



## MADERA LAMINADA ENCOLADA ESTRUCTURAL DE ÁLAMO. DETERMINACIÓN EMPÍRICA DE SU COMPORTAMIENTO MECÁNICO

### STRUCTURAL GLUED LAMINATED TIMBER OF POPLAR. EMPIRICAL DETERMINATION OF ITS MECHANICAL BEHAVIOR

Ma. del Rocío Ramos (P)(1); Ma. Alexandra Sosa Zitto (2); Ricardo E. Gómez (2); Eduardo A  
Torrán (3); Juan C. Piter (4)

(1) Ing. Civil, Investigador Grupo Estudio de Maderas (GEMA) y Prof. Dpto. Ing. Civil, FRCU – UTN, Arg.

(2) Ing. en Construcciones, Investigador Grupo GEMA y Prof. Dpto. Ing. Civil, FRCU – UTN, Arg.

(3) Ing. en Construcciones, Codirector Grupo GEMA y Prof. Dpto. Ing. Civil, FRCU – UTN, Arg.

(4) Ing. en Construcciones, Director Grupo GEMA y Prof. Dpto. Ing. Civil, FRCU – UTN, Argentina.

Dirección para correspondencia: mrocio\_ramos@hotmail.com; (P) Presentador

#### Resumen

Las normas IRAM 9660-1/2, 9661 y 9662-1/2/3, publicadas en 2006, establecen los requisitos de fabricación y control para la madera laminada encolada estructural en Argentina. Las mismas contemplan tres especies cultivadas en el país (*Araucaria angustifolia*, *Eucalyptus grandis*, *Pinus taeda/elliottii*) y proveen los valores característicos de las propiedades mecánicas para dos clases resistentes. Actualmente, dichas normas se encuentran en revisión para incorporar dos clones de la especie *Populus deltoides*: 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67', cultivados en el delta del río Paraná. Luego de investigar el comportamiento mecánico de las tablas y de las uniones dentadas (finger), a partir de cuyos resultados se derivaron analíticamente las propiedades de la madera laminada, se ejecutó un programa experimental conforme al criterio de las normas europeas, el cual permitió comprobar experimentalmente los valores proyectados. El programa incluyó ensayos a flexión según la norma EN 408 (2010) de 103 vigas en tamaño estructural, agrupadas en dos muestras representativas de los dos grados de calidad adoptados. El valor característico de la resistencia a flexión alcanzó 20,8N/mm<sup>2</sup> para el grado 1 y 18,4N/mm<sup>2</sup> para el grado 2, en tanto que el módulo de elasticidad mostró valores medios de 10700N/mm<sup>2</sup> y 10100N/mm<sup>2</sup>, los cuales son congruentes con los derivados analíticamente a partir del comportamiento de las tablas y de las uniones dentadas. Estos resultados están en el orden de los adoptados por la norma IRAM 9660-1 (2006) para las especies incluidas actualmente, lo cual alienta la realización de nuevos estudios que consoliden el conocimiento de este material estructural.

*Palabras clave: Populus deltoides, madera laminada, estructuras, resistencia, rigidez.*

#### Abstract

The IRAM 9660-1/2 standards, published in 2006, establish requirements of manufacturing and testing for structural glued laminated timber in Argentina. They include three species grown in the country (*Araucaria angustifolia*, *Eucalyptus grandis*, *Pinus taeda/elliottii*) and provide the characteristic values of mechanical properties for two strength classes. Currently these standards are on review to incorporate two clones of *Populus deltoides*: 'Australiano129/60' and 'Stoneville 67', grown in the delta of the Parana River. After investigating the mechanical behavior of boards and finger joints, from whose results the properties of glued laminated timber were analytically derived, an experimental program was carried out according to the criteria of European standards, which allowed to verify the projected values experimentally. The program included bending tests according to EN 408 (2010) of 103 beams of structural size, grouped in two representative samples of the two quality grades adopted. The characteristic value of bending strength reached 20,8N/mm<sup>2</sup> for grade 1 and 18,4N/mm<sup>2</sup> for grade 2, while elasticity modulus showed mean values of 10700N/mm<sup>2</sup> and 10100N/mm<sup>2</sup>, which are consistent with those analytically derived from the behavior of boards and finger joints. These results are in order with the ones adopted by IRAM 9660-1 (2006) for the species currently included, which encourages further studies to consolidate the knowledge of this structural material.

*Keywords: Populus deltoides, glued laminated timber, structures, strength, stiffness*

## 1. INTRODUCCIÓN

En Argentina la aplicación de la madera laminada encolada estructural se encuentra en crecimiento y se ha impulsado especialmente con la edición en el año 2006 de las normas IRAM 9660, 9661 y 9662, referentes a este material.

