



Identificación del Trabajo	
Área:	Estructuras y construcciones civiles
Categoría:	Doctorando
Regional:	Venado Tuerto

DETERMINACIÓN DE TENSIONES CRÍTICAS PARA PIEZAS ESBELTAS DE MADERA LAMINADA ENCOLADA SOMETIDA A COMPRESIÓN

Lía MEYER

G.I.D.E.C. (Laprida N° 651, Venado Tuerto), Facultad Regional Venado Tuerto, UTN

E-mail de contacto: lmeyer@frvt.utn.edu.ar

Este trabajo ha sido realizado bajo la dirección del Dr. Arq. Gamaliel López Rodríguez y la Dra. Inga. María Alexandra Sosa Zitto, en el marco del plan de tesis doctoral "Comportamiento mecánico de barras esbeltas de madera laminada encolada de álamo "Australiano129/60" y "Stoneville 67" (Populus deltoides) del delta del río Paraná sometidas a esfuerzos de compresión". (Año de inicio 2018 – Finalización 2022)

Resumen

En Argentina existe poca tradición en el uso de la madera, limitada a la utilización de tirantería de especies nativas o estructuras reticuladas. En el año 2016 con la aprobación del primer Reglamento Argentino de Estructuras de Madera, se da un impulso importante al poner a disposición de los profesionales una normativa con criterios de diseño para estas estructuras. En este trabajo se desarrolló el cálculo teórico de la tensión crítica según los criterios del reglamento INTI-CIRSOC (2016) y Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1 2005) para barras esbeltas comprimidas en piezas de madera encolada de *Populus deltoides* a los efectos de evaluar las diferencias entre ambos y establecer las bases para un posterior desarrollo experimental. En las tensiones críticas que se determinaron según los criterios de las normativas ya mencionadas, se encontraron diferencias del 1% en el rango de esbelteces de $\lambda < 60$ y un 2% para las esbelteces de $\lambda > 60$.

Palabras Claves: pandeo pieza laminada; compresión; álamo;

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Consideraciones generales

En Argentina se privilegió históricamente la construcción de estructuras de hormigón y en menor medida las de acero. El uso de la madera se limitó a la utilización de tirantería de madera nativa o estructuras reticuladas. La poca trascendencia dada a 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 2016a). 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. Esta versión del reglamento propone la determinación de la seguridad en las estructuras de madera en base a tensiones admisibles, quedando para una posterior edición la versión en estados últimos. El reglamento está compuesto de un cuerpo normativo principal con 9 capítulos y un suplemento con los valores de tensiones



Identificación del Trabajo	
Área:	Estructuras y construcciones civiles
Categoría:	Doctorando
Regional:	Venado Tuerto

admisibles para las combinaciones especie/ procedencia estudiadas. Como complemento se presentan un “Manual de aplicación de los criterios de diseño adoptados por el reglamento argentino de estructuras de madera (INTI-CIRSOC 2016b) y una “Guía para el proyecto de estructuras de bajo compromiso estructural (INTI-CIRSOC 2018).

La confección de los suplementos del reglamento puso en evidencia la falta de estudios para la determinación del comportamiento mecánico de la madera proveniente de especies de rápido crecimiento en Argentina. A la fecha solo se incluyen valores de tensiones de referencia para la *Araucaria angustifolia* de Misiones, el *Eucalyptus grandis* de Entre Ríos, el *Pinus Taeda - Elliottii* de Misiones y Corrientes y el *Populus deltoides* del delta del río Paraná. A esta falta de información sobre el comportamiento de la madera se suma la falta de trabajos que verifiquen la aplicabilidad de los criterios de diseño del reglamento INTI CIRSOC 601 (2016a), extraídos de la norma americana NDS (2005), a las maderas argentinas.

En Europa, con mayor tradición en la construcción con madera, poseen desde hace muchos años un reglamento para la construcción con madera: Eurocódigo 5: Proyecto de estructuras de madera, que se actualiza sistemáticamente, siendo la última versión en el año 2016.

