

CLASIFICACIÓN MECÁNICA DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE MADERA DE POPULUS DELTOIDES

Guillaumet, Alfredo Aníbal (1); Filippetti, María Cecilia (2); Manavella Roberto Daniel (3)
(1) y (2) Ing. en Construcciones; (3) Ingeniero Civil
(1) y (2) GIDEC UTN FRVT y UNNOBA; (3) GIDEC UTN FRVT.
aaguillaumet@frvt.utn.edu.ar

RESUMEN

La madera es un material cuyas propiedades resistentes varían con la especie, el lugar de cultivo y el tratamiento silvícola. La clasificación visual permite mejorar su uso estructural, pero su aplicación está sujeta al criterio del evaluador y la dificultad para evaluar todos los parámetros que influyen en la resistencia. La clasificación mecánica es una alternativa más costosa pero más confiable. En este trabajo se presentan y se discuten los resultados de modelos mecánicos para clasificar madera, su comparación con los resultados obtenidos mediante una clasificación visual y con los valores experimentales. Los modelos para la clasificación mecánica se diseñaron en base al módulo de elasticidad, la nudosidad y la densidad. El programa empírico se realizó sobre 834 elementos estructurales de *Populus deltoides*, provenientes de bosques implantados en el delta del río Paraná, ensayados a flexión según la norma UNE-EN 408:2011. La clasificación visual se realizó de acuerdo a la norma IRAM 9663/4. La clasificación mecánica permitió alcanzar una mayor eficiencia en la predicción de la resistencia, con un 98% de aciertos en el grado superior y un 100% en el inferior, mientras que para la clasificación visual solo se alcanzaron valores de un 57% y un 32% respectivamente.

ABSTRACT

*Wood is a material whose resistant properties vary with the species, the growing area and the silvicultural treatment. The visual classification allows us to improve its structural use but its application is subjected to the tester's criterion and to the difficulty to evaluate all the parameters that affect resistance. Mechanical classification is a more expensive but more reliable alternative. In this paper, we present and discuss the results of mechanical models for classifying wood, comparing them with the results obtained through a visual classification and with the experimental values. The models for the mechanical classification were designed based on the modulus of elasticity, knot ratio and density. The empirical program was carried out on 834 structural elements of *Populus deltoides*, from forests implanted in the Paraná River delta, that were tested on flexion according to the UNE-EN 408:2011. The visual classification was carried out according to the IRAM 9663/4 standard. The mechanical classification allowed us to reach a greater efficiency in the prediction of resistance with 98 per cent of correct answers in the superior degree and 100 per cent in the inferior one, while for the visual classification only values of 57 per cent and 32 per cent were reached respectively.*

1. Introducción

La madera es un material natural que presenta grandes variaciones de su calidad, en función de la especie, tratamiento silvicultural y condiciones ambientales. Las propiedades no solo varían de un árbol a otro, sino también dentro del árbol en función de la altura y la distancia a la médula (Glos 1995)¹. Los desarrollos para obtener mejores propiedades en la madera condujeron a hibridaciones y clonaciones, por lo que debe definirse claramente no solo la especie de la que proviene la madera en estudio sino su hibridación o clonación si fuera el caso. Las propiedades estructurales de la madera no solo están afectadas por las características mencionadas precedentemente, sino también por las singularidades que presente (presencia de médula, dimensiones de los nudos, inclinación de las fibras, afectación por hongos o insectos, rectitud del tronco, dimensión de los anillos de crecimiento, entre otras) y el trabajo de aserrado que provoca cortes en las fibras. Todo ello conduce a grandes variaciones en las propiedades resistentes y al definir la resistencia característica como 5%-percentil inferior, toda la muestra se encuentra condicionada por los elementos más débiles, desaprovechando las propiedades mayores del 95% de la población.

Argentina es un país sin tradición en la construcción con madera, por ello se impone resaltar el advenimiento de las primeras normas IRAM de clasificación visual en los años 2002 y 2006 como consecuencia del trabajo de un conjunto investigadores y empresas del sector. La clasificación visual contribuyó a mejorar el uso estructural de la madera aserrada, normas IRAM 9662/1/2/3/4 y de la madera laminada encolada estructural, IRAM 9660/1.