La norma IRAM 9660-1 establece las clases de resistencia y los requisitos de fabricación y control y provee los valores característicos de resistencia y rigidez a flexión de la madera laminada encolada para tres especies cultivadas en nuestro país: *Araucaria angustifolia*, *Eucalyptus grandis* y *Pinus taeda/elliottii*, en cada caso, para dos grados resistentes. Los mismos están asociados a la clasificación previa de las tablas que conforman las vigas. Las normas 9662-1, 2 y 3 definen los métodos de clasificación visual de las tablas por resistencia, para las tres especies mencionadas y proveen las propiedades mecánicas y la densidad para dos clases resistentes de cada una de ellas. La norma 9660-2 define los métodos de ensayo, y la norma 9661 establece los requisitos de los empalmes por unión dentada.

Un aspecto de la primera norma mencionada, relevante para el presente trabajo, es que contempla dos tipos de conformación de los elementos laminados: “homogénea” cuando las tablas componentes pertenecen todas a una misma clase y “combinada” cuando se utilizan tablas de dos clases diferentes. Sin embargo, sólo admite la combinación de tablas en los elementos estructurales laminados encolados de grado 1 sometidos a la flexión y establece que deben poseer láminas de la mejor clase resistente en la zona comprendida dentro de 1/4 de la altura, a partir de ambos bordes, con un mínimo de 2 tablas para cada caso. Las láminas restantes, ubicadas en la zona más cercana al eje neutro, pueden pertenecer a la clase de menor resistencia.

En 2013 ha sido publicado el primer Reglamento Argentino de Estructuras de Madera, INTI-CIRSOC 601 (2013), actualmente en trámite de aprobación. El mismo incluye el diseño con madera laminada encolada estructural y provee valores de las propiedades de las especies contempladas en las normas IRAM mencionadas, adecuados al método de diseño.

En los últimos años se han comenzado a fabricar elementos laminados de álamo (*Pópulus deltoides*). Una empresa productora, en convenio con el Grupo de Estudio de Maderas (GEMA) de la Facultad Regional Concepción del Uruguay (FRCU) de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN), propuso realizar los estudios requeridos para la inclusión de esta especie en las normas IRAM y el reglamento CIRSOC 601. Es decir, desarrollar un método de clasificación de tablas, estudiar su comportamiento mecánico, estudiar el comportamiento de las uniones dentadas elaboradas con las mismas y, finalmente, determinar los valores característicos de resistencia y rigidez de la madera laminada encolada.

En relación al último punto, la tendencia mundial actual es la realización de ensayos sobre cuerpos de prueba de tamaño estructural y es ésta la metodología adoptada en el presente trabajo. No obstante, en el caso de la madera laminada encolada existen normas europeas que proveen métodos analíticos para la determinación de sus propiedades por inferencia a partir de las propiedades de las tablas y de las uniones dentadas. Las normas de aplicación en este caso son la EN 1194 (1999) y la EN 14080 (2013), si bien ambas se encuentran actualmente vigentes durante un período que posibilite la adaptación del sector productivo, la última reemplazará a la primera luego de concluida la transición. Aunque el trabajo empírico fue anterior a la publicación de la EN 14080 (2013), en el presente informe se incluye en forma comparativa la determinación

analítica por medio de ambas normas, con el propósito de evaluar el ajuste de las expresiones provistas respecto a los resultados empíricos.

En este informe se presentan los resultados de la determinación experimental de las propiedades de la madera laminada encolada, homogénea y combinada, elaborada con tablas de dos clones de la especie *Populus deltoides*, el ‘Australiano 129/60’ y el ‘Stoneville 67’, cultivados en el delta del río Paraná. Dichos resultados se contrastan con los resultados de la determinación analítica. Se compararan los resultados obtenidos para el *Pópulus deltoides* con los contemplados en la norma IRAM 9660-1 para otras especies, y con los valores provistos por el sistema europeo de clases resistentes para madera laminada encolada.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Determinación experimental de las propiedades de la madera laminada encolada

El material de estudio fueron vigas elaboradas con tablas clasificadas de madera proveniente de dos clones de la especie *Populus deltoides*, el ‘Australiano 129/60’ y el ‘Stoneville 67’, cultivados en el delta del río Paraná.

En estudios previos, durante el diseño del método de clasificación de las tablas, se observó que el comportamiento mecánico de los dos clones no presentó diferencias significativas y, por lo tanto, se consideró que ambos constituyen una única población desde el punto de vista estadístico, a la cual es aplicable el mismo método de clasificación y los valores de las propiedades obtenidos para cada clase resistente.

