

Estimación de la densidad de la madera aserrada de conífera mediante técnicas no destructivas de arranque de tornillos y penetrómetro y su aplicación en la estimación del módulo de elasticidad

Density estimation by screw withdrawal resistance and probing in structural sawn coniferous timber, and modulus of elasticity assessment

Ignacio Bobadilla Maldonado*, Miguel Esteban Herrero*, Guillermo Íñiguez González**, Francisco Arriaga Martitegui***, Daniel Ballarín Montesinos****, José Palacios Monteagudo*

RESUMEN

Se han efectuado medidas indirectas de la densidad de la madera mediante métodos no destructivos, como la penetración de una varilla con penetrómetro o el arranque de tornillos, sobre probetas procedentes de 395 vigas de tamaño estructural de *Pinus radiata* D. Don (155), *Pinus sylvestris* L (120), y *Pinus nigra* Arn (120). El objeto es tratar de establecer una metodología, para la estimación en obra de la densidad, cuando se realizan tareas de mantenimiento, rehabilitación o restauración.

Se han obtenido relaciones estadísticamente significativas entre los valores obtenidos en los ensayos no destructivos y la densidad real de las piezas. Se proponen tres modelos para la estimación de la densidad basados en el resultado del ensayo no destructivo de arranque de tornillos con coeficientes de determinación (R^2) de 48,5%, 49,5% y 49,9%. Por último, se plantea, si se desconoce la especie, el uso de un modelo común, que permite estimar la densidad con un R^2 de 48,6%. Este dato, permite posteriormente la estimación, junto con los sistemas de ultrasonidos, del módulo de elasticidad de las piezas y su clasificación.

850-12

Palabras clave: arranque de tornillo, penetrómetro, pilodyn, densidad, ensayos no destructivos, madera.

SUMMARY

*The results of probing 395 sawn pieces of Radiata pine (*Pinus radiata* D. Don), Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and Laricio pine (*Pinus nigra* Arn. ssp. *salzmannii*) from Spanish sources are presented. Specimens had a cross section from 150 x 200 mm, 150 x 250 mm, and 200 x 250 mm. The Screw Withdrawal Force Meter (SWFM) developed by the Wood NDT Laboratory of the University of Western Hungary, in Sopron, and the Pilodyn 6J Wood Tester by Proceq, are the items of equipment used to measure screw withdrawal force and penetration depth, respectively.*

Based on our results, this paper concludes that for structural coniferous timber the density values estimated from probing measurements are reliable. There is a positive correlation between non-destructive parameters and density (a coefficient of determination r^2 of 48.5% to 49.9% is obtained). The authors believe that it is possible to use probing with ultrasonic methods as a good combined nondestructive technique to improve the results of visual grading and modulus of elasticity assessment, at least as an additional parameter in structural sawn timber.

Keywords: screw withdrawal, pilodyn density, penetration depth, non-destructive, wood.

UPM

*Dr. Ingeniero de Montes

**Ingeniero de Montes

***Dr. Arquitecto

**** Ingeniero Técnico Forestal

Persona de contacto/Corresponding author: i.bobadilla@upm.es ([Ignacio Bobadilla Maldonado](mailto:i.bobadilla@upm.es))

Fecha de recepción: 7-III-07

Fecha de aceptación: 17-V-07

1. INTRODUCCIÓN

En la evaluación de estructuras existentes, ya sea en obras de rehabilitación o de consolidación, las técnicas no destructivas acústicas (vibraciones inducidas o ultrasonidos), pueden resultar, en muchos casos, de gran utilidad en la toma de decisiones. La aplicación de estas técnicas para la estimación de las propiedades mecánicas, requiere conocer la velocidad de propagación de las ondas a través del material, y su densidad, con el fin de deducir el módulo de elasticidad dinámico según la ecuación $E_d = V^2 \times \rho$, donde V es la velocidad y ρ la densidad del material (1) (2). La velocidad resulta fácil de obtener con el equipo adecuado, pero, la determinación de la densidad en piezas situadas en una estructura resulta complicada. Se podrían utilizar valores medios recogidos de la bibliografía técnica, suponiendo que se conozca la especie, pero en numerosas ocasiones la especie es desconocida, y además, debido a la variabilidad de comportamiento de la madera dentro de una misma especie, sería un dato muy impreciso.

El objeto de este trabajo es comprobar la validez de las técnicas no destructivas de arranque de tornillo y penetrómetro, para la estimación de la densidad de las piezas en obra.

La relación entre la resistencia a la penetración o al arranque de clavos o tornillos y la densidad y resistencia de la madera ha sido investigada con anterioridad arrojando resultados prometedores (3)(4), llegando a la conclusión de que resulta una metodología muy útil junto con otros sistemas de medición indirecta como los ultrasonidos para la estimación del módulo de elasticidad del material (5)(6).