En el año 2013 se culminó la redacción del primer Reglamento Argentino de Estructuras de Madera CIRSOC 601² (basado en las NDS 2005³), el mismo fue aprobado por la Secretaría de Obras Públicas de la Nación en el año 2016. La versión actual está redactada en base al diseño en tensiones admisibles, pero existe la intención de presentar una versión para el diseño en estados límites. El reglamento presenta un suplemento con los valores de las propiedades estructurales de las cuatro especies forestales estudiadas a la fecha, en todos los casos existe la referencia del método de clasificación visual propuesto para cada una de ellas. El desarrollo de códigos para la seguridad de las estructuras de madera como el Eurocódigo 5⁴ o las National Design Specification (NDS) for Wood Construction³, basados en el diseño en estados límites de cargas y servicio, exigen valores confiables de las propiedades estructurales la madera.

La clasificación visual presenta dos inconvenientes respecto a su confiabilidad. Uno en relación a la capacidad y precisión del operario para evaluar las singularidades apreciables a simple vista y decidir el grado resistente; y el otro la capacidad de predecir con justeza las propiedades estructurales del elemento sobre la base de estas singularidades. La clasificación mecánica por resistencia se presenta como una alternativa superadora a esta problemática. Distintos autores refieren que la clasificación sobre la base de parámetros mecánicos, permite alcanzar mayores rendimientos y grados de calidad que los visuales, con una mayor confiabilidad, (Glos 1995)¹, (Diebold y Glos 1994)⁵. La ventaja de la clasificación visual es que resulta menos costosa su aplicación y la calidad de una pieza puede modificarse en

una inspección de revisión, aún en su posición definitiva de uso, mientras que con la clasificación mecánica esto no es posible

Se han desarrollado distintos modelos de máquinas para clasificar madera de uso estructural, (Görlacher 1997)⁶, (Diebold 1997)⁷. El módulo de elasticidad es el parámetro que presenta una de las más altas correlaciones con la resistencia, por ello es uno de los parámetros más utilizados (Piter 2003)⁸, (Fank 2017)⁹. La denominada máquina de flexión tiene dos formas de trabajar, durante el pasaje de la pieza de madera provoca una deformación constante y mide la fuerza necesaria para alcanzarla o aplica una fuerza constante y registra la deformación, todo ello a intervalos regulares y sobre longitudes en general entre 0,50 m. y 1,20 m. (Glos 1995)¹. La flexión se realiza sobre el eje de menor inercia.

La combinación de parámetros ha permitido mejorar la capacidad para predecir la resistencia. La combinación de módulo de elasticidad con la medición de los nudos y la incorporación de la densidad ha permitido esa mejora (Glos 1995¹; Dávalos Sotelo et al 2009¹⁰; Hanhijärvi et al 2008¹¹; Casado et al 2010¹²; Fank et al 2016⁹). La presencia de los nudos puede determinarse por escaneo óptico de las cuatro caras de la pieza (Roblot et al 2010)¹³ y la densidad por medición del peso o la radiación, también es posible determinar el contenido de humedad (Glos 1995)¹. En la medida que aumenta la precisión de la máquina y la determinación de más parámetros aumenta el costo.

El álamo, *Populus deltoides*, se inserta en la familia de las salicáceas y constituye el tercer cultivo forestal en importancia de Argentina, siendo precedido por el de pinos y eucaliptos (Achinelli et al. 2004)¹⁴. Las condiciones de clima del Delta del río Paraná permitió implantar más de 20 clones, pero de acuerdo a los resultados obtenidos los más recomendados son: 'Australiano 129/60', 'Australiano 106/60' y "Stoneville 67" (Borodowski 2006)¹⁵.

El uso estructural de la madera obtenida de estos dos clones fue impulsado por el sector productivo regional vinculado con la elaboración de madera aserrada y laminada encolada, el cual fue acompañado por el sector académico-científico del país. En los últimos años se llevaron a cabo investigaciones orientadas a conocer el comportamiento físico-mecánico de este material y a evaluar su rendimiento técnico y económico (Guillaumet et al. 2014a¹⁶, b¹⁷; Ramos et al. 2014a¹⁸, b¹⁹). También se han publicado resultados que comparan el comportamiento estructural de la madera de estos clones con el del pino resinoso (Fank et al. 2014)²⁰, siendo esta última una especie de referencia por su importancia en el país.

