



**6º CONGRESO FORESTAL
ESPAÑOL**

6CFE01-511

Montes: Servicios y desarrollo rural
10-14 junio 2013
Vitoria-Gasteiz



Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Vitoria-Gasteiz, 10-14 junio de 2013
ISBN: 978-84-937964-9-5
© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Estimación de la calidad de la madera en rollo de *Populus x euramericana* mediante ultrasonidos

CASADO SANZ, M.¹, ACUÑA RELLO, L.¹, BASTERRA OTERO, L. A.², HEREDERO MUÑOZ, S.¹ y SAN MARTÍN, R.¹

¹ Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias de Palencia. Universidad de Valladolid.

² Escuela de Arquitectura. Universidad de Valladolid

Resumen

El género *Populus* no tiene aplicación estructural a nivel nacional debido a la falta de normativa de clasificación para esta especie. Si bien en algunas versiones de la norma UNE 56544:1997 se incluía junto a las coníferas, ya que presenta unas características mecánicas relativamente similares, en sus últimas versiones este género ha sido excluido de ella. La caracterización actualizada de la madera de chopo nacional puede garantizar un aumento del empleo de esta especie para su uso estructural.

En esta comunicación se presentan los resultados de ensayos realizados con métodos no destructivos (NDT) con el fin de estimar la calidad de la madera en rollo y aserrada de chopo, en función de los resultados del MOE, MOR y densidad de los ensayos según norma UNE-EN 408:2011. Se seleccionaron 10 chopos en pie de clases diamétricas entre 33 y 43 cm, de cada árbol se obtuvieron 2 trozas de madera, las trozas fueron aserradas obteniéndose 141 tablas.

Los resultados obtenidos ofrecen una aceptable predicción del Modulo de Elasticidad de la madera aserrada en función de la velocidad de ultrasonidos tomada sobre la madera en rollo con un R² 50%.

Palabras clave

Ensayos no destructivos, madera estructural, MOR, MOE, densidad, ultrasonidos.

1. Introducción

El cultivo del lamo va en aumento en Europa y en todo el mundo debido a su rápido crecimiento y a la capacidad de adaptación a diferentes condiciones de suelo y clima. El área de plantaciones productivas de álamo ocupa una superficie próxima a 5,4 millones de hectáreas a nivel mundial, y la mayor extensión se concentra en China con 4 millones de hectáreas, cinco veces el área de plantaciones de Europa, según datos de la FAO de 2007 (LEBEDYS & KOLLERT; 2010). En España se superan las 135.710 ha, muchas de ellas con certificación PEFC, siendo Castilla y León la primera región española en plantación de chopos pues cultiva 87.600 ha, con una producción de madera de chopo de 345.408 m³/año, lo que representa el 62% de total nacional (M.A.P.A; 2008). Desde el punto de vista medioambiental el género *Populus* tiene la mayor tasa de crecimiento de las especies maderables europeas y una de las mayores de todo el mundo, por lo que es una de las plantaciones forestales más adecuadas para la captura de CO₂.

El principal destino de la madera de chopo a nivel nacional es, en un 65%, el desarrollo para tablero contrachapado, y su limitación para uso estructural se debe a la falta de normativa de clasificación para esta especie. Si bien en algunas versiones de la norma UNE 56544:1997 se incluía junto a las coníferas por presenta unas características mecánicas relativamente similares a ellas, en sus últimas versiones este género ha sido excluido de ella.

La madera de álamo se ha utilizado en aplicaciones estructurales y aún podemos encontrar en la actualidad importantes muestras de su utilización desde hace siglos, siendo en el medio rural, cercano a vegas y riberas, donde esta madera más se utilizó. En Italia el uso del chopo fue habitual en los siglos XVII a XIX debido a su baja densidad del material, su buena estabilidad dimensional y, esencialmente, a su abundancia en las zonas cercanas a las poblaciones (CASTRO; 2007). En la última década se ha estudiado el comportamiento del chopo en nuevos productos estructurales como el LVL (Laminated Veneer Lumber) y la madera laminada encolada CASTRO & PAGANINI (2003), CASTRO & ZANUTTINI (2004) y CASTRO & FRAGNELLI (2008). La caracterización actualizada de la madera de chopo nacional puede garantizar un aumento del empleo de esta especie para uso estructural.

