

COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN DE PIEZAS ESBELTAS DE MADERA LAMINADA ENCOLADA DE ÁLAMO

Behavior to compression in slim pieces of glue-laminated poplar wood.

ANDREA D. TOSCO – LIA MEYER

UTN Facultad Regional Venado Tuerto

atosco@frvt.utn.edu.ar - lmeyer@frvt.utn.edu.ar

RESUMEN

Este trabajo se planteó bajo la problemática de la aplicabilidad de las fórmulas y las tensiones críticas admisibles propuestas por INTI-CIRSOC 601 (2016) y el coeficiente de seguridad que esto arroja para piezas esbeltas comprimidas. Se diseñó un programa de ensayo de 40 piezas de esbeltez 90, de madera laminada encolada estructural de *Populus deltoides* clones 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67', provenientes del delta del río Paraná. Mediante el ensayo de flexión, según prescripciones de la norma IRAM 9663 (2013), se determinaron los módulos de elasticidad (MOE) resultando el mínimo un 87% superior al que presenta el reglamento. Seguidamente, se procedió al ensayo de las piezas comprimidas, determinando una tensión de rotura mínima de 6,2 [N/mm²]. Se determinó la tensión crítica admisible a partir de las fórmulas establecidas en INTI-CIRSOC 601 (2016), con el MOE mínimo del suplemento resultando 2,5 [N/mm²] y con el MOE mínimo experimental resultando 4,2 [N/mm²]. Se verificó, para la tensión crítica admisible con los valores del MOE propuestos por reglamento un coeficiente de seguridad de 2,5 y para el MOE mínimo real obtenido de los ensayos 1,5, resultando este último inferior a las premisas de la normativa argentina que utiliza un coeficiente del orden de 2. Se plantea la necesidad de realizar una serie más amplia de ensayos para confirmar el módulo de elasticidad real que amerita ser usado en la reglamentación y para determinar el coeficiente de seguridad final mediante un análisis más exhaustivo de las fórmulas reglamentarias.

PALABRAS CLAVE: pandeo, compresión, madera laminada encolada, álamo

ABSTRACT

This work was raised under the problem of the applicability of the formulas and the admissible critical stresses proposed by INTI-CIRSOC 601 (2016) and the safety coefficient that this yields for slender compressed parts. A test program of 40 pieces of slenderness 90, of structural glued laminated wood of *Populus deltoides* clones 'Australian 129/60' and 'Stoneville 67', from the Paraná River delta, was designed. Through the bending test, according to the prescriptions of the IRAM 9663 (2013) standard, the modulus of elasticity (MOE) was determined, resulting in a minimum of 87% higher than that presented by the regulation. Next, the compressed pieces were tested, determining a minimum breaking stress of 6.2 [N/mm²]. The admissible critical stress was determined from the formulas established in INTI-CIRSOC 601 (2016), with the minimum MOE of the supplement resulting in 2.5 [N/mm²] and with the minimum experimental MOE resulting in 4.2 [N/mm²]. A safety coefficient of 2.5 was verified for the admissible critical stress with the MOE values proposed by regulation, and for the actual minimum MOE obtained from the tests, 1.5, resulting in the latter being lower than the premises of the Argentine regulations that use a coefficient of the order of 2. There is a need to carry out a broader series of tests to confirm the real elasticity modulus that deserves to be used in the regulation and to determine the final safety coefficient through a more exhaustive analysis of the regulatory formulas.

KEYWORDS: buckling, compression, glued laminated timber, poplar

1.- INTRODUCCIÓN

En países que han hecho de la madera un material con gran aplicación en la construcción, los productos laminados encolados estructurales son habitualmente utilizados y su producción se encuentra normada y controlada, lográndose en consecuencia un producto de calidad para materializar los proyectos arquitectónicos. Argentina dispone de la normativa IRAM 9660-1/2 (2013) y 9661 (2013) que establecen las clases de resistencia, los requisitos de fabricación y control, los métodos de ensayo y los requisitos de los empalmes por unión dentada, proponiendo los valores para cuatro especies cultivadas en el país (*Araucaria angustifolia*, *Eucalyptus grandis*, *Pinus taeda/elliottii* y *Populus deltoides*).

