

DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD POR ULTRASONIDO Y VIBRACIONES EN VIGAS DE PINO PONDEROSA

DETERMINATION OF THE MODULUS OF ELASTICITY BY ULTRASOUND AND VIBRATIONS IN PONDEROSA PINE BEAMS

Roberto D. Manavella^{1*}, Alfredo A. Guillaumet², María C. Filippetti³, Lía C. Meyer⁴

⁽¹⁾ Profesor Titular. GIDEC UTN FRVT, Venado Tuerto. Argentina

⁽²⁾ Profesor Titular. GIDEC UTN FRVT, Venado Tuerto. Argentina

⁽³⁾ Profesor Adjunto. GIDEC UTN FRVT, Venado Tuerto. Argentina

⁽⁴⁾ Ayudante de Trabajos Prácticos. GIDEC UTN FRVT, Venado Tuerto. Argentina

* Contacto: Roberto D. Manavella : rdmvt@yahoo.com

CÓDIGO: 4620112

Resumen

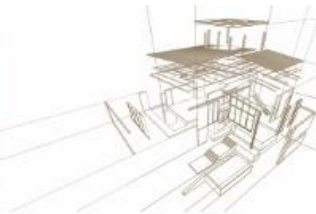
El uso de métodos no destructivos para la predicción del comportamiento elástico de madera aserrada en piezas de tamaño estructural es una práctica frecuente y avalada por numerosas publicaciones. Estas técnicas son utilizadas con eficacia para la clasificación mecánica y la determinación de parámetros de diseño. El objetivo de este trabajo es verificar la efectividad de las técnicas de vibraciones y ultrasonido como herramientas válidas para predecir el valor del módulo de elasticidad en madera de pino ponderosa (*Pinus ponderosa Dougl. ex Laws*) de la Patagonia Norte, Argentina. Se ensayaron 173 vigas de tamaño estructural de diferentes escuadrías. En cada una de las piezas se determinaron los valores del módulo de elasticidad mediante tres técnicas: por flexión estática según norma UNE-EN 408, por ultrasonido mediante equipo Fakkop Microsecond Timer y por vibraciones longitudinales inducidas. Los resultados de módulo de elasticidad calculados a partir de los ensayos de flexión según UNE-EN 408 comparados con los obtenidos por ultrasonido presentan una correlación de 0,90 ($R^2 = 0,81$), en tanto que, comparados con los determinados por vibraciones longitudinales inducidas muestran una correlación de 0,93 ($R^2=0,87$). Estos resultados indican que las técnicas de ultrasonido y de vibraciones longitudinales inducidas pueden usarse con suficiente exactitud y seguridad para la predicción del módulo de elasticidad en madera de Pino ponderosa.

Palabras claves: pino ponderosa, módulo de elasticidad, MOE, vibraciones, ultrasonido.

Abstract

The use of non-destructive methods for the prediction of the elastic behavior of sawn wood in pieces of structural size is a frequent practice and endorsed by numerous publications. These techniques are used effectively for the mechanical classification and determination of design parameters. The objective of this work is to verify the effectiveness of vibration and ultrasound techniques as valid tools to predict the value of the modulus of elasticity in ponderosa pine wood (*Pinus ponderosa Dougl. ex Laws*) of North Patagonia, Argentina. 173 beams of structural size from different squads were tested. In each of the pieces the values of the modulus of elasticity were determined by three techniques: by static bending according to UNE-EN 408 norm, by ultrasound using Fakkop Microsecond Timer equipment and by induced longitudinal vibrations. The values of modulus of elasticity calculated from the bending tests according to UNE-EN 408 compared with those obtained by ultrasound show a correlation of 0,90 ($R^2=0,81$), whereas, compared with those determined by induced longitudinal vibrations show a correlation of 0,93 ($R^2=0,87$). These results indicate that the techniques of ultrasound and induced longitudinal vibrations can be used with sufficient accuracy and safety for the prediction of the modulus of elasticity in ponderosa pine wood.

