del río.

El proyecto titulado “Catálogo de soluciones prácticas de pasarelas peatonales en el ámbito forestal. Proyecto de pasarela peatonal en el término municipal de El Espinar”, pretende elaborar una guía práctica de pasarelas versátiles de ámbito forestal, que permitan una aplicación sencilla, eficaz, rápida y económica de los recursos de la zona, promoviendo además la economía rural.

Como aplicación se presenta una pasarela de 7 metros en el término municipal de El Espinar, en Segovia, situada en una zona recreativa en restauración denominada “El Puente del Ingeniero”.

La estructura principal de las pasarelas está formada por vigas de madera en rollo descortezadas de *Pinus sylvestris* L. de 260 mm de diámetro mínimo sin corteza. Este material se encuentra disponible con facilidad en los aserraderos locales de las áreas forestales. El número de vigas que soportan cada pasarela depende de la longitud, así, la pasarela de 5 metros será soportada por 2 vigas, la pasarela de 6 metros, por 3 vigas iguales y equidistantes, la pasarela de 7 metros por 4 vigas agrupadas 2 a 2 y con un vano central de 26 cm y, por último, la pasarela de 8 metros está formada por 5 vigas de igual tamaño, en este modelo los rollizos tendrán un diámetro mínimo de 28 cm, sin separación alguna entre ellos. Todas las pasarelas poseen una anchura útil de 1,20 metros, una altura total de 1,31 metros, y el material utilizado en todas ellas es madera aserrada y rollizo torneado (clase resistente C18) y rollizo descortezado (clase resistente

C22) de pino silvestre.

El entablado que forma el suelo de cada pasarela se compone de tablas de madera aserrada de con dimensiones 140x45x1300 mm, que se disponen paralelamente con separación de 10 mm entre ellas para soportar los cambios dimensionales producidos por la humedad y para desalojar el agua de su superficie con mayor facilidad

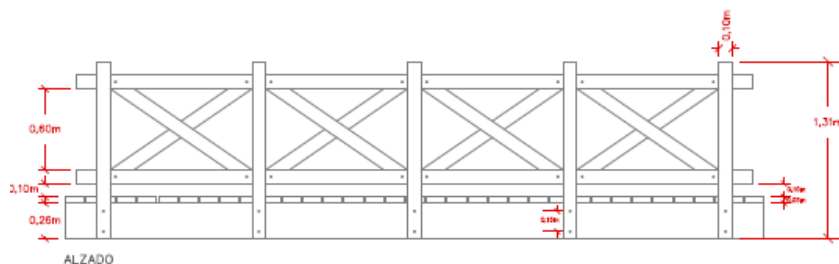
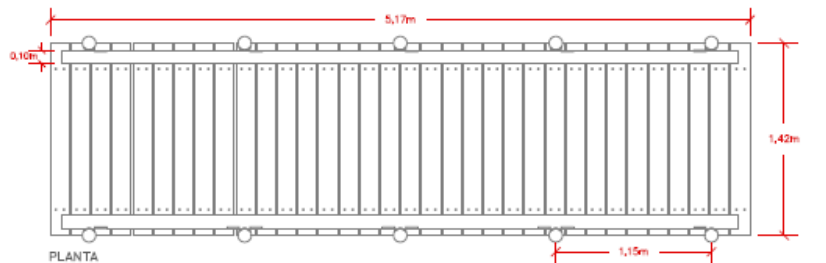
La cimentación sobre la cual descansan las pasarelas está formada por zapatas de hormigón en masa con armadura mínima de reparto, las dimensiones de las zapatas serán 2,4 x

1,2 x 0,6 m, el hormigón será de clase HM-25 y las armaduras serán de clase B500S con diámetro de 20 mm.

A lo largo de las pasarelas diseñadas se dispone una barandilla formada por un pasamanos colocado a 1,10 m de la base de pisada, de rollizo torneado de 120 mm de diámetro. El pasamanos reposa sobre barros unidos por medio de una estructura en forma de cruces de San Andrés.

A continuación se describen de forma breve las características principales de los modelos elaborados:

### MODELOS DE PASARELAS:

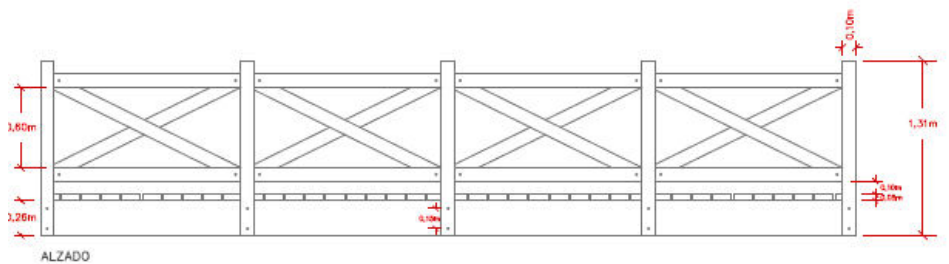
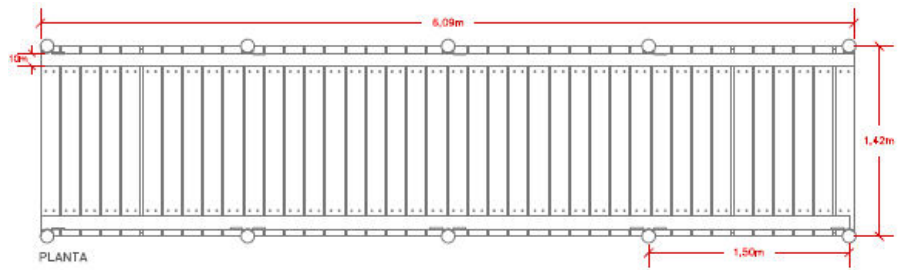