El desarrollo de técnicas no destructivas para la determinación de características físico-mecánicas y, en particular, las mediciones por ondas ultrasónicas en la madera se remonta a mediados del siglo pasado. A comienzos de los años ochenta aparecen multitud de artículos científicos sobre este tema, en los últimos veinte años numerosos investigadores utilizan esta técnica para determinar las propiedades elásticas de la madera con distinto grado de aproximación SANDOZ (1989), SANDOZ et al (2000), HERNÁNDEZ et al (1998), ACUÑA et al (2006), CONDE et al (2007), CASADO et al (2012) entre otros muchos. En todos los casos se ha ensayado madera aserrada, la novedad de este trabajo es la aplicación de los ultrasonidos en madera en rollo de álamo.

2. Objetivos

Puesto que la velocidad de transmisión de ondas ultrasónicas varía con la estructura del material, el método de ultrasonidos debe ser evaluado y puesto a punto para cada especie de madera antes de ser aplicado. Por ello uno de los objetivos de este trabajo consiste en analizar la aplicabilidad de modelos de predicción de la calidad mecánica de la madera en rollo y aserrada de *Populus x euramericana* I-214 basados en dicha técnica.

3. Metodología

Se seleccionaron 10 árboles en pie de clases diamétricas entre 33 y 43 cm de una chopera de Santa Marina del Rey (León), de cada árbol se obtuvieron 2 trozas de madera en rollo de 3 metros de longitud. Las trozas fueron marcadas con códigos de colores en las testas y aserradas a tablas de 15x5x300 cm obteniéndose 141 tablas (figura 1). Se detallan a continuación los ensayos realizados:

- En campo sobre 19 trozas (una de las trozas se rajó y no se pudo ensayar) se determinó; el diámetro medio con forcípula, 6 mediciones de la velocidad de la onda longitudinal con ultrasonidos de testa a testa según las figuras 2 y 3.
- En aserradero sobre las 141 tablas se realizó una medición de la velocidad de la onda ultrasónica longitudinal de testa a testa. (Ver figura 4).

- Finalmente ya en laboratorio sobre las 141 tablas secadas hasta una humedad final entorno al 8%;
 - se midieron los nudos en cara y en canto y se determinaron para cada pieza las siguientes variables; Diámetro relativo del máximo nudo de la cara en % (diámetro mayor en la cara dividido entre la anchura de la pieza d_c), Diámetro relativo del máximo nudo del canto en % (diámetro mayor en el canto dividido entre el espesor de la pieza d_h), anchura de los anillos (A_a) según norma UNE 56544:2011).
 - se clasificó cada tabla utilizando la norma UNE 56544:2011 considerando la calidad ME1 como C18 y ME 2 como C14.



Figura 1. Tablas de madera aserrada con los códigos de colores en las testas

Mediciones con ultrasonidos

Se utilizó un equipo de ultrasonidos tipo *Fakopp Microsecond Timer*®, que trabaja por transmisión ultrasónica con un generador de 45 kHz de frecuencia y con dos palpadores que se introducen en la madera. La velocidad ultrasónica longitudinal y el módulo de elasticidad dinámico se determinaron según las siguientes expresiones (1) y (2).

$$V_{ult} = L/t \quad [1]$$

$$E_{ult} = \rho * (V_{ult})^2 * K'_h \quad [2]$$

Donde: ρ es la densidad de la pieza, L la longitud, t tiempo de paso de la onda ultrasónica y K'_h el factor de corrección por diferencia del contenido de humedad respecto a la humedad de referencia al 12%.

