

Estado actual de la investigación sobre madera estructural en España

Current state of research on structural timber in Spain

Miguel Esteban Herrero*, Ramón Argüelles Álvarez*, Francisco Arriaga Martitegui**,
Guillermo Íñiguez González***, Ignacio Bobadilla Maldonado*

RESUMEN

Este artículo pretende dibujar un panorama sobre el estado actual de la investigación en torno a la madera estructural desarrollada actualmente en España. Se ha realizado una amplia recopilación de información entre personas e instituciones. La información recibida ha sido tan extensa que ha sido necesaria una difícil labor de síntesis para ofrecer una visión general y objetiva.

En poco tiempo ha sido implantado en España un nuevo marco legislativo y normativo definido por la Ley de Ordenación de la Edificación, el Código Técnico de la Edificación y la Directiva Europea de Productos de la Construcción. En este marco surgen algunos retos para el sector de la construcción a los que la madera no resulta ajena. La madera estructural se enmarca por primera vez en una normativa de obligado cumplimiento, lo que supone no sólo un reto sino la puesta en valor de todo su potencial como material estructural.

En este marco se han disparado las necesidades de investigación, desarrollo e innovación, y así lo demuestran las muchas líneas de investigación abiertas en nuestro país, con una clara vocación de responder a las necesidades surgidas en el sector y de satisfacer los requisitos de seguridad planteados en la normativa. En este artículo, con la información recopilada se resumen las líneas de investigación sobre madera estructural que se están desarrollando actualmente en España, así como su presencia en medios de difusión nacional o internacional o sus aplicaciones directas en la industria.

SUMMARY

This article intends to show the current state of the research about structural timber in Spain. An ample compilation of information from people and institutions has been carried out. Information received has been so extensive that a hard work of synthesis has been necessary in order to offer a general and objective vision of the subject.

In a few years a new legislative and normative frame has been implanted in Spain, defined by the Law of Arrangement of the Construction, the Construction Technical Code and the European Construction Products Directive. In this frame some challenges for the sector arise from the construction and the timber. It is the first time that structural timber is framed within a norm of forced fulfillment, which it supposes not only a challenge but the putting in value of all its potential like structural material.

In this frame research necessities have been increased, as well as development and innovation, and it is demonstrated by several research initiatives started in our country, with a clear vocation to respond to the necessities arisen in the sector and to satisfy the raised requirements of security in the norm. In this work, using the compiled information, the research lines on structural timber at the moment in Spain are summarized, as well as their presence in means of national or international diffusion or their direct applications in the industry.

850-3

Palabras clave: madera, estructuras, investigación, construcción.

Keywords: timber, structures, research, building.

Universidad Politécnica de Madrid (UPM)

* Dr. Ingeniero de Montes

**Dr. Arquitecto

***Ingeniero de Montes

Persona de contacto/Corresponding author: miguel.esteban@upm.es ([Miguel Esteban Herrero](mailto:miguel.esteban@upm.es))

Fecha de recepción: 17-II-07

Fecha de aceptación: 16-V-07

1. INTRODUCCIÓN

La situación actual en el sector de la edificación resulta crítica desde la entrada en vigor de la Ley de Ordenación de la Edificación (LOE) (1) y el Código Técnico de la Edificación (CTE) (2). A esta situación no resulta ajena la madera en la construcción, resultando un momento especialmente interesante en la medida en que, por primera vez, en España disponemos de un marco normativo que sitúa a la madera estructural en igualdad de condiciones frente a otros materiales. Por otro lado, la elevada demanda de madera estructural en el mercado está haciendo muy necesaria y urgente la actualización del sector para asumir y dar respuesta a los retos planteados por el CTE.

Fruto de estas circunstancias, no sólo son las empresas y los profesionales los que han emprendido una importante carrera para ponerse al día. Instituciones y personas dedicadas a la docencia y a la investigación en España también han incrementado en los últimos años su dedicación, orientada a satisfacer las demandas tecnológicas de este sector.

Son muchas y muy variadas las vertientes en las que la actividad investigadora se ha lanzado a ofrecer respuestas, tanto públicas como privadas, a nivel personal o institucional, en centros de investigación o en universidades.

La idea de recopilar esta información, o al menos intentarlo, surge de la invitación que la revista Informes de la Construcción realiza a la Unidad Docente de Cálculo de Estructuras (en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Universidad Politécnica de Madrid) para escribir un artículo que explique e informe sobre su actividad investigadora y docente realizada en torno a la madera estructural durante más de 20 años de dedicación.

El volumen de actividad que en la actualidad se está desarrollando en tantos y tan diferentes ámbitos sobrepasa con mucho la capacidad limitada de una Unidad Docente, por lo que el enfoque adecuado para aceptar la invitación y realizar este artículo, necesariamente, tendría que abarcar el más amplio espectro posible de participación.

Por ello se procede a extender la invitación a personas e instituciones con el objeto de que informen de su actividad y este artículo sea reflejo, lo más fiel posible, de la abundante actividad investigadora sobre la madera para uso estructural que se está desarrollando actualmente en España.

En total son remitidas más de 40 invitaciones a investigadores que desarrollan su actividad en 21 centros diferentes, algunos de ellos muy relacionados con la madera aunque en su vertiente no estructural. La respuesta recibida ha sido valorada muy positivamente, la práctica totalidad de los centros que orientan su trabajo hacia la madera estructural han ofrecido alguna respuesta y a todos ellos tenemos que agradecer su participación.

Hasta tal punto ha sido buena y extensa la respuesta que ha sobrepasado con mucho la expectativa de este artículo y, como consecuencia, una difícil labor de síntesis ha sido necesaria. De nuevo se reitera a todos nuestro agradecimiento por su participación, pero es obligado advertir que la transcripción de tanta información recibida en ocasiones podrá parecer injustamente sintetizada. La intención ha sido en todo momento dibujar un panorama de la actividad a nivel nacional, y esperamos que se haya conseguido porque con esta experiencia hemos constatado que se están desarrollando muchas y muy interesantes iniciativas, todas merecedoras de reconocimiento. Por otro lado, esperamos que esta información sirva de cauce para establecer relaciones y colaboraciones, por lo que al final del artículo se ofrece el listado de los participantes y alguna dirección de contacto.

En un listado independiente se recogen por temas las líneas de investigación que han sido recopiladas entre los que han aportado información para la elaboración de este artículo.

