

Metodología de ensayo no destructivo y destructivo aplicada a madera de *Populus x canadensis* 'I-214' de procedencia Argentina.

KEIL, G.^{1,6}; **ACUÑA, L.**^{2,7}; **SPAVENTO, E.**^{3,6}; **CASADO, M.**^{4,7}; **REFORT, M.**^{5,6}

¹M Sc Ing. Ftal.: gabrieldkeil@yahoo.com.ar; ²Dr. Ing. de Montes: maderas@iaf.uva.es; ³M Sc Ing. Ftal.: eleanaspavento@yahoo.com.ar; ⁴Dra. Ing. de Montes: milac@iaf.uva.es; ⁵ Ing. Ftal. mmrefort@gmail.com; ⁶Laboratorio de Investigaciones en Maderas (LIMAD); Facultad de Cs. Agrarias y Ftales, UNLP, Argentina; ⁷Grupo de Investigación en Estructuras y Tecnología de la Madera, UVA, España.

Resumen:

La producción de salicáceas (*Populus* sp., álamos y *Salix* sp., sauces) en Argentina constituye el tercer cultivo en importancia después de los *Pinus* sp y *Eucalyptus* sp. En la Patagonia norte, el cultivo de álamos en particular, ha estado históricamente relacionado a barreras de protección para la producción fruti-hortícola; posteriores forestaciones en macizo se han relacionado a la producción de madera de mejor calidad, destacándose los clones 'I-214', 'I-488', 'Conti 12' y 'Guardi', de las variedades canadensis. Asimismo, la finalidad de estas maderas es la elaboración de productos de bajo valor agregado, aún desconociendo si el material puede presentar mejores prestaciones. Por ello, dado el desconocimiento de las potencialidades de la materia prima regional existente, así como la disponibilidad de diversas técnicas de estimación elasto-resistente es importante realizar una caracterización físico-mecánica general del material comercializable. El objetivo del presente trabajo fue realizar una evaluación no destructiva y destructiva de la madera de *Populus x canadensis* 'I-214' a fin de caracterizar el material disponible en el mercado. Se trabajó con 90 piezas de madera maciza de 40 mm x 60 mm x 1200 mm de dicho clon procedente de plantaciones comerciales (15 años de edad) del valle medio de Río Negro, Argentina. Como metodología de ensayo no destructivo se utilizaron los métodos de vibraciones inducidas y de ultrasonidos, determinando en ambos casos el módulo de elasticidad dinámico (MOE_d). Mediante ensayo destructivo de flexión estática (EN 408:2011+A1:2012) se determinó el módulo de elasticidad estático (MOE_e) y el módulo de rotura (MOR). La densidad fue determinada utilizando la masa y el volumen total de cada pieza y de probetas pequeñas libres de defectos, obtenidas tras la rotura de las piezas (EN 408:2011+A1:2012). Ambas metodologías fueron relacionadas mediante análisis de regresión. Los valores característicos hallados fueron: MOE_e : 7191,85 MPa, MOR: 20,79 MPa y densidad 366,00 Kg/m³, sin diferencias significativas entre ambas densidades. El MOE_d de vibraciones inducidas fue significativamente inferior al MOE_d de ultrasonidos (8197,03 MPa y 9023,27 MPa, respectivamente), siendo ambos valores significativamente superiores al MOE_e . De acuerdo con el análisis de regresión, el método de vibraciones inducidas presentó mejores ajustes que el método de ultrasonidos para la estimación del MOE_e (50,01 y 41,28%, respectivamente).

Palabras clave: álamo, rigidez, resistencia, valores característicos.

Introducción:

La expansión de las salicáceas (*Populus* sp., álamos, y *Salix* sp., sauces) en general, y el cultivo del género *Populus* sp. con fines industriales en particular, presenta un recorrido relativamente corto, pese a ser una especie de mucha tradición y haber tenido multitud de usos a lo largo de la historia. Su explotación tuvo mayor auge décadas atrás acompañando la exponencial demanda y la necesidad de abastecimiento de materia prima en los mercados madereros. Todo ello se vio además favorecido por el creciente interés en materias primas renovables y menos nocivas para el medioambiente, principalmente en sectores importantes como el de la construcción (Casado *et al.*, 2009). Estas corrientes de cambio han beneficiado la selección y uso de especies madereras de rápido crecimiento y con buena capacidad de adaptación a diferentes condiciones de suelo y clima como es el caso del género *Populus* sp (Casado *et al.*, 2011).