En la problemática del diseño de estructuras, la inestabilidad del equilibrio de piezas esbeltas comprimidas, constituye un apartado especial que ha merecido numerosos estudios a nivel internacional. 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. Los estudios conducen a fórmulas complejas para evaluar el comportamiento de estos elementos. En el caso del reglamento INTI-CIRSOC 601 (2016a) este comportamiento se evalúa a través de un factor de estabilidad lateral de la barra del miembro comprimido (C_P).

La madera es un material natural, compuesto fundamentalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, con una conformación heterogénea y anisótropa. Esta particularidad obliga a estudiar las propiedades en las distintas direcciones, resultando la forma más sencilla considerarla como un material ortotrópico, en donde se distinguen tres direcciones principales: la longitudinal, la radial y la tangencial. El comportamiento mecánico de la madera también está muy influenciado por la presencia de singularidades y defectos tales como los nudos, médula, inclinación de las fibras, dimensión de los anillos de crecimiento entre otros (Coronel 1994, Hoffmeyer 1995).

La utilización de elementos laminados encolados sumó a la problemática del conocimiento de las propiedades de la madera, la necesidad de un proceso de fabricación que asegure la buena prestación. En Argentina las normas IRAM 9660/1/2 y 9661 del año 2015 establecen las pautas de fabricación y control para estos elementos estructurales.

El grupo de investigación GIDEC ha desarrollado numerosos estudios relacionados con el comportamiento en flexión del *Populus deltoides* del delta del río Paraná (Guillaumet *et al.* 2018; Guillaumet *et al.* 2017; Guillaumet *et al.* 2016; Filippetti *et al.* 2015, Guillaumet *et al.* 2014a) pero ninguno en relación al comportamiento de este material en piezas esbeltas solicitadas a compresión centrada. Torrán *et al.* (2012) realizó una publicación para piezas esbeltas de *Eucalyptus grandis* sometido a compresión. En el plano internacional existen diversos trabajos relacionados al comportamiento de piezas esbeltas (Blaß H.J. 1986, 1987, 1988, 1995; Leicester 1986; Bouchanan *et al.* 1985; Huang *et al.* 1989; Larsen 1975).



Identificación del Trabajo	
Área:	Estructuras y construcciones civiles
Categoría:	Doctorando
Regional:	Venado Tuerto

En este trabajo se desarrolla de manera teórica el cálculo de la tensión crítica de pandeo según los criterios del reglamento INTI-CIRSOC 2016a y el Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1 2005) para barras esbeltas comprimidas en piezas de madera encolada de *Populus deltoides*. El objetivo es evaluar las diferencias entre ambos y establecer las bases para un desarrollo experimental, que permita verificar a través de ensayos de laboratorio, los resultados obtenidos.

2. METODOLOGIA

Se determinaron los valores para las piezas cuyas dimensiones se indican en la TABLA I.

TABLA I: Valores para las dimensiones de piezas

λ	a mm	b mm	Longitud mm
30	100	75	649
40	100	75	866
50	100	75	1082
60	100	75	1299
70	100	75	1515
80	100	75	1732
90	100	75	1948
100	100	75	2165

Se utiliza una sección nominal con dimensiones de 100 mm x 75 mm, y está conformada por tres tablas laminadas de espesor de 1", pegadas con adhesivo (Según norma IRAM 9660). La configuración de las piezas se la considera como biarticulada.

Se obtendrá los valores de C_p y K_c para cada nivel de esbeltez (λ), en el rango de 30 a 100, con saltos de 10 en 10.

Como tensión básica de diseño de referencia se utilizará la tensión de rotura publicada por Guillaumet *et al.* 2017 en lugar de la tensión admisible propuesta por el INTI-CIRSOC 601 (2016a), siendo su valor de $F_c^* = 26,6 \text{ N/mm}^2$.

Considerando que los lineamientos de diseño de ambas normativas, que presentan formatos distintos y con el fin de obtener valores de cálculos comparables se adoptan los mismos valores para F_c^* y F_{cE} para ambos métodos.

