

## Aplicación de los ultrasonidos a la evaluación de las propiedades mecánicas de la madera en rollo de pequeño diámetro

### *Ultrasound application to evaluation of small round timber mechanic properties*

Eva Hermoso Prieto\* Juan I. Fernández-Golfín Seco\*\*, M. Rafael Díez Barra\*\*\*, Rafael Mier Pérez\*\*\*\*

#### RESUMEN

En el presente trabajo se presentan los resultados de la caracterización mecánica efectuada sobre madera en rollo delgada (diámetro inferior a 23 cm) de pino laricio (*Pinus nigra* subsp. *Saltzmanii*) procedente de los Montes de Cuenca.

Se ensayan, de acuerdo con la norma EN 14251:2003, un total de 445 rollizos torneados con diámetros finales de 8, 10, 12 y 14 cm, concluyéndose que el material sin clasificar puede ser asignado a una clase de resistencia de C14 (según UNE-EN 338:2003).

Se evalúa la aplicabilidad del método de transmisión de ondas ultrasónicas en la clasificación del material proponiendo diversas combinaciones de clases de resistencia (C22/C16/R, C18/C14/R ó C18/R) en función del valor de paso empleado para la velocidad de la onda ultrasónica. Para cada combinación de clases resistentes obtenida se analiza el rendimiento clasificatorio, el cual es comparado con los resultados de una clasificación óptima del material (Optimal Ranking) efectuada según los principios establecidos en la norma EN 14081-2:2005.

Finalmente se concluye sobre la aplicabilidad del método en la predicción de la presencia de determinadas particularidades del crecimiento (en especial madera juvenil) así como sobre la conveniencia de establecer métodos mixtos de clasificación basados en el empleo conjunto de evaluaciones visuales y por ultrasonidos.

850-10

**Palabras clave:** madera en rollo delgada, *Pinus nigra* subsp. *Saltzmanii*, caracterización de maderas.

#### SUMMARY

*In this study is shown the mechanic characterization results carried out with small round timber (diameter under 23 cm) of laricio pine (*Pinus nigra* subsp. *Saltzmanii*) from Cuenca forest.*

*According to EN 14251:2003 445 small round timber of 8, 10, 12 y 14 cm are tested, concluding they can be assigned to C14 strength class (according to UNE-EN 338:2003).*

*The suitability of ultrasound transmission method to grade this material is evaluated, proposing several strength grades combination (C22/C16/R, C18/C14/R ó C18/R) which are based on values of the indicating property of the ultrasound wave velocity. For each strength classes combination obtained, the grade yield is analyzed and compared with optimal ranking results developed according to UNE-EN 14081-2:2005.*

*Finally, method feasibility related to predict the presence of growth specific singularities (juvenile wood specially) is concluded, in addition to the convenience to establish mix grading methods based on ultrasound and visual evaluation together.*

**Keywords:** small round timber, "*Pinus nigra* subsp. *Saltzmanii*", timber characterization.

Laboratorio de Estructuras de Madera. CIFOR-INIA

\*Dr. Ingeniero de Montes

\*\*Dr. Ingeniero de Montes

\*\*\*Dr. Ingeniero Técnico Agrícola y Biólogo

\*\*\*\*Ingeniero de Montes

Persona de contacto/Corresponding author: hermoso@inia.es (Eva Hermoso Prieto)

Fecha de recepción: 6-III-07

Fecha de aceptación: 13-IV-07

## 1. INTRODUCCIÓN

Por madera en rollo delgada o de pequeño diámetro se entiende (1) la procedente de árboles con menos de 23 cm de diámetro normal.

Este material en rollo de pequeño diámetro procede en su gran mayoría de la realización de claras sobre masas naturales o artificiales, en su gran mayoría de coníferas. También puede proceder de subproductos del proceso de aserrado (puntas y raberones fundamentalmente).

Un buen manejo forestal suele ir obligatoriamente asociado a la realización de claras<sup>1</sup> en diversas fases del turno pero, desgraciadamente, los elevados costes de estas operaciones y la falta de rentabilidad económica de los productos extraídos suele dificultar, si no impedir completamente, su realización. Por contra, la supresión de estos tratamientos se paga en términos de sanidad y calidad de la masa y en pérdida de rendimientos económicos al final del turno, al ser menor la producción de madera de calidad.

El diseño de productos y aplicaciones rentables para este material de pequeño diámetro permitiría ayudar a cubrir los costes de las operaciones necesarias para su extracción, aportaría rentas y oportunidades industriales a las poblaciones rurales, ayudaría a mejorar la sanidad de las masas y a minimizar el riesgo y extensión de los incendios forestales (2, 3).

Aparte de los usos tradicionales de este material, basados fundamentalmente en su trituración y posterior conversión en tableros, pasta de papel o biomasa; existe un empleo creciente en construcciones rurales o decorativas, donde este material juega un papel claramente estructural. En estas aplicaciones estructurales la madera puede presentarse tanto de forma maciza (postes) como reconstituida (Scrimber, madera laminada, etc.). De estas aplicaciones "históricas" del material tampoco debemos olvidarnos de los postes, ya que en esta aplicación la madera en rollo ha sido la reina hasta hace muy recientes fechas.

