

# Comportamiento mecánico de barras esbeltas de madera laminada encolada de Álamo 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67' (*Populus deltoides*) del Delta del Río Paraná sometidas a esfuerzos de compresión

Mechanical behavior of slender bars of glulam wood of poplar 'Australian 129/60' and 'Stoneville 67' (*Populus deltoides*) of the Paraná River Delta subjected to compression stresses

Presentación: 6 y 7 de Octubre de 2020

Doctorando:

**Lia Caren Meyer**

Grupo de Investigación y Desarrollo de Estructura Civiles, Facultad Regional Venado Tuerto, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina.

[lmeyer@frvt.utn.edu.ar](mailto:lmeyer@frvt.utn.edu.ar)

Director:

**Gamaliel López Rodríguez**

Co-Director:

**María Alexandra Sosa Zitto**

## Resumen

El presente trabajo reporta la investigación del cálculo teórico de la tensión crítica según los criterios del reglamento INTI-CIRSOC (2016) y Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1 2005) a los efectos de evaluar el nivel de seguridad que proveen los procedimientos de cálculo, y de la primera etapa de ensayos destinada a determinar los módulos de elasticidad en piezas laminadas encoladas de madera *Populus deltoides*, cultivada en el delta del Río Paraná, Argentina. Para el diseño de elementos comprimidos, según las especificaciones del Reglamento Argentino de Estructuras de Madera INTI-CIRSOC 601 (2016) se calcula el factor de inestabilidad lateral del miembro comprimido ( $C_p$ ), la determinación de este factor está en función del módulo de elasticidad mínimo. El reglamento INTI-CIRSOC 601 (2016) también incorpora en sus suplementos valores de referencia para las vigas de madera laminada encolada del *Populus deltoides*. En este trabajo, se ha comparado el valor del módulo de elasticidad mínimo propuesto por este reglamento con el experimental, y se ha analizado su incidencia en la tensión crítica de compresión. Los resultados experimentales mostraron un módulo de elasticidad mínimo superior respecto del propuesto por el INTI-CIRSOC 601. Esta situación evidencia que los elementos comprimidos de una estructura quedan sobredimensionados si son calculados con éste reglamento.

**Palabras claves:** viga laminada encolada, compresión, álamo

## Abstract

This work reports the investigation of the theoretical calculation of critical stress according to the criteria of the INTI-CIRSOC (2016) and Eurocode 5 (EN 1995-1-1 2005) regulations for the purpose of evaluating the level of safety provided by the procedures of calculation, and the first stage of tests aimed at determining the modulus of elasticity in glulam wood pieces of *Populus deltoides*, cultivated in the delta of the Paraná River, Argentina. For the design of compressed elements, according to the specifications of the Argentine Regulation of Wooden Structures INTI-CIRSOC 601 (2016), the lateral instability factor of the compressed member ( $C_p$ ) is calculated, the determination of this factor is a function of the minimum modulus of elasticity. The INTI-CIRSOC 601 (2016) regulation also incorporates in its supplements reference values for the glulam wood beams of *Populus deltoides*. In this work, the value of the minimum

modulus of elasticity proposed by this regulation has been compared with the experimental, and its incidence on the critical compression stress has been analyzed. The experimental results showed a minimum modulus of elasticity higher than that proposed by INTI-CIRSOC 601. This situation shows that the compressed elements of a structure are oversized if they are calculated with this regulation.

**Keywords:** beam glulam; compression; poplar

## Introducción

En Argentina, la protección de bosques nativos ha incentivando el uso de madera provenientes de bosques implantados, actualmente en el país existe una alta disponibilidad de maderas cultivadas con especies de rápido crecimiento como pino, álamo y eucalipto.

El álamo es el tercer cultivo forestal más importante en el país, esta especie pertenece al género de *Populus sp.* de la familia de las salicáceas. Se estiman 83.370 hectáreas de superficie forestada con salicáceas por provincia, cerca del 77% de las forestaciones el delta bonaerense es de sauces y el 23% de álamo, (Borodowski et al., 2014). En los últimos años en sus avances genéticos destacan los clones 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67', generando mayor productividad, mejor calidad del producto y adaptación a áreas marginales de cultivo. Así mismo, la madera de álamo puede ser aplicada a diversos usos, tiene un descarte mínimo y es utilizada para la producción de madera laminada.