2.1 Reglamento INTI-CIRSOC (2016)

El Reglamento argentino INTI-CIRSOC 601 (2016a) plantea que el valor de la tensión crítica ($f_{c;C601}$) se obtiene multiplicando la tensión de diseño de referencia (F_c^*) por el factor de estabilidad lateral de la barra del miembro comprimido (C_p),

$$F_{c;C601} = F_c^* \cdot C_p \quad (1)$$

siendo:



Identificación del Trabajo	
Área:	Estructuras y construcciones civiles
Categoría:	Doctorando
Regional:	Venado Tuerto

F_c^* : Tensión de diseño en compresión paralela a las fibras de referencia, multiplicadas por todos los factores de ajustes aplicables C_D , C_M , C_t , excepto C_p

$$F_c^* = 26,6 \text{ (N/mm}^2\text{)} \times C_D \times C_M \times C_t$$

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

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

$$F_{cE} = \frac{0,822 E_{0,05}}{\left(\frac{l_e}{d}\right)^2} \quad (3)$$

F_{cE} : la tensión crítica en periodo elástico ideal, expresada en 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; expresada en mm.

d : ancho de la sección transversal en la dirección perpendicular al eje baricentrico donde se produce; expresada en mm.

C : coeficiente que depende para madera aserrada, miembros estructurales sección circular y madera lamada encolada estructural; unidad adimensional.

$E_{0,05}$: módulo de elasticidad para el cálculo de deformaciones en situaciones de diseño críticas, de referencia. Valor que se obtendrá de los ensayos de flexión realizados con anterioridad a los valores de compresión. Adoptado del trabajo de investigación Guillaumet *et al.* 2014b.

2.2 Eurocódigo 5 (2005)

El Eurocódigo 5 (2005), para piezas de madera laminada encolada, establece el valor de la tensión crítica ($F_{c,EC5}$) que se calcula multiplicando la tensión de referencia (F_c^*) por un factor que tiene en cuenta la influencia de la esbeltez sobre la capacidad portante (k_c):

$$F_{c,EC5} = F_c^* \cdot k_c \quad (4)$$

siendo:

$F_c^* = f_{c,0,k}$ = valor de cálculo de la resistencia a compresión paralela a la fibra;

Para obtener K_c , se determina con las siguientes ecuaciones:



Identificación del Trabajo	
Área:	Estructuras y construcciones civiles
Categoría:	Doctorando
Regional:	Venado Tuerto

$$\lambda_{rel} = \sqrt{\frac{F_c^*}{F_{cE}}} \quad (5)$$

$$k_c = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel}^2}} \quad (6)$$

$$k = 0,5 [1 + \beta_c(\lambda_{rel} - 0,3) + \lambda_{rel}^2] \quad (7)$$

siendo:

k : coeficiente de minoración, adimensional;

β_c : factor para piezas que cumplen los límites de rectitud para madera maciza, dependiendo de madera laminada encolada o microlaminada; adimensional;

λ_{rel} : esbelteces relativas según las propiedades mecánicas correspondientes a la flexión respecto al eje "y";

F_{cE} : a la tensión crítica de pandeo; en N/mm²;

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 INTI-CIRSOC

Se adoptan los valores para distintos factores que intervienen en las ecuaciones (2) y (3) y se resuelven a continuación:

$$F_{cE} = \frac{0,822 E_{0,05}}{\left(\frac{l_e}{d}\right)^2}; \text{ en N/mm}^2;$$

$$l_e = \sqrt{\frac{I}{A}} \times \lambda, \text{ en mm};$$

$d = 75 \text{ mm};$

$C = 0,9$ para madera laminada encolada estructural;

$E_{0,05} = 6560 \text{ N/mm}^2$; Adoptado del trabajo de investigación Guillaumet *et al.* 2014b.

$$F_c^* = 26,6 (\text{N/mm}^2) \times C_D \times C_M \times C_t;$$

$C_D = 1$; Para una duración de carga de 10 años.

$C_M = 1$; Condición de servicio referido al contenido de humedad en estado seco.