El uso de elementos estructurales en rollo ha crecido en los últimos años debido a la construcción rural y a la rehabilitación de estructuras agropecuarias pero aún así, el mercado al que actualmente logran acceder, sigue siendo pequeño. Uno de los motivos principales de este recelo en su empleo se debe a la falta de conocimiento de las características estructurales de la madera en rollo de pequeño diámetro.

Es necesario apuntar que los mayores desarrollos tecnológicos en este campo han tenido lugar en Estados Unidos (1, 2, 4, 5, 6), si bien éstos, hasta el momento, se han producido fundamentalmente dentro del ámbito de la madera de trituración. En este sentido podemos citar la actual existencia de materiales de uso estructural, compuestos de partículas (más o menos alargadas) y adhesivos, tales como el OSB (Oriented Strand Boards), PSL (Paralell Strand Lumber), Scrimber, etc., hoy habituales en el mercado de la madera. Recientemente un trabajo de Hernández *et al.* (3) abre la posibilidad a su empleo como materia prima para la fabricación de pequeños elementos de madera laminada encolada.

A nivel europeo la realización del proyecto FAIR CT95-0091 (7) llevado a cabo para analizar la situación europea al respecto, supuso un punto de inflexión al plantear conclusiones muy relevantes. Tras la evaluación de las diversas alternativas posibles, los autores de este trabajo concluyeron que era el mercado de la construcción el que ofrecía más posibilidades para la rentabilización económica de este producto, máxime teniendo en cuenta que de los ensayos y evaluaciones efectuados se deducía que la madera en rollo de pequeño diámetro era capaz de cumplir con las exigencias de la Directiva de Productos de la Construcción (DPC). No obstante, los autores del trabajo detectaron una serie de carencias que era necesario salvar para conseguir el eficaz empleo de este material en la construcción, tales como la necesidad de determinar sus propiedades mecánicas, por especies y procedencias, la necesidad de poner a punto métodos de selección, clasificación y procesado, así como la de diseñar sistemas eficaces de unión y el planteamiento de soluciones constructivas tipo.

A nivel español el proyecto RTA 2001-0354FOR se planteó como objetivo principal avanzar en este sentido, caracterizando la madera en rollo de pequeño diámetro de *Pinus nigra* (Pino laricio) y diseñando paralelamente nuevos sistemas para su clasificación resistente.

Esta especie, que ya fue objeto en el pasado de una exhaustiva caracterización físico-mecánica y tecnológica (8) de la madera aserrada procedente de árboles cortados en turno, se ha revelado como productora de la madera más competitiva a nivel nacional para el mercado de la construcción.

Recientemente el estudio de las propiedades y aplicaciones estructurales de la madera en rollo y las implicaciones tecno-

<sup>1</sup> Las claras constituyen una práctica básica de la gestión forestal de masas semi-naturales, consistente en la extracción de pies sobrantes o de inadecuada conformación, todo ello para conseguir abrir la masa, que entre la luz, eliminar competencia excesiva por los nutrientes y el agua y así conseguir que los pies restantes crezcan con más vigor y dimensiones.

lógicas y de proceso que ello conlleva han sido objeto de diversos estudios (1, 2, 5, 9, 10, 11).

Centrándonos en los métodos de evaluación no destructiva de la resistencia de la madera en rollo (1, 5, 9, 10, 11, 12, 13, 14) parece ser el de transmisión de ondas ultrasónicas el que, desde un punto de vista práctico, presenta las mayores ventajas.

El principio de los ultrasonidos aplicado a la evaluación de las propiedades de la madera se basa en la relación que existe entre la velocidad de propagación longitudinal de la onda y las propiedades elásticas del medio que atraviesa (15, 16). Este método de evaluación aporta información de tipo general sobre la calidad de la pieza, por lo que si se desease incluir en la evaluación un cierto conocimiento sobre la distribución e incidencia de las particularidades del crecimiento de la madera sería necesario combinarlo con el empleo de otros métodos que aportan información más particularizada (17), tales como la densitometría por rayos X o la resistografía (18), la evaluación visual o el empleo de técnicas "mecánicas", como puede ser la extracción de tornillos en determinados puntos (19).

La técnica de transmisión de ultrasonidos ha sido ampliamente investigada y utilizada para la inspección de maderas aserradas en servicio (20, 21, 22, 23) y para la caracterización de madera en rollo (13), madera aserrada (24, 25, 26) y derivados de la madera (27). Sandoz (16) investigó su uso en la determinación de la resistencia de la madera aserrada estructural de abeto y concluyó la posibilidad de realizar una efectiva clasificación a partir de los datos de las velocidades medidas. Böstrom (28) estudió y comparó la utilización de cuatro métodos de clasificación automática de la resistencia también sobre madera aserrada de abeto, entre los que se encontraba el método de ultrasonidos, concluyendo la mejora de la predicción de este método al considerar la densidad de la pieza.