La poca trascendencia dada en las estructuras de madera se evidencia en que recién en el año 2016 se aprueba el primer Reglamento Argentino de Estructuras de Madera (INTI CIRSOC 601 2016). Esta normativa se redactó sobre la base de las normas americanas NDS (2005) y consolida el trabajo que en los últimos 20 años vienen realizando diversos grupos de investigación en la temática. Está versión del reglamento ha fomentado la construcción de estructura y obras civiles con madera en el país, resultando ser fundamental que el mercado ofrezca madera clasificada por clase resistente. Lo cual implica el interés de la industria por la fabricación de productos de madera para uso estructural como el caso de las vigas laminadas encoladas.

Las vigas de madera laminada encolada tienen como ventajas una mayor estabilidad dimensional y una gran optimización de recursos para su fabricación, con mayores escuadrías y longitudes que las maderas aserradas. En el año 2015, con la actualización de la normativa IRAM 9662-4 y 9660-1, 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.

El Reglamento Argentino de Estructura de Madera (INTI-CIRSOC 601, 2016) contempla el diseño de elementos estructurales sometidos a esfuerzos de compresión, evaluándolo a través de un factor de estabilidad lateral del miembro comprimido ( $C_p$ ), factor que depende de la tensión crítica de Euler  $F_{CE}$  y el módulo de elasticidad ajustado  $E'_{min}$ .

El objetivo de esta tesis doctoral es determinar el comportamiento resistente y elástico de barras esbeltas de madera laminada encolada de *Populus deltoides* 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67' cultivado en Argentina, sometidas a esfuerzos de compresión. El objetivo de este trabajo en particular es presentar los módulos de elasticidad mínimo de los valores obtenidos de los ensayos de 160 piezas para determinar las tensiones críticas de pandeo de las distintas esbelteces en el rango de 70 a 100. Y realizar un análisis comparativo con el valor del módulo de elasticidad mínimo publicado por el INTI-CIRSOC (2016)

## Materiales y método

Para el desarrollo de este trabajo se utilizó madera de álamo en los clones 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67' proveniente del delta del río Paraná. La madera fue acopiada en el Laboratorio GIDEC de la Facultad Regional Venado Tuerto. Se confeccionaron y cortaron las probetas a ensayar y posteriormente se ingresaron en la cámara con humedad y temperatura controlada para el acondicionamiento final.

En el programa experimental, en una primera etapa, se realizaron ensayos de flexión en el campo de las pequeñas deformaciones, destinados a determinar el módulo de elasticidad mínimo en las barras con esbeltez igual o superior a 70. Estas pruebas, realizadas sobre 160 probetas, se llevaron a cabo conforme a la norma IRAM 9663 (2013) flexionando las barras alrededor del eje de menor momento de inercia. La aplicación de las cargas fue suficiente para lograr las deformaciones que permitan determinar el módulo de elasticidad global, pero sin afectar a las propiedades mecánicas de la madera ni provocar su rotura. En la segunda etapa del programa experimental, se ensayarán a compresión centrada las 320 barras, con esbeltez comprendida entre  $30 \leq \lambda \leq 100$ . Estas pruebas, obtendrán datos referidos al comportamiento mecánico de las barras comprimidas de tamaño estructural. Con el propósito de comparar valores del 5-percentil de tensión crítica determinados a través de los lineamientos de diseño del Reglamento INTI-CIRSOC 601 (2016) y del Eurocódigo 5 (2006), se procedió a efectuar el cálculo de la tensión crítica en función de la esbeltez, permitiendo evaluar las diferencias entre ambas normativas antes mencionadas.

En la tercera etapa, se llevarán a cabo pruebas de compresión paralela a las fibras, conforme a la norma EN 408 (2012). Estas pruebas, también sobre 160 probetas, y proveerán información acerca del comportamiento mecánico en compresión sin deflexión lateral.