La relación entre la densidad de la madera y el penetrómetro ha sido extensamente estudiada para la clasificación de árboles en pie desde finales de los años 70, encontrándose en la mayor parte de los casos importantes relaciones estadísticas (7-12). Asimismo se ha investigado su relación con los procesos de degradación fúngica también con buenos resultados (13) y su relación con el contenido de humedad de la madera (14). Sin embargo, apenas hay referencias acerca de su aplicación en la estimación de la densidad de madera aserrada estructural.

2. MATERIALES Y EQUIPOS

2.1. Material de ensayo

En este trabajo se han ensayado tres lotes de piezas de madera aserrada de conífera.

El primero, formado por 155 vigas de gran escuadría de *Pinus radiata* D. Don del País Vasco de secciones de 150 x 200 y 150 x 250 mm (muestras procedentes del proyecto AGL2004-01598 FOR). El segundo, formado por 120 vigas de madera de *Pinus sylvestris* L. de la provincia de Segovia, de 150 x 200 y 200 x 250 mm. Por último, un tercer grupo de 120 vigas de madera de *Pinus nigra* Arn. procedente de Cuenca, de las mismas secciones que en el caso del pino silvestre (estos dos últimos lotes procedentes del proyecto AGL2002-00813).

2.2. Equipos

El penetrómetro

Se trata de un equipo de concepción y manejo muy simples, ya que se trata de disparar sobre la madera, una varilla metálica percutora, impulsada por la fuerza elástica de un resorte.

El equipo fue diseñado para estimar la densidad y la dureza de la madera tanto aserrada como de árboles en pie.

Es considerado "no destructivo" ya que únicamente se realiza un pequeño orificio de unos 2,5 mm de diámetro y con una profundidad variable entre 5-20 mm, dependiendo de la resistencia a la penetración que ofrezca la madera. En ningún caso, este orificio causa daños importantes a la madera o al vegetal vivo.

El utilizado en este trabajo es el equipo Pilodyn, modelo 6J Forest de la empresa Proceq, figura 1.

El equipo de arranque de tornillo

El ensayo de arranque de tornillo en el ámbito del presente trabajo, se efectúa con la máquina portátil "Screw Withdrawal Resistance Meter" de Fakopp (en adelante SWRM), y que consta básicamente de tres partes, figura 2.

Un dispositivo de sujeción del tornillo, un transductor que registra la fuerza máxima de arranque, y un husillo, para la extracción del tornillo.

3. METODOLOGÍA

3.1. Metodología general

De las piezas estructurales comentadas en el apartado anterior, se han obtenido 395 probetas, para la realización de los ensayos que más adelante se detallan. Las

probetas objeto de ensayo fueros extraídas de las piezas tal y como se muestra en la figura 3.

Con cada una de las 395 probetas así obtenidas de las tres especies, se ha seguido el proceso que se describe a continuación:

- Acondicionamiento en cámara climática a 20 ± 2 °C y $65\pm 5\%$ de HR.
- Medidas dimensionales, de masa, y cálculo de la densidad, ρ (kg/m^3).
- Medida del contenido de humedad con xilohigrómetro de resistencia
- Ensayo de penetración de una varilla (Pilodyn), determinando la profundidad de penetración, d (mm).
- Ensayo de arranque de tornillos con equipo portátil (SWRM-Fakopp), determinando la fuerza de arranque, F (kN).

Los ensayos de densidad y contenido de humedad se han efectuado conforme a las normas europeas UNE-EN 408:2004 y UNE-EN 13183:2002; err 2003; Ac 2004.

Tanto los ensayos de penetración de la varilla, como los de arranque de tornillos se han realizado en las direcciones tangencial y radial de la madera, figura 4. De esta forma se obtienen dos medidas para cada variable antes descrita, d_{rd} y d_{tg} , para las profundidades de penetración en las direcciones radial y tangencial respectivamente, y análogamente, F_{rd} y F_{tg} .

Después del acondicionado en cámara, se procede a la medición de las dimensiones de las piezas y de la humedad mediante xilohigrómetro; a continuación se procede a su pesado en balanza para calcular la densidad acondicionada.

Tras el cálculo de la densidad se procede a realizar los ensayos con el penetrómetro y de resistencia al arranque de tornillos; cada uno de ellos se efectúa en las direcciones tangencial y radial de las probetas. Una vez realizados los dos ensayos, parte de las piezas se introducen en la estufa, para comprobar la medida de la humedad.

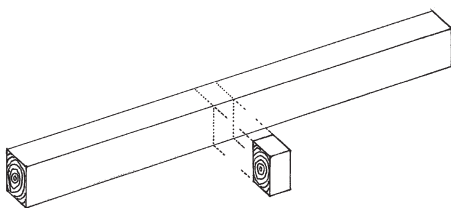


Figura 3. Zona de extracción de las probetas para la realización de los ensayos.



Figura 1. Equipo de penetración de varilla (Pilodyn).