La asignación de tablas a las dos clases resistentes, así como el material enviado a descarte, están determinados por los principales parámetros visuales: la nudosidad, la presencia de médula y de ataques biológicos. La nudosidad se determina como el cociente entre la dimensión del nudo mayor -medido entre tangentes a él y paralelas al eje de la pieza- y el ancho de la cara donde se manifiesta. La clase 1 no admite médula ni piezas con nudosidad mayor a  $1/3$ . La clase 2 admite piezas con y sin médula y una nudosidad menor o igual a  $2/3$ . Las tablas con nudosidad mayor a  $2/3$  y/o con presencia de ataques biológicos se deben descartar para la fabricación de madera laminada encolada estructural.

Cada viga fue conformada con 10 láminas de 20 mm de alto y 89 mm de ancho, resultando cuerpos de prueba de dimensiones promedio de 89x204mm en la sección y 4400mm de longitud. En un total de 103 vigas, se distinguen tres muestras de acuerdo a las clases de las láminas componentes. Dos muestras corresponden al grado resistente 1 y la restante al grado 2, la composición y el número de cuerpos de prueba ensayados de cada una se presenta en la Tabla 1.

Para la unión de las láminas, al igual que en las uniones dentadas, se utilizó adhesivo de urea formaldehído con melamina que satisface los requisitos de la norma IRAM 45055 (2002) para adhesivos estructurales tipo II, destinados a uso interior.

En todos los casos, tanto la clasificación de las tablas componentes como la elaboración de las vigas se realizó en fábrica, de acuerdo a los procedimientos habituales de la misma, y respetando los requisitos de fabricación y control establecidos en las normas IRAM 9660-1 (2006) y 9661 (2006).

“Estructuras para el Desarrollo, la Integración Regional, y el Bienestar Social”

Tabla 1. Características de las muestras

Grado Resistente	Composición		Cantidad
Grado 1	Homogénea (G1-H)	10 láminas Clase 1	29
	Combinada (G1-C)	3 láminas Clase 1 4 láminas Clase 2 3 láminas Clase 1	27
Grado 2	Homogénea (G2)	10 láminas Clase 2	47

Las vigas se entregaron en el laboratorio envueltas en papel film para preservar el estado de secado logrado en el proceso de fabricación. Se identificó cada una con un número, se registraron sus dimensiones y se prepararon para el ensayo marcando la posición de los apoyos, de la aplicación de cargas y de los instrumentos de medición.

Cada cuerpo de prueba fue ensayado a flexión estática, de acuerdo a las prescripciones de la norma EN 408 (2010), es decir, con distancia entre apoyos igual a 18 veces la altura de la viga y disposición simétrica de cargas aplicadas en los tercios de la longitud, como se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Viga de *Populus deltoides* durante el ensayo a flexión.



Para intervalos de carga comprendidos en el período elástico, se registraron las respectivas deformaciones del eje neutro en ambas caras de la sección central, necesarias para la determinación del módulo de elasticidad local (MOE). El proceso de carga continuó hasta la rotura, registrándose el valor máximo de carga alcanzado para la determinación del módulo de rotura en flexión (MOR), de acuerdo a EN 408 (2010).

Se fotografió cada pieza después del ensayo y se describió el modo de rotura, indicando: a) si se produjo en coincidencia con la presencia de uniones dentadas en la lámina inferior o involucraba defectos propios de la madera; b) si la rotura iniciaba en el tercio central -zona de mayor sollicitación- o fuera del mismo.

De cada cuerpo de prueba se extrajo un trozo próximo a la zona de rotura, abarcando toda la sección transversal de la viga, para la determinación de la densidad y del contenido de humedad, de acuerdo a IRAM 9532 (1973).

Los valores del módulo de elasticidad se ajustaron al contenido de humedad de referencia (12%), de acuerdo a EN 384 (2010). Los valores del módulo de rotura en flexión se ajustaron a las dimensiones de referencia -150mm de ancho y 600mm de altura- de acuerdo a lo estipulado en la EN 1194 (1999). El valor característico del MOR y la densidad se determinaron al 5° percentil inferior por ordenamiento; y en el módulo de elasticidad se adoptó valor medio, de acuerdo a EN 384 (2010).

