

INFLUENCIA DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD EN LA DETERMINACIÓN DE TENSIONES ADMISIBLES EN COMPRESIÓN PARA MADERA LAMINADA ENCOLADA DEL *POPULUS DELTOIDES*

Meyer, Lía C.⁽¹⁾; Guillaumet, Alfredo A.⁽²⁾; Sosa Zitto, Ma. Alexandra⁽³⁾; López Rodríguez, Gamaliel⁽⁴⁾

(1) Ing., Becaria Doctoral, Investigador, UTN – FR Venado Tuerto; Argentina; lmeyer@frvt.utn.edu.ar

(2) Dr. Ing., Profesor Titular, Investigador, UTN – FR Venado Tuerto; Argentina

(3) Dr. Ing., Profesor Titular, Investigador, UTN – FR C. del Uruguay; Argentina

(4) Dr. Arq., Profesor Titular, Investigador, Universidad de Valladolid, España

Resumen

El Reglamento Argentino de Estructuras de Madera CIRSOC 601 (2016) incorpora en sus suplementos los valores de referencia para las vigas laminadas encoladas de *Populus deltoides*. En el diseño de elementos comprimidos, de acuerdo a las especificaciones del mencionado reglamento, interviene el factor de estabilidad del miembro comprimido (C_p), la determinación de este factor está en función del módulo de elasticidad mínimo (E_{min}) y de la tensión admisible en compresión. En este trabajo se analiza la influencia del módulo de elasticidad, para ello se determinó por medio de ensayos de flexión en 160 piezas laminadas encoladas. Los ensayos se realizaron de acuerdo a la norma IRAM 9663 (2013). Se comparó el valor del módulo elasticidad mínimo propuesto por el CIRSOC 601 con el experimental y se analizó su incidencia en la tensión crítica en compresión. Los resultados experimentales mostraron un módulo de elasticidad mínimo superior en un 75% respecto del propuesto por el CIRSOC 601 que conduce a una tensión admisible mínima superior. Esta situación supone un aumento significativo del coeficiente de seguridad en elementos comprimidos. Se deberían realizar más ensayos para confirmar los valores propuestos en los suplementos del CIRSOC 601 para el *Populus deltoides*.

Abstract

*The Argentine Regulation of Wood Structures CIRSOC 601 (2016) incorporates in its supplements the reference values for the glued laminated beams of *Populus deltoides*. In the design of compressed elements, according to the specifications of the aforementioned regulation, the stability factor of the compressed member (C_p) intervenes, the determination of this factor is a function of the minimum modulus of elasticity (E_{min}) and admissible stress in compression. In this work the influence of the modulus of elasticity is analyzed, for this it was determined by means of bending tests on 160 glued laminated pieces. Tests were carried out according to the IRAM 9663 (2013) norm. The value of the minimum elasticity modulus proposed by CIRSOC 601 was compared with the experimental and its incidence in admissible compression stress was analyzed. The experimental results showed a modulus of elasticity of 75% higher than that proposed by CIRSOC 601, which leads to a higher minimum admissible stress. This situation means a significant increase in the safety coefficient in compressed elements. Further tests should be carried out to confirm the proposed values in CIRSOC 601 supplements for *Populus deltoides*.*

1.- INTRODUCCIÓN

En Argentina, se destacan algunos avances con respecto a la utilización de la madera en la construcción y obras civiles, como disponer de normas y reglas de diseño para el cálculo de estructuras de maderas, que hasta no hace mucho no existían en el país. También hubo otros factores que colaboraron para que se cuente con madera de calidad para su uso estructural, proveniente de bosques implantados con especies de rápido crecimiento, entre una de ellas el *Populus deltoides*.