2. UN NUEVO MARCO NORMATIVO Y LEGISLATIVO PARA LA EDIFICACIÓN Y LA CONSTRUCCIÓN

La Ley de Ordenación de la Edificación, aprobada en 1999 y modificada en 2001, surge con la necesaria pretensión de regular el sector de la Edificación en todos sus aspectos. Muchas son las consecuencias de la entrada en vigor de la LOE, algunas de ellas positivas y otras, cuando menos, controvertidas, pero todas ellas orientadas a tratar de resolver algunas necesidades relacionadas con la calidad de la edificación, en el más amplio sentido del concepto de calidad.

Una de las consecuencias más inmediatas se traduce en la implantación de una serie de garantías que deben ser cubiertas con carácter obligatorio por los diferentes agentes que intervienen en el proceso de la edificación. En este capítulo se sitúan los seguros anual, trienal y decenal.

Otra de las principales consecuencias de la LOE es la implantación de un Código Técnico de la Edificación (CTE) en el que se enmarquen, desde un punto de vista normativo de obligado cumplimiento, todas las condiciones y los métodos para cumplir dichas condiciones, que deben reunir los edificios. El objetivo es garantizar unas prestaciones mínimas relacionadas con los siguientes requisitos esenciales:

- seguridad en las estructuras
- seguridad contra incendio
- seguridad de utilización
- salubridad
- protección contra el ruido
- ahorro de energía

Por otro lado, la Directiva de Productos para la Construcción (3), desde 1998 viene implantando un sistema de certificación a los productos que se incorporan de manera permanente a la construcción y se encuentran relacionados con alguno de los mismos requisitos esenciales definidos en el CTE. Este sistema de certificación se está implantando progresivamente en los diferentes sectores y a los diferentes materiales, siendo la finalidad última su implantación obligatoria en todos los productos.

Los primeros precedentes en España sobre las aplicaciones estructurales de la madera se deben a la labor iniciada en los años 60 por D. César Peraza Oramas, Catedrático de Tecnología de la Madera en la ETSI de Montes de Madrid, quien supo contagiar su pasión y conocimiento de la madera a otros muchos profesionales, alumnos y profesores de la Universidad. La tecnología de la madera laminada encolada era un tema incluido en los programas de las asignaturas incluso antes de que en España comenzara su fabricación industrial. Una de las consecuencias de esta etapa pionera ha sido el hecho de que la Cátedra de Estructuras de la misma Escuela imparta docencia sobre construcción con madera desde los años 80.

3. MADERA ASERRADA ESTRUCTURAL

En este nuevo marco la madera y sus productos derivados para uso estructural no sólo no resultan ajenas, sino que por primera vez son contemplados en igualdad de condiciones con otros materiales, ofreciendo en edificación las mismas garantías de calidad y seguridad estructural. Así, la integración de la madera como material estructural en una normativa de obligado cumplimiento viene a satisfacer una demanda del sector para equipararse en el mercado a otros productos.

Pero para ello, la primera necesidad consiste en implantar en los sistemas de producción y caracterización de madera y productos derivados para uso estructural unas medidas encaminadas a garantizar sus propiedades mecánicas. Los sistemas actualmente más reconocidos e implantados en Europa y en otros países de sobrada tradición en la construcción con madera, son los basados en la clasificación visual y en la asignación de clases resistentes para la madera aserrada. Para ello, desde hace años se vienen desarrollando las normas de clasificación visual a nivel nacional (en España, la UNE 56544 (4)), cuyos resultados están siendo refrendados por los Comités Europeos de Normalización para reconocer la asignación de clases resistentes mediante su integración en la norma UNE-EN 1912 (5). El sistema de clases resistentes queda definido en la norma UNE-EN 338 (6).

En este campo es merecido reconocer el ímprobo trabajo realizado por el equipo de investigadores del Laboratorio de Estructuras de Madera del CIFOR-INIA, en el que se han desarrollado y se siguen desarrollando diversos proyectos de investigación que han conducido a la caracterización de las cuatro especies de coníferas españolas más utilizadas en estructuras (pinos silvestre, laricio, pinaster y radiata). Al importantísimo volumen de trabajo realizado por este equipo y a la importancia de sus conclusiones se añade la relevancia de ser, en la actualidad, el laboratorio de referencia para la madera de uso estructural en España.

En esta línea se deben reconocer también, los esfuerzos realizados en otros centros para caracterizar otras especies. Este es el caso de la caracterización del eucalipto rojo (*Eucalyptus globulus* Labill.) que se está realizando en el CIS-Madera en Galicia y cuyos resultados se encuentran próximos a ser incluidos en la normativa, del Castaño (*Castanea* sp.) en la ETSI Montes de Madrid (UD Tecnología de la Madera) y en la Escuela Politécnica Superior de Lugo, o del Abeto (*Abies alba* Mill.) procedente del pirineo en la Universidad de Lérida.

4. TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS EN MADERA

En este campo se abre un abanico de líneas de investigación tan extenso como necesario. Para la caracterización de madera en aserradero existen normas y procedimientos cuya aplicación en estructuras existentes resulta muy limitada, por lo que se hace necesario un nuevo enfoque para tratar de estimar las propiedades mecánicas de

la madera puesta en obra. Por otro lado, la aplicación industrial de la clasificación visual puede resultar muy lenta cuando se requieren altos rendimientos, como sucede en una fábrica de madera laminada.

Con estas aplicaciones como finalidad, la mayor parte de estas líneas de investigación se basan en el estudio de técnicas no destructivas para complementar la aplicación de la clasificación visual y mejorar la predicción de las propiedades mecánicas o para detectar discontinuidades en el material.

En esta línea destacan la aplicación de técnicas basadas en medir la velocidad de propagación de ultrasonidos, la resistencia a la penetración de una varilla, la resistencia a la extracción de un tornillo o el análisis de los modos de vibración natural mediante vibraciones inducidas. El resistógrafo también resulta una técnica muy utilizada, aunque sus aplicaciones en la práctica se encuentran más relacionadas con el diagnóstico de daños que con la caracterización de las propiedades mecánicas. La termografía permite detectar con un alto grado de sensibilidad los cambios de temperatura. El georradar detecta discontinuidades internas en el material mediante campos electromagnéticos.

