

DIAGRAMA TENSION-DEFORMACION DE LA MADERA LIBRE DE DEFECTOS DE *Pinus elliottii* DE PROCEDENCIA URUGUAYA**STRESS-STRAIN DIAGRAM OF FREE-DEFECTS TIMBER OF *Pinus elliottii* FROM URUGUAY**

Vanesa Baño (P) (1); Gonzalo Cetrangolo (2); Hugo O'Neill (3); Atilio Morquio (4)

- (1) Dr. Ing. Prof. Adjunto, IET, Fac. de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.
(2) MSc. Ing. Prof. Adjunto, IET, Fac. de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.
(3) Per. Agrónomo, Dpto. Proyectos Forestales, Laboratorio Tecnológico del Uruguay, Montevideo, Uruguay.
(4) Dr. Ing. Prof. Titular, IET, Fac. de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.
Dirección para correspondencia: vanesab@fing.edu.uy; (P) Presentador

Resumen

La madera es un material anisótropo y heterogéneo, con un comportamiento elástico y lineal en tracción y no lineal en compresión. En el cálculo estructural, según la normativa vigente, se trabaja únicamente en tramo elástico de comportamiento y el módulo de elasticidad longitudinal paralelo a la fibra se considera como un valor intermedio entre el de compresión y el de tracción. Conocer el verdadero comportamiento de la madera pasa por conocer los módulos de elasticidad a tracción y a compresión, establecer el límite elástico en compresión y los límites de rotura y definir la curva elastoplástica en compresión.

Habitualmente estos valores se obtienen de la realización de tres ensayos independientes: ensayo de flexión, de compresión paralela a la fibra y de tracción paralela a la fibra. El objetivo del presente trabajo es la determinación de la curva tensión-deformación para probetas de madera libres de defectos de *Pinus elliottii* de procedencia uruguaya a partir de un único ensayo. Para ello se realizaron ensayos mecánicos de flexión en cuatro puntos en tres probetas pequeñas libres de defectos, midiendo valores de flecha mediante extensómetro digital y deformaciones en tracción y en compresión mediante galgas extensométricas. Asumiendo un modelo que simula el tramo curvo en compresión como una sucesión de tramos rectos con comportamiento lineal, se obtuvo el descenso de la fibra neutra hasta la rotura, el límite elástico en compresión y los módulos de elasticidad en tracción y compresión.

Palabras-clave: Pinus elliottii, tensión-deformación, módulo elasticidad, elastoplasticidad, Uruguay

Abstract

Timber is an anisotropic and heterogeneous material, whose behavior is elastic and linear in tension and non-linear in compression. Structural calculations according international standards is usually done in elastic phase of behavior and the modulus of elasticity longitudinal parallel to the grain is considered as an intermediate value between the modulus of elasticity in tension and in compression. To know the true behavior of timber is necessary to obtain the modulus of elasticity in tension and in compression, the elastic limit in compression, the rupture limits and the diagram stress-strain for the elastic-plastic behavior in compression.

Usually these values are obtained from three different experimental tests: bending, compression parallel to the grain and tension parallel to the grain. The objective of the present work is the determination of the stress-strain diagram for small specimens of Uruguayan *Pinus elliottii* from a single test. 4-points bending tests were made in three specimens free for defects and the deformation and strains in tension and compression were measured using an extensometer and strain gauges, respectively. Assuming a model to simulate the elastic-plastic curve zone of the diagram as a series of straight segments, whose behavior is linear, the decrease of the neutral axis, the elastic limit in compression and the modulus of elasticity in tension and in compression.

Keywords: Pinus elliottii, stress-strain, modulus of elasticity, elastic-plastic, Uruguay

1. INTRODUCCIÓN

Uruguay se ha convertido recientemente en un productor de madera que, para el período comprendido entre el año 2010 y el 2030, prevé que el 71% del volumen de madera disponible tendrá un destino principal la producción de celulosa. Del 29% restante, 4,2 millones de m³, corresponde a la industria de transformación mecánica, es decir, productos para la construcción y la carpintería. De este volumen total de madera para transformación mecánica, 3 millones de m³ son de madera de la especie *Pinus*, fundamentalmente *Pinus taeda* y *Pinus elliottii* (Dieste, 2012). A nivel de comercialización de la madera de pino en Uruguay no se diferencia entre *P. taeda* y *P. elliottii* por tener unas características físicas y mecánicas similares.

Esta disponibilidad de madera de pino para transformación mecánica pone a esta especie en el punto de mira del sector de primera y segunda transformación, donde ven la posibilidad de proporcionarle un valor agregado a esta especie en su utilización en la ingeniería y la arquitectura. Este nuevo uso pasa por el conocimiento de sus propiedades físicas y mecánicas para el diseño y el cálculo estructural. El cálculo estructural según normativa internacional (CEN, 1995; CIRSOC, 2013; ABNT, 2010, etc.) se simplifica al comportamiento en tramo elástico de comportamiento y con valores medios de módulos de elasticidad y de resistencias para dos únicas direcciones de la fibra, la longitudinal y la transversal, englobando esta última a las direcciones radial y tangencial.

En Uruguay no existe norma de clasificación resistente de la madera, aunque sí datos publicados de valores medios y/o característicos para las especies anteriormente citadas. La clase resistente asignada a un total de 291 de probetas de madera de *P. taeda* y *P. elliottii* de 50x50x760mm obtenidas de árboles de 25 años de edad es una C14, de acuerdo a la norma europea EN 338 (CEN, 2010), limitada por el valor de módulo de elasticidad longitudinal, con valores medios de 7444 N/mm² (Moya et al., 2013). Para esta misma muestra, se conoce también la resistencia a compresión perpendicular y paralela a la fibra, con valores medios de 9,7 y 37,2 N/mm², respectivamente. Existen, además, datos de valores medios y característicos de ensayos a flexión de vigas de estas especies de tamaño estructural, con influencia de las singularidades de la madera en la resistencia que, dependiendo de la procedencia y de la edad del árbol, pueden alcanzar valores de clase resistente hasta C18 (O'Neill et al., 2013).