El álamo pertenece al género *Populus spp.* de la familia de las salicáceas. Las plantaciones principales de esta especie se encuentran en la cuenca del delta del río Paraná comprendida por las provincias de Buenos Aires y Entre Ríos, donde se estiman 83.370 hectáreas, de las cuales el 17% corresponden a *Populus spp* y el resto con el porcentaje más alto para *Salix spp*. El aprovechamiento del consumo del álamo es del 93%, y representa alrededor de 150.000 toneladas para uso sólido, en aserraderos y debobinadoras. (Borodowski *et al.* 2014)^[1]. En el programa de mejoramiento genético de álamos se destacan los clones introducidos de 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67', por su rápido crecimiento, adaptabilidad, variados usos de la madera, y especialmente, por conservar el ambiente en la protección de las cuencas y cultivos. (Cortizo, 2011)^[2].

La madera laminada encolada presenta una alternativa con mayores esquadrias, formas y longitudes que la madera aserrada, para piezas estructurales. En el año 2015, con la actualización de la normativa IRAM 9662-4^[3] y 9660-1^[4], se incorpora la clasificación visual de las tablas por resistencias del álamo *Populus deltoides* 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67' provenientes del delta del río Paraná y los requisitos de fabricación.

La aprobación del primer Reglamento Argentino de Estructura de Madera en el año 2016, complementa y brinda a los proyectistas, valores de tensiones de referencia para las distintas clases resistentes del *Populus deltoides* del delta río Paraná y de otras tres especies más cultivadas en el país.

En el estudio de la inestabilidad del equilibrio de piezas esbeltas comprimidas, es sabido que de acuerdo a la esbeltez del elemento comprimido se generan distintos mecanismos de rotura, desde la compresión pura para piezas cortas, pasando por el pandeo anelástico, hasta el pandeo elástico para piezas muy esbeltas. En el caso del reglamento INTI-CIRSOC 601 (2016)^[5] este comportamiento se evalúa a través de un factor de estabilidad lateral del miembro comprimido (C_p).

El objetivo de este trabajo es presentar los módulos de elasticidad mínimos obtenidos de los ensayos de 160 piezas para determinar las tensiones admisibles de pandeo de las distintas esbelteces en el rango de 70 a 100. Y, al mismo tiempo, realizar un análisis comparativo con el valor del módulo de elasticidad mínimo publicado por el INTI-CIRSOC 601 (2016)^[5].

2.- METODOLOGIA

2.1 MATERIAL

El material elegido para realizar el desarrollo experimental fueron piezas de madera laminadas encoladas del *Populus deltoides* en los clones 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67'. Las mismas se fabricaron según especificaciones de la norma IRAM 9660-1 (2015)^[4], la madera seleccionada fue de grado resistente 1, compuesta por tres láminas adyacentes superpuestas, unidas con adhesivo específico según IRAM 45055^[6] y con empalmes de uniones dentadas (finger-joint) en su longitud. Una vez terminado el proceso de fabricación sus cuatro caras fueron cepilladas. Las muestras presentaban una sección transversal de 60 mm x 90 mm y una longitud efectiva de pandeo según la configuración de carga y las condiciones de apoyo, para nuestro caso biarticulada, en el rango de esbelteces de 70 a 100.

A continuación, se indican la esbeltez, la longitud efectiva y las dimensiones de las piezas ensayadas para ambos clones en la TABLA 1:

Clon	λ	Le mm	a mm	b mm	n
A	70	1212	90	60	20
	80	1386	90	60	20
	90	1559	90	60	20
	100	1732	90	60	20
S	70	1212	90	60	20
	80	1386	90	60	20
	90	1559	90	60	20
	100	1732	90	60	20

λ : Esbeltez; **Le**: Longitud efectiva; **a**: Altura de la sección transversal;
b: Ancho de la sección transversal; **n**: número de piezas

TABLA 1: Características de los elementos de pruebas

2.2.- DESARROLLO EXPERIMENTAL

Los ensayos se llevaron a cabo en el laboratorio de la Facultad Regional de Venado Tuerto, Universidad Tecnológica Nacional.