En campo se realizaron 2 mediciones de la velocidad ultrasónica longitudinal directa de testa a testa de cada troza (figura 2) y 4 mediciones longitudinales indirectas cruzadas; 1-A, 2-B, 3-C y 4-D (figura 3).

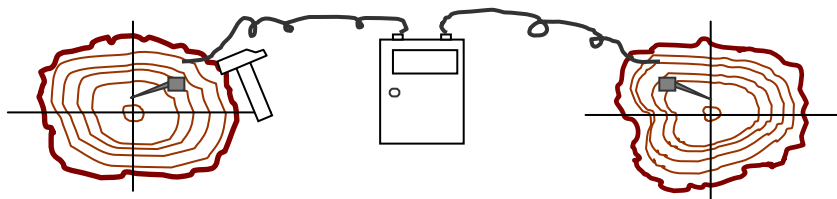


Figura 2. Esquema de la medición de ultrasonidos longitudinal directa en las trozas

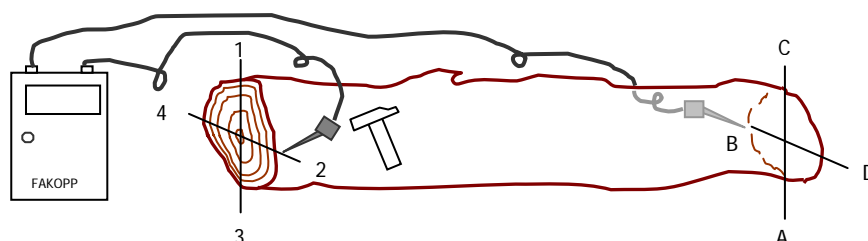


Figura 3. Esquema de la medición de ultrasonidos longitudinal indirecta en las trozas

En aserradero se realizó 1 medición longitudinal directa de testa a testa en cada tabla aserrada (figura 4).

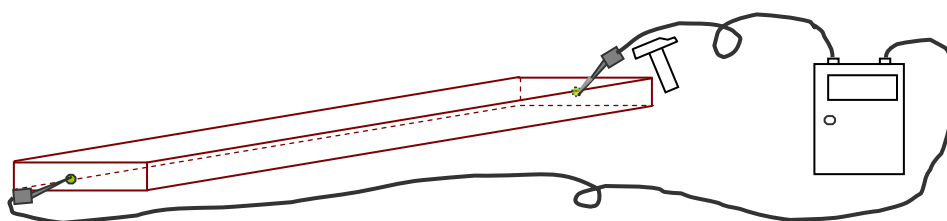


Figura 4. Esquema de la medición de ultrasonidos longitudinal directa en las tablas en aserradero

Finalmente en laboratorio sobre las 141 tablas secadas hasta una humedad final entorno al 8% se midieron 2 velocidades de la onda ultrasónica longitudinal directa.

Ensayos de flexión

Los ensayos mecánicos a flexión se realizaron siguiendo la norma UNE-EN 408:2011. Se determinó por cada tabla los siguientes valores: Tensión de rotura a flexión (MOR) en N/mm^2 , Módulo de elasticidad global (MOEGTO) en N/mm^2 , la densidad en kg/m^3 y la humedad.

El análisis estadístico se realizó utilizando el programa STATGRAPHICS Plus 5.1. En los diferentes análisis estadísticos se verificaron las hipótesis de normalidad de las variables y la independencia de los residuos.

4. Resultados

En la tabla 1 se muestran los valores de los ensayos realizados; en la chopera sobre las trozas, en aserradero sobre las tablas húmedas y en laboratorio con las tablas secas.

