



**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL VENADO TUERTO**

G I D E C

Grupo de Investigación y Desarrollo de Estructuras Civiles

**UTILIZACION
DE LA MADERA DE
ALAMO EN ELEMENTOS
ESTRUCTURALES**

ISBN: 978-9974-0-1168-7



**TRABAJO EXPUESTO II CONGRESO BRASILEIRO
DE CIENCIA Y TECNOLOGIA DE LA MADERA
Montevideo – Uruguay - 2014**

**AUTORES: Alfredo A. Guillaumet - María C. Filippetti - Luis Acuña Rello - Juan
C. Piter**

UTILIZACION DE LA MADERA DE ALAMO EN ELEMENTOS ESTRUCTURALES

THE WOOD OF POPLAR AS A STRUCTURAL MATERIAL

Alfredo A. Guillaumet (P) (1); María C. Filippetti (2); Luis Acuña Rello (3); Juan C. Piter (4)

(1) Ing., Profesor Titular, Investigador, Universidad Tecnológica Nacional FR Venado Tuerto; Argentina

(2) Ing., Profesor Adjunto, Investigador, Universidad Tecnológica Nacional FR Venado Tuerto; Argentina

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

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

Resumen

La madera es el material de construcción más antiguo, con excelentes propiedades mecánicas en relación a su peso específico. Tradicionalmente se utilizó madera proveniente de bosques nativos, caracterizada por una alta densidad acompañada de excelentes propiedades mecánicas y durabilidad natural. La protección de esos bosques condujo a la utilización de madera proveniente de cultivos de rápido crecimiento, la que usualmente presenta un decrecimiento de las propiedades mencionadas anteriormente. La falta de información sobre el comportamiento estructural de estas especies genera incertidumbre y coloca a este material en una clara desventaja frente a otros tradicionalmente empleados en nuestro medio. La reciente redacción del Reglamento Argentino de Estructuras de Madera (CIRSOC 601) pone en evidencia la necesidad de abordar nuevas combinaciones especie-procedencia en los proyectos orientados a la determinación de las propiedades más importantes para el diseño estructural. En este trabajo se presentan y discuten los resultados de ensayos realizados sobre 299 tablas y 162 vigas representativas de cuatro dimensiones de uso estructural habitual, preparadas con madera aserrada de Álamo *Populus deltoides* Australiano 129/60 proveniente de bosques implantados en el delta del río Paraná. La parte experimental se realizó de acuerdo a las Normas UNE EN 408:2011 y UNE EN 384:2010. Los resultados prueban que este material, clasificado visualmente por resistencia, presenta propiedades mecánicas que no difieren significativamente de las adoptadas para otras especies cultivadas en el país. En consecuencia, alientan la realización de nuevos estudios orientados a consolidar su uso en estructuras portantes de distinto tipo.

Palabras clave: Clasificación visual, álamo, estructura madera, propiedades mecánicas madera

Abstract

Wood is the oldest construction material. It exhibits excellent mechanical properties in relation to its weight. Traditionally, timber was obtained from native forests and was characterized by a high density accompanied by excellent mechanical properties and natural durability. As a consequence of the protection of native species, an increasing number of fast-growing species is used at present for structural purposes. Since the mechanical behavior of these fast-growing species are scarcely known, it is necessary to carry out new studies aimed at making timber a reliable and competitive structural material. The recent edition of the Argentinean design code CIRSOC 601 make evident the necessity of preparing new project aimed at studying the most important mechanical properties of new species-provenance combinations. In this paper are presented and discussed the results of tests performed on 299 boards and 162 beams of *Populus deltoides* "Australian 129/60" in structural sizes. The experimental part was performed according to the UNE EN 408:2011 and UNE EN 384:2010. The results proved that this material, visually strength graded, presents mechanical properties that do not differ significantly from those adopted for other cultivated species in the country and, consequently encourage further studies aimed at improving their use in load-bearing structures of different types.

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

1. INTRODUCCIÓN

La utilización de la madera en la construcción data de muy antiguo en el mundo. Argentina, con poca tradición en construcción con madera, le asignó a este material un papel secundario dentro de la ejecución de obras. Durante mucho tiempo se utilizaron especies nativas de madera dura con propiedades mecánicas adecuadas para el uso estructural. La protección del bosque nativo y los planes de forestación para especies de rápido crecimiento orientan el consumo de madera para la construcción hacia estas nuevas especies y colocan a los profesionales ante la situación de utilizar un material cuyas propiedades estructurales no conocen con certeza.

Si bien al día de la fecha los estudios sobre la aptitud de la madera para la construcción de estructuras son escasos, se ha podido concretar en normativa IRAM 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 (IRAM 9662/1, 9662/2 y 9662/3), y su utilización en la fabricación de vigas laminadas encoladas (IRAM 9660/1). En cuanto a la madera aserrada se desarrolló la norma IRAM 9670 de clasificación visual de vigas de madera aserrada de *P. taeda* y *P. elliottii*. El esquema de norma IRAM 9662-4 presenta la clasificación visual de tablas de *Populus deltoides* “Australiano 129/60” y “Stoneville 67” cultivados en el Delta del Río Paraná con destino a la fabricación de vigas laminadas encoladas. Sin embargo, no existen antecedentes comparables que hayan permitido la concreción en una normativa IRAM para tablas o vigas de otras combinaciones especie / procedencia.

La confección de los suplementos del “Reglamento Argentino de Estructuras de Madera”, CIRSOC 601, con los valores de diseño de referencia para las diferentes especies y lugares de procedencia, puso en evidencia esta falta de información sobre el comportamiento estructural de 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.

Dentro de las especies de reforestación de rápido crecimiento se destaca por su potencial el álamo, y si se considera como zona de cultivo el delta del río Paraná se aprecia su cercanía a un mercado de consumo potencial muy importante. “El álamo en general se presenta como una especie de rápido crecimiento, baja densidad de la madera y rigidez, pero con resultados que podrían satisfacer las condiciones para fabricación de vigas laminadas o como vigas aserradas para pequeñas luces” (Castro, 2006).

