



La Ingeniería Estructural, motor del desarrollo en América, en un marco de Integración y Sustentabilidad

PROPIEDADES MECÁNICAS EN FLEXIÓN DE LA MADERA ASERRADA DE *POPULUS DELTOIDES* 'STONEVILLE 67'

BENDING MECHANICAL PROPERTIES OF SAWN WOOD OF *POPULUS DELTOIDES* 'STONEVILLE 67'

Alfredo A. Guillaumet (P) (1); Roberto Manavella (2); Luis Acuña (3); Juan C. Piter (4)

(1) Ing., Profesor Titular, Investigador, Universidad Tecnológica Nacional FRVT y UNNOBA; Argentina

(2) Ing., Profesor Titular, Investigador, Universidad Tecnológica Nacional FRVT- Argentina

(3) Dr. Ing., Profesor Titular, Investigador, Universidad de Valladolid; España

(4) Dr. Ing., Profesor Titular, Investigador, Univ. Tecnológica. Nacional FR C. del Uruguay, Argentina
Laprida 651, Venado Tuerto, aaguillaumet@rec.utn.edu.ar, (P) Presentador

Resumen

En Argentina se encuentran edificios con estructura de madera, construida generalmente con especies de alta densidad, resistencia y durabilidad. La protección del bosque nativo estimuló la utilización de madera con baja densidad proveniente de bosques implantados. Sin embargo, la falta de información sobre su comportamiento mecánico genera incertidumbre y demanda una importante tarea de caracterización. A modo de ejemplo, en los suplementos del Reglamento Argentino de Estructuras de Madera (CIRSOC 601), se proveen valores de las propiedades para solo tres especies cultivadas en el país: *Pinus taeda/elliottii*, *Eucalyptus grandis* y *Araucaria angustifolia*. En el delta del río Paraná, Argentina, existen más de 20.000 hectáreas cultivadas con álamo, dentro de las cuales se destacan, por su importancia, los clones *Populus deltoides* 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67'. Existen reportes que presentan a la madera del clon 'Australiano 129/60' con una resistencia a la flexión adecuada para fines estructurales, comparable a la del *Pinus elliottii*, pero no se conocen valores publicados para la madera del clon 'Stoneville 67'. Este trabajo presenta los resultados obtenidos sobre 333 cuerpos de prueba preparados con madera de 'Stoneville 67' y sometidos a ensayos de flexión siguiendo el procedimiento de la norma UNE-EN 408:2010. Los resultados mostraron superiores propiedades mecánicas para la madera de 'Stoneville 67' que las publicadas para la madera de 'Australiano 129/60', siendo más importante la diferencia entre ambos clones para el módulo de elasticidad que para la resistencia.

Palabras clave: clasificación visual, álamo, estructuras de madera, propiedades mecánicas madera.

Abstract

In Argentina it is possible to find buildings with timber structure usually built-up with species exhibiting high density, strength and durability. The protection of native forests encouraged the use of low-density timber obtained from renewable plantations. However, the lack of information related to the mechanical behavior of these new species affects the material reliability and requires an important effort connected with the determination of the main properties. This shortage may be observed in the supplements of the Argentine design code (CIRSOC 601) which provide design values for sawn timber obtained from only three species cultivated in the country: *Pinus taeda/elliottii*, *Eucalyptus grandis* and *Araucaria angustifolia*. In the delta of Parana river, Argentina, there are over 20.000 hectares planted with poplar, the clones *Populus deltoids* 'Australian 129/60' and 'Stoneville 67' being the most important. The bending strength of sawn timber obtained from the clone 'Australian 129/60' has been reported as suitable for structural purposes, exhibiting a strength level similar to that corresponding to *Pinus elliottii*. Nevertheless, no results were published for the mechanical properties of 'Stoneville 67'. This paper presents the results obtained from 333 structural-sized specimens of 'Stoneville 67' subjected to bending tests by following the procedures of UNE-EN 408: 2010. Results showed that the mechanical properties of sawn timber of 'Stoneville 67' are higher than those reported for 'Australian 129/60' and that the difference is greater for the modulus of elasticity than for the strength.

Keywords: visual strength grading, poplar, timber structures, timber mechanical properties



La Ingeniería Estructural, motor del desarrollo en América, en un marco de Integración y Sustentabilidad

1. INTRODUCCION

Desde la antigüedad la madera se utilizó en la construcción de edificios y aún en la actualidad, en números países, su utilización es muy importante y con ello el desarrollo de trabajos para conocer mejor el material en pos de un aprovechamiento pleno de su potencial. En Argentina la mampostería y las estructuras de hormigón o acero son ampliamente utilizadas relegando la madera a un pequeño segmento del mercado. Durante mucho tiempo se utilizó la madera de especies nativas latifoliadas con propiedades mecánicas adecuadas para el uso estructural. La protección del bosque nativo y los planes de forestación para especies de rápido crecimiento generaron una nueva oferta y la necesidad de estudiar el comportamiento estructural de estas combinaciones de especie - procedencia.

El desarrollo de una normativa IRAM para la clasificación visual de tablas de *Araucaria angustifolia* de Misiones, *Pinus taeda* y *Pinus elliottii* de Misiones y Corrientes, y *Eucalyptus grandis* de la Mesopotamia y *Populus deltoides* del delta del río Paraná (IRAM 9662/1, 9662/2, 9662/3 y 9662/4), y su utilización en la fabricación de vigas laminadas encoladas (IRAM 9660/1), sumadas a la norma IRAM 9670 de clasificación visual de vigas de madera aserrada de *P. taeda* y *P. elliottii* presentan un primer avance hacia la clasificación visual y clases resistentes para madera proveniente de bosques implantados de rápido crecimiento.

