

NOTA TECNICA

EVOLUCIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD LONGITUDINAL ENTRE 10°C Y 100°C EN PIEZAS DE *Pinus radiata* USANDO UNA TÉCNICA DE EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA

EVOLUTION OF THE LONGITUDINAL MODULUS OF ELASTICITY BETWEEN 10° C AND 100° C IN SPECIMENS OF *Pinus radiata* USING A NONDESTRUCTIVE EVALUATION TECHNIQUE

Jorge Cornejo Troncoso¹, Ricardo Baettig Palma¹

RESUMEN

Se midió la frecuencia de vibración natural en 5 piezas de *Pinus radiata* D. Don de una pulgada de espesor, en un rango de variación de temperatura desde 10°C a 100°C, en intervalos de 10°C. Para el ensayo, las piezas fueron apoyadas en sus extremos como una viga simple y la vibración fue inducida mediante un impacto seco. Para cada impacto, un dispositivo electrónico digitalizó y almacenó en un computador personal la señal de vibración a una frecuencia de adquisición de 1 kHz. Al inicio del experimento las piezas se encontraban a un contenido de humedad de 12% y fueron envueltas en un film de nylon para minimizar los cambios de contenido de humedad. El barrido de temperatura se realizó en una cámara de secado experimental con regulación automática de la temperatura y humedad relativa del aire. Conforme a la teoría, los resultados muestran que a medida que aumenta la temperatura, la madera pierde rigidez, expresada experimentalmente como una disminución de la frecuencia de vibración. Los resultados muestran que a 100°C se produce una reducción del módulo de elasticidad dinámico cercano al 20% con respecto a su valor a temperatura ambiente.

Palabras claves: Vibraciones transversales, visco-elasticidad de la madera, evaluación no destructiva.

ABSTRACT

We measured the natural frequency of vibration in 5 wood specimens of *Pinus radiata* D. Don (1 inch thickness) in the range of temperature from 10°C to 100°C at intervals of 10°C. The samples were placed as a simple-beam and the vibration was induced by a quick shot. The signal of vibration was digitized and stored on a personal computer at a frequency acquisition of 1 kHz. At the beginning of the experiment the specimens were at 12% moisture content and were wrapped in a nylon film to minimize changes in moisture content. The temperature scan was conducted in a drying kiln with automatic control of temperature and relative humidity. According to theory, results show that wood loses stiffness gradually. This is expressed experimentally as a decrease in the frequency of vibration. Results show that at 100°C the modulus of elasticity reduces close to 20% of its value at room temperature.

Keywords: Transversal vibrations, wood viscoelasticity, non-destructive testing.

¹Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Talca, Talca, Chile.
Autor para correspondencia: rbaettig@utalca.cl
Recibido: 15.12.2008 Aceptado: 28.07.2009

INTRODUCCION

La madera es un material ampliamente usado en construcción, que se comporta mecánicamente como un sólido viscoelástico, es decir, como un material que tiene un carácter elástico y también fluido, sobre todo en esfuerzos de larga duración. Éste comportamiento puede ser acentuado mediante un aumento de la temperatura.

Si no actúan fuerzas periódicas externas en un cuerpo sólido vibrando, este vuelve a su condición estática. Las amplitudes sucesivas comienzan a declinar ya que la energía inherente original, es disipada parcialmente por radiación de sonido y parcialmente por fricción interna, la cual produce calentamiento, lo que es llamado capacidad de amortiguación (Kollmann y Coté 1968).

Según Ross y Pellerin (1994), Jayne fue quién en 1959 inició la hipótesis que relacionaba las propiedades mecánicas y vibratorias de la madera. Éste afirma que el almacenamiento y disipación de energía en la madera, son controlados por los mismos mecanismos que determinan sus propiedades mecánicas. Las propiedades físicas y mecánicas de la madera y principalmente el módulo de elasticidad (MOE) y módulo de ruptura (MOR), son representados por el almacenamiento y la disipación de energía, respectivamente. Las propiedades de almacenamiento de energía pueden ser observadas como la frecuencia de oscilación en vibración o la velocidad de transmisión del sonido. Por otra parte, las propiedades de disipación pueden ser observadas mediante la medición de la tasa de amortiguación de vibraciones libres o la atenuación de ondas acústicas (Ross y Pellerin 1994). De acuerdo a estos autores pueden establecerse relaciones matemáticas entre las propiedades vibratorias de la madera y el comportamiento estático elástico y la resistencia, a través de análisis estadísticos de regresión lineal.