Identificación del Trabajo	
Área:	Estructuras y construcciones civiles
Categoría:	Doctorando
Regional:	Venado Tuerto

$C_t = 1$; Factor de temperatura para miembros estructurales expuestos a temperaturas menores o iguales a 40 °C,

$$F_c^* = 26,6 \text{ N/mm}^2.$$

En la TABLA II, se expresan los valores obtenidos para el factor de estabilidad lateral del miembro comprimido (C_p), en los rangos de esbelteces de 30 a 100, con saltos de 10 en 10;

TABLA II: Valores de C_p

λ	l_e mm	F_{cE} N/mm ²	C_p
30	649,5	71,9	0,949
40	866,0	40,4	0,879
50	1082,5	25,9	0,749
60	1299,0	18,0	0,591
70	1515,5	13,2	0,458
80	1732,1	10,1	0,360
90	1948,6	8,0	0,289
100	2165,1	6,5	0,236

λ : Esbelteces; l_e : Longitud efectiva; F_{cE} : Tensión crítica de pandeo;
 C_p : Factor de estabilidad lateral del miembro comprimido CIRSOC

3.2 EUROCÓDIGO 5

Los valores que se adoptan para poder resolver las ecuaciones (5), (6) y (7), son los siguientes:

$$\beta_c: 0,1 \text{ para madera laminada encolada.}$$

$$F_c^*: 26,6 \text{ N/mm}^2.$$

$$l_e = \sqrt{\frac{I}{A}} \times \lambda, \text{ en mm}$$

$$F_{cE} = \frac{0,822 E_{0,05}}{\left(\frac{l_e}{d}\right)^2}; \text{ en N/mm}^2.$$

En la TABLA III, se muestran los valores adimensionales de K_c obtenidos según el EUROCODIGO 5.



Identificación del Trabajo	
Área:	Estructuras y construcciones civiles
Categoría:	Doctorando
Regional:	Venado Tuerto

TABLA III: Valores de K_c

λ	Le mm	F _{cE} N/mm ²	λ_{rel}	k	K_c
30	649,5	71,9	0,6	0,7	0,955
40	866,0	40,4	0,8	0,9	0,890
50	1082,5	25,9	1,0	1,0	0,757
60	1299,0	18,0	1,2	1,3	0,588
70	1515,5	13,2	1,4	1,6	0,451
80	1732,1	10,1	1,6	1,9	0,353
90	1948,6	8,0	1,8	2,2	0,282
100	2165,1	6,5	2,0	2,6	0,231

λ : Esbelteces; l_e : Longitud efectiva; λ_{rel} : Esbeltez relativa; k : Coeficiente de minoración; K_c : Factor de la capacidad portante EUROCODIGO 5

En la Tabla IV, puede observarse la similitud existente entre los valores de C_p y K_c para cada nivel de λ . En consecuencia, y como estos factores introducen la influencia de la esbeltez sobre la tensión crítica (F_c) al ser multiplicados por la tensión de referencia (F_c*), puede apreciarse también una diferencia despreciable entre los resultados obtenidos para F_{c;C601} y F_{c;EC5}.

TABLA IV: Tensiones críticas según normativa INTI-CIRSOC y EUROCODIGO 5

		λ							
		30	40	50	60	70	80	90	100
C_p		0,949	0,879	0,749	0,591	0,458	0,360	0,289	0,236
K_c		0,955	0,890	0,757	0,588	0,451	0,353	0,282	0,231
F _c *	N/mm ²	26,6	26,6	26,6	26,6	26,6	26,6	26,6	26,6
F _{c; C601}	N/mm ²	25,2	23,4	19,9	15,7	12,2	9,6	7,7	6,3
F _{c; EC5}	N/mm ²	25,4	23,7	20,1	15,6	12,0	9,4	7,5	6,1
F _{c;C601} / F _{c;EC5}		0,994	0,988	0,990	1,005	1,015	1,020	1,022	1,023

λ : Esbelteces; C_p : Factor de estabilidad lateral del miembro comprimido; K_c : Factor de influencia de esbeltez sobre la capacidad portante; **F_{c;C601}**: Tensión crítica según CIRSOC 601; **F_{c; EC5}**: Tensión crítica según EUROCODIGO 5

La FIGURA 1 muestra la relación entre los resultados calculados según el procedimiento de diseño para ambas normativas ya citadas, en donde se exhiben en forma conjunta las tensiones críticas F_{c;C601} y F_{c;EC5} en función de las esbelteces λ .

