

PROTOTIPO DE LÁMINA RETICULAR POSTCONFORMADA CON MADERA DE *ECUALYPTUS GLOBULUS*: CONSTRUCCIÓN Y ENSAYO DE LABORATORIO

ELASTIC GRIDSHELL PROTOTYPE MADE OF *EUCALYPTUS GLOBULUS*: CONSTRUCTION AND LABORATORY TEST

Antonio José Lara-Bocanegra ^(1,3), Almudena Majano-Majano ⁽²⁾, Juan Ortiz ⁽³⁾,
Manuel Guaita ⁽³⁾

(1) Arch., Universidad Politécnica de Madrid, ETS Arquitectura, Departamento de Estructuras y Física de la Edificación, Madrid, Spain.

(2) Dr. Arch., Universidad Politécnica de Madrid, ETS Arquitectura, Departamento de Estructuras y Física de la Edificación, Madrid, Spain.

(3) Dr. Prof., Universidad de Santiago de Compostela, Escuela Politécnica Superior, Lugo, Spain.

Dirección de contacto: antoniolara@us.es

Código de identificación: T6-22

Resumen

La necesaria revisión de los procesos constructivos en busca de soluciones más sostenibles conduce al empleo de sistemas estructurales de alta eficiencia y materiales respetuosos con el medio ambiente. En este sentido, las estructuras laminares reticulares de madera post-conformadas (*elastic gridshells*) suponen una solución de gran interés para cubiertas ligeras de medias y grandes luces, adecuadas tanto en soluciones de geometrías libres como modulares. La técnica de la *gridshell* permite construir láminas de madera de grandes dimensiones doblemente curvadas, a partir de elementos estándar. Esta técnica se fundamenta en el curvado en obra de retículas planas formadas por piezas idénticas de madera aserrada de buena calidad, gran longitud y pequeña sección, constituyendo un sistema con alta capacidad de industrialización y estandarización. En este trabajo se presenta un prototipo de laboratorio de *gridshell* a escala real construido con madera de *Eucalyptus globulus* en el que se explora el potencial de la especie y de un novedoso sistema constructivo con tres direcciones de láminas flectadas. Así mismo, los resultados de dos pruebas de carga monitorizadas utilizando técnicas de medición por fotogrametría son también mostrados.

Palabras clave: lámina reticular postconformada; *Eucalyptus globulus*; fotogrametría

Abstract

The necessary revision of the construction processes in search of more sustainable solutions leads to the use of high efficiency structural systems and environmen-friendly materials. In this sense, timber gridshells represent a solution of great interest for lightweight roofs with medium and long spans, suitable for both free and modular geometry solutions. The gridshell technique allows the construction of large double-curved timber shells using standard elements. It is based on curving on site initially flat grids formed by identical pieces of good quality sawn wood, great length and small section, constituting a system with high capacity of industrialization and standardization. This paper presents a real-scale gridshell prototype built with Eucalyptus globulus. The species potential and a novel constructive system with three bending directions of laths are explored. Likewise, the results of two loading tests monitored using photogrammetric measurements are also shown.

Keywords: gridshell; *Eucalyptus globulus*; photogrammetry

1. INTRODUCCIÓN

La construcción sostenible y respetuosa con el medio ambiente está dejando de ser un valor añadido para convertirse en una exigencia de nuestra sociedad. Este nuevo requisito está propiciando que la construcción con madera esté experimentando en los últimos años un gran impulso en todo el mundo debido a las ventajas medioambientales que presenta respecto a otros materiales. Simultáneamente, el desarrollo de los adhesivos y técnicas de laminación y la evolución de las herramientas de diseño paramétrico, análisis estructural y tecnología CNC están posibilitando realizaciones de gran complejidad formal y estructural como son las láminas reticulares para la cubierta de *The Forum Exeter University* [1], y del *Centre Pompidou Metz* [2]. Estas estructuras laminares reticulares presentan un inconveniente: debido a su geometría irregular con doble curvatura se hace necesaria la fabricación de un gran número de elementos diferentes, ya sean nudos de acero cuando se trata de mallas de barras rectas [1], o segmentos de láminas de madera laminada curvada alabeada [2], con la consiguiente repercusión en los costos de ejecución.