Tabla 1. Estadística descriptiva de las variables determinadas en el estudio, entre paréntesis se indican los valores característicos

Variable	N	Promedio	Desv. estánd.	C.V (%)	Mínimo	Máximo
EN CHOPERA:						
<i>Longitud de la troza (cm)</i>	19	298,6	7,2	2,4	271,0	305,3
<i>Diámetro de la troza (cm)</i>	19	38,2	3,2	8,3	32,9	43,8
<i>Velocidad ultrasónica longitudinal indirecta (m/s)</i>	19	3750,36	143,68	3,83	3564,81	4012,07
<i>Velocidad ultrasónica longitudinal directa (m/s)</i>	19	4114,88	152,09	3,69	3929,32	4425,41
EN ASERRADERO:						
<i>Velocidad ultrasónica longitudinal directa (m/s)</i>	141	3857,99	424,39	11,00	2921,08	4612,31
<i>Humedad (%)</i>	40	108,45	46,92	43,26	75,97	191,44
EN LABORATORIO:						
<i>Anchura de los anillos (cm)</i>	141	1,18	0,30	25,67	0,6	2,2
<i>Velocidad ultrasónica longitudinal directa (m/s)</i>	141	4944,84	204,00	4,12	4552,07	5686,55
<i>MOE dinámico (N/mm²)</i>	141	8779,81	1288,56	14,67	6782,06	14381,0
<i>MOR_C (N/mm²)</i>	141	43,16 (22,0)*	12,23	28,34	14,31	72,76
<i>MOE(N/mm²)</i>	141	7553,45	1428,45	18,91	5034,6	14404,2
<i>Densidad (kg/m³)</i>	141	357,29 (314,37)*	28,681	8,027	301,22	444,72
<i>Humedad (%)</i>	141	7,5	0,62	8,254	6,69	9,58

La calidad estructural del lote ensayado según la norma UNE-EN 338:2010, que utiliza como parámetros el valor medio del Módulo de Elasticidad (7553 N/mm²), el valor característico del Módulo de Rotura (22 N/mm²) y el valor característicos de la densidad (314 kg/m³), correspondería a una clase resistente C14, si atendemos a los valores de la resistencia a flexión y densidad podría clasificarse como C18.

Atendiendo a la norma de clasificación visual UNE 56544:2011, 26 de las 141 tablas fueron clasificadas como C18, 53 como C14 y 62 tablas se rechazarían ó clasificarían como madera no estructural, en la figura 5 se aprecian los porcentajes de cada clase. La principal

causa de rechazo visual fueron los nudos, seguido de la presencia de entrecasco y gemas en las tablas aserradas.

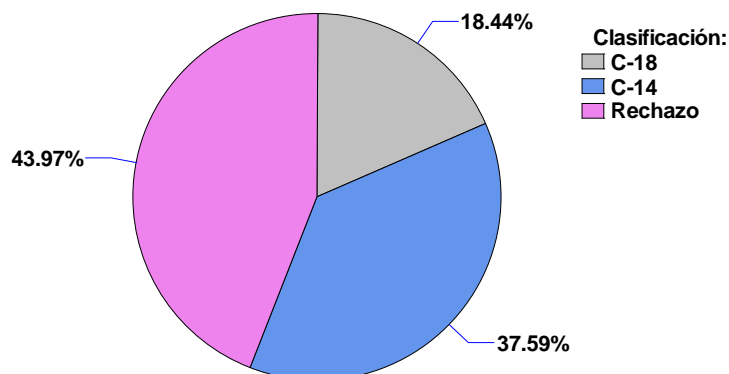


Figura 5. Porcentajes de tablas clasificadas visualmente.

Se ha comparado la clasificación visual de las tablas con los valores de los ensayos de flexión, los resultados se pueden ver en la tabla 2.