La confección del “Reglamento Argentino de Estructuras de Madera”, CIRSOC 601, y sus suplementos con los valores de diseño de referencia para las diferentes especies y lugares de procedencia, puso en evidencia la falta de información sobre el comportamiento estructural de muchas especies de rápido crecimiento en Argentina y marcó un área de vacancia para el desarrollo de trabajos de investigación sobre el comportamiento estructural de cada combinación especie / procedencia.

El álamo se inserta en la familia de las salicáceas, constituye el tercer cultivo forestal en importancia de Argentina, siendo precedido por el de pinos y eucaliptos (Achinelli *et al.* 2004). El álamo pertenece al género *Populus Sp.* Es originario del hemisferio norte y comprende unas 40 especies, a las que se deben agregar numerosos híbridos y clones. En Argentina se cultivan el *Populus nigra L.*, el *Populus deltoides* Marsh y sus híbridos. Las condiciones de clima del Delta del río Paraná posibilitó implantar más de 20 clones de *Populus deltoides* pero de acuerdo a los resultados obtenidos los más recomendados son: ‘Australiano 129/60’, ‘Australiano 106/60’ y ‘Mississippi Slim’ conocido como “Stoneville 67” (Borodowski 2006; Cortizo 2005)).

El mapa de plantaciones forestales (MPF, 2010) elaborado por el área de SIG e Inventario Forestal de la DPF - Dirección de Producción Forestal, Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación Argentina – estimó en más de 80.000 las hectáreas forestadas en la región, pero cabe aclarar que actualmente se estima que de esa superficie el área forestada bajo manejo con Salicáceas es de 60.000 has aproximadamente, 70 % en Buenos Aires y un 30 % en Entre Ríos, (Delta Forestal- Información Técnica MAGP 2015)

Los álamos son exigentes en luz y agua. Para un buen desarrollo necesitan un suelo de al menos dos metros de profundidad con condiciones de arenoso o franco arenoso. Su albura es de color blanco y su duramen blanco amarillento, no posee un olor característico y es de textura



La Ingeniería Estructural, motor del desarrollo en América, en un marco de Integración y Sustentabilidad

suave y homogénea. Es una madera muy trabajable y no ofrece dificultades para el aserrado o el debobinado. No es sencillo distinguir a simple vista entre el albura y el duramen. Los anillos de crecimiento interanuales no son fáciles de apreciar y a los efectos de su medición resulta conveniente impregnar la superficie con algún líquido para resaltarlos.

Diversos autores han presentado recientemente trabajos sobre las propiedades estructurales del álamo para distintos clones y procedencias. Sobre los clones de *Populus deltoides* 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67' cultivados en el delta del río Paraná en Argentina, Fank et al (2014) presentó un estudio sobre las propiedades resistentes de tablas, Ramos et al (2014a) y (2014b) sobre las propiedades resistentes de vigas laminadas encoladas y Guillaumet et al (2014a) sobre el rendimiento de tablas para la fabricación de vigas laminadas encoladas. Sobre el clon de *Populus deltoides* 'Australiano 129/60' cultivado en el delta del río Paraná en Argentina, Guillaumet et al (2014b) y Filippetti et al (2015) presentaron valores de las propiedades resistentes a partir del estudio de piezas de distinta escuadría. Sobre los *Populus nigra cv italica* (álamo criollo) y el *Populus x canadensis* I-214 y *Guardi*, cultivados en el sur de Mendoza en Argentina Genovese et al (2014) presentaron un estudio sobre propiedades resistentes de tablas. Sobre vigas de *Populus x euramericana* I-214 (Dode) Guinier, procedente de Río Negro en Argentina y de Castilla y León en España, Spavento (2015) presentó una tesis doctoral que incluye las principales propiedades mecánicas.

En este trabajo se presentan los resultados del ensayo a flexión de 333 elementos estructurales de 5 escuadrías distintas, ejecutados con madera aserrada del clon de *Populus deltoides* 'Stoneville 67' cultivado en el delta del río Paraná en Argentina. Se analiza la resistencia a flexión, el módulo de elasticidad y la densidad. Se presentan también los resultados de los ensayos realizados sobre 496 elementos del clon de *Populus deltoides* 'Australiano 129/60' cultivado en el delta del río Paraná en Argentina, publicados por Filippetti et al (2015), a los efectos de realizar una evaluación comparativa de la prestación estructural de ambos clones. Se analizan los clones por separado y en conjunto de acuerdo a los lineamientos de la norma IRAM 9662/4 (2015). Finalmente se realiza una propuesta de clasificación visual resistente para el conjunto de ambos clones y se comparan los valores obtenidos con los publicados en diversos trabajos sobre elementos estructurales de madera de *Populus*.

2. METODOLOGÍA

2.1. Material.

El material experimental se seleccionó al azar de la producción de madera aserrada proveniente de una plantación de *Populus deltoides* 'Australiano 129/60' de 13 años de edad y de una de 'Stoneville 67' con 16 años, ambas radicadas en el delta del río Paraná. En ambos cultivos, las prácticas silviculturales y las edades de corte fueron representativas de la población a analizar. Conforme al objetivo de este proyecto, se eligieron 5 muestras en las cuales estuvieron representadas todas las secciones transversales destinadas al uso estructural del material. Luego de secadas, las piezas fueron trasladadas al Laboratorio de la Facultad Regional Venado Tuerto de la Universidad Tecnológica Nacional.

Después de cepillados los cuerpos se colocaron en una cámara con una temperatura de 20 ± 2 °C y una humedad relativa ambiente de 65 ± 5 %. La Tabla 1 informa sobre las características de las 5 muestras que abarcaron un total de 829 cuerpos de prueba. En la denominación de cada muestra se incluyó como subíndice el valor nominal del ancho y del alto de los cuerpos de prueba que la integran.