Pese a que el método de transmisión de ultrasonidos suele aportar una información de tipo general sobre la calidad de la pieza o rollo que se evalúa, mediante el empleo de procedimientos especiales es posible su aplicación en la detección de defectos localizados, tales como pudriciones o ataques de termitas (20), fendas internas y superficiales producidas tras el secado (29), presencia de nudos (30) y desviaciones de fibras (15, 31). Incluso existen estudios dirigidos a estimar el punto local del defecto que inicia el mecanismo de rotura y que determina el

módulo de rotura (17) y el estudio de su propagación (32).

El objetivo del presente trabajo es aportar los resultados obtenidos en el proyecto RTA2001-0354FOR referidos al diseño de nuevos métodos de evaluación no destructiva de las propiedades mecánicas de la madera en rollo delgada de pino laricio (*Pinus nigra* subsp. *Saltzmanii*). En este trabajo se evalúa y pone a punto la técnica de transmisión de ultrasonidos

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

De la realización de trabajos anteriores (8) se sabía que no existían diferencias significativas entre las propiedades físico-mecánicas de las dos principales Regiones de Procedencia del pino laricio (33), las 7 ("Sistema Ibérico") y 8A ("Cazorla-Alcaraz"). Al contar con la colaboración de la empresa "Ayuntamiento de Cuenca Maderas SA" y el permiso del Ayuntamiento de Cuenca se procedió a centralizar todos los trabajos de selección y preparación de muestras en los Montes de Cuenca (Región 7).

El muestreo se llevó a cabo sobre señalamientos regulares de madera en los Montes de Cuenca, contando para ello con la ayuda del Aserradero "Ayuntamiento de Cuenca Maderas SA", en cuyas instalaciones se procedió a la preparación (descortezado, corte en longitud, mecanizado perimetral, secado y tratamiento) del material de ensayo. En total se muestrearon y ensayaron (Tabla 1) 445 rollizos torneados, de diámetros de 8, 10, 12 y 14 cm así como de longitudes de 2; 2,5 y 3 m, extraídos todos ellos de claras y puntas.

Para su torneado perimetral se hizo uso de una torneadora OSWALD propiedad del aserradero colaborador. Convenientemente torneados, todos los rollizos fueron almacenados bajo cubierta hasta su secado.

Antes de su ensayo, y previo secado al aire bajo techado y hasta el 14% de humedad, todas las piezas fueron analizadas una por una, inventariando sus defectos y particularidades (diámetros máximos, mínimos y medios, variación diamétrica en testas, tamaño de los nudos y su distribución, tamaño de las fendas, existencia y posición de verticilos, existencia de madera juvenil, tamaño medio y máximo de los anillos de crecimiento, etc.) de acuerdo con las metodologías establecidas al efecto por la norma UNE-EN 1310:1997 (34). El objetivo de esta inventariación cualitativa era poder, posteriormente, clasificar el material con cualquier norma de clasificación visual posible y analizar el

efecto real de cada una de las particularidades de crecimiento inventariadas con el fin de poder incluirlas, con el peso adecuado, en la norma de clasificación a proponer.

Paralelamente a su inspección visual en todos los rollizos se determinó la velocidad de transmisión de ultrasonidos, haciendo uso de un equipo SYLVATEST DUO. Este equipo consta de un par de sondas de punta cónica, una actuando como emisora de la onda (frecuencia de 22 kHz) y otra como receptora y una estación que recoge el tiempo que tarda la onda en atravesar la pieza de madera. Para conseguir el perfecto acoplamiento con la madera se efectuaron orificios de 5 mm de diámetro y 10 mm de profundidad haciendo uso de una broca especial.

Para analizar la influencia que en la medida de la velocidad de transmisión de la onda podría tener la forma de realizarlas, se determinó la velocidad colocando los palpadores en diferentes localizaciones dentro de la estructura del rollizo. Para ello se practicaron orificios en la médula, la albura y el duramen, de forma que se tuvieran datos de mediciones albura-albura, albura-duramen y médula-médula. También se efectuaron medidas indirectas colocando los palpadores no en las testas sino en la periferia, en secciones ubicadas a 20 cm de las testas.

Tras el análisis de los datos resultantes de cada tipo de medidas, se concluyó que las efectuadas en albura-albura, albura-duramen y médula-médula no presentaban diferencias estadísticamente significativas, mientras que sí lo hacían respecto a la medición indirecta. Debido a que no todos los rollizos de la muestra presentaban duramen y que los taladros sobre la médula, caracterizado por ser un material blando, no permitían un ajuste adecuado de la sonda al orificio, se optó por emplear sólo las medidas albura-albura (directa) e indirecta.