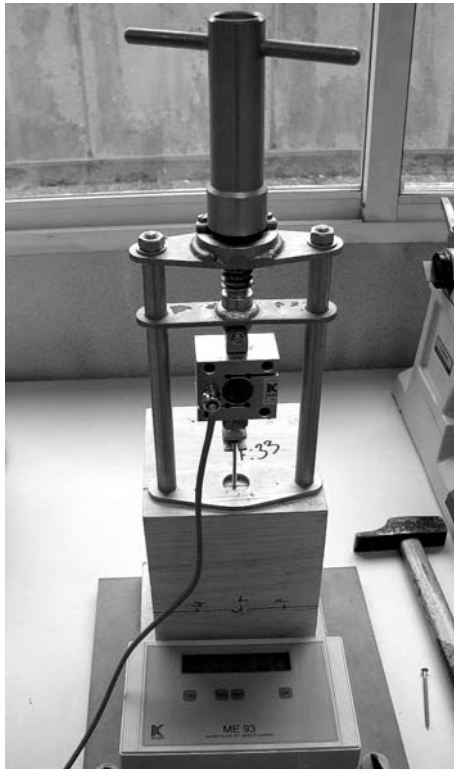


Figura 2. Máquina de arranque de tornillos Fakopp.

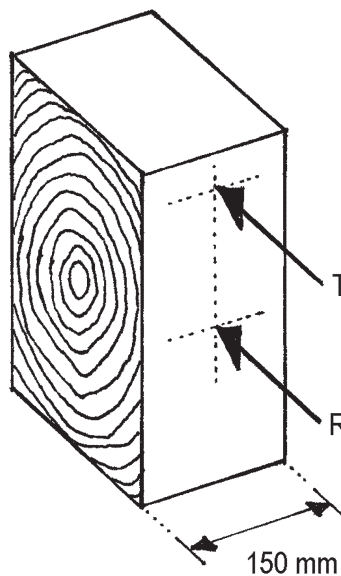


Figura 4. Orientación radial y tangencial de los ensayos.

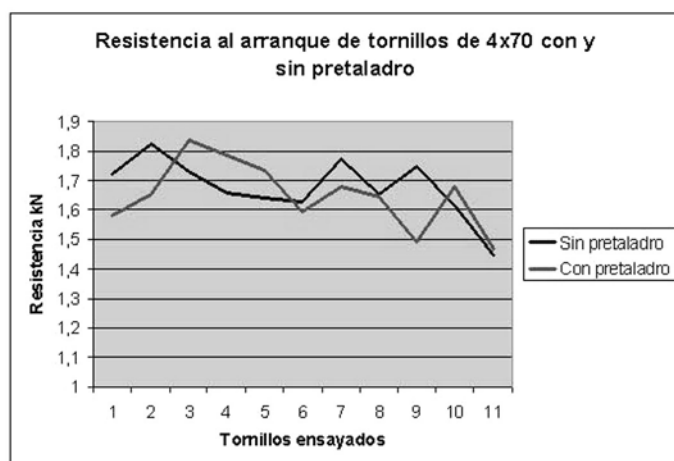


Figura 5. Fuerza de arranque de tornillo con y sin pretaladro.

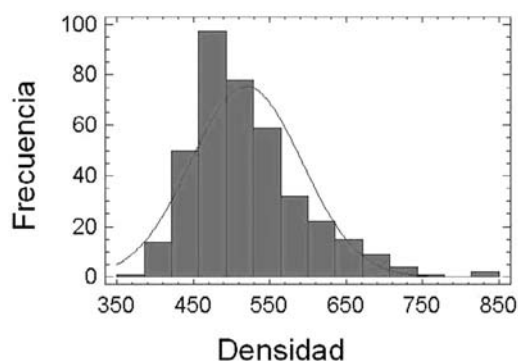


Figura 6. Gráfica de distribución de la densidad para todas las muestras.

Todos los equipos implicados en este trabajo han sido verificados y/o calibrados en su caso.

3.2. Selección del tornillo

Como paso previo a la realización del ensayo de arranque de tornillo, se efectuaron pruebas con diferentes tipos (diámetros y longitudes), utilizando o no, pretaladro en la madera, y con profundidades de penetración variables. Más concretamente se han utilizado tornillos Heco-Fix plus con cabeza tipo Spax (PZD) y acabado cincado (yellow zinc plated) con tres diámetros y longitudes: 3x40, 4x70 y 5x70 mm. Ha podido comprobarse el efecto del diámetro y del aumento de la profundidad de penetración de 20 a 24 mm.

A la vista de los resultados, se adoptó el tornillo "Heco-Fix plus tipo Spax (PZD) cincado de 4 mm de diámetro y 70 de longitud, con una profundidad de penetración de 20 mm en la madera, ya que con este tipo de tornillo, la resistencia al arranque se sitúa en unos valores próximos al punto medio de la escala del equipo, que es la zona óptima de medida.