El MOE dinámico puede ser determinado usando la frecuencia de resonancia de vibración de manera simple y rápida (Baettig 2001). Debido a la simplicidad de utilización de esta técnica, puede utilizarse para estudiar el comportamiento de los sólidos viscoelásticos a distintas temperaturas incluyendo temperaturas muy altas y criogénicas. Cuando la vibración se estimula por un impacto, cuya duración es extremadamente corta con respecto a la oscilación que produce, se habla de impulse excitation of vibration technique (IET) o vibración transversal libre. A su vez, cuando la vibración es estimulada periódicamente mediante algún transductor, se habla de sonic resonance (SR) o vibraciones transversales forzadas. Estas técnicas han mostrado promisorios resultados para la evaluación del módulo de elasticidad en forma no destructiva en diversos materiales, incluso las normas ASTM E1876-99 y ASTM E1875-97 describen su implementación.

Ross y Pellerin (1994) exponen la analogía entre el comportamiento de una viga simplemente apoyada vibrando libremente y la vibración de una masa atada a un resorte y un amortiguador. A partir de dicha analogía y tomando en cuenta la geometría de la viga (segundo momento de inercia, I y longitud total, L) y las condiciones de apoyo, es posible calcular el módulo de elasticidad dinámico por vibraciones transversales (MOE_{tv}) como:

$$MOE_{tv} = \frac{F_f^2 \times m \times L^3}{12,65 \times I} \quad (1)$$

$$MOE_{tv} = \frac{F_f^2 \times m \times L^3}{2,46 \times I} \quad (2)$$

Donde:

MOE_{tv} : módulo de elasticidad dinámico por el método de vibraciones transversales (Pa),

F_f : frecuencia fundamental de vibración (Hz),

m : masa de la pieza (kg),

L : largo total de la pieza (m),

I : segundo momento de inercia (m^4).

La primera ecuación es válida para condiciones de apoyo en los nodos de la vibración, vale decir, usando una luz de 55,2% de L (ASTM E1876 1999) y la segunda para condiciones de apoyo cerca de sus extremos (Metriguard Inc. 1990).

Según Guitard (1987) la madera es asimilable a un compuesto natural complejo esencialmente constituido de tres biopolímeros, dos polímeros amorfos, es decir, la lignina y las hemicelulosas y un tercer polímero semicristalino que contribuye al fortalecimiento (celulosa). El principal proceso de relajación para polímeros corresponde a la temperatura de transición vítrea, en este proceso un polímero cambia desde una forma vítrea, es decir, un material poco dúctil, a una forma como un fluido viscoso o goma plástica. El paso de estado vítreo, al estado dúctil de un polímero amorfo termoplástico, es caracterizado por una temperatura T_g , dicha temperatura, es denominada temperatura de transición vítrea o temperatura de relajación. Esta transición se acompaña de una disminución muy importante, que afecta particularmente a la constante elástica (Guitard 1987). Usualmente, los materiales con características amorfas presentan una menor T_g , en el caso de madera, la lignina y la hemicelulosa son amorfas y presentan temperaturas de transición menores que la celulosa que es parcialmente cristalina (Moya 2000). La T_g de la lignina y la hemicelulosa aisladas de la madera en estado seco está comprendida entre 127-235°C y 150-220°C. La celulosa anhidra aislada posee una T_g que fluctúa entre 220-255°C. La T_g a un 20% de contenido de agua está comprendidas en rangos de 72-128°C, 54-142°C y 190-230°C para los componentes aislados lignina, hemicelulosa y celulosa, respectivamente (Guitard 1987; Wolcott *et al.* 1990; Obataya *et al.* 1998).

De acuerdo a ello, la temperatura relajación de algunos componentes de la madera cae dentro del rango usual de temperaturas utilizadas en procesos convencionales de secado. Por medio de la técnica de vibraciones transversales, es posible medir y analizar la evolución del módulo de elasticidad dinámico (componente elástico) y del factor de amortiguación de la vibración (componente viscoso) en piezas de tamaño real. Es por esto que el objetivo del estudio ha sido el de caracterizar el comportamiento visco-elástico en piezas de madera aserrada en un rango amplio de temperatura, en piezas de tamaño real de *Pinus radiata* D. Don. Este rango va entre 10°C (temperatura ambiente usual en invierno en la zona central de Chile) y 100°C (temperatura máxima de secado convencional acelerado).