Estos valores de módulo de elasticidad están determinados en tramo elástico de comportamiento y considerando un valor de módulo de elasticidad longitudinal paralelo a la fibra obtenido a partir de ensayos de flexión. En la realidad, el comportamiento de las vigas de madera sometidas a flexión difiere ligeramente de esta simplificación, pues el módulo de elasticidad en la zona comprimida es diferente al de la zona traccionada. Además, el comportamiento es lineal sólo parcialmente, pues a partir de un punto, límite elástico, comienza la plastificación de la madera sometida a compresión, mientras que la madera a sometida a tracción continúa con un comportamiento lineal hasta la rotura.

La curva tensión-deformación que define el comportamiento de una viga de madera sometida a flexión, Fig. 1-a), es obtenida normalmente a partir de ensayos de compresión y de tracción pura, tal y como define la norma EN 408 (CEN, 2011). Se representan en la figura el límite elástico a compresión ($\sigma_{c,e}$), el límite de rotura a tracción ($\sigma_{t,r}$), la deformación a compresión en el límite elástico ($\epsilon_{c,e}$) y la deformación a compresión cuando se alcanza el límite por fallo a compresión ($\epsilon_{c,r}$).

Se utilizó la hipótesis de Bernoulli de la deformación plana de la sección. En la sección de una pieza de madera libre de defectos se distinguen tres fases de tensiones en compresión hasta alcanzar la rotura, Fig. 1-b) (Argüelles y Arriaga, 2000): una primera fase de comportamiento elástico (fase 1); una segunda de comportamiento elastoplástico (fase 2) y una tercera fase de fluencia, donde la madera sigue deformándose en compresión sin que esto implique un aumento de la carga aplicada, hasta que se alcanza el límite de fallo a compresión. En el caso de probetas libres de defectos la rotura última de la probeta se produce por tracción paralela a la fibra, una vez plastificada la zona superior comprimida.

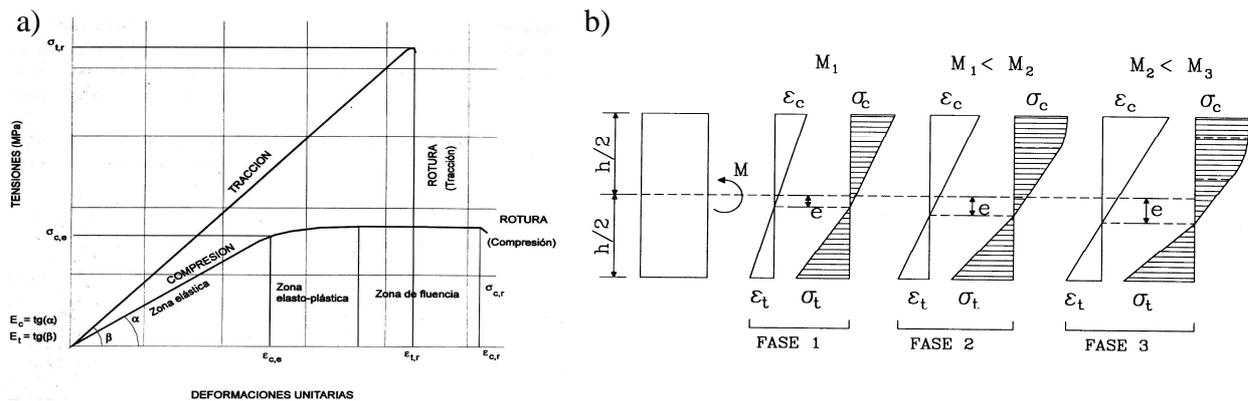


Figura 1. a) Diagrama tensión-deformación en tracción y compresión paralela a la fibra; b) Distribución de tensiones en flexión (Argüelles & Arriaga, 2000)

Existen datos publicados de valores de tensiones máximas para estas especies de procedencia americana, que adoptan los siguientes valores medios: *P. taeda* ($\sigma_{c,r}=49,2 \text{ N/mm}^2$; $\sigma_{t,r}=80,0 \text{ N/mm}^2$) y *P. elliotii* ($\sigma_{c,r}=49,2 \text{ N/mm}^2$), (USDA, 1999; USDA, 2010). De la especie *P. sylvestris* de procedencia española se conocen no sólo las tensiones máximas, sino también los módulos de elasticidad a tracción y a compresión y valores de pendientes para el tramo elastoplástico, asumiendo una discretización de la zona curva del diagrama tensión-deformación en pequeños tramos rectos. Dicha especie adopta un valor medio de tensión en el límite elástico a compresión de 39 N/mm^2 , un límite de rotura a tracción de 89 N/mm^2 (siendo el menor valor de $38,3$ y el mayor de 144 N/mm^2) y un límite de fallo a compresión de 57 N/mm^2 (Baño et al., 2012).

El abordaje de las normas de cálculo estructural en madera puede resultar insuficiente a la hora de diseñar estructuras o uniones complejas, haciendo necesaria la realización de simulaciones numéricas del comportamiento de la madera con el fin de obtener datos más precisos. En estos casos es cuando resultaría imprescindible contar con información sobre las propiedades mecánicas reales de la madera.

Existen varios modelos que simplifican el diagrama tensión-deformación en compresión. Hill (1948) lo limita a un tramo recto lineal que modela el comportamiento elastoplástico y otro correspondiente a la fluencia tal y como queda reflejado en la Figura 2-a). Bazan (1980) plantea que, una vez alcanzado el límite elástico, la tensión disminuye linealmente mientras las deformaciones siguen aumentando, Fig. 2-b).

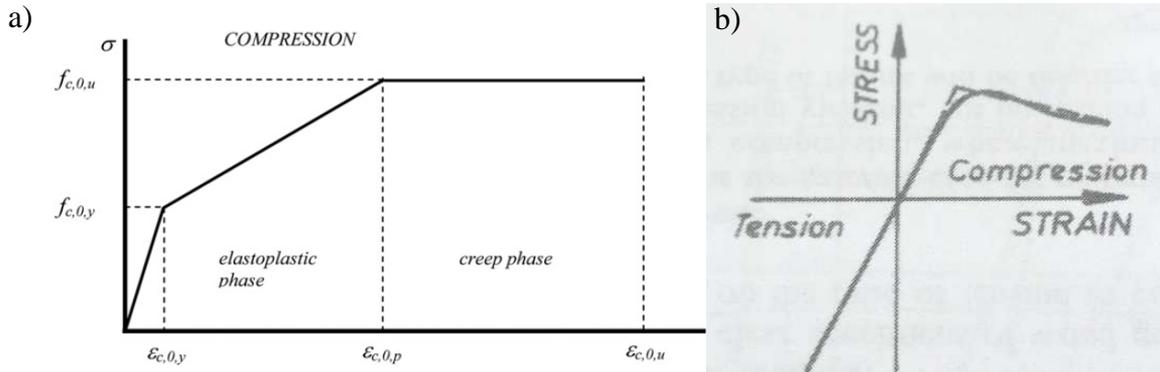


Figura 2. Diagrama simplificado de tensión-deformación en compresión: a) según Hill (1948); b) según Bazan (1980).

