

Los métodos de vibración como herramienta no destructiva para la estimación de las propiedades resistentes de la madera aserrada estructural

Vibration methods as non-destructive tool for structural properties assessment of sawn timber

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

RESUMEN

La clasificación no destructiva de madera aserrada estructural mediante los métodos de vibración, utiliza la frecuencia natural de la pieza para llegar a definir la calidad del material.

Este artículo describe los fundamentos teóricos de esta técnica no destructiva y un trabajo de investigación enfocado a valorar la idoneidad de dicha herramienta. Se muestran los resultados de clasificación de 120 piezas de gruesa escuadría (150 x 200 x 4.060 mm y 200 x 250 x 5.060 mm) de madera aserrada estructural de pino laricio, (*Pinus nigra* subsp. *salzmannii* (Dunal) Franco).

Adicionalmente, las probetas fueron ensayadas a flexión conforme a la norma UNE-EN 408: 2004, para comparar los valores de resistencia y rigidez obtenidos mediante este ensayo con los estimados utilizando este método no destructivo. Se utilizó el PLG (Portable Lumber Grader), desarrollado en el Laboratorio de Técnicas No Destructivas para la Madera de la Universidad del Oeste de Hungría, en Sopron, para la determinación de la frecuencia longitudinal de vibración. Este equipo permite medir la frecuencia y la densidad de las piezas, a partir de las cuales calcula el módulo de elasticidad dinámico y estima la resistencia.

Para piezas de gruesa escuadría de pino laricio existe un alto grado de correlación entre el módulo de elasticidad dinámico obtenido a partir de la frecuencia longitudinal de vibración, y las propiedades mecánicas. Los métodos acústicos de clasificación han sido ampliamente aceptados porque son precisos, portátiles, baratos y fáciles de aplicar.

850-11

Palabras clave: clasificación no destructiva; métodos de vibración; frecuencia longitudinal de vibración; madera aserrada estructural de gruesa escuadría; PLG (Portable Lumber Grader).

*Ingeniero de Montes, UPM

**Dr. Arquitecto, UPM

***Dr. Ingeniero de Montes, UPM

Persona de contacto/Corresponding author: guillermo.iniguez@upm.es ([Guillermo Íñiguez González](mailto:guillermo.iniguez@upm.es))

SUMMARY

The non-destructive testing of structural sawn timber using the resonant frequency methods uses the natural frequency of pieces to assess the quality of test samples.

*This paper describes the theoretical basis of this non-destructive technique and an investigation into the suitability of this tool. The results of grading 120 pieces of gross cross-section (150 x 200 x 4,060 mm and 200 x 250 x 5,060 mm) structural timber of European black pine, (*Pinus nigra* subsp. *salzmannii* (Dunal) Franco) are shown.*

Furthermore, the specimens were tested for bending according to the UNE-EN 408: 2004 standard, to compare the values of strength and stiffness obtained from this test with the results estimated using the non-destructive method. PLG (the Portable Lumber Grader) developed at the Wood NDT Laboratory of the University of Western Hungary, in Sopron, was used to measure the frequency of the longitudinal stress wave. This equipment determines the frequency and the density of the specimens, and uses them, to evaluate the dynamic modulus of elasticity and to estimate the strength.

For gross cross-section European black pine pieces, a strong relationship exists between dynamic modulus obtained by longitudinal vibration frequency and the mechanical properties. Acoustic measurements have become widely acceptable, because they are accurate, portable, cheap and easy to apply.

Keywords: non-destructive testing; resonant frequency methods; longitudinal vibration frequency; gross cross-section structural saw timber; PLG (Portable Lumber Grader).

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, entre otras razones por la reciente puesta en vigor de la Ley de Ordenación de la Edificación (1) y del Código Técnico de la Edificación (2), una de las más fuertes exigencias en el sector de la construcción es la encaminada a satisfacer la creciente demanda de garantías en todos los aspectos relacionados con la calidad, entendida en el más amplio de sus significados, y con la seguridad de los edificios, así como lo relativo a la durabilidad.

Como es lógico, la construcción con madera no resulta ajena a esta tendencia. Una rápida descripción del sector de la construcción con madera partiría del hecho constatado de la existencia de unas deficiencias que se hacen evidentes desde la fase de proyecto hasta la fase de ejecución de cualquier obra con madera, desde la falta de conocimiento y de herramientas de trabajo para los técnicos hasta la falta de mano de obra cualificada para el levantamiento de las estructuras de madera, pasando por el suministro del material, los controles de calidad, etc.

Si nos circunscribimos al material, la mayor parte de las carencias detectadas están casi siempre relacionadas con la dificultad para evaluar sus propiedades resistentes.

Para la madera aserrada, la estimación de las propiedades mecánicas se realiza, generalmente, mediante la clasificación visual de las piezas en función de las singularidades (o defectos) presentes en las mismas.

Hoy día, en nuestro país existen dos normas de clasificación visual, una, la UNE 56544: 2003 (3), para coníferas (especies del género: *Pinus sp.*), y otra, la UNE 56546 (4) en fase de publicación, para el eucalipto (*Eucalyptus globulus* Labill.).