La mayor parte de estas y otras técnicas no destructivas basadas en diferentes fundamentos, tratan de establecer relaciones que permitan mejorar la capacidad de predicción de las propiedades físicas y mecánicas de la madera. Esta predicción resulta especialmente necesaria para aumentar la fiabilidad del cálculo estructural en los trabajos de intervención en edificios con estructura de madera. Así, las técnicas más habituales y sus parámetros de estudio se resumen en lo siguiente:

- Ultrasonidos y vibraciones → Módulo de elasticidad dinámico
- Resistógrafo, arranque de tornillo y penetrómetro → Densidad

Otras técnicas y algunas de las anteriores también pueden ser utilizadas para localizar discontinuidades ocultas en la madera, como pueden ser algunas singularidades de la propia madera (nudos, fendas, etc.), daños biológicos como pudriciones o ataques de insectos, cambios de humedad, alternancia de materiales, etc. Éste es el caso del georradar, el resistógrafo o la termografía.

Al margen de las mencionadas, existen numerosas y variadas técnicas no destructivas basadas en muy diferentes fundamentos físicos o mecánicos (infrarrojos, visión artificial, rayos X, densitometrías, entre otras) de

las que actualmente no tenemos constancia de su utilización o investigación en España. Sin embargo, en Europa y Norteamérica se encuentran muy implantadas a nivel industrial en las líneas de clasificación de madera para grandes fábricas de madera laminada u otros productos estructurales a base de madera maciza.

Son varios los centros y las personas que en este momento abordan estas líneas de trabajo con sus diferentes vertientes, partiendo de los primeros estudios realizados con ultrasonidos en el INIA o la introducción en España de las técnicas de vibraciones inducidas y el arranque de tornillos por la UD de Cálculo de Estructuras en la ETSI de Montes de Madrid. Más adelante, estas técnicas están siendo investigadas en la Escuela de Arquitectura de Sevilla y en la EUIT Forestal de la UPM, así como en la Universidad de Valladolid con los equipos de la Escuela de Arquitectura y del laboratorio de Maderas de la Escuela de Ingenierías Agrarias en Palencia, en el que se han realizado ensayos de caracterización sobre más de 2.500 vigas de madera de pino pinaster.

Cabe señalar que los resultados prometedores de estas técnicas están permitiendo su aplicación y utilización directa en numerosos trabajos de diagnóstico y peritación de estructuras existentes. Algunas de ellas están despertando el interés de industriales españoles para su implantación en fábrica.

5. UNIONES Y SISTEMAS ESTRUCTURALES

Es sabido que uno de los aspectos más relevantes del diseño y cálculo estructural en madera es el de las uniones. En las uniones se producen concentraciones de tensiones y esfuerzos que vienen a coincidir con situaciones en la que la sección de la pieza se puede encontrar rebajada, pueden existir mecanizados, pueden aparecer componentes no deseables perpendiculares a la fibra, a menudo concurren varias piezas en planos o ejes no alineados, etc. Todo ello contribuye a que el mayor esfuerzo de ingeniería estructural se concentre en el correcto diseño y en la resolución de las uniones.

Existen varios motivos por los que la tipología estructural en madera tiende hacia la construcción de estructuras isostáticas y, por tanto, a uniones articuladas. Sin embargo, también existen sistemas que permiten la ejecución de uniones rígidas.

La construcción tradicional con madera se basa en la ejecución de uniones carpinteras en las que la transmisión de esfuerzos

se realiza principalmente por contacto directo entre superficies de madera. Este tipo de uniones son necesariamente articuladas. Las posibilidades que ofrecen actualmente el diseño asistido por ordenador y la fabricación mediante control numérico han permitido la recuperación de las uniones y sistemas constructivos tradicionales con altos niveles de precisión en la ejecución. En esta línea se han realizado algunos esfuerzos de investigación para recuperar la tipología de los detalles constructivos tradicionales en madera. En otro orden, son destacables los trabajos realizados en la Escuela Politécnica Superior de Lugo para modelizar con el Método de Elementos Finitos el comportamiento mecánico de este tipo de uniones.

Los nuevos diseños estructurales recurren a sistemas de unión basados en elementos metálicos tipo clavija (pasadores, pernos, tirafondos, etc.) o de superficie (placas clavo, conectores en anillo, etc.). En general, este tipo de elementos también aportan soluciones isostáticas, salvo que actúen en grupo y se encuentren específicamente diseñados para transmitir momentos flectores. Las posibilidades para realizar uniones rígidas se abren con la utilización de sistemas de encolado directo entre piezas de madera o mediante varillas o placas de diferentes materiales, posibilidades que están siendo exploradas por Landa Ochandiano Arquitectos y aplicadas en la práctica como soluciones de refuerzo o sustitución de piezas de madera en estructuras existentes.

El diseño estructural tampoco es ajeno a la innovación y en la ETS de Arquitectura de La Coruña se vienen desarrollando estudios avanzados sobre mallas planas y espaciales mediante barras de madera y diversos sistemas de unión que cuentan con algunas patentes y modelos de utilidad.

6. INTERVENCIÓN EN ESTRUCTURAS EXISTENTES, DIAGNÓSTICO, PERITACIÓN Y REHABILITACIÓN

En los trabajos de intervención sobre edificios con estructura de madera convergen muchos temas diferentes. La caracterización de la madera para estimar sus propiedades mecánicas, las técnicas de inspección para el diagnóstico de las patologías, el diseño de soluciones de refuerzo, etc., son líneas de trabajo e investigación a las que se puede remitir en diferentes apartados de este artículo.

Sin embargo, algunas cuestiones específicas relacionadas con el refuerzo de estructuras de madera están siendo investigadas en

España con no pocos esfuerzos. En la ETS de Arquitectura de Madrid se están realizando estudios sobre el comportamiento de conectores para la construcción de forjados colaborantes de madera hormigón, solución muy utilizada en la actualidad para satisfacer las nuevas necesidades de rigidez y resistencia de los forjados de madera tan abundantes en nuestras ciudades.

En la misma línea se sitúan otros estudios de diferente naturaleza para reforzar estructuras mediante un sistema patentado de perfiles metálicos colaborantes que se instalan desde la cara superior de forjado, uniones encoladas para reparación de elementos que trabajan a flexión o a tracción, o reparación de estructuras mediante injertos encolados.

Con un enfoque diferente, aparte de algunas técnicas no destructivas ya descritas para el diagnóstico, otros esfuerzos desarrollados en la EUIT Forestal de Madrid se dirigen hacia el estudio de algunos parámetros morfológicos de los daños producidos por insectos xilófagos para sistematizar el diagnóstico mediante herramientas informáticas.