Se siguieron las prescripciones de la norma IRAM 9663 (2013)^[7], para el ensayo a flexión las 160 piezas, se ensayaron a flexión en el plano de menor inercia, porque sobre ese eje ocurrirá la falla de inestabilidad de equilibrio. La probeta se encontraba entonces simplemente apoyada con una luz igual 18 veces su altura (1.080 mm) y la carga se aplicó, simétricamente en los tercios de la luz. Como la carga aplicada no debe dañar la probeta y esta debe mantenerse dentro del campo elástico se estimó la

carga máxima de rotura en base a las tensiones publicadas por Guillaumet (2019)^[8] y se aplicó hasta el 40% de la misma. La carga máxima que se aplicó fue de 3.000 N y se hizo mediante un equipo hidráulico con cabezal que se desplaza a velocidad constante.

Se registraron las deformaciones correspondientes de los escalones de carga cada 500 N, a través de un comparador centesimal ubicado en la parte inferior de la viga en el centro de la luz entre los apoyos. (FIGURA 1)

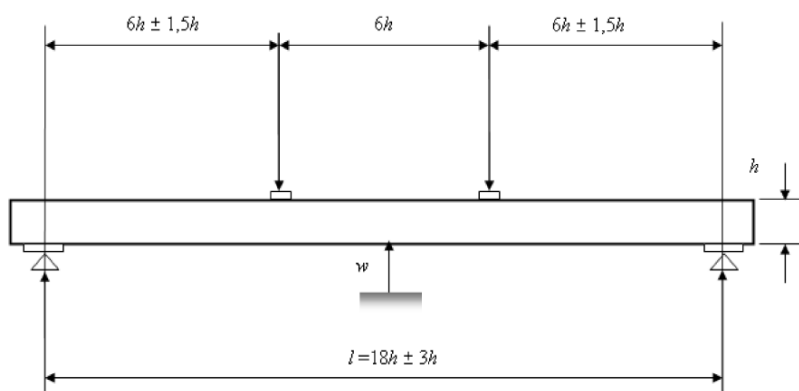


FIGURA 1: Esquema de carga a flexión

Con los valores obtenidos de cargas y deformaciones, se calculó el módulo de elasticidad global según la expresión (1)

$$E_{m,g} = \frac{3 a l^2 - 4 a^3}{2 b h^3 \left(2 \frac{w_2 - w_1}{P_2 - P_1} \right)} \quad (1)$$

$E_{m,g}$: Módulo de elasticidad global en N/mm²

a : Distancia entre puntos de carga y apoyo más próximo, en mm.

l : Longitud de flexión entre apoyos, en mm.

b : Anchura de la sección, en mm.

h : Altura de la sección, en mm.

$P_2 - P_1$: Incremento de carga en la recta de regresión con un coeficiente de correlación superior a 0,99 con las deformaciones, en N.

$w_2 - w_1$: Incremento de deformación correspondiente a $P_2 - P_1$, en mm.

2.3.- DETERMINACIÓN DE LA CARGA ADMISIBLE DE PANDEO SEGÚN CIRSOC 601 (2016)

El procedimiento descrito en el Reglamento Argentino de Estructuras de Maderas (INTI-CIRSOC 601, 2016)^[5] plantea que el valor de la tensión admisible ($F'_{c;C601}$), se obtiene multiplicando, la tensión de diseño de referencia (F_c), por todos los factores de ajuste, C_D , C_M , C_t y C_P .

$$F'_{c;C601} = F_c \times C_D \times C_M \times C_t \times C_P \quad (1)$$

F_c = Suplemento 2: Valores de diseño MLEE – Tabla S2.1-1 – Grado resistente 1

C_D = Factor de duración de la carga, Tabla 4.3-2

C_M = Factor de condición de servicio, Tabla 5.3-2

C_t = Factor de temperatura, Tabla 5.3-3

C_P = Factor de estabilidad del miembro comprimido, Artículo 3.3

El valor de C_P , cuyo valor es igual o menor que 1, se determina con la siguiente expresión:

$$C_P = \frac{1+(F_{cE}/F_c^*)}{2c} - \sqrt{\left[\frac{1+(F_{cE}/F_c^*)}{2c}\right]^2 - \frac{F_{cE}/F_c^*}{c}} \quad (2)$$