El uso de estas normas, aunque aún no está muy extendido, empieza a encontrar implantación por su relativa sencillez de manejo y la fiabilidad en la respuesta que ofrece.

Las propiedades mecánicas así obtenidas, definen un nivel de seguridad adecuado, pero representan un aprovechamiento reducido del material, ya que muchas veces el porcentaje de piezas de rechazo es demasiado elevado y la separación entre las propiedades mecánicas de cada calidad es muy reducida.

Éste es uno de los principales motivos por los que se han desarrollado otras técnicas no destructivas de evaluación de las propiedades

mecánicas en la madera con un carácter más objetivo y eficaz.

Las primeras citas sobre el empleo de técnicas no destructivas diferentes de la clasificación visual, son de los años 50. Ross y Pellerin de la Washington State University en Estados Unidos (5), usaron las ondas de impacto para determinar el módulo de elasticidad dinámico de probetas libres de defectos. Se obtuvo un alto grado de predicción midiendo el tiempo de propagación y relacionándolo con la elasticidad del material (6).

Desde los años 60, estos métodos se han ido desarrollando en los laboratorios y aplicándose con mayor o menor éxito en la industria y en las obras, constituyendo hoy día importantes e insustituibles herramientas en diversos campos, por ejemplo, el del control de calidad (7).

En esta línea, la Unidad Docente de Cálculo de Estructuras de la ETS de Ingenieros de Montes de la Universidad Politécnica de Madrid, junto con el Laboratorio de Maderas del INIA y AITIM, llevan varios años investigando en la utilización y aplicación de diferentes técnicas no destructivas. En especial, son de los primeros equipos de investigación en desarrollar los métodos de vibración para clasificar especies utilizadas en construcción en nuestro país (8).

2. TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS

En general, se denomina ensayo no destructivo a cualquier tipo de prueba practicada a un material que no altere de forma permanente sus propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales. Los métodos no destructivos se basan en la aplicación de fenómenos físicos tales como ondas electromagnéticas, acústicas, elásticas, etc. o cualquier otro tipo de prueba, que permita evaluar o detectar una determinada propiedad en el material. La estimación de las propiedades resistentes de la madera: densidad, módulo de elasticidad y tensión de rotura, se puede realizar mediante la utilización de diferentes técnicas: clasificación visual, clasificación mecánica y/o la medición de una serie de parámetros físicos que se utilicen como predictores de las mismas, por ejemplo, la velocidad de propagación de ultrasonidos.

Tanto la clasificación visual como la clasificación mecánica son sistemas normalizados y muy extendidos, donde la asignación de clase resistente es prácticamente inmediata. El resto de los sistemas son, en su

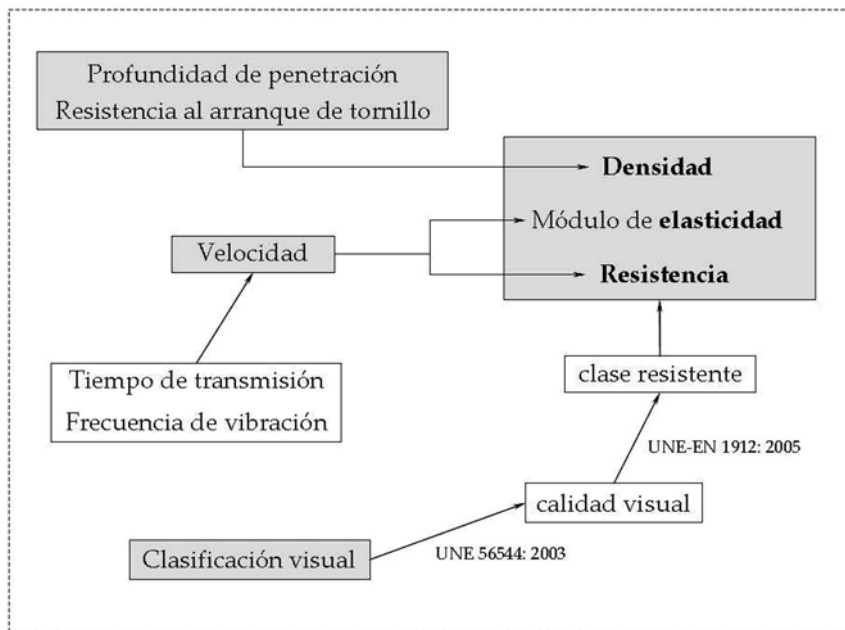


Figura 1. Parámetros no destructivos vs. Propiedades resistentes.

mayoría, métodos experimentales no normalizados, pero sujetos a un intenso desarrollo e implantación; mejorando en algunos casos enormemente a los primeros, en rendimiento y optimización del material.

En la figura 1 se resumen algunos parámetros físicos medidos mediante técnicas no destructivas y las propiedades estimadas a partir de ellos.

