

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

Ing. Torrán, Eduardo Antonio; Dr. Faure, Omar Roberto; Dr. Ing. Piter, Juan Carlos
Grupo de Estudio de Maderas (GEMA), Facultad Regional Concepción del Uruguay,
Universidad Tecnológica Nacional
Email: etorran@yahoo.com.ar

RESUMEN

La madera laminada encolada de *Eucalyptus grandis* está contemplada en la norma IRAM 9660-1 (2006) que establece clases de resistencia y requisitos de fabricación y control para este material en el país. Esta norma provee también los valores característicos de las propiedades mecánicas para las distintas clases resistentes. El Proyecto CIRSOC 601 incorporó valores de diseño de referencia para este material, los cuales fueron derivados tomando como base el soporte estadístico empleado en la norma IRAM antes mencionada, y provee un procedimiento para calcular las barras sometidas a compresión centrada. Con el propósito de verificar el nivel de seguridad que provee este procedimiento de cálculo, se diseñó un programa de ensayos sobre 240 barras de madera laminada encolada de *Eucalyptus grandis* en tamaño estructural, provistas por una empresa que cumple los requisitos de fabricación y control de la norma IRAM 9660-1 (2006) y con un rango de esbelteces comprendido entre 30 y 100, en el cual la influencia de las propiedades del material sobre el comportamiento mecánico adquiere gran importancia. Los resultados muestran que el procedimiento de diseño del Proyecto CIRSOC 601 provee un nivel de seguridad adecuado, el cual es similar al obtenido aplicando el criterio del Eurocódigo 5.

ABSTRACT

A strength class system as well as production and quality control requirements for the fabrication of glued laminated timber are established in the Argentinean standard IRAM 9660-1 (2006). This standard also provides characteristic values for the mechanical properties corresponding to the strength classes. The CIRSOC 601 (draft) gives reference design values for this material, which are supported by the statistical base provided by the standard mentioned above, and also establishes a procedure for designing members subjected to axial compression. With the aim of checking the suitability of this procedure for the design of glulam members built-up with boards of Argentinean Eucalyptus grandis, an empirical research project was design. This project enclosed 240 columns in structural sizes with slenderness ranging from 30 to 100, which were manufactured by following the requirements of IRAM 9660-1 (2006). The empirical results showed that the design criteria adopted by CIRSOC 601 (draft) and by the Eurocode 5 (2005) adequately fulfill the safety requirements.

INTRODUCCION

Las forestaciones con el género eucalyptus son las más importantes en la provincia de Entre Ríos, representando un 90% del área provincial forestada. Dentro de este género, la especie principal es el *Eucalyptus grandis*, que a su vez encuentra en la Mesopotamia Argentina su núcleo de mayor producción en el país (INTA 1995) ^[1].

Las estructuras de madera en Argentina han tenido un desarrollo limitado a construcciones temporarias o de pequeña magnitud en comparación con las realizadas con otros materiales. Dentro de las causas de esta situación se puede citar el escaso o nulo conocimiento de las características de las maderas disponibles, y la ausencia de un adecuado marco normativo.

La madera laminada encolada estructural es una alternativa industrial para obtener escuadrías importantes con maderas jóvenes provenientes de forestaciones. Este material permite lograr además de formas diferentes, alternativas durables de uso para diferentes condiciones de exposición al ambiente. Como todo proceso industrial, la construcción de la madera laminada estructural posee una serie de requerimientos sobre los materiales y los procesos involucrados en su fabricación. Estos fueron desarrollados en nuestro país en el período comprendido entre los años 2000 y 2006 (Piter 2005) ^[2], y se encuentran plasmados en las normas IRAM 9660-1 ^[3], 9660-2 ^[4], 9661 ^[5], 9662-1 ^[6], 9662-2 ^[7] y 9662-3 ^[8], todas puestas en vigor en setiembre de 2006. Este marco normativo establece clases de resistencia así como requisitos de fabricación y control. Además provee los valores característicos de las propiedades mecánicas para las distintas clases resistentes.

Actualmente ha finalizado el proceso de discusión pública del Proyecto de Reglamento Argentino de Estructuras de Madera CIRSOC 601 (2011) ^[9], lo que complementa un marco regulatorio y legal que brinda a los proyectistas un respaldo técnico y legal inexistente hasta la fecha. Este proyecto adopta, en su primera etapa, procedimientos de diseño por tensiones admisibles, basados en el National Design Specification (NDS 2005) ^[10] de Estados Unidos. En particular, aporta ecuaciones para calcular la capacidad portante de barras esbeltas sometidas a compresión centrada, objeto del presente trabajo.