El arquitecto y profesor Frei Otto [3] ideó una técnica que permitía construir estructuras laminares de madera de grandes luces doblemente curvadas pero empleando láminas y nudos idénticos, consiguiendo así un elevado grado de estandarización. Con este procedimiento realizó varias construcciones como el *German Building Exhibition* en Essen [4], el *German Federal Pavilion* para la Expo'67 en Montreal [5] y el *Mannheim Multihalle* [5], de 15, 20 y 60 metros de luz máxima respectivamente. Estas estructuras, denominadas originalmente *timber gridshells*, poseen tres características diferenciadoras [6]: utilizan láminas rectas, continuas y superpuestas formando una cuadrícula; la geometría final de la superficie, con simple o doble curvatura, se consigue por flexión elástica de las láminas; y durante el proceso de elevación de la estructura el giro de los nudos está liberado alrededor de su vector normal a la superficie. Debido a la deformación elástica impuesta a este tipo de estructuras para alcanzar la forma definitiva, posteriormente han sido denominadas *elastic gridshells* [7] o *strained gridshells* [8], permitiendo de este modo ser diferenciadas de otras estructuras laminares reticulares cuyas barras o láminas no se han curvado elásticamente para conseguir la geometría final como ocurre en *The Forum Exeter University* o en *Centre Pompidou Metz*.

A pesar del enorme interés de las *elastic gridshells*, solo algunas obras importantes se han construido desde el *Mannheim Multihalle*, como son *The Weald and Downland Open Air Museum gridshell* [9] (fig. 1 izda) y *The Savill Garden gridshell* [10] (fig. 1 dcha).



Figura 1: *The Weald and Downland Open Air Museum gridshell* (izquierda) y *The Savill Garden gridshell* (derecha) (imágenes de autoría propia).

Esto puede deberse a diversos motivos, como son la inexistencia en el mercado de productos homologados de madera adecuados y fácilmente disponibles, la complejidad de los métodos de determinación de la geometría final y de los procesos de elevación durante la construcción cuando

se trata de grandes luces, la falta de investigación sobre modelos numéricos contrastados experimentalmente y la escasez de estudios relativos a la relajación de tensiones en piezas de madera curvadas.

Otra técnica para realizar láminas de madera a partir de láminas planas de madera curvadas en obra ha sido desarrollada por J. Natterer [11]. En este caso las láminas no forman una cuadrícula plana antes de su elevación sino que se colocan individualmente en su posición definitiva coincidiendo con las curvas geodésicas de la superficie. Este tipo de estructuras ha sido denominado *ribbed shells* [12] debido al aspecto nervado que presentan. La aparente dificultad de construcción por láminas individuales es compensada por dos aspectos: la geometría final de cada lámina es fácilmente determinable al tratarse de curvas geodésicas; y las láminas solo poseen flexión en el plano normal a la superficie pero no en el plano tangente como ocurre en las *strained gridshells*.

En este trabajo se presentan las investigaciones iniciales llevados a cabo en la Plataforma da Enxeniería da Madeira Estructural (PEMADE) de la Universidad de Santiago de Compostela (España) sobre la construcción de un primer prototipo de laboratorio de *gridshell* a escala real realizado con madera de *Eucalyptus globulus* en el que se explora el potencial de la especie y de un novedoso sistema constructivo con tres direcciones de láminas flectadas. Así mismo se presentan los resultados de dos pruebas de carga monitorizadas utilizando técnicas de medición por fotogrametría.