En Argentina, la producción de salicáceas constituye el tercer cultivo en importancia después de los pinos (*Pinus* sp) y eucaliptos (*Eucalyptus* sp). En la Patagonia norte, el cultivo de álamos en particular, ha estado históricamente relacionado a barreras de protección para la producción fruti-hortícola con la finalidad de proteger a los cultivos de los vientos característicos de la región; posteriores forestaciones en macizo se han relacionado a la producción de madera de mejor calidad, destacándose para ello los clones 'I-214', 'I-488', 'Conti 12' y 'Guardi', de las variedades canadensis (Cancio y Thomas, 2011). Asimismo, la finalidad de estas maderas es la elaboración de productos de bajo valor agregado, aún desconociendo si el material puede presentar mejores prestaciones (Thomas y Garcés, 2011). Por ello, dado el desconocimiento de las potencialidades de la materia prima regional existente, así como la disponibilidad de diversas técnicas de estimación elasto-resistente es importante y prácticamente obligatorio, realizar una caracterización físico-mecánica general del material comercializable, tendiente hacia un aprovechamiento y empleo más eficaz de la materia prima existente.

Al respecto, se han hallado diversos estudios sobre el comportamiento de diferentes clones de álamo tanto en madera maciza como en productos a base de madera, concernientes al uso de metodología destructiva y no destructiva, control de plagas, mejoras genéticas, entre otras consideraciones, pero en lo referente a caracterización y calidad de la madera, los estudios en nuestro país son escasos (Casado *et al.*, 2012; Arcidiácono *et al.*, 2011; Calderón *et al.*, 2011; García, 2011; Casado *et al.*, 2011; Casado *et al.*, 2009; Castro & Fragnelli, 2008; Acuña, *et al.*, 2007; Castro, 2007; Basterra *et al.*, 2006; Álvarez, *et al.*, 2005; Casado *et al.*, 2005; Castro & Zanuttini, 2004; Castro & Paganini 2003; Cuevas, 2002; Gutiérrez *et al.*, 2001; Hernández, *et al.*, 1998). En este sentido, y dada la cantidad de especies y clones presentes en la región así como la constante incorporación de nuevas variedades, se requiere el estudio de sus características madereras, siendo uno de los aspectos fundamentales el conocimiento de sus características físico-mecánicas, lo cual permitiría garantizar un mayor y mejor empleo de estos clones/variedades (Calderón *et al.*, 2011). Al respecto, incluso las diversas técnicas de ensayo no destructivo (END) existentes brindan una buena oportunidad en este aspecto, permitiendo una estimación de la calidad elasto-resistente del material.

En este sentido, y como parte de un proyecto integral de caracterización y mejora tecnológica de la madera del clon 'I-214' de *Populus x canadensis*, el objetivo del presente trabajo fue realizar una evaluación no destructiva y destructiva de dicha madera a fin de caracterizar el material disponible en el mercado.

Materiales y métodos:

Material leñoso

Se trabajó con madera perteneciente al clon 'I-214' de *Populus x canadensis* procedente de plantaciones comerciales (15 años de edad) del valle medio de Río Negro (39 29'40.74"S, 65 35'28.01"W), Argentina. Dicho material fue recepcionado en forma de vigas y acondicionado en el Laboratorio de Investigación en Maderas (LIMAD), UNLP, hasta alcanzar la humedad de equilibrio higroscópico (15-17% en la ciudad de La Plata) constatada mediante xilohigrómetro digital (Hydromette HT 85, de la marca GANN). Posteriormente el material fue reprocesado atendiendo a las especificaciones de la norma EN 408:2010+A1:2012 en cuanto a la proporción de las dimensiones de las piezas (longitud de la pieza al menos 19 veces la altura de la sección). De este modo, se obtuvieron 90 piezas de madera maciza de 40 mm x 60 mm x 1200 mm para ser caracterizadas.