La descripción estadística de las propiedades mecánicas nos conduce a menores valores si consideramos toda la población y no la misma dividida en clases de acuerdo a sus defectos (Glos 1995a), por ello la importancia de establecer parámetros fácilmente identificables que nos brinden la posibilidad de dividir en clases resistentes la misma combinación especie / procedencia, obteniendo para las clases de mejor calidad valores característicos más altos. Una exigencia muy alta para clasificar en una determinada clase nos conduce a mejores valores pero aumenta el número de piezas rechazadas, un buen método debe observar un equilibrio entre estos conceptos.

Existen numerosos trabajos que presentan las pautas para establecer la clasificación visual resistente de especies de rápido crecimiento Hermoso Prieto E (2001), Piter JC (2003a), Guillaumet et al (2007), Casado et al (2009), Casado et al (2011), entre otros. En todos los casos se observa un equilibrio entre los límites propuestos, la mejora de calidad de cada clase y el número de rechazos. Se aprecia como parámetros de primera incidencia en el comportamiento estructural la presencia de médula y la dimensión de los nudos en relación al ancho de la cara donde se manifiestan; en segunda instancia aparecen las deformaciones previas, el ataque biológico, fisuras, inclinación de las fibras y aristas faltantes.

Las características de la madera como material higroscópico hacen que sus propiedades resistentes y de rigidez se vean afectadas por la humedad que contiene la pieza (Hoffmeyer P.

1995) y en concordancia con ello la norma UNE-EN 384:2010 prevé correcciones para ajustar los valores de las propiedades a una humedad de referencia del 12%.

La resistencia en flexión aumenta al disminuir el tamaño de la pieza. Esta variación constatada en diversos trabajos, Denzler and Glos (2008), Piter (2012), Hermoso et al (2002), condujo a la inclusión en los reglamentos NDS (2005), CIRSOC 601 (2013) y Eurocódigo 5 (2005) de correcciones por la altura de la pieza en flexión. En función de esta característica del material, la norma UNE-EN 384:2010 prevé correcciones para ajustar el valor de la resistencia a flexión a una altura de referencia de 150 mm.

Este trabajo tiene por objetivo presentar un método para clasificar visualmente por resistencia la madera aserrada de *Populus deltoides* ‘Australiano 129/60’, proveniente de bosques implantados en el Delta del Río Paraná, para ser utilizada como madera aserrada estructural.

2. METODOLOGÍA

2.1. Materiales

Se analizaron 462 cuerpos de prueba de *Populus deltoides* ‘Australiano 129/60’ provenientes de bosques implantados en el Delta del Río Paraná. La tabla 1 presenta el detalle de las escuadrías de los mismos, el año de implante y de tala.

Tabla 1: Detalle de los cuerpos de prueba

SERIE	CANTIDAD	DIMENSIONES NOMINALES			PLANTACIÓN	FECHA	
		BASE	ALTURA	LARGO		IMPLANTE	TALA
	n	mm	mm	mm	N	Año	Año
1	140	100	25	500	1	1996	2009
2	159	100	25	500	1	1996	2009
3	67	25	100	2000	1	1996	2009
4	56	50	75	2000	2	1998	2011
5	40	50	100	2000	2	1998	2011

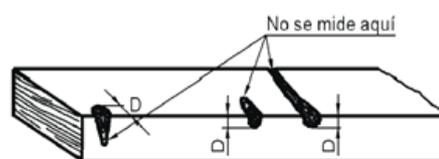
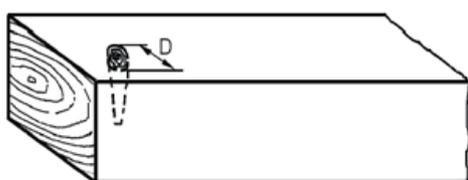
Ambas plantaciones se realizaron con un espaciamiento de 6m x 4m en un terreno plano. Se anegaron por lluvia en pocas oportunidades con no más de quince días de estancamiento del agua y no más de 15-20 cm de altura del agua sobre el terreno. Se les practicó poda de formación al año, poda en altura a los 4 y 7 años de edad. Se realizó control de hormigas, roleo y rastreado en sus primeros 3 años, luego se introdujo ganado. En la plantación 1 se realizó un raleo al 30% a los nueve años y en la plantación 2 a los 7 años.

Los cuerpos de prueba se acopiaron entablillados en el Laboratorio de Estructuras de Madera de la Facultad Regional Venado Tuerto de la Universidad Tecnológica Nacional. Previo al relevamiento de los defectos se cepillaron sus cuatro caras. Finalmente se acopiaron en una cámara de estabilizado a 20°C de temperatura y 65 % de humedad relativa hasta el momento del ensayo.

2.2. Desarrollo experimental

Con los cuerpos de prueba cepillados se procedió al relevamiento de sus defectos: presencia de médula, dimensión de los nudos, deformaciones previas al ensayo, arista faltante, fisuras y ataque biológico. Para realizar estas determinaciones se siguieron las prescripciones de la UNE-EN 14081-1:2006 y los lineamientos de la UNE-EN 1310:1997.

La dimensión de los nudos se midió entre paralelas a las aristas para los nudos de cara, Figura 1, para los nudos de arista se consideró la dimensión más chica que se manifestara en una de las caras, Figura 2. La nudosidad “K” se define como el porcentaje que ocupa la dimensión de cada nudo sobre la dimensión de la cara donde se manifiesta. Las Figuras 1 y 2 corresponden al esquema de norma IRAM 9662/4



Para el ataque biológico se definieron cuatro categorías de afectación (sin afectación, leve, moderada, intensa). Se calificó como ataque leve cuando la sección presentaba hasta tres orificios sobre una de las caras sin coincidir con la sección de la rotura, como ataque moderado cuando presentabamás de tres orificios u orificios en más de una cara de la misma sección sin coincidir con la sección de la rotura y como ataque intenso cuando la rotura de la pieza se p

Figura 1: Medición del nudo cara

Figura 2: Medición del nudo de arista

Para la presencia de médula la determinación fue si la pieza incluía o no partes de la misma.