2. EL POTENCIAL DEL EUCALYPTUS GLOBULUS

Diferentes criterios resultaron determinantes a la hora de elegir la especie de madera más adecuada en la construcción de las *gridshells* más relevantes realizadas hasta la fecha. En *Mannheim Multihalle* se optó por utilizar Tsuga del Pacífico, también conocida como Western hemlock (*Tsuga heterophylla*) debido a la disponibilidad de piezas de gran longitud y con fibras normalmente rectas permitiendo minimizar de este modo el número de empalmes entre láminas [5]. En *The Weald and Downland Open Air Museum gridshell* se eligió roble verde por su gran durabilidad natural, por ser una especie tradicionalmente utilizada en construcción, lo que creaba una resonancia especial entre el edificio y el contexto del museo, y por su mayor flexibilidad para el curvado y menor coste que el roble seco [9]. En *The Savill Garden gridshell* se empleó alerce debido a su gran calidad y disponibilidad en los recursos forestales de la zona [10]. En todas ellas se realizó una selección y clasificación visual buscando conseguir una elevada calidad de las láminas evitando defectos como nudos que pudiesen disminuir la resistencia a flexión de las mismas.

La madera de *Eucalyptus globulus* presenta una magnífica alternativa como producto base para la realización de *gridshells* debido a varios motivos:

- Posee un elevado módulo de elasticidad medio paralelo a la fibra, de 18.4 GPa según UNE 56546:2013 [14]. Puesto que uno de los parámetros de dimensionado principales en este tipo de estructuras es el pandeo local de la lámina [5], esta propiedad mecánica resulta de gran interés ya que la carga última de pandeo es directamente proporcional al módulo de elasticidad longitudinal. Es importante hacer notar que aunque se trata de un estado límite último, se utiliza el valor medio del módulo de elasticidad debido a que una *gridshell* está formada por un elevado número de láminas de madera.
- Además del elevado módulo de elasticidad, *Eucalyptus globulus* es una de las tres especies con crecimiento en Europa, junto al haya (*Fagus sylvatica*) y el fresno (*Fraxinus excelsior*), de mayor clase resistente: D40 según EN 1912: 2012 [13]. Por tanto su resistencia característica a flexión es también elevada (47 MPa según UNE 56546:2013 [14]) manteniendo así un ratio bajo de módulo de elasticidad/resistencia que permite conseguir, a igualdad de espesor de lámina, mayores curvaturas que con otras especies.

- Tiene una densidad media muy superior al de otras especies: 797 kg/m² según UNE 56546:2013 [14], lo cual implica un mayor módulo de deslizamiento de los sistemas de conexión, cuantificado en el Eurocódigo 5 [15] a través del factor k_{ser} . En las *gridshells* en las que la rigidez de la estructura conseguida mediante el empleo de dos capas cruzadas de láminas resulta insuficiente, se hace necesario disponer de capas adicionales de láminas hasta alcanzar la rigidez adecuada. La conexión entre las diferentes capas se realiza siempre de modo mecánico por lo que la rigidez final de la estructura depende en gran medida del módulo de deslizamiento de estas conexiones [5,12].
- Es una especie con alta durabilidad natural: clase 2 frente a hongos según prEN 350-2:2014 [16], comparable al roble (*Quercus robur*) y al castaño (*Castanea sativa*), minimizando el uso de protectores químicos dañinos para el medio ambiente y permitiendo su aplicación en situaciones de exterior.
- Prácticamente no tiene nudos, lo cual representa siempre una enorme ventaja tanto desde un punto de vista mecánico como estético.
- Puede comercializarse con fines estructurales en toda Europa ya que está recogida en la norma europea EN-1912:2012 [13].

Un aspecto que resulta de gran importancia en la puesta en obra de las *gridshells* es realizar el empalme por testa de las piezas mediante unión dentada encolada (*finger-joint*) con el objetivo de conseguir láminas de la longitud necesaria.