En la ETSI de Montes de Madrid, dentro de la UD de Tecnología de la Madera y en colaboración con AITIM, ya en los años 80 se llevaron a cabo trabajos de investigación sobre el refuerzo de estructuras de madera con la tecnología de las formulaciones epoxi. Actualmente, la UD de Cálculo de Estructuras de la ETSI de Montes junto con el INIA y AITIM ha realizado un esfuerzo investigador e innovador importante en el campo de la utilización de técnicas no destructivas para la peritación de estructuras existentes. En otros centros se han sumado a esta línea con un creciente interés. Otra ciencia que encuentra aplicaciones interesantes es la dendrocronología, cuyo centro de referencia se encuentra en el INIA, y que aporta como utilidad principal la datación de estructuras históricas de madera.

7. MADERA LAMINADA, DÚOS, TRÍOS, MADERA CONTRALAMINADA, TABLEROS, PANELES SÁNDWICH Y NUEVOS PRODUCTOS

La madera laminada es, en la actualidad, el producto derivado de la madera con mayor implantación para uso estructural. Recientemente han surgido nuevos productos, como los dúos y tríos, que responden muy bien a una demanda muy extendida en el mercado español y europeo, ofreciendo un producto de cualidades estéticas similares a la madera aserrada pero con las garantías de un producto industrializado (mayor estabilidad

dimensional, mayor gama de dimensiones, etc.). La madera contralaminada irrumpe en el mercado europeo hace pocos años con fuerza, su formato y versatilidad ofrecen un abanico de posibilidades muy amplio e interesante para el diseño arquitectónico y para un montaje rápido y limpio.

En España, estos productos y su tecnología llegan fundamentalmente desde países europeos, y las líneas de investigación se centran en la implantación de certificados de calidad, como los Sellos de Calidad de AITIM, cuya vocación más inmediata es la de transformarse en el inminente mercado CE obligatorio. En el caso de la madera laminada, el mercado CE será obligatorio a partir de abril de 2009. Para otros productos aún se está trabajando en las normas y documentos que regularán el mercado, por lo que su implantación será más lenta.

Durante los años 80 se realizaron los primeros ensayos en España, con un enfoque eminentemente práctico, sobre la calidad del encolado de especies españolas para la fabricación de madera laminada (pino radiata y pino pinaster). Estos trabajos se realizaron en paralelo a la aparición de la nueva normativa europea sobre fabricación de madera laminada encolada cuyo resultado fue la actual norma UNE-EN 386 (7).

Algunas iniciativas españolas de innovación en este campo van encaminadas a la utilización de maderas de procedencia nacional para la fabricación de productos estructurales, como sucede con el pino radiata en el País Vasco, el eucalipto rojo en Galicia, el pino piñonero en Andalucía, el castaño en Asturias o el roble procedente del norte peninsular.

Con estas especies se están realizando experiencias de fabricación de madera laminada para uso estructural. También existen iniciativas en España para fabricación de madera laminada o formatos similares a los dúos y tríos con maderas tropicales importadas.

En cuanto a los tableros derivados de la madera para uso estructural, la determinación de sus propiedades mecánicas fue objeto de proyectos de investigación desarrollados por equipos mixtos (AITIM, UPM, INIA) a finales de los años 90, constituyendo acciones pioneras en la aplicación de la normativa europea de ensayo.

Otro producto innovador basado en tecnología española es el tablero de virutas fabricado con madera de chopo, obteniendo unas buenas prestaciones mecánicas para su utilización en clases de servicio 1 y 2.

Los paneles sándwich en general y, en nuestro caso, los fabricados con productos derivados de la madera se han visto fuertemente afectados por los requisitos del mercado CE. Se trata de un producto muy extendido y con múltiples variantes que cumple funciones relacionadas con casi todos los requisitos esenciales definidos en la Directiva de Productos para la Construcción, por lo que la certificación de su calidad resulta especialmente compleja. Diferentes empresas españolas han iniciado a través de la Unidad Conjunta AITIM-INIA los estudios de caracterización de sus productos.

Como productos innovadores en el mercado español, aunque en otros países hace tiempo que encuentran una mayor implantación, cabe señalar la utilización de la madera termotratada en la construcción y la utilización del bambú como material interesante en el diseño arquitectónico.

8. CONTROL DE CALIDAD Y CERTIFICACIÓN DE PRODUCTOS

El ámbito de la certificación de productos derivados de la madera para uso estructural, relacionado con muchas cuestiones tratadas en este artículo, es uno de los más importante y recurrentes en el control de calidad. Los fabricantes recurren a las marcas de calidad voluntarias para cumplir la función básica de certificar frente a terceros sus productos y sus prestaciones, lo que supone a su vez un valor añadido frente a su competencia.

Por otro lado, los responsables del control de calidad en obra encuentran en ellas una herramienta fundamental de trabajo. A esta filosofía de la calidad se añade el carácter obligatorio del mercado CE como garantía de mínimos que deben cumplir los productos en Europa.

La utilización de marcas de calidad voluntarias o la implantación obligatoria del mercado CE suponen en la actualidad una de las principales líneas de acción de algunos centros tecnológicos públicos o privados.

No sólo para realizar los trabajos de seguimiento mediante inspecciones y ensayos periódicos, sino porque exigen un elevado esfuerzo en la implantación de sistemas de control de calidad, en la interpretación de las normas y documentos que definen las condiciones que deben cumplir los productos, en la redacción de manuales, reglamentos o protocolos de control y ensayo para nuevos productos, en la adaptación de los equipos de laboratorio, etc.

Algunos de los ejemplos actuales más importantes son los de la certificación de la madera aserrada para uso estructural, en la que los Sellos de Calidad certifican la correcta clasificación y asignación de clases resistentes en los aserraderos. Estos Sellos, hasta ahora voluntarios, tendrán que desembocar en el mercado CE que empezará a ser obligatorio en septiembre de 2008. En madera aserrada, como en otros productos derivados de la madera, los Sellos de Calidad que actualmente se encuentran más implantados en España son los de AITIM, aunque también se está implantando el de Cidemco en el País Vasco. A otro nivel también se están promoviendo distintivos de calidad local como valor añadido a la madera estructural de determinadas regiones de procedencia.

