



Resistencia a la compresión paralela en madera laminada encolada de Álamo

Parallel compression strength in poplar glulam timber

Presentación: 02/03/2023

Aprobación: 03/05/2023

Lía Caren Meyer

Grupo de Investigación y Desarrollo de Estructuras Civiles (GIDEC), Facultad Regional Venado Tuerto, Universidad Tecnológica Nacional - Argentina
lmeyer@frvt.utn.edu.ar

Gamaliel López

Universidad de Valladolid (Uva) -España
gamaliel.lopez@uva.es

Alfredo Anibal Guillaumet

Grupo de Investigación y Desarrollo de Estructuras Civiles (GIDEC), Facultad Regional Venado Tuerto, Universidad Tecnológica Nacional - Argentina
aaguillaumet@frvt.utn.edu.ar

Roberto Daniel Manavella

Grupo de Investigación y Desarrollo de Estructuras Civiles (GIDEC), Facultad Regional Venado Tuerto, Universidad Tecnológica Nacional - Argentina
rdmvt@yahoo.com

Ma. Alexandra Sosa Zitto

Grupo de Estudio de Maderas (GEMA), Facultad Regional Concepción del Uruguay, Universidad Tecnológica Nacional - Argentina
alexandrasosazitto@gmail.com

Resumen

Las nuevas tecnologías de fabricación e industrialización de elementos estructurales de madera laminada encolada permiten abordar diseños de construcciones civiles de grandes luces, capaces de competir en prestaciones con las predominantes estructuras de acero. Dadas las características ortotrópicas de la madera, es importante conocer con exactitud las propiedades mecánicas del material para comprobar las tensiones que se producen en cada dirección al aplicar una carga. En el caso de la resistencia a la compresión, la mayor capacidad se manifiesta en la dirección paralela a la fibra (dirección longitudinal). En este

trabajo se determina la resistencia y el módulo de elasticidad paralelo a la fibra en piezas de madera laminada encolada *Populus deltoides* cultivada en el delta del río Paraná. Se han realizado ensayos de compresión sobre 90 probetas, de acuerdo con las prescripciones de la norma IRAM 9663 (2013). En el Suplemento 2 del CIRSOC 601 (2016), se proponen los valores de referencia para esta especie con el fin de diseñar estructuras de madera de forma segura y confiable. Los valores de resistencia a la compresión paralela a la fibra obtenidos en el percentil 5% resultan mayores que los publicados por Guillaumet et al (2017) en madera aserrada, y cumplen con la categoría resistente GL24h de la normativa europea UNE-EN14080 (2017).

Palabra clave: caracterización, álamo, compresión paralela, madera laminada encolada

Abstract

New technologies for the manufacture and industrialization of glulam timber structural elements make it possible to design large-span civil constructions capable of competing in terms of performance with the predominant steel structures. Given the orthotropic characteristics of wood, it is important to know the exact mechanical properties of the material in order to check the stresses that occur in each direction when a load is applied. In the case of compressive strength, the greatest capacity is manifested in the direction parallel to the grain (longitudinal direction). In this work, the strength and modulus of elasticity parallel to the grain in pieces of glulam timber *Populus deltoides* grown in the Paraná River delta are determined. Compression tests were performed on 90 specimens, in accordance with the requirements of IRAM 9663 (2013). In Supplement 2 of CIRSOC 601 (2016), reference values for this species are proposed in order to design timber structures safely and reliably. The values of resistance to compression parallel to grain obtained at the 5% percentile result higher than those published by Guillaumet et al (2017) in sawn timber, and comply with the GL24h resistant category of the European standard UNE-EN14080 (2017).

Keyword: characterization, poplar, parallel compression, glulam timber

Introducción

En los últimos años, el empleo de la madera para todo tipo construcciones está en expansión por diferentes motivos. Los más relevantes son que es un material renovable y que dispone en el mercado de una amplia variedad de elementos estructurales industrializados con madera laminada encolada. La utilización de estas piezas posee varias ventajas frente a la madera aserrada tradicional, entre ellas, limitar las singularidades de la propia madera, admitir variedad de geometrías, permitir la fabricación de elementos para grandes luces y disponer de mayores escuadrías que aumentan la capacidad portante. Estas ventajas colocan a la madera en igualdad de condiciones con el acero laminado, permitiendo la resolución de diversos modelos estructurales.