Las normas europeas para madera empalmada EN 15497:2014 [17] y madera laminada EN 14080:2013 [18] recogen los requerimientos y recomendaciones de producción necesarias para garantizar las prestaciones mecánicas de los *finger-joints* realizados en madera de coníferas (con densidades inferiores a 500 kg/m³). Sin embargo no existe aún una norma equivalente de aplicación a especies frondosas como es el caso del *Eucalyptus globulus*, lo que obliga a realizar amplias campañas experimentales. Con el objetivo de desarrollar una unión por *finger-joint* de altas prestaciones con esta especie, los autores del presente trabajo han analizado la influencia de diversos parámetros geométricos y de encolado en la resistencia a flexión del *finger-joint* demostrando que con ajustes precisos de dichos parámetros pueden alcanzarse valores característicos superiores a 70 Mpa [19].

3. CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

El proceso de curvado de la retícula supone una de las principales cuestiones a resolver en la puesta en obra de este tipo de estructuras. Una clasificación de los procedimientos empleados hasta el momento ha sido realizada por Quinn y Gengnagel (2014) [7], donde puede verse que el proceso de curvado de la retícula siempre se realiza con ésta totalmente desplegada, bien elevando la zona central hacia arriba a través de grúas o plataformas elevadoras (por ej. *German Building Exhibition* en Essen y *Mannheim Multihalle*); o bien construyendo la retícula sobre una plataforma de andamios elevada y produciendo el curvado de la misma por el descenso de sus extremos (por ej. *The Weald and Downland Open Air Museum gridshell* y *The Savill Garden gridshell*). Sin embargo ninguno de estos procedimientos aprovecha la condición de “desplegable” que tiene la retícula durante el proceso de curvado al mantener libre el giro en los nodos alrededor del vector normal a la lámina. Con el objetivo de explorar esta característica para su aplicación en láminas alargadas apoyadas solo sobre sus lados cortos, se ha construido un primer prototipo de laboratorio.

Para la fabricación de las láminas se utilizaron tablas de tres metros de longitud de *Eucalyptus globulus* de procedencia gallega. Con el fin de disponer de láminas de gran calidad, los pequeños nudos que presentaban las tablas fueron eliminados. Posteriormente se realizaron los empalmes por *finger-joints* necesarios para alcanzar una longitud de 7.15 m. Por último se llevó a cabo un cepillado de las láminas a una sección definitiva de 60x25 mm². Se utilizaron un total de 18 láminas

para la fabricación de una retícula de 1.64 m de intereje. Una vez fabricada la retícula, ésta se cerró para posteriormente ser desplegada sobre dos tímpanos semicirculares de 2.9 m de diámetro situados en ambos extremos y realizados con microlaminado de *Picea abies* (fig. 2).



Figura 2: Proceso constructivo del prototipo de *gridshell*

Una vez alcanzada la forma final y con el objetivo de dotar a la estructura de rigidez a cortante en su plano, se dispuso de una tercera familia de láminas flectadas a modo de pequeños arcos transversales. Debido al pequeño radio de curvatura de la superficie en esta dirección, las láminas se realizaron mediante el acoplamiento mecánico de tres piezas de $60 \times 8.3 \text{ mm}^2$ dando como resultado una sección final de $60 \times 25 \text{ mm}^2$. Para dicho acoplamiento se utilizaron tirafondos pequeños de $4 \times 25 \text{ mm}$, de modo similar al propuesto por J. Natterer [11]. En los nodos con tres direcciones de láminas se emplearon tirafondos de $6 \times 70 \text{ mm}$, y tirafondos de $8 \times 120 \text{ mm}$ para fijar la *gridshell* a los tímpanos. Con esta configuración (en adelante configuración A) se realizó una primera prueba de carga la cual se describe en el siguiente apartado.