Cuando se trata de secciones esbeltas comprimidas, el diseño de estructuras requiere considerar la inestabilidad del equilibrio, dada la fuerte incidencia de este fenómeno en las cargas de rotura. En el reglamento INTI-CIRSOC 601 (2016) este comportamiento se evalúa a través de un factor de estabilidad lateral de la barra del miembro comprimido (C_p) que está en función del módulo de elasticidad (MOE) y la tensión crítica en compresión (F'_c).

Para la presente investigación, se analizaron piezas de madera laminada encolada estructural de *Populus deltoides* clones 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67', provenientes del delta del río Paraná, sometidas a compresión centrada. La IRAM 9662-4 (2013) presenta un método de clasificación visual para tablas de *Populus deltoides* con destino a la elaboración de vigas laminadas encoladas.

El objetivo del presente trabajo fue evaluar el comportamiento a compresión centrada en piezas esbeltas de la madera laminada encolada de álamo, determinar las tensiones críticas de compresión a partir del valor del MOE mínimo obtenido experimentalmente y compararlas con las que surgen de la aplicación del INTI-CIRSOC 601 (2016) utilizando el MOE mínimo informado en el suplemento del reglamento.

2.- MATERIALES Y MÉTODOS

2.1.- MATERIAL

Se utilizaron cuerpos de prueba de madera laminada encolada conformadas por tres tablas de 20 mm de alto y 90 mm de ancho de álamo (*Populus deltoides* clones 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67') provenientes del Delta del Río Paraná. Cada pieza estaba construida de acuerdo con las prescripciones de las IRAM 9660-1 (2013), 9661 (2013) y 9662-4 (2013). Se ensayaron 40 probetas, 20 pertenecientes a cada clon y con grado de resistencia 1. Sus principales características se encuentran en la Tabla 1.

λ	h [mm]	b [mm]	A [mm ²]	l [mm]
90	90	60	5400	1554

λ : Esbeltez; h: Altura de la sección transversal; b: Ancho de la sección transversal; A: área de la sección transversal; l: Longitud de la pieza

TABLA 1: Dimensiones de las probetas

2.2.- MÉTODOS

2.2.1.- ENSAYO A FLEXIÓN

Para determinar el módulo de elasticidad global se ensayaron las probetas a flexión, conforme las prescripciones de la IRAM 9663 (2013) y en el plano de menor inercia debido a que la inestabilidad del equilibrio se presenta sobre este eje.

Como había que preservar la probeta, el ensayo se realizó dentro del campo elástico. Se estimó la carga máxima de rotura en base a las tensiones publicadas por Guillaumet et al. (2019) y se solicitó a la pieza sin sobrepasar el 40% de esa carga. La carga de ensayo máxima fue de 3.000 N y se aplicó mediante una prensa hidráulica con válvula reguladora de caudal que permitió ajustar la velocidad de aplicación de la carga para que la fuerza máxima se alcance en un tiempo de 300 ± 120 seg. La medición de cargas se realizó con una celda de 50 KN de capacidad máxima con precisión de 10 N. Se registraron las deformaciones correspondientes a 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.

Las dimensiones de las piezas se indican en la Tabla 2.

Clon	n [u]	h [mm]	b [mm]	le _F [mm]
A	20	60	90	1080
S	20	60	90	1080

A: 'Australiano 129/60'; S: 'Stoneville 67'; n: número de piezas; h: Altura de la sección transversal;
b: Ancho de la sección transversal; le_F: Longitud efectiva para ensayo a flexión

TABLA 2: Elementos de pruebas a flexión

Con los valores obtenidos del ensayo a flexión, cargas y deformaciones, se calcula el módulo de elasticidad global según la Ecuación 1.