En el caso de la madera laminada la utilización de certificados de calidad viene siendo habitual entre las empresas de mayor arraigo. Son conocidos algunos certificados europeos y, en España, el sello de AITIM, todos ellos orientados a certificar el proceso de fabricación y encolado en todas las fases críticas para la obtención del producto final.

9. DIVULGACIÓN, PUBLICACIONES EN REVISTAS Y CONGRESOS, SOFTWARE Y PÁGINAS WEB

El capítulo de la divulgación y publicación de resultados de la investigación no resulta ajeno al volumen y variedad de los trabajos realizados. Los cauces de divulgación nacional son tan variados como centros, universidades, colegios profesionales o editoriales especializadas.

Como revistas españolas especializadas en madera con un reconocido prestigio están el Boletín de Información Técnica de AITIM con una tirada bimestral de 5.000 ejemplares, editada desde 1967 es probablemente la más veterana, o más recientemente la publicación periódica del CIS Madera. Otras revistas periódicas relacionadas con el sector de la construcción y con un enfoque más generalista se hacen eco con frecuencia de la madera como material en la construcción, tal es el caso del monográfico de la revista Tectónica o la reciente revista electrónica Recopar, entre otras.

Con un perfil eminentemente científico debe señalarse la revista del INIA (SJAR, de difusión internacional). La revista Materiales de Construcción, dependiente del Instituto Eduardo Torroja, junto con la anterior son actualmente las únicas publicaciones españolas incluidas en el Citation Index que ha publicado artículos sobre madera estruc-

tural. La revista Informes de la Construcción demuestra, con la publicación de este monográfico, que comparte el creciente interés general por la madera estructural. Revistas internacionales especializadas en madera incluidas en el Citation Index, cuya relación se cita en un listado aparte, también han publicado artículos españoles.

Relación de revistas científicas y divulgativas:

- AITIM, Boletín de Información Técnica
- Arquetipo
- Boletín de Información Técnica del CIS Madera
- Construire in laterizio
- Forêt méditerranéenne
- Het Houtblad
- Información Tecnológica
- Informes de la Construcción, CSIC
- International Journal of Adhesion & Adhesives
- Journal of Cultural Heritage
- Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures
- Montajes e instalaciones
- Noticias de la construcción
- ReCoPaR (revista electrónica)
- Rehabilitación
- Revista de edificación
- Revista de Investigación Agraria
- Revista MONTES
- STAR Structural Architecture
- SUSTRAI
- Tecnimadera

Relación de revistas incluidas en el Citation Index (2007):

- Biosystem Engineering
- Holz als Roh-und Werkstoff
- Materiales de Construcción
- Wood Science and Technology
- Spanish Journal of Agricultural Research
- Hozlforschung
- Forest Product Journal
- Journal of ASAE
- Journal of ASCE

Relación de congresos nacionales e internacionales, en diferentes ediciones, con presencia española:

- Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica. Sevilla, España, 2006.
- Congreso forestal de Cuba y III Simposio Internacional de Técnicas Agroforestales. Habana, Cuba, 2004.
- Congreso Forestal Español. Granada, 2001. Zaragoza, 2005.
- Congreso Forestal Hispano Luso. Irati, Pamplona, España, 1997.
- Congreso Iberoamericano de Eucalyptus globulus. Vigo, España, 2006.

- Congreso Iberoamericano de Investigación y Desarrollo de Productos Forestales. Concepción, Chile, 2000.
 - Congreso internacional de rehabilitación del patrimonio arquitectónico y edificación. Tenerife, España, 1992. La Habana, Cuba, 1998. San Bernardino, Paraguay, 2002. Lanzarote, España, 2004. Buenos Aires, Argentina, 2006.
 - Congreso Mundial sobre Protección Integral de Ciudades frente al fuego y otros riesgos. Toledo, España, 1997.
 - Congreso Nacional de Agroingeniería. Córdoba, España, 2003, León, España, 2005.
 - Congreso Nacional de Historia de la Construcción. Cádiz, España, 2005.
 - Congreso Nacional de la Madera. Madrid, España, 1999
 - Congreso Nacional de Profesores de Materiales de Construcción de Escuelas que imparten Arquitectura Técnica. Valencia, España, 2004.
 - Congreso Nacional de protección de la madera. Pamplona, España, 2002. San Sebastián, España, 2006.
 - Congreso Nacional END, Asociación española de ensayos no destructivos. Cartagena, España, 2003
 - Congresso de Métodos Computacionais em Engenharia. Lisboa, Portugal, 2004.
 - COST Action E5. Timber frame building systems. 1995-2000.
 - COST Action E24. Reliability analysis of timber structures. 2000-2005.
 - COST Action E29. Innovative timber and composite elements / Components for building. 2002-2007.
 - COST Action E40: Innovative utilisation and products of large dimensioned timber including the whole forest-wood-chain. 2004-2008.
 - COST Action E53: Quality control for wood and wood products. 2005-2010.
 - COST Action IE0601 Wood Science for Conservation of Cultural Heritage (WoodCultHer). 2007 y siguientes.
 - European Conference on NDT. Barcelona, España 2002
 - European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. Helsinki, Finlandia, 2006.
 - Congreso Ibérico a Madeira na construção. Guimaraes, Portugal, 2004.
 - IASS 40th Anniversary Congress. Madrid, España, 1999
 - Internacional Conference on Archeological Prospection.
 - Internacional Structural Analysis of Historical Constructions Possibilities of Numerical and Experimental Techniques. Nueva Dheli, India, 2006
 - International Conference on Space Structures. Guildford, Reino Unido, 1993. Guildford, Reino Unido, 2002.
 - International Congress on restoration of architectural. Florencia, Italia. 2000.
 - International Seminar Forum UNESCO University and Heritage. Florencia, Italia. 2006.
 - Jornadas de Investigación en la Construcción IETCC. Madrid, España, 2005.
 - Jornadas sobre la madera estructural. El pino laricio. Segura de la Sierra, Jaén, España, 2006
 - Second International Maras 96. Mobile and Rapidly Assembled Structures. Wessex Institute of Technology. Wessex Institute of Technology and School of Architecture, Sevilla. 1996.
 - Seminario Internacional sobre construcciones históricas. Guimaraes, Portugal, 2001.
 - Simposio del Pino piñonero. Valladolid, España, 2000.
 - Simposio Iberoamericano de Eucalyptus globulus. Pontevedra, España. 2006.
 - WCTE World Conference on Timber Engineering. Lahti, Finlandia, 2004. Portland, USA, 2006.
 - La madera en la rehabilitación y restauración de edificios. Madrid, España, 1985.
 - Jornadas Nacionales de la Madera en la Construcción, INIA-ANCOP. Madrid, España, 1986. Madrid, España, 1998.
 - Jornadas Técnicas sobre la Madera en la Construcción, Junta de Andalucía. Granada, España, 1988.
 - Jornadas Técnicas de la Madera, Xunta de Galicia. Pontevedra, España, 1989.
 - Jornadas sobre Diagnosis, Patología y reparación de elementos de madera. Barcelona, España, 1992.
 - International Summer Meeting, American Society of Agricultural Engineers. Charlotte, North Carolina, USA. 1992.
 - Jornadas Forestales de Cuenca. Cuenca, España, 1992.
 - International Symposium on Nondestructive Testing of Wood. Hannover, Alemania, 2005.
 - Symposium Brücken aus Holz. Munich, Alemania, 2007.
- A todas estas vías de difusión se añaden los canales de comunicación habituales de colegios profesionales y escuelas técnicas, centros de investigación, revistas colegiadas, apuntes para la docencia, páginas web, etc.
- Por su veteranía y por el reconocimiento que cosechan, es obligada la mención a las numerosas publicaciones de AITIM y a su línea editorial especializadas en madera.
- La recopilación del volumen de producción científica en forma de publicaciones, congresos o tesis doctorales ha resultado espe-