Los ensayos de las series 2, 3, 4 y 5 de la Tabla 1 se realizaron en un pórtico de cargas existente en el laboratorio de la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Venado Tuerto, mientras que la serie 1 se ensayó en el Laboratorio de la Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires con una máquina de ensayos universal marca Baldwin de 30 toneladas de carga máxima. Para las series 1, 2, 3 y 4 las cargas se registraron con una celda de carga de 10 KN de carga máxima, mientras que para la serie 5 se utilizó una celda de carga de 50 KN de carga máxima. Las deformaciones para la determinación del módulo de elasticidad global se registraron con un comparador digital con una precisión de 0.01 mm y una carrera máxima de 50 mm; para registrar las deformaciones correspondientes a la determinación del módulo de elasticidad local se utilizaron dos comparadores digitales con una precisión de 0.01 mm y una carrera máxima de 12 mm.

El procedimiento experimental se realizó de acuerdo a las prescripciones de la norma UNE-EN 408:2011. La Figura 3 presenta el esquema de cargas para el ensayo.

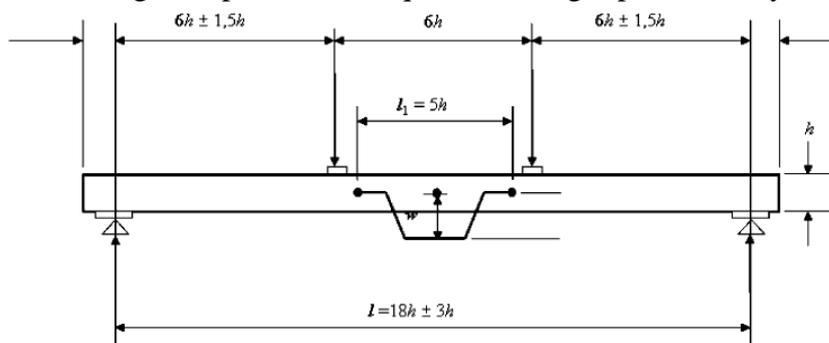


Figura 3: Esquema de cargas

La Figura 4 presenta el ensayo de una viga en la Universidad Tecnológica Nacional FRVT, se aprecian los dispositivos para medir las deformaciones correspondientes al módulo de elasticidad local y al módulo global. Se muestra también el dispositivo de aplicación de cargas. La Figura 5 presenta el ensayo de una tabla en la Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires, se aprecian los detalles de apoyo y medición de deformaciones.



Figura 4: Ensayo de una viga



Figura 5: Ensayo de una tabla

La determinación de la resistencia a la flexión axil se realizó con la expresión 1

$$f_m = \frac{3Fa}{bh^2}$$

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 módulo de elasticidad local en flexión se determinó con la expresión 2

$$E_{m,l} = \frac{al_1^2(F_2 - F_1)}{16I(w_2 - w_1)} \quad (2)$$

Donde:

$E_{m,l}$: Módulo de elasticidad local en flexión, en newton por milímetro cuadrado.

l_1 : longitud base de medida de deformaciones, en milímetros.

$F_2 - F_1$: incremento de carga en Newton.

$w_2 - w_1$: incremento de deformación en milímetros para $F_2 - F_1$.

I: momento de inercia en milímetros elevados a la cuarta potencia

El módulo de elasticidad global en flexión se determinó con la expresión 3

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

Donde:

$E_{m,g}$: Módulo de elasticidad global en flexión, en Newton por milímetro cuadrado

G: Módulo de elasticidad transversal, en Newton por milímetro cuadrado.

En la determinación del módulo de elasticidad local " $E_{m,g}$ " se consideró el módulo de elasticidad transversal "G" como infinito, de acuerdo a lo permitido por la norma UNE-EN 408:2011 para los casos en que se desconoce su valor.

Posteriormente a los ensayos en todos los cuerpos de prueba se determinó la densidad (norma ISO 3131/1975) y humedad (norma ISO 3130/1975).

Los valores obtenidos para la resistencia a la flexión se ajustaron a la altura de referencia de 150 mm de acuerdo a lo establecido en la norma UNE-EN 384:2010

Los valores de módulo de elasticidad se ajustaron a la humedad de referencia del 12% de acuerdo a lo establecido en la norma UNE-EN 384:2010.

Los valores de densidad se ajustaron a la humedad de referencia del 12% de acuerdo a lo establecido en la norma UNE-EN 384:2010.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La tabla 2 presenta el resumen estadístico de los valores obtenidos para la resistencia a flexión, módulo de elasticidad local, módulo de elasticidad global y densidad para cada una de las cinco series ensayadas.

Tabla 2: Resumen estadístico de los valores obtenidos para cada una de las 5 series ensayadas

PARAMETRO	SERIE 1				SERIE 2				SERIE 3				SERIE 4				SERIE 5				TODAS				
	f_m	$E_{m,l}$	$E_{m,g}$	δ	f_m	$E_{m,l}$	$E_{m,g}$	δ	f_m	$E_{m,l}$	$E_{m,g}$	δ	f_m	$E_{m,l}$	$E_{m,g}$	δ	f_m	$E_{m,l}$	$E_{m,g}$	δ	f_m	$E_{m,l}$	$E_{m,g}$	δ	
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	Kg/m ³	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	Kg/m ³	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	Kg/m ³	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	Kg/m ³	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	Kg/m ³	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	Kg/m ³	
Valor medio	37,2	-	9139	411	38,9	-	10171	401	35,0	9696	9073	403	34,9	9838	9105	391	32,8	9740	9331	387	36,8	9755	9498	402	
Desvío estandar	7,7	-	1276	30	6,7	-	1365	22	9,3	1461	1164	35	7,8	1493	1115	22	11,2	1103	865	19	8,2	1387	1333	27	
COV %	21%	-	14%	7%	17%	-	13%	5%	27%	15%	13%	9%	22%	15%	12%	6%	34%	11%	9%	5%	22%	14%	14%	7%	
Mínimo	15,6	-	4007	347	16,2	-	4242	351	16,5	5548	5530	326	13,1	7080	7064	327	12,6	6660	6642	343	12,6	5548	4007	326	
Máximo	55,6	-	11952	517	52,3	-	12679	451	50,3	12142	11366	550	45,7	14260	12484	440	53,1	12120	10720	429	55,6	14260	12679	550	
Percentil 5%	24,3	-	6994	368	26,3	-	7270	362	17,6	7087	7253	352	15,2	7517	7599	350,0	14,7	7656	7786	348	20,7	7517	7183	359	
Recuento (n)	136	-	140	140	154	-	159	154	66	67	67	67	56	56	56	56	40	40	40	40	40	452	163	462	457
f_m = Resistencia a la flexión				$E_{m,l}$ = módulo de elasticidad local				$E_{m,g}$ = módulo de elasticidad global				δ = densidad													