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

Donde:

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

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

l: Longitud de flexión entre apoyos, [mm].

b: Anchura de la sección, [mm].

h: Altura de la sección, [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, [N].

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

2.2.2.- ENSAYO A COMPRESIÓN

Se dispusieron las 40 probetas de 1554 [mm] de largo (le) y esbeltez ($\lambda =$ longitud efectiva / radio de giro) 90. Se ensayaron a compresión centrada con condición de apoyo biarticulada y perfectamente verticales. La carga se aplicó de forma continua mediante un dispositivo hidráulico de manera tal que la duración del ensayo fue de 300 ± 120 seg, determinando finalmente el valor de la carga máxima de rotura. Las cargas se midieron con un dispositivo de cuatro celdas combinadas de hasta 200KN de carga máxima.



IMÁGEN 1: Máquinas de ensayo y elementos de prueba a flexión y compresión centrada, laboratorio UTN FRVT

2.2.3.-TENSIONES CRITICAS SEGÚN INTI-CIRSOC 601(2016)

Para elementos comprimidos el Reglamento Argentino de Estructuras de Madera (INTI-CIRSOC 601, 2016), define que la tensión crítica ($F'_{c;C601}$) 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 .

$$F'_{c;C601} = F_c \cdot C_D \cdot C_M \cdot C_t \cdot C_P \quad (2)$$

Siendo:

F_c : Tensión crítica, 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:

$$C_P = \frac{1+(F_{cE}/F_c^*)}{2c} - \sqrt{\left[\frac{1+(F_{cE}/F_c^*)}{2c}\right]^2 - \frac{F_{cE}/F_c^*}{c}} \quad (3)$$

Siendo:

$$F_{cE} = \frac{0,822 \cdot E'_{min}}{\left(\frac{l_e}{d}\right)^2} \quad (4)$$

$$F_c^* = F_c \cdot C_D \cdot C_M \cdot C_t \quad (5)$$

Donde:

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

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 para el cálculo de la estabilidad ajustado por C_M y C_T [N/mm²].

El contenido de humedad se determinó según las normas ISO 13061-1 (2014) e ISO 13061-2 (2014), respectivamente, luego de finalizado el ensayo. Para ese fin se empleó un trozo obtenido en las proximidades de la zona de rotura, abarcando toda la sección transversal.

3.- RESULTADOS

3.1.- MÓDULO DE ELASTICIDAD EXPERIMENTAL

A partir de los resultados de los ensayos a flexión, se determinó el valor del MOE experimental, de acuerdo con lo descrito en el apartado 2.2.1.- y la ecuación (1). En la Tabla 3 se presenta el valor del módulo de elasticidad medio, el mínimo y el coeficiente de variación de la muestra obtenida. Se destaca la relativamente baja dispersión obtenida en los ensayos para determinar el módulo de elasticidad expresado en el coeficiente de variación (C.V.) del 12%.

	n	E_{med} [N/mm ²]	E_{min} [N/mm ²]	C.V [%]
EXPERIMENTAL	40	11.561	8.056	12

n: número de piezas; E_{med} : Módulo de elasticidad medio; E_{min} : Módulo de elasticidad mínimo;

NOTA: Los valores del módulo de elasticidad se ajustaron al contenido de humedad del 12% según IRAM 9663 (2013).

TABLA 3: Módulos de elasticidad experimentales

Con el objeto de comparar estos valores con los que propone el suplemento 2 del reglamento INTI-CIRSOC 601 (2016) y los publicados en Ramos et al (2014), se debió realizar una corrección en los resultados ya que los contenidos de humedad con los que han trabajado cada una de estas publicaciones son diferentes.