Tabla 1: Detalle de los cuerpos de prueba

Muestra	Cantidad de cuerpos de prueba (n)	Dimensiones de la sección transversal (mm)				
		Valor nominal		Valor real medio luego del cepillado		
		Ancho (b)	Alto (h)	Ancho (b)	Alto (h)	
1 _{100x25}	‘Australiano 129/60’	287	100	25	103,4	22,8
	‘Stoneville 67’	150				
2 _{50x75}	‘Australiano 129/60’	48	50	75	46,8	78,3
	‘Stoneville 67’	48				
3 _{25x100}	‘Australiano 129/60’	65	25	100	23,4	99,4
	‘Stoneville 67’	49				
4 _{50x100}	‘Australiano 129/60’	49	50	100	46,6	101,4
	‘Stoneville 67’	48				
5 _{50x150}	‘Australiano 129/60’	38	50	150	44,1	148,0
	‘Stoneville 67’	38				

2.2. Desarrollo experimental.

Los parámetros visuales fueron registrados conforme al criterio de las normas UNE-EN 1310:2007, UNE-EN 14081:2006 e IRAM 9662-4(2015). El material fue clasificado visualmente por resistencia según el método adoptado por la norma IRAM 9662-4 (2015), denominando como clase 3 (Residuo) a los cuerpos que no cumplen los requisitos establecidos para ser asignados a las dos clases (clase 1 y clase 2) previstas por la norma.



Figura 1: sistema de cargas.

Los ensayos se realizaron de acuerdo a las prescripciones de la norma UNE-EN 408:2011. Se utilizó como luz entre apoyos 18 veces la altura (h) del cuerpo de prueba y las cargas se aplicaron en los tercios de la separación entre apoyos. Las cargas se aplicaron por medio de un equipo hidráulico con capacidad de desplazar el cabezal con velocidad constante. En los puntos de apoyo y de aplicación de la carga se colocaron placas de acero -de ancho igual a la

mitad de la altura de la viga- con el objeto de reducir el aplastamiento localizado de la madera. Para impedir el pandeo lateral, en los cuerpos de prueba de las muestras $3_{25 \times 100}$, $4_{50 \times 100}$ y $5_{50 \times 150}$ se ubicaron dispositivos especiales capaces de proporcionar arriostramiento lateral sin obstaculizar las deformaciones verticales. La figura 1 ilustra el sistema de cargas.

La resistencia a la flexión (f_m) se determinó con la expresión (1) provista por la norma UNE-EN 408 (2011):

$$f_m = \frac{3Fa}{bh^2} \quad (1)$$

Donde:

- f_m : resistencia a la flexión, en newton por milímetro cuadrado.
- F: carga, newton.
- a: distancia entre un punto de carga y el apoyo más próximo, en milímetros.
- b: anchura de la sección transversal, en milímetros.
- h: altura de la sección en los ensayos de flexión, en milímetros.

El valor de f_m se ajustó a una altura de referencia de 150 mm, se llevó a cabo según el criterio de la norma UNE-EN 384:2010, expresiones 2 y 3

$$f_{m,150} = \frac{f_{m,150}}{k_h} \quad (2)$$

$$k_h = \left(\frac{150}{h}\right)^{0,2} \quad (3)$$

Donde cada término tiene el mismo significado que en las expresiones anteriores.

El módulo de elasticidad global en flexión se determinó con la expresión 4 provista por la norma UNE-EN 408 (2011):

$$E_{m,g} = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gb^2h}\right)} \quad (4)$$

Donde:

- $E_{m,g}$: módulo de elasticidad global en flexión, en newton por milímetro cuadrado
- l: longitud entre apoyos, en milímetros.
- $F_2 - F_1$: incremento de carga en newton.
- $w_2 - w_1$: incremento de deformación en milímetros para $F_2 - F_1$.
- G: módulo de elasticidad transversal, en newton por milímetro cuadrado.

En la determinación del módulo de elasticidad global " $E_{m,g}$ " se consideró el módulo de elasticidad transversal $G=650 \text{ N/mm}^2$, de acuerdo a lo establecido por la norma UNE-EN 408:2011 para los casos en que se desconoce su valor. El módulo de elasticidad se ajustó a la humedad de referencia del 12% de acuerdo lo establecido en la norma UNE-EN 384:2010.

El contenido de humedad y la densidad se determinaron según las normas ISO 3130 (1975) e ISO 3131 (1975), respectivamente, luego de finalizado el ensayo. Para este fin se empleó un trozo obtenido en las proximidades de la zona de rotura, abarcando toda la sección transversal y libre de defectos. La densidad se ajustó a la humedad de referencia del 12% de acuerdo lo establecido en la norma UNE-EN 384:2010.

3. ANALISIS DE RESULTADOS

3.1. Análisis por clon.

3.1.1 Resistencia a la flexión.

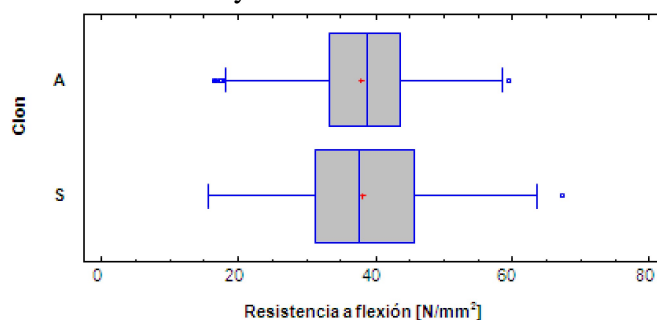
En la tabla 2 se presenta el análisis estadístico de los valores obtenidos para la resistencia a la flexión, f_m . Los valores se ajustaron a la altura de referencia (150 mm) de acuerdo a las prescripciones de la norma UNE-EN 384:2010. Los valores corresponden a tablas y vigas. Se puede apreciar valores muy similares para ambos clones, incluso su percentil 5% resulta el mismo. El clon 'Stoneville 67' presenta un mayor coeficiente de variación.