Las propiedades mecánicas de la madera deben ser analizadas considerando indisolublemente la especie, o grupo de especies, y la zona de cultivo. En consecuencia, resulta indispensable comprobar experimentalmente si el criterio de diseño del Proyecto CIRSOC 601 (2011) ^[9] es adecuado para expresar el comportamiento estructural de barras comprimidas de madera laminada encolada de *E. grandis* cultivado en la Mesopotamia.

El objetivo de este trabajo es presentar y discutir los resultados parciales obtenidos en un proyecto de investigación orientado a determinar experimentalmente la capacidad portante de barras de madera laminada encolada construidas con tablas de *E. grandis* cultivado en la Mesopotamia. El rango de esbelteces previsto en el proyecto se extiende desde 30 a 100, pero en la primera etapa de avance se han obtenido resultados en el rango comprendido entre 30 y 80. Adicionalmente, los resultados empíricos son comparados con el criterio de diseño del Proyecto CIRSOC 601 (2001) ^[9] y del Eurocódigo 5 (2005) ^[11].

MATERIALES Y METODOS

Las tablas para la confección de las barras de madera laminada encolada destinadas a los ensayos fueron obtenidas de una forestación ubicada en la zona de Ubajay, provincia de Entre Ríos. El material fue especialmente identificado y acondicionado en el aserradero para mantener su trazabilidad. Luego del proceso de secado técnico, fue enviado al laboratorio de la Facultad Regional Concepción del Uruguay de la UTN.

Posteriormente, las tablas fueron trasladadas a una fábrica de madera laminada encolada estructural, que cumple las exigencias de producción y control establecidos en la norma IRAM 9660-1 (2006) [3]. Durante el proceso de fabricación fueron relevados todos los defectos y singularidades de la madera, de manera de que posteriormente se puedan realizar estudios de correlación entre esos parámetros y las propiedades mecánicas.

Las piezas laminadas encoladas originales se construyeron superponiendo y pegando tres laminas, alcanzando, luego de terminadas y cepilladas, una sección transversal de 60 mm x 90 mm y una longitud de 12000 mm (ver Figura 1). Con posterioridad se realizó una primera reducción del tamaño de las piezas originales para facilitar el transporte, la que consistió en el corte transversal de las mismas en dos partes, obteniéndose en consecuencia dos barras de 6000 mm de longitud a partir de cada pieza original. El material así producido fue trasladado nuevamente al laboratorio, donde se acondicionó en una cámara de climatización a 20°C de temperatura y 65% de humedad relativa ambiente conforme los requisitos internacionales.

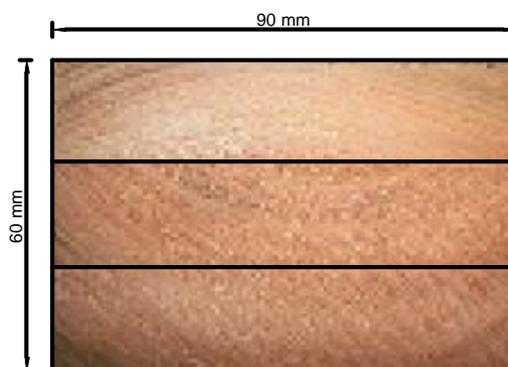


Figura 1 Características de la sección transversal de las barras

Las barras destinadas a los ensayos de compresión se cortaron de acuerdo a un programa previamente establecido conforme al rango de esbeltez previsto. Se produjo un total de 240 barras discriminadas de la siguiente manera: 30 unidades de cada uno de los siguientes niveles de esbeltez: 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 y 100. El rango seleccionado es aquel en el cual mayor influencia ejercen las particularidades de cada especie sobre el comportamiento estructural, ya que por debajo del mismo la capacidad portante es definida por la resistencia a la compresión paralela a las fibras del material y por encima del mismo se produce un pandeo elástico. Teniendo en cuenta la menor dimensión transversal de las barras, para lograr los niveles de

esbeltez indicados anteriormente se cortaron barras cuya longitud osciló entre 520 mm y 1732 mm.

Los ensayos se ejecutaron en una máquina de ensayos con capacidad para proveer una velocidad constante de avance del cabezal de carga y controlada de manera de alcanzar la rotura en un tiempo cercano a los 10 minutos.