Tabla 2. Resultados comparados de las diferentes clasificaciones de las tablas

		Nº de tablas				TOTAL
		C24	C18	C14	Rechazo	
Clases resistentes UNE-EN 338:2010						
Clasificación UNE-EN 338:2010		3	13	73	52	
Clasificación Visual UNE 56544:2011	<i>Sobrestimas</i>	0	0	14	36	35,46%
	<i>Aciertos</i>	0	2	26	16	31,21%
	<i>Subestimas</i>	3	11	33	0	33,33%

Una buena clasificación debe conseguir un alto porcentaje de aciertos, una cantidad moderada de subestimas y un 5% (sería lo deseable) como máximo de sobreestimas, por lo que a raíz los resultados anteriores la norma de clasificación visual utilizada no es una buena norma para el álamo coincidiendo con resultados anteriores (CASADO et al 2012).

Puesto que el objetivo principal de trabajo era analizar una metodología de ensayos con ultrasonidos sobre la madera en rollo que permitiera predecir la calidad de la madera aserrada a partir de las medidas realizadas en campo y en aserradero, identificadas las tablas de cada troza y árbol se analizó si existían diferencias significativas a nivel de árbol para las variables medidas: velocidad de ultrasonidos longitudinal directa medida en la madera en rollo, en el aserradero sobre las tablas húmedas y en laboratorio sobre las tablas secas (tabla 3). También se estudió igualmente la variabilidad de las propiedades mecánicas considerando el factor árbol cuyos resultados se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Resumen del análisis de la varianza de distintas variables considerando el factor árbol.

Variables	Velocidad ultrasónica directa en madera en rollo	Velocidad ultrasónica directa en madera aserrada ($h > PFS$)	Velocidad ultrasónica directa en madera aserrada ($h < 12\%$)	MOE	MOR	Densidad
Razón- F	1,44	0,40	2,43	1,32	1,03	6,50
p-valor	0,296	0,934	0,014*	0,231	0,421	0,000**

* $\alpha < 0,05$ ** $\alpha < 0,001$

Finalmente se realizó un análisis estadístico para poder predecir el módulo de elasticidad a partir de los resultados de los ensayos de ultrasonidos, se consideraron únicamente las variables que se relacionaban significativamente con el MOE, en la tabla 4 se indican las ecuaciones de los modelos y otros resultados estadísticos.

Tabla 4. Funciones de predicción del MOE a partir de las velocidades ultrasónicas longitudinales.

Ecuación del ajuste	p-valor	R^2_{ajus} (%)
$MOE = -2877,4 + 2,3 V_{drollo}$	0,009	35,5
$MOE = -4396,7 + 2,9 V_{irollo}$	0,001	50,4
$MOE = -1793,07 + 1,09 V_{daserra} + 14,12 D$	0,000	41,1
$MOE = -12295,9 + 2686 V_{dlabo} + 18,2 D$	0,000	50,5

V_{drollo} : Velocidad ultrasónica directa de la onda medida en la madera en rollo

V_{irollo} : Velocidad ultrasónica indirecta de la onda medida en la madera en rollo

$V_{daserra}$: Velocidad ultrasónica directa de la onda medida en las tablas en aserradero

V_{dlabo} : Velocidad ultrasónica directa de la onda medida en las tablas en laboratorio

5. Discusión

La calidad estructural de la madera aserrada analizada es similar a la obtenida en otros estudios y publicaciones de *Populus x euramericana* "I-214" de los mismos autores (CASADO et al 2012). La resistencia a flexión es similar a muchas coníferas, pero su módulo de elasticidad es relativamente bajo en comparación con ellas, por lo que no tiene buen acomodo en una sola clase resistente de las definidas en la norma UNE-EN 338:2010 por las discrepancias que presentan sus valores característicos de MOE y MOR con ella. Por ello, parecería conveniente establecer para esta especie alguna clase resistente independiente (CHP1 y CHP2), tabla 5, híbrida entre las clases definidas por la norma, como ya han propuesto varios autores para la madera estructural de gran escuadría ARRIAGA et al (2005) y CASADO et al (2012).