## 2.2 Determinación analítica de las propiedades de la madera laminada encolada

Tanto la norma EN1194 (1999) como la EN14080 (2013), que, como se mencionó anteriormente, en el futuro reemplazará a la primera pero actualmente se encuentran en vigencia simultánea, proveen fórmulas para la determinación de diversas propiedades de la madera laminada encolada a partir de la resistencia de las tablas y de las uniones dentadas. Si bien la EN 1194 (1999) fue limitada a especies de coníferas, el sistema de clases resistentes para madera aserrada adoptado por la EN 338 (2010), asimila el comportamiento mecánico de la madera de álamo al de las coníferas. La EN 14080 (2013) incluye en su campo de aplicación la madera obtenida de coníferas y álamo. Las expresiones de las propiedades comparables con los resultados empíricos se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Expresiones para determinar las propiedades de la madera laminada

Propiedad	Símbolo (*)	Expresión EN 1194 (1999)	Expresión EN 14080 (2013)
Resistencia a flexión (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{m,g,k}$	$7 + 1,15 f_{t,0,l,k}$	$-2,2+2,5 (f_{t,0,l,k})^{0,75} + 1,5[(f_{m,j,k}/1,4) - f_{t,0,l,k} + 6]^{0,65}$
Módulo de elasticidad paralelo a las fibras (N/mm <sup>2</sup> )	$E_{0,g,medio}$	$1,05 E_{0,l,medio}$	$1,05 E_{0,l,medio}$
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{g,k}$	$1,10 \rho_{l,k}$	$1,10 \rho_{l,k}$

(\*) : el subíndice k refiere al valor característico  
 $f_{t,0,l,k}$ : resistencia característica a tracción de las tablas  
 $f_{m,j,k}$ : resistencia característica a flexión de la unión dentada  
 $E_{0,l,medio}$ : el valor medio del módulo de elasticidad en tracción de las tablas  
 $\rho_{l,k}$ : densidad característica (5%) de las tablas

Los datos de las propiedades mecánicas y de densidad de las tablas y de las uniones dentadas fueron obtenidos del banco de datos del Grupo de Estudio de Maderas (GEMA), y provienen de determinaciones experimentales realizadas conforme a las normas europeas. En la Tabla 3 se transcriben dichos valores, que fueron publicados previamente por Ramos *et al.* (2014).

Tabla 3. Propiedades de las tablas y de las uniones dentadas

Clase resistente	$f_{t,0,l,k}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_{0,lm}^*$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\rho_{l,k}^*$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{m,j,k}$ (N/mm <sup>2</sup> )
1	13,9	10200	400	32,3
2	10,8	9000	400	26,9

$(f_{t,0,l,k})$ : resistencia característica en tracción de las tablas determinada conforme a la norma EN 384 (2010)  
 $(E_{0,l,m})$ : valor medio del módulo de elasticidad en tracción de las tablas  
 $(\rho_{l,k})$ : densidad característica de las tablas determinada conforme a la norma EN 384 (2010)  
 $f_{m,j,k}$ : resistencia característica a flexión de la unión dentada  
 \* Valores ajustados al contenido de humedad de referencia (12%) conforme a la norma EN 384 (2010)

Es de señalar que la norma EN 1194 (1999) establece como requisito para la aplicación de las expresiones exhibidas en la Tabla 1 que se satisfaga la expresión  $f_{m,j,k} = 8 + 1,4 f_{t,0,l,k}$  donde  $f_{m,j,k}$  es la resistencia característica a flexión de las uniones dentadas y  $f_{t,0,l,k}$  es la resistencia característica a tracción de las tablas. Esta limitación tiene por objeto evitar que la rotura de la madera laminada encolada se produzca como consecuencia de una baja resistencia de las uniones dentadas y en consecuencia se invalide la relación planteada en las expresiones antes mencionadas entre  $f_{t,0,l,k}$  y las propiedades de la madera laminada.

En el caso de la norma 14080 (2013), la expresión de la resistencia característica a flexión de la madera laminada ( $f_{m,g,k}$ ) indicada en la Tabla 2 es válida para el siguiente rango de variación de la resistencia característica a flexión de las uniones dentadas:  $1,4 f_{t,0,l,k} < f_{m,j,k} \leq 1,4 f_{t,0,l,k} + 12$ . En el caso de madera laminada fabricada con tablas sin uniones dentadas se debe utilizar el valor superior del rango mencionado para aplicar la fórmula. Adicionalmente, el valor característico mínimo de la resistencia a flexión de plano de las uniones dentadas está vinculado al grado resistente y se indican en las tablas 2 y 3 de dicha norma.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Resultados experimentales

En la Tabla 4 se presentan los principales resultados de la resistencia a flexión (MOR), del módulo de elasticidad local paralelo a las fibras (MOE) y la densidad, para cada grado resistente, obtenidos a partir de los ensayos a flexión.