Previamente a la ejecución del ensayo de compresión, de características destructivas, se determinó el módulo de elasticidad de cada una de las barras sometiéndolas en un ensayo de flexión alrededor del eje de menor momento de inercia. Con este fin se aplicaron cargas ubicadas en los tercios de su longitud y sin superar el período elástico del material, conforme al procedimiento adoptado por la norma europea EN 408 (2010) ^[12].

La configuración adoptada para los ensayos de compresión aseguró que ambos extremos de las barras se encuentren inmovilizados transversalmente y perfectamente articulados, permitiendo el libre giro alrededor del eje de mínimo momento de inercia. En la Figura 2 pueden apreciarse las características más importantes de las pruebas estáticas. Durante la ejecución de los ensayos se registró la evolución del valor de la carga y del desplazamiento lateral en el centro de la barra. En todos los casos se logró una precisión del 1%. El sistema de medición de cargas fue contrastado internamente con un aro dinamométrico número 019222, el cual se encuentra calibrado según informe IMAE F-22531 y vinculado a través de ese laboratorio a patrones del INTI, según consta en el informe de calibración.



Figura 2. Imágenes ilustrativas del ensayo de compresión.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 3 se presentan los valores de la carga de rotura obtenidos sobre barras con un rango de esbeltez comprendido entre $\lambda = 30$ y $\lambda = 80$, que es el rango estudiado en el desarrollo de esta primera etapa del proyecto descrito. El valor obtenido para el 5-percentil, valor que resulta de especial importancia para la confiabilidad del diseño estructural, decrece levemente entre $\lambda = 30$ y $\lambda = 40$ pero ese decrecimiento se acentúa para valores superiores de λ . Tanto los valores mínimos y máximos como el coeficiente de variación, que oscila entre 7 % y 13 %, indican una relativamente baja dispersión de valores si se tiene en cuenta la importante variabilidad natural de las propiedades de este material.

	λ					
	30 (n=30)	40 (n=30)	50 (n=30)	60 (n=30)	70 (n=30)	80 (n=30)
Min (daN)	16030	15130	13650	10350	9272	7673
Med (daN)	18219	18822	15812	13480	11772	9825
Max (daN)	21140	22120	18130	17397	15117	11947
S (daN)	1240	1783	1429	1291	1545	1020
COV (%)	7	9	9	10	13	10
5-percentil (daN)	16540	16071	13753	12074	9668	8299

Tabla 3. Valores de la carga de rotura alcanzada en los ensayos. n es el número de barras ensayadas en cada nivel de esbeltez

Con el propósito de independizar el análisis del valor absoluto de las cargas, en la Tabla 4 se presenta el 5-percentil correspondiente a la tensión crítica o de rotura (f_c) determinado empíricamente para cada nivel de esbeltez. Es de señalar que el valor obtenido para la muestra con barras de menor esbeltez ($f_c = 30,6 \text{ N/mm}^2$ para $\lambda = 30$) es similar al valor de $30,5 \text{ N/mm}^2$ publicado previamente por Piter et al. (2004)¹³ para la resistencia en compresión paralela a las fibras de la especie investigada. En consecuencia, los resultados muestran que la influencia de la esbeltez sobre la tensión crítica puede ignorarse hasta $\lambda = 30$ y en adelante el valor $f_c = 30,6 \text{ N/mm}^2$ será tomado como referencia ($f_{c,ref}$) para el análisis. La Tabla 4 también exhibe la relación entre el 5-percentil de la tensión crítica y el valor tomado como referencia para cada nivel de esbeltez ($f_c / f_{c,ref}$). Los resultados indican que la tensión crítica para $\lambda = 40$ representa el 97% de la de referencia y, consecuentemente, a los fines prácticos vinculados al diseño estructural podría ignorarse la influencia de la esbeltez sobre la capacidad portante de las barras hasta $\lambda = 40$ inclusive. A partir de $\lambda = 50$ la disminución del valor de la relación $f_c / f_{c,ref}$ se hace importante, indicando las primeras manifestaciones claras del pandeo con características inelásticas que luego, para valores crecientes de λ , dará lugar a la aparición del pandeo elástico.