Tabla 5. Clases resistentes según norma EN 338 y propuesta de clases para el *Populus x euramericana*

Valores característicos	Clases resistentes					
	C14	C16	C18	C24	CHP1	CHP2
MOR (N/mm ²)	14	16	18	24	18	22
MOE (N/mm ²)	7	8	9	11	6,5	8
Densidad (kg/m ³)	290	310	320	350	290	310

Los resultados de las velocidades longitudinales ultrasónica medias tanto de las trozas como de las tablas con humedad superior al PSF (Punto de Saturación de las Fibras), ofrecen valores muy similares en torno a 4000 m/s con un coeficiente de variación inferior al 4%. Sin embargo sobre las tablas secas la velocidad longitudinal ultrasónica media es significativamente mayor y próxima a 5000 m/s, coincidiendo dicho resultado con otros estudios sobre madera estructural del mismo clon (CASADO et al 2012).

El empleo de ultrasonidos sobre la madera en rollo indica una mejor predicción del Módulo de Elasticidad con las velocidades ultrasónicas logitudinales indirectas que con las velocidades directas. El uso del ultrasonidos sobre la madera aserrada con humedad > PSF no ofrece los resultados que se esperaban, por lo que se debería continuar estudiando con mas estudios sobre los ensayos de ultrasonidos sobre madera saturada.

El análisis de influencia del factor árbol en la variabilidad de las propiedades mecánicas indica que no hay diferencias significativas entre los árboles para las variables: velocidad ultrasónica longitudinal directa medida en la madera en rollo ni la velocidad de las tablas húmedas determinadas en aserradero, tampoco hay diferencias entre árboles para el módulo de elasticidad ni para la resistencia a la flexión, si se encontraron diferencias significativas en la velocidad ultrasónica longitudinal directa medida en las tablas secas y en la densidad. El hecho de que no se encuentren diferencias entre árboles en las propiedades mecánicas de las tablas aserradas obtenidas de ellos indica que la variabilidad entre los distintos individuos no es significativamente mayor que entre las tablas de un mismo chopo y esto puede ser debido al proceso del aserrado, por lo que el aserrado podría ser un condicionante a analizar, según DIEZ y FERNÁNDEZ GOLFÍN (1998) y DIEZ et al (2001) en trabajos realizados en *Pinus nigra* señala que el factor más decisivo en el rechazo de piezas y el análisis de la resistencia a flexión fue la variabilidad intratroza.

6. Conclusiones

La calidad estructural de la madera aserrada según la norma UNE-EN 338:2010, que utiliza como parámetros el Módulo de Elasticidad, el Módulo de Rotura y la densidad, con valores de 7553 N/mm², 22 N/mm² y 314 kg/m³, respectivamente, corresponde a una C14. Se propone una clasificación mixta por las discrepancias que presentan los valores característicos del MOE y MOR.

La velocidad de ultrasonidos sobre la madera aserrada con humedad > PSF indica una pobre relación para predecir el módulo de elasticidad de la madera a la humedad de uso, por lo que en próximos estudios se deberá analizar la influencia del contenido de humedad.

No hay diferencias estadísticamente significativas entre los árboles en la mayoría de las variables analizadas, si se encontraron diferencias significativas en la velocidad ultrasónica longitudinal directa medida en las tablas secas. El hecho de que no se encuentren diferencias entre árboles en las propiedades mecánicas de las tablas aserradas puede ser debido al proceso del aserrado, por lo que el aserrado podría ser un condicionante a analizar.

Se ha definido una función de predicción para el MOE con la velocidad ultrasónica longitudinal indirecta medida con 'Fakopp' en las trozas de la chopera, obteniendo un R^2 de 50,4%, por lo que puede ser un buen predictor de la calidad de la madera. El coeficiente de determinación de la función de predicción del MOE con la velocidad ultrasónica longitudinal y la densidad medida en las tablas en aserradero (con humedad superior al PSF) es 41,1%. Se debería continuar estudiando con nuevas propuestas del empleo de ensayos de ultrasonidos sobre madera saturada y analizar otros parámetros de calidad de la madera en rollo para mejorar los modelos de predicción.