Keywords: ponderosa pine., Modulus of elasticity, MOE, vibrations, ultrasound



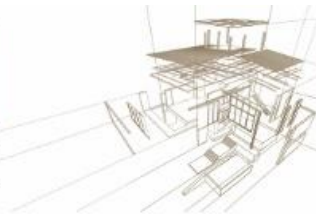
1.- INTRODUCCIÓN

Debido al sostenido aumento de la construcción con madera y a la demanda de este material para uso estructural que se está observando en Argentina, se hace imprescindible contar con valores precisos de las propiedades mecánicas de las especies de mayor comercialización, ya que esto permitirá poner a disposición de los profesionales, información precisa para el diseño y cálculo de estructuras de madera más confiables, seguras y económicas.

Es deseable que el aporte de valores sea realizado utilizando métodos rápidos, sencillos, que mantengan intacta las características del material original, siendo las técnicas de evaluación no destructivas las más indicadas para este fin, ya que dan resultados ciertos, válidos y comparables con los obtenidos por ensayos destructivos, con la ventaja de preservar la integridad de la madera.

Existen numerosas publicaciones que abordan este tema y certifican lo pertinente del uso de métodos no destructivos. Los END (Ensayos No Destructivos) se pueden definir como técnicas que permiten examinar los materiales o sus componentes sin que se vean afectadas sus propiedades, su integridad y su utilidad final, siendo el interés práctico tratar de predecir las características resistentes con el mayor grado de acierto, sin dañar el material, Acuña *et al.* (2006), Casado *et al.* (2010). La estimación de las propiedades resistentes de la madera, tales como la densidad, el módulo de elasticidad o la tensión de rotura, se puede realizar mediante la medición de una serie de parámetros físicos que se utilicen como predictores, por ejemplo, la velocidad de propagación de ultrasonidos, Íñiguez González *et al.* (2007). En particular, el ensayo de ultrasonidos se basa en hacer pasar una onda ultrasónica a través de la madera, donde recorrerá el camino más directo entre el punto de emisión y el punto de recepción, dependiendo su velocidad de propagación de las características elásticas del material atravesado, Balmori *et al.* (2016), Conde García *et al.* (2007). La velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas varía con cada especie por lo que resulta de interés realizar una evaluación previa y los ajustes necesarios antes del uso de estos métodos. Se debe tener en cuenta que las mediciones se verán afectadas por las singularidades y defectos internos de la madera y su grado de deterioro, entre otros, Pellerin *et al.* (1985). En los ajustes se deberá considerar, además, las variaciones en función de la longitud de la pieza, Diab *et al.* (2013).

Una gran cantidad de trabajos de investigación corroboran la correlación existente entre los valores del módulo de elasticidad dinámico, determinado a través de ensayos por ultrasonido o vibraciones, con los calculados a partir de ensayos de flexión estática, Ilic (2001). De acuerdo a Rajeshwar *et al.* (1997), es común encontrar altas correlaciones lineales entre el MOE, la densidad y la resistencia de la madera, del orden del 0,6 a 0,8. Para el Pino del Sur (*pinus do sul*), Calil *et al.* (2003), ha informado coeficientes de correlación lineal entre el módulo elasticidad dinámica y el módulo estático de $R = 0,98$. Casado *et al.* (2013) ha evaluado, para trozas y tablas aserradas de *Populus x euramericana* una función de predicción para el MOE con la velocidad ultrasónica longitudinal indirecta medida con equipo Fakopp alcanzando un R^2 de 0,50, lo que considera un buen predictor de la calidad de la madera. En piezas de gruesa escuadría de pino laricio, se ha encontrado un alto grado de correlación entre el módulo de elasticidad dinámico obtenido a partir de la frecuencia longitudinal de vibración, y las propiedades mecánicas, Íñiguez González *et al.* (2007).



La estimación del módulo de elasticidad dinámico puede hacerse de manera sencilla y acertada por ultrasonidos. Esta técnica puede ser aplicada, esencialmente, siguiendo los procedimientos de transmisión o pulso eco, siendo los primeros los que mayor aplicación tienen en la madera, utilizándose muy ampliamente aquellos que consisten en dos transductores, uno emisor y otro receptor que, perfectamente acoplados a la madera, miden el tiempo que tarda la onda ultrasónica en llegar de uno a otro, Acuña *et al.* (2006). En estudios realizados sobre probetas pequeñas libres de defectos se han obtenido buenos resultados en la predicción del módulo de elasticidad a través de la velocidad de propagación de ultrasonidos y la densidad, Boström L. (1994).