La madera es un material ortotrópico, ya que presenta diferentes propiedades mecánicas según la dirección de las fibras consideradas (longitudinal, transversal o radial). Para la resistencia a compresión la mayor resistencia la presenta en la dirección paralela a la fibra. Este esfuerzo tiende a acortar la longitud de las mismas en el sentido longitudinal, Coronel (1995). Un ejemplo, son las columnas donde se considera su rigidez respecto a su longitud,

teniendo en cuenta el efecto de pandeo según el cual las fallas se producen por inestabilidad. Por esta razón, los elementos estructurales sometidos a compresión deben ser fabricados atendiendo a la orientación correcta de las fibras.

Los clones ‘Australiano 129/60’ y ‘Stoneville 67’ se introducen en Argentina a través del Programa de Mejoramiento Genético de Salicáceas del INTA Delta del Paraná. Representa el tercer cultivo de bosques de rápido crecimiento implantados más importante de Argentina. Cuando alcanzan la edad de corte, que se estima entre 10 y 16 años, se estudian las propiedades físicas y mecánicas (CNA 2016). En el año 2015, dichos clones se incorporan a la norma IRAM 9660-1 e IRAM 9662-4, definiendo los valores de referencia característicos de las propiedades mecánicas para madera laminada encolada y aserrada, para cada clase resistente.

El Reglamento Argentino de Estructuras de Madera (CIRSOC 601,2016) publica en el Suplemento 2 los valores de referencia para *Populus deltoides* clones ‘Australiano 129/60’ y ‘Stoneville 67’ con el fin de asegurar un valor mínimo de resistencia para las piezas con un determinado grado estructural correspondiente a la combinación especie/procedencia. Cada grado se asocia con un conjunto de tensiones admisibles que permiten diseñar estructuras de madera de forma segura y confiable.

Los trabajos publicados de madera aserrada del álamo de los clones *Populus deltoides* ‘Australiano 129/60’ y ‘Stoneville 67’ cultivado en el delta del río Paraná, determinan que las tablas son aptas para la fabricación de madera laminada encolada estructural, con propiedades mecánicas similares a las maderas de las especies contempladas en la norma IRAM 9660-1 (2015), Fank et al. (2014), Filippetti et al. (2015), Guillaumet et al. (2017).

El objetivo de este trabajo es determinar la resistencia, módulo de elasticidad y densidad para madera laminada encolada de *Populus deltoides* sometidas a esfuerzo de compresión paralelo a la fibra.

Materiales y Métodos

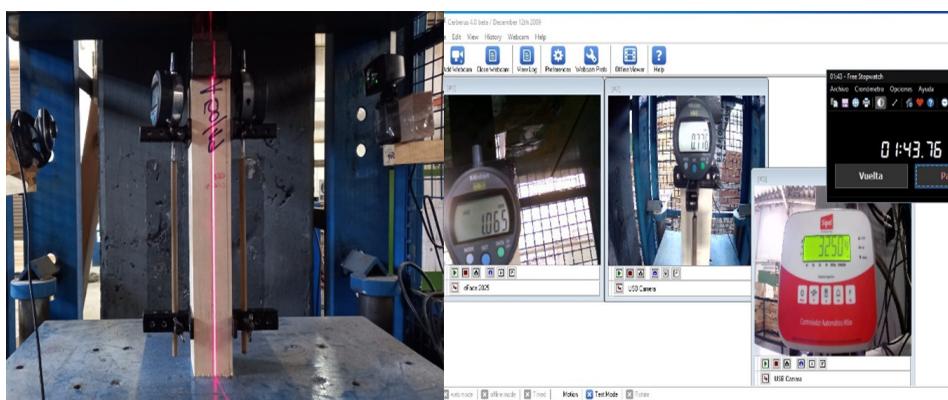
En este trabajo se ha utilizado madera de *Populus deltoides* de los clones ‘Australiano 129/60’ y ‘Stoneville 67’ cultivados en el delta del río Paraná. Las piezas se fabricaron conforme a las especificaciones de la norma IRAM 9660-1 (2015), se formaron con tres láminas superpuestas pegadas con adhesivo en las caras adyacentes y unidas en su longitud por empalmes de unión dentada. Todas las tablas son de clase resistente 1, clasificadas según IRAM 9662-4 (2015). Las probetas contaron con una sección transversal completa de 50 mm x 60 mm y longitud de L=300 mm, respetando seis veces la menor dimensión de la sección transversal según establece la norma IRAM 9663 (2013). En la Tabla 1 se recogen los datos de las probetas para cada clon.