MATERIALES Y METODOS

La componente experimental se realizó en las dependencias Centro Regional de Tecnología e Industria de la Madera (CERTIM) de la Universidad de Talca. En el experimento se utilizó un total de seis piezas de 1 pulgada de espesor por 4 pulgadas de ancho de madera aserrada de *Pinus radiata* D. Don. Estas 6 piezas originalmente de 4,2 m de longitud fueron elegidas al azar dentro de un paquete de madera que había sido secado en una cámara de secado convencional del CERTIM. Todas las piezas presentaban nudos, pero estos no fueron registrados. Para los experimentos se utilizó una cámara de secado prototipo marca NARDI con control automático de temperatura, humedad relativa y velocidad del aire con capacidad para 1 m³ de madera aserrada. Debido a las limitaciones de tamaño de esta cámara, las piezas tuvieron que ser cortadas a un largo final de 2 m antes de ser testeadas.

Se construyó un sistema prototipo de medición de frecuencia de vibración de acuerdo a los pasos e ideas propuestas por Baettig (2001). En el dispositivo la pieza de madera vibra apoyada en sus extremos, constituyendo uno de los apoyos en una celda de carga de tipo universal que responde a las oscilaciones de peso que percibe a medida que la pieza se encuentra vibrando (Figura 1). Un circuito electrónico (amplificador de instrumentación) se encarga de aumentar la amplitud de la señal. Esta señal es digitalizada mediante un convertidor analógico digital marca Picotech modelo ADC-12 que se conecta al puerto paralelo de un computador personal. La señal es digitalizada a una frecuencia de 10 kHz con 12 bits de resolución.

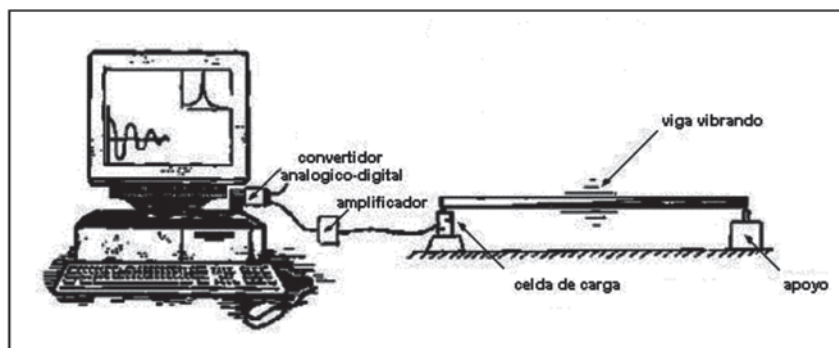


Figura 1. Configuración del sistema prototipo de medición de frecuencia de vibración.

Se midió el contenido de humedad inicial de cada una de las seis piezas mediante un xilohigrómetro marca Protimeter modelo Mini III, recogiendo de cada una de las piezas tres lecturas, siendo dos de estas tomadas a una distancia aproximada de 50 cm desde los extremos y una tercera lectura se obtuvo en el centro de la pieza, con la finalidad de obtener un contenido de humedad promedio representativo de cada pieza. Se procedió a envolver las seis piezas con un film de nylon para evitar cambios en el contenido de humedad durante el experimento. Se escogió la pieza N°3 para dejarla como pieza testigo del registro de temperatura que se realizó por medio de termocupla J, la cual, fue introducida hasta el centro de la pieza mediante una perforación de menos de 1 mm de diámetro.

Las 6 piezas fueron puestas en la cámara de secado para realizar un barrido desde la temperatura ambiental (alrededor de 10°C) hasta 100°C. Operacionalmente, cada pieza tuvo que ser extraída de la cámara y montada rápidamente sobre el dispositivo de medición de vibraciones. En seguida se golpeó levemente con un martillo al centro del largo de la pieza y simultáneamente se registró la vibración transversal mediante el sistema descrito en Baettig (2001) y Cornejo (2008). Se registraron en total 5 impactos por cada medición. Finalmente se reintrodujo la pieza al secador y se repitió el mismo procedimiento para las 4 piezas restantes. Este mismo procedimiento se realizó abarcando un intervalo del barrido térmico un rango de 10° a 100° C con registros cada 10°C.

Se utilizó la herramienta “Análisis de Fourier” del software Microsoft Excel 2003 para el cálculo de la frecuencia fundamental de vibración utilizando la técnica de “Transformación Rápida de Fourier” (FFT). La frecuencia fundamental de las vibraciones es combinada con las dimensiones de la pieza y su peso para determinar el MOE dinámico. Debido a la configuración del ensayo, para el cálculo del MOE se utilizó la ecuación 2.