Con el objetivo de aumentar la rigidez de la estructura se dispusieron dos capas de láminas adicionales siguiendo la dirección de las capas de la retícula original. Por motivos estéticos se optó por evitar la utilización de tacos de bloqueo de rasante entre las diferentes capas. Esto obligó a sustituir los tirafondos dispuestos inicialmente en los nodos de la retícula por otros de mayor longitud y diámetro. En esta configuración (en adelante configuración B) se realizó la segunda prueba de carga.

4. INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL

4.1 Ensayos preliminares

Con el objetivo de comprobar la capacidad de curvado del *Eucalyptus globulus*, se ensayaron a compresión con control por recorrido diversas láminas de 3 m de longitud articuladas en sus extremos provocando la flexión lateral controlada de las mismas (fig. 3). Los ensayos pusieron de manifiesto la gran capacidad de curvado y la inexistencia de fallos frágiles repentinos antes de la

rotura [9]. Además todas las tablas utilizadas en la construcción del prototipo fueron ensayadas en flexión de canto a cuatro puntos en régimen elástico de acuerdo a la norma EN 408:2011 [20]. El valor medio obtenido del módulo de elasticidad longitudinal fue de 17544 MPa.

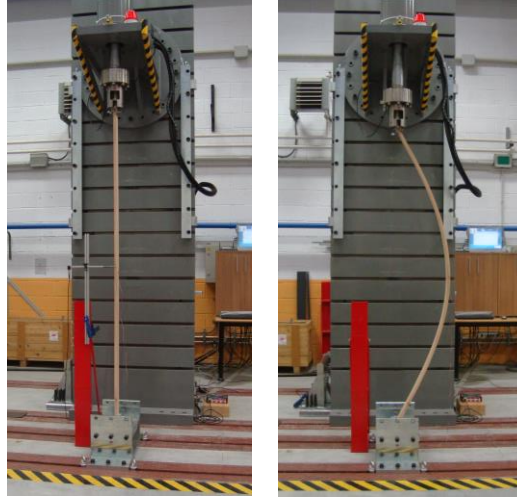


Figura 3: Ensayo a compresión de las láminas.

4.2 Pruebas de carga

Dos pruebas de carga A y B se llevaron a cabo en la estructura según las configuraciones anteriormente descritas. En ambas pruebas se cargaron los cinco nodos centrales del arco correspondiente al plano de simetría transversal de la lámina con un total de 1.04 kN/nodo (Fig. 4).

Se emplearon recipientes graduados de plástico de 50 litros de capacidad colgados por parejas en los nodos correspondientes. Éstos se llenaron con agua lentamente y de modo simétrico para evitar movimientos bruscos.



Figura 4: Prueba de carga B.

La posición inicial y deformada de todos los nodos y puntos medios de las barras se evaluó utilizando técnicas de fotogrametría mediante el empleo de más de 170 dianas pudiendo capturar con una buena precisión el comportamiento global de la estructura (fig. 5). El error medio calculado en estas mediciones fue del orden de $\pm 1\text{mm}$. La monitorización de la estructura se completó y contrastó haciendo uso de diferentes extensómetros.