El cálculo del módulo de elasticidad dinámico se obtiene de la relación que existe entre la velocidad de propagación longitudinal de la onda y las propiedades elásticas de la madera, que viene expresada por la ecuación:

$$\text{Módulo de elasticidad dinámico} \\ = \text{Densidad} * (\text{Velocidad})^2 \quad [1]$$

Analizadas físicamente las muestras y determinadas en ellas las velocidades de transmisión de los ultrasonidos por disposición directa (albura-albura) e indirecta, se procedió a su ensayo mecánico hasta la rotura. Para realizar este ensayo mecánico se siguió la metodología establecida

en la norma europea EN 14251:2003 (35), si bien, y para evitar que los rollos rodaran durante el ensayo, fue necesario diseñar un sistema de cunas (con forma cóncava en la zona de contacto con el rollizo), tanto para el soporte inferior de las piezas como para la transmisión de la fuerza. Adicionalmente a este sistema de cunas también fue necesario diseñar un sistema de fijación de las perchas (necesarias para la determinación de la deformación en la línea neutra) que incorporan los deformadores dado que era necesario evaluar el módulo de elasticidad sin las oscilaciones que se observaban cuando se empleaba el mismo método usado en el ensayo de la madera aserrada. En la Figura 1 puede apreciarse un esquema del método de ensayo seguido.

Diseñado un equipo propio de ensayo (no citado en la norma de ensayo) y comprobada su funcionalidad y aplicabilidad al caso, se procedió al ensayo del total de los 445 (Tabla 1) rollos muestreados.

Una vez ensayados los rollizos se calcularon los valores de la tensión última a flexión, (*f<sub>m</sub>*), del módulo de elasticidad global (*E<sub>g</sub>*) y de la densidad (en la zona de rotura).

Para el cálculo de las propiedades físico-mecánicas antes citadas se aplicó la metodología considerada en la norma UNE-EN 384 (36). Los valores del módulo de elasticidad (*E<sub>g</sub>*) y de la densidad fueron previamente corregidos por humedad según establece dicha norma. La resistencia a la flexión (*f<sub>m</sub>*), fue corregida tomando en consideración la longitud entre apoyos inferiores y el diámetro, siendo necesario para este último calcular la fórmula a aplicar considerando un valor de referencia de 120 mm de diámetro.

De acuerdo con la metodología comúnmente aceptada en este tipo de trabajos, los valores de resistencia fueron aportados por lotes de calidad homogénea (en este caso conjunto de rollizos con valores de paso de onda dentro de un mismo intervalo previamente establecido). Con posterioridad estas clases de calidad fueron asignadas a clases de resistencia de la norma UNE-EN 338 (37), siguiendo el sistema establecido de asignación en función del valor tomado por las tres principales variables clasificadoras: módulo medio de elasticidad a la flexión y los valores característicos de la tensión última a la rotura en flexión y de la densidad.

El análisis de los datos para obtener los intervalos de valores de la veloci-

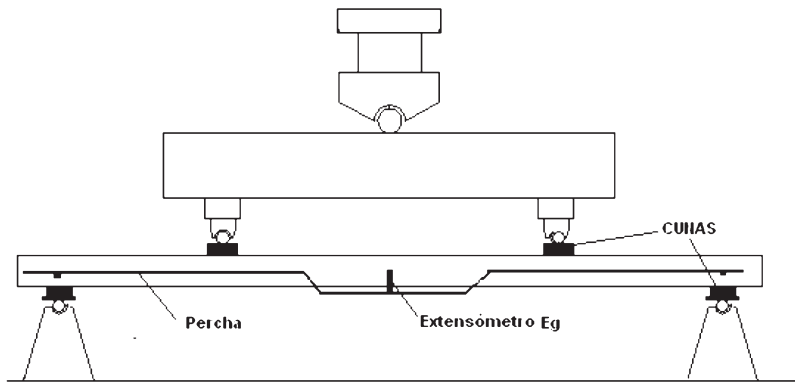


Figura 1. Esquema de ensayo según EN 14251:2003.

Tabla 1. Propiedades mecánicas de los rollos torneados de la muestra ensayada (n = 445), dados por clases diamétricas

Datos muestrales y propiedades mecánicas								
Diámetro	Longitud	Nº muestras	Densidad		$E_g$	$f_m$		
			Media	Característica		Media	Característica	
(cm)	(m)		(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	
8	2	120	460,5	390,5	6574	39,2	24,0	
10	2,5	120	447,5	378,9	7031	39,9	25,0	
12	3	105	472,8	401,1	7970	44,3	24,7	
14	2,5 y 3	100	456,5	370,1	7109	43,6	22,3	
TOTAL	-	445	462,2	398,1	7100	41,2	24,6	

dad de la onda que permitían establecer las distintas clases de calidad luego asignables a distintas clases de resistencia, se realizó mediante el estudio de la distribución de la muestra por métodos de estadística clásica, empleando para ello el paquete estadístico STATGRAPHICS 5.0.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1 quedan reflejados los resultados medios y característicos globales obtenidos en la determinación de las propiedades mecánicas y la densidad de los rollizos torneados, expresados tanto por clases diamétricas como para el total de la muestra.