“Estructuras para el Desarrollo, la Integración Regional, y el Bienestar Social”

Tabla 4. Principales resultados obtenidos experimentalmente

Propiedad	Grado resistente	Mínimo (N/mm <sup>2</sup> )	Medio (N/mm <sup>2</sup> )	Máximo (N/mm <sup>2</sup> )	D.E. (N/mm <sup>2</sup> )	C.V. (%)
MOR	Grado 1	15,5	28,9	38,6	5,2	18%
	Grado 2	17,6	24,7	32,9	4,0	16%
MOE	Grado 1	8938	10594	12338	847	8%
	Grado 2	7647	10064	12441	890	9%
		(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )	(%)
DENSIDAD	Grado 1	409	450	500	17,8	4%
	Grado 2	410	469	526	24,6	5%

Puede observarse que cada propiedad presentó similares coeficientes de variación para ambos grados. Se destaca que la variabilidad en el MOR duplica los valores del MOE, lo cual puede explicarse por una relativa falta de homogeneidad en los procesos de fabricación con impacto sobre la resistencia final de las vigas. En la densidad se observa que los coeficientes de variación son bajos y que los valores medios de ambos grados son prácticamente iguales. Esta última característica también se presenta en el *Eucalyptus grandis* (Piter, Zerbino y Blaß, 2004), pero difiere sustancialmente con lo observado en las coníferas (Fank, Stefani y Piter 2014).

### 3.2 Comparación de los resultados experimentales y las determinaciones analíticas

Considerando la importancia que para el diseño estructural revisten los valores característicos de la resistencia y de la densidad al 5% inferior, así como del módulo de elasticidad medio, se exhiben a continuación en la Tabla 5 los correspondientes valores obtenidos del programa experimental y los determinados en forma analítica, para cada grado resistente.

Tabla 5. Valores característicos de las propiedades.

Propiedad	Símbolo <sup>(*)</sup>	Resultados empíricos		Resultados analíticos según EN 1194 (1999)		Resultados analíticos según EN 14080 (2013)	
		Grado 1	Grado 2	Grado 1	Grado 2	Grado 1	Grado 2
MOR (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{m,g,k}$	20,8	18,4	23,0	19,4	24,3	21,2
MOE (N/mm <sup>2</sup> )	$E_{0,g,medio}$	10594	10064	10710	9450	10710	9450
DENSIDAD (Kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{g,k}$	424	421	440	440	440	440

(\*): el subíndice k refiere al valor característico

Los valores de resistencia característica corresponden a las dimensiones de referencia 150mm de ancho y 600mm de altura, de acuerdo a lo estipulado en la EN 1194 (1999). Los valores del módulo de elasticidad y la densidad corresponden al contenido de humedad de referencia de 12%.

Se encuentra que en ambos grados resistentes los valores experimentales del MOR resultan sobre estimados por la determinación analítica. En los valores correspondientes a la norma EN 1194 (1999) la diferencia es del 11% para el grado 1 y del 5% para el grado 2. En los valores correspondientes a la norma 14080 (2013), las diferencias son de 17% y 15%, respectivamente. Cabe destacar que en la determinación del MOR del grado 1 por medio de la EN 14080 (2013),

en la expresión debió utilizarse el valor de  $f_{m,j,k}$  correspondiente al límite superior del campo de validez, ya que la resistencia experimental de la unión dentada es mayor al mismo.

En el caso del MOE y la densidad las expresiones de ambas normas son iguales. Para el MOE la diferencia entre los valores experimentales y analíticos es pequeña, del 1 % en la mejor calidad y del 6% en la de menor calidad, siendo en esta última el valor experimental mayor al proyectado. En la densidad las diferencias también son pequeñas del 4% y 3% para los grados 1 y 2, respectivamente, siendo los valores proyectados mayores a los experimentales.

### 3.3 Análisis del modo de rotura en las vigas ensayadas

Analizando los modos de rotura, se encontró que en ambos grados resistentes el inicio de la rotura se produce, en la mayoría de los casos, en coincidencia con la presencia de una unión dentada (finger joint) en la lámina inferior de la viga. En el grado 1 esta situación se presentó en 44 ensayos de un total de 56 (79%). Esto indica que la continuidad lograda en la unión dentada es más débil que la resistencia de la madera para la clase correspondiente. En el grado 2 el inicio de la rotura en una unión dentada se produjo en 25 de 47 ensayos (53%), los restantes 22 corresponden a rotura en madera, lo que es coherente con una calidad de madera inferior, ya que admite tablas con médula y/o nudos más grandes que los tolerados en el grado 1.

En la Figura 2 se presenta un gráfico de dispersión de la resistencia en flexión de las tres muestras (ver Tabla 1), subdivididas por el modo de rotura de la tabla inferior de la viga, según se inicie en coincidencia con una unión dentada (f) o en madera (m). En esta figura puede apreciarse la gran dispersión de los valores. La mayoría de los valores de MOR de grado 1 superan los  $20\text{N/mm}^2$ ; sin embargo, se destaca un valor excepcionalmente bajo correspondiente a composición combinada, de  $15,5\text{N/mm}^2$ . El mismo corresponde a una rotura por madera, fuera del tercio central, que puede atribuirse a algún defecto constructivo no detectado durante la fabricación, ya que el estudio individualizado no evidenció otra causa.