	λ					
	30	40	50	60	70	80
f_c (N/mm ²)	30,6 ($f_{c,ref}$)	29,8	25,5	22,4	17,9	15,1
$f_c / f_{c,ref}$	1,00	0,97	0,83	0,73	0,58	0,49

Tabla 4. 5-percentil de la tensión crítica alcanzada en los ensayos (f_c) y su relación con el valor adoptado como referencia ($f_c / f_{c,ref}$)

Con el propósito de comparar los valores del 5-percentil de f_c determinados a través de los ensayos con los que se obtendrían siguiendo los lineamientos de diseño del Proyecto CIRSOC 601 (2011)⁹ y del Eurocódigo 5 (2005)^[11], se procedió a efectuar el cálculo de la tensión crítica en función de la esbeltez pero empleando las ecuaciones adoptadas en las reglas de diseño antes mencionadas. Teniendo en cuenta las diferencias de formato que presentan ambos lineamientos de diseño, y con el fin de lograr resultados comparables entre sí y a los obtenidos a través de los ensayos, se eliminaron los factores relacionados a la calibración de la seguridad en todas las ecuaciones y se consideró la acción de una carga de corta duración, similar a la empleada en el laboratorio.

Siguiendo el procedimiento del Proyecto CIRSOC 601 (2011)^[9] el valor de la tensión crítica (f_{cC}) se obtendría multiplicando la tensión de referencia ($f_{c,ref}$) por el factor de estabilidad lateral de la barra (C_p):

$$f_{cC} = f_{c,ref} C_p \quad (1)$$

siendo:

$f_{c,ref} = 30,6$ N/mm² bajo la acción de una carga de corta duración, como se expresó anteriormente

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

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

F_{cE} representa la tensión crítica en período elástico ideal, calculado en este caso sin factor de seguridad como se expresó anteriormente.

$c = 0,9$ para la madera laminada encolada estructural.

$E_{0,05} = 11580$ N/mm², valor obtenido en los ensayos de flexión realizados con anterioridad a los de compresión (ver el capítulo de Materiales y Métodos).

Conforme al criterio del Eurocódigo 5 (2005)^[11], el valor de la tensión crítica (f_{cE}) se obtendría multiplicando la tensión de referencia ($f_{c,ref}$) por un factor que tiene en

cuenta la influencia de la esbeltez sobre la capacidad portante (k_c):

$$f_{cE} = f_{c,ref} k_c \quad (4)$$

$$k_c = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel}^2}} \quad (5)$$

$$k = 0,5 * \left[1 + 0,1 * (\lambda_{rel} - 0,3) + \lambda_{rel}^2 \right] \quad (6)$$

$$\lambda_{rel} = \sqrt{\frac{f_{c,ref}}{F_{cE}}} \quad (7)$$

Los resultados obtenidos empleando las ecuaciones anteriores se presentan en la Tabla 5, donde 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 ($f_{c,ref}$), puede apreciarse también una diferencia despreciable entre los resultados obtenidos para $f_{c,C}$ y $f_{c,E}$.

	λ					
	30	40	50	60	70	80
C_p	0,97	0,94	0,88	0,77	0,65	0,53
K_c	0,98	0,94	0,89	0,78	0,65	0,52
$f_{c,C}$	29,7	28,7	26,8	23,7	19,7	16,1
$f_{c,E}$	29,9	28,9	27,1	24,0	19,7	15,9

Tabla 5. Resultados obtenidos para la tensión crítica según el criterio del Proyecto CIRSOC 601 ($f_{c,C}$) y del Eurocódigo 5 ($f_{c,E}$)

Con el fin de apreciar con mayor claridad la relación entre los resultados empíricos y los calculados según los procedimientos de diseño antes mencionados, en la Figura 6 se exhiben en forma conjunta los valores de f_c , $f_{c,C}$ y $f_{c,E}$, en función de λ . De la figura surge claramente que tanto los resultados experimentales como los valores obtenidos según ambos criterios de cálculo muestran una influencia despreciable de λ sobre la carga crítica para $\lambda < 20$ y prácticamente despreciable a los propósitos prácticos para $\lambda < 30$.