Es decir, el empleo de una técnica no destructiva consiste en el registro de un parámetro físico, como por ejemplo, la profundidad de penetración o la frecuencia de vibración, y la clasificación del material en función de la relación existente entre ese estimador y las propiedades resistentes. De tal modo que, cuanto mayor sea esa relación entre factores y más fácil de medir sea el estimador, mejor será la técnica.

Los métodos no destructivos utilizados en la estimación de las propiedades de los materiales pueden clasificarse de muy diversos modos. Haciéndolo en función de la naturaleza de la técnica en la que se basan, podemos considerar los siguientes: métodos mecánicos, métodos acústicos, métodos electromagnéticos y métodos nucleares (9).

3. MÉTODOS ACÚSTICOS: ANÁLISIS DE VIBRACIONES

Una importante propiedad dinámica de todo sistema elástico es la frecuencia natu-

ral de vibración. Para una pieza de determinadas dimensiones que se encuentra vibrando, la frecuencia natural asociada a su vibración está principalmente relacionada con sus propiedades físicas (densidad) y mecánicas (módulo de elasticidad).

Por tanto, el módulo de elasticidad dinámico de un material puede ser determinado mediante la medición de la frecuencia natural de vibración de una pieza prismática de dimensiones conocidas y de su densidad.

La relación matemática existente entre estas variables, se enuncia suponiendo que se trate de medios sólidos: homogéneos, isotrópicos y perfectamente elásticos; sin embargo, esta expresión puede aplicarse también a sistemas heterogéneos, como la madera o el hormigón, cuando las dimensiones de la pieza son grandes en relación al tamaño de los elementos constituyentes del material (7).

En resumen, la utilización del método de análisis de vibraciones consiste en medir la frecuencia natural de vibración de una pieza y a partir de ella, estimar sus propiedades resistentes.

La probeta de ensayo puede hacerse vibrar de varios modos, en función de las condiciones de apoyo y de la localización del lugar del impacto.

Si el golpe se aplica en la testa, figura 2, la vibración originada permite medir con facilidad la frecuencia propia de vibración en la dirección longitudinal.

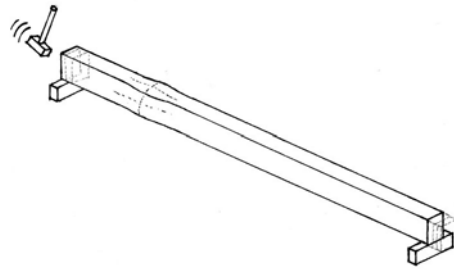


Figura 2. Detalle de vibración longitudinal.

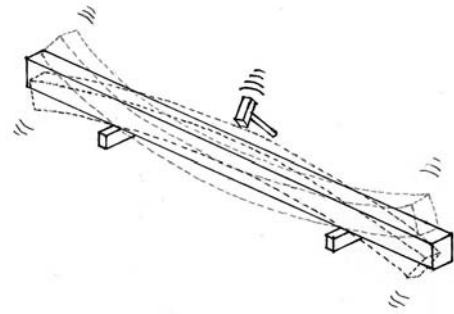


Figura 3. Detalle de vibración de flexión.

Resolviendo la ecuación diferencial de propagación de las ondas planas longitudinales a través de una barra de sección constante (10), se obtiene la expresión que permite calcular el módulo de elasticidad dinámico del material a partir de la frecuencia natural de vibración longitudinal de una probeta:

$$E_{din} = (2 \cdot L \cdot f)^2 \cdot \rho$$

donde:

- E_{din} : es el módulo de elasticidad dinámico, en N/m^2 ;
- L: es la longitud total de la probeta, en m;
- f: es la frecuencia natural de vibración longitudinal, en Hz;
- ρ : es la densidad del material, en kg/m^3 .

Si, por el contrario, el golpe que se realiza es transversal a la directriz de la pieza, figura 3, el modo de vibración que resulta más marcado es el de flexión, pudiendo de esta forma medir la frecuencia natural en flexión.

Para piezas prismáticas oscilando en flexión, la teoría de Timoshenko (10) describe la vibración de la barra a través de la siguiente ecuación diferencial:

$$EI \frac{\delta^4 r}{\delta x^4} + \rho A \frac{\delta^2 r}{\delta t^2} - \rho I \left(1 + \frac{E}{\beta G} \right) \frac{\delta^4 r}{\delta x^2 \delta t^2} + \frac{\rho^2 I}{\beta G} \frac{\delta^4 r}{\delta t^4} = 0$$

donde:

- E: es el módulo de elasticidad longitudinal;
- I: es el momento de inercia de la sección;
- r: es el desplazamiento;
- x: es la coordenada longitudinal;
- ρ : es la densidad;
- A: es el área de la sección transversal;

- t: es el tiempo;
- β : es el factor de cortante (1/1,2 para barras prismáticas);
- G: es el módulo de elasticidad transversal o de cortante.

El inconveniente de esta ecuación es su complejidad y que requiere medir valores de frecuencia, al menos, en dos modos de vibración. Además, no existe solución exacta, de ahí que haya que utilizar métodos iterativos para calcular su resultado.