Tabla 2: Resistencia a la flexión ajustada a la altura de referencia por clon

Clon			Mínimo	Medio	Máximo	Percentil 5%	Desvío	COV	n
Australiano	$f_{m,150}$	N/mm ²	16,5	37,9	59,5	23,3	7,8	20,5	487
Stoneville	$f_{m,150}$	N/mm ²	15,6	38,3	67,3	23,3	10,0	26,1	333
Todos	$f_{m,150}$	N/mm ²	15,6	38,1	67,3	23,3	8,7	23,0	820

$f_{m,150}$: resistencia a la flexión ajustada a la altura de referencia de 150 mm.

La figura 2 muestra claramente que las dos poblaciones son similares, por lo que tratarlas en conjunto es perfectamente razonable y no afecta los resultados finales.



A: Australiano 129/60; S: Stoneville 67

Figura 2: resistencia a la flexión por clon.

3.1.2. Módulo de elasticidad global.

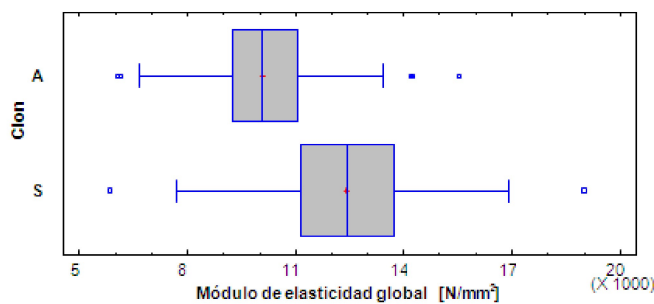
La tabla 3 presenta los valores del módulo de elasticidad global, $E_{m,g}$. Se puede apreciar una clara diferencia en el valor medio para ambos clones. Los valores se ajustaron a la humedad de referencia (12%) de acuerdo a las prescripciones de la norma UNE-EN 384:2010. El clon 'Australiano 129/60' presenta un valor inferior en un 11% al del clon 'Stoneville 67'. Si se trabajan los dos clones en conjunto resulta un valor superior al obtenido para el clon 'Australiano 129/60' solo del orden del 5%, en la misma magnitud varía el percentil 5%.

Tabla 3: Módulo de elasticidad global ajustado a la humedad de referencia -12% - por clon

Clon			Mínimo	Medio	Máximo	Percentil 5%	Desvío	COV	n
Australiano	$E_{m,g}$	N/mm ²	4.699	9.995	13.705	7.497	1.392	13,9	496
Stoneville	$E_{m,g}$	N/mm ²	4.735	11.298	16.110	8.226	1.915	17,0	333
Todos	$E_{m,g}$	N/mm ²	4.699	10.51	16.110	7.808	1.743	16,6	829

$E_{m,g}$: módulo de elasticidad global ajustado a la humedad de referencia del 12%.

La figura 3 muestra claramente que las dos poblaciones son diferentes por lo que tratarlas en conjunto solo se puede justificar en que la diferencia del valor medio, tratadas en conjunto, es superior solo en un 5% a la del clon de menor prestación y en que resulta muy complicado distinguir la madera aserrada de uno u otro por lo que habitualmente se comercializan sin identificar el clon.



A: Australiano 129/60; S: Stoneville 67

Figura 3: Módulo de elasticidad global por clon.

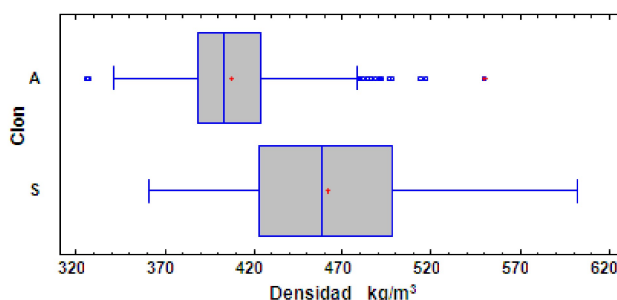
3.1.2. Densidad.

La tabla 4 presenta los valores de la densidad, ρ , ajustada a la humedad de referencia (12%) según las prescripciones de la norma UNE-EN 384:2010. Al igual que para el módulo de elasticidad, el clon 'Stoneville 67' presenta una densidad media superior a la del otro clon del orden del 8 % para el percentil 5% y alrededor de un 13 % para el valor medio.

Tabla 4: Densidad corregida a humedad de referencia -12%- por clon

Clon			Mínimo	Medio	Máximo	Percentil 5%	Desvío	COV	n
Australiano	ρ	Kg/m ³	326	407	550	361	31	7,6	491
Stoneville	ρ	Kg/m ³	361	461	602	390	47	10,3	333
Todos	ρ	Kg/m ³	326	429	602	369	47	10,9	824

ρ : densidad ajustada a la humedad de referencia del 12%.



A: Australiano 129/60; S: Stoneville 67

Figura 4: Densidad por clon.

La figura 4 muestra claramente que las dos poblaciones son diferentes por lo que tratarlas en conjunto solo se puede justificar en que la diferencia del valor percentil 5%, tratadas en conjunto, es muy cercano al del clon de menor prestación y en que resulta muy complicado distinguir la madera aserrada de uno u otro por lo que habitualmente se comercializan sin identificar el clon.

3.2. Clasificación visual resistente.

La norma IRAM 9662/4 establece un sistema de clasificación visual por resistencia para tablas aserradas de álamo, *Populus deltoides* 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67', cultivados en el delta del río Paraná, es decir que no hace ninguna distinción entre los clones. En virtud de lo expresado precedentemente, en cuanto que presentan una similar resistencia a la flexión y que la diferencia en el módulo de elasticidad y densidad no es tan significativa, que se comercializan sin identificación del clon y el tratamiento conjunto que les dispensa la norma IRAM 9662/4 se analizarán las clases resistentes para ambos clones en conjunto.