Nuevos clones están siempre en análisis, entre el año 2015 y 2017, el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) remitió para su inscripción cinco nuevos clones de álamo, 'Guayracá INTA', 'Ñacuturú INTA', 'Paycarabí INTA', 'Hovyú INTA' y "Pytá INTA". Los cuatro primeros ya han sido aprobados mientras que el quinto se encuentra aún en proceso de inscripción. Las propiedades físicas y mecánicas (en piezas libres de defectos) son similares a otros clones de *Populus deltoides* e indican que podrían ser utilizados como madera sólida o triturada (Cortizo et al 2017)²¹.

La utilización de la madera en la construcción tiene una gran importancia en la sustentabilidad de las mismas, dado que es un material que cumple un ciclo de vida

amigable con el medio ambiente. Durante su crecimiento la madera acumula importantes cantidades de CO₂ y lo mantiene almacenado hasta su destrucción. La madera aserrada se constituye en un reservorio de carbono y su procesamiento requiere mucha menos energía que el resto de los materiales de construcción, aunque no es simple cuantificar estos valores con precisión porque dependen de los distintos procesos industriales, pero para dar un orden de magnitud se puede expresar que la energía primaria contenida, en kWh/m³, por material es la siguiente: madera aserrada 350, madera encolada 1200, cemento 1750, hormigón 700, acero 46000 y aluminio 141500 (Vihavainen 1995)²².

Este trabajo compara el rendimiento y la precisión en la predicción de la resistencia a la flexión de la clasificación visual, de acuerdo a la norma IRAM 9662/4, y dos modelos de clasificación mecánica. El trabajo se realizó sobre 834 probetas de dimensiones estructuras de *Populus deltoides*, clones 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67' cultivados en el delta del Río Paraná.

2. Desarrollo experimental

2.1. Material

El material experimental se seleccionó al azar de tres plantaciones en la zona del Delta del Río Paraná, en la provincia de Buenos Aires, Argentina. Las plantaciones uno y dos corresponden al clon 'Australiano 129/60', mientras que la tercera al clon 'Stoneville 67'. En los tres cultivos, las prácticas silviculturales y las edades de corte fueron representativas de la población a analizar. En la Tabla 1 se presentan las características de las 10 muestras, que totalizan 843 cuerpos de prueba.

Muestra	Clon	Cantidad n	Dimensiones nominales			Plantación N°	Edad años
			base mm	Altura mm	Largo mm		
1	A	296	100	25	500	1	13
2	A	48	50	75	2000	1	13
3	A	65	25	100	2000	1	13
4	A	49	50	100	2000	1	13
5	A	44	50	150	3000	2	13
6	S	150	100	25	500	3	16
7	S	48	50	75	2000	3	16
8	S	49	25	100	2000	3	16
9	S	49	50	100	2000	3	16
10	S	45	50	150	3000	3	16

A: *Populus deltoides* clon 'Australiano 129/60'; S: *Populus deltoides* clon 'Stoneville 67'

Tabla 1: Detalle de los cuerpos de prueba utilizados

Después de cepillados, los cuerpos se colocaron en una cámara de estabilizado a una temperatura de 20+/-2 °C y una humedad relativa ambiente de 65+/-5 %.

2.2. Método de ensayo.

Los parámetros visuales fueron registrados conforme al criterio de las normas UNE-EN 1310:2007²³, UNE-EN 14081:2006²⁴ e IRAM 9662/4:2015²⁵. El material fue clasificado visualmente por resistencia según el método adoptado por la norma IRAM 9662/4:2015²⁵. De acuerdo a lo especificado en la mencionada norma, la nudosidad “K” se determinó como la relación entre la dimensión del nudo mayor o agrupamiento de nudos medido entre líneas tangentes al eje de la pieza y la dimensión transversal de la cara donde se manifiesta. Se relevó la presencia de médula y la inclinación de las fibras. Para medir la inclinación de las fibras se utilizó un trazador como se describe en la norma UNE-EN 1310:2007²³. No se determinó la dimensión de los anillos de crecimiento por no ser apreciables a simple vista y por ello la norma IRAM 9662/4:2015²⁵ no la incluye en el método de clasificación visual. La norma establece como límites principales a la hora de clasificar visualmente la madera de *Populus* los siguientes: a) para el grado superior no se admite médula, la nudosidad “K” debe ser menor a 1/3 y la inclinación de las fibras menor 11,1%; b) para el grado inferior se admite médula, la nudosidad “K” debe ser menor a 2/3 y la inclinación de las fibras menor 11,1%; y c) como descarte las piezas que no cumplen las condiciones anteriores.