Finalmente la función de predicción del MOE con la velocidad ultrasónica longitudinal medida en las tablas del laboratorio y la densidad, ofrece un coeficiente de determinación del 50,5%.

7. Agradecimientos

El trabajo que aquí se presenta se encuadra dentro del proyecto VA047A08 subvencionado por la Junta de Castilla y León. Se ha realizado en colaboración con la empresa Aserradero Maderas Alcoba Pérez (León).

8. Bibliografía

ACUÑA, L., DIEZ BARRA, R., CASADO, M.; 2006. Los ultrasonidos y la calidad de la madera estructural. Aplicación a *Pinus pinaster* Ait. Revista Boletín de CIDEU. 6-26.

ARRIAGA, F.; IÑIGUEZ, G.; ESTEBAN, M.; 2005. Assessment of strength and stiffness properties using longitudinal stress wave on structural gross cross section timber of radiata pine (*Pinus radiata* D.Don) . Symposium NDT: 101-109.

CASADO, M.; ACUÑA, L.; BASTERRA, L.A.; RAMÓN-CUETO, G.; VECILLA, D.; 2012. Grading of structural timber of *Populus x euramericana* I-214. *Holzforschung*. Vol 66:633-638

CASTRO, G.; 2007. Aplicaciones del chopo en la construcción. Revista AITIM N° 248: 24-28.

CASTRO, G.; PAGANINI, F.; 2003. Mixed glued laminated timber of poplar and *Eucalyptus grandis* clones. *Holz als Roh - und Werkstoff* 61: n. 4: 291-298.

CASTRO, G.; ZANUTTINI, R.; 2004. Multilaminar wood: Manufacturing process and main physical-mechanical properties. *Forest Prod. J.* 54 (2):61-67.

CASTRO, G.; FRAGNELLI, G.; 2008. New technologies and alternative uses for poplar wood. *Boletín CIDEU.* 2: 27-36.

CONDE, M.; FERNÁNDEZ GOLFÍN, J. I.; PRIETO, E.; 2007. Mejora de la predicción de la resistencia y rigidez de la madera estructural con el método de ultrasonidos combinado con parámetros de clasificación visual. *Materiales de Construcción*, Vol. 57: 49-59.

DIEZ M.R., FERNÁNDEZ GOLFÍN, J. I.; 1998. Influencia de diversos factores en la calidad de la madera de uso estructural de *P. sylvestris* L. *Invest. Agr. Sist. Recur. For.* 7(1 y 2): 41-51.

DIEZ M.R., FERNÁNDEZ GOLFÍN, J. I. HERMOSO, E.; 2001. Causas de las deformaciones en madera estructural de *Pinus nigra*. *Invest. Agr. Sist. Recur. For.* 10(2): 246-252.

UNE 56544:2011. Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas.

UNE-EN 338:2010. Madera estructural. Clases resistentes. AENOR, España.

UNE-EN 408:2011. Madera estructural. Madera estructural y madera laminada. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. AENOR, España.

UNE-EN 384:2004. Madera Estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad. AENOR, España.

HERNÁNDEZ, R. E., KOUBAA, A., BEAUDOIN, M., FORTIN, Y.; 1998. Selected mechanical properties of Fast-growing poplar hybrid clones. *Wood and Fiber Science* 30 (2):138-147.

LEBEDYS A.; KOLLERT W.; 2010. Recursos y Mercados de Álamo desde la perspectiva Europea. Primer encuentro de populicultores de Europa. Valladolid, España.

M.A.P.A 2008. Datos estadísticos del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación <http://www.mapa.es/es/agricultura/pags/chopo/cortas.htm>

SANDOZ, J.L.; 1989. Grading of construction timber by ultrasound. *Wood Science and Technology*, 223: 95-108.

SANDOZ, J.L.; BENOIT, Y. Y DEMAY, L.; 2000. Wood testing using acoustic-ultrasonic, *12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood.* 97-104.