Se ha evaluado, asimismo, el efecto de la realización de un pretaladro antes de la introducción del tornillo, constatando que el efecto es despreciable en la media de los resultados así como en la regularidad de los mismos, figura 5, ya que el coeficiente de variación es muy similar.

No existe diferencia estadísticamente significativa entre las medias, las medianas y las distribuciones con y sin pretaladro, con un nivel de confianza del 95%.

Además, por tratarse de un grupo de especies de densidad moderada, tampoco supone una ventaja en el proceso de introducción del tirafondo, por lo que se decidió no utilizar pretaladro.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Análisis estadístico y modelos de estimación

En cuanto a los datos para la estimación de la densidad, se parte, como se puede apreciar en la figura 6, de la normalidad de las distribuciones, tanto de la densidad como de las medidas efectuadas con los equipos no destructivos.

Tras el análisis estadístico pormenorizado de todos los datos obtenidos (tablas 1, 2, 3 y 4), se puede apreciar que los mejores coeficientes de determinación (R^2) se obtienen utilizando las medidas tangenciales y radiales de los dos equipos, F_{rd} y F_{tg} , d_{rd} y d_{tg} . Si por cuestiones de rapidez y comodidad, hubiéramos de escoger un solo equipo, encontraríamos mejores relaciones estadísticas con la fuerza de arranque, F , por lo que en la práctica, se propone el uso de la media aritmética de las medidas tangencial y radial de resistencia al arranque de tornillos, para la estimación de la densidad.

Ya que existen diferencias significativas para los resultados por especies, se mantienen los grupos separados, añadiendo un grupo más para todas juntas, que será de utilidad si se desconoce la especie de las piezas a evaluar.

4.2. Comprobación del modelo

Para la comprobación del modelo propuesto se han tomado 28 vigas de *Pinus sylvestris* L. procedentes de las obras de restauración de un edificio de finales del siglo XVIII, obra del arquitecto Ventura Rodríguez, conocido como "Casa del Gobernador", situado en Aranjuez, provincia de Madrid (15)(16).

Tabla 1. Resultados estadísticos y modelos de regresión para *Pinus radiata* D. Don.

		ρ (kg/m ³)	F media (kN)	d media (mm)
MEDIA		481	2,08	10,06
CV		10,70	19,88	15,71
VARIABLE PREDICTORA	R ²	FUNCIÓN DE PREDICCIÓN		
TODAS	0,54	$\rho = 452,4 + 20,7 \times F_{rd} + 34,1 \times F_{lg} - 3,76 \times d_{rd} - 4,66 \times d_{lg}$		
F media (kN)	0,48	$\rho = 322,3 + 77,2 \times F \text{ media}$		
d media (mm)	0,40	$\rho = 669,2 - 18,5 \times d \text{ media}$		

Tabla 2. Resultados estadísticos y modelos de regresión para *Pinus sylvestris* L.

		ρ (kg/m ³)	F media (kN)	d media (mm)
MEDIA		500	1,85	10,78
CV		9,9	16,4	18,3
VARIABLE PREDICTORA	R ²	FUNCIÓN DE PREDICCIÓN		
TODAS	0,56	$\rho = 413,6 + 39,4 \times F_{rd} + 45,1 \times F_{lg} - 4,72 \times d_{rd} - 1,86 \times d_{lg}$		
F media (kN)	0,50	$\rho = 296,9 + 109,2 \times F \text{ media}$		
d media (mm)	0,35	$\rho = 650,7 - 14,1 \times d \text{ media}$		

Tabla 3. Resultados estadísticos y modelos de regresión para *Pinus nigra* Arn.

		ρ (kg/m ³)	F media (kN)	d media (mm)
MEDIA		586	2,34	9,62
CV		14,1	22,22	22,79
VARIABLE PREDICTORA	R ²	FUNCIÓN DE PREDICCIÓN		
TODAS	0,55	$\rho = 598,0 + 4,64 \times F_{rd} + 47,3 \times F_{lg} - 3,33 \times d_{rd} - 10,96 \times d_{lg}$		
F media (kN)	0,49	$\rho = 336,2 + 106,0 \times F \text{ media}$		
d media (mm)	0,49	$\rho = 827,9 - 25,4 \times d \text{ media}$		

Tabla 4. Resultados estadísticos y modelos de regresión para *Pinus spp* (radiata, silvestre y nigra)

		ρ (kg/m ³)	F media (kN)	d media (mm)
MEDIA		519,28	2,09	10,14
CV		14,81	22,15	19,23
VARIABLE PREDICTORA	R ²	FUNCIÓN DE PREDICCIÓN		
TODAS	0,50	$\rho = 400,4 + 44,9 \times F_{rd} + 44,3 \times F_{lg} - 4,05 \times d_{rd} - 2,61 \times d_{lg}$		
F media (kN)	0,49	$\rho = 289,9 + 109,7 \times F \text{ media}$		
d media (mm)	0,35	$\rho = 744,6 - 22,2 \times d \text{ media}$		