Los ensayos se realizaron de acuerdo a las prescripciones de la norma UNE-EN 408:2011²⁶. Los apoyos se separaron una distancia de 18 veces la altura media de la serie a ensayar. El apoyo de la izquierda funcionó como apoyo fijo articulado y el de la derecha como apoyo móvil. Las cargas se aplicaron en la parte superior de las piezas, centradas y separadas entre sí una distancia de 6 veces la altura. El dispositivo de ingreso de las cargas funcionó articulado para acompañar la deformación de las piezas. La distribución de las cargas se realizó a través de un perfil doble Te. La aplicación de las cargas se realizó por medio de un cilindro hidráulico accionado desde una central con la capacidad de ajustar la velocidad del ensayo a los requerimientos de la norma. En ningún caso la velocidad superó los “0,003 x h” (h: altura de la pieza en el plano de flexión). Entre el perfil que distribuye las cargas y la celda de cargas se interpuso una rótula. La Figura 1 ilustra el ensayo de una pieza.

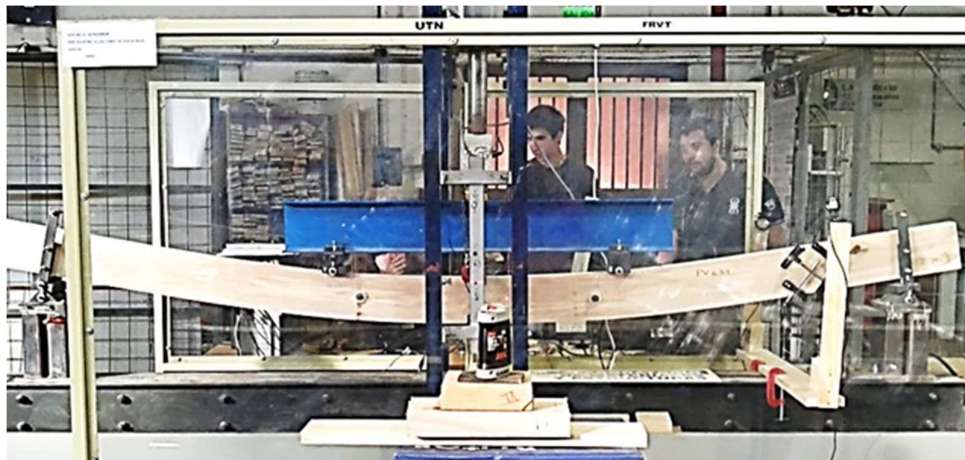


Figura 1: Ensayo de una pieza

La medición de las cargas se realizó a través de celdas de carga, de 20 kN y 50 kN de acuerdo a la carga máxima estimada. Para las deformaciones globales se midió la flecha en el centro de la luz con un comparador digital de carrera 50 mm con precisión de 0,01 mm.

Para la determinación del módulo de elasticidad global se utilizó la expresión (1) de la norma UNE-EN 408:2011²⁶.

$$E_{m,g} = \frac{3 a l^2 - 4 a^3}{2 b h^3 \left(2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6 a}{5 G b h} \right)} \quad (1)$$

$E_{m,g}$	Módulo de elasticidad global en newton por milímetro cuadrado
a	Distancia entre el punto de carga y apoyo más próximo, en milímetros.
l	Longitud de flexión entre apoyos, en milímetros.
b	Anchura de la sección, en milímetros.
h	Altura de la sección, en milímetros.
G	Módulo de elasticidad transversal en newton por milímetro al cuadrado.
$F_2 - F_1$	Incremento de carga en la recta de regresión con un coeficiente de correlación superior a 0,99 con las deformaciones, en newton.
$w_2 - w_1$	Incremento de deformación correspondiente a $F_2 - F_1$, en milímetros.

Para el módulo de elasticidad transversal se utilizó el valor $G = 650 \text{ N/mm}^2$.

Para la determinación de la resistencia a la flexión se utilizó la expresión (2) de la norma UNE-EN 408:2011²⁶.

$$f_m = \frac{3 F a}{b h^2} \quad (2)$$

f_m	Resistencia a la flexión, en newton por milímetro cuadrado.
a	Distancia entre el punto de carga y apoyo más próximo, en milímetros.
b	Anchura de la sección, en milímetros.
h	Altura de la sección, en milímetros.
F	Carga máxima, en newton.