Se plantean, por lo tanto, como objetivos del presente trabajo, la presentación y validación de una metodología de ensayo único para la obtención de resultados de flexión, compresión y tracción; la obtención de los módulos de elasticidad longitudinales paralelos a la fibra en tracción y en compresión; el establecimiento del límite elástico a compresión y las tensiones de rotura; y la definición la curva tensión-deformación en tramo elastoplástico de comportamiento a compresión.

2. METODOLOGÍA

2.1. Material de ensayo

Se ensayaron tres probetas de madera libres de defectos de *P. elliotii* de procedencia uruguaya de 450 mm de longitud y las secciones indicadas en la Tabla 1, acondicionadas en cámara a una temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ y $65 \pm 5\%$ de contenido de humedad relativa. Se seleccionaron probetas con un corte transversal radial de modo que tanto la carga como los apoyos de la probeta coincidieran con las caras tangenciales, con el objetivo de no generar resultados diferentes para diferentes direcciones de la fibra.

Tabla 1. Probetas de *Pinus elliotii* de 450 mm de longitud

Probeta	b (mm)	h (mm)
1	24,93	24,74
2	24,18	24,78
3	24,87	25,13

2.2. Ensayos experimentales

En un ensayo a flexión de cuatro puntos con las aplicaciones de la carga y las distancias entre apoyos definidas en la Figura 3, se midieron las flechas globales para cada carga aplicada, mediante un extensómetro colocado en el borde inferior de la probeta, y las deformaciones a tracción y a compresión mediante galgas extensométricas, Fig. 4. Las galgas empleadas en los ensayos fueron de la marca HBM (HBM, Wägetechnik GMBH, Darmstadt), modelo 10/120ALY11, y son normalmente utilizadas para ensayos en acero.

“Estructuras para el Desarrollo, la Integración Regional, y el Bienestar Social”

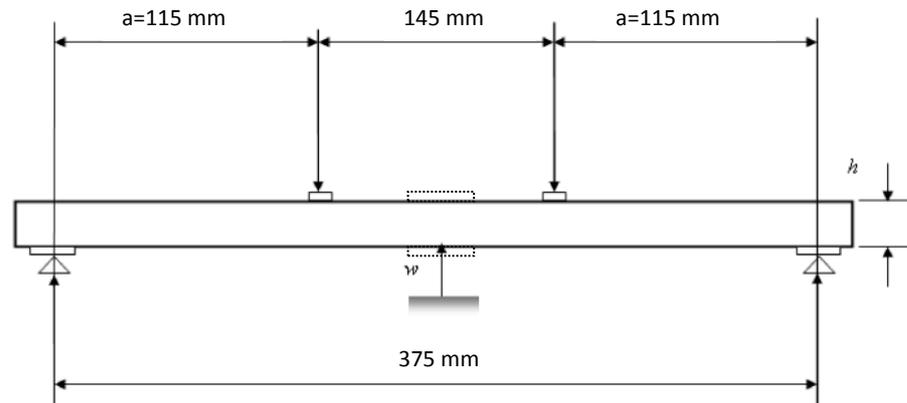


Figura 3. Esquema del ensayo de flexión y ubicación de los dispositivos de medida



Figura 4. Detalle del dispositivo de ensayo, donde se aprecia el corte de la probeta, la galga extensométrica en la cara inferior y el extensómetro para medir flecha global

2.3. Determinación de la resistencia a flexión y del módulo de elasticidad longitudinal paralelo a la fibra

A partir de los resultados de la carga aplicada y de la flecha global en tramo elástico se determinó el módulo de elasticidad longitudinal paralelo a la fibra global de acuerdo a la ecuación (1) obtenida de la norma EN 408 (CEN, 2011).

$$E_{m,g} = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - 5Gbh \right)} \quad (1)$$

donde:

a = distancia entre el punto de carga y el apoyo más próximo (mm)

l = luz de la probeta en el ensayo de flexión (mm)

b = anchura de la sección transversal de la probeta (mm)

h = altura de la sección transversal de la probeta (mm)

F_2-F_1 = incremento de carga sobre la línea de regresión con un coeficiente de correlación mayor o igual a 0,99 (N)

w_2-w_1 = incremento de deformación correspondiente a F_2-F_1 (mm)

G = módulo de elasticidad transversal, considerado igual a ∞ al desconocerse el valor experimental.

$F_1=0,1 F_R$ y $F_2=0,4 F_R$, siendo F_R la carga total que provocó la rotura de las probetas.

A partir de la carga última que provocó la rotura de las probetas se determinó la resistencia a flexión según la ecuación (2).

$$f_m = M / w = 3F_R a / bh^2 \quad (2)$$

donde:

f_m = resistencia a flexión (N/mm^2)

M = momento flector para una viga biapoyada sometida a flexión mediante un ensayo de cuatro puntos (N mm)

w = módulo resistente para una sección rectangular (mm^3)

La ecuación (3) definida en la norma EN 384 (CEN, 2010) estima el valor medio del módulo de elasticidad local a partir del global, que es el usado para la determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas.

$$\bar{E}_{m,l} = (\sum E_i / n)1,3 - 2690 \quad (3)$$

donde:

$\bar{E}_{m,l}$ = valor medio del módulo de elasticidad local (N/mm^2)

E_i = módulo de elasticidad global (N/mm^2)

n = número de probetas ensayadas

2.4. Determinación de la posición de la fibra neutra a partir de la ecuación de la recta

A partir de los resultados de deformación a tracción y a compresión asociados a las cargas aplicadas, obtenidos mediante mediciones con las galgas extensométricas en el punto medio de la cara superior e inferior, se determinó la posición de la fibra neutra para cada estado de carga.