cialmente compleja. Se ha recogido mucha información pero se tiene la seguridad de que el volumen producido en España es muy superior al señalado, de hecho casi todos los centros han aportado una información muy resumida y algunas instituciones no han participado en el aporte completo de información. Por ello, resulta imposible y no se pretende valorar con precisión el volumen de producción científica. Sin embargo, un simple recuento de citas permite observar una clara evolución creciente en la producción, destacando la presencia en congresos del año 2005 y la perspectiva de culminación de tesis doctorales del año 2007 y sucesivos. A esta producción se sumarían un elevado número de informes técnicos o de trabajos de fin de carrera.

De toda esta producción cabe destacar dos figuras fundamentales en las que se concentran más de la mitad de los congresos y publicaciones referenciadas, especialmente las publicaciones en revistas del Citation Index. Uno es el grupo de investigación del INIA, orientado principalmente hacia la caracterización de las maderas españolas para uso estructural. Y otro, el grupo de la Unidad Docente de Cálculo de Estructuras de la ETSI de Montes de Madrid, orientado hacia la docencia, las aplicaciones estructurales de la madera y la intervención en estructuras existentes.

En la figura 1 se puede señalar una tendencia creciente en la producción que se inicia a mediados de los años 90, en los que el número de artículos por año se mantiene prácticamente constante. Desde el año 2003 aproximadamente, cabe reflexionar sobre las causas de un descenso en el número de artículos publicados a cambio de un espectacular aumento de la presencia en Congresos. Una causa probable es la consolidación en España de un sistema de reconocimiento de méritos basado, entre otros criterios, en los artículos publicados en revistas del Citation Index, conocidas habitualmente como revistas de impacto.

La publicación en este tipo de revistas requiere un tiempo, esfuerzo y dedicación mucho mayores y las necesidades de currículum hacen redirigir los esfuerzos hacia los congresos. Actualmente la tendencia parece equilibrarse de nuevo y se consolida la presencia de investigadores españoles en revistas de impacto como fruto del trabajo realizado durante años anteriores, hasta el punto de que la mitad de las publicaciones actuales se dirigen hacia estas revistas mientras que hasta el año 2003 su presencia, aparte de las publicaciones del INIA, era casi testimonial.

En otro orden debe citarse la evolución de los medios y herramientas informáticas, como es la página web de aitim (www.aitim.es) bajo la denominación de infomadera, que hoy en día es la mayor fuente de información gratuita sobre madera en España, o los programas de cálculo como Estrumad, primer software español para la comprobación de estructuras de madera bajo las más recientes novedades de la normativa.

10. COLABORACIONES PARA LA REDACCIÓN DE ESTE ARTÍCULO

Las instituciones y las personas que han colaborado en la realización de este artículo y que forman parte de los grupos de investigación son las siguientes:

1. UD de Cálculo de Estructuras, ETS de Ingenieros de Montes, Universidad Politécnica de Madrid. Ramón Argüelles, Miguel Esteban, Francisco Arriaga, Guillermo Íñiguez.
2. Carlos Arrabal (8), ETS de Ingenieros de Montes, Universidad Politécnica de Madrid.
3. AITIM, Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera, Madrid. Fernando Peraza, Emilio Luengo, Raquel Mateo.

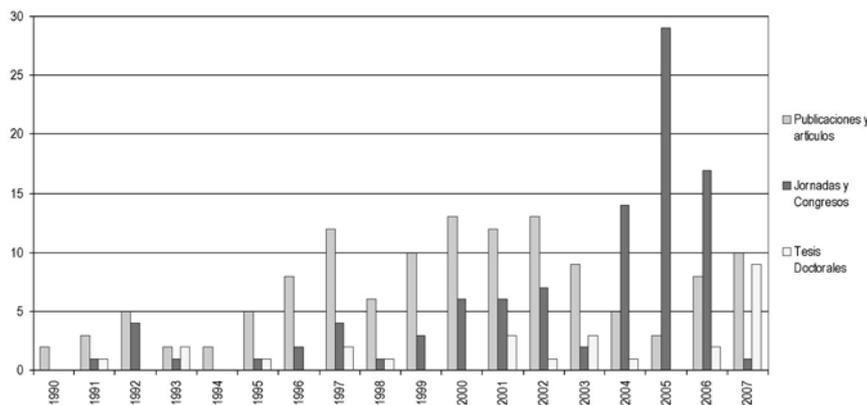


Figura 1. Evolución de la producción científica sobre madera estructural en España desde 1990.