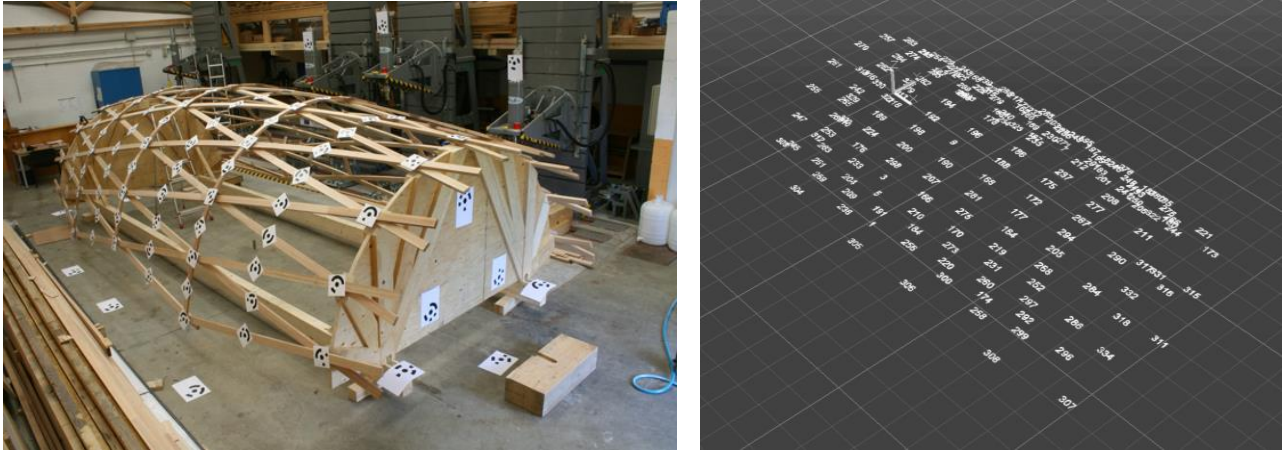


Figura 5: Proceso de evaluación de la deformación mediante fotogrametría.

La flecha en el nodo central para la carga máxima en cada una de las pruebas de carga resultó en 13.8 mm y 5.6 mm respectivamente. En la figura 6 se representan las curvas carga-desplazamiento correspondientes a dicho nodo para ambos casos de carga.

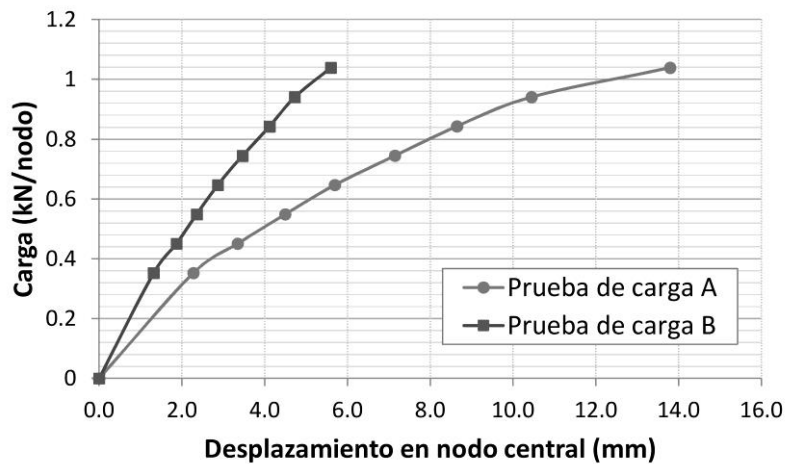


Figura 6: Curvas carga-desplazamiento resultantes de las pruebas de carga A y B.

Los resultados muestran que, para la carga aplicada, la *gridshell* con tres capas exhibe una respuesta en régimen plástico. Sin embargo, con la incorporación de dos capas adicionales y para el mismo nivel de carga, la rigidez de la estructura aumenta significativamente y la respuesta es fundamentalmente elástica.

4. CONCLUSIONES

El potencial del *Eucalyptus globulus* para su aplicación en estructuras tipo *gridshell* es analizado en este trabajo y verificado mediante ensayos preliminares.

Un nuevo sistema constructivo basado en la capacidad “desplegable” de la retícula durante el proceso de curvado es puesto en práctica satisfactoriamente mediante la construcción de un prototipo utilizando un sistema de tres direcciones de láminas flectadas.

Dos pruebas de carga idénticas se han realizado para comparar la rigidez de la estructura con tres y cinco capas. Los resultados revelan que la rigidez elástica aumenta de modo importante en el caso de cinco capas.

Para la medición de las deformaciones se han utilizado técnicas de fotogrametría empleando dianas en todos los nodos y puntos medios de las barras. Los resultados, aunque arrojan errores no despreciables, presentan la gran ventaja de ofrecer información completa sobre el comportamiento de la estructura.