Donde:

$$F_{cE} = \frac{0,822 E_{\min}}{\left(\frac{L_e}{d}\right)^2} \quad (3)$$

F_{cE} : representa la tensión crítica en miembros comprimidos, N/mm².

$$F_c^* = F_c \times C_D \times C_M \times C_t \quad (4)$$

F_c^* : tensión de diseño en compresión paralela a las fibras de referencia multiplicada por todos los factores aplicables, menos C_P , N/mm².

L_e : longitud efectiva de pandeo, que depende de las condiciones de apoyo y la configuración de carga, en este caso de un miembro biarticulado, mm.

d : ancho de la sección transversal en la dirección perpendicular al eje baricéntrico respecto del cual se produce pandeo, mm.

c : coeficiente cuyo valor es 0,8 para miembros de madera aserrada, 0,85 para miembros estructurales de sección circular y 0,90 para madera laminada encolada estructural;

E_{\min} : módulo de elasticidad mínimo, N/mm².

3.- ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1.- MÓDULO DE ELASTICIDAD

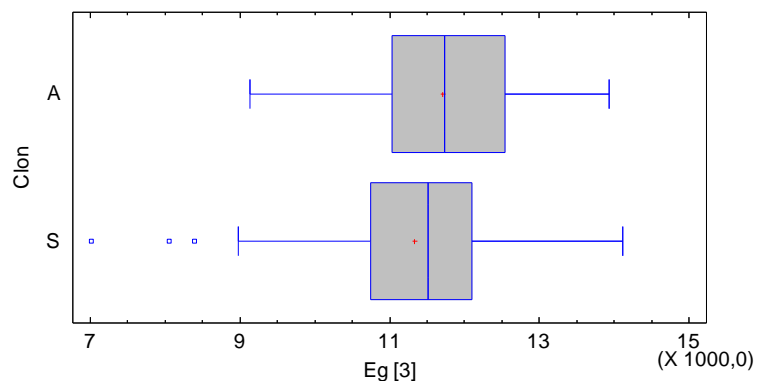
En la TABLA 2, se presentan los valores del módulo de elasticidad global procesados estadísticamente,

Clon	λ	n	Le mm	E_{\min} N/mm ²	E_{prom} N/mm ²	E_{\max} N/mm ²	$E_{0,05}$ N/mm ²	COV
A	70	20	1212	9138	11407	13458	9567	11,4
	80	20	1386	10311	11583	12436	10413	5,7
	90	20	1559	9338	12022	13894	9593	11,5
	100	20	1732	9211	11805	13931	10801	9,5
	Total	80		9138	11704	13931	9571	9,8
S	70	20	1212	9218	11772	12847	10498	7,0
	80	20	1386	7018	11144	13043	8881	12,7
	90	20	1559	8056	11100	12937	9693	10,3
	100	20	1732	8388	11307	14120	9732	11,4
	Total	80		7018	11331	14120	9002	10,5
Todos		160		7018	11518	14120	9579	10,3

A: 'Australiano 129/60'; **S:** 'Stoneville 67'; **λ :** Esbeltez; **n:** cantidad de muestras; **Le:** Longitud efectiva; **E_{\min} :** Mod. elasticidad mínima; **E_{prom} :** Mod. Elasticidad promedio; **E_{\max} :** Mod. elasticidad máxima

TABLA 2: Valores experimentales del módulo de elasticidad global

Se aprecia en la FIGURA 2, que las poblaciones son similares, por lo tanto, se podrían implementar los mismos módulos de elasticidad para ambos clones, lo que resulta aceptable. Debido a que no es posible distinguir los clones a simple vista, se comercializan sin identificar el clon. La norma IRAM 9662-4 (2015)^[3] especifica que las diferencias entre sus propiedades no son significativas, entonces no hace ninguna distinción entre los clones.