La Tabla 3 presenta los valores medios de la resistencia a la flexión (f_m) y módulo de elasticidad global ($E_{m,g}$) de acuerdo a la afectación que presentaban por ataque biológico. Se puede apreciar en la resistencia a flexión que las piezas con ataque leve y moderado presentan valores similares, levemente inferiores a las piezas sin afectación, mientras que las piezas que rompieron en la zona que presentaba el ataque biológico lo hicieron con valores muy inferiores. Estos resultados nos reafirman que como resulta muy difícil calcular la afectación interna de la pieza por los signos exteriores y considerando que al romper en la zona de ataque biológico los valores son muy bajos corresponde no admitir para uso estructural piezas que presenten orificios producto de ataque de insectos. Por otra parte se puede apreciar que el módulo de elasticidad resulta menos afectado, se debe tener en cuenta que el valor del módulo se determina para cargas inferiores al 40% de la carga de rotura. En virtud de lo expuesto en los análisis posteriores se excluirán los valores correspondientes a los cuerpos de prueba que rompieron en la zona del ataque biológico.

Tabla 3: Valores medios de la resistencia y del módulo de elasticidad según la afectación por ataque biológico

CATEGORIAS DE ATAQUE BIOLÓGICO	f_m (N/mm ²)	$E_{m,g}$ (N/mm ²)
Sin afectación	37,8 (n=325)	9657 (n=334)
Leve	35,5 (n=24)	8879 (n=25)
Moderada	36,6 (n=86)	9151 (n=86)
Intensa	19,8 (n=17)	9018 (n=17)
Todas	36,8 (n=452)	9497 (n=462)

f_m : valor medio de la resistencia a flexión ajustado a una altura de 150 mm.
 $E_{m,g}$: valor medio del modulo de elasticidad global ajustado a 12% de humedad.

3.1. Relación entre los principales parámetros y las propiedades mecánicas

La Figura 6 muestra como la resistencia a flexión disminuye con el aumento de la nudosidad, mientras que la Figura 7 nos presenta una relación similar entre el módulo de elasticidad global y este defecto. El coeficiente de correlación entre la resistencia a flexión y la nudosidad fue de -0,37; mientras que entre el módulo de elasticidad y la nudosidad alcanzó -0,34. Estos resultados muestran una relación modesta entre las variables analizadas. No obstante, los resultados de un análisis estadístico probaron la significancia estadística de las correlaciones determinadas con un nivel de confianza del 95%. Esta dependencia nos confirma que la nudosidad es un parámetro a tener en cuenta al diseñar un método de clasificación visual. Piter et al (2004) reportaron valores ligeramente inferiores a los mencionados para la correlación entre la resistencia a flexión y la nudosidad en madera aserrada de *Eucaliptus grandis* y Guillaumet et al (2007) reportaron para la *Araucaria angustifolia* una mayor relación con un coeficiente de correlación de -0,60.

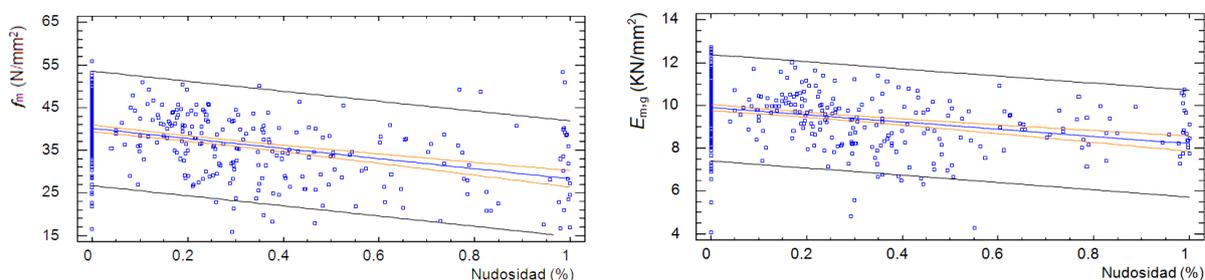


Figura 6: Influencia de la dimensión del nudo

Figura 7: Influencia de la dimensión del nudo en el módulo de elasticidad

La incidencia de la presencia o no de la médula se evaluó a través de dividir los resultados en dos grupos, los que correspondían a cuerpos de prueba con médula y los no que la poseían. Se pudo apreciar una moderada suba de los valores de resistencia a la flexión. No se apreció impacto en el módulo de elasticidad. En la Tabla 4 se pueden apreciar los valores de cada magnitud con la presencia o no de médula.

3.2. Análisis de distintos perfiles de resistencia, rigidez y densidad

Con el objeto de evaluar los límites de los parámetros visuales y los correspondientes valores de las principales propiedades para distintas clases resistentes se consideran diferentes propuestas. En la Tabla 4 se presentan los valores y el rendimiento para la resistencia a flexión, módulo de elasticidad y densidad por clase resistente de acuerdo los límites definidos para cada criterio de análisis. Como criterio 1 se incorporan todas las piezas ensayadas. En virtud de lo expresado al realizar el análisis de la influencia del ataque biológico, en los restantes criterios de selección se excluyeron los cuerpos de prueba que rompieron en la sección afectada por este defecto. Para fijar los límites entre clases en los criterios 2 a 5 se utilizan como parámetros de análisis la nudosidad y la presencia de médula. Como criterio 2 se utiliza una simple división entre las piezas que presentaron médula o no. Como criterio 3 se utiliza el propuesto en el esquema de norma IRAM 9662/4 para tablas de álamo, clase 1 sin médula y nudosidad menor a 1/3, clase 2 admite médula y nudosidad hasta 2/3, y clase 3 el resto. Como criterio 4 se fija para la clase 1 sin médula y nudosidad menor a 1/4, clase 2 admite médula y nudosidad menor a 3/4, y clase 3 el resto. Como criterio 5 se fija la clase 1 sin médula y nudosidad menor a 2/5, clase 2 admite médula y nudosidad menor a 3/5, y clase 3 el resto.