Asumiendo una distribución lineal de deformaciones en tracción y compresión hasta rotura, tal y como se indica en la Figura 1-b), se dedujo la posición de la fibra neutra para cada estado de carga como el punto de intersección de la recta que une las deformaciones de tracción y de compresión con la vertical, considerando valor positivo de deformación en compresión y negativo en tracción. Para la ecuación de la recta $y = ax + b$, se dedujeron los valores de a y b para una configuración de deformaciones tal y como aparece reflejado en la Figura 5, de modo que el descenso de la fibra neutra se calculó según la ecuación (4).

$$\begin{aligned} \varepsilon_t = a\left(-\frac{h}{2}\right) + b; \quad \varepsilon_c = a\left(+\frac{h}{2}\right) + b; \quad \varepsilon_t + \varepsilon_c = 2b; \quad y = 0; \quad a = -e; \quad \varepsilon_t = e\left(-\frac{h}{2}\right) + \left(\frac{\varepsilon_t + \varepsilon_c}{2}\right) \\ e = \frac{(\varepsilon_t + \varepsilon_c)h}{2(\varepsilon_t - \varepsilon_c)} \end{aligned} \quad (4)$$

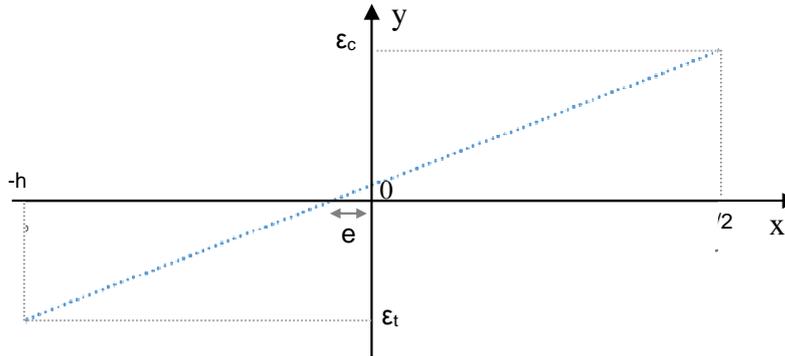


Figura 5. Diagrama de deformaciones y definición del descenso de la fibra neutra (e)

2.5. Determinación del módulo de elasticidad a tracción y a compresión paralela a la fibra en tramo elástico

En tramo elástico de comportamiento, el diagrama de tensiones es lineal para tracción y para compresión, por lo que los valores de las tensiones de tracción y compresión (5) se obtuvieron a partir del momento de flexión obtenido mediante ensayo experimental, conociendo la posición de la fibra neutra, tal y como se muestra en la Figura 6-a).

$$M = \left(-\frac{\sigma_c \left(\frac{h}{2} + e \right)}{2} \right) \left[\frac{2}{3} \left(\frac{h}{2} - e \right) + \frac{2}{3} \left(\frac{h}{2} + e \right) \right] b \quad ; \quad M = \left(-\frac{\sigma_t \left(\frac{h}{2} - e \right)}{2} \right) \left[\frac{2}{3} \left(\frac{h}{2} - e \right) + \frac{2}{3} \left(\frac{h}{2} + e \right) \right] b$$

$$\sigma_c = 2M / b \left(\frac{h}{2} + e \right) \left[\frac{2}{3} \left(\frac{h}{2} - e \right) + \frac{2}{3} \left(\frac{h}{2} + e \right) \right] \quad ; \quad \sigma_t = 2M / b \left(\frac{h}{2} - e \right) \left[\frac{2}{3} \left(\frac{h}{2} - e \right) + \frac{2}{3} \left(\frac{h}{2} + e \right) \right] \quad (5)$$

donde,

M= momento de flexión (N/mm²)

σ_c = tensión de compresión en tramo elástico (N/mm²)

σ_t = tensión de tracción (N/mm²)

Los módulos de elasticidad a tracción y a compresión se obtuvieron a partir de la ecuación lineal de Hook (7), calculando el módulo de elasticidad medio en el tramo elástico como la relación entre la diferencia de tensiones y de deformaciones entre los puntos inicial y final del tramo considerado (8).

$$\sigma_c = E_c \varepsilon_c \quad ; \quad \sigma_t = E_t \varepsilon_t \quad (7)$$

$$E_c = \frac{\sigma_{c,2} - \sigma_{c,1}}{\varepsilon_{c,2} - \varepsilon_{c,1}} \quad ; \quad E_t = \frac{\sigma_{t,2} - \sigma_{t,1}}{\varepsilon_{t,2} - \varepsilon_{t,1}} \quad (8)$$

Donde,

σ_c = tensión de compresión, correspondiente a una carga inicial F_1 y la carga correspondiente al límite elástico F_2 (N/mm²)

σ_t = tensión de tracción (N/mm²)

E_c = módulo de elasticidad a compresión paralela a la fibra (N/mm²)

E_t = módulo de elasticidad a tracción paralela a la fibra (N/mm²)

ε_c = deformación en compresión (adimensional)

ε_t = deformación en tracción correspondiente (adimensional)

La determinación del límite elástico se obtuvo a partir del punto donde la relación $\varepsilon_t/\varepsilon_c$ deja de ser lineal.