A: 'Australiano 129/60'; **S:** 'Stoneville 67'; **Eg:** Modulo elasticidad global experimental

FIGURA 2: Módulo de elasticidad experimental por clon

Además, no existe una diferencia estadística significativa en la muestra de los datos obtenidos, en consecuencia, en la TABLA 3, se presenta una síntesis de valores de módulo de elasticidad mínimo adoptados para ambos clones

Clon	λ	n	Le mm	E_{min} N/mm ²
Ambos	70	40	1212	9138
	80	40	1386	7018
	90	40	1559	8056
	100	40	1732	8388
Todos		160		7018

Ambos: 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67'; λ : Esbeltez; n: Cantidad de muestras; **Le:** Longitud efectiva; **E_{min}:** Módulo elasticidad mínimo

TABLA 3: Valores del módulo de elasticidad mínimo para ambos clones

El valor experimental del módulo de elasticidad mínimo obtenido para ambos clones es superior en un 75% respecto del valor del E_{min} publicado por el Reglamento Argentino de Estructuras de Madera. Además, para tablas aserradas de *Populus deltoides*, el E_{min} experimental indica ser superior en un 68% con respecto al valor publicado por Fank *et al.* 2014^[9] y un 49% superior al E_{min} presentado por Guillaumet *et al.* 2018^[10].

3.2.- TENSIONES ADMISIBLES A LA COMPRESIÓN

Para calcular el factor de estabilidad del miembro comprimido (C_P), en primer lugar, se determinó la tensión de diseño en compresión paralela a las fibras de referencia multiplicada por todos los factores aplicables, menos C_P (F_c^*) (Ecuación 4). De acuerdo a las condiciones de uso previstas $C_M=1$; $C_t=1$, $C_D=1,6$ (carga de 10 minutos) y $F_c= 6,3$ N/mm², con lo que resulta $F_c^*=10,08$ N/mm²

Se determinó F_{cE} (Ecuación 3) considerando $d= 60$ mm; $l_e= 1212$ mm, 1386 mm, 1559 mm y 1732 mm para cada una de las esbelteces 70, 80, 90 y 100 respectivamente, de acuerdo a la TABLA 1. Se efectuaron las determinaciones para el módulo de elasticidad mínimo propuesto por el INTI-CIRSOC 601 (2016) ^[5] $E_{min;C601}= 4000$ N/mm² y para el módulo de elasticidad mínimo determinado experimentalmente $E_{min;exp}= 7018$ N/mm².

Se determinó C_P (Ecuación 2) considerando $c=0,9$ por tratarse de madera laminada encolada.

En la TABLA 4 se presentan los valores del coeficiente de ajuste por inestabilidad de equilibrio C_P y de las tensiones admisibles mínimas, para los rangos de esbelteces previstos de 70 a 100 y ambos módulos de elasticidad.

Clon	Esbeltez	Le mm	Fc* N/mm ²	Con valor de $E_{min;C601}=4000/Nmm^2$		Con valor de $E_{min;C601}=7018 N/mm^2$		Diferencia
				C_p	$F_{C;C601;min}$ N/mm ²	C_p	$F_{C;E;min}$ N/mm ²	
Ambos	70	1212	10,08	0,67	6,71	0,86	8,69	1,29
	80	1386	10,08	0,55	5,50	0,79	7,92	1,44
	90	1559	10,08	0,45	4,51	0,69	6,98	1,55
	100	1732	10,08	0,37	3,73	0,60	6,03	1,62

Ambos: 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67'; λ : Esbeltez; Le = Longitud efectiva;