Ensayos no destructivos-procedimiento

Como metodología no destructiva se utilizaron los métodos de vibraciones inducidas y de ultrasonidos, determinando en ambos casos el módulo de elasticidad dinámico (MOE_d). Previo a dicho ensayo, se determinó el peso y las dimensiones de todas las piezas, con lo cual se determinó la densidad de las mismas.

La técnica de vibraciones inducidas consiste en la obtención de la frecuencia natural de vibración de una viga de madera, la cual es generada aplicando un impacto de martillo en el

extremo de una viga (vibración longitudinal). El impacto es recibido mediante un captador de señal, registrado y transformado mediante un programa (FFT analyzer), desde un ordenador, para la obtención de la frecuencia principal de vibración.

La técnica de ultrasonidos permite determinar la velocidad de propagación de una onda ultrasónica, haciendo pasar dicho impulso a través de la muestra a analizar. La onda es generada (a 30 Hz de frecuencia) mediante un golpe de martillo en un palpador emisor y es captada en el otro extremo de la pieza mediante un palpador receptor. De este modo, se determina el tiempo (μs) que tarda la onda ultrasónica en llegar desde el palpador emisor hasta el palpador receptor.

En ambos casos, el ensayo fue realizado con las piezas bi-apoyadas (Figura 1, 2, 3 y 4); las mismas fueron colocadas sobre dos soportes (sin fijación), separados de cada extremo a $0,22 L$ (siendo L =longitud de la viga).

Para el ensayo de vibración longitudinal, el impacto de martillo fue realizado en un extremo de la pieza, el cual fue captado por un micrófono en el extremo opuesto y analizado mediante el analizador de onda (FFT analyzer) desde un ordenador. Para el ensayo de ultrasonidos se utilizó el equipo "Microsecond Timer" de Fakopp; el impacto fue realizado en el palpador emisor y recibido en el otro extremo mediante el palpador receptor, recogiendo el tiempo incurrido en el recorrido mediante el software de dicho equipo.

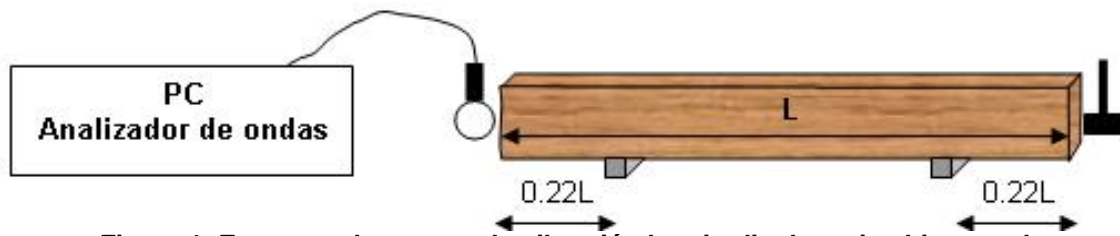


Figura 1. Esquema de ensayo de vibración longitudinal en viga bi-apoyada.

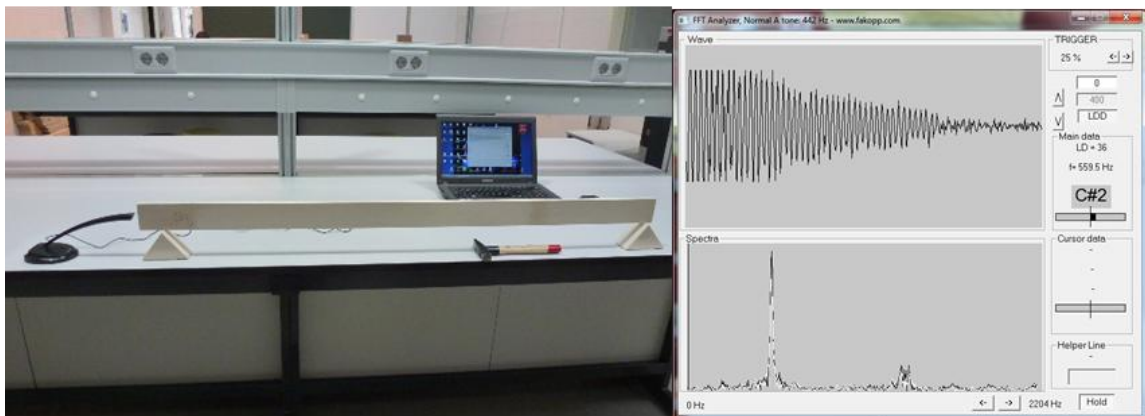


Figura 2. Ensayo en viga bi-apoyada. Captura de la onda vibratoria en el programa FFT analyzer.