RESULTADOS Y DISCUSION

La densidad a un contenido de humedad 12% para cada una de las piezas ensayadas se presenta en la Tabla 1:

Tabla 1. Densidad a 12% de contenido de humedad.

Pieza	Densidad (kg/m ³)
N°1	463
N°2	531
N°4	388
N°5	479
N°6	572

El contenido de humedad inicial promedio de las piezas medido por xilohigrómetro resultó 12,3% en tanto que el final alcanzó un 11,4%. Es decir, el film de nylon permitió que las piezas se secaran poco menos de 1%, pese a haber sido llevadas hasta una temperatura de 100°C en una condición de humedad de equilibrio cercana al estado anhidro.

Con propósitos de reducir cantidad de análisis espectrales se usaron sólo 3 registros de vibraciones transversales libres, de los 5 obtenidos en la etapa de experimentación. Como consecuencia de registrar 3 impactos a un total de 5 piezas, en un barrido de 10 temperaturas distintas (variando de 10°C a 100°C) se obtuvo una base de datos de 150 registros de vibraciones transversales libres. La repetitividad de la medición de frecuencia fundamental es alta, de hecho como resultado de la aplicación de la Transformada Rápida de Fourier, la mayor parte de las veces se obtuvieron espectros de potencia idénticos para cada uno de los 3 impactos. En 34 de 50 ensayos de obtuvo exactamente la misma frecuencia fundamental de vibración. En los 16 casos restantes se obtuvieron frecuencias que no difirieron entre sí en más de 0,24 Hz, lo que se tradujo en menos de 5% de diferencia en el módulo de elasticidad estimado. Los resultados promedio para tres mediciones del MOE dinámico (en GPa) por cada pieza en función de la temperatura (en °C), para cada una de las 5 piezas son presentados en la Figura 2. Estos resultados tienen un amplio rango de variación debido al amplio rango de densidad encontrada (Tabla 1) y a la nudosidad variable de las piezas estudiadas.