4. Laboratorio de Estructuras de Madera, CIFOR-INIA, Madrid. Juan Ignacio Fernández-Golfín, Eva Hermoso, Rafael Diez
5. Grupo de Investigación de Estructuras y Tecnología de la Madera, ETS de Arquitectura, Valladolid. Alfonso Bastera, Gema Ramón, Isabel Barranco y Gamaliel López
6. ETS de Arquitectura, Sevilla. Carmen Rodríguez, Paloma Rubio, Juan Carlos Gómez, Filomena Pérez, Concepción González, Marcelino Sánchez, Sergio Sánchez.
7. ETS de Ingenierías Agrarias, Palencia. Luis Acuña, Milagros Casado, Enrique Relea, Gonzalo Fernández de Córdoba, Valentín Pando, José Rafael Alonso, María Teresa Lázaro, Andrés Llorente, Fernando Renedo.
8. Universidad de Santiago de Compostela, Escuela Politécnica Superior de Lugo. Manuel Guaita, M^a José López, Guillermo Riesco, Ramón Argüelles B. (UPM), José M^a Argüelles, Pablo Vidal (Universidad de Extremadura), JR Villar, Vanesa Baño, Azahara Soilán, Adrián Eiras.
9. ETS de Arquitectura, La Coruña. Javier Estévez, Emilio Martín, Santiago Muñiz, José Antonio Vázquez, M^a Dolores Otero.
10. Escuela Politécnica Superior de Lugo, Universidad de Santiago de Compostela. Manuel Méndez, Xoán Carlos Carreira, M^a Elena Fernández, Ramón Mariño.
11. ETS de Arquitectura, Sevilla. Enrique Morales, Fernández Naranjo, Borrallo Jiménez, Arquillo Torres.
12. ETS de Arquitectura, Universidad Politécnica de Valencia. Rafael Capuz, Javier Benlloch, Jerónimo Araujo, Maite Gil, Francisco García, Manuel Ramírez, Isabel Rodríguez, José Luis Montalva, Rosa Martínez, Isabel Tort.
13. ETS de Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid. Ricardo Aroca, José Luis Fernández-Cabo, José Miguel Ávila, Santiago Huerta, Enrique Nuere, Almudena Majano, Montaña Jiménez, José Luis de Miguel.
14. Escuela de Ingenieros Agrónomos y de Montes, Córdoba. Francisco J. Jiménez Peris, Cristina Prades, Francisco Hernández (UPM), Enrique Povedano (Junta de Andalucía), Carlos Lobo, Isabel Cueva.
15. CIDEMCO Centro de Investigación Tecnológica, Guipúzcoa. Ángel Lanchas, Oriol Muné, equipo compuesto por 12 personas (Ingenieros de Montes e Industriales, Licenciados en Ciencias Químicas y Biológicas, técnicos de análisis y control).
16. INCAFUST, Institut Català de la Fusta, Lérida. Jordi Gené.
17. Landa Ochandiano Arquitectos, Álava. Mikel Landa.
18. Universidad Politécnica de Valencia, ETS de Arquitectura. Liliana Palaia, Santiago Tormo, José Monfort, Rafael Sánchez, Luisa Gil, M^a Ángeles Álvarez, Vicente López, Carmen Pérez.
19. ETS Arquitectura, Universidad Politécnica de Cataluña. Jaume Avellaneda, Joan Ramón Rosell, Joaquín Montón, Judith Ramírez.
20. CIS Madera, Centro de Innovación y Servicios de la Xunta de Galicia. Francisco Pedras, Manuel Touza, Gonzalo Piñeiro.
21. UD de Industrias de los Productos Forestales, EU de Ingeniería Técnica Forestal, Universidad Politécnica de Madrid. Andrés Remacha, Ignacio Bobadilla.
22. Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción, Madrid. Beatriz González.
23. Departamento de Construcciones Arquitectónicas, ETSI Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid. Luis Maldonado, Carlos González.
24. UD de Tecnología de la Madera, ETSI Montes, Universidad Politécnica de Madrid. Antonio Guindeo, Luis García, Paloma de Palacios, Francisco García, Antonio Camacho.
25. AIDIMA Instituto Tecnológico de la Madera, Mueble, Embalaje y Afines. Valencia.

11. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Con la información remitida por los colaboradores en este artículo se ha realizado un directorio de líneas de actividad que se

ofrece a continuación a modo de listado esquemático. Los números que acompañan a cada línea de investigación hacen referencia a los centros o grupos de investigación en los que se están desarrollando conforme a la numeración del apartado anterior. La finalidad de este directorio, aparte de dejar constancia de la diversidad de actividades que se están desarrollando, es facilitar la comunicación entre personas o instituciones por áreas de interés.

Caracterización de madera aserrada para uso estructural:

- Caracterización de las propiedades mecánicas de la madera y productos derivados mediante ensayos físicos y mecánicos (1-3-4-7-10-11-14-20-21-24)
- Pino silvestre (1-3-4-7)
- Pino laricio (1-3-4-7-11-14-15)
- Pino pinaster (1-3-4-7-11-14-20)
- Pino radiata (1-3-4-7)
- Norma de clasificación visual (1-3-4-7)
- Influencia de los defectos en las propiedades mecánicas (1-8)
- Gruesa escuadría (1-19)
- Estructuras existentes (1-19)
- Pino piñonero (11-14)
- Eucalipto (10-20)
- Castaño (7-10-24)
- Roble (24)
- Abeto del pirineo
- Madera en rollo (4-7)
- Certificación (3-4)

Técnicas no destructivas en madera:

- Ultrasonidos (1-4-5-6-7-12-18-19-21-25)
- Vibraciones (1-4-5-7-19-21-25)
- Arranque de tornillos (1-5-7-19-21)
- Penetrómetro (1-4-19-21)
- Resistógrafo (5-7-10-12-18-20)
- Georradar (12)
- Microondas (12)
- Termografía (5-18)
- Tomografía (25)

Uniones y sistemas estructurales:

- Uniones tradicionales (8)
- Uniones encoladas con resinas epoxi (1-17)
- Uniones mediante barras encoladas con resinas epoxi (1-9)
- Mallas planas y espaciales con barras de madera (9)
- Barras huecas de madera para la construcción de estructuras espaciales (9)
- Mejora del anclaje con la ejecución de en bulbos (9)
- Casas de madera (3-11-18)
- Diseño de sistemas constructivos de alto valor añadido (15)

Madera laminada, dúos, tríos, madera contralaminada, tableros y otros productos derivados de la madera para uso estructural:

- Mejora de las propiedades de la madera laminada (15)
- Madera laminada de Eucalipto rojo procedente de Galicia (10)
- Madera laminada con coníferas procedentes de Andalucía (11-14)
- Aplicaciones en construcción de la madera termotratada (13-25)
- Desarrollo de nuevos productos (15)
- Arquitectura en bambú (19)
- Tableros (1-3-24-25)