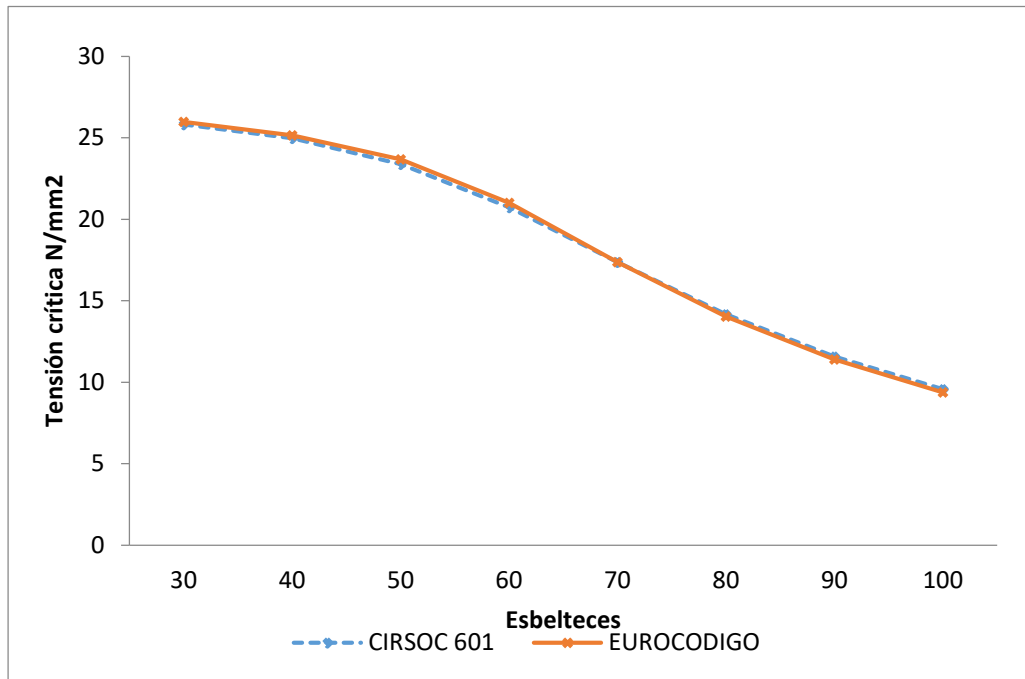
## Avances del desarrollo experimental

Para el cálculo teórico de las tensiones críticas según los criterios del reglamento INTI-CIRSOC (2016) y el Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1 2005) para barras esbeltas comprimidas en piezas de madera encolada de *Populus deltoides*, se emplearon las fórmulas del procedimiento de cálculo de los valores de  $C_p$ , factor de estabilidad lateral del miembro comprimido y los valores de  $K_c$  factor que tiene en cuenta la influencia de la esbeltez sobre la capacidad portante, para cada nivel de esbeltez ( $\lambda$ ), en el rango de 30 a 100, con intervalos de 10 en 10.

La configuración de las piezas se la considera biarticulada. El largo de las piezas varió según su esbeltez y se presentan en la TABLA 1. En consecuencia, los factores  $C_p$  y  $K_c$  ponderan la influencia de la esbeltez sobre la tensión crítica ( $F_c$ ) al ser multiplicados por la tensión de referencia ( $F_c^*$ ), poniendo en evidencia una diferencia despreciable entre los resultados obtenidos para  $F_{c;C601}$  y  $F_{c;EC5}$ , como muestra la FIGURA 1.

| $\lambda$ | Longitud (mm) |
|-----------|---------------|
| 30        | 520           |
| 40        | 693           |
| 50        | 866           |
| 60        | 1039          |
| 70        | 1212          |
| 80        | 1386          |
| 90        | 1559          |
| 100       | 1732          |

**TABLA 1:** Longitudes de las probetas a ensayar



**FIGURA 1:** Tensiones críticas calculados con los lineamientos del INTI-CIRSOC 601 (2016) y EUROCODIGO 5 (2005)

En la primera etapa del programa experimental se realizó el ensayo a flexión sobre un total de 160 probetas para las esbelteces 70, 80, 90 y 100 y de acuerdo a las prescripciones de la norma IRAM 9663 (2013), todas las muestras poseen una sección transversal de 60 mm x 90 mm y la longitud de probeta a ensayar, que debe ser mínimo 19 veces la altura de la sección, es igual a 1140 mm. Los valores experimentales obtenidos del módulo de elasticidad global para los clones 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67' son procesados estadísticamente y al no existir una diferencia estadística significativa en la muestra de los datos y que la norma IRAM 9662-4 (2015) especifica que las diferencias entre sus propiedades no son significativas y no hace ninguna distinción entre los clones, en consecuencia, en la TABLA 2, se presenta una síntesis de valores de módulo de elasticidad mínimo adoptados para ambos clones.