Para la predicción del módulo de elasticidad dinámico, también pueden utilizarse la técnica de vibraciones longitudinales inducidas con resultados muy satisfactorios. Los valores obtenidos mediante el empleo de la técnica de vibraciones longitudinales 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, Íñiguez González *et al.* (2007).

El objetivo del presente trabajo, es determinar los valores del módulo de elasticidad dinámico de 173 piezas de tamaño estructural de Pino ponderosa, utilizando las técnicas de ultrasonido y vibraciones longitudinales inducidas y compararlos con los resultados obtenidos por flexión estática, a fin de verificar que dichos métodos no destructivos proporcionan valores aceptables para la estimación del módulo de elasticidad en madera aserrada de esta especie.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Material de ensayo.

La madera de Pino ponderosa (*Pinus ponderosa Dougl. ex Laws*) proviene de la Patagonia Andina Norte, República Argentina, específicamente de plantaciones de la cuenca Arroyo del Medio, cercana a San Carlos de Bariloche. El material se obtuvo de trozas provenientes de un primer raleo comercial, en tres predios diferentes de la zona mencionada, con edades de 25, 26 y 32 años. Las trozas fueron aserradas, secadas y cepilladas en Bariloche y trasladadas, previo acondicionamiento, a la ciudad de Venado Tuerto. Las piezas fueron recibidas en el Laboratorio de la Facultad Regional Venado Tuerto, de la Universidad Tecnológica Nacional donde se prepararon los cuerpos de prueba con una longitud igual a 20 veces su altura nominal y se colocaron en cámara, a una temperatura de 20 ± 2 °C y una humedad relativa ambiente de $65 \pm 5\%$, para su almacenamiento y estabilización. En la Tabla 1 se presentan las dimensiones de las muestras a ensayar.

Se efectuaron mediciones sobre un total de 173 piezas de madera aserrada de tamaño estructural, sin clasificar, correspondientes a cuatro muestras de diferentes escuadrías y longitudes. En todos los casos se determinó el módulo de elasticidad mediante tres técnicas: por flexión estática de acuerdo a la UNE-EN 408:2012, por ultrasonido y por vibraciones longitudinales inducidas.

Previo al ensayo a flexión, para cada cuerpo de prueba, se realizó un relevamiento de sus singularidades de acuerdo a las prescripciones de la norma IRAM 9662-3 (2015) y de sus características geométricas.



Tabla 1: Dimensiones y cantidad de los cuerpos de prueba

Muestra N° :	1	2	3	4
Base (mm) :	50	50	50	50
Altura (mm) :	50	75	100	125
Largo (mm) :	1000	1500	2000	2500
Cantidad :	34	40	50	49

2.2. Procedimiento operatorio y de cálculo para la determinación del Módulo de Elasticidad Global según UNE-EN 408:2012

Los ensayos de flexión estática y la determinación de los valores de módulo de elasticidad global y de resistencia a flexión se hicieron de acuerdo a las prescripciones de la norma EN 408:2012. Para la determinación del módulo de elasticidad global se consideró al módulo de elasticidad transversal “G” igual a infinito, (procedimiento idéntico a la normativa IRAM 9663:2013).

En el procedimiento experimental se adoptó una separación entre apoyos igual a 18 veces la altura del cuerpo de prueba. Las cargas se aplicaron en los tercios de la viga con velocidad constante. Para su medición se utilizó una celda de carga máxima 50.000 N y lectura mínima 10 N. Para la determinación del módulo de elasticidad global en flexión se empleó un comparador digital de 0,01 de precisión, ubicado en el centro de la luz, sobre la cara inferior. Se usaron escalones de carga de 500 N con la medición de las deformaciones correspondientes para la determinación de los módulos de elasticidad. En los apoyos de la viga y en los puntos de aplicación de la carga, se colocaron placas de acero de ancho igual a la mitad de la altura de la viga, con el objeto de reducir el aplastamiento localizado de la madera. Para el ensayo de los cuerpos de prueba de mayor escuadría, se colocaron dispositivos especiales capaces de proporcionar arriostramiento lateral sin obstaculizar las deformaciones verticales, para evitar el pandeo lateral de la pieza.