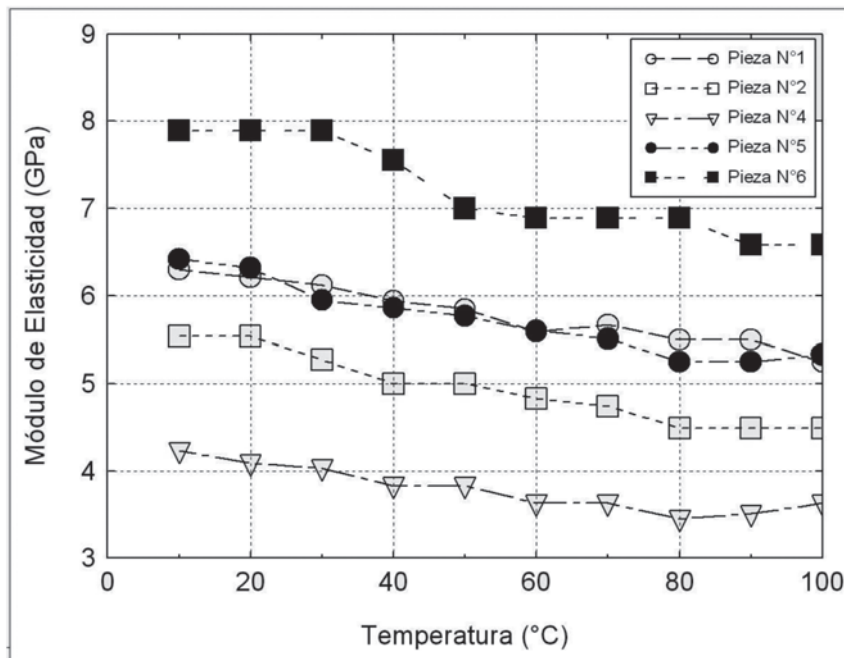


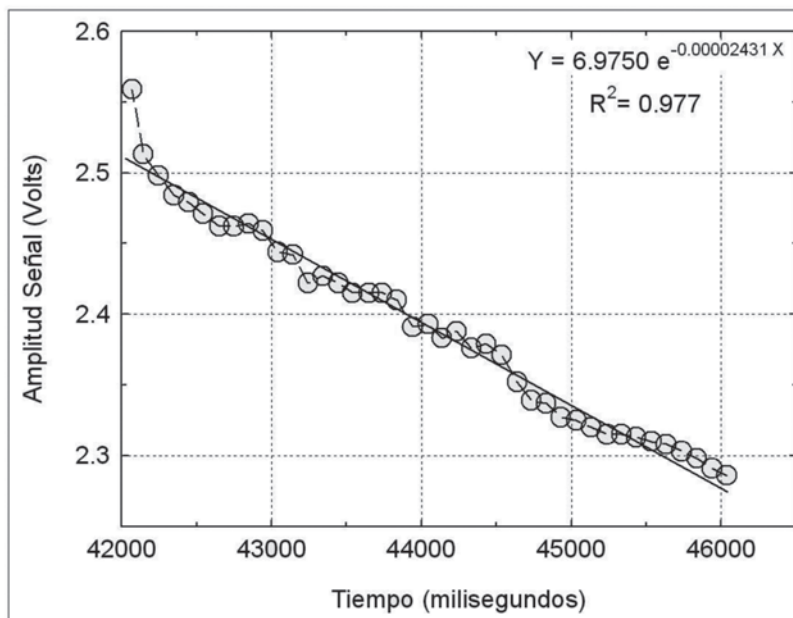
Figura 2. Módulo de elasticidad dinámico versus temperatura para las 5 piezas.

Los resultados presentados en la Figura 2 fueron estandarizados como MOE igual a 100% a una temperatura de 0°C. Posteriormente se realizaron regresiones lineales simples entre temperatura y MOE estandarizado. El resultado de la pendiente de regresión lineal (pérdida porcentual de rigidez) y el resultado de su respectivo coeficiente de correlación son presentados en la Tabla 2. Estos resultados indican una pérdida cercana a un 0,2% de MOE por cada °C de aumento en temperatura, es decir, una reducción promedio de 20% en el valor del MOE al aumentar la temperatura hasta 100°C.

Tabla 2. Regresión MOE unitario versus temperatura.

Pieza	Pendiente (%/°C)	Coef. de Correlación
N°1	-0,172	0,981
N°2	-0,230	0,974
N°4	-0,189	0,922
N°5	-0,201	0,964
N°6	-0,209	0,949

Por otra parte, a cada uno de los 150 registros de vibración libre se les registró el peak por cada oscilación, obteniéndose las respectivas curvas de amortiguación. Con estos datos se realizaron regresiones exponenciales entre el tiempo versus la amplitud de oscilación. El exponente de esta regresión (Figura 3) corresponde al coeficiente de amortiguación de la vibración.

**Figura 3.** Gráfica tiempo versus amplitud de oscilación y estimación del coeficiente de amortiguación (pieza N°6 a 100°C).

Los resultados promedio para el coeficiente de amortiguación de la vibración en función de la temperatura, para cada una de las 5 piezas son presentados en la Figura 4:

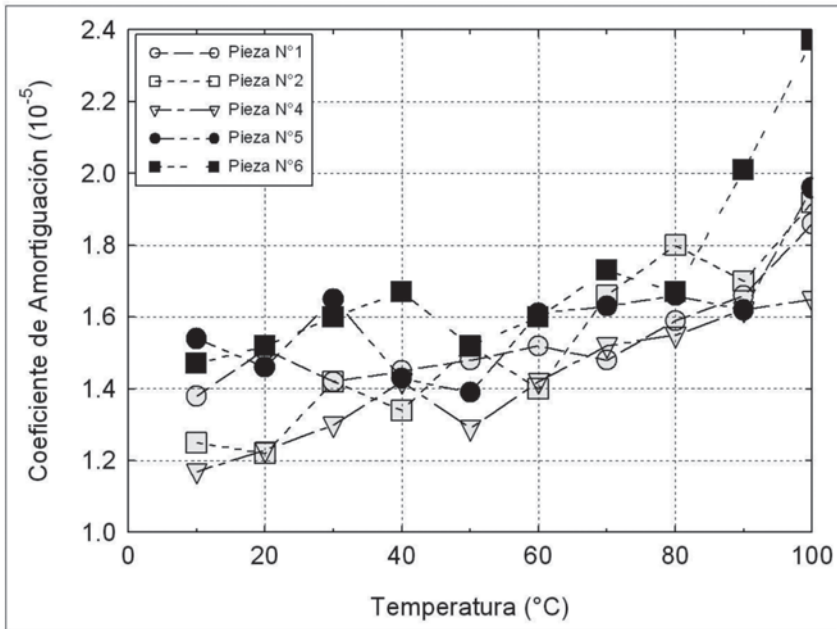


Figura 4. Coeficiente de amortiguación de la vibración versus temperatura para las 5 piezas.