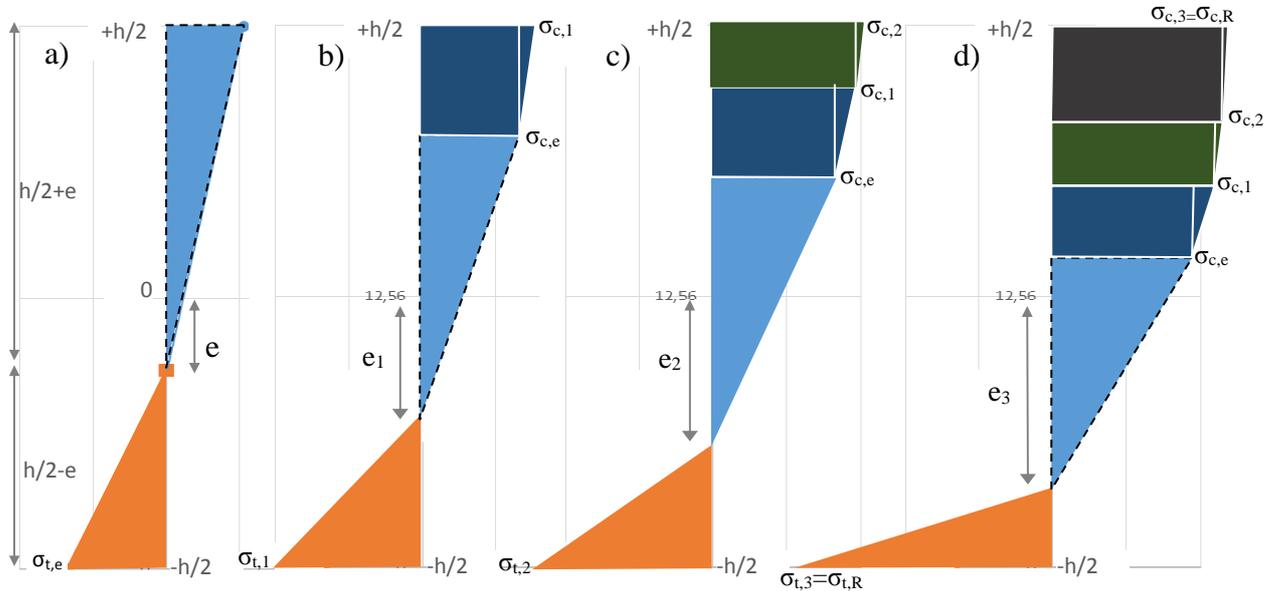


Figura 6. Diagrama tensión-deformación para diferentes estados de carga: a) tramo elástico; b) tramo elastoplástico 1); c) tramo elastoplástico 2 y d) tramo elastoplástico 3.

2.6. Determinación del módulo de elasticidad a tracción y a compresión paralela a la fibra en tramo elastoplástico

Para obtener el comportamiento elastoplástico de la madera en la fase 2, es decir, entre el comportamiento elástico y la fluencia, se discretizó la curva en tres tramos rectos con un comportamiento lineal en cada tramo. Asumiendo, además, que el comportamiento en tracción es siempre elástico y lineal, calculado a partir de los valores de deformación y de módulo de elasticidad definido en tramo elástico, se determinó la tensión de tracción para cada tramo ($\sigma_{t,1}$; $\sigma_{t,2}$ y $\sigma_{t,3}$) y la de rotura, a partir del momento y de la posición de la fibra neutra según la ecuación (5).

En la zona comprimida, se diferencian, en un primer paso, Fig. 6-b), dos tramos de comportamiento: i) el elástico, que afectará a la madera comprendida entre la fibra neutra y la posición del límite elástico, y ii) tramo elastoplástico 1, que afecta a la sección de madera comprendida entre la posición del límite elástico y el borde superior de la probeta. La posición de la altura de la probeta a la que se alcanza el límite elástico se determinó considerando que la ecuación de la recta $y=ax+b$, toma, como valor de y , la deformación de compresión y, como valor de x , la distancia entre el eje de la sección transversal y la altura a la que se alcanza el límite elástico. Se calculó el valor de la tensión máxima en dicho tramo 1 considerando que el área de la zona comprimida debe de ser igual al área de la zona traccionada.

De igual modo se procedió para el tramo 2, Fig. 6-c), y el tramo 3, Fig. 6-d), determinando la posición de límite de tensión que diferencia cada tramo según la altura de la sección de la probeta y equilibrando las áreas de compresión con la de tracción.

Para cada tramo elastoplástico, se calculó un módulo de elasticidad medio como relación de la diferencia de tensiones y la diferencia de deformaciones entre los puntos inicial y final que definen cada tramo de recta, ecuación (8).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados experimentales

La Figura 7 presenta la gráfica de los resultados carga-deformación en tracción y compresión (izqda.) y de carga-flecha (dcha.) para las tres probetas ensayadas.