Tabla 4: Perfiles de resistencia, rigidez y densidad y límites correspondientes para los parámetros adoptados

CRITERIO	DESCRIPCIÓN	$f_{m,media}$ (N/mm ²)	$f_{m,05}$ (N/mm ²)	$E_{m,g, medio}$ (N/mm ²)	δ_{05} (Kg/m ³)
1	Todas las piezas	36,8 (n=452)	20,7 (n=452)	9498 (n=462)	359 (n=452)
2	SABI-SM	37,9 (n=313)	21,6 (n=313)	9476 (n=320)	363 (n=316)
	SABI-AM	36,2 (n=161)	20,0 (n=122)	9617 (n=125)	359 (n=124)
3	SABI-SM-1/3>K	39,7 (n=234)	28,7 (n=234)	9747 (n=240)	361 (n=236)
	SABI-AM-K<2/3	35,8 (n=161)	21,8 (n=161)	9357 (n=165)	359 (n=164)
	SABI-EL RESTO	31,4 (n=40)	17,0 (n=40)	8786 (n=40)	350 (n=40)
4	SABI-SM-1/4>K	40,5 (n=207)	28,8 (n=207)	9871 (n=213)	362 (n=209)
	SABI-CM-K<3/4	35,3 (n=193)	21,6 (n=193)	9264 (n=197)	354 (n=196)
	SABI-EL RESTO	31,3 (n=35)	16,7 (n=35)	8774 (n=35)	348 (n=35)
	SABI-SM-0,40>K	39,2 (n=254)	27,0 (n=452)	9644 (n=260)	361 (n=256)
5	SABI-CM-K<0,60	36,4 (n=131)	21,6 (n=452)	9507 (n=135)	355 (n=134)
	SABI-EL RESTO	31,1 (n=50)	17,4 (n=452)	8872 (n=50)	349 (n=50)
n: número de cuerpos de prueba					
SABI: sin ataque biológico intenso					
SM: sin médula					
AM: admite médula					
K: nudosidad: tamaño del nudo en proporción de la cara donde se manifiesta					
$f_{m,media}$: valor medio de la resistencia a flexión ajustado a una altura de 150 mm según UNE-EN 384:2010. Newton por milímetro cuadrado					
$f_{m,05}$: percentil 05 de la resistencia a flexión ajustado a una altura de 150 mm según UNE-EN 384:2010. Newton por milímetro cuadrado					
$E_{m,g, medio}$: valor medio del modulo de elasticidad global ajustado a 12% de humedad según UNE-EN 384:2010. Newton por milímetro cuadrado					
δ_{05} : Percentil 05 de la densidad ajustada a 12% de humedad según UNE-EN 384:2010. Kilogramo por metro cúbico					

La evaluación de los valores presentados en la Tabla 4 permite el siguiente análisis:

a) En el criterio 2 que propone la simple separación por presencia o no de médula, se aprecia que los valores alcanzados para ambas clases difieren muy poco entre sí, tanto para los

valores medios como para los correspondientes al percentil del 5%, y resultan similares a los alcanzados para la población completa, esto es coherente con la débil correlación encontrada entre la resistencia a la flexión y la presencia de médula, y entre ésta y el módulo de elasticidad.

b) En los criterios 3 a 5 se combinan como límites la nudosidad y la presencia de médula (no se admite en la primer clase). Para la resistencia a flexión se observa claramente como aumentan en la primer clase los valores medios y en mayor proporción los correspondientes al percentil del 5% que aumenta aproximadamente un 40 % sobre el valor hallado para toda la muestra. Para el módulo de elasticidad y la densidad se observa el aumento de los valores para la primer clase. Se distingue perfectamente como cada clase adquiere su propio valor, marcando la diferencia de calidad de la madera.

c) El criterio 4, que es el más restrictivo con la nudosidad para la clase 1, presenta los resultados más altos para los valores medios pero un valor correspondiente al percentil del 5% similar al criterio 3 y ligeramente superior al criterio 5, como el criterio 4 conduce a que menos piezas que califiquen en el grado 1 y valores parecidos al criterio 3, no es razonable de aplicar. El criterio 5 conduce a un valor del percentil del 5% y más piezas en el grado 1, pero por lo restrictivo del límite de la nudosidad para el grado 2 aumentan el número de rechazos.

d) Por lo expuesto en los puntos anteriores resulta razonable utilizar el criterio 3, que además es el mismo que propone el esquema de norma IRAM 9662/4 para las tablas álamo de la misma procedencia.

Se realizó un análisis similar pero solo para las serie 3, 4 y 5, es decir las piezas que se ensayaron como vigas (la mayor dimensión de la sección en el plano de flexión), los resultados obtenidos no arrojaron diferencias sustanciales con los presentados en la Tabla 4.

3.3. Método propuesto para la clasificación visual de la especie estudiada

De acuerdo a los requisitos establecidos en la Norma UNE-EN 14081-1 y las pautas del criterio 3 analizado precedentemente se proponen como límites para definir las clases resistentes los que se resumen en la Tabla 5. La clase 3 está formada por el rechazo de las otras clases.