Tabla 5. Resultados de la estimación con Arranque de Tornillo

MEDIDA	MEDIA (kg/m ³)	CV (%)	MÍNIMO / MÁXIMO
DENSIDAD REAL	488,54	12,50	380 / 736
DENSIDAD ESTIMADA SILVESTRE	441,65	7,85	372 / 564
DENSIDAD ESTIMADA PINUS	435,26	8,00	365 / 559

Se trata en su mayor parte de pares de cubierta y vigas de forjado de gran escuadría y sección variable próximas a 140 x 195 mm. De cada una de estas vigas se extraen dos probetas, siguiendo la misma metodología descrita anteriormente para las muestras de madera procedentes de aserradero.

En cada una de estas probetas se realizan los ensayos de densidad y resistencia al arranque de tornillos para así poder realizar la estimación de la densidad con los modelos propuestos, y poder comparar los resultados estimados y los reales. Se han comprobado los modelos de arranque de tornillo (media aritmética) correspondientes a la especie *Pinus sylvestris* L, y el género *Pinus* (Tabla 5).

Se comprueba que existe diferencia estadística significativa entre los valores reales de densidad, y los estimados con un nivel de confianza del 95%, aunque no entre los dos estimadores, que resultan estadísticamente iguales con el mismo nivel de confianza. Esta diferencia se debe a que el resultado de la regresión subestima el valor de la densidad en un porcentaje de 9 a 11%, dependiendo del modelo de estimación utilizado. La correlación entre los valores estimados y

reales resulta de 0,72 con un coeficiente de determinación r^2 de 52,4%.

Se puede observar, por último, cómo los dos estimadores utilizados, pese a subestimar los valores reales, se ajustan bastante bien a la variabilidad de la muestra, respondiendo a los altibajos de la densidad con bastante exactitud, figura 7.

Por todo ello, se considera satisfactorio el resultado de la comprobación de modelo, siendo además positivo, desde el punto de vista de la seguridad, el hecho de que se produzca una ligera subestimación de un 10% de la densidad real.

5. CONCLUSIONES Y PROPUESTA METODOLÓGICA

5.1. Conclusiones

Existe relación estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 99% entre los parámetros indirectos medidos y la densidad real de las piezas, quedando las mejores correlaciones obtenidas en los modelos con un R^2 de 49,9%.

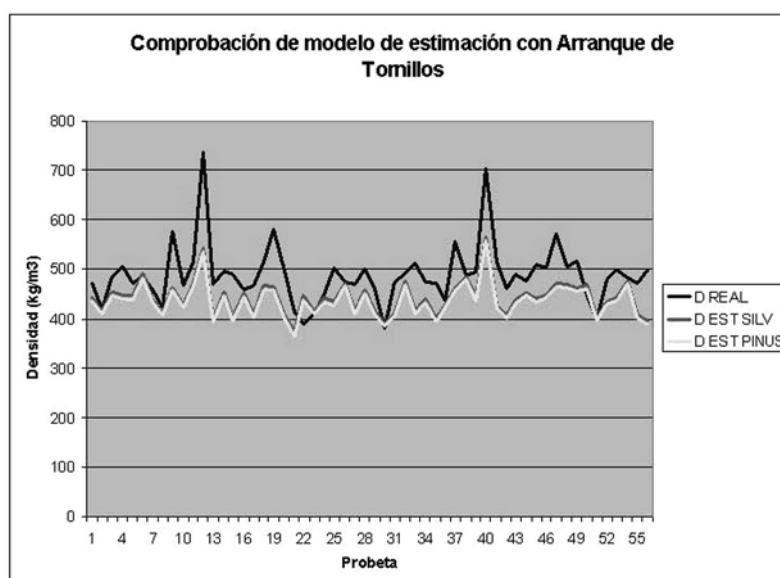


Figura 7. Densidad real y estimada mediante arranque de tornillo.

Tabla 6. Resumen de modelos propuestos por especie

MODELO	ECUACIÓN/GRÁFICO
<i>Pinus radiata</i> D. Don	<p>Modelo de regresión para P. radiata</p> <p>Densidad (kg/m³)</p> <p>$\rho = 77,24 F_{media} + 322,3$ $R^2 = 0,485$</p> <p>Fuerza de extracción (N)</p>
<i>Pinus sylvestris</i> L.	<p>Modelo de regresión para P. radiata</p> <p>Densidad (kg/m³)</p> <p>$\rho = 77,24 F_{media} + 322,3$ $R^2 = 0,485$</p> <p>Fuerza de extracción (N)</p>
<i>Pinus nigra</i> Arn.	<p>Modelo de regresión para P. radiata</p> <p>Densidad (kg/m³)</p> <p>$\rho = 77,24 F_{media} + 322,3$ $R^2 = 0,485$</p> <p>Fuerza de extracción (N)</p>
<i>Pinus</i> spp.	<p>Modelo de regresión para P. radiata</p> <p>Densidad (kg/m³)</p> <p>$\rho = 77,24 F_{media} + 322,3$ $R^2 = 0,485$</p> <p>Fuerza de extracción (N)</p>