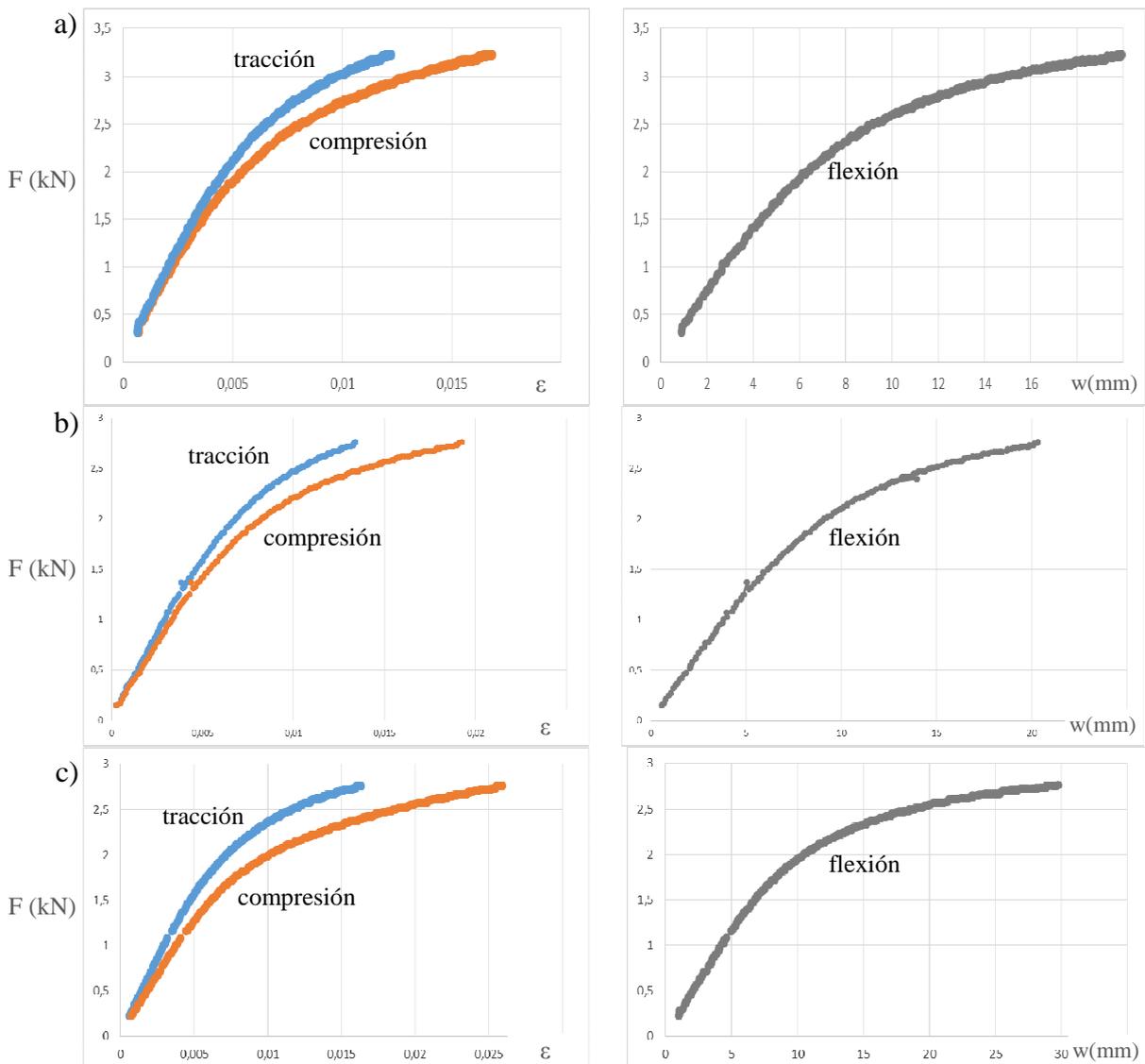


Figura 7. Diagrama carga (kN)-deformación y Diagrama carga (kN)-flecha (mm) para:
a) probeta 1; b) probeta 3 y c) probeta 4

En ambos casos, mediciones de deformaciones y de flechas, se puede observar una tendencia de comportamiento lineal en los primeros estados de carga, representado por un tramo

recto desde el inicio de carga hasta un punto donde comienza a representarse una curva, para terminar nuevamente en un tramo recto.

Atendiendo al diagrama carga-flecha o al diagrama momento-curvatura y realizando una similitud con los modos de fallo definidos por Buchanan (1990), en las tres probetas ensayadas sólo se reflejan los dos primeros modos de fallo: i) modo 1, correspondiente al primer tramo recto, donde la resistencia de la probeta depende únicamente de la resistencia a tracción, sin que la parte comprimida se plastifique (tensión tracción/tensión compresión < 1,0); ii) modo 2, correspondiente al tramo curvo, donde el momento máximo de flexión estaría asociado a un fallo por rotura frágil en tracción, pero donde ya ha ocurrido plastificación en la parte comprimida (tensión tracción/tensión compresión > 1,0). Al realizar el ensayo por control de velocidad de carga y no por flecha, no se obtuvieron resultados de los modos de fallo 3 y 4 definidos por este autor, donde se contemplaría una disminución de la carga y de la deformación hasta la rotura.

La Tabla 2 presenta los valores de carga, momento, descenso de fibra neutra y tensión de compresión para el límite elástico de las tres probetas ensayadas, así como la tensión de rotura a flexión.

Tabla 2. Límite elástico en compresión y límite de rotura a flexión

N	F_e (kN)	M_e (N mm)	e (mm)	$\sigma_{c,e}$ (N/mm ²)	F_r (kN)	f_m (N/mm ²)
1	1,6	94875	0,78	35,1	3,2	72,8
2	1,4	78200	0,87	29,5	2,8	64,1
3	1,2	69575	1,57	23,6	2,8	60,6

Donde,

F_e = carga aplicada en el límite elástico (kN)

M_e = momento en el límite elástico (N mm)

e = descenso de la fibra neutra en el límite elástico (mm)

$\sigma_{c,e}$ = tensión de compresión en el límite elástico (N/mm²)

F_r = carga a la que se produce la rotura de la probeta (kN)

f_m = resistencia a flexión de la probeta (N/mm²)

La carga aplicada en límite elástico a compresión se alcanza a un 50 % con respecto a la carga última de rotura para las probetas 1 y 2, y a un 43 % para la probeta 3. Según la norma EN 408, se asegura el comportamiento de la madera trabajando a flexión en tramo elástico cuando se está por debajo del 40% de la carga de rotura, aunque, tal y como se aprecia para la probeta 3, este valor puede estar muy próximo al límite elástico o incluso podría estar dentro del tramo elastoplástico de comportamiento.

3.2. Módulos de elasticidad en tramo elástico

Se presentan en la Tabla 3 los resultados del módulo de elasticidad longitudinal paralelo a la fibra global ($E_{m,g}$) obtenido según la ecuación (1) a partir de los resultados experimentales de flecha (w), los módulos de elasticidad longitudinal paralelo a la fibra en compresión ($E_{c,0}$) y en tracción ($E_{t,0}$) obtenidos a partir de los resultados experimentales de deformación en compresión (ε_c) y en tracción (ε_t), la relación entre los módulos de elasticidad a tracción y a compresión ($E_{t,0}/E_{c,0}$) y el módulo de elasticidad longitudinal paralelo a la fibra local ($E_{m,l}$), obtenido a partir de la ecuación (3) según la norma EN 384 (CEN, 2010).

Tabla 3. Módulos de elasticidad en tramo elástico

N	$E_{m,g}$ (N/mm ²)	$E_{c,0}$ (N/mm ²)	$E_{t,0}$ (N/mm ²)	$E_{t,0}/E_{c,0}$	$E_{m,l}$ (N/mm ²)	C.R. (EN 338)
1	9510	8386	11035	1,31	9673	C20
2	7175	6030	8044	1,33	6638	No clasifica
3	5980	4892	8141	1,66	5084	No clasifica

Asumiendo una asignación de clase resistente de las probetas de madera libres de singularidades únicamente por valores de módulo de elasticidad local ($E_{m,l}$), sólo la probeta 1 clasificaría como estructural, lo que refleja los bajos valores de módulo de elasticidad de esta especie de procedencia uruguaya frente a los publicados por el USDA (1999), que presenta valores de $E_{m,l}$ de 12.300 y 13.700 N/mm² para *P. taeda* y *P. elliottii*, respectivamente. Los valores medios obtenidos concuerdan con los resultados de estas especies de procedencia uruguaya obtenidos por Moya et al. (2013).