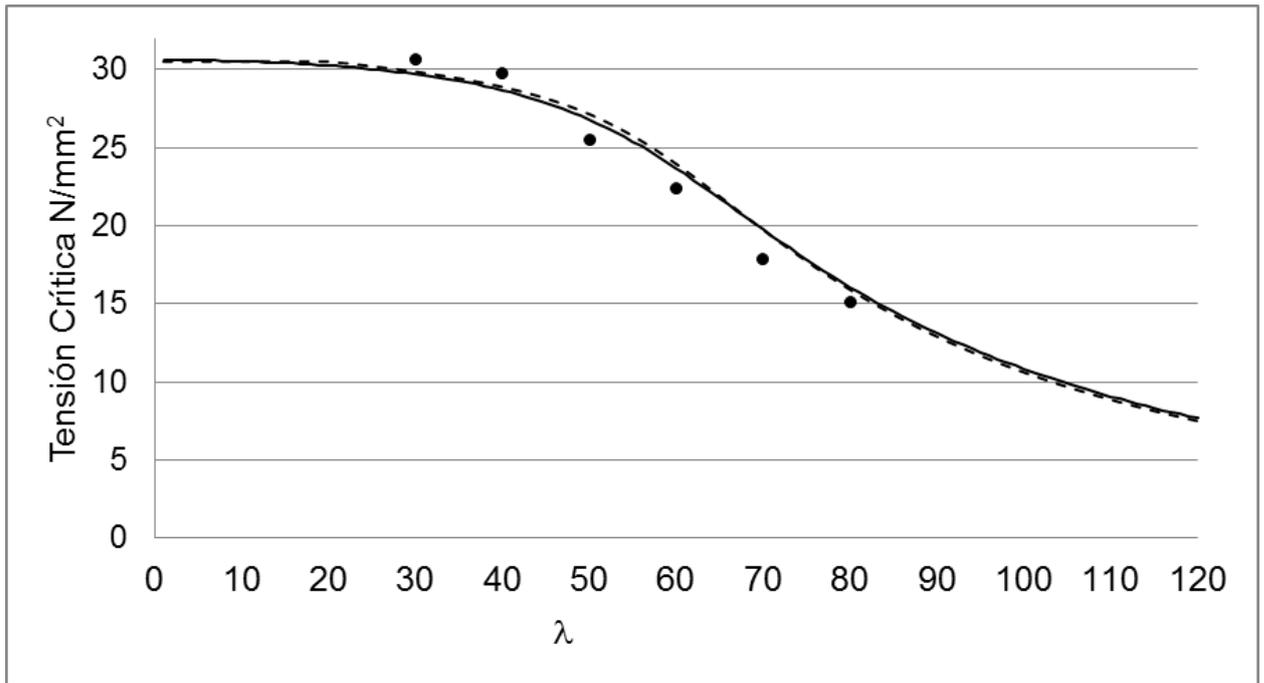


Figura 6. Resultados de f_c , $f_{c,C}$ y $f_{c,E}$ en función de λ . • resultados experimentales, — curva del CIRSOC 601, - - - - - Curva del Eurocódigo 5.

Complementando la información presentada en la Figura 6, en la Tabla 7 se expresa numéricamente la relación encontrada entre los resultados obtenidos de los ensayos (f_c) y los calculados según ambos procesos de cálculo para cada uno de los valores de λ considerados en esta primera etapa del programa empírico. Estos resultados muestran que la resistencia obtenida empíricamente es superior a la calculada según ambas reglas de diseño para $\lambda < 50$, con una diferencia que oscila entre el 2% y el 4%. Para $\lambda \geq 50$ se aprecia una relación menor que la unidad, indicando que los valores obtenidos por el cálculo quedarían del lado contrario a la seguridad. La mayor diferencia corresponde a $\lambda = 70$ y alcanza un 9%. En consecuencia, y a los propósitos prácticos del diseño estructural, puede considerarse que los dos lineamientos de diseño analizados expresan adecuadamente el comportamiento estructural de las barras esbeltas de madera laminada encolada consideradas en el presente proyecto.

	λ					
	30	40	50	60	70	80
$f_c / f_{c,C}$	1,03	1,04	0,95	0,95	0,91	0,94
$f_c / f_{c,E}$	1,02	1,03	0,94	0,94	0,91	0,95

Tabla 7. Relación entre los valores de la tensión crítica determinados experimentalmente (f_c) y los obtenidos de acuerdo al criterio de cálculo del Proyecto CIRSOC 601 ($f_{c,C}$) y del Eurocódigo 5 ($f_{c,E}$)

CONCLUSIONES

El 5-percentil de la tensión de rotura obtenido empíricamente para las barras con $\lambda = 30$ ($30,6 \text{ N/mm}^2$) es similar al valor publicado previamente para la resistencia en compresión paralela a las fibras de la misma especie ($30,5 \text{ N/mm}^2$) lo cual indica que la influencia de la esbeltez puede ignorarse hasta ese nivel. Esta conclusión puede incluso hacerse extensiva hasta $\lambda = 40$, ya que el 5-percentil de la tensión de rotura encontrado para esta esbeltez representa un 97% del valor correspondiente a $\lambda = 30$.