Los valores característicos que figuran en la Tabla 1, determinados de acuerdo con los principios establecidos en la norma UNE-EN 384 (36), son necesarios para, posteriormente, poder asignar las poblaciones a clases de resistencia de la norma UNE-EN 338 (37).

De los datos de la Tabla 1 y de acuerdo con los valores mínimos establecidos en la norma de clases resistentes UNE-EN 338 (37), si

se ignorasen los valores del módulo de elasticidad medio sería posible asignar el conjunto de las clases diamétricas anteriores a la clase de resistencia C24, salvo en el caso de la clase diamétrica de 14 cm que lo sería a la C22. Esta asignación, no obstante, sería de C14 si se emplease estrictamente el método de asignación establecido en la norma UNE-EN 338 (37), que se basa en el empleo simultáneo de las tres propiedades indicadoras: valor característico de la tensión última a la rotura, valor medio del módulo de elasticidad en flexión y valor característico de la densidad.

De acuerdo con lo citado en el párrafo anterior es posible llegar a la conclusión de que es el módulo de elasticidad el que lleva a esta madera a ser clasificada con clases de resistencia reducidas, ya que la resistencia característica observada es propia de clases muy superiores, como corresponde a una sección circular que maximiza su comportamiento mecánico debido a que sus momentos de inercia son menores que en secciones cuadradas equivalentes.

Todo lo anteriormente visto lleva a la conclusión de que la propiedad limitante en el uso resistente de esta madera es el valor

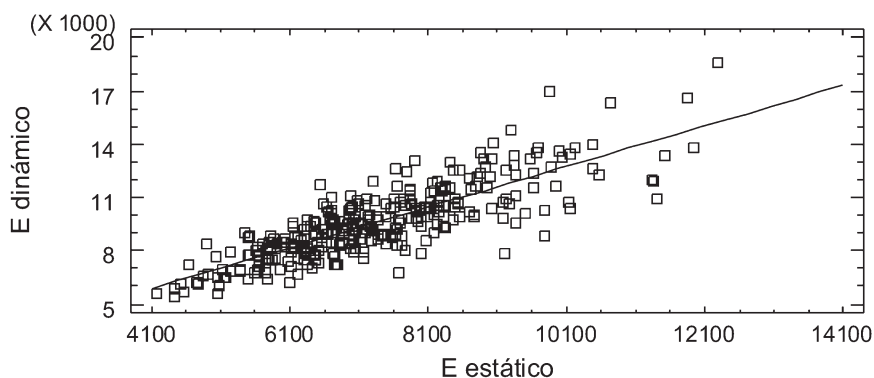


Figura 2. Relación entre los módulos de elasticidad dinámico y estático.

del módulo de elasticidad, de ahí el interés en poner a punto sistemas de evaluación no destructiva de la calidad basados en la correcta estimación de esta variable. Es precisamente en este campo en el que el método de los ultrasonidos ha presentado mejores resultados.

Para evaluar la capacidad estimadora del módulo de elasticidad dinámico respecto del módulo de elasticidad estático se hizo uso de la técnica de regresión lineal, considerando el coeficiente de regresión como una primera estima de la bondad del método.

En la Figura 2 queda reflejado de forma gráfica el modelo lineal ajustado por técnicas de regresión lineal, modelo que resulta ser el siguiente:

$$E_{\text{dinámico}} = 1183,87 + 1,14502 * E_{\text{mg}} \quad (R^2 = 0,68) \quad [2]$$

Este resultado es considerado como aceptable y en la línea de los resultados conocidos en trabajos de la misma naturaleza, si bien efectuados sobre otras maderas. Así Wang *et al.* en 2002 (14) y trabajando sobre pino silvestre llegaron a ajustar modelos con un coeficiente de determinación del 0,75 y Sik Jang en 2000 (12) y trabajando sobre alerce europeo llegó a valores del coeficiente

de hasta el 0,84, si bien con un material notablemente más homogéneo que el aquí ensayado.

Otro análisis planteado durante la ejecución del proyecto era el de evaluar la capacidad de la técnica de ultrasonidos para detectar la presencia de determinadas particularidades del crecimiento que resultan en la práctica minoradoras del comportamiento mecánico del material. En concreto se evaluó la capacidad de detección de presencia de madera juvenil, ya que esta particularidad anatómica es habitualmente considerada como un factor de reducción de la resistencia y mayorador de elasticidad a flexión del material, tal y como queda demostrado en la Figura 3, donde se aprecia una diferencia significativa entre la resistencia media del material con madera juvenil respecto del material sin madera juvenil.

Analizando los resultados de la Figura 4 se aprecia que respecto de la velocidad de transmisión de la onda ultrasónica también el material con y sin madera juvenil exhiben comportamientos estadísticamente distintos, siendo entonces posible ajustar el método para detectar la presencia o ausencia de esta particularidad anatómica en el material.