Los valores de los ensayos fueron corregidos a condiciones de referencia de acuerdo a la norma IRAM 9664 (2013). Una vez finalizado el ensayo, se procedió a aserrar un trozo de material de las proximidades de la zona de rotura, abarcando toda la sección transversal y libre de defectos, sobre el cual se determinó el contenido de humedad y la densidad aparente de acuerdo a norma ISO 3130 (1975) e ISO 3131 (1975) respectivamente.

Para la determinación del módulo de elasticidad global se eligió la parte de la curva carga-deformación con correlación superior a 0,99. Se trató de incluir un tramo que estuviera comprendido entre el 20% y el 30% de la carga estimada de rotura. Se utilizó la siguiente expresión dada por la norma UNE EN 408 (2012):

$$MOE_{Global} = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gbh} \right)} \quad (1)$$



Donde:

MOE_{Global} : Módulo de elasticidad global en flexión, en N/mm^2 .

a : Distancia entre el punto de carga y apoyo más próximo, en milímetros.

l : Longitud de flexión entre apoyos, en milímetros.

b : Anchura de la sección, en milímetros.

h : Altura de la sección, en milímetros.

G : Módulo de elasticidad transversal en N/mm^2 . Se utilizó para el módulo de elasticidad transversal el valor $G = \infty$.

$F_2 - F_1$: Incremento de carga en la recta de regresión con un coeficiente de correlación superior a 0,99 con las deformaciones, en Newton.

$w_2 - w_1$: Incremento de deformación correspondiente a $F_2 - F_1$, en milímetros.

2.3. Procedimiento operatorio y de cálculo para la determinación del Módulo de Elasticidad Dinámico por Ultrasonidos.

La determinación del módulo dinámico por Ultrasonido se realizó usando un equipo Fakkop Microsecond Timer compuesto de un generador de ultrasonidos y dos sensores, uno emisor y otro receptor, los que se clavan en las caras extremas de la pieza a una distancia L conocida, coincidente con la longitud de la viga. Esta disposición permite medir el tiempo, en microsegundos, que tarda la onda ultrasónica en atravesar la viga de sensor a sensor y calcular, a posteriori, la velocidad de propagación longitudinal del sonido. La distancia entre testas se determinó con cinta métrica. Los transductores se clavan, mediante martillo de goma, hasta lograr una fijación firme y un contacto franco y directo entre el sensor y el material.

El procedimiento consiste en golpear sobre el sensor emisor con un martillo de peso conocido, que el equipo dispone para tal fin y medir el tiempo de propagación de la onda. Se efectuaron tres mediciones para cada viga con los sensores clavados en las caras extremas, paralelos al eje longitudinal de la pieza. El valor del Módulo de Elasticidad Dinámico se calcula aplicando las siguientes fórmulas:

$$v = l / t \quad (2)$$

$$MOE_{Din,Ultr} = \rho v^2 \quad (3)$$

Donde:

$MOE_{Din,Ultr}$: Módulo de Elasticidad Dinámico determinado por medición de la velocidad de propagación del sonido, en newton por metro cuadrado.

ρ : Densidad de la madera, en kg/m^3 .

v : Velocidad de propagación del sonido en metros por segundo.

l : Distancia entre testas, en metros.

t : Tiempo que tarda la onda, en segundos.



2.4. Procedimiento operatorio y de cálculo para la determinación del Módulo de Elasticidad Dinámico por Vibraciones longitudinales inducidas.