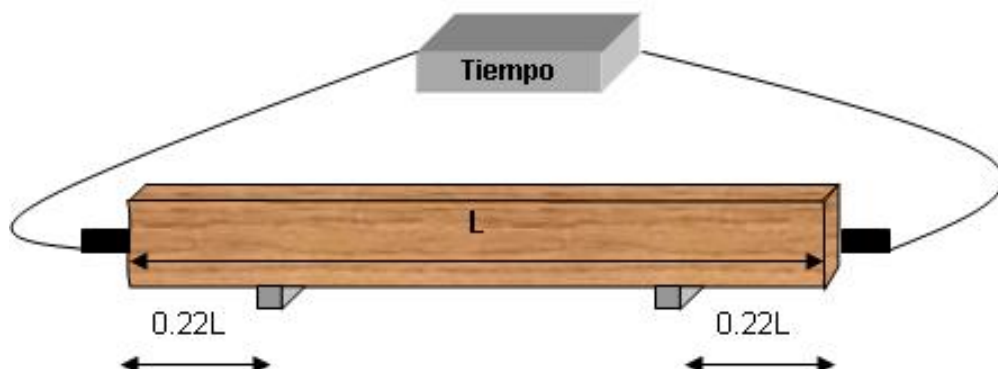


Figura 3. Esquema de ensayo con ultrasonidos en viga bi-apoyada.



Figura 4. Ensayo en viga bi-apoyada. Ultrasonidos: Microsecond Timer de Fakopp.

Ensayo destructivo-procedimiento

El ensayo destructivo de flexión estática (EN 408:2011+A1:2012) fue llevado a cabo en máquina Universal de ensayo ALFRED J. AMSLER & Co, Schaffouse - Suisse 7928 de 5000 Kg. A través de este ensayo se determinó el módulo de elasticidad estático (MOE_e) y el módulo de rotura (MOR). Finalizado el ensayo, en la zona cercana a la rotura de las piezas, se extrajeron probetas de las mismas escuadrías y de 100 mm de longitud para determinar la densidad de la madera en probetas libres de defecto.

En la Figura 5 se muestra un esquema del dispositivo y las condiciones de ensayo y en la Figura 6 se muestra una imagen del ensayo de flexión en la máquina utilizada.

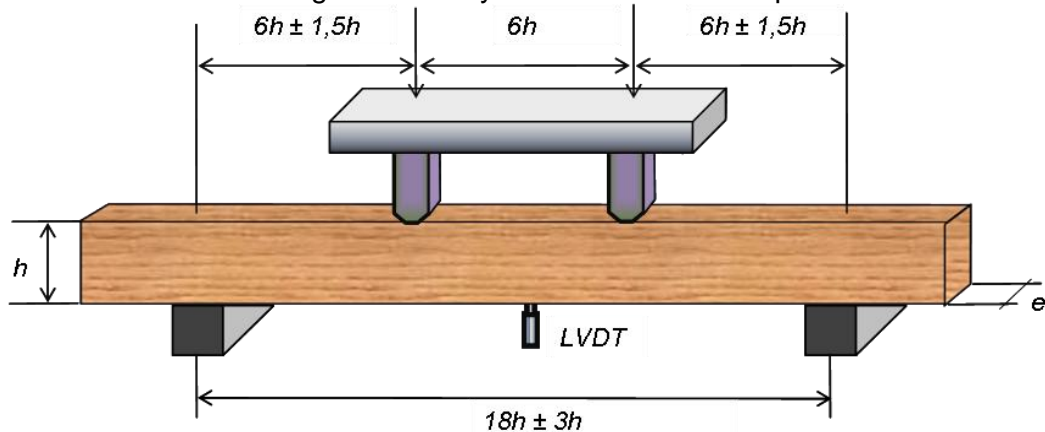


Figura 5: Esquema del dispositivo y condiciones de ensayo (EN 408:2011+A1:2012).