Se analizan las piezas divididas en tres clases resistentes, clase 1, clase 2 y clase 3. Como límites entre clases se utilizan los propuestos en la norma IRAM 9662/4. Se analiza en primera instancia el comportamiento de todos los elementos y luego se los divide en vigas y tablas, definiendo como tablas los elementos que en el plano de flexión presentan la menor dimensión transversal.

3.2.1. Resistencia a la flexión.

En la tabla 5 se presentan los valores de resistencia a la flexión, ajustada a la altura de referencia (150 mm) de acuerdo a las prescripciones de la norma UNE-EN 384:2010, para cada clase resistente. Se presentan los valores para todas las piezas agrupadas y luego dividida en vigas (muestras 2 a 5) y tablas (muestra 1). Para la clase 1 se observa que el valor medio resulta mayor en las vigas que en las tablas y que el valor del percentil 5% es ligeramente superior en las tablas (6%) respecto de las vigas. Para la clase 2 se observa un comportamiento similar, el valor medio resulta mayor en las vigas que en las tablas, con un valor del percentil 5% ligeramente superior en las tablas (6%) respecto de las vigas. En ambas clases los valores superan el valor característico propuesto en la norma IRAM 9662/4. En la clase 3, que corresponde al descarte, el valor medio y el percentil 5% es superior en las tablas respecto de las vigas.

Tabla 5: Resistencia a la flexión en N/mm^2 por clase resistente y tipo de elemento

Elemento	Clase	Mínimo	Medio	Máximo	Percentil 5%	Desvío	COV	n
Vigas y Tablas	1	17,9	40,8	67,3	26,8	8,0	19,5	382
	2	15,6	36,8	62,0	22,6	8,5	23,1	357
	3	15,6	31,0	53,2	18,2	8,1	26,1	81
Vigas	1	19,8	42,2	67,3	26,2	9,3	22,0	151
	2	15,6	38,1	62,0	22,6	9,7	25,4	183
	3	16,2	29,3	53,2	16,7	9,0	30,7	49
Tablas	1	17,9	39,9	55,6	27,7	6,9	17,2	231
	2	19,5	35,4	49,5	23,9	6,8	19,2	174
	3	21,8	33,6	44,4	23,5	5,8	17,3	32

El sistema de clasificación visual resistente propuesto en la norma IRAM 9662/4 permite una mejora del valor de la resistencia a flexión respecto de la muestra en conjunto. La resistencia a flexión de la muestra sin dividir, ver tabla 2, es ligeramente superior al de la clase 2 pero claramente inferior al de la clase 1. La figura 5 muestra cómo se agrupan las piezas de cada clase resistente.

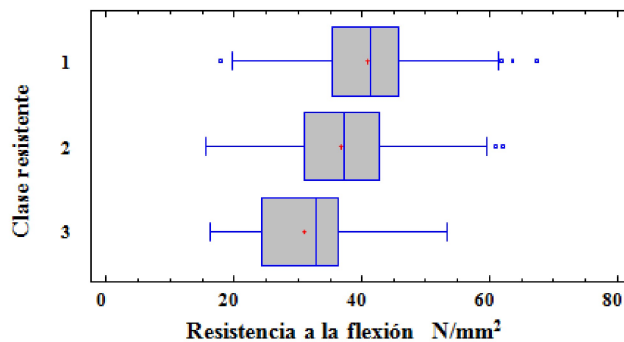
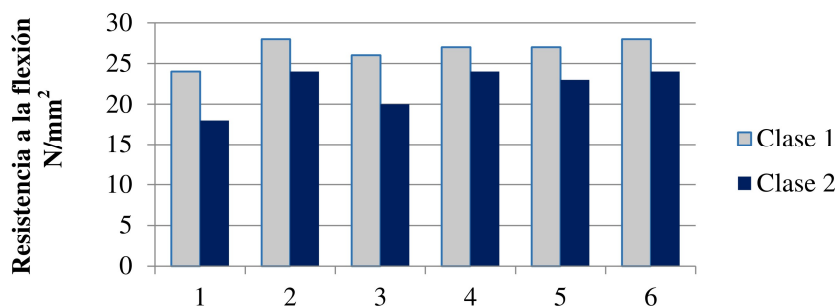


Figura 5: Resistencia a la flexión por clase resistente.

Debe marcarse el buen rendimiento del método de clasificación, un 40% de las vigas calificó en la clase 1 y un 48% en la clase 2, en esta estadística no se consideraron las piezas afectadas por ataque biológico. El rendimiento de las tablas en su largo de corta de 2200 mm, de acuerdo al método de clasificación de la norma IRAM 9660/4, también fue bueno y se publicó en las Jornadas de Salicáceas 2014 (Guillaumet et al 2014a).

En la figura 6 se presenta una comparación entre los valores de resistencia a la flexión para tablas y vigas de álamo de acuerdo a distintos trabajos y normas. Se observa que los resultados obtenidos en este trabajo para las tablas superan a los presentados para los mismos clones y procedencia en el año 2014 (Fank et al 2014), y para el clon I-214 procedente del sur de Mendoza en Argentina (Genovese et al 2014). Las vigas del clon I-214 procedente de España (Spavento 2015) presentan valores ligeramente superiores a los hallados en este trabajo para los clones 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67'.