Fueron determinadas las funciones que definen la variación de la tensión crítica de pandeo en función de la esbeltez conforme al criterio del Proyecto CIRSOC 601 (2011) ^[9] y al Eurocódigo 5 (2005) ^[11]. Los resultados son prácticamente coincidentes según ambos criterios cuando se aplican los valores de las propiedades mecánicas de la especie investigada bajo solicitaciones de corta duración, y se eliminan todos los factores relacionados al criterio de seguridad adoptado por cada formato de diseño.

El 5-percentil de la tensión de rotura obtenido para cada muestra ensayada fue levemente superior al valor de la tensión crítica calculada conforme los lineamientos de diseño del Proyecto CIRSOC 601 (2011) ^[9] y del Eurocódigo 5 (2005) ^[11] para $\lambda < 30$, en tanto que fue menor para $\lambda > 30$. No obstante, considerando que la mayor diferencia entre los valores empíricos y los calculados alcanzó 9%, a los fines prácticos del diseño estructural puede considerarse que ambos lineamientos de diseño expresan adecuadamente el comportamiento estructural de las barras de madera laminada encolada construidas con tablas de la especie investigada.

Los resultados encontrados alientan la continuación del proyecto presentado con el propósito de extender la verificación de la confiabilidad de los métodos de diseño hasta $\lambda = 100$, como está previsto en su planificación. Con el logro de este propósito se contaría con una base estadística obtenida de 240 barras ensayadas a escala natural que abarcaría todo el rango de pandeo inelástico, en el cual las propiedades del material analizado ejercen mayor influencia sobre los fenómenos de inestabilidad del equilibrio, y a su vez se alcanzaría el comienzo del pandeo elástico.

COLABORADORES

Un agradecimiento especial por su participación en el acondicionamiento y ajuste del equipamiento al Ing. Ricardo Gómez, en la realización de ensayos del programa empírico a los becarios del grupo GEMA y en particular a los alumnos Leonardo Díaz y Walter Kloster.

REFERENCIAS

[1] INTA (1995) Manual para Productores de Eucaliptos de la Mesopotamia Argentina. Grupo Forestal, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, EEA Concordia, Argentina.

[2] Piter JC (2005) Mejora de la calidad de las vigas laminadas encoladas para uso estructural en construcciones. Experiencia de innovación y transferencia entre el sector científico-tecnológico y el empresario en Argentina. Seminario Iberoamericano de Tecnología de Materiales, La Habana, Cuba.

[3] IRAM 9660-1 (2006) Madera laminada encolada estructural, Parte 1: Clases de Resistencia y requisitos de fabricación y de control. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires.

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

[5] IRAM 9661 (2006) Madera laminada encolada estructural. Requisitos de los empalmes por unión dentada. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires.

[6] IRAM 9662-1 (2006) Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por resistencia, Parte 1: Tablas de pino Paraná (*Araucaria angustifolia*). Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires.

[7] IRAM 9662-2 (2006) Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por resistencia, Parte 2: Tablas de eucalipto grandis (*Eucalyptus grandis*). Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires.

[8] IRAM 9662-3 (2006) Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por resistencia, Parte 3: Tablas de pino taeda y elliottii (*Pinus taeda* y *elliottii*). Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires.

[9] CIRSOC 601 (2011) Proyecto de Reglamento Argentino de Estructuras de Madera. Buenos Aires, Instituto Nacional de Tecnología Industrial y Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles, 1 volumen de 129 pág. pdf (www.inti.gov.ar/cirsoc).

[10] NDS (2005) National Design Specification for Wood Construction. American Forest & Paper Association, Washington.

[11] Eurocode 1995-1-1 (2005) Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings. European Committee for Standardisation, Brussels.

[12] EN 408 (2010) Holzbauwerke, Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz, Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften. Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag, Berlin.

[13] Piter J.C., Zerbino R. L., Blaß H. J. (2004). Visual strength grading of Argentinean *Eucalyptus grandis*. Strength, stiffness and density profiles and corresponding limits for the main grading parameters. Holz als Roh- und Werkstoff 62(1): 1-8.