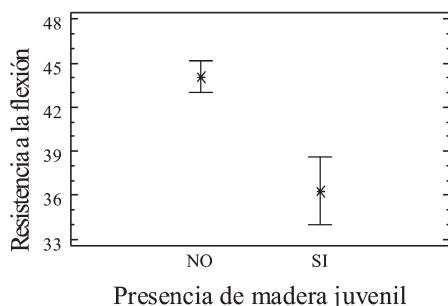


Figura 3. Efecto de la madera juvenil sobre la resistencia.

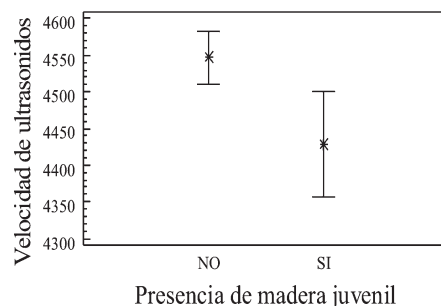


Figura 4. Efecto de la madera juvenil sobre la velocidad de transmisión de la onda.

**Tabla 2. Velocidades de paso y rendimientos de clases resistentes, medidas albura-albura**

MEDIDA ULTRASONIDOS ALBURA-ALBURA			
	C22/C16/R	C18/C14/R	C18/R
Velocidad (m/s)	4880 / 4375 / -	4570 / 4105 / -	4570 / -
Rendimiento (%)	16,3 / 52 / 31,7	36/42,5/21,5	36/64

R: Rechazos

**Tabla 3. Velocidades de paso y rendimientos de clases resistentes para medidas indirectas**

MEDIDA ULTRASONIDOS INDIRECTA		
	C18/C14/R	C18/R
Velocidad (m/s)	4595 / 4165 / -	4595 / -
Rendimiento (%)	41,3/39,2/19,5	41,3/58,7

R: Rechazos

**Tabla 4. Rendimientos y propiedades mecánicas, dados para la clasificación óptima**

Asignación	C18/C14/Rechazo		
	C18	C14	R
CLASES objetivo	C18	C14	R
nº muestras	123	233	89
Rendimiento (%)	27,6	52,4	20,0
$f_k$ (N/mm <sup>2</sup> )	36,3	25,9	19,7
$E_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	8590	7121	5425
Densidad <sub>k</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	406,9	391,5	289,1
CLASE real	C18	C16	<C14

En la Tabla 2 se muestran los resultados del análisis de las velocidades de onda medidas desde las testas y en configuración directa albura-albura. En dicha tabla, junto con los valores límite o de paso de la velocidad de transmisión de la onda que permiten clasificar al material directamente en una determinada clase resistente dentro de una concreta combinación de clases, es posible también apreciar el detalle de los rendimientos clasificatorios obtenidos. El estudio se realizó sobre el total de la muestra para las agrupaciones de clases resistentes que se consideraron en un principio más apropiadas para la población en función de los rendimientos obtenidos.

Del análisis de los resultados de la Tabla 2, se puede concluir que el menor nivel de

rechazos se alcanza con la agrupación de clases C18/C14/R así como que con la agrupación C22/C16/R es posible obtener que el 16,3% del material sea asignado a una clase resistente tan alta como C22. De las tres agrupaciones analizadas parece que la más apropiada a las características de este material es la C18/C14/R.

Dado que la realización de medidas indirectas exclusivamente en la cara de la madera en rollo delgada también se considera un método apropiado para la predicción de la clase resistente y que además es un método de gran utilidad para la evaluación de estructuras en servicio, en la Tabla 3 se recogen los resultados de idéntico análisis al anterior pero empleando los valores de la velocidad medida de forma indirecta

La comparación entre sí de los resultados contenidos en las Tablas 2 y 3 llevan a comprobar la gran semejanza habida entre los resultados medidos de forma directa e indirecta, lo que permite concluir sobre la aplicabilidad del método también en la evaluación de la madera rolliza ya puesta en obra.

Si se comparasen los resultados de las Tablas 2 y 3 para la agrupación C18/C14/R con los obtenidos mediante una clasificación óptima del material (Optimal Rankig) efectuada en los términos establecidos en la norma EN 14081-2:2005 (38) y reflejada en la Tabla 4, se podría llegar a concluir que el método de transmisión de ultrasonidos resulta muy eficaz en la clasificación del material ya que aumenta la cantidad de madera clasificada como C18 y disminuye la cantidad de rechazos.

#### 4. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados puestos de manifiesto en el presente estudio, es posible concluir que el método de transmisión de ultrasonidos resulta eficaz en la clasificación de rollos de pequeño diámetro de pino laricio, tanto en fábrica como puestos ya en obra.

Para conseguir este fin en las Tablas 2 y 3 se aportan los valores de paso a emplear para clasificar el material según las diversas calidades mecánicas, agrupadas en combinaciones de clases resistentes.

La extrapolación de estos resultados a otras especies exigirá la realización de comprobaciones previas ya que la estructura anatómica y propensión a la presencia de determinadas características relacionadas con el crecimiento de la madera (nudosidad, inclinación de la fibra, presencia de madera juvenil, etc.) varían con la especie de madera considerada.