AGRADECIMIENTOS

Los trabajos aquí presentados han sido desarrollados en el marco del proyecto de investigación BIA2015-64491-P *Análisis de la relajación de tensiones en láminas curvadas y de nuevas soluciones de unión para estructuras de madera tipo gridshell realizadas con Eucalyptus globulus*, cofinanciado por el Programa Estatal de fomento de la Investigación Científica y Técnica de Excelencia, Subprograma Estatal de generación del conocimiento (convocatoria 2015), del Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España y fondos FEDER. Nos gustaría agradecer la colaboración de Jorge Crespo Outes, en el montaje de la estructura y de María José Rodríguez González por su colaboración en las tareas relacionadas con la fotogrametría.

REFERENCIAS

- Harris, R., 'Engineered timber structures in the UK', *En: 3^{ème} Forum Bois Construction*, France (2013).
- Lewis, B., 'Centre Pompidou-Metz: Engineering the roof', *The Structural Engineer*. **89**(18) (2011) 20-26.
- Otto, F., Henniecke, J. and Matsushita, K., 'IL10 Gitterschalen', *Institut für leichte Flächentragwerke (IL)* (1974).
- Roland, C., 'The work of Frei Otto'. Longman. (1970).
- Happold, E. and Liddell, W.I., 'Timber lattice roof for the Mannheim Bundesgartenschau'. *The Structural Engineer*, **53**(3) (1975) 99-135.
- Gengnagel, C. and Quinn, G., 'Large deformations. On the design of strained grid shells' (2016)177-197.
- Quinn, G. and Gengnagel, C., 'A review of elastic grid shells, their erection methods and the potential use of pneumatic formwork'. *Mob Rapidly Assem Struct IV* **136** (2014).
- Quinn, G. and Gengnagel, C., 'Simulation Methods for the Erection of Strained Grid Shells Via Pneumatic Falsework'. *En: Modelling Behaviour*. Springer International Publishing, (2015) 257-268.
- Harris, R., Kelly, O. and Dickson M., 'Downland gridshell-an innovation in timber design', *Proceedings of Ice. Civil Engineering*. **156** (2003) 26-33.
- Harris, R. and Roynon, J. 'The Savill Garden gridshell design and construction', *Proceedings of the 10th Conference on Timber Engineering*, Miyazaki, Japan. (2008).
- Natterer, J., Burger, N., Müller, A. and Natterer, J.. 'Holzrippendächer in Brettstapelbauweise. Raumerlebnis durch filigrane Tragwerke'. *Bautechnik* **77** (11) (2000) 783-792.
- Gliniorz, K-U., Mosalam, K.M. and Natterer, J., 'Modeling of layered timber beams and ribbed shell frameworks'. *Composites: Part B*, **33** (2002) 367-381.
- EN 1912:2012 'Structural Timber - Strength Classes - Assignment of Visual Grades and Species'. (2012)
- UNE 56546:2013. 'Visual grading for structural sawn timber. Hardwood timber'. (2013).
- EN 1995-1-1 'Eurocode 5: Design of timber structures. Part 1-1: General. Common rules and rules for buildings'. (2016).
- prEN 350-2:2014. 'Durability of Wood and Wood-based Products – Natural Durability of Solid Wood: Guide to natural durability and treatability of selected wood species of importance in Europe'. (2014).

EN 15497:2014. 'Structural finger jointed solid timber - Performance requirements and minimum production requirements'. (2014)

EN 14080:2013. 'Timber structures - Glued laminated timber and glued solid timber – Requirements'. (2013)

Lara-Bocanegra, A.J., Majano-Majano, A., Crespo, J. and Guaita, M., 'Finger-joint performance in engineered laminated products made of Eucalyptus globulus'. En *Proceedings of the World Conference on Timber Engineering*, Vienna, Austria (2016).

EN 408:2011. 'Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties'. (2011).