La ecuación de Euler es, sin embargo, mucho más sencilla (9):

$$EI \frac{\delta^4 r}{\delta x^4} + \rho A \frac{\delta^2 r}{\delta t^2} = 0$$

donde:

- E: es el módulo de elasticidad longitudinal;
- I: es el momento de inercia de la sección;
- r: es el desplazamiento;
- x: es la coordenada longitudinal;
- ρ : es la densidad;
- A: es el área de la sección transversal;
- t: es el tiempo.

La ecuación de Euler tiene por solución la siguiente expresión:

$$E_{din} = \left(\frac{2 \cdot f_n}{\gamma_n \cdot \pi} \right)^2 \frac{m \cdot L^3}{I}$$

donde:

- E_{din} : es el módulo de elasticidad dinámico, en N/m^2 ;
- f_n : es la frecuencia natural de vibración en flexión, en Hz, siendo "n" el modo (si $n=1$, se llama modo básico o fundamental);
- m: es la masa de la pieza, en kg;
- L: es la longitud total de la pieza, en m;
- γ_n : es una constante igual a $(n+0,5)^2$, donde "n" es el modo, pero γ_1 es 2,267;
- I: es el momento de inercia de la sección, en m^4 .

La simplificación de la ecuación de Euler supone no considerar la deformación por cortante incluida en la vibración de flexión, de ahí que presente un resultado menos preciso que al emplear la expresión de Timoshenko (9).

No obstante, la diferencia entre los resultados obtenidos con ambas ecuaciones es despreciable para esbelteces de la pieza (longitud/grueso) superiores a 15, por debajo de este valor, el módulo de elasticidad calculado mediante el método de Euler desciende exponencialmente.

Finalmente, si la pieza tiene unas dimensiones más parecidas a una placa que a una barra prismática, y se apoya como muestra la figura 4, el modo de vibración más relevante será el de torsión, pudiendo deducir el módulo de elasticidad dinámico transversal o de cortante a partir de la expresión:

$$G_{\text{din}} = \left(\frac{2 \cdot L \cdot f_n}{\gamma_n} \right)^2 \frac{\rho \cdot I}{K}$$

donde:

- G_{din} : es el módulo de elasticidad din. transversal o de cortante, en N/m^2 ;
- L : es la longitud total de la pieza, en m , en la dirección perpendicular a la línea de apoyo central;
- f_n : es la frecuencia natural de vibración en torsión, en Hz , siendo "n" el modo;
- ρ : es la densidad, en kg/m^3 ;
- I : es el momento de inercia de la sección, en m^4 ;
- γ_n : es una constante igual a $(n+0,5)^2$, donde "n" es el modo, pero γ_1 es 2,267;
- K : es un valor que depende de la sección transversal de la pieza (9), en m^4 .

El método de determinación del módulo de elasticidad de cuerpos sólidos a partir de sus frecuencias resonantes fue descubierto a principios del siglo XX. En 1938, Powers en los Estados Unidos, fue el primero en calcular la frecuencia de resonancia de prismas de hormigón de $51 \times 51 \times 241$ mm haciéndolos vibrar mediante un golpe de martillo (7).

Uno de los posibles métodos para determinar las frecuencias fundamentales consiste exactamente en eso, es decir, en golpear la probeta con un martillo. El impacto hace que la pieza comience a vibrar en su frecuencia natural. La amplitud y frecuencia de la vibración de resonancia son obtenidas utilizando un analizador de espectro que determina las frecuencias relativas mediante la transformada rápida de Fourier. Las ventajas de este método frente al de vibraciones forzadas, por ejemplo, es la mayor rapidez de ejecución del ensayo y la posibilidad de estudiar piezas de muy diferentes dimensiones. Sobue introdujo en madera el método de cálculo del módulo de elasticidad dinámico utilizando la frecuencia calculada a partir de la transformada de Fourier del espectro de vibración de la probeta motivo de estudio. El parámetro medido era la frecuencia natural de vibración de la pieza (11-13).

Existen diversos factores, como el tamaño de la probeta, que afectan a la frecuencia de resonancia. En hormigón, Obert y Duball (14) demostraron que el valor de

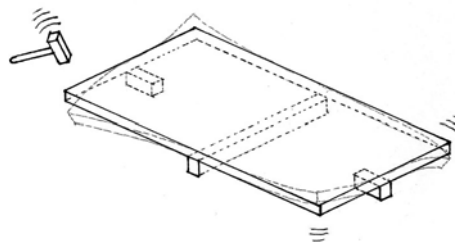


Figura 4. Detalle de vibración de torsión.

módulo de elasticidad dinámico depende de las dimensiones de la pieza estudiada. Las piezas de mayor tamaño, debido a sus dimensiones y peso, tienen frecuencias de resonancia menores. Piezas grandes vibrando a frecuencias más bajas dan valores de módulo de elasticidad dinámico proporcionalmente más altos que los de las piezas más pequeñas (15).