Clon	n	Sección [mm]	A [mm ²]	L [mm]	l ₁ [mm]
A	45	50 x 60	3.000	300	200
S	45	50 x 60	3.000	300	200

A: ‘Australiano 129/60’; **S:** ‘Stoneville 67’; **n:** Cantidad de probetas; **A:** Área de la sección transversal; **L:** longitud total de la probeta; **l₁:** longitud de tramo central;

Tabla 1: Datos de probetas

Los ensayos de compresión paralela a la fibra (Figura 1a) se realizaron según el procedimiento descrito en la norma IRAM 9663 (2013). Con un equipo hidráulico se aplicó la carga axial centrada de manera continua, a velocidad constante y de manera que se alcance la rotura en un tiempo de 300 ± 120 segundos. Se registraron las lecturas de los escalones de carga cada 5 kN, hasta alcanzar la fuerza máxima. La medición de la carga aplicada se realizó con un lector de 200 kN y precisión del 1%. En el tramo central de la probeta (l1) se tomaron las deformaciones con dos comparadores de precisión 0,01 mm. Cada probeta se centró verticalmente en el dispositivo de ensayo mediante niveles láser a 90° . Se utilizó un software que permitió ver tres cámaras simultáneamente en la pantalla de computadora, dos cámaras para los comparadores y una para el lector de la celda de carga. Se capturó la imagen de pantalla para cada escalón de carga hasta que se alcanzó la fuerza máxima (Figura 1b). Con todas las imágenes registradas se generó una planilla de cálculo para el procesamiento estadístico de los datos.



(a) Probeta con comparadores y cámaras; (b) Pantalla de datos: deformaciones, carga y tiempo

Figura 1: Ensayo a compresión

La resistencia a la compresión paralela a la fibra se obtiene de la ecuación:

$$f_{c,0} = \frac{P_{\max}}{A} \quad (1)$$

P_{\max} : Carga máxima en Newton;
A: Área de la sección transversal en mm^2 ;

El módulo de elasticidad a la compresión paralela se calcula con:

$$E_{c,0} = \frac{l_1(P_2 - P_1)}{A(W_2 - W_1)} \quad (2)$$

l_1 : 4 veces el lado menor de la probeta, mm
A: sección transversal de la probeta en mm^2
 $P_2 - P_1$: incremento de carga en la parte recta de la curva de carga-deformación en Newton

$W_2 - W_1$: incremento de la deformación correspondiente a $P_2 - P_1$, en mm

Se determina el contenido de humedad (3) y densidad de cada probeta (4), según las normas ISO 13061-1 (2014) e ISO 13061-2 (2014) respectivamente.

$$CH = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \cdot 100 \quad (3)$$

m_1 : peso de la probeta húmeda en gramos.

m_2 : peso seco de la probeta en gramos.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (4)$$

m: peso de la probeta al momento de ensayo, en kilogramos.

V: volumen de la probeta al momento de ensayo en m^3 .

Resultados y discusión

En la Tabla 2 se presentan los valores mínimos, media, máximos, percentil 5%, desvío estándar y coeficiente de variación. Los valores están ajustados a una humedad del 12% según la norma IRAM 9664 (2013).

Clon	n	Mínimo	Media	Máximo	Percentil 5%	D. STD	COV
A	45	36,02	43,65	54,95	38,63	4,39	10%
S	45	34,31	41,20	48,27	36,16	2,91	7%
Ambos	90	34,31	42,43	54,95	36,39	3,90	9%

A: 'Australiano 129/60'; S: 'Stoneville 67'; n: Cantidad de probetas; D. STD: Desvío estándar; COV: Coeficiente de variación; Ambos: 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67'

Tabla 2: Resistencia a compresión paralela en N/mm²

En el análisis estadístico comparativo entre los clones se tiene un valor-P= 0,0012, siendo menor que 0,05 para la prueba de Kruskal-Wallis, lo que indica una diferencia estadística significativa en la resistencia a compresión paralela. Entre los valores de la resistencia percentil 5% se observa una discrepancia del 7% entre ambos clones.