Análogamente ha quedado demostrada la aplicabilidad del método en la predicción de la presencia de determinadas anomalías y particularidades del crecimiento de la madera, en especial de la madera juvenil.

Puesto que este método se adapta, tal y como ya hemos visto, a la clasificación de madera en rollo de pequeño diámetro, puede resultar un excelente complemento a la clasificación visual del material, método que en la actualidad es el más empleado en la

práctica ya que resulta barato, sencillo y muy seguro aunque si bien a costa de rechazar excesiva cantidad de material, parte del cual podría ser perfectamente apto para el trabajo estructural de haberse empleado sistemas más eficaces de clasificación.

Dado que se ha demostrado que el método de medida denominado "indirecto" es igualmente válido a la hora de clasificar el material, se puede concluir que puede ser una adecuada herramienta para la predicción de la calidad mecánica de la madera ya puesta en servicio.

Como posibles futuros trabajos en este campo, se hace constar el interés que podría tener la aplicación de los ultrasonidos al estudio de los defectos internos de la madera en rollo para así conseguir su aplicación a la selección de los rollos previa al aserrado, lo que conllevaría poder obtener una madera estructural de mayor calidad, ahorrando con ello tiempo y costes.

#### AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por el Programa Nacional de I+D sobre Recursos y Tecnologías Agroalimentarias, proyecto RTA2001-0354FOR. Se agradece la colaboración prestada por la gerencia y personal de la empresa colaboradora "AYUNTAMIENTO DE CUENCA MADERAS S.A." así como por la del personal del Laboratorio de Estructuras y carpintería del CIFOR, sin cuya intervención hubiera sido imposible su realización

#### BIBLIOGRAFÍA

- (1) Wolfe, R. 2000. Research challenges for structural use of small-diameter round timbers. *Forest Products Journal*. Vol. 50, nº 2 pp. 21-29.
- (2) Levan-Green, S., Livingston, J., 2001. Exploring the uses for small-diameter trees. *Forest Products Journal* 51(9): 10-21.
- (3) Hernández, R., Green, D.W., Kretschmann, D.E., Verrill, S.P., 2005 Improved utilization of Small-Diameter Ponderosa pine in glued laminated timber. USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, Research Paper FPL-RP-625, 388 p. Fujii, Y. 1990. "Using acoustic emission monitoring to detect termite activity in wood", *Forest Products Journal*, Vol. 40, Nº.1, pp. 34-36.
- (4) FPL, 1998. Forest Products Laboratory Research program on small-diameter material. USDA Forest Service. General Technical Report FPL-GTR-110.
- (5) Wolfe, R. y Moseley, C. 2000. Small-diameter log evaluation for value-added structural applications. *Forest Products Journal*. Vol. 50, nº 10 pp. 48-58.
- (6) Bumgardner, M.; Hansen, B.; Schuler A. y Araman, P., 2001. Options for small-diameter hardwood utilization: past and present. *Hardwoods-an underdeveloped resource?* Proceedings of the annual meeting of the Southern Forest Economics Workers, Lexington, Kentucky, 7p.
- (7) Ranta-Maunus, A., 1999. Round small-diameter timber for construction. Final report of project FAIR CT 95-0091. VTT, Technical Research Centre of Finland. VTT Publications 383. ESPOO. [www.umeme.maine.edu/mick/Projects/SDT/sdt.pdf](http://www.umeme.maine.edu/mick/Projects/SDT/sdt.pdf)
- (8) Conde, M., 2003. Caracterización de la madera estructural de *Pinus nigra* Subsp. *Salzmannii*. Madrid (España). Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S.I. Montes.
- (9) Erikson, R. G., Gorman, T.M., Green, D.W., Graham, D., 2000. Mechanical grading of lumber sawn from small-diameter lodgepole pine, ponderosa pine, and grand fir trees from northern Idaho. *Forest Products Journal* 50(7-8), pp. 59-65
- (10) Lindstrom, H., Harris, P., Nakada, R., 2002. Methods for measuring stiffness of young trees. *Holz Als Roh-Und Werkstoff* 60(3), pp. 165-174