Para la implementación del método de las vibraciones longitudinales inducidas se ha utilizado una computadora provista de un software gratuito para el análisis de la transformada rápida de Fourier (FFT Analyzer) y un micrófono de uso corriente. El procedimiento consiste en provocar una excitación con un impacto de martillo sobre un extremo de la viga, y colocar un micrófono en el otro extremo para efectuar la medición. Mediante el software FFT Analyzer se determina la frecuencia principal de vibración del sonido, la cual se utiliza para calcular el $MOE_{Din,Vibr}$. El Módulo de Elasticidad Dinámico por vibraciones longitudinales inducidas se determinó aplicando las fórmulas siguientes:

$$v = 2 l f \quad (4)$$

$$MOE_{Din,Vibr} = \rho v^2 \quad (5)$$

Donde:

$MOE_{Din,Vibr}$: Módulo de Elasticidad Dinámico determinado por medición de la velocidad de propagación del sonido, en newton por metro cuadrado.

ρ : Densidad de la madera, en kg/m^3 .

v : Velocidad de propagación del sonido en metros por segundo.

l : Distancia entre testas, en metros.

f : Frecuencia natural de vibración, en Hertz. (1/s)

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Resultados de los ensayos

En la Tabla 2 se presentan los valores de módulo de elasticidad global (MOE_{Global}) calculados por flexión estática según Norma UNE-EN 408:2012. En la Tabla 3 se presentan los valores de módulo de elasticidad dinámico calculados por ultrasonido ($MOE_{Din,Ultr.}$) y en la Tabla 4 se presentan los valores de módulo de elasticidad dinámico calculado por el método de vibraciones longitudinales inducidas ($MOE_{Din,Vibr.}$). En cada una de las tablas se muestran los valores mínimos, máximos y promedio para cada muestra y para el conjunto. Se incluye el valor del COV en % y la cantidad de piezas.

Tabla 2: Módulo de elasticidad global según UNE-EN 408: 2012

Muestra N° :	1	2	3	4	Todas 1+2+3+4
Mínimo (N/mm ²)	1919	2054	2479	2459	1919
Promedio (N/mm ²)	3787	4828	5111	4868	4717
Máximo (N/mm ²)	5830	6891	8053	8069	8069
COV (%)	26	27	27	28	29
Cantidad (n)	34	40	50	49	173

Se puede observar que los valores medios calculados por ultrasonidos son superiores a los obtenidos por flexión estática, para cada una de las muestras y para la muestra total, dando variaciones mínimas y máximas del 13% y 27% respectivamente.

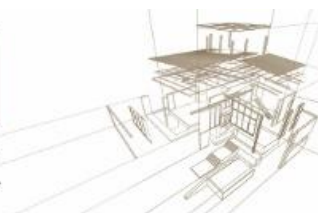


Tabla 3: Módulo de elasticidad dinámico por Ultrasonidos

Muestra N° :		1	2	3	4	Todas 1+2+3+4
Mínimo	(N/mm ²)	1832	2694	3382	2957	1832
Promedio	(N/mm ²)	4287	6120	6118	5859	5685
Máximo	(N/mm ²)	7596	9436	9226	9458	9458
COV	(%)	31	26	28	29	31
Cantidad	(n)	34	40	50	49	173

Los valores medios obtenidos por el método de las vibraciones longitudinales inducidas dan valores muy cercanos a los calculado a partir de los ensayos de flexión, apreciándose variaciones poco significativas menores al 3 %.

Tabla 4: Módulo de elasticidad dinámico por vibraciones longitudinales inducidas

Muestra N° :		1	2	3	4	Todas 1+2+3+4
Mínimo	(N/mm ²)	1992	2121	2847	2395	1992
Promedio	(N/mm ²)	3694	4760	5033	4885	4665
Máximo	(N/mm ²)	5983	7278	7758	8573	8573
COV	(%)	41	24	28	30	29
Cantidad	(n)	34	40	50	49	173

Se observa que los valores obtenidos por vibraciones longitudinales inducidas dan resultados mucho más aproximados a los de flexión estática que los calculados por la técnica de ultrasonidos. Los coeficientes de variación (COV), considerando la determinación de todos los módulos, presentan valores entre 24 % y 41 %, guarismos compatibles con un lote de esta cantidad de piezas sin clasificar.