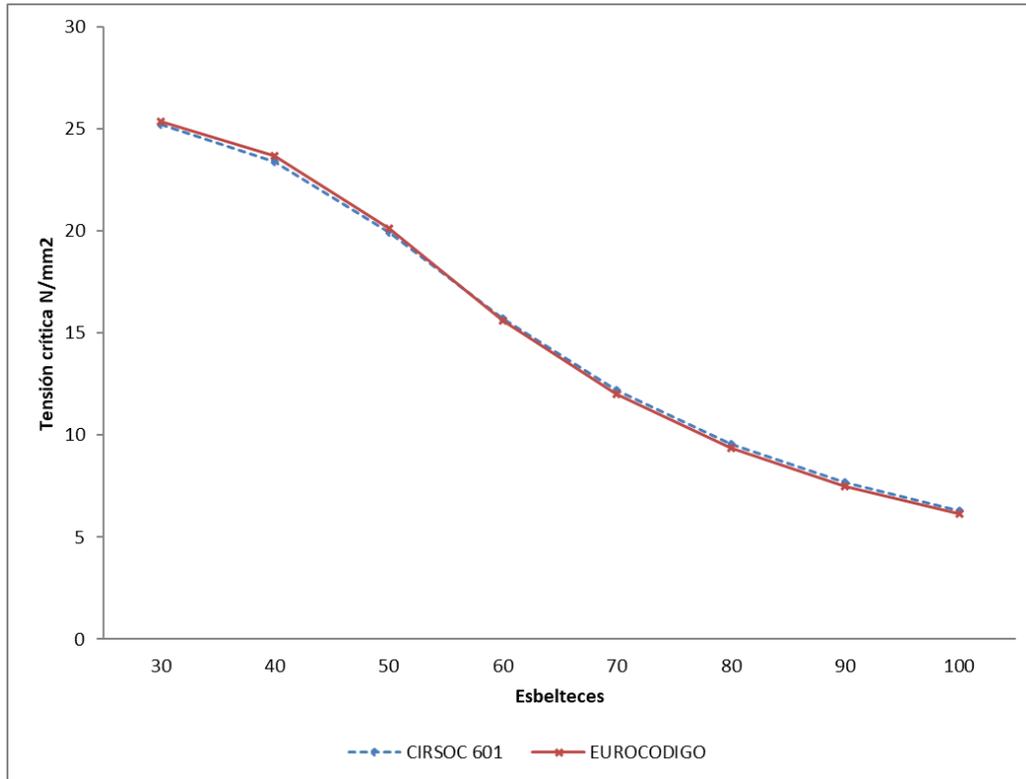


FIGURA 1: Tensiones críticas del INTI-CIRSOC 601 (2016) y EUROCODIGO 5 (2005)

4. CONCLUSIONES

El EUROCÓDIGO 5 (2005) muestra valores de tensiones críticas de pandeo respecto a las determinadas según INTI-CIRSOC (2016a) del orden del 1% mayores para el rango de esbelteces entre $\lambda=30$ y $\lambda=60$ y del orden del 2% menores para esbelteces entre $\lambda>60$ y $\lambda=100$.

Los resultados obtenidos por ambos métodos de cálculo dan valores similares y expresan un comportamiento análogo para barras esbeltas comprimidas de madera laminada encolada de *Populus deltoides*.

Resulta de interés la comprobación experimental del comportamiento estructural en piezas comprimidas para verificar la exactitud de criterios de ambas normativas para piezas laminadas encoladas de *Populus deltoides*.