La determinación de la humedad y densidad aparente de las probetas se realizó inmediatamente después de finalizado el ensayo correspondiente. Se efectuó sobre

un trozo de sección completa y libre de nudos, extraído de la zona cercana a la rotura. Para la compresión perpendicular a las fibras se realizó sobre la probeta completa. Se respetaron los procedimientos descriptos en las normas UNE-EN 408:2011²⁶, ISO 3131:1975²⁷ e ISO 3130:1975²⁸.

3. Análisis de resultados

3.1 Resultados de los ensayos a flexión

En la Tabla 2 se presentan los valores de resistencia a la flexión (f_{150}) para cada una de las diez muestras sin clasificar. Los valores están ajustados a la altura de referencia de 150 mm de acuerdo a las prescripciones de la norma UNE-EN 384:2010²⁹. Los valores medios de cada muestra varían entre 35,5 N/mm² y 41,4 N/mm², con un coeficiente de variación entre el 14 % y el 33%. Se debe destacar que los valores medios para cada clon, muestras 1 a 5 para el clon 'Australiano 129/60' y 6 a 10 para el clon 'Stoneville 67', presentan valores muy similares 38,0 N/mm² y 38,3 N/mm².

Clon	Muestra	Mínimo N/mm ²	Medio N/mm ²	Máximo N/mm ²	COV %	n
A	1	19,5	38,4	55,6	18	287
	2	25,8	37,3	45,7	14	48
	3	16,5	35,5	50,3	26	65
	4	18,0	38,1	59,5	25	49
	5	18,4	39,9	58,6	24	44
	1 a 5	16,5	38,0	59,5	20	493
S	6	17,9	36,3	52,0	20	150
	7	22,2	41,1	63,5	27	48
	8	15,6	41,4	67,3	26	49
	9	18,2	40,4	60,9	27	49
	10	16,2	36,6	62,0	33	45
	6 a 10	15,6	38,3	67,3	23	341
Ambos		15,6	38,1	67,3	16	834

La resistencia a la flexión está ajustada a la altura de referencia de 150 mm según UNE-EN 384:2010. COV: coeficiente de variación, n: número de piezas. "A": clon 'Australiano 129/60'. "S": clon 'Stoneville 67'.

Tabla 2: Resistencia a la flexión por muestra

En la tabla 3 se presentan los valores de módulo de elasticidad global ($E_{m,g}$) para cada una de las diez muestras sin clasificar. Los valores están corregidos a la humedad de referencia del 12% de acuerdo a las prescripciones de la norma UNE-EN 384:2010²⁹. Los valores medios de cada muestra varían entre 9.562 N/mm² y 12.777 N/mm², con un coeficiente de variación entre el 11 % y el 17%. Se debe destacar que los valores medios del clon 'Australiano 129/60', muestras 1 a 5, son inferiores a los del clon 'Stoneville 67', muestras 6 a 10, con valores de 9.993 N/mm² y 11.315 N/mm² respectivamente.

Clon	Muestra	Mínimo N/mm ²	Medio N/mm ²	Máximo N/mm ²	COV %	n
A	1	4.699	10.185	13.436	15	287
	2	7.276	9.587	13.216	13	48
	3	7.197	9.562	11.956	12	65
	4	6.842	10.040	13.705	12	49
	5	7.507	9.851	12.867	12	44
	1 a 5	4.699	9.993	13.705	14	502
S	6	4.735	10.254	15.167	17	150
	7	7.875	11.977	14.973	12	48
	8	9.673	12.777	16.110	15	49
	9	8.663	12.198	14.982	11	49
	10	9.885	11.593	14.208	11	45
	6 a 10	4.735	11.315	16.110	17	341
Ambos		4.699	10.528	16.110	17	843

El módulo de elasticidad global (UNE-EN 408:2011) está ajustado a la humedad de referencia del 12% según la norma UNE-EN 384:2010. COV: coeficiente de variación, n: número de piezas. "A": clon 'Australiano 129/60'. "S": clon 'Stoneville 67'.