3.2 Comparación entre los valores de módulo de elasticidad por flexión estática y por métodos no destructivos.

En la Tabla 5 se muestran las correlaciones entre el módulo estático y los módulos dinámicos obtenidos por ambos métodos, para cada una de las muestras y para el conjunto.

Tabla 5: Correlaciones entre el módulo de elasticidad estático y los dinámicos

PARÁMETROS	Muestras N°				
	1	2	3	4	1+2+3+4
Correlación MOE _{Global} - MOE _{Din,Ultr.}	0,86	0,88	0,89	0,91	0,90
Correlación MOE _{Global} - MOE _{Din,Vibr.}	0,90	0,91	0,91	0,96	0,93

En todos los casos se observa una fuerte correlación con valores mínimos de 0,86 y máximos de 0,96. Se aprecia que los valores de la correlación aumentan progresivamente para ambos métodos no destructivos desde la muestra 1 a la muestra 4, coincidente con el aumento de la escuadría y la longitud de los elementos ensayados. Las piezas de mayores dimensiones, coincidentes con las más usadas estructuralmente, son las que muestran mejor correlación.



En la Figura 1 se muestra el gráfico de correlación entre el módulo de elasticidad global y el módulo de elasticidad dinámico por ultrasonido, para las 173 piezas. En el esquema se incluye la ecuación de la regresión lineal y el valor de R^2 . Se verifica una alta correlación entre los valores de los módulos, con un $R^2 = 0,81$ que corresponde a un $R = 0,90$.

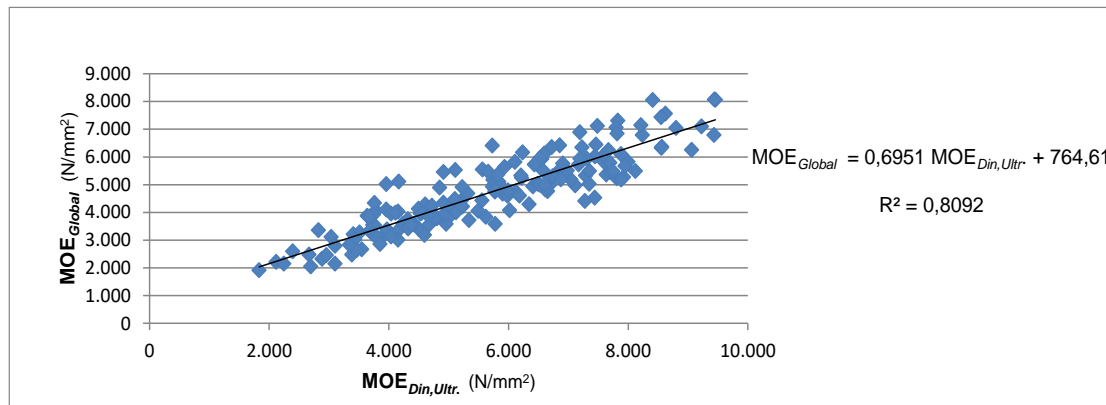


Figura 1: Gráfico de correlación entre el módulo de elasticidad global y el módulo de elasticidad dinámico por ultrasonido.

Estos valores de correlación resultan menores a los obtenidos por Acuña *et al.* (2006) para piezas de madera de tamaño estructural y calidad visual ME1 de 5 especies diferentes, *Pinus sylvestris* L. (pino silvestre), *Pinus radiata* D.Don (pino insignis), *Pinus pinaster* Ait. (pino resinero), *Fagus sylvatica* L. (haya) y *Chlorophora excelsa* Benth & Hook (iroko) donde informó valores del coeficiente R^2 , ajustado para todas las especies, en torno a 0,90.

La recta de regresión lineal es la siguiente:

$$MOE_{Global} = 0,6951 MOE_{Din,Ultr.} + 764,61 \quad (6)$$

Donde:

MOE_{Global} : Módulo de elasticidad global en flexión estática en N/mm^2 .

$MOE_{Din,Ultr.}$: Módulo de elasticidad dinámico por ultrasonido, en N/mm^2 .