En base a estos resultados se realizaron regresiones lineales simples entre temperatura y el promedio del coeficiente de amortiguación de la vibración. El resultado de la pendiente de regresión lineal y el resultado de su respectivo coeficiente de correlación se presentan en la Tabla 3. Estos resultados indican un aumento sistemático del coeficiente de amortiguación en función de la temperatura. Este pendiente varía entre $3,48 \times 10^{-7}$ y $7,36 \times 10^{-7}$ por cada 1°C , lo cual, se traduce en un aumento entre 30% y 60% en el valor del coeficiente de amortiguación, al pasar de 10°C a 100°C .

Tabla 3. Regresión coeficiente de amortiguación versus temperatura

Pieza	Pendiente (1°C)	Coef. de Correlación
N°1	$3,88 \times 10^{-7}$	0,832
N°2	$7,36 \times 10^{-7}$	0,936
N°4	$5,27 \times 10^{-7}$	0,963
N°5	$3,48 \times 10^{-7}$	0,656
N°6	$7,34 \times 10^{-7}$	0,806

Debido a la pérdida de contenido de humedad de 1% en el experimento descrito, según datos de Guitard (1987) debió haberse producido un aumento de 1,5% del MOE longitudinal de la madera. Contrario a ello, el experimento midió una pérdida promedio del MOE próxima a 20%, al alcanzarse una temperatura de 100°C . Este resultado es acorde con lo esperable teóricamente debido a un fenómeno de pérdida de rigidez del material, debido principalmente al debilitamiento que sufren los enlaces químicos que se forman entre y dentro de las moléculas que conforman el material.

CONCLUSIONES

Se ha demostrado en forma experimental y usando una técnica no destructiva de fácil implementación que la madera aserrada tamaño real experimenta un proceso de “plastificación” con el aumento gradual de la temperatura. Mediante la técnica de vibraciones transversales libres se cuantificó una reducción cercana de 0,2% del valor del MOE longitudinal por cada 1°C de aumento de la temperatura en un rango de 10°C a 100°C. El mismo fenómeno se puso en evidencia experimentalmente por medio del registro de un aumento sistemático del coeficiente de amortiguación de la vibración libre en función de la temperatura, alcanzándose entre 30% y 60% de aumento en el valor del coeficiente de amortiguación, al pasar de 10°C a 100°C.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Centro Regional de Tecnología e Industrias de la Madera (CER-TIM) – Universidad de Talca, por las facilidades prestadas en la realización de este trabajo.

BIBLIOGRAFIA

American Society for Testing and Materials. 1997. Standard test method for dynamic young's modulus, shear modulus, and Poisson's Ratio by Sonic Resonance. ASTM E1875-97. West Conshohocken, USA.

American Society for Testing and Materials. 1999. Standard test method for dynamic young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio by impulse excitation of vibration. ASTM E1876-99. West Conshohocken, USA.

Baettig, R. 2001. Determinación del módulo de elasticidad de la madera mediante vibraciones transversales. *Madera: Ciencia y Tecnología* 3 (1 - 2): 48 - 51.

Cornejo, J. 2008. Comportamiento viscoelástico en piezas estructurales de *Pinus radiata* D. Don usando técnicas no destructivas. Memoria para optar al Título de Ingeniero en Industrias de la Madera. Universidad de Talca. Talca. Chile. 42 p.

Guitard, D. 1987. Mécanique du matériau bois et composites. Cepadues Editions. Toulouse. France. 238 p.

Kollmann, F.; Côté, W. 1968. Principles of Wood Science and Technology. Springer-Verlag. 592 p.

Metriguard Inc. 1990. Metriguard model 340 E-Computer. Operation Manual. Metriguard Inc. Pullman. Wa. USA.

Moya, C. 2000. Análisis dinámico mecánico de maderas. Memoria para optar al Título de Ingeniero Forestal. Universidad de Talca. 66 p.

Obataya, E.; Norimoto, M.; Gril, J. 1998. The effects of adsorbed water on dynamic mechanical properties of wood. *Polymer* 39(14):3059-3064.

Ross, R.J.; Pellerin, R.F. 1994. Nondestructive testing for assessing wood members in structures: A review. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-70 (Rev.). Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 40 p.

Wolcott, M.P.; Kamke, F.A.; Dillard, D.A. 1990. Fundamentals of flakeboard manufacture: viscoelastic behavior of the wood component. *Wood Fiber Science* 22(4):345-361.