Una relación $E_{t,0}/E_{c,0}$ comúnmente utilizada para la madera de coníferas toma el valor de 1,2 (Baño et al., 2012), aunque estos valores pueden variar en función de la especie, la procedencia o la probeta ensayada. Dicha relación varía entre 1,31 y 1,66 para las probetas de *P. elliottii* ensayadas.

3.3. Diagrama tensión-deformación en flexión en tramo elastoplástico

Asumiendo comportamiento lineal en tracción y considerando que el valor del módulo de elasticidad obtenido en el tramo elástico se mantiene hasta rotura, los límites de resistencia a tracción tomaron valores de 135, 108 y 133 N/mm² y los límites elásticos a compresión se alcanzaron para tensiones de 35, 30 y 24 N/mm² para las probetas 1, 2 y 3, respectivamente.

La figura 8 presenta los diagramas de tensiones según la altura de la sección en el tramo de comportamiento elastoplástico 2. Se observa el descenso de la fibra neutra con respecto al eje de la sección y la curvatura del tramo elastoplástico.

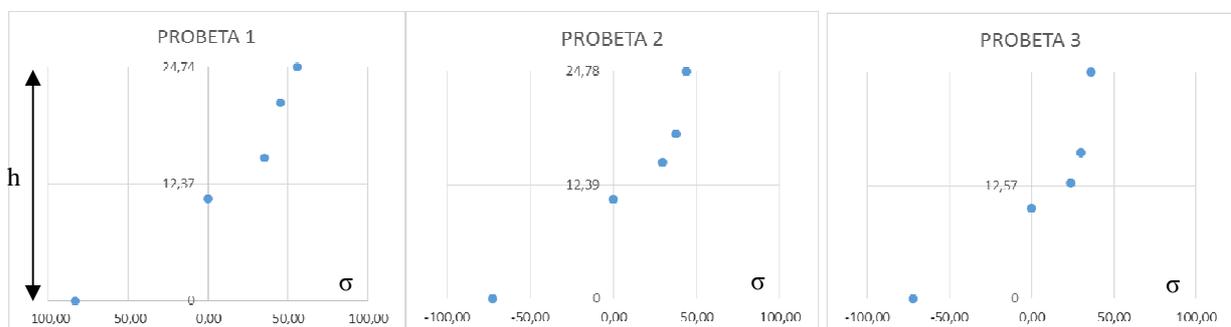


Figura 8. Diagrama de tensiones según la altura de la sección en el tramo elastoplástico 2 para las probetas 1, 2 y 3

“Estructuras para el Desarrollo, la Integración Regional, y el Bienestar Social”

Se presenta en la Figura 9 la curva tensión-deformación en tramo elastoplástico de compresión a partir de tramos rectos para las tensiones presentadas en la Figura 9. Aunque en el tramo elastoplástico se detecta un comportamiento claramente diferente al elástico, no se ha podido determinar el módulo de elasticidad medio para el último tramo elastoplástico hasta rotura, por lo que no se obtuvieron valores de límite de fallo a compresión.

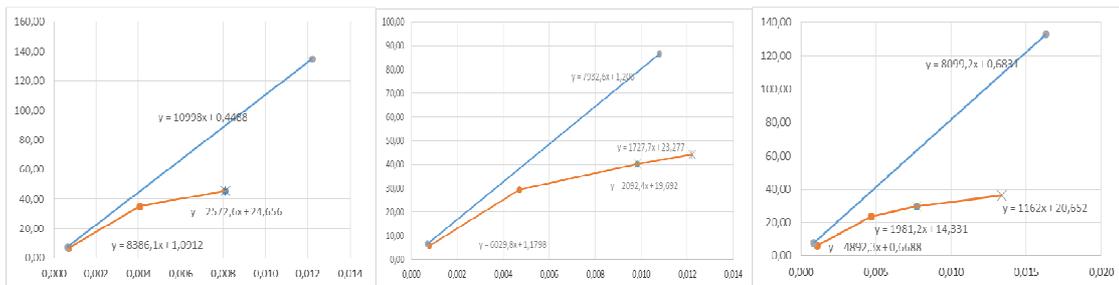


Figura 9. Diagrama tensión-deformación para las probetas 1, 2 y 3

Los valores de resistencia a tracción son ligeramente mayores que los valores medios para el *P.taeda* de procedencia americana (USDA, 2010) y que el valor medio para *P. sylvestris* de procedencia española (89 N/mm²), aunque se encuentra dentro del intervalo de valores máximos y mínimos obtenidos para esta última especie en ensayos a tracción pura ($\sigma_{t,R}$ igual a 38 y 144 N/mm², respectivamente) (Baño et al., 2012).

Se observó, para las tres probetas, que la pendiente que define el módulo de elasticidad medio a compresión se hacía negativa si los tramos se acortaban, de modo que el incremento de carga fuese pequeño con respecto a la carga que definía el límite de un tramo, tal y como se puede observar en la Figura 10. Aunque este fenómeno se asemeja a una de las teorías de modo de distribución de tensiones en madera sometida a flexión (Bazan, 1980), éste suele producirse en un solo tramo, es decir, entre el límite elástico y la rotura, lo que difiere de lo obtenido en los ensayos experimentales, donde el fenómeno ocurre en cada cambio de tramo.