Figura 6: Ensayo en máquina Universal ALFRED J. AMSLER & Co, Schaffouse – Suisse.

Análisis estadísticos

La caracterización del material se realizó mediante la determinación de los valores medios elasto-resistentes y de la densidad, como así también de sus valores característicos (media para el MOE y 5° percentil de la población objeto de estudio para el MOR y la densidad). Asimismo se realizó un análisis de la varianza (previa constatación de los supuestos estadísticos) para comparar la media de los módulos de elasticidad y se utilizó el test de comparación de medias e intervalos de confianza (IC) de Tukey para determinar entre que medias existían diferencias. Mediante análisis de regresión lineal simple y múltiple se evaluó la relación entre los parámetros no destructivos y las variables elasto-resistentes obtenidas mediante el ensayo de flexión estática.

Resultados y discusión:

Evaluación no destructiva: análisis descriptivo-comparativo entre END

La evaluación no destructiva del material en estudio se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Ensayo no destructivo.

END	Nº	Densidad en piezas reales (Kg/m ³)	Frecuencia* (Hz)	Velocidad* (m/seg)	MOE _d *
Vibraciones inducidas	90	409,83 - 376,09** (6,77)	1859,02 (6,18)	-	8197,03 a (11,43)
Ultrasonidos	90		-	4693,94 (4,78)	9023,27 b (9,75)

*Los coeficientes de variación en % se indican entre paréntesis; letras diferentes indican diferencias significativas con el test de Tukey ($p < 0,05$). **Valor característico de la densidad (5° percentil; EN 384. 2010).

El gráfico de caja y bigotes y el gráfico de medias e IC 95% de Tukey para el MOE_d de ambas técnicas de END se muestra en la Figura 7 y Figura 8, respectivamente.

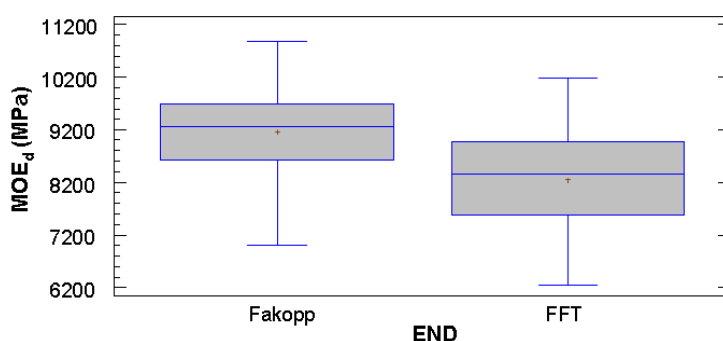


Figura 7. Gráfico de Caja y Bigotes: MOE_d por END

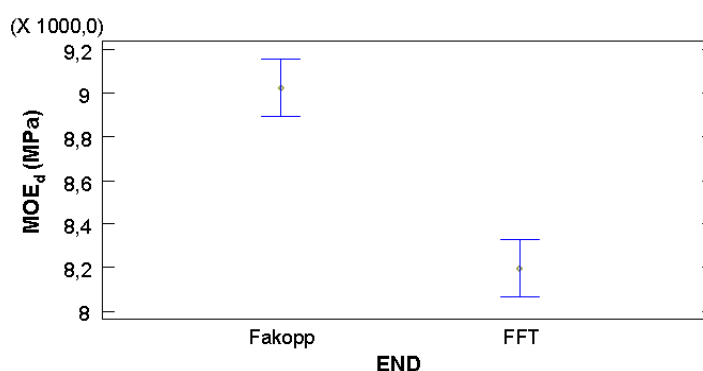


Figura 8. Gráfico de medias e IC 95% de Tukey para MOE_d por END.

Como puede observarse en la Tabla 1 y en la Figura 8, los valores de MOE_d obtenido por ultrasonidos son significativamente superiores a los obtenidos mediante la técnica de

vibraciones; asimismo, la variabilidad de los datos es baja y aceptable en ambos tipos de metodologías (Tabla 1 y Figura 7).

Evaluación destructiva: análisis descriptivo-comparativo con END.