[1] Tablas según IRAM 9662/4, [2] Tablas según este trabajo, [3] Tablas según Fank et al (2014), [4] Tablas según Genovese et al (2014), [5] Vigas según este trabajo, [6] Vigas según Spavento (2015)

Figura 6: Comparación de la resistencia a flexión presentada en diversos trabajos

Se debe tener en cuenta que las muestras 1 a 5 corresponden a piezas clasificadas de acuerdo a la norma IRAM 9662/4 (2015), mientras que la muestra 6 se clasificó de acuerdo a la norma UNE-EN 56544:2011

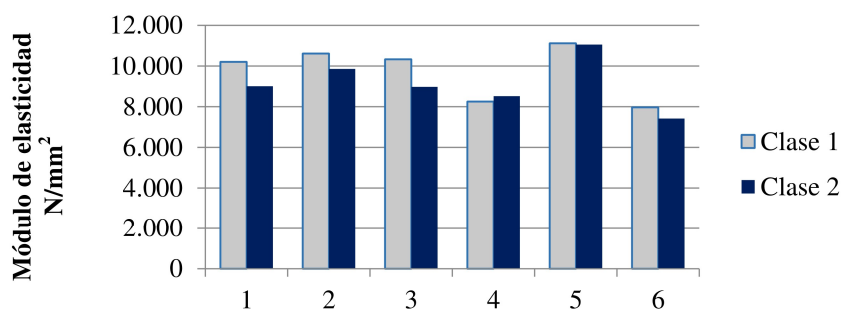
3.2.2. Módulo de elasticidad.

En tabla 6 se presentan los valores del módulo de elasticidad, ajustados a la humedad de referencia (12%) de acuerdo a las prescripciones del Norma UNE-EN 384:2010, para cada clase resistente. Del análisis del valor medio en la clase 1 se puede apreciar que las vigas arrojaron un valor ligeramente mayor (5%) respecto de las tablas. En el clase 2 se observa un comportamiento similar, las vigas presentan un módulo de elasticidad medio mayor al de las tablas (12%). En ambas clases los valores hallados son superiores a los propuestos en la norma IRAM 9662/4. La clase 3 se comporta de la misma manera, con mayores valores en las vigas.

Tabla 6: Módulo de elasticidad en N/mm^2 por clase resistente y tipo de elemento

ELEMENTO	CLASE	Mínimo	Medio	Máximo	Percentil 5%	Desvío	COV	n
VIGAS	1	5.553	10.812	15.666	8.442	1.718	15,9	388
	2	4.699	10.466	16.110	7.785	1.701	16,3	360
TABLAS	3	6.662	9.345	13.332	7.223	1.532	16,4	81
VIGAS	1	7.197	11.119	15.666	8.380	1.947	17,5	151
	2	6.842	11.053	16.110	8.617	1.641	14,8	183
	3	7.272	9.606	13.332	7.493	1.575	16,4	49
TABLAS	1	5.553	10.618	15.167	8.449	1.527	14,4	237
	2	4.699	9.859	14.327	7.199	1.547	15,7	177
	3	6.662	8.945	11.780	6.730	1.394	15,6	32

Al analizar el valor correspondiente al percentil 5%, vigas y tablas presentan valores similares para la clase 1 pero en la clase 2 es muy superior el hallado en las vigas, superior incluso al correspondiente a la clase 1 de las vigas. La clase 3 se comporta de la misma manera, con mayores valores en las vigas.



[1] Tablas según IRAM 9662/4, [2] Tablas según este trabajo, [3] Tablas según Fank et al (2014), [4] Tablas según Genovese et al (2014), [5] Vigas según este trabajo, [6] Vigas según Spavento (2015)

Figura 7: Comparación módulo de elasticidad global presentado en diversos trabajos

En la figura 7 se presenta una comparación entre los valores del módulo de elasticidad global para tablas y vigas de álamo de acuerdo a distintos trabajos y normas. Se observa que los resultados obtenidos en este trabajo para las tablas superan a los presentados para los mismos

clones y procedencia en el año 2104 (Fank et al 2014), y para el clon I-214 procedente del sur de Mendoza en Argentina (Genovese et al 2014). Las vigas del clon I-214 procedente de España, (Spavento 2015), presentan valores marcadamente inferiores a los hallados en este trabajo para los clones 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67'.

3.2.3. Densidad.

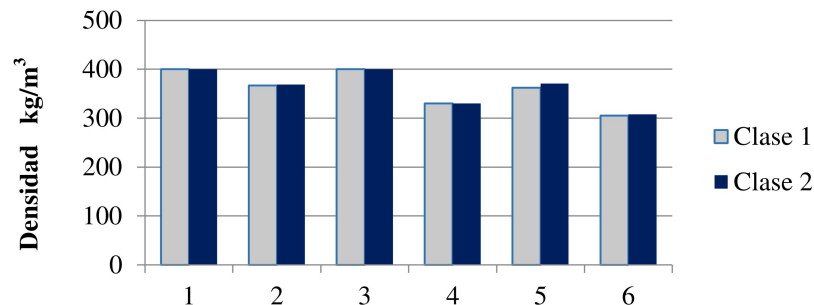
La tabla 7 presenta los valores de la densidad, ajustada a la humedad de referencia (12%) de acuerdo a las prescripciones de la norma UNE-EN 384:2010, por clase resistente. Se puede apreciar que el valor medio para todas las piezas no presenta diferencias significativas entre las clases resistentes (3%), esta diferencia alcanza el 4,5% en las tablas. Se marca claramente la tendencia de una mayor densidad en las piezas de menor calidad.

Tabla 7: Densidad en kg/m^3 por clase resistente y tipo de elemento

ELEMENTO	CLASE	Mínimo	Medio	Máximo	Percentil 5%	Desvío	COV	n
VIGAS	1	326	424	602	367	45	10,6	384
	2	345	432	555	369	46	10,7	359
TABLAS	3	327	438	575	348	56	12,7	81
VIGAS	1	326	427	602	362	48	11,3	151
	2	345	437	547	371	47	10,8	183
	3	327	436	567	369	57	13,1	49
TABLAS	1	354	422	571	367	42	10,0	233
	2	347	427	555	369	45	10,5	176
	3	348	441	575	369	54	12,3	32

En la evaluación de los valores correspondientes al percentil del 5% se presenta una situación similar, muy poca diferencia entre los valores de cada clase resistente, menor al 2% en el análisis de vigas y tablas por separado, aunque muestra una diferencia mayor (5%) en el análisis de todas las piezas. Lo que resulta muy marcado es que los valores del percentil 5% obtenidos son sensiblemente inferiores, en el orden del 10%, a los que propone la norma IRAM 9662/4. Esta situación está motivada por los valores de densidad del clon 'Australiano 129/60' que presenta densidades notoriamente más bajas que el clon 'Stoneville 67', ver tabla 4.