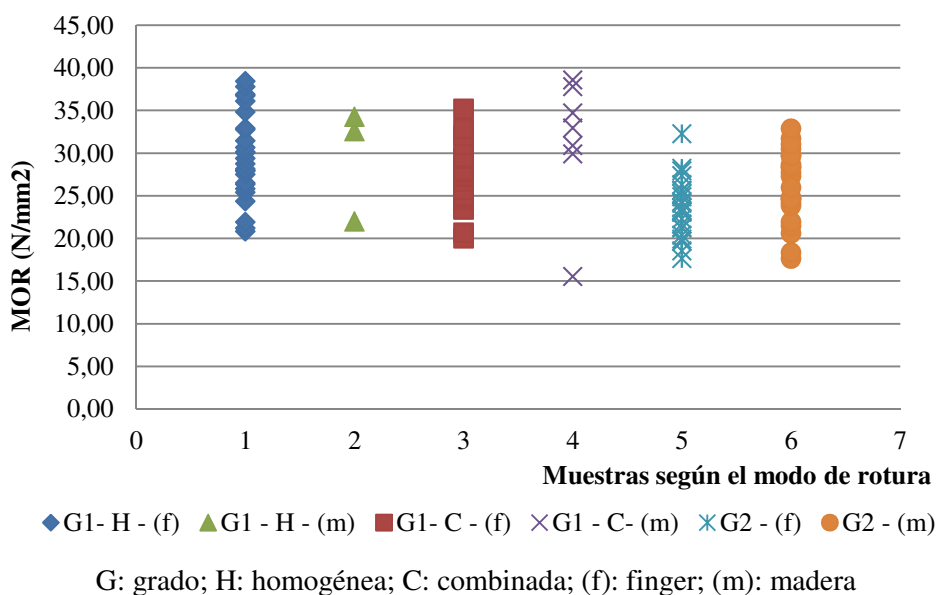


Figura 2. Dispersión de la resistencia en flexión



El relativamente bajo desempeño de las uniones dentadas en las vigas ensayadas puede explicar, al menos en parte, la diferencia entre el MOR experimental y el proyectado analíticamente según las normas europeas. Así mismo, también puede explicar que en los resultados experimentales el MOR del grado 1 resulte solo el 13% mayor que el del grado 2, mientras que en los valores proyectados esa diferencia es del 19% (ver Tabla 5). Todo esto es congruente con la mayor dispersión detectada en el MOR, que duplica la dispersión del MOE (ver apartado 3.1), ya que éste último no es influenciado en mayor medida por los procesos constructivos debido a que las deformaciones empleadas en su cálculo se determinan en el período elástico del material, mucho antes de la rotura.

Considerando que la exigencia establecida en la norma EN 1194 (1999) para la resistencia de las uniones dentadas en relación a la resistencia de las tablas (ver apartado 2.2) fue verificada en los estudios de Ramos *et al.* (2014) y, así mismo, se verificaron en este estudio las establecidas en la EN 14080 (2013), en ambos casos resulta válida la aplicación de las expresiones presentadas en la Tabla 1 para la determinación analítica de las propiedades de la madera laminada encolada. Puede advertirse que dichas condiciones no resultan suficientemente severas para garantizar el buen desempeño de la unión dentada en los elementos laminados. Esto se encuentra en línea con lo observado por Piter *et al.* (2007), en el estudio de los modos de rotura de vigas laminadas encoladas de *Eucalyptus grandis* donde se encontró una incidencia similar de las uniones dentadas en el desarrollo de la rotura (90% en el grado resistente 1 y 74% en el grado 2). Así mismo, ese trabajo reportó diferencias entre los valores experimentales del MOR y los proyectados con la EN 1194 (1999), siendo los últimos 9% y 5 % mayores que los primeros para los grados 1 y 2 respectivamente. La necesidad de establecer una condición más exigente para las uniones dentadas que la contemplada en dicha norma también fue discutida y fundamentada por Gheri (1992).

### 3.4 Comparación de los resultados experimentales con los adoptados por la norma IRAM 9660-1 (2006) y con los provistos por el sistema europeo

El valor característico del MOR obtenido experimentalmente en el presente trabajo para el grado resistente 1 alcanzó  $20,8\text{N/mm}^2$  y el MOE para el mismo grado mostró un valor medio de  $10594\text{N/mm}^2$  (ver Tabla 5). Comparando estos resultados empíricos con los provistos por la norma IRAM 9660-1 (2006) resulta que la resistencia del grado 1 del *Pópulus deltoides* estudiado es semejante a la del grado 2 del *Eucalyptus grandis* ( $21\text{N/mm}^2$ ) y de la *Araucaria angustifolia* ( $20\text{N/mm}^2$ ), pero con un valor del MOE significativamente más bajo que los  $13000\text{N/mm}^2$  que presentan dichas especies.