En la Tabla 2 se muestran los resultados del ensayo de flexión estática y el valor de la densidad obtenida a partir de probetas libres de defectos.

Tabla 2. Ensayo de flexión estática y densidad en probetas libre de defectos.

Ensayo	Nº	Densidad en probetas libre de defecto* (Kg/m ³)	MOE _e * (MPa)	MOR* (MPa)
Flexión estática	90	402,77 – 366,00** (6,78)	7191,85** (17,16)	33,57 - 20,79** (20,54)

*Los coeficientes de variación en % se indican entre paréntesis; **Valor característico: media del MOE, 5º percentil de la densidad y el MOR (EN 384. 2010).

Los valores característicos hallados son similares a los obtenidos por otros autores, siendo el MOE_e el valor limitante para la utilización estructural de esta madera, pues se clasificaría como una clase resistente C14 según la norma EN 338-2010 (Casado *et al.*, 2011; Casado *et al.*, 2009; Cuevas, 2002; Gutiérrez. *et al.*, 2001; Hernández *et al.*, 1998). Asimismo, el MOE_e presenta mayor variabilidad con respecto a los MOE_d (Tabla 2; Figura 9), siendo significativamente inferior a ellos (Figura 10).

Los valores de densidad determinados en piezas con defectos y en probetas libre de defectos no presentaron diferencias significativas entre sí (no indicado en la Tabla 1–2).

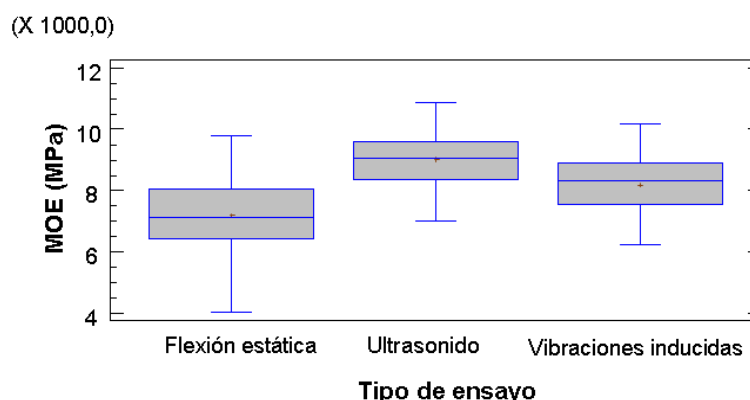


Figura 9. Gráfico de Caja y Bigotes: MOE – Tipo ensayo.

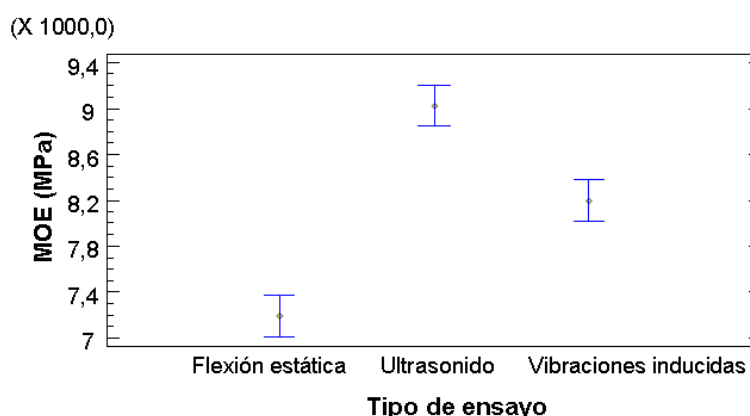


Figura 10. Gráfico de medias e IC 95% de Tukey para MOE por tipo de ensayo.

Evaluación no destructiva-destructiva: análisis de regresión.

En la Tabla 3 se presenta un resumen del análisis de regresión lineal simple y múltiple entre las variables no destructivas y el MOE_e.

Tabla 3: Análisis de regresión END- MOE_e.