El valor publicado por Guillaumet et al. (2017) para madera aserrada es de $f_{c,0 \text{ perc}5\%} = 25,2$ N/mm². El resultado en este trabajo para madera laminada encolada es de $f_{c,0 \text{ perc}5\%} = 36,4$ N/mm², siendo este último superior en un 44% al de la publicación. Los gráficos de caja y bigotes de la Figura 2, presentan las muestras por clon para visualizar la distribución de los valores analizados.

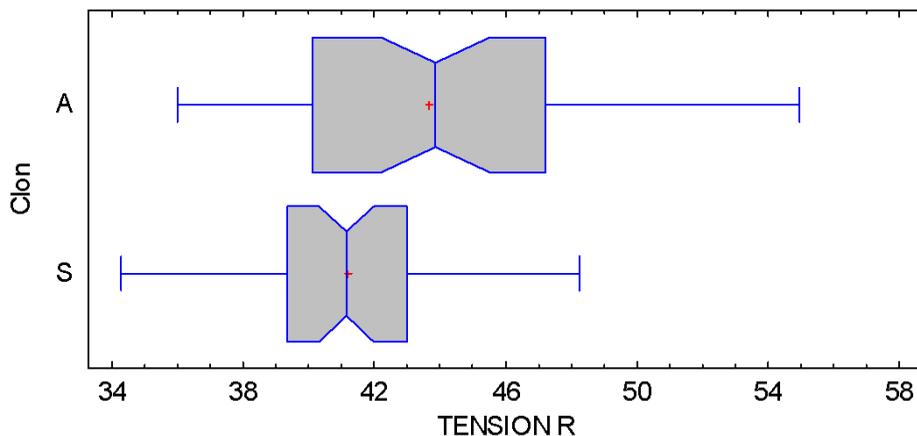


Figura 2: Resistencia a compresión paralela por clon en N/mm2

En los esfuerzos por compresión, la carga actúa en el eje longitudinal y las fuerzas interiores que aparecen se reparten de forma uniforme sobre toda la sección transversal, produciendo un “acortamiento” de las fibras. En el caso de la madera laminada encolada dicho efecto se visualiza en el aplastamiento de las fibras o en la unión dentada (Finger-joint) de lámina. (Figura 3)



(a) Modo de falla por aplastamiento de fibra; (b) Modo de falla por aplastamiento en unión de lámina

Figura 3: Falla de rotura en probetas

La Tabla 3 presenta los valores del módulo de elasticidad ($E_{c,0}$) determinados en un tramo con una correlación entre la carga y la deformación superior al 0,99.

Clon	n	Mínimo	Medio	Máximo	Percentil 5%	D. STD	COV
A	45	7.450	11.685	16.080	9.514	1.682	14%
S	45	8.238	12.260	16.795	10.617	1.475	12%
Ambos	90	7.450	11.973	16.795	9.570	1.599	13%

A: 'Australiano 129/60'; S: 'Stoneville 67'; n: Cantidad de probetas; D. STD: desvío estándar; COV: Coeficiente de variación; Ambos: 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67'

Tabla 3: Módulo de elasticidad paralelo a la fibra en N/mm²

En el análisis estadístico comparativo entre los clones se tiene un valor-P=0,0573 mayor o igual a 0,05 para la prueba de Kruskal-Wallis. Por lo tanto, con un nivel de confianza del 95%, no existe una diferencia estadística significativa indicando que ambos clones son iguales. Para madera aserrada Guillaumet et al. (2017) obtuvo un valor de $E_{c,0 \text{ Perc}5\%} = 6544 \text{ N/mm}^2$, y en este trabajo para madera laminada se tiene un valor de $E_{c,0 \text{ Perc}5\%} = 9570 \text{ N/mm}^2$, que resulta superior en un 46% al indicado anteriormente. En el gráfico de caja y bigotes de la Figura 4 se presentan las poblaciones de ambos clones.