#### 1. Pasarela de 5 metros

- Vigas: 2 de 260 mm de diámetro.
- Entablado: 34 tablas de 140 mm de anchura y 45 mm de grosor separadas por una entrecalle de desague de 1 cm.
- Pasamanos: 10 postes de 120 cm de diámetro separados 1,15 m
- Precio pasarela: 5.640,00 € (fabricación, suministro y montaje, sin cimentaciones)

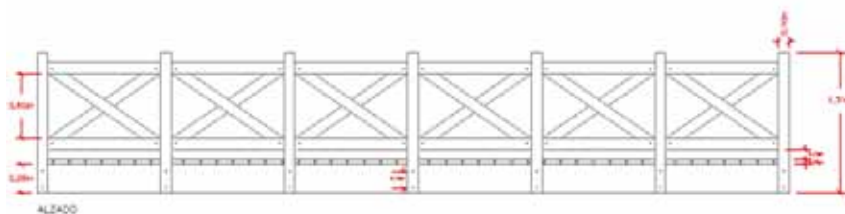
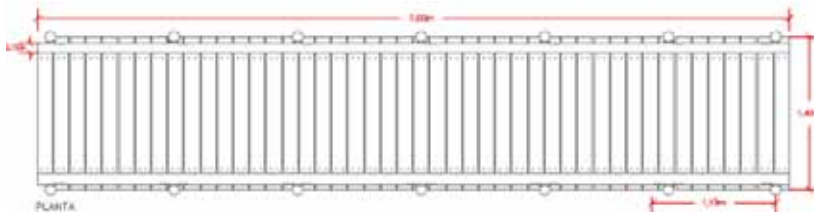


# estructuras



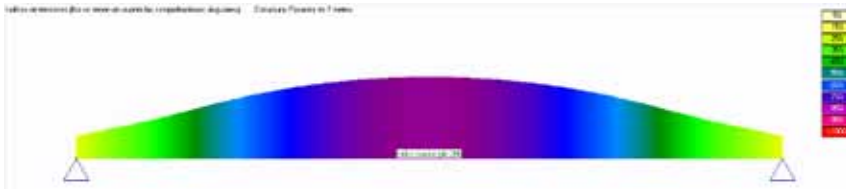
## Pasarela de 6 metros

- Vigas: 3 de 260 mm de diámetro.
- Tablas: 40 tablas de 140 mm de anchura y 45 mm de grosor.
- Pasamanos: 12 postes de 120 mm de diámetro separados 1,15 m
- Precio pasarela: 6.150,00 € (fabricación, suministro y montaje, sin cimentaciones).

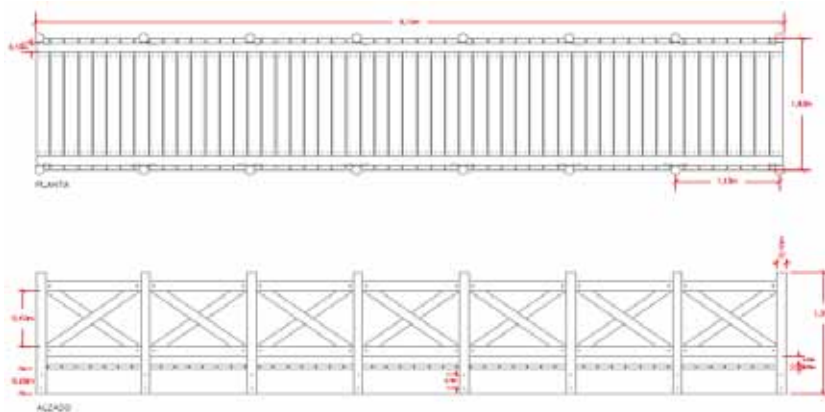


## Pasarela de 7 metros

- Vigas: 4 de 260 mm de diámetro.
- Tablas: 47 tablas de 140 mm de anchura y 45 mm de grosor.
- Pasamanos: 14 postes de 120 mm de diámetro separados 1,15 m.
- Precio pasarela: 6.840,00 € (fabricación, suministro y montaje, sin cimentaciones).



Agotamiento de la sección de la viga de 7 metros



### Pasarela de 8 metros

- Vigas: 5 de 280 mm de diámetro.
- Tablas: 54 tablas de 140 mm de anchura y 45 mm de grosor.
- Pasamanos: 16 postes de 120 mm de diámetro separados 1,15 m.
- Precio pasarela: 8.120,00 € (fabricación, suministro y montaje, sin cimentaciones).



Como ejemplo real de aplicación del catálogo se muestra la construcción de una pasarela peatonal sobre el río Gudillos, en la antigua zona recreativa situada bajo el paso elevado de la autopista de El Espinar. El emplazamiento de esta pasarela es el mismo que en el pasado ocupó el denominado "Puente del Ingeniero". Se ha utilizado el modelo de pasarela de 7 metros de longitud y cuatro vigas

Pasarela instalada en El Espinar de 7 metros