Modelo	Variable regresora	Razón-F	Valor-P	Coefficiente de correlación	R ² ajustado (%)
Regresión lineal	Velocidad de ultrasonido	64,96	0,0000	0,65	41,28
	Frecuencia de vibración	92,05	0,0000	0,71	50,01
Regresión múltiple	Velocidad de ultrasonido Densidad	66,50	0,0000	-	59,01
	Frecuencia de vibración Densidad	145,74	0,0000	-	76,08

La relación obtenida mediante regresión lineal entre los parámetros no destructivos (velocidad de ultrasonidos y frecuencia de vibración) y el MOE_e mostraron que el método de vibraciones inducidas presenta mejores ajustes que el método de ultrasonidos para la estimación del módulo de elasticidad a flexión (Tabla 3; Figura 11). Asimismo, estas relaciones se vieron mejoradas y con el mismo comportamiento (mejor ajuste con la técnica de vibración) cuando se incluyó en el análisis a la densidad de las piezas (Tabla 3).

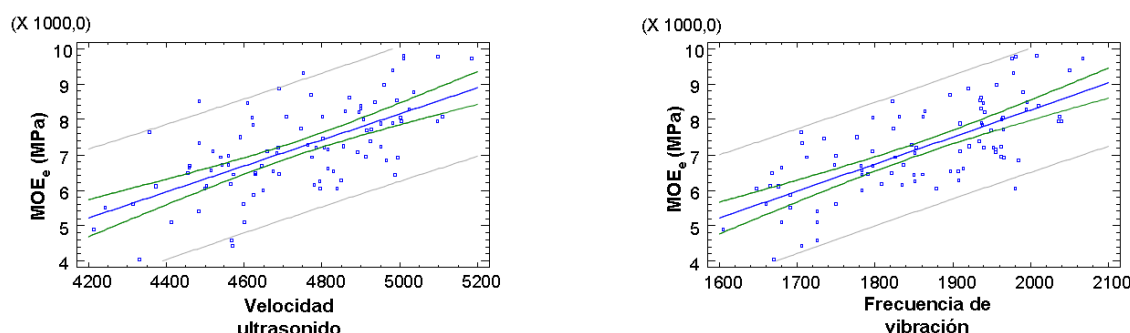


Figura 11. Gráfico del modelo ajustado de regresión lineal simple MOE_e-END.

Si bien se evaluó la relación de los parámetros no destructivos con el MOR, en todos los casos se lograron ajustes del orden del 20% o inferiores.

Conclusiones:

Los valores característicos del clon 'I-214' de *Populus x canadensis* fueron MOE_e: 7191,85 MPa, MOR: 20,79 MPa y densidad 366,00 Kg/m³, sin diferencias significativas para la densidad en piezas de tamaño real y en probetas libre de defectos.

El MOE_d de vibraciones inducidas fue significativamente inferior al MOE_d de ultrasonidos (8197,03 MPa y 9023,27 MPa, respectivamente), siendo ambos valores significativamente superiores y más homogéneos con respecto al MOE_e.

La metodología no destructiva empleada presentó resultados promisorios para la estimación del módulo de elasticidad a flexión, siendo el método de vibraciones inducidas el que mejores ajustes presentó.

En términos generales puede concluirse que el parámetro limitante para la utilización de esta madera para fines estructurales es el módulo de elasticidad, el cual según los valores hallados, limitaría su clase resistente a una C14 según la norma EN 338-2010.

Referencias bibliográficas:

Acuña, L.; I. Barranco; M. Casado; C. Martínez; A. González. 2007. Análisis y validación de la técnica resistográfica aplicada a la madera estructural. 11º Congreso de Ensayos no Destructivos. Sociedad Española de Ensayos no Destructivos AEND. Gijón. 343 – 354.

Álvarez, J.; L. Acuña; I. Barranco; M. Casado. 2005. Aplicación del resistógrafo al diagnóstico de elementos singulares en estructuras de madera. *Jornadas de Investigación en la Construcción Instituto Torroja*. Madrid. 12 Pp.

Arcidiácono, R.; C. Lucero; M. J. Martín; C. Murcia; F. Naldini; N. Oberti; G. Paiva; F. Pediccone; N. Pierini; G. Poggi; F. Genovese; H. Reviglio; W. Guarino; R. Bassotti. 2011. Caracterización físico mecánica de la madera de álamo del sur de la provincia de Mendoza, para la fabricación de elementos estructurales multilaminados encolados. *Tercer Congreso Internacional de Salicáceas en Argentina*.