| Clon  | $\lambda$ | n   | Le<br>mm | $E_{min}$<br>N/mm <sup>2</sup> |
|-------|-----------|-----|----------|--------------------------------|
| 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';  $\lambda$ : Esbeltez; n: Cantidad de muestras;  
Le: Longitud efectiva;  $E_{min}$ : Módulo elasticidad mínimo

**TABLA 2:** Valores del módulo de elasticidad mínimo para ambos clones

Luego, para realizar un análisis comparativo de los módulos de elasticidad mínimos se procedió a obtener los valores de tensión crítica según el método de cálculo planteado por el reglamento INTI-CIRSOC (2016). Tomando como valor

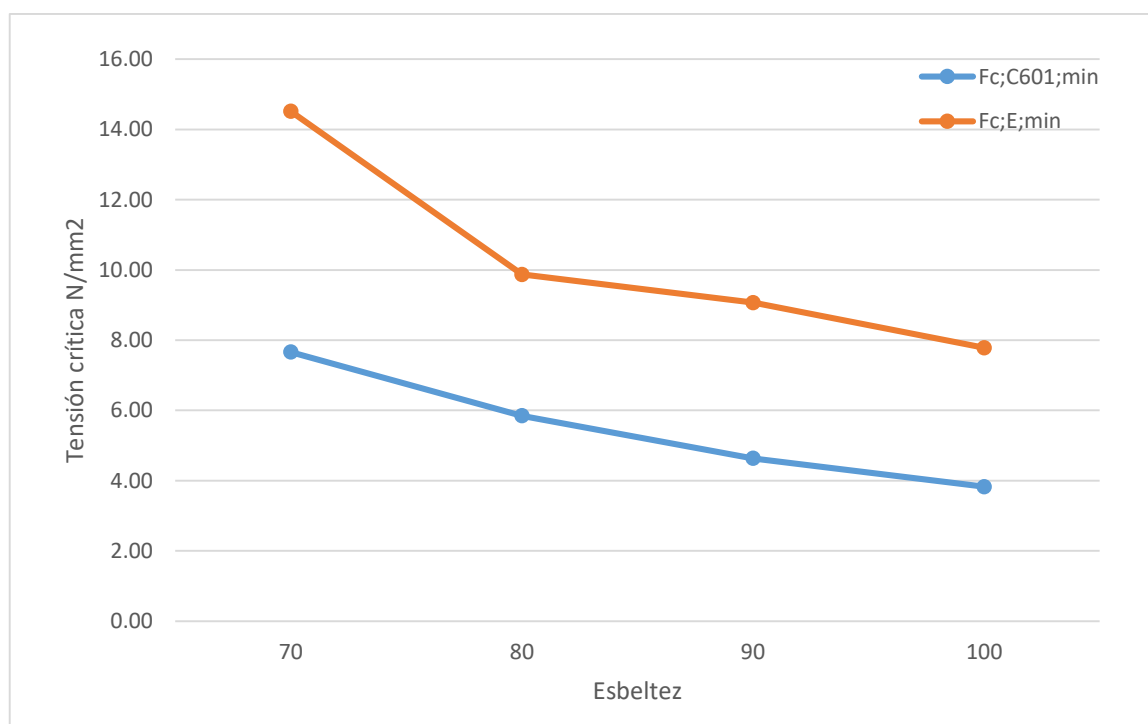
de referencia para madera laminada encolada de *Populus deltoides* de clase resistente 1, según la Tabla S.2.1.1-1 del INTI-CIRSOC 601 (2016), para el módulo de elasticidad mínimo  $E_{\min;C601} = 4000 \text{ N/mm}^2$  y los módulos de elasticidad mínimos obtenidos de los ensayos, los resultados se muestran en la TABLA 3.