Tabla 5: Pautas para la clasificación visual

Defecto		Unidad	Clase 1	Clase 2	Clase 3
Médula		-	No se admite	Se admite	Se admite
Nudosidad		mm/mm	≤ 1/3	≤ 2/3	Sin restricciones
Dirección de las fibras		mm/mm	Desviación menor que 1°		Sin restricciones
Densidad		Kg/m ³	No se aceptan piezas con densidad excepcionalmente baja		Sin restricciones
Fisuras	No pasantes	m	No mayores que 1 m o ¼ de la longitud de la pieza (la que sea menor)	No mayores que 1,5 m o ½ de la longitud de la pieza (la que sea menor)	Sin restricciones
	Pasantes	m	Sólo se admiten en los extremos y si son de longitud no mayor que el ancho de la pieza	No mayores que 1 m o ¼ de la longitud de la pieza (la que sea menor). Si están en los extremos, la longitud no será mayor que dos veces el ancho de la pieza	
Curvatura de cara en 2 m		mm	10	20	Sin restricciones
Curvatura de canto en 2 m		mm	8	12	Sin restricciones
Alabro		mm/mm	Menor que 1 mm por cada 25 mm de ancho.	Menor que 2 mm por cada 25 mm de ancho.	Sin restricciones
Abarquillado			Sin limitación		Sin restricciones
Arista faltante		mm/mm	Transversalmente menor que 1/4 de la cara o canto donde aparece.	Transversalmente menor que 1/3 de la cara o canto donde aparece.	Sin restricciones
			Sin restricciones para el largo		
Ataques biológicos		-	No se admiten zonas atacadas por hongos causantes de pudrición.		Sin restricciones
			Se admiten zonas atacadas por hongos cromógenos.		
			No se admiten orificios causados por insectos		
Madera de reacción		mm/mm	Menor o igual que 1/5	Menor o igual que 2/5	Sin restricciones

La tabla 6 presenta el resumen estadístico de los valores de las propiedades para cada grado resistente de acuerdo a la propuesta de clasificación visual expresada en la tabla 5. Se

aprecia una marcada diferencia entre los valores para cada clase, fundamentalmente para la resistencia a flexión y el módulo de elasticidad global.

Tabla 6: valores estadísticos de las propiedades para cada clase resistente de acuerdo a la propuesta de clasificación visual

VALORES ESTADÍSTICOS	CLASE 1			CLASE 2			CLASE 3		
	f_m	$E_{m,g}$	δ	f_m	$E_{m,g}$	δ	f_m	$E_{m,g}$	δ
	N/mm ²	N/mm ²	Kg/m ³	N/mm ²	N/mm ²	Kg/m ³	N/mm ²	N/mm ²	Kg/m ³
Promedio	39,7	9747	401	35,8	9357	404	31,4	8786	402
Desvío Estándar	6,5	1327	25,1	7,2	1373	27,4	9,6	942	40,0
COV [%]	16,4%	13,6%	6,3%	20,3%	14,7%	6,8%	30,4%	10,7%	9,9%
Mínimo	15,6	4007	326	16,24	4242	345	16,5	7093	327
Máximo	55,6	12679	479	49,8	12321	517	53,2	10720	550
Percentil 5%	28,7	7825	361	21,8	6727	359	17,0	7326	350
Recuento [n]	234	240	236	161	165	164	40	40	40
Porcentaje [%]	54%	54%	54%	37%	37%	37%	9%	9%	9%

Los gráficos caja y bigotes de las Figuras 6 y 7 nos muestran cómo se diferencian los valores para cada clase resistente. Se aprecia también en las Figuras que la diferencia de valores es más marcada para la resistencia a flexión que para el módulo de elasticidad global.

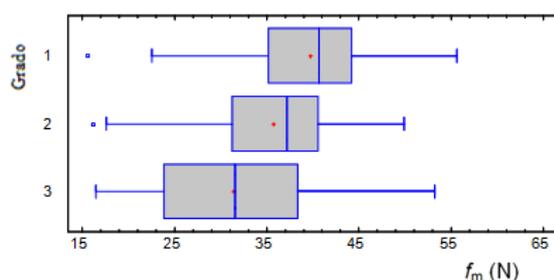


Figura 6: Resistencia a la flexión por clase resistente

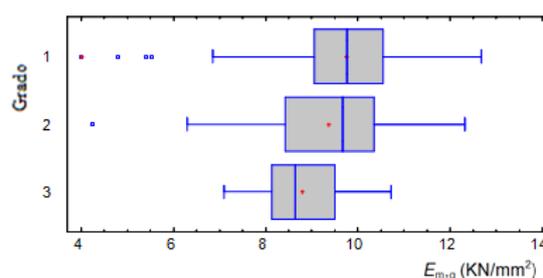


Figura 7: Módulo de elasticidad global por clase resistente

3.4. Análisis de la relación entre el módulo de elasticidad local y el global

En la Tabla 7 se analiza la relación entre el módulo de elasticidad local " $E_{m,l}$ " y el módulo de elasticidad global " $E_{m,g}$ ". El módulo de elasticidad local se determina en el centro de la viga en la zona de flexión pura y solo se realizó sobre las series 3, 4 y 5. Se puede apreciar que para cada clase resistente y para el total de los cuerpos de prueba el módulo global, que está afectado por la influencia de las deformaciones por esfuerzo de corte, es inferior al local y que el porcentaje se mantiene un poco superior al 6%, estos resultados son similares a los obtenidos por Piter et al (2003b) para el Eucaliptus grandis.

Tabla 7: Comparación de los valores entre los módulos de elasticidad local y global

PARAMETRO	CLASE 1	CLASE 2	CLASE 3	TOTAL
$E_{m,g, medio}$ (N/mm ²)	9323	9271	8786	9163
$E_{m,l, medio}$ (N/mm ²)	9940	9946	9338	9778
Diferencia %	-6,21%	-6,79%	-5,91%	-6,29%
Recuento	66	41	40	147

3.5. Comparación de las clases resistentes propuestas con el sistema internacional europeo

Resulta de interés evaluar cómo se insertan los valores obtenidos para cada clase resistente en el sistema internacional europeo. Para ello se debe afectar al valor hallado para la resistencia a flexión, percentil 5%, por los coeficientes que surgen de las prescripciones de la norma UNE-EN 384:2010 en cuenta a la cantidad y tamaño de las muestras.

La norma UNE-EN 384:2010 contempla, para el caso en que no disponga de resultados de ensayos de probetas de dimensiones reales de uso, la determinación de algunos valores característicos de propiedades mecánicas y de rigidez a partir de una serie de expresiones en función de la resistencia a flexión, el módulo de elasticidad y la densidad. Se utilizaron las expresiones correspondientes a coníferas en virtud que la norma UNE-EN 338:2010 define las clases resistentes para las coníferas y el chopo (álamo) en forma conjunta.

La Tabla 8 presenta un resumen de los valores de las propiedades mecánicas, propiedades de rigidez y densidad para las tres clases resistentes. Se debe recordar que la clase 3 está compuesta por el rechazo de las otras por lo que no califica para uso estructural.