En la Figura 2 se muestra el gráfico de correlación entre el módulo de elasticidad global y el módulo de elasticidad dinámico por vibraciones longitudinales inducidas, para las 173 piezas. En el esquema se incluye la ecuación de la regresión lineal y el valor de R^2 . Se verifica una alta correlación entre los valores de los módulos con un $R^2 = 0,87$ que corresponde a un $R = 0,93$. Este valor es consistente y algo superior al obtenido por Íñiguez González *et al.* (2007) para la madera aserrada estructural de pino laricio donde se verificó un $R^2 = 0,83$.

La recta de la regresión lineal es la siguiente:

$$MOE_{Global} = 0,9139 MOE_{Din,Vibr.} + 453,1 \quad (7)$$

Donde:

MOE_{Global} : Módulo de elasticidad global en flexión estática en N/mm^2 .

$MOE_{Din,Vibr.}$: Módulo de elasticidad dinámico por ultrasonido, en N/mm^2 .

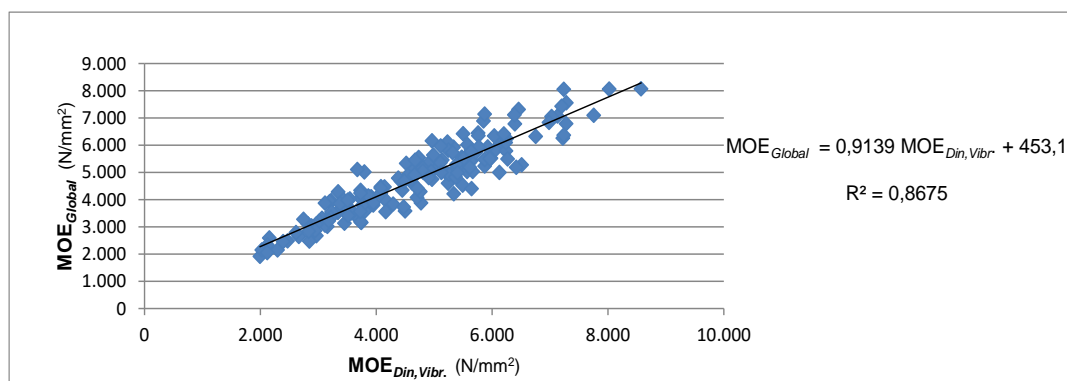
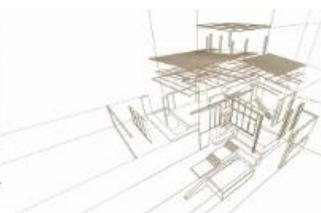


Figura 2: Gráfico de correlación entre el módulo de elasticidad global y el módulo de elasticidad dinámico por vibraciones longitudinales inducidas

4.- CONCLUSIONES.

El módulo de elasticidad dinámico determinado por ultrasonido presenta una alta correlación ($R=0,90$ y $R^2 = 0,81$) con el módulo de elasticidad determinado por ensayo estático.

El módulo de elasticidad dinámico determinado por vibraciones longitudinales inducidas presenta una alta correlación ($R=0,93$ y $R^2 = 0,87$) con el módulo de elasticidad determinado por ensayo estático.

La determinación del módulo de elasticidad dinámico a través de ensayos no destructivos se presenta como un método rápido, sencillo y preciso a la hora de predecir el módulo de elasticidad en piezas de tamaño estructural de Pino ponderosa y se convierten en una alternativa válida para el diseño de un posible método de clasificación mecánica.

AGRADECIMIENTOS.

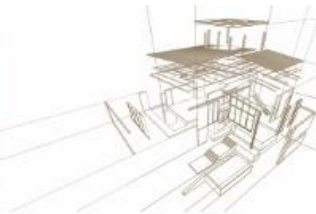
A los becarios alumnos y graduados del grupo GIDEC de la Facultad Regional Venado Tuerto de la Universidad Tecnológica Nacional por su responsable colaboración en los ensayos. A la Comisión Forestal y Maderera Bariloche.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

Acuña L., Díez M. R., Casado M. (2006), Los ultrasonidos y la calidad de la madera estructural. Aplicación a *Pinus pinaster* ait. Boletín Informativo CIDEU, 2, 7-26.