| Clon  | Esbeltez | Le<br>mm | $F_c^*$<br>N/mm <sup>2</sup> | $C_p$<br>CIRSOC | $F_{c;C601;\min}$<br>N/mm <sup>2</sup> | $C_p$<br>EXPERIM | $F_{c;E;\min}$<br>N/mm <sup>2</sup> | Diferencia |
|-------|----------|----------|------------------------------|-----------------|--|------------------|-------------------------------------|------------|
| Ambos | 70       | 1212     | 20,16                        | 0,38            | 7,66                                   | 0,72             | 14,52                               | 1,89       |
|       | 80       | 1386     | 20,16                        | 0,29            | 5,85                                   | 0,49             | 9,87                                | 1,69       |
|       | 90       | 1559     | 20,16                        | 0,23            | 4,64                                   | 0,45             | 9,07                                | 1,96       |
|       | 100      | 1732     | 20,16                        | 0,19            | 3,83                                   | 0,39             | 7,78                                | 2,03       |

Ambos: 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67';  $\lambda$ : Esbeltez; Le: Longitud efectiva;  
 $C_p$ = Factor de estabilidad lateral del miembro comprimido;  
 $F_{c;C601;\min}$ : Tensión crítica con  $E_{\min}$  del INTI-CIRSOC;  $F_{c;E;\min}$ : Tensión crítica con  $E_{\min}$  experimental.

**TABLA 3:** Tensiones críticas mínimas y valores  $C_p$

En la FIGURA 2 se presentan los resultados obtenidos. Allí puede apreciarse que a medida que los módulos de elasticidad mínimo experimentales aumentan mayor es la incidencia en las tensiones críticas mínimas calculadas.



**FIGURA 2:** Tensiones críticas mínimas en N/mm<sup>2</sup> según INTI-CIRSOC (2016)

## Conclusiones

Los valores teóricos de tensiones críticas de pandeo respecto al reglamento INTI-CIRSOC (2016) y el EUROCODIGO 5 (EN 1995-1-1 2005), y sus métodos de cálculo dan valores similares y expresan un comportamiento análogo para barras esbeltas comprimidas de madera laminada encolada de *Populus deltoides*. Este análisis se explicita en el trabajo presentado en las Jornadas Investigadores Tecnológicos JIT 2019 Rosario.

El resultado obtenido del ensayo de flexión para ambos clones de *Populus deltoides* arroja un módulo de elasticidad mínimo de 7018 N/mm<sup>2</sup>, que resulta ser superior en un 75% respecto al módulo de elasticidad mínimo de 4000 N/mm<sup>2</sup> publicado por el INTI-CIRSOC 601 (2016).

Por lo tanto, las tensiones críticas mínimas determinadas conforme al criterio de diseño del INTI-CIRSOC 601 (2016) en función del módulo de elasticidad mínimo confirman la incidencia del  $E_{\min}$  experimental, generando un aumento del coeficiente de seguridad en elementos comprimidos.

Los resultados de la investigación del plan de tesis doctoral impactarán directamente en la confiabilidad que requiere el uso estructural de este material y complementarán de manera significativa el conocimiento existente para el diseño de estructuras de madera laminada encolada.

## Referencias

**Borodowski E.D., Signorelli A, Battistella A. (2014).** Salicáceas en el Delta del Paraná: situación actual y perspectivas. Actas Jornadas de Salicáceas 2014. Cuarto Congreso Internacional de las Salicáceas en Argentina.

**EN 408+A1 (2012)** Timber structures - Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties. European Committee for Standardization, Brussels

**Eurocódigo 5. EN 1995-1-1 (2005),** Proyecto de estructura de madera, Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación. CEN, Brussels.

**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, disponible en <https://www.inti.gov.ar/cirsoc/pdf/601/CIRSOC601-completo.pdf>.

**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.

**IRAM 9660-2 (2015)** Madera laminada encolada estructural, Parte 2: Métodos de ensayo. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires.

**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.

**IRAM 9663 (2013)** Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de las propiedades físicas y mecánicas. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires.

**NDS (2005)** National Design Specification for Wood Construction. American Forest & Paper Association, Washington. EE UU