Tabla 8: valores de las propiedades para cada clase resistente de acuerdo a la propuesta de clasificación visual

		CLASE 1	CLASE 2	CLASE 3
PROPIEDADES RESISTENTES (N/mm²)				
Resistencia a la flexión característica (1)	$f_{m,k}$	24	19	15
Resistencia a la tracción paralela característica (2)	$f_{t,0,k}$	15	12	9
Resistencia a la tracción perpendicular característica (2)	$f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4
Resistencia a la compresión paralela característica (2)	$f_{c,0,k}$	21	19	17
Resistencia a la compresión perpendicular característica (2)	$f_{c,90,k}$	3	3	2
Resistencia al cortante paralelo característica (2)	$f_{v,k}$	4	3	3
PROPIEDADES DE RIGIDEZ (N/mm²)				
Módulo de elasticidad local paralelo medio (1)	$E_{0,l, medio}$	9.940	9.946	9.338
Módulo de elasticidad global paralelo medio (1)	$E_{0,g, medio}$	9.747	9.357	8.786
Módulo de elasticidad local paralelo percentil 5% (1)	$E_{0,l, 05}$	8.316	7.555	7.084
Módulo de elasticidad global paralelo percentil 5% (1)	$E_{0,g, 05}$	7.825	6.727	7.326
Módulo de elasticidad global perpendicular medio (2)	$E_{90,l, medio}$	325	312	293
Módulo cortante medio (2)	G_{medio}	609	585	549
DENSIDAD (Humedad 12%) (Kg/m³)				
Densidad característica (1)	δ_{05}	361	359	350
Densidad media (1)	δ_{medio}	401	404	402
(1) Determinado experimentalmente				
(2) Determinado por aplicación de la Norma UNE-EN 384:2010				

Los valores obtenidos para la resistencia a la flexión en las clases 1 y 2 son los exigidos por la Norma UNE-EN 338:2010 para ser incluidas en las clases C24 y C18, lo mismo ocurre con la densidad, pero al analizar el módulo de elasticidad se observa que califica para las clases C22 y C18, por lo que podemos expresar que los resultados obtenidos permitirían encuadrar este clon en las clases C22 y C18 con los criterios de clasificación visual que se establecen en la Tabla 5. La Norma UNE-EN 1912-2005+A4 establece para ciertos clones el Chopo (álamo) de Francia las clases C24 y C18 con las pautas de clasificación de la Norma Francesa 52001-1 ST II y ST-III. El Esquema de Norma IRAM 9662-4 para tablas aserradas de *Populus deltoides*, clones Australiano 129/60 y Stoneville 67, cultivados en el Delta del Río Paraná, presenta valores resistencia y módulo de elasticidad similares, pero una densidad mayor.

3.6. Comparación de las propiedades estructurales del *Populus* con las que se presentan para otras especies en el Suplemento 1 del Reglamento CIRSOC 601

Se confeccionó la Tabla 9 a los efectos de establecer una comparación con los valores de las propiedades resistentes y de rigidez propuestas para vigas aserradas en el Suplemento 1 del Reglamento Argentino de Estructuras de Madera CIRSOC 601. Para incorporar a la misma los valores presentados en la tabla 8 se afectó la resistencia a la flexión de un coeficiente de seguridad de “2” y de un coeficiente por duración de la carga de “1,6”; al módulo de elasticidad se lo afectó de un coeficiente de 0,86 para ajustar el valor a la humedad de referencia del 19%. Los coeficientes aplicados son para ajustar los valores de las condiciones de ensayo a las condiciones de referencia que adopta el CIRSOC 601.

Tabla 9. Comparación de las propiedades resistentes del *Populus* con los valores para otras especies presentados en el CIRSOC 601

ESPECIE	CLASE 1			CLASE 2			CLASE 3		
	f_m	E_m	δ	f_m	E_m	δ	f_m	E_m	δ
	N/mm ²	N/mm ²	Kg/m ³	N/mm ²	N/mm ²	Kg/m ³	N/mm ²	N/mm ²	Kg/m ³
<i>Araucaria angustifolia</i>	10,6	13.339	443	6,6	11.421	390	5,03	10.002	387
<i>Eucalyptus grandis</i>	9,4	12.040	430	7,5	10.750	430	5,63	9.976	430
<i>Pinus taeda</i> y <i>elliottii</i>	6,2	7.740	420	3,2	6.450	390	-	-	-
<i>Populus Australiano</i> 129/60	7,5	8.548	361	5,9	8.554	361	4,69	8.031	361

Se puede apreciar que las propiedades resistentes y de rigidez del *Populus deltoides* Australiano 129/60 cultivado en el Delta del Río Paraná son superiores a las del *Pinus taeda* y *Pinus elliottii*, pero inferiores a las del *Eucalyptus grandis* y las de la *Araucaria angustifolia*.

4. CONCLUSIONES

Es importante la afectación de las piezas por el ataque de insectos y los valores de rotura en las secciones afectadas por este defecto resultan muy bajos, considerando además que resulta muy difícil valorar el deterioro de la sección en función de los orificios que se presentan en las caras no se deben admitir para uso estructural elementos que presentes signos de esta afectación.

Se confirmó la influencia la nudosidad y la presencia de médula en la resistencia a flexión de los elementos estructurales ejecutados con madera de *Populus deltoides* Australiano 129/60.

La influencia la nudosidad y la presencia de médula en el módulo de elasticidad de los elementos estructurales ejecutados con madera de *Populus deltoides* Australiano 129/60 resulta menos significativa que para la resistencia a flexión.

El módulo de elasticidad global presenta valores en un 6% inferiores a los del módulo de elasticidad local por la influencia de la deformación generada por el esfuerzo de corte.

Es posible diseñar un método de clasificación visual que permita obtener una mejora en las propiedades resistentes del clon con un rendimiento razonable y descarte inferior al 27%.

Los valores de las propiedades resistentes obtenidas mediante la clasificación visual permiten insertar a la madera aserrada de la especie estudiada en las clases C22 y C18 del sistema internacional adoptado por de la Norma UNE-EN 338:2010

Los elementos estructurales ejecutados con madera de *Populus deltoides* Australiano 129/60 califican para uso estructural y resulta razonable proponer su incorporación al Suplemento 1 del Reglamento Argentino de Estructuras de Madera CIRSOC 601, aunque sería muy interesante aumentar la base estadística a través de la realización de un mayor número de ensayos.