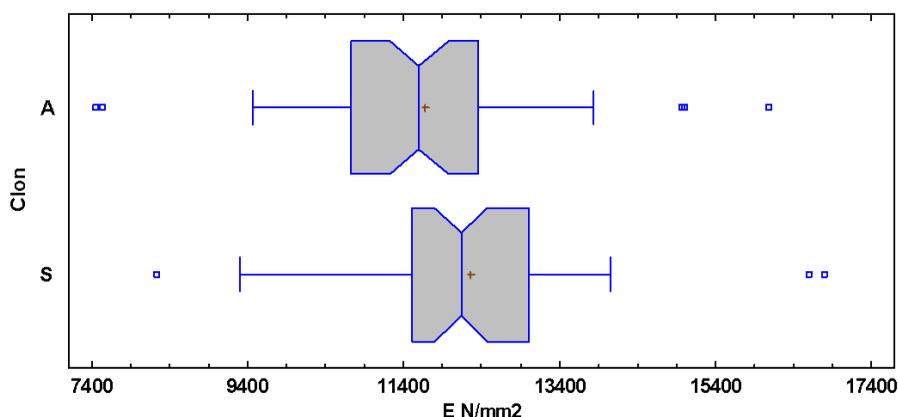


Figura 4: Módulo de elasticidad paralela N/mm²

El cálculo de la densidad se realizó sobre probetas extraídas de una zona cerca a la rotura, donde la probeta no estaba dañada. Los valores de densidad ajustados a una humedad del 12% se presentan en la Tabla 4.

Clon	n	Mínimo	Medio	Máximo	Percentil 5%	D. STD	COV
A	45	408	452	514	424	22,06	5%
S	45	419	452	529	424	19,71	4%
Ambos	90	408	452	529	424	20,80	5%

A: 'Australiano 129/60'; S: 'Stoneville 67'; n: Cantidad de probetas; D. STD: Desvío estándar; COV: Coeficiente de variación; Ambos: 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67'

Tabla 4: Densidad corregida en Kg/m³

En el análisis estadístico comparativo entre las densidades de los clones del *Populus deltoides* se tiene un valor- $P=0,981$ para la prueba de Kruskal-Wallis, siendo mayor que $0,05$, no existe una diferencia estadística significativa con un nivel de confianza del 95% .

El valor de densidad al 12% para madera aserrada es de $\rho_{\text{Perc}5\%} = 353 \text{ Kg/mm}^3$ de acuerdo a Guillaumet et al. (2017), y para madera laminada en este trabajo es de $\rho_{\text{Perc}5\%} = 424 \text{ Kg/m}^3$, siendo este último superior en un 20% . En el gráfico de caja y bigotes de la Figura 5, se presentan las poblaciones de densidad para ambos clones.

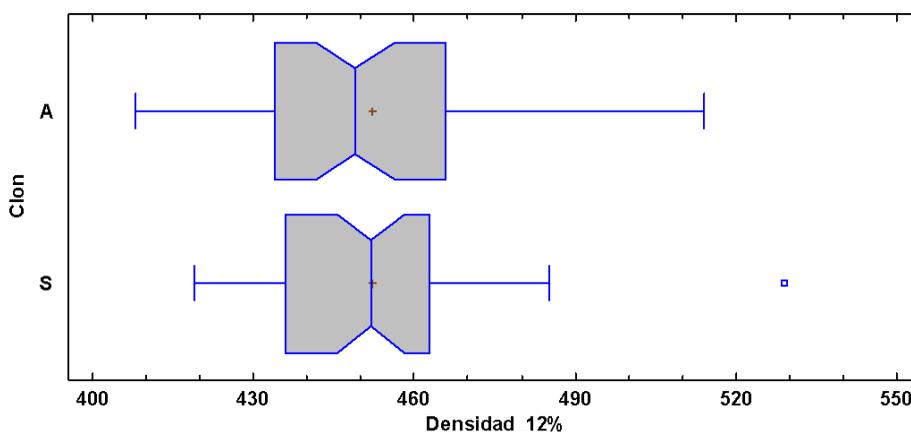


Figura 5: Densidad en Kg/m^3

Si se comparan ambos clones, los valores correspondientes al percentil 5% de la resistencia a la compresión paralela muestran una diferencia del orden del 7% , el módulo de elasticidad al percentil 5% una diferencia de un 12% , en tanto que los valores de densidad resultan similares, por lo tanto, resulta admisible tratarlos como una sola población. Esta forma de tratamiento resulta aceptable ya que el material se comercializa sin identificación, al no ser posible distinguirlos a simple vista. Coincide con el tratamiento de la norma IRAM 9662-4 (2015), que no distingue entre los clones y especifica que las diferencias entre las propiedades de ambos no son significativas, Fank et al (2014), Guillaumet (2019).