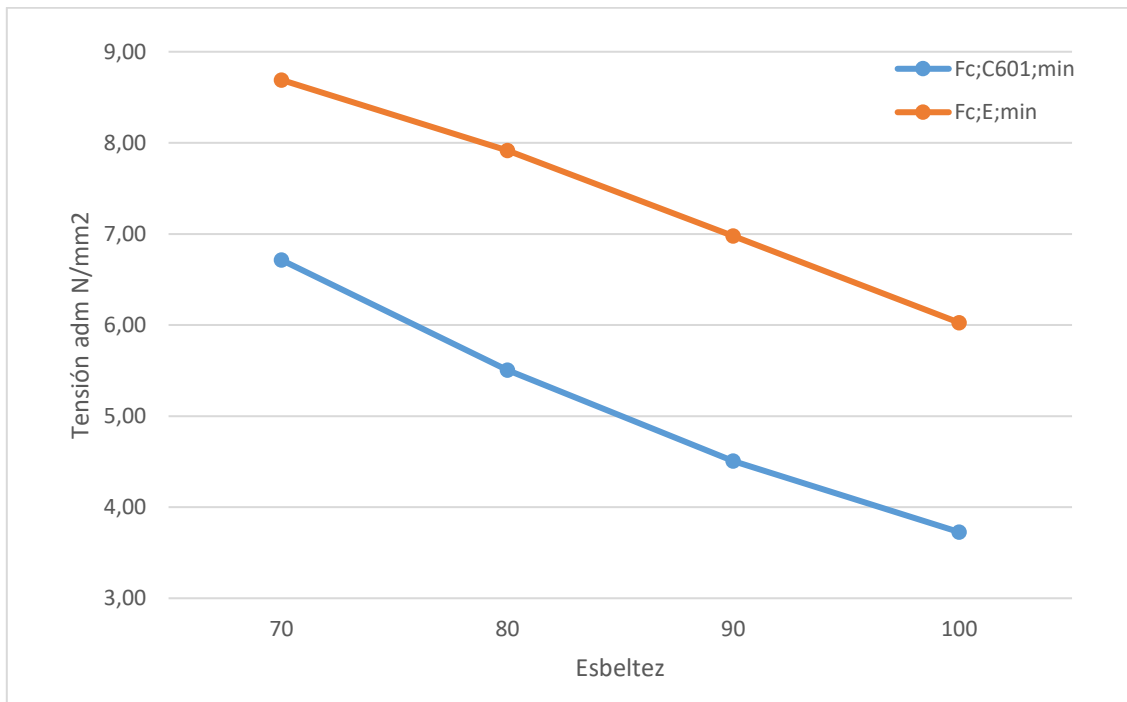
C_p = Factor de estabilidad lateral del miembro comprimido;

$F_{C;C601;min}$: Tensión admisibles mínima con E_{min} del INTI-CIRSOC;

$F_{C;E;min}$: Tensión admisibles mínima con E_{min} experimental.

TABLA 4: Determinación de tensiones admisibles mínimas

En la FIGURA 3, se presenta la variación de la tensión admisible a la compresión utilizando ambos módulos de elasticidad mínimos. Se aprecia que cuando aumentan las esbelteces, mayor es la incidencia del módulo de elasticidad mínimo en las tensiones admisibles calculadas, pasa de 1,29 para la esbeltez 70 a 1,62 para la esbeltez 100. En todos los casos la diferencia es menor que la existente entre los módulos de elasticidad utilizadas (75%).



F'c;C601;mín: valor propuesto por el INTI-CIRSOC 601; N/mm²; **F'c;Exp;mín:** Valor experimental, N/mm²

FIGURA 3: Tensiones admisibles mínimas según INTI-CIRSOC 601 (2016)^[5]

Los resultados obtenidos indican que los valores propuestos para el módulo de elasticidad mínimo del *Populus deltoides* en los suplementos del Reglamento INTI-CIRSOC 601 (2016)^[5] son conservadores y se sitúan del lado de la seguridad.