Tabla 3: Módulo de elasticidad global por muestra

En la tabla 4 se presentan los valores de densidad (ρ) para cada una de las diez muestras sin clasificar. Los valores están corregidos a la humedad de referencia del 12% acuerdo a las prescripciones de la norma UNE-EN 384:2010. Los valores medios de cada muestra varían entre 392 Kg/m³ y 478 Kg/m³, con un coeficiente de variación entre el 6 % y el 11%. Se debe destacar que los valores medios del clon 'Australiano 129/60, muestras 1 a 5, son inferiores a los del clon 'Stoneville 67', muestras 6 a 10, con valores de 408 Kg/m³ y 461 Kg/m³ respectivamente.

Clon	Muestra	Mínimo Kg/m ³	Medio Kg/m ³	Máximo Kg/m ³	COV %	n
A	1	347	406	517	6	287
	2	327	392	438	6	48
	3	326	402	550	9	65
	4	344	397	446	6	49
	5	398	461	519	6	44
	1 a 5	326	408	550	8	497
S	6	374	465	575	10	150
	7	400	478	602	11	48
	8	361	460	539	9	49
	9	392	465	567	6	49
	10	381	426	489	6	45
	6 a 10	361	461	602	10	341
Ambos		326	429	602	11	838

La densidad está ajustada al valor de referencia del 12% según la norma UNE-EN 384:2010, COV: coeficiente de variación, n: número de piezas. "A": clon 'Australiano 129/60'. "S": clon 'Stoneville 67'.

Tabla 4: Densidad en kg/m³ por muestra

3.2. Resultados de la clasificación visual.

De acuerdo a condiciones establecidas en la norma IRAM 9662/4:2015²⁵ se divide a la muestra en tres calidades resistentes, superior, inferior y descarte. Considerando que ambos clones se comercializan en conjunto, que la norma mencionada los trata de la misma manera y que los análisis estadísticos no arrojaron diferencias substanciales en las propiedades estructurales entre ambos, se considera razonable analizarlos como una sola muestra. La Tabla 5 presenta los valores de resistencia a la flexión, módulo de elasticidad y densidad para ambos clones en conjunto clasificados de acuerdo a la norma mencionada.

Propiedades	Unidades	Grados Resistentes		
		Superior	Inferior	Descarte
Resistencia a la flexión percentil 5 %	N/mm ²	27,3	23,3	17,4
Módulo de Elasticidad global percentil 5%	N/mm ²	8.333	7.779	7.223
Módulo de Elasticidad global medio	N/mm ²	10.841	10.485	9.333
Densidad percentil 5%	kg/m ³	367	370	357
Densidad valor medio	kg/m ³	425	433	434
Cantidad de piezas	n	398	351	85
Clase resistente según UNE-EN 338		C24	C20	C14

La resistencia a la flexión está ajustada a la altura de referencia de 150 mm de acuerdo a las prescripciones de la norma UNE-EN 384:2010. El módulo de elasticidad global (UNE-EN 408:2011)²⁶ está ajustada a la humedad de referencia del 12 % de acuerdo a las prescripciones de la norma UNE-EN 384:2010²⁹. La densidad está ajustada a la humedad de referencia del 12 % de acuerdo a las prescripciones de la norma UNE-EN 384:2010²⁹.

Tabla 5: Valor de las propiedades por grado resistente

Diseño de un método de clasificación mecánico

Para diseñar un método de clasificación se analiza la correlación entre la resistencia a la flexión y el resto de los parámetros identificables a través de una máquina. La Tabla 6 presenta las correlaciones entre la resistencia a la flexión, el módulo de elasticidad, la densidad y la nudosidad.

Clon	$E_{m,g}$	ρ	K
	R (n)	R (n)	R (n)
A	0,63 (493)	0,14 (493)	-0,48 (493)
S	0,59 (341)	0,22 (341)	-0,28 (341)
Todas	0,57 (834)	0,16 (834)	-0,38 (834)

“A”: clon ‘Australiano 129/60’. “S”: clon ‘Stoneville 67’. S.; $E_{m,g}$: Módulo de elasticidad de acuerdo a la UNE-EN 408:2011²⁶. ρ : densidad. K: dimensión del nudo en porcentaje de la cara donde se manifiesta. R. coeficiente de correlación. (n): número de piezas

Tabla 6: Correlación entre los valores de resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad, la densidad, la nudosidad “K”.

Se puede apreciar una correlación moderadamente fuerte con el módulo de elasticidad, relativamente débil con la nudosidad y relativamente muy débil con la densidad.