Protección y durabilidad:

- Durabilidad de la madera al exterior (4-11)
- Tratamientos protectores y eficacia (4-25)
- Durabilidad de los herrajes metálicos en la construcción con madera (11)
- Desarrollo de nuevos productos y tratamientos para mejorar la durabilidad de la madera (15)
- Tratamientos curativos y preventivos (15)
- Control de calidad de tratamientos (3-4-15-20-21)
- Tratamiento químico y termotratamiento del Eucalipto rojo (20)
- Efecto del envejecimiento en las propiedades mecánicas de los tableros (21)

Intervención en estructuras existentes, peritación y rehabilitación:

- Inspección y diagnóstico en edificios con estructuras antiguas de madera (1-3-5-6-7-10-11-12-19-20-21-25)
- Identificación de agentes xilófagos (4-21-25)
- Forjados mixtos madera, hormigón (5-13)
- Refuerzos con elementos metálicos (19-23)
- Dendrocronología (4)
- Uniones encoladas para reparación de elementos estructurales a flexión y a tracción (1-17)
- Sistemas de reparación de estructuras de madera mediante injertos encolados y resinas epoxi (1-17)
- Análisis constructivo y de conservación de cubiertas y artesonados (18)

Modelización e informatización:

- Elementos finitos (5-8)
- Desarrollo de programas de cálculo (1-5-8)
- Desarrollo e implantación de programas de diseño asistido por ordenador y fabricación mediante control numérico

- Desarrollo de un sistema experto abierto para el diseño de estructuras convencionales de madera (13)
- Despliegue funcional de calidad (DFC) y análisis modal de fallos y efectos (AMFE) (7)

Fuego:

- Resistencia al fuego y características mecánicas de la madera laminada encolada (11)
- Comportamiento de la madera frente al fuego (4-14-25)
- Comportamiento mejorado frente al fuego (20)

Control de calidad de la madera en la construcción:

- Control de calidad, ensayos, control en obra (3-4-20-21-24-25)
- Implantación de sistemas de certificación: sellos de calidad, marcado CE (3-4)
- Ensayos de caracterización de nuevos productos (3-4-21)

Otros:

- Minimización y reutilización de residuos de la madera en la construcción (15)
- Construcción con madera y sostenibilidad (15-19)
- Madera en construcciones agrarias y ganaderas (10)
- Construcciones agroforestales de bajo coste (1-10)
- Identificación de especies de madera (4-7-20-21-25)
- Normalización (1-3-4-7-13-21)

12. CONCLUSIONES

En primer lugar, reiterar el agradecimiento por la generosa participación con la que empresas e instituciones han aportado tanta y tan variada información. La primera y más llamativa conclusión de este trabajo ha sido el ingente volumen de información que hemos tenido que manejar. Sin duda, esta información procede de una actividad muy dinámica y variada que a primera vista no era fácil de adivinar. Las líneas de investigación en su mayoría responden a las necesidades tecnológicas de un mercado y de un sector con una expectativa de crecimiento y con unas posibilidades altamente esperanzadoras, por ello cabe hablar de una investigación eminentemente aplicada al servicio de la industria.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) Ley de Ordenación de la Edificación (LOE). Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación. Modificada por la Ley 24/2001, de 27 de diciembre.

La fuerte demanda de productos estructurales de madera y la entrada en vigor de nuevas normas requieren un elevado esfuerzo para cubrir las muchas carencias actuales, y así lo refleja la tendencia creciente y casi exponencial de los trabajos, proyectos y los resultados que se han ido publicando en los últimos años. Los campos que concentran los mayores esfuerzos son los de caracterización de los productos de madera para uso estructural, incluidos los nuevos productos, el control de calidad y la certificación de productos, y los orientados a la búsqueda de soluciones y herramientas para la intervención en estructuras existentes de madera. Existe un significativo y creciente nivel de representación y divulgación internacional de los investigadores españoles, algunos de ellos en congresos al más alto nivel.

Sin embargo, no se encuentra igual de generalizada la presencia en medios de difusión científica y tecnológica con reconocimiento internacional mediante el Citation Index. De hecho, las publicaciones en revistas de impacto se limitan a las de unos pocos centros y se concentran en los últimos años.

El perfil predominante en los grupos de investigación se basa en la presencia de Ingenieros de Montes o Forestales y de Arquitectos. Son las Escuelas de Arquitectura y las Escuelas de Ingenieros de Montes los centros en los que más volumen de actividad se ha podido constatar, y en los centros de investigación es el mismo perfil el que predomina entre el personal investigador.

Otras titulaciones que acompañan en menor proporción son los Arquitectos Técnicos y Aparejadores o los licenciados en Ciencias Biológicas o en Ciencias Químicas. A ellos se suma un elevado número de personas e instituciones, cuya presencia es fundamental a todos los niveles y a los que es justo reconocer su mérito en todos los trabajos de investigación y en la transferencia de resultados, como becarios predoctorales, técnicos de laboratorio, estudiantes, profesionales del sector, empresas, etc. Las conclusiones de este trabajo, quizás el primero de esta naturaleza y por ello incompleto, no deben terminar en este artículo. Esta documentación merece ser ampliada con los años y por ello invitamos a los participantes y a todos los que lo consideren interesante a continuar aportando información para mantener esta base de datos actualizada.

- (2) Código Técnico de la Edificación (CTE). Dirección General de Arquitectura y Política de Vivienda del Ministerio de Vivienda. 2006
- (3) Directiva 89/106/CEE del Consejo de 21 de diciembre de 1988 relativa a la aproximación de las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas de los Estados Miembros sobre los productos de construcción.
- (4) Norma UNE 56544:2003. Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas.
- (5) Norma UNE-EN 1912:2005. Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de especies y calidad visuales.
- (6) Norma UNE-EN 338:2003. Madera estructural. Clases resistentes.
- (7) Norma UNE-EN 386:2003. Madera laminada encolada. Especificaciones y requisitos de fabricación.
- (8) Arrabal, C. 2006: "Enseñanza e investigación relacionados con la madera en España". *VI Jornadas sobre la actividad docente e investigadora en Ingeniería Agroforestal*. Palencia, 21 y 22 de septiembre de 2006

* * *