Identificación del Trabajo	
Área:	Estructuras y construcciones civiles
Categoría:	Doctorando
Regional:	Venado Tuerto

BIBLIOGRAFIA

- Blaß H.J. (1986)** Strength model for glulam columns. Paper 19-12-2. Proceedings of the meeting CIB W18/IUFRO S 5.02. Florence. Italy.
- Blaß H.J. (1987)** Designs of Timber Columns. Paper 20-2-2. Proceedings of the meeting CIB W18/IUFRO S 5.02. Dublin, Ireland.
- Blaß H.J. (1988)** The Influence of Creep and Duration of Load on The Design of Timber Columns. Proceedings of the 1988 Int. Conf.on Timber Eng. Seattle, USA.
- Blaß H.J. (1995)** Columns. In Timber Engineering STEP 1, pp. B6/1-B6/8. Centrum Hout, The Netherlands.
- Buchanan A. H., Johns K. C. Madsen B. (1985)** Colum Design Methods For Timber Engineering, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 12, 1985, pp. 731-744.
- Coronel E. O. (1994)** Fundamentos de las propiedades físicas y mecánicas de las Maderas.1º parte, Fundamentos de las propiedades físicas de las maderas. Instituto de Tecnología de la Madera, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Santiago del Estero.
- Eurocódigo 5. EN 1995-1-1 (2005)**, Proyecto de estructura de madera, Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación. CEN, Brussels.
- Filippetti, M.C.; Guillaumet, A.A.; Manavella, R.D.; Guillaumet, M.P. (2015)**. Uso estructural de la madera de álamo. II Congreso Brasileiro de Ciencia y Tecnología de Madera. Belo Horizonte, Brasil.
- Guillaumet, A.A.; Filippetti, M.C.; Acuña Rello, L.; Piter, J.C. (2014a)**. Utilización de la madera de álamo en elementos estructurales. XXXVI Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural. Montevideo, Uruguay.
- Guillaumet A.; Acuña Rello L.; Piter J.(2014b)** Evaluación del rendimiento de las tablas de *Populus deltoides* `Australiano 129/60´ y `Stoneville 67´ para la fabricación de vigas laminadas encoladas Jornadas de Salicáceas 2014. IV Congreso Internacional de Salicáceas en Argentina. Buenos Aires.
- Guillaumet; Manavella; Acuña; Piter. (2016)** Propiedades mecánicas en flexión de la madera aserrada de *Populus deltoides* `Stoneville 67`. Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural. Asunción, Paraguay.
- Guillaumet, AA; Filippetti, MC; Manavella, RD; Acuña Rello, L; Piter, JC (2017)** Propiedades resistentes en compresión paralela de la Madera *Populus deltoides* cultivado en el delta del rio Paraná. CLEM + CIMAD. Junín. Buenos Aires. Argentina
- 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.
- Hoffmeyer, P. (1995)**. Wood as a building material. Timber engineering STEP 1, Lecture B2. First edition. Centrum Hout. The Netherlands. P 43-63.
- Huang, S.Y., Yu, P.M., Hong, J.Y. (1989)** Buckling and reliability checking of timber columns. Proceedings of the second Pacific Timber Engineering Conference. University of Auckland. Auckland. New Zealand. p. 241-244.
- INTI CIRSOC (2016a)**. 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.gob.ar/cirsoc/pdf/601/CIRSOC601-completo.pdf>.



Identificación del Trabajo	
Área:	Estructuras y construcciones civiles
Categoría:	Doctorando
Regional:	Venado Tuerto

IRAM 9660/1 (2006) 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 (2006) Madera laminada encolada estructural, Parte 2: Métodos de ensayo. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires.

IRAM 9661 (2006) Madera laminada encolada estructural. Requisitos de los empalmes por unión dentada. 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.

Larsen H. J. (1975) Test with centrally loaded timber Columns. Paper 4-2-1, CIB W18, Paris Francia.

Leicester R. H. (1986) Creep Buckling Strength of Timber Beams and Columns. Paper 19-2-1, CIB W18, Florence, Italy.

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

Torrán, Eduardo; Faure, Omar; Piter, J. Carlos (2012) La seguridad de las barras de madera laminada encolada sometidas a compresión centrada. Análisis del criterio de diseño del proyecto CIRSOC 601 y de los resultados de un programa empírico con barras en tamaño estructural. Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural. Buenos Aires