La bibliografía advierte de que aunque existe muy buena correlación entre el módulo de elasticidad estático y dinámico, generalmente los valores de rigidez de este último suelen ser superiores a los reales (estáticos), por lo que no se recomienda utilizarlos sin corregir en cálculos estructurales. Una de las propuestas consiste en someter a la estructura a una oscilación, mediante un motor con una masa excéntrica que provoca una vibración con una frecuencia creciente (16). La vibración de la estructura se registra de manera automática, hasta que se detecta la frecuencia de resonancia en el primer modo de vibración en flexión, f_1 . De esta manera se obtiene la rigidez a flexión ($E \cdot I$), en $\text{N} \cdot \text{m}^2$, mediante la siguiente expresión:

$$E \cdot I = \frac{f_1^2 \cdot W \cdot L^3}{k \cdot g}$$

donde:

- k : es un parámetro que depende de las condiciones de apoyo de la viga (biarticulada, $k=2,46$; biempotrada, $k=12,65$);
- g : es la aceleración de la gravedad, en m/s^2 ;
- f_1 : es la frecuencia de vibración en flexión del modo fundamental, en Hz ;
- W : es la carga total, en N , repartida uniformemente;
- L : es luz entre apoyos, en m .

Esta metodología se ha utilizado para la evaluación del estado de la estructura de pasarelas y puentes de madera (17-20) y para la estimación de la rigidez de forjados en edificios históricos (21).

4. ESTIMACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA DE PINO LARICIO MEDIANTE EL MÉTODO DE VIBRACIÓN LONGITUDINAL. EJEMPLO DE APLICACIÓN

En este apartado se describen los resultados obtenidos de la aplicación del método de vi-

Tabla 1. Material de ensayo

Especie	Sección (mm)	nº de piezas	Longitud media (m)
<i>Pinus nigra</i> subsp. <i>salzmannii</i>	150x200	60	4,06
	200x250	60	5,06
	total	120	4,56

bración longitudinal como herramienta para la estimación de las propiedades mecánicas (módulo de elasticidad y tensión de rotura) de una partida de madera aserrada de uso estructural.

4.1. Material de ensayo

La muestra estudiada consta de un total de 120 piezas de madera de pino laricio (*Pinus nigra* subsp. *salzmannii* (Dunal) Franco) dividida en dos lotes, según el tamaño de su dimensión transversal.

En la tabla 1 se recogen las dimensiones y número de piezas de cada lote.

La selección de la madera se realizó de manera que contuviera una muestra representativa de la calidad que se comercializa como madera para estructuras. Por lo general, incluye todas las piezas, excepto aquellas que presentan notables defectos que afectan a la rectitud o al aspecto de la pieza (alabeos, madera chamosa, grandes entrecascos).

La madera se sometió a un proceso de secado en cámara y posteriormente se mantuvo bajo cubierta durante un periodo de, al menos, 3 meses antes del proceso de ensayo.

4.2. Desarrollo experimental

El proceso experimental del trabajo de investigación se puede dividir en dos fases claramente marcadas, la primera, denominada: aplicación de técnicas no destructivas; y la segunda, que comprende los ensayos de determinación de las propiedades físicas y mecánicas.

La fase I consistió en la ejecución de los siguientes procesos:

- Medición de la longitud media y de las dimensiones de la sección de la probeta (cara y canto) en la zona central.

- Medición del contenido de humedad de la madera con xilohigrómetro situado en la sección central y sobre canto superior, conforme a la norma UNE-EN 13183-2: 2002 (22).

- Medición de la frecuencia natural de vibración longitudinal mediante vibración forzada por impacto en la testa.

- Registro de la masa total de la pieza mediante balanza.

La fase II supuso la realización de los ensayos mecánicos propiamente dichos y derivó en lo siguiente:

- Cálculo del módulo de elasticidad global y de la resistencia a la flexión, a partir del ensayo de flexión conforme a la norma UNE-EN 408: 2004 (23).

4.3. Metodología

4.3.1. Contenido de humedad

El contenido de humedad de las probetas se determinó utilizando un xilohigrómetro de resistencia eléctrica marca GANN, modelo Hydromette HTR 300; siguiendo el procedimiento descrito en la norma. El contenido medio de la muestra es del 14,4% (10,8 a 20,7%).

4.3.2. Frecuencia de vibración longitudinal y densidad

La técnica no destructiva empleada en este trabajo de investigación fue el análisis de la vibración longitudinal, y para ello se empleó el equipo denominado PLG (Portable Lumber Grader) de la empresa Fakopp Enterprise Bt.

El PLG es un equipo portátil de clasificación de madera aserrada desarrollado por el Profesor Ferenc Divos, del Laboratorio de Técnicas No Destructivas para la Madera de la Universidad del Oeste de Hungría, Sopron (24). Este equipo permite llegar a clasificar madera asignando una clase resistente a cada probeta (25), si bien, la bondad de esa caracterización depende de una calibración previa por especie.