Basterra, L.A.; M. Casado; L. Acuña; O. Pinazo. 2006. Techniques of pseudo-nondestructive testing on structural wood, by extraction of screws. *Revista: ReCo PaR*. Nº 2, 37-59.

Calderón, A.D.; F.A. Roig; R.P. Zanetti; E.G. Aguado; A.M. Furlani; F.G. Martinez. 2011. Características físico-mecánicas de maderas de clones de álamo Ensayadas en la provincia de Mendoza – República Argentina – Parte I. *Tercer Congreso Internacional de Salicáceas en Argentina*. 9 Pp.

Cancio, H.; E. Thomas. 2011. Utilización de una barreta hidráulica para la plantación de guías de álamos en los valles irrigados de Patagonia Norte. *Tercer Congreso Internacional de Salicáceas en Argentina*. 4 Pp.

Casado, M.; L. Acuña; L.A. Basterra; G. Ramón-Cueto; D. Vecilla. 2012. Grading of structural timber of *Populus x euramericana* clone I-214. *Holzforschung* 66 (5): 633–638.

Casado, M.; L. Acuña; D. Vecilla; L.A. Basterra; E. Relea; G. López. 2011. Ultrasonidos y parámetros de clasificación visual para la caracterización de madera estructural de *Populus x Euramericana* I-214. *1º Congresso Ibero-LatinoAmericano da Madeira na Construção*. Coimbra, Portugal. 9 Pp.

Casado, M.; L. Acuña; D. Vecilla; A. Basterra; E. Relea; G. López; G. Ramón. 2009. “Técnicas vibratorias aplicadas a madera estructural de *Populus x euramericana*”. *V Congreso Forestal Español*. Ávila. 14 Pp.

Casado, M.; A. Basterra; L. Acuña; O. Pinazo.; C. Martínez; E. Relea; I. Barranco; G. Ramón. 2005. Determinación de la capacidad resistente mediante métodos no destructivos. Aplicación en viguetas de forjado de un edificio singular. *IV Congreso Forestal Español*. Zaragoza, 10 Pp.

Casado, M.; I. Escudero; L. Acuña; D. Vecilla; A. Basterra; E. Relea; G. López; G. Ramón. 2009. El chopo como productor de madera estructural y sumidero de CO₂. *XII Congreso Forestal Mundial*. Buenos Aires, Argentina.

Castro, C. 2007. Aplicaciones del chopo en la construcción. *Revista AITIM* 248, 24-28.

Castro, G.; G. Fragnelli. 2008. New technologic and alternative uses for poplar wood. *Boletín CIDEU*. 2: 27-36.

Castro, G.; F. Paganini. 2003. Mixed glued laminated timber of poplar and Eucaliptus Grandis clones. *Holz als Roh- und Werkstoff* 61(4): 291-298.

Castro, G.; R. Zanuttini. 2004. Multinaminar wood: Manufacturing process and main physical-mechanical properties. *Forest Prod. J.* 54(2): 61-67.

Cuevas, D.H. 2002. Propiedades mecánicas de *Populus x euramericana* (Dode) Guinier creciendo en Valdivia, Chile. *Bosque (Valdivia)*. 23 (2), 93-98.

García J. 2011. El cultivo de las Salicáceas en los valles irrigados de la Patagonia, pasado, presente y futuro. *Tercer Congreso Internacional de Salicáceas en Argentina*. 6 Pp.

EN 408:2011+A1:2012. Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas.

EN 338. 2010. Madera estructural. Clases resistentes.

EN 384. 2010. Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad.

Gutiérrez, A.; J.M. Grau; M. Baonza. 2001. Propiedades físicas de la madera de diferentes clones de chopo. *I Simposio del chopo*. Ed. Junta C y L. Zamora. 461-468.

Hernández, R.; A. Koubaa; M. Beaudoin; Y. Fortin. 1998. Selected mechanical properties of Fast-growing poplar hybrid clones. *Wood and Fiber Science* 30(2). 138-147.

Thomas, E.; A. Garcés. 2011. Crecimiento inicial de 13 clones de álamo en el Valle Medio del río Negro. *Tercer Congreso Internacional de Salicáceas en Argentina*. Comunicación. 5 Pp.