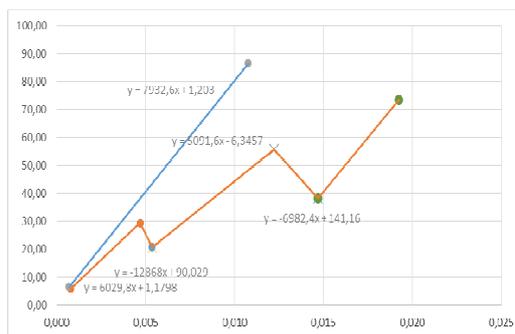


Figura 10. Pendiente negativa para tramos cortos de elastoplasticidad

Ante dichos, se realizó un nuevo supuesto de comportamiento elastoplástico de la madera, donde se consideró que el comportamiento podría ser no lineal tanto en compresión como en tracción. En la Figura 11 se muestra el diagrama tensión-deformación considerando dos tramos de comportamiento elastoplástico para las tres probetas estudiadas, donde se puede apreciar un comportamiento prácticamente lineal para el tramo elástico y primero elastoplástico, mientras que el último tramo a tracción antes de rotura no sigue un comportamiento lineal, lo que difiere de la teoría de comportamiento para la madera. Por este motivo, no se pueden dar por válidos los

valores de resistencia última obtenidos, por lo que se considera necesario la realización de ensayos en un mayor número de probetas además de tener en cuenta otras técnicas de instrumentación.

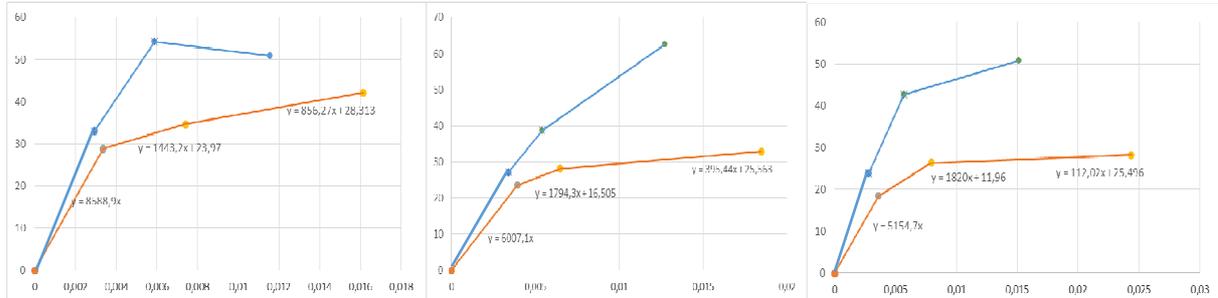


Figura 11. Diagrama tensión-deformación suponiendo no linealidad en tracción

4. CONCLUSIONES

Se presentó una metodología de ensayo a flexión para la determinación de los valores de módulo de elasticidad y de resistencia a flexión, a tracción paralela a la fibra y a compresión paralela a la fibra, optimizando de este modo el tiempo y el coste de ejecución de los tres ensayos de forma independiente. Dicho ensayo evita, además, los problemas experimentales asociados los desgarros de la madera o desplazamientos de las garras durante el ensayo de tracción pura.

Se obtuvieron valores de módulo de elasticidad a flexión, a tracción y a compresión en tramo elástico, que presentaron una relación E_f/E_c que varió entre 1,33 y 1,66 para las probetas ensayadas. Se obtuvieron los límites elásticos a compresión, que varió entre 24 y 35 N/mm^2 , y los límites de rotura a tracción suponiendo linealidad hasta rotura en el comportamiento de tracción.

Se desarrolló un modelo para la obtención del diagrama tensión-deformación en tramo elastoplástico de comportamiento a compresión. Dicho modelo simula la curva mediante tramos rectos lineales y se obtuvo el valor del módulo de elasticidad medio de cada tramo como la pendiente entre el punto final y el inicial de cada tramo. Se observó un fenómeno, común a todas las probetas, donde cuando los tramos lineales considerados son cortos, la pendiente se hace negativa y un comportamiento no lineal en tracción en el último tramo antes de rotura, lo que no permitió determinar el límite de fallo a compresión.

En base a los resultados obtenidos, se pueden considerar como válidos los resultados en tramo elástico y los límites elásticos a compresión, mientras que para dar por válido el modelo de elastoplasticidad se considera necesaria la realización de ensayos en un mayor número de probetas y evaluar otras técnicas de medición, con el fin de estudiar el fenómeno anteriormente citado y definir el comportamiento genérico de la especie con una muestra más grande.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (2010). NBR 7190. Projeto de estruturas de madeira. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, Brazil.

Argüelles, R. y Arriaga, F. (2000). Estructuras de Madera. Diseño y cálculo. AITIM, Madrid, España

- Baño, V., Argüelles Bustillo, R., Regueira, R and Guaita, M. (2012). Determinación de la curva tensión-deformación en madera de *Pinus Sylvestris* L. para la simulación numérica de vigas de madera libre de defectos. *Materiales de Construcción* Vol. 62, 306, 269, 284
- Bazan, I.M.M. (1980). Ultimate bending strength of timber beams. Tesis doctoral (PhD) en Nova Scotia College, Halifax, Nova Scotia.
- Buchanan, A. H. (1990). Bending strength of lumber. *Journal of Structural Engineering*. Vol. 116, No 5, p.1213-1229
- CEN (2010). UNE EN 338. Madera estructural. Clases resistentes
- Dieste, A. (2012). *Programa de promoción de exportaciones de productos de madera*. Dirección Nacional de Industrias. Ministerio de Industrias, Energía y Minería. Consejo Sectorial Forestal-Madera. Uruguay
- Hill, R. (1948). A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic materials. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, 1e281
- INTI-CIRSOC (2013). CIRSOC-602. Reglamento Argentino de Estructuras de Madera. Buenos Aires. Argentina.
- Moya, L.; Laguarda, M.F.; Cagno, M.; Cardoso, A.; Gatto, F. and O'Neill, H. (2013). Physical and mechanical properties of Loblolly and Slash pine Wood from Uruguayan plantations. *Forest Products Journal*. Vol. 63, No. 2
- O'Neill, H.; Tarigo, F.; Cardoso, A.; Cagno, M. (2013). Comportamiento mecánico de la madera de *Pinus taeda* y *Pinus elliottii* proveniente de plantaciones de rápido crecimiento para uso estructural en la construcción en el Uruguay. LATU. Nota Técnica N°12
- USDA (1999). Wood handbook. Wood as an engineering material. Forest Products Laboratory. United States Department of Agriculture Forest Service. Madison, Wisconsin
- USDA (2010). Wood handbook. Wood as an engineering material. Forest Products Laboratory. United States Department of Agriculture Forest Service. Madison, Wisconsin