En la figura 8 se presenta una comparación entre los valores del módulo de elasticidad global para tablas y vigas de álamo de acuerdo a distintos trabajos y normas. Se observa que los resultados obtenidos en este trabajo para las tablas y vigas resultan inferiores a los presentados para los mismos clones y procedencia en el año 2014 (Fank et al 2014), y superiores a los presentados para el clon I-214 tanto el procedente del sur de Mendoza en Argentina (Genovese et al 2014) como el procedente de España (Spavento 2015).



[1] Tablas según IRAM 9662/4, [2] Tablas según este trabajo, [3] Tablas según Fank et al (2014), [4] Tablas según Genovese et al (2014), [5] Vigas según este trabajo, [6] Vigas según Spavento (2015)

Figura 8: Comparación de la densidad presentada en diversos trabajos.

3.3. Valores propuestos para cada grado resistente

Si bien se encontraron algunas diferencias entre el comportamiento de las tablas y las vigas, se considera que no son relevantes a la hora de proponer valores para las propiedades resistentes de la madera proveniente de los clones 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67' de *Populus deltoides* cultivados en el delta del río Paraná, Argentina. Se adoptan como límites entre clases resistentes los propuestos por la norma IRAM 9662/4 (2015). La tabla 8 presenta los valores de las propiedades propuestos por este estudio para la madera de ambos clones.

Tabla 8: Propiedades resistentes de los clones 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67' de *Populus deltoides* cultivados en el delta del río Paraná, clasificados visualmente según norma IRAM 9662/4 (2015)

		Clase 1	Clase 2	Clase 3
PROPIEDADES RESISTENTES EN N/mm²				
Flexión (1)	$f_{m,k}$	26,80	22,60	18,20
Tracción paralela (2)	$f_{t,0,k}$	16,08	13,56	10,92
Tracción perpendicular (2)	$f_{t,90,k}$	0,37	0,37	0,35
Compresión paralela (2)	$f_{c,0,k}$	21,96	20,34	18,45
Compresión perpendicular (2)	$f_{c,90,k}$	5,51	5,54	5,22
Cortante (2)	$f_{v,k}$	2,78	2,42	2,04
PROPIEDADES DE RIGIDEZ EN N/mm²				
Módulo de Elasticidad paralelo medio (1)	$E_{0,medio}$	10.812	10.466	9.345
Módulo de Elasticidad paralelo 5° percentil (1)	$E_{0,05}$	8.442	7.785	7.223
Módulo de Elasticidad perpendicular medio (2)	$E_{90,medio}$	360	349	312
Módulo cortante medio (2)	G_{medio}	676	654	584
DENSIDAD EN Kg/m³				
Densidad (1)	ρ_k	367	369	348
Densidad media (1)	ρ_{medio}	427	437	436

(1) Valores de ensayo. (2) Valores determinados de acuerdo a la Norma UNE-EN 384:2010.



La Ingeniería Estructural, motor del desarrollo en América, en un marco de Integración y Sustentabilidad

4. CONCLUSIONES

El clon 'Stoneville 67', cultivado en el delta del río Paraná, presenta valores de resistencia a la flexión similares a los del clon 'Australiano 129/60' de la misma procedencia, con un módulo de elasticidad en flexión mayor en un 13% y una densidad también mayor en el orden del 19%.

Evaluar ambos clones en conjunto resulta razonable considerando que las diferencias entre sus propiedades no resultan tan significativas, que no es posible distinguirlos a simple vista, que se comercializan habitualmente sin identificar el clon y que la norma IRAM 9662/4 (2015) los trata en conjunto.

El sistema de clasificación visual resistente propuesto en la norma IRAM 9662/4 (2015), para tablas de ambos clones, se puede aplicar a las vigas aserradas con un buen rendimiento.

Los valores de resistencia a la flexión y módulo de elasticidad obtenidos, tanto para tablas como vigas aserradas, superan los valores propuestos en la Norma IRAM 9662/4 (2015).

La densidad obtenida en los ensayos es sensiblemente inferior a la presentada en la norma IRAM 9662/4(2015). Se debería revisar ese aspecto de la norma.

Resulta razonable extender la aplicación la norma IRAM 9662/4 (2015) a las vigas aserradas de los clones de *Populus deltoides* 'Stoneville 67' y 'Australiano 129/60', cultivados en el delta del río Paraná, tanto en el sistema de clasificación visual resistente como en los valores de resistencia y rigidez propuestos para cada clase.

AGRADECIMIENTOS

A los ingenieros Miguel Tortoriello y María Cecilia Filippetti por su valiosa participación en el desarrollo experimental y dirección de becarios.

A los jóvenes graduados y alumnos de la carrera de ingeniería civil de la Facultad Regional Venado Tuerto de la Universidad Tecnológica Nacional por su valiosa participación en el desarrollo de los ensayos.

A los alumnos de ingeniería mecánica e ingeniería industrial de la Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires por su valiosa participación en el desarrollo de los ensayos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Achinelli, F.G.; Denegri, G.; Marlats, R. (2004). Evolución y perspectivas del cultivo de Salicáceas en la pampa húmeda argentina. SAGPyA Forestal 32: 14-23.
- Borodowski ED. (2006). Álamos y sauces en el Delta del Paraná: situación del sector y silvicultura. Disertación. Actas Jornadas de Salicáceas 2006.