5. AGRADECIMIENTOS

Al Ingeniero Roberto Manavella, graduados y alumnos del Grupo GIDEC (Grupo de Investigación y Desarrollo de Estructuras Civiles) de la Facultad Regional Venado Tuerto de la

Universidad Tecnológica Nacional por su invaluable colaboración en el ensayo de los elementos estructurales.

Al Ingeniero Miguel Tortoriello, al Técnico Luis Seewald y alumnos de la Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires por inestimable colaboración en el ensayo de una serie de tablas.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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
- Castro G. 2006. Usos actuales y posibilidades futuras de la madera de álamo. Jornadas de Salicáceas 2006
- Denzler J.K. and Glos P. (2008) Size effects in bending. 41th Meeting, International Council for Reserarch and Innovation in Building and Construcction, Working Commission W18 – Timber Structures, CIB-W18, Paper 41-6-4, St. Andrews, Canada.
- Denzler J.K., Stapel P., Glos P. (2008) Relationship between global und local MOE. International council for research and innovation in building and construction CIB-W18/41-10-3, St. Andrews, Canada.
- GlosP .1995a Lectura A6 Solid Timber. Strenght Grading. Timber Engineering Step 1. First Edition, Centrum Hout, The Netherlands.
- GlosP .1995b Lectura A7 Solid Timber. Strenght Classes. Timber Engineering Step 1.FirstEdition, 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.A., Manavella R.D., Filippetti M.C., Diab J., (2012) Propiedades Estructurales de la madera de *Araucaria Angustifolia* procedente de bosques implantados. XXXV Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, Río de Janeiro. Brasil
- Hermoso E, Fernández-Golfín JJ, Díaz MR. 2002.“Análisis del factor de altura Kh, en madera aserrada de estructural de pino silvestre”. Invest. Agr.: Sist. Recur. For. Vol. 11 (2)
- Hermoso Prieto E. (2001) Caracterización mecánica de la madera estructural de *Pynussylvestris* L.. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Madrid.
- Hoffmeyer P. (1995) Wood as a building material. In Timber Engineering STEP 1, pp. A4/1-A4/21. Centrum Hout, The Netherlands.
- Newlin JA y Trayer GW (1924). Form factors of beams subjected to transverse loading only. United Status National Advisory Committeefor Aeronautics Report No. 181.
- Piter J.C. (2003a) Clasificación por resistencia de la Madera aserrada como material estructural. Desarrollo de un método para el Eucaliptos grandis de Argentina. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ingeniería.
- Piter J.C., Zerbino R. L., Blaß H. J (2003b) Relationship between global and local Modulus of Elasticity in beams of Argentinean *Eucalyptus grandis*. Maderas: Ciencia y Tecnología 5(2): 107-116.
- Piter J.C., Zerbino R. L., Blaß H. J (2004). Visual strength grading of Argentinean *Eucalyptus grandis*. Strength, stiffness and density profiles and corresponding limits for the main grading parameters. Holz Roh Werkst 62:1-8 DOI 10.1007/s00107-003-0433-2. 2004

- Piter J.C. (2012) Size effect on bending strength in sawn timber of fast-growing Argentinean *Eucalyptus grandis*. Analysis according to the criterion of European standards. *European Journal of Wood and Wood Products* 70(1): 17-24
- Agencia Española de Normalización y Certificación. (2010). Madera estructural. Clases resistentes. UNE-EN 338:2010. Madrid.
- Agencia Española de Normalización y Certificación. (2010). Determinación de los valores característicos de las propiedades y la densidad. UNE-EN 384:2010. Madrid.
- Agencia Española de Normalización y Certificación. (2011). Madera aserrada y madera unilaminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. UNE- EN 408:2011. Madrid.
- Agencia Española de Normalización y Certificación. (1997). Madera aserrada y madera en rollo. Método de medida de singularidades. UNE-EN 1310:1997. Madrid.
- Agencia Española de Normalización y Certificación. (2006). Estructuras de madera. Madera estructural con sección transversal rectangular clasificada por su resistencia. Parte 1: Requisitos generales. UNE-EN 14081-1:2006. Madrid.
- Agencia Española de Normalización y Certificación. (2010). Madera estructural. Asignación de calidades visuales y especies. UNE-EN 1912:2005+A4. Madrid.
- American Forest & Paper Association .American Wood Council.(2005) National Design Specification for Wood Construction. NDS 2005 Washington DC. USA
- European Comité for Standardization (2009).Structural timber – Strength classes. EN 338:2009. Brussels
- European Comité for Standardization (2010).Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties. EN 408:2010. Brussels
- European Committee for standardization (2005) Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General – Comon rules and rules for buildings. EN 1995-1-1 (2005), Brussels.
- Instituto Nacional de Tecnología Industrial. Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad en Obras Civiles. (2011). Reglamento Argentino de Estructuras de Madera (en etapa de discusión pública). CIRSOC 601. Buenos Aires
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2005). Madera laminada encolada estructural. Parte 1: Clases de resistencia y requisitos de fabricación y de control.. IRAM 9660-1. Buenos Aires.
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2005). Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por Resistencia. Parte 1: Tablas de pino Paraná (*Araucaria angustifolia*). IRAM 9662-1. Buenos Aires.
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2005). Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por Resistencia. Parte 2: Tablas de *Eucalyptus grandis*. IRAM 9662-2. Buenos Aires
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2005). Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por Resistencia. Parte 3: Tablas de Pino taeda - *elliotti*. IRAM 9662-3. Buenos Aires
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2014). Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por Resistencia. Parte 4 – Tablas de álamo ‘australiano 129/60’ y ‘Stoneville 67’ (*Populus deltoides*). Esquema IRAM 9662-4. Buenos Aires
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2002). 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. IRAM 9670. Buenos Aires
- International Organization for Standardization (E.) Wood - Determination of moisture content for physical and mechanical tests. ISO 3130 (1975)
- International Organization for Standardization (E). Wood - Determination of density for physical and mechanical tests. ISO 3131 (1975).