Balmori, J.A.; Acuña, L.; Basterra, L.A. (2016). Estudio de la influencia de la dirección de la fibra en la velocidad de propagación de ultrasonidos (fakopp) en madera estructural de “*Pinus sylvestris* l.” y “*Pinus radiata* d. Don.”. REHABEND 2016. May 24-27, 2016. Burgos, Spain.

Böstrom, L. (1994). Machine strength grading: comparison of four different systems. Swedish National Testing and Research Institute, Building Technology SP Report 49, 57 pp.



- Calil Júnior C.; Alexandre J. S. Miná A.J.S. (2003). *Vibração transversal: Um método eficiente para classificação de peças estruturais de madeira*. Rev. Bras. De Engenharia Agrícola e Ambiental, v.7, n.2, p.335-338.
- Casado, M.; Acuña Rello, L.; Basterra Otero, L.; A.2, Heredero Muñoz, S; San Martín, R. (2013). *Estimación de la calidad de la madera en rollo de Populus x euramericana mediante ultrasonidos*. 6º Congreso Forestal Español. Victoria-Gasteiz. España.
- Casado, M.; Acuña, L.; Vecilla, D.; A. Basterra, A; Relea E; López, G.; Ramón,G. (2010). *The influence of size in predicting the elastic modulus of Populus x euramericana timber using vibration techniques*. Structures and Architecture – Cruz (Ed.) Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-49249-2. 8 Pp.
- Diab, J.; Manavella, R.; Guillaumet, A.; Filippetti, M. (2013). *Influencia de la longitud y posición de terminales en la det. de la vel.de propagación del sonido en vigas de madera de Álamo y pino Paraná*. 4to Congreso Forestal Argentino y Latinoamericano. Iguazú. Argentina.
- Ilic, J. (2001). *Relationship among the dynamic and static elastic properties of air-dry Eucalyptus delegatensis R. Baker*. Holz als Roh- und Werkstoff 59:169-175.
- INTI CIRSOC 601. (2016). Instituto Nacional de Tecnología Industrial. Centro de Investigación de los Regl. Nac. de Seguridad en Obras Civiles. (2016). *Reglamento Argentino de Estructuras de Madera*. Buenos Aires.
- Íñiguez González G.,F. Arriaga Martitegui, M.E. Herrero, R. Argüelles Álvarez.(2007). *Los métodos de vibración como herramienta no destructiva para la estimación de las propiedades resistentes de la madera aserrada estructural*. Inf. de la Construcción Vol. 59, 506, 97-105 abril-junio 2007.ISSN: 0020-0883.
- IRAM 9662-3 (2015). Instituto Argentino de Normalización y Certificación. *Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por Resistencia. Parte 3: Tablas de Pino taeda - elliotti*. Buenos Aires.
- IRAM 9663(2013). *Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de las propiedades físicas y mecánicas*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires.
- IRAM 9664 (2013). *Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires.
- ISO 3130 (1975). International Organization for Standardization. *Wood – Determination of moisture content for physical and mechanical tests*.
- ISO 3131 (1975). International Organization for Standardization. *Wood – Determination of density for physical and mechanical tests*.
- M. Conde García, J. I. Fernández-Golfín Seco, E. Hermoso Prieto.(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*. Mat. de Construcción Vol. 57, 288, 49-59- Octubre-Diciembre 2007. ISSN: 0465-2746
- Pellerin, R., De Groot, R.C., Esenther, G.R. (1985). *Nondestructive stress wave measurements of decay and termite attack in experimental wood units*. Proceedings of the 5th Nondestructive Testing of Wood Symposium. Pp.319-352. Pullman WA.
- Rajeshwar, B.; Bender, D. A.; Bray, D. E.; McDonald. K. A.(1997). *An ultrasonic technique for predicting tensile strength of southern pine lumber*; American Society of Agricultural Engineers 0001-2351; VOL. 40(4):1153-1159.
- UNE EN 408 (2012). *Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas*. Agencia Española de Normalización y Certificación. Madrid.