Si se tiene en cuenta que el reglamento INTI-CIRSOC 601 (2016)^[5] utiliza un coeficiente de seguridad $\gamma=2$, para determinar la tensión de rotura para cada esbeltez se debe multiplicar el valor admisible obtenido por ese coeficiente.

4.- CONCLUSIONES

El resultado obtenido del ensayo para ambos clones de *Populus deltoides* arroja un módulo de elasticidad mínimo de 7.018 N/mm², que resulta ser superior en un 75% con respecto al módulo de elasticidad mínimo de 4.000 N/mm² publicado por el INTI-CIRSOC 601 (2016)^[5] y resulta superior también a los publicados por Fank *et al.* 2014^[9] y Guillaumet *et al.* 2018^[10].

Las tensiones admisibles mínimas determinadas conforme al criterio de diseño del INTI-CIRSOC 601 (2016)^[5], confirman la significativa influencia del módulo de elasticidad mínimo.

Los valores de módulo de elasticidad obtenidos experimentalmente para el *Populus deltoides* resultan superiores a los propuestos en los suplementos del Reglamento INTI-CIRSOC 601 (2016)^[5], demostrando que los mismos son conservadores y sitúan el diseño del lado de la seguridad, generando un aumento del coeficiente de seguridad en elementos comprimidos. Se deberían realizar más ensayos para confirmar el valor E_{min} propuesto en los suplementos del INTI-CIRSOC 601 (2016)^[5] para madera laminada encolada del *Populus deltoides*.

Las tensiones de rotura determinadas en este trabajo serán contrastadas con las que se obtengan en los ensayos en compresión de las piezas previstos en la siguiente etapa del proyecto de investigación en curso.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Borodowski E.D., Signorelli A, Battistella A. (2014). Salicáceas en el Delta del Paraná: situación actual y perspectivas. Actas Jornadas de Salicáceas 2014. IV Congreso Internacional de las Salicáceas en Argentina. Disertación. ISSN 1850-3543
- [2] Cortizo, S (2011) Mejoramiento genético del álamo, una ciencia en apoyo a la producción forestal sostenible. III Congreso Internacional de las Salicáceas en Argentina. Neuquén. Argentina
- [3] IRAM 9662/4 (2015) Madera laminada encolada estructural, Clasificación visual de las tablas por resistencia. Parte 4: Tablas de álamo 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67' (*Populus deltoides*). Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, Buenos Aires.
- [4] IRAM 9660/1 (2015) Madera laminada encolada estructural, Parte 1: Clases de resistencia y requisitos de fabricación y control. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, Buenos Aires.
- [5] INTI CIRSOC (2016) Reglamento Argentino de Estructuras de Madera. Disposiciones generales y requisitos para el diseño y la construcción de estructuras de madera en edificaciones. Buenos Aires, Argentina.
- [6] IRAM 45055 (2002) Adhesivos para estructuras de madera bajo carga, Adhesivo de policondensación de tipos fenólicos, aminoplásticos y de otros tipos. Clasificación y requisitos de comportamiento. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, Buenos Aires
- [7] 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 Racionalización de Materiales, Buenos Aires.

[8] Guillaumet, AA (2019) Comportamiento estructural de la madera de Álamo (*Populus deltoides* 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67') cultivado en el delta del río Paraná. Tesis doctoral. Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Concepción del Uruguay. Argentina.

[9] Fank, P., Stefani, P, Piter, JC (2014) Resistencia y rigidez de tablas destinadas a la fabricación de madera laminada encolada estructural. Análisis comparativo entre el pino resinoso (*Pinus taeda/elliottii*) y el álamo (*Populus deltoides* 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67'). IV Congreso Internacional de las Salicáceas en Argentina.

[10] Guillaumet, AA; Filippetti, MC; Manavella, RD (2018) Clasificación mecánica de elementos estructurales de madera de *Populus deltoides*. XXXVIII Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural 2018. Resistencia. Chaco