El procedimiento de ensayo consiste, como puede observarse en la figura 5, en colocar la probeta sobre dos soportes con apoyos mullidos que permitan la vibración libre

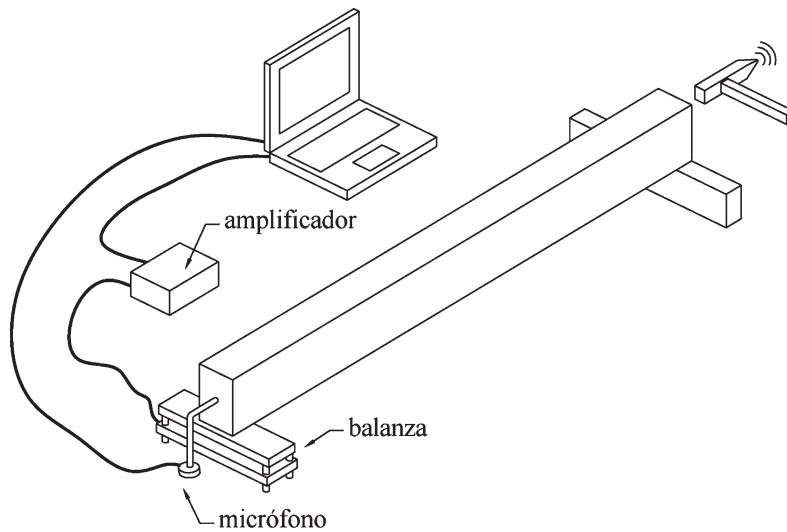


Figura 5. Equipo de análisis de la vibración longitudinal (PLG).

de la pieza. Uno de estos apoyos actúa, simultáneamente, como apoyo y como balanza, registrando la mitad del peso de cada probeta.

La densidad de cada una de las piezas se calcula dividiendo la masa total de la pieza entre su volumen, de esta manera, se obtiene un valor más global que el obtenido a partir de una rebanada libre de defectos.

El valor deducido es corregido a una humedad de referencia del 12% de acuerdo con lo descrito en la norma UNE-EN 384: 2004 (26), reduciendo el valor en un 0,5% por cada 1 % de disminución del contenido de humedad de la madera. El valor medio de la densidad de las piezas es de 593 kg/m³ (CV: 10,8%).

La pieza es golpeada en uno de sus extremos utilizando un martillo, y el impacto genera una onda de presión que recorre toda la pieza. Esta señal acústica es registrada por un micrófono y sintetizada mediante un analizador de sonido basado en la transformada rápida de Fourier. De este modo, se calcula la frecuencia fundamental de vibración longitudinal de la pieza.

Con el dato de frecuencia podemos calcular el módulo de elasticidad dinámico a partir de la expresión descrita en el apartado anterior:

$$E_{\text{din}} = (2 \cdot L \cdot f)^2 \cdot \rho$$

donde:

E_{din} : es el módulo de elasticidad dinámico, en N/m²;

L : es la longitud de la probeta, en m;
 f : es la frecuencia natural de vibración longitudinal, en Hz;
 ρ : es la densidad del material, en kg/m³.

El valor deducido de módulo de elasticidad dinámico se corrige a una humedad de referencia del 12%, y su valor medio es de 11.047 N/mm² (CV: 21,8%).

4.3.3. Módulo de elasticidad y tensión de rotura

Se realiza el ensayo a flexión, según la norma UNE-EN 408: 2004 (23), determinando el módulo de elasticidad estático global, E_{glor} y la tensión de rotura a flexión, f_u .

De acuerdo a lo prescrito por la norma, la pieza se dispone simplemente apoyada con una luz igual a 18 veces la altura de la sección y es sometida a dos cargas simétricamente colocadas en los tercios de la luz.

Primero se realiza el ensayo de flexión midiendo la deformación en el tramo elástico, de la que se obtiene el módulo de elasticidad estático global. A continuación, se sigue aumentando la carga hasta llegar a la rotura de la pieza. Del dato de carga máxima, se calcula la tensión de rotura. Los módulos de elasticidad son corregidos a una humedad de referencia del 12% de acuerdo con lo descrito en la norma UNE-EN 384 (26), aumentando el valor en un 2% por cada 1% de disminución del contenido de humedad de la madera.

El pórtico de ensayos utilizado es de la marca IBERTEST, modelo PFIB 600/300W, LM01,

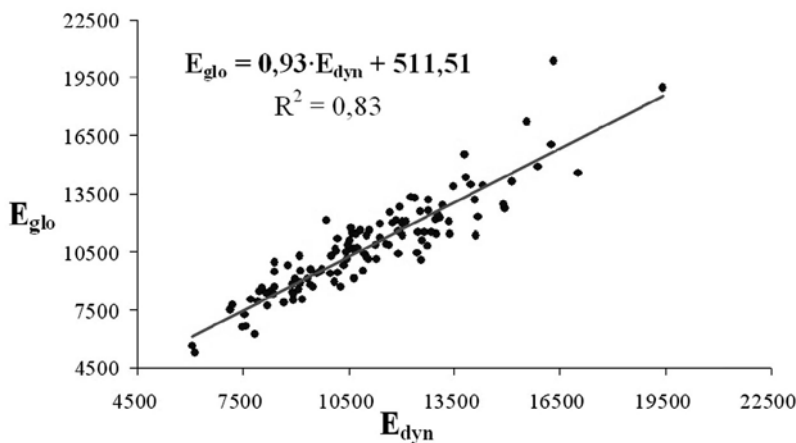


Figura 6. Recta de regresión lineal entre el módulo de elasticidad dinámico, E_{dyn} y el módulo de elasticidad estático, E_{glo}