Los valores obtenidos para las propiedades mecánicas de resistencia a la compresión paralela, módulo de elasticidad paralelo y densidad para madera laminada encolada de *Populus deltoides*, cumple con la categoría asociada a la clase resistente GL24h de la norma europea EN-UNE 14080 (2017) y verifica la aptitud de la madera de Álamo cultivada en el delta del río Paraná para la fabricación de elementos estructurales.

Conclusiones

- Considerando ambos clones, el ‘Australiano 129/60’ y ‘Stoneville 67’ como una sola población, el valor que se obtiene en madera laminada encolada para la resistencia a la compresión paralela a la fibra es de $F_{c,0 \text{ Perc}5\%} = 36,4 \text{ N/mm}^2$, y el valor del módulo de elasticidad paralelo es de $E_{c,0 \text{ Perc}5\%} = 9570 \text{ N/mm}^2$ con una densidad de $\rho_{\text{Perc}5\%} = 424 \text{ Kg/m}^3$.

- Estos valores resultan mayores a los publicados por Guillaumet et al. (2017), para madera aserrada, lo que indica que las piezas de madera laminada encolada con una fabricación óptima son productos de muy buena calidad y poseen valores de resistencia a la compresión paralela a la fibra y módulo de elasticidad paralelo superiores.
- Los valores de este trabajo cumplen con la categoría clase resistente de GL 24h de la norma europea EN-UNE 14080 (2017), por lo que el *Populus deltoides* es una especie apta para la fabricación de elementos laminados encolados de uso estructural.

Agradecimientos

A los alumnos y graduados, becarios del Grupo de investigación GIDEC de la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Venado Tuerto, por su colaboración en los ensayos.

Referencias

Coronel E. O. (1995) Fundamentos de las propiedades físicas y mecánicas de las Maderas. 2º 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.

Comisión Nacional de Álamo de Argentina - CNA (2016) Informe nacional Periodo 2012-2015. Datos técnicos. Argentina.

Fank, P; Stefani, P; Piter, J (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.

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.

Filippetti, M.C.; Guillaumet, A.A.; Tortoriello, M; Mossre, C (2017) Potencial uso estructural de la madera *Populus deltoides* cultivado en el noroeste de la provincia de Buenos Aires. CLEM + CIMAD. Junín. Buenos Aires. Argentina

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 río Paraná. CLEM + CIMAD. Junín. Buenos Aires. Argentina

Guillaumet, Alfredo (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.

INTI CIRSOC 601 (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.gob.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 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 (2013) Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad. 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, R.; Gómez, R.; Torrán, E.; Piter, J.C. (2014). Propiedades físico-mecánicas de la madera laminada encolada estructural de álamo (*Populus deltoides* ‘Australiano 129/60’ y ‘Stoneville 67’). Análisis conforme al criterio adoptado por la normativa europea. IV Congreso Internacional de las Salicáceas en Argentina. La Plata, Argentina.

UNE- EN 14080:2013 (2017) Agencia Española de Normalización. Estructuras de madera laminada encolada y madera maciza encolada. Madrid.

Contribución de los Autores

Nombres y Apellidos del autor	Colaboración Académica													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Lía Caren Meyer						X	X	X		X	X		X	X
Gamaliel Rodríguez						X						X		
Alfredo Anibal Guillaumet	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X	X	
Roberto Daniel Manavella						X	X		X	X	X		X	
Ma. Alexandra Sosa Zitto									X			X		

1-Administración del proyecto, 2-Adquisición de fondos, 3-Análisis formal, 4-Conceptualización, 5-Curaduría de datos, 6-Escritura - revisión y edición, 7-Investigación, 8-Metodología, 9-Recursos, 10-Redacción - borrador original, 11-Software, 12-Supervisión, 13-Validación, 14-Visualización.