- (11) Schad, K.C., Schmoltd, D.L., R. J. ROSS, R.J., 1996. Nondestructive methods for detecting defects in softwood logs. Forest Products Laboratory: 13 p.
- (12) Sik Jang, S., 2000. Evaluation of lumber properties by applying stress waves to larch logs grown in Korea. Forest Products Journal. Vol. 50, nº 3, pp. 44-48.
- (13) Wang, X.; Ross, R.J.; Mattson, J.A.; Erickson, J.R.; Forsman, J.W.; Geske, E.A.; Wehr, M.A. 2001. Several nondestructive evaluation techniques for assessing stiffness and moe of small-diameter logs Res. Paper FPL-RP-600. Madison, WI: US. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 12 p.
- (14) Wang, X.; Ross, R.J.; Mattson, J.A.; Erickson, J.R.; Forsman, J.W.; Geske, E.A. y Wehr, M. A., 2002. Nondestructive evaluation techniques for assessing modulus of elasticity and stiffness of small-diameter logs. Forest Products Journal. Vol. 52, nº 2, pp. 79-85.
- (15) Bucur, V. 1984. Relationship between grain angle of wood specimens and ultrasonic velocity, Catgut Acoustical Society Inc. 41, p. 30-35.
- (16) Sandoz, J.L. 1989. Grading of construction timber by ultrasound. Wood Science and Technology, 23, pp. 95-108.
- (17) Sandoz, J.L.; Benoit, Y. y Demay, L. 2000. Wood testing using acousto-ultrasonic, 12<sup>th</sup> International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, pp. 97-104.
- (18) Bucur, V. 1985. Ultrasonic, hardness and x-ray densitometric analysis of wood, Ultrasonics, pp. 269-275.
- (19) Németh, L. 2000. Evaluation of built-in timbers by non-destructive testing, 12<sup>th</sup> International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, pp. 457-461.
- (20) Fujii, Y. 1990. Using acoustic emission monitoring to detect termite activity in wood, Forest Products Journal, Vol. 40, N<sup>o</sup>.1, pp. 34-36.
- (21) Arriaga, F.; García, L.; Gebremedhin, K. y Peraza, F. 1992. Estructuras de madera: restauración. estudio experimental de la capacidad resistente de forjados realizados con vigas de madera, Memoria del proyecto de investigación PAT 90-0224, Vol. 1.
- (22) Ross, R.J. y Hunt, M.O. 2000. Stress wave timing non-destructive evaluation tools for inspecting historic structures. a guide for use and interpretacion, Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-119. Madison, WI: US. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 15 p.
- (23) Ross, R.J.; Pellerin, R.F.; Forsman, J.W.; Erickson, J.R.; Lavinder, J.A. 2001. Relationship between stress wave transmission time and compressive properties of timbers removed from service, Res. Note FPL-RN-280. Madison, WI: US. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 4 p.
- (24) Hermoso, E; Fernández-Golfín, J.I. y Díez, M.R., 2003. Evaluación de la clasificación resistente de la madera estructural mediante ultrasonidos. 10<sup>o</sup> Congreso Nacional de Ensayos No Destructivos, Cartagena, España, actas pp. 187-195.
- (25) Arriaga, F.; Íñiguez, G.; Esteban, M.; Fernández-Golfín, J.I., 2006. Structural Tali timber (*Erythrophleum ivorense* A. Chev., *Erythrophleum suaveolens* Brenan.): Assessment of strength and stiffness properties using visual and ultrasonic methods. Holz als Roh und Werkstoff. Vol. 64, nº 5, pp. 357-362.
- (26) Conde, M., Fernández-Golfín, J.I., Hermoso 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. Aprobado para publicación en *Mater. Construcc.*
- (27) Bekhta, P.; Niemz, P.; Kucera, L. 2000. The study of sound propagation in the wood-based composite materials. 12<sup>th</sup> International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, pp. 33-42.
- (28) Böstrom, L. 1994. Machine strength grading: comparison of four different systems, Swedish National Testing and Research Institute, Building Technology SP Report 49, 57 p.
- (29) Fuller, J.J.; Ross, R.J. y Dramm, J.R. 1994. Honeycomb and surface check detection using ultrasonic nondestructive evaluation, Res. Note FPL-RN-0261. Madison, WI: US. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 6 p.
- (30) Karsulovic, J.T.; León, L.A. y Gaete, L. Ultrasonic detection of knots and annual ring orientation in *Pinus radiata* lumber, Wood and Fiber Science, Vol. 32, N<sup>o</sup> 3, 2000, pp. 278-286.
- (31) Kabir, M.F. 2001. Prediction of ultrasonic properties from grain angle, Journal of the Institute of Wood Science. Vol. 15, N<sup>o</sup>.5 (89), pp. 235-246.
- (32) Reiterer, A.; Stanzl-Tschegg, E.; Tschegg, K. 2000. Mode I fracture and acoustic emission of softwood and hardwood, Wood Science and Technology, 34, pp. 417-430.
- (33) Catalán Bachiller, G. *et al.*, 1991. Regiones de procedencia *Pinus sylvestris* L., *Pinus nigra* Arn. *Subsp salzmannii* F. Monografía ICONA, ISBN 84-8014-004-6.
- (34) UNE-EN 1310:1997. Madera aserrada y madera en rollo. Método de medida de las singularidades.
- (35) EN 14251:2003. Structural round timber- Test methods.
- (36) UNE-EN 384: 2004 Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad.
- (37) UNE-EN 338: 1999. Madera estructural. Clases resistentes.
- (38) EN 14081-2: 2005. Timber structures. Strength graded structural timber with rectangular cross section. Part 2: Machine grading. Additional requirements for initial type testing.

\* \* \*