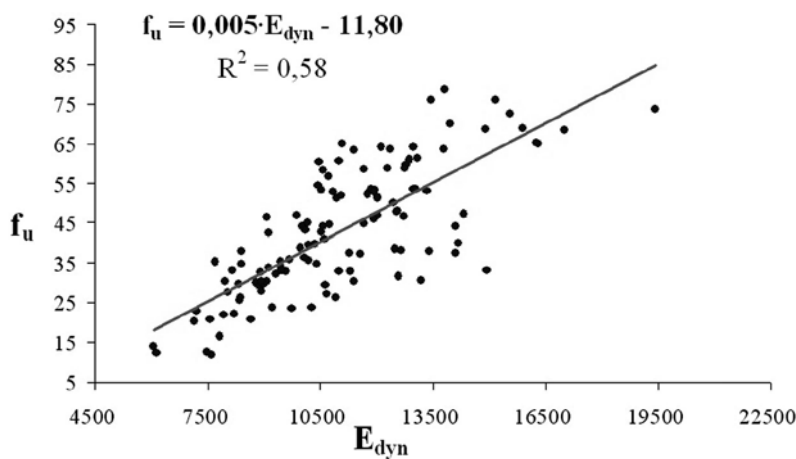


Figura 7. Recta de regresión lineal entre el módulo de elasticidad dinámico, E_{dyn} y la tensión de rotura, f_u

especialmente diseñado para el ensayo a flexión de piezas de directriz recta de hasta 7 m de longitud y una capacidad máxima de carga de 600 kN. Este pórtico de ensayos está dotado de dos células de carga, de 100 y 600 kN, así como de deformadores LVDT de 20 a 50 mm de recorrido. Los valores medios obtenidos del módulo de elasticidad y de la tensión de rotura son: 10.731 N/mm² (CV: 23,0%) y 42,9 N/mm² (CV: 36,6%), respectivamente.

4.4. Resultados y conclusiones

El grado de predicción de las propiedades mecánicas (módulo de elasticidad y tensión de rotura) del lote de madera de pino laricio, se evalúa a partir del análisis de regresión lineal entre el módulo de elasticidad dinámico calculado con la frecuencia de vibración longitudinal y las propiedades resistentes. La bondad del ajuste se estima mediante el coeficiente de determinación.

La recta de regresión lineal entre el módulo de elasticidad dinámico y estático, así como la ecuación propuesta, se muestra en la figura 6. En la figura 7 se observa la regresión lineal entre el módulo de elasticidad dinámico y la tensión de rotura. Normalmente, los resultados que se obtienen de la estimación de las propiedades mecánicas de la madera a partir de variables no destructivas, como la frecuencia de vibración longitudinal, son mejores para el módulo de elasticidad que para la tensión de rotura. De hecho, los resultados en este trabajo de investigación así lo corroboran, ya que se alcanzan coeficientes de determinación, R^2 , para ajustes de predicción a partir del módulo de elasticidad dinámico, de 0,83 para el módulo de elasticidad, y de 0,58 para la tensión de rotura.

Una posible explicación podría consistir en el hecho de que al medir el módulo de elasticidad dinámico se miden las propiedades de la pieza completa, lo que está mejor relacionado con el módulo de elasticidad del material; mientras que por otro lado, la resistencia depende de la presencia de singularidades locales en la pieza, lo que hace que su predicción mediante un estimador global, como es el módulo de elasticidad dinámico, sea más baja.

Aun así, puede concluirse que los resultados obtenidos mediante el empleo de la técnica de vibración longitudinal permiten definir las propiedades del material con un alto grado de precisión, superando en eficacia y facilidad de empleo a otras técnicas no destructivas, incluida la clasificación visual. En la actualidad y en procesos industriales, como la fabricación de madera laminada, ya existen máquinas de clasificación basadas en este principio y que han sustituido a la clasificación visual. Por ello, es de suponer que el futuro de los métodos de vibración como herramientas no destructivas para la estimación de las propiedades resistentes de la madera aserrada estructural sea más que esperanzador.

Este equipo de investigación trabaja en la actualidad con otras especies y técnicas no destructivas. Los resultados obtenidos acentúan las características de precisión, portabilidad, precio y facilidad de empleo de los métodos y equipos de vibración.

AGRADECIMIENTOS

Mº de Educación y Ciencia. Proyecto de Investigación: AGL2002-00813. Laboratorio de Estructuras de Madera del CIFOR-INIA. AITIM (Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y el corcho).