Por otra parte, el MOE del grado 1 resulta similar al adoptado en el sistema europeo (EN 1194 1999) para la clase resistente GL 24h ( $11600\text{N/mm}^2$ ) que corresponde a un valor característico del MOR de  $24\text{N/mm}^2$ . La importante diferencia encontrada en la resistencia puede atribuirse al relativamente bajo desempeño de las uniones dentadas, como ya se expresó anteriormente, ya que la similitud entre los valores del MOE señalados anteriormente indica una calidad similar entre ambos materiales.

En la EN 14080 (2013) para el grado resistente GL 24h (MOR  $24\text{N/mm}^2$  y MOE  $11500\text{N/mm}^2$ ), se prevé la conformación homogénea con tablas de resistencia característica de  $14\text{N/mm}^2$  y resistencia mínima de la unión dentada de  $30\text{N/mm}^2$ . Ambas condiciones se satisfacen en la conformación del grado resistente 1 homogéneo de los cuerpos ensayados (ver Tabla 3).

Análogamente, para la clase resistente GL 20h (MOR 20N/mm<sup>2</sup> y MOE 8400N/mm<sup>2</sup>), prevé la conformación con tablas de resistencia característica de 10N/mm<sup>2</sup> y resistencia mínima de la unión dentada de 25N/mm<sup>2</sup>, que son satisfechas por los materiales empleados en la elaboración de los elementos de grado 2 homogéneo. En el caso de la conformación combinada, para la clase resistente GL 24c (MOR 24N/mm<sup>2</sup> y MOE 11000N/mm<sup>2</sup>), se prevé la conformación con tablas de resistencia característica de 14N/mm<sup>2</sup> para las tablas extremas y 9N/mm<sup>2</sup> para las centrales, y resistencia mínima de la unión dentada de 31N/mm<sup>2</sup> y 19N/mm<sup>2</sup>, respectivamente. Dichas condiciones se cumplen para la conformación de los elementos de grado 1 combinados ensayados. Sin embargo, en todos los casos el valor del MOR determinado empíricamente resultó inferior a los indicados en dicha norma (ver Tabla 5).

### 3.5 Comparación de las muestras homogénea y combinada

La información presentada en la Figura 2, se complementa con los valores presentados en la Tabla 6, donde se indican los resultados del grado resistente 1 desagregado para los dos tipos de conformaciones, la homogénea y la combinada. En la misma puede observarse la similitud de las propiedades entre ambas muestras, en virtud de lo cual la composición combinada resulta una alternativa válida cuando se trata de elementos destinados a trabajar en flexión y que posibilita un mejor aprovechamiento del material.

Tabla 6. Propiedades mecánicas y densidad de la muestra

Propiedad	Conformación	Mínimo	Medio	Máximo	D.E.	C.V.	Característico
		(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(%)	(N/mm <sup>2</sup> )
MOR	Homogénea	20,8	29,6	38,4	5,1	17%	21,5
	Combinada	15,5	28,2	38,6	5,4	19%	20,2
MOE	Homogénea	8956	10756	12338	938	9%	10756
	Combinada	8938	10421	11539	715	7%	10421
DENSIDAD	Conformación	(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )	(%)	(kg/m <sup>3</sup> )
	Homogénea	421	453	500	18,0	4%	435
	Combinada	409	447	486	17,4	4%	423

El valor excepcionalmente bajo de 15,5N/mm<sup>2</sup> en el MOR de la conformación combinada, como ya se comentó anteriormente, no pudo ser explicado a través de un análisis detallado y puede atribuirse a un defecto no detectado en el proceso de fabricación.

## 4. CONCLUSIONES

Fue posible determinar en forma experimental los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad de la madera laminada encolada estructural fabricada con tablas de los clones *Populus deltoides* ‘Australiano 129/60’ y ‘Stoneville 67’.

La resistencia a flexión mostró una dispersión significativamente mayor que el módulo de elasticidad. En la densidad, es destacable la baja dispersión, y la similitud de los valores medios de ambos grados resistentes.

Las diferencias que surgieron al comparar los valores experimentales del presente estudio con los valores determinados analíticamente son relativamente bajas, por lo que puede considerarse que



las ecuaciones utilizadas expresan adecuadamente -para propósitos prácticos ligados al diseño estructural- la relación existente entre las propiedades de las tablas y las de la madera laminada encolada estructural. Un estudio detallado mostró una importante influencia de las uniones dentadas en el desarrollo de la rotura en ambos grados resistentes y, particularmente, en el grado 1. En ese sentido, y atendiendo a los resultados encontrados también en otros estudios previos llevados a cabo tanto en Europa como en Argentina (Piter *et al.*, 2007 – Gheri 1992), se concluye que la condición establecida en la normativa utilizada para la resistencia de las uniones dentadas no es lo suficientemente exigente para lograr una continuidad adecuada en el laminado que posibilite el aprovechamiento de la máxima capacidad portante de la madera. En consecuencia, se considera conveniente preparar nuevos proyectos experimentales orientados a investigar específicamente la relación existente entre la resistencia de las uniones dentadas y las de la madera laminada encolada, en especial cuando se emplean tablas de las mayores clases resistentes.