El reglamento INTI-CIRSOC 601 (2016) estipula que todos los valores de diseño de referencia y el módulo de elasticidad, especificados en el suplemento, están referidos a un contenido de humedad en servicio menor a 16% y en ningún caso sobrepasa un máximo de 19%. Por este motivo y tal como indica la IRAM 9664 (2011), corregimos los valores experimentales un 1% por cada variación del 1% del contenido de humedad, desde el 12% de ensayo al 19% del reglamento.

En la Tabla 4 se presentan los valores del módulo de elasticidad medio y mínimo que brinda el reglamento Tabla S.2.1.1-1. Suplemento 2 - INTI-CIRSOC 601 (2016) y los obtenidos experimentalmente en ensayos de flexión, para un contenido de humedad 19%.

MOE [N/mm ²]	CIRSOC 601 (2016)	RAMOS et al. (2014)	EXPERIMENTAL
E_{med}	9.400	9.852 (5%)	10.752 (15%)
E_{min}	4.000	8.312 (108%)	7.492 (87%)

E_{med} : Módulo de elasticidad medio; E_{min} : Módulo de elasticidad mínimo; (...): diferencia porcentual con el valor CIRSOC.

TABLA 4: Módulos de elasticidad corregidos

En los valores del módulo de elasticidad global medio ($E_{med;C601}$) no se aprecian grandes diferencias (menos del 15%) para los tres casos.

Para la obtención de las tensiones críticas de pandeo, el reglamento INTI-CIRSOC 601 (2016) solicita la utilización del módulo de elasticidad global mínimo (E_{min}), se observa que el valor obtenido experimentalmente ($E_{min;EXP}$) es un 87% mayor que aquel que brinda el reglamento ($E_{min;C601}$). Ramos *et al.* (2014), publicó un valor mínimo del MOE que alcanzó los 8.938 [N/mm²]

para una humedad del 12%, mientras que para 19% de humedad el valor alcanzó los 8.312 [N/mm²], resultando una diferencia del 108% con el que propone el reglamento CIRSOC.

3.2.- TENSIONES DE ROTURA EXPERIMENTALES

Se determinaron las tensiones experimentales de rotura como el cociente entre la carga máxima obtenida y la sección de la pieza, cuyos resultados se reflejan en la Tabla 4.

	F _{C; rot max} [N/mm ²]	F _{C; rot med} [N/mm ²]	F _{C; rot min} [N/mm ²]	F _{C; rot 0,05} [N/mm ²]	C.V. [%]
EXPERIMENTAL	14,3	10,2	6,2	7,3	18

F_{C; rot max}: Tensión crítica de rotura máxima; F_{C; rot med}: Tensión crítica de rotura media; F_{C; rot min}: Tensión crítica de rotura mínima; F_{C; rot 0,05}: Tensión crítica de rotura percentil 5%; C.V.: Coeficiente de variación.

TABLA 4: Tensiones de rotura experimentales

3.3.- TENSIONES CRÍTICAS PARA PANDEO ANALÍTICAS

Se procedió a la determinación analítica de tensiones críticas admisibles para pandeo siguiendo la normativa reglamentaria INTI-CIRSOC 601 (2016) y utilizando dos módulos de elasticidad mínimos, el otorgado en el suplemento (E_{min;C601}), y el obtenido experimentalmente (E_{min;EXP}). En la Tabla 5 se detallan los parámetros y en la Tabla 6 los resultados hallados.