Se recomienda el uso de la medida de arranque de tornillos, con mejores correlaciones en términos generales que el penetrómetro. En cuanto a la orientación del ensayo, se recomienda efectuar las dos medidas, tangencial y radial, y utilizar la media aritmética, ya que se obtienen mejores correlaciones que con las medidas individuales, y al tratarse de regresiones simples, los intervalos de confianza son más reducidos.

Se utilizará el tornillo HecoFix Plus SPAX (PZD) cincado de 4x70 mm con una profundidad de penetración de 20 mm en la madera y sin pretaladro.

Se presentan en la tabla 6, los modelos propuestos por especie.

Habida cuenta de las diferencias de densidad locales en una pieza estructural, debidas a la presencia de nudos, desviación de la fibra, madera de reacción, u otras particularidades, se recomienda además realizar una serie de, al menos, 1 medida por metro lineal del elemento objeto de ensayo, procurando en cualquier caso evitar zonas con anomalías. Como dato de entrada en el modelo se utilizará la media aritmética de todas las medidas efectuadas. En el caso de realizar medidas en obras de rehabilitación o restauración de edificios con estructura de madera, se habrá de procurar además evitar zonas de pudrición o ataques de insectos xilófagos si éstos están presentes, ya que resulta evidente la influencia de estos agentes en la densidad y el comportamiento de las piezas.

Tras la comprobación del modelo realizada en piezas de *Pinus sylvestris* L. de más de 100 años de antigüedad, se puede observar que el estimador se comporta bien, adaptándose a las variaciones de la densidad con bastante ajuste, aunque subestimando ligeramente (10%) el valor de la misma, lo cual quedaría, en cualquier caso, del lado de la seguridad.

5.2. Propuesta metodológica para la estimación del módulo de elasticidad estático en obra

Una vez comprobada la validez de los modelos obtenidos, se plantea el siguiente esquema de actuación en obra:

Se comienza midiendo los parámetros indirectos o no destructivos, velocidad de propagación de la onda de ultrasonidos (15)(16), y resistencia al arranque de tornillo, figura 8. Con este último dato se estima la densidad de la pieza, que, junto con la velocidad antes comentada, nos permite calcular el

módulo de elasticidad dinámico según la ecuación siguiente:

$$Ed = \rho \times V^2 \times 10^{-6}$$

Donde E_d es el módulo de elasticidad dinámico en N/mm^2 , ρ es la densidad en kg/m^3 y V la velocidad de propagación de la onda en m/s .

Para obtener el módulo de elasticidad estático, E , se pueden utilizar estimadores propuestos en otros trabajos de investigación (17)(18), pero para las especies manejadas en este proyecto se plantean los siguientes estimadores desarrollados con los datos de este y anteriores proyectos (19).

$$P.radiata(R^2 = 0,42) \rightarrow E = 0,741 \times Ed + 660(N/mm^2)$$

$$P.sylvestris(R^2 = 0,45) \rightarrow E = 0,837 \times Ed - 127(N/mm^2)$$

(Estimadores del Módulo de elasticidad estático para los pinos radiata y silvestre)

Con los valores estimados del módulo de elasticidad estático y la densidad, se puede asignar una clase resistente a la pieza de acuerdo con la norma UNE-EN 338. En este procedimiento existe el riesgo de sobreestimar la resistencia, ya que generalmente este es el parámetro crítico en la asignación, debido al efecto de las particularidades de las piezas (nudos, fendas, etc.).

En paralelo con esta metodología se realiza la clasificación visual de la pieza según la normativa correspondiente a la especie de que se trate, si son coníferas españolas será la UNE 56544:2003, y, posteriormente, se comparan los resultados, para, de esta forma, al menos, obtener un mayor aporte de información objetiva, a la toma de decisiones.

En una prueba realizada con 28 vigas de pino silvestre procedentes de la obra de rehabilitación antes citada, realizando la clasificación mediante ensayo a flexión normalizado (UNE-EN 408:2004) y con la metodología propuesta en este trabajo, se obtuvieron los resultados que se presentan en la figura 9.