BIBLIOGRAFÍA

- (1) Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación.
- (2) Código Técnico de la Edificación. Ministerio de la Vivienda. Marzo 2006.
- (3) UNE 56544: 2003. Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas.
- (4) UNE 56546. Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de frondosas.
- (5) Pellerin, R.F.; Ross, R.J. *Nondestructive evaluation of wood*. 210 p. Forest Products Society. Madison, WI, USA. 2002.
- (6) Bucur, V. *Acoustics of wood*. 2nd Ed. Heidelberg: Springer Verlag. 455 p. 2006.
- (7) Malhotra, V.M.; Carino, N.J. *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*. CRC Press, 2nd edition. 384 p. 2003.
- (8) Arriaga, F.; Íñiguez, G.; Esteban, M. "Assessment of strength and stiffness properties using longitudinal stress wave on structural gross cross section timber of radiata pine (*Pinus radiata* D. Don)." Proceedings of the 14th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood. Hannover 2 - 4 May 2005. Published by Shaker Verlag, Germany (2005), pp. 101 - 110.
- (9) Divos, F. "Course in Non-Destructive Testing of Wood. Apuntes y presentaciones del curso". Madrid 13-16 junio 2005. ETS Ingenieros de Montes - ETS Arquitectura, UPM, Madrid. 2005.
- (10) Weaver, W.; Timoshenko S.P.; Young, D.H. *Vibration problems in engineering*. John Wiley & Sons Limited. 5th Edition. 610 p. 1990.
- (11) Sobue, N. "Instantaneous measurement of elastic constants by analysis of the tap tone of wood. Application to flexural vibration of beams." *Mokuzai Gakkaishi*, 32 (4) (1986a), pp. 274 - 279.
- (12) Sobue, N. "Measurement of Young's modulus by the transient longitudinal vibration of wooden beams using a FFT spectrum analyser." *Mokuzai Gakkaishi*, 32 (9) (1986b), pp. 744 - 747.
- (13) Sobue, N. "Simultaneous determination of Young's modulus and shear modulus of structural lumber of complex vibrations of bending and twisting." *Mokuzai Gakkaishi*, 34 (8). (1988), pp. 652 - 657.
- (14) Obert, L.; Duvall, W.I. "Discussion of dynamic methods of testing concrete with suggestions for standardization." *Proc. ASTM*, 41, 1053 (1941).
- (15) Kesler, C.E.; Higuchi, Y. "Problems in the sonic testing of plain concrete." Proceedings of the International Symposium on Nondestructive Testing of Materials and Structures. Paris, 1954. Vol. 1 published by RILEM (1954). 45 p.
- (16) Li, J.; Samali, B.; Crews, K. "Determining individual member stiffness of bridge structures using a simple dynamic procedure." *Acoustics Australia*, 32 (1) (2004), pp. 9 - 12.
- (17) Wang, X.; Wacker, J.P.; Morison, A.M.; Forsman, J.W.; Erikson, J.R.; Ross, R.J. "Nondestructive assessment of single-span timber bridges using a vibration-based method". USDA Forest Service, Research Paper FPL-RP-627. Forest Products Laboratory, June 2005. 17 p. 2005a.
- (18) Wang, X.; Wacker, J.P.; Ross, R.J.; Brashaw, B.K.; Vatalaro, R. "Development of flexural vibration inspection techniques to rapidly assess the structural health of timber bridges systems." Proceedings of the 14th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood. Hannover, 2 - 4 May 2005. Published by Shaker Verlag, Germany, (2005b), pp. 113 - 121.
- (19) Crews, K.; Samali, B.; Li, J. "Reliable assessment of aged timber bridges using dynamic procedures." Proceedings of the 8th World Conference on Timber Engineering. 14 -17 June 2004. Lahti, Finland. Vol II. (2004a), pp. 295 - 300.
- (20) Crews, K.; Samali, B.; Li, J.; Bakoss, S.; Champion, C. "Testing and assessment procedures to facilitate the management of timber bridge assets." Proceedings of the 3rd CECAR - Civil Engineering Conference in the Asian Region. Seoul, Korea. 16 -19 August 2004. (2004b). 15 p.
- (21) Ross, R.J.; Hunt, M.O.; Wang, X.; Soltis, L.A. "Floor vibration: a possible assessment method for historic buildings." *APT Bulletin, The Journal of Preserv. Technology*. Vol. XXII, 2-3 (2001), pp. 23-25.
- (22) UNE-EN 13183-2: 2002. Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 2: Estimación por el método de la resistencia eléctrica.
- (23) UNE-EN 408: 2004. Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas.
- (24) Divos, F. "Portable Lumber Grader." 13th International Symposium on Non-destructive Testing of Wood. Berkeley, California, USA 2002 August 19-21. (2002).
- (25) UNE-EN 338: 2003. Madera aserrada estructural. Clases resistentes.
- (26) UNE-EN 384: 2004. Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad.

* * *