Parámetros	Método 1: CIRSOC	Método 2: CIRSOC MOD.
E _{min} [N/mm ²]	4.000 (E _{min;C601}),	7.492 (E _{min;EXP})
C _D ; duración de carga 10min	1,6	1,6
C _M ; humedad menor a 16%	1	1
C _T ; temperatura menor a 40°C	1	1
C _P ; ecuación (3)	0,2	0,4
F _{CE} [N/mm ²] ecuación (4)	4,87	9,12
F _C [N/mm ²]	6,3	6,3

TABLA 5: Parámetros para obtener tensiones críticas

TENSIONES [N/mm ²]	CIRSOC	CIRSOC MOD.	EXPERIMENTAL
F _{C; rot}	-	-	6,2
F' _{C; adm}	2,5 (2,5)	4,2 (1,5)	-

F_{C; rot min}: Tensión crítica de rotura mínima; F'_{C; adm min}: Tensión crítica admisible mínima; (...): Coeficiente de seguridad

TABLA 6: Tensiones críticas analíticas y experimentales

En la determinación de la tensión crítica admisible con los valores de módulo de elasticidad propuestos por el suplemento del INTI-CIRSOC 601 (2016) se llega a una tensión crítica admisible de 2,5 [N/mm²], recordando que el resultado de tensión crítica de rotura mínima fue de 6,2 [N/mm²] y realizando el cociente entre ambas, se obtiene un coeficiente de seguridad 2,5. A partir de esta verificación, se confirma con cierta holgura el coeficiente de seguridad que aplica el reglamento frente a estos casos donde, para convertir valores de tensión de rotura en tensión admisible utiliza un coeficiente de seguridad del orden de 2. Esto ha sido demostrado en otras publicaciones, tal como Guillaumet et al. (2014)

En la determinación de la tensión admisible reemplazando en la fórmula del INTI-CIRSOC 601 (2016) el E_{min;CIRSOC} por el E_{min;EXP}, la tensión crítica de pandeo alcanzó el valor 4,2 [N/mm²] con un coeficiente de seguridad de 1,5.

4.- CONCLUSIONES

Se determinó, para las piezas laminadas encoladas de *Populus deltoides* clones 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67' cultivados en el Delta del Río Paraná, un módulo de elasticidad mínimo de 7.492 [N/mm²], que resulta superior en un 87% al propuesto en los suplementos del reglamento INTI-CIRSOC 601 (2016).

La tensión crítica admisible determinada de acuerdo con el reglamento INTI-CIRSOC 601 (2016) presentó un coeficiente de seguridad de 2,5 frente a la tensión de rotura mínima determinada experimentalmente. La utilización del módulo de elasticidad obtenido experimentalmente en las expresiones del reglamento condujo a una tensión crítica admisible que presentó un coeficiente de seguridad de 1,5 frente a tensiones de rotura determinadas experimentalmente. Este coeficiente de seguridad es inferior al que utiliza la norma para determinar tensiones admisibles.

Se debería analizar una serie más amplia de piezas con diferentes esbelteces a los efectos de confirmar el valor del módulo de elasticidad para esta combinación de especie-procedencia y el coeficiente de seguridad que resulta de la aplicación de las expresiones del reglamento INTI-CIRSOC 601 (2016).

5.- REFERENCIAS

Guillaumet et al. (2014). Especies provenientes de bosques implantados en argentina caracterizadas para uso estructural. XIV EBRAMEM - Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira 28-30/Abril, 2014, Natal, RN, Brasil.

Guillaumet, et al. (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.

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

IRAM 9660/1/2 (2013) Madera laminada encolada estructural, Parte 1: Clases de resistencia y requisitos de fabricación y control. Parte 2: Métodos de ensayo. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, Buenos Aires.

IRAM 9661 (2013) Requisitos de los empalmes por unión dentada. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, 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) 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

IRAM 9664 (2011), Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, Buenos Aires.

ISO 13061-1. 2014. Physical and mechanical properties of wood – Test methods for small clear wood specimens. Determination of moisture content for physical and mechanical tests. International Organization for Standardization

ISO 13061-2. 2014. Physical and mechanical properties of wood – Test methods for small clear wood specimens. Determination of density for physical and mechanical tests. International Organization for Standardization

RAMOS et al. (2014). Madera laminada encolada estructural de álamo. Determinación empírica de su comportamiento mecánico. XXXVI Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural. 19-21 /Noviembre,2014, Montevideo, Uruguay.