Como se puede apreciar, de forma individual, se sobreestiman 3 de las 28 piezas (marcadas con flechas rojas), pero en términos de resistencia media, más generales, la clasificación resulta ligeramente más conservadora (C-20 real, frente a C-16 estimada). Realizada la clasificación visual de estas mismas piezas, el resultado de clasificación es C-18, pero con un porcentaje de rechazo del 54%, frente al 7% por ensayo normalizado, y al 4% con el método de estimación presentado. Sería necesario

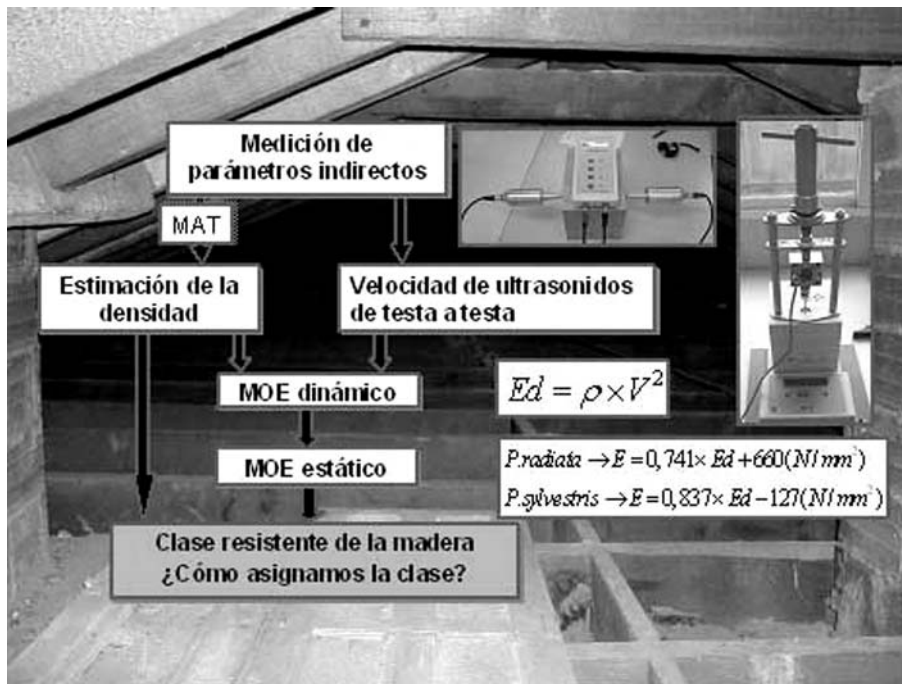


Figura 8. Esquema de actuación en obra.

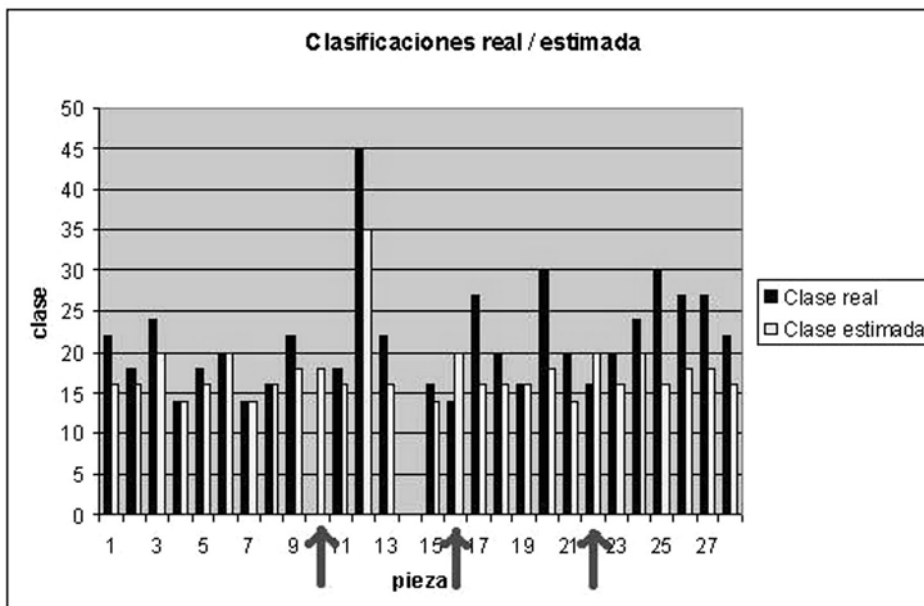


Figura 9. Asignación de la clase resistente real y estimada para 28 vigas de *P. sylvestris*. (El número indicado por la clase, expresa la resistencia característica a flexión en N/mm^2).

en cualquier caso, la realización de un número mayor de ensayos para establecer una metodología más fiable.