La resistencia de la madera laminada encolada de las especies estudiadas se encuentra en el orden de los valores adoptados por la norma IRAM 9660-1 para otras especies cultivadas en Argentina. Sin embargo, se presume que el material analizado posee un potencial mayor al realmente alcanzado con los procesos de fabricación utilizados. Esto se fundamenta tanto por la similitud del valor medio del módulo elástico con materiales que alcanzan resistencias mayores (EN 1194 1999 y EN 14080 2013), como por la alta influencia de las uniones dentadas en el origen de la rotura, que se reflejó, además, en una alta variabilidad de la resistencia.

Finalmente, la comparación entre los resultados obtenidos para vigas de composición homogénea y combinada confirmó para esta especie la validez de la combinación de láminas de distintas calidades en elementos destinados al uso estructural en flexión.

## 5. REFERENCIAS

- IRAM 9532 (1973). Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Método de determinación del contenido de humedad. Buenos Aires.
- IRAM 9660-1 (2006). Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Madera laminada encolada estructural. Parte1: Clases resistentes y requisitos de fabricación y control. Buenos Aires.
- IRAM 9660-2 (2006). Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Madera laminada encolada estructural. Parte2: Métodos de ensayo. Buenos Aires.
- IRAM 9661 (2006). Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Madera laminada encolada estructural. Requisitos de los empalmes por unión dentada. Buenos Aires.
- IRAM 9662-1 (2006). Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por resistencia. Parte 1: Tablas de pino Paraná (*Araucaria angustifolia*). Buenos Aires.
- IRAM 9662-2 (2006). Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por resistencia. Parte 2: Tablas de eucalipto grandis (*Eucalyptus grandis*). Buenos Aires.
- IRAM 9662-3 (2006). Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por resistencia. Parte 3: Tablas de pino taeda y elliotti (*Pinus taeda y elliottii*). Buenos Aires.



- IRAM 45055 (2002). Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Adhesivos para estructuras de madera bajo carga. Adhesivo de policondensación de tipos fenólicos, aminoplásticos y de otros tipos. Clasificación y requisitos de comportamiento. Buenos Aires.
- INTI-CIRSOC 601(2013). Instituto Nacional de Tecnología Industrial - Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles. Reglamento Argentino de Estructuras de Madera. Disposiciones generales y requisitos para el diseño y la construcción de estructuras de madera en edificaciones. Buenos Aires.
- EN 338 (2010). European Committee for Standardisation. Structural timber – Strength classes. Brussels.
- EN 384 (2010). European Committee for Standardisation. Structural timber – Determination of characteristic values of mechanical properties and density.. Brussels.
- EN 408 (2010). European Committee for Standardisation. Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties. Brussels.
- EN 1194 (1999). European Committee for Standardisation. Timber structures. Glued laminated timber. Strength classes and determination of characteristic values.. Brussels.
- EN 14080 (2013). European Committee for Standardisation. Timber structures - Glued laminated timber and glued solid timber – Requirements. Brussels.
- Fank, P.; Stefani, P. y 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-Jornadas de Salicáceas 2014, La Plata, marzo.
- Gehri, E. (1992). Determination of characteristic bending values of glued laminated timber, EN-approach and reality. International Council for Building Research Studies and Documentation, Working Commission W18 – Timber Structures. Ahus, Sweden.
- Piter, J.C.; Zerbino, R. L. y 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* (ISSN 0018-3768, revista científica editada por Springer Verlag - Technische Universität München - *Holzforschung München*, Alemania) 62(1): 1-8.
- Piter J.C., Cotrina A.D., Sosa Zitto M.A., Stefani P.M., Torrán E.A. (2007) Determination of characteristic strength and stiffness values in glued laminated beams of Argentinean *Eucalyptus grandis* according to European standards. *Holz als Roh- und Werkstoff* (ISSN 0018-3768, revista científica editada por Springer Verlag - Technische Universität München - *Holzforschung München*, Alemania) 65(4): 261-266.
- Ramos R.; Gómez R.; Torrán E.; Piter J.C. (2014) Comportamiento mecánico 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-Jornadas de Salicáceas 2014. La Plata. Publicado completo en CD ROM en 8 pág. pdf.