La Ingeniería Estructural, motor del desarrollo en América, en un marco de Integración y Sustentabilidad

- Casado M. et al. (2009). Structural timber classification of Populus x Euroamericano I-214.V Congreso Nacional y II Congreso Ibérico Agroingeniería . Lugo. España ISBN: 978-84-692-5560-5, Pág. 10
- Casado M. et al. (2011). Ultrasonidos y parámetros de clasificación visual para la caracterización de madera estructural de Populus x euramericana I-214. CIMAD 11 – 1º Congreso Ibero-Latinoamericano da Madeira na Construção, 7-9/06/2011, Coimbra, Portugal.
- CIRSOC 601(2013). Instituto Nacional de Tecnología Industrial. Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad en Obras Civiles. Reglamento Argentino de Estructuras de Madera. Buenos Aires
- Cortizo, S. (2005). Mejores árboles para más forestadores. Subprograma álamos en el delta del Paraná de la SAGPyA, Capítulo III, pág. 137 a 160.
- Delta Forestal. (2015) Información técnica. MAGP. Dirección de Producción Forestal. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Argentina.<http://deltaforestal.blogspot.com.ar/p/informacion-tecnica.html>
- Fank, P; Stefani, P.; Piter, J.C. (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. La Plata, Argentina.
- Filippetti MC, Guillaumet AA, Manavella RD, Guillaumet MP. (2015). Uso estructural de la madera de álamo. II Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira. Belo Horizonte, Brasil.
- Genovese et al (2014). Caracterización físico mecánica de la madera de álamo del sur de la provincia de Mendoza, para la fabricación de elementos estructurales multilaminados encolados. IV Congreso Internacional de las Salicáceas en Argentina. La Plata, Argentina.
- Glos P (1995a) Lectura A6 Solid Timber. Strength Grading. Timber Engineering Step 1. First Edition, Centrum Hout, The Netherlands.
- Glos P (1995b) Lectura A7 Solid Timber. Strength Classes. Timber Engineering Step 1. First Edition, Centrum Hout, The Netherlands
- Guillaumet A.A., Manavella R.D., Filippetti M.C., Diab J., Armas A. (2007) Clasificación visual resistente de la Araucaria Angustifolia procedente de Eldorado, Misiones, Argentina. III Congreso Iberoamericano de Productos Forestales IBEROMADERA 2007, Buenos Aires.
- Guillaumet, A.; Acuña Rello, L.; Piter, J.C. (2014^a). Evaluación del rendimiento de las tablas de Populus deltoides 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67' para la fabricación de vigas laminadas encoladas. IV Congreso Internacional de las Salicáceas en Argentina. La Plata, Argentina.
- Guillaumet, A.A.; Filippetti, M.C.; Acuña Rello, L.; Piter, J.C. (2014b). Utilización de la madera de álamo en elementos estructurales. XXXVI Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural. Montevideo, Uruguay.
- IRAM 9660-1. (2015) Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Madera laminada encolada estructural. Parte 1: Clases de resistencia y requisitos de fabricación y de control.. Buenos Aires.
- IRAM 9662-1 (2015). 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 (2015). Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2005). Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por Resistencia. Parte 2: Tablas de Eucalyptus grandis. Buenos Aires



La Ingeniería Estructural, motor del desarrollo en América, en un marco de Integración y Sustentabilidad

- IRAM 9662-3 (2015). Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por Resistencia. Parte 3: Tablas de Pino taeda - elliotti. Buenos Aires
- IRAM 9662-4 (2015). Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por Resistencia. Parte 4 – Tablas de álamo ‘australiano 129/60’ y ‘Stoneville 67’ (Populus deltoides). Buenos Aires
- IRAM 9670 (2002). Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Madera estructural. Clasificación en grados de resistencia para la madera aserrada de pinos resinosos (Pino elliotti y Pino taeda) del noroeste argentino mediante una evaluación visual. Buenos Aires.
- ISO 3130 (1975). International Organization for Standardization (E.) Wood - Determination of moisture content for physical and mechanical tests.
- ISO 3131 (1975). International Organization for Standardization (E). Wood - Determination of density for physical and mechanical tests.
- NDS (2005). American Forest & Paper Association .American Wood Council.(2005) National Design Specification for Wood Construction. Washington DC. USA
- Ramos, R.; Gómez, R.; Torrán, E.; Piter, J.C. (2014a). 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.
- Ramos, R.; Sosa Zitto, M.A.; Gómez, R., Torrán, E., Piter, J.C. (2014b). Madera laminada encolada estructural de álamo. Determinación empírica de su comportamiento mecánico. XXXVI Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, Montevideo, Uruguay.
- Spavento E (2015). Caracterización y mejora tecnológica de la madera de Populus x euramericana i-214 (dode) guinier, austral y boreal, con fines Estructurales. Tesis doctoral. Universidad de Valladolid.
- UNE-EN 338:2010. Agencia Española de Normalización y Certificación. (2010). Madera estructural. Clases resistentes. Madrid.
- UNE-EN 384:2010. Agencia Española de Normalización y Certificación. (2010). Determinación de los valores característicos de las propiedades y la densidad. Madrid.
- UNE- EN 408:2011. Agencia Española de Normalización y Certificación. (2011). Madera aserrada y madera une-laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. Madrid.
- UNE-EN 1310:1997. Agencia Española de Normalización y Certificación. (1997). Madera aserrada y madera en rollo. Método de medida de singularidades. Madrid.
- UNE-EN 1912:2005+A4. Agencia Española de Normalización y Certificación. (2010). Madera estructural. Asignación de calidades visuales y especies. Madrid.
- UNE-EN 14081-1:2006. Agencia Española de Normalización y Certificación. (2006). Estructuras de madera. Madera estructural con sección transversal rectangular clasificada por su resistencia. Parte 1: Requisitos generales. Madrid.
- UNE-EN 56544:2011. Agencia Española de Normalización y Certificación. (2006). Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madrid.