AGRADECIMIENTOS

- AITIM "Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y el Corcho" (Proyectos AITIM-FUCOVASA 2004-05 "Parámetros indirectos de clasificación en piezas de madera estructural puesta en servicio. Análisis y correlación con la capacidad resistente real" y AITIM-FUCOVASA 2005-2006 "Evaluación de técnicas no destructivas para su utilización en el control de calidad de productos estructurales de madera").
- CIFOR-INIA, Proyecto AGL 2004-01598 FOR (Pinus radiata D. Don)

- Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Departamento de Construcción y Vías Rurales, Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Forestal y Departamento de Ingeniería Forestal.
- Ministerio de Ciencia y Tecnología, Plan Nacional de I+D+i 2000-2003. Proyecto AGL 2002 – 00813.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) Ross, Rober J. Pellerin, Roy F.: "Nondestructive testing for assessing wood members in structures". USDA. FPL-GTR-70. 1994), pp. 1-40.
- (2) Arriaga, F. Esteban, M, Relea, E.: "Evaluation of the load carrying capacity of large section coniferous timber in standing structures". *Mater. Construcc.* Vol. 55, nº 280 (2005), pp. 43-52.
- (3) Rammer, Douglas R. Zelinka, Samuel L.: "Review of End Grain Nail Withdrawal Research". USDA. FPL-GTR-151. (2004), pp. 28.
- (4) Walter, I.T.G. Norton, B. Lavery, D.J. Chapman, M.J.: "Screw ingress torque as a non-destructive determinant of timber compressive strength". *Proceedings of the 14 th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood.* (2005), pp. 144-145.
- (5) Divos, F; Tanaka, T.: "Lumber Strength Estimation by Multiple Regression. Published in International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood", *Holz Forschung.* Vol. 51, nº 5. (1997), pp. 467-471
- (6) Divos, F. Tanaka, T. Nagao, H. Kato, H.: "Determination of shear modulus on construction size timber". *Wood science and technology.* Vol. 32 (6) (1998), pp. 393-402.
- (7) Greaves BL, Borralho NMG, Raymond CA, Farrington A.: "Use of a Pilodyn for the indirect selection of basic density in Eucalyptus nitens". *Canadian Journal of Forest Research.* Vol. 26 (9) (1996), pp. 1643-1650.
- (8) Watt M.S., Garnett B.T., Walker JCF. 1996. "The use of the pilodyn for assessing outerwood density in New Zealand radiata pine". *Forest Products Journal.* Vol. 46 (11-12) (1996), pp. 101-106
- (9) Raymond C.A., Muneri A., MacDonald A.C.: "Non-destructive sampling for basic density in Eucalyptus globulus and E-nitens". *Appita Journal.* Vol. 51 (3) (1998), pp. 224-228.
- (10) Wang T., Aitken S.N., Rozenberg P., Carlson M.R.: "Selection for height growth and Pilodyn pin penetration in lodgepole pine: effects on growth traits, wood properties, and their relationships". *Canadian Journal of Forest Research,* Vol. 29 (4) (1999), pp. 434-445.
- (11) Silva J.C.E., Borralho N.M.G., Wellendorf H.: "Genetic parameter estimates for diameter growth, pilodyn penetration and spiral grain in Picea abies (L.)" *Karst. Silvae Genetica,* Vol. 49 (1) (2000).
- (12) López, J.A. y Staffieri, G.M.: "Correlaciones genéticas entre Pilodyn y densidad de la madera de *Pinus elliottii* var. *elliottii* en la Mesopotamia Argentina". *Novenas Jornadas Técnicas Forestales.* INTA-FCF-MEYRNYT-Eldorado, Misiones, Argentina (2002).
- (13) Niemz P., Kucera L.J., Bernatowicz G.: "Investigation of the spruce wood quality degraded by the brown-rot fungi". *Drevarsky Vyskum.* Vol. 43 (1) (1998), pp.1-12.
- (14) Smith, S.M. Morrell, J.J.: "Correcting pilodyn measurement of Douglas fir for different moisture levels". *Forest Products Journal.* Vol. 36 (1) (1986), pp.45-46.
- (15) Esteban, M.: "Determinación de la capacidad resistente de la madera estructural de gran escuadría y su aplicación en estructuras existentes de madera de conífera". *Tesis Doctoral.* ETSI de Montes, UPM. (2003)
- (16) Arriaga, F; Esteban, M; Relea, E.: "Evaluación de la Capacidad portante de piezas de gruesa escuadría de madera de conífera en estructuras existentes". *Mater. Construcc.* Vol. 55, nº 280 (2005), pp: 43-52.
- (17) Green, D.W.; McDonald, K.A.: "Investigation of the mechanical properties of red oak 2 by 4's". *Wood and Fiber Science.* Vol. 25(1) (1993a), pp. 35-45.
- (18) Green, D.W.; McDonald, K.A.: "Mechanical properties of red maple structural lumber". *Wood and Fiber Science.* Vol. 25(4) (1993b), pp. 365-374.
- (19) Casas, L.: "Parámetros indirectos de clasificación en piezas de madera estructural puesta en servicio. Análisis y correlación con la capacidad resistente real". *Trabajo Fin de Carrera.* EUIT Forestal – UPM (2005).

Normativa

UNE 56544:2003 Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural: madera de coníferas.
UNE-EN 13183:2002; err 2003; Ac 2004. I-II Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada.
UNE-EN 408:2004 Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas.
UNE-EN 338:2003 Madera Estructural. Clases resistentes.

* * *