La Figura 1 muestra la correlación entre la resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad por clon, se puede apreciar la mayor correlación del clon 'Australiano 129/60'.

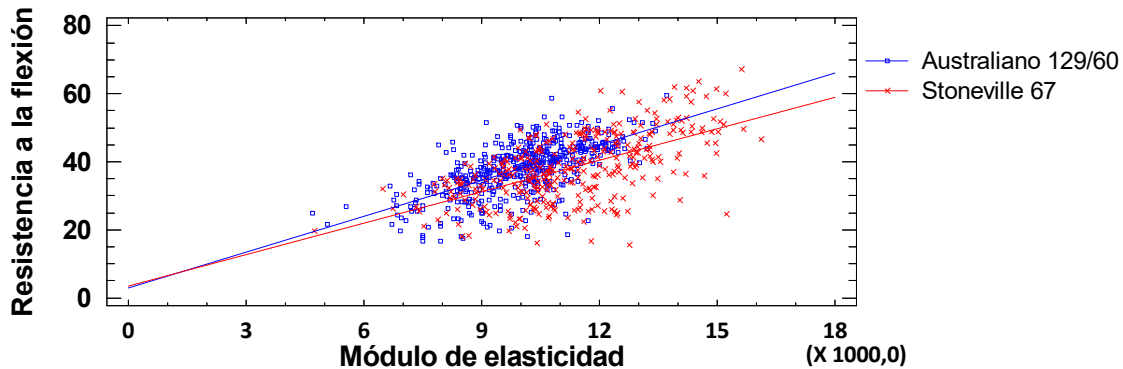


Figura 1: Correlación entre la resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad por clon

La Figura 2 muestra la correlación entre la resistencia a la flexión y la nudosidad por clon, se puede apreciar la mayor correlación del clon 'Australiano 129/60'.

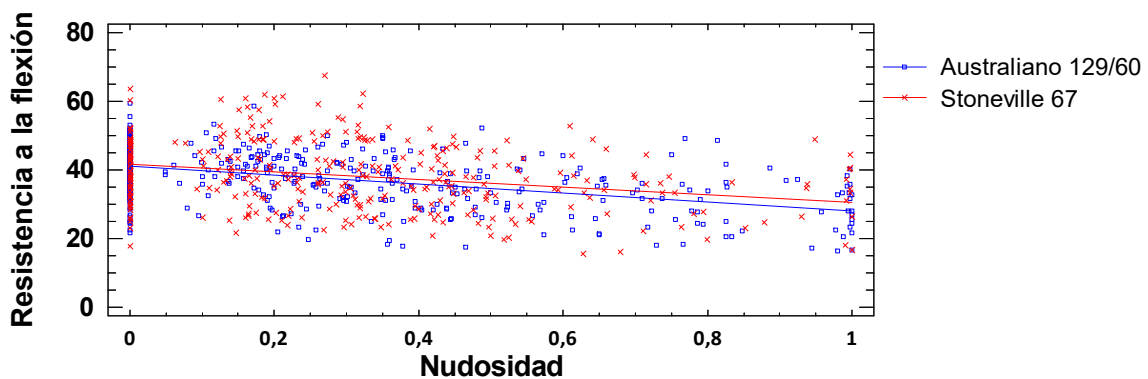


Figura 2: Correlación entre la resistencia a la flexión y la nudosidad por clon

Al efectuar un análisis de regresión múltiple, considerando como variable dependiente la resistencia a la flexión (f_{150}) y variables independientes el módulo de elasticidad global ($E_{m,g}$), la nudosidad (K) y a la densidad (ρ), se obtiene para la densidad un P-valor=0,929; que indica que el término que la incluye no es estadísticamente significativo y puede eliminarse. Se realiza el análisis del modelo así simplificado y se obtiene la ecuación (3):

$$PC = 13,171 - 8,800 \times K - 0,00259 E_{m,g} \quad (3)$$

PC: parámetro combinado.

K: nudosidad medida entre paralelas a las aristas en porcentaje de la cara donde se

manifiesta.

$E_{m,g}$ módulo de elasticidad global, en N/mm².

La aplicación de modelo genera un estadístico R-Cuadrada de 40,5%. La Tabla 7 presenta los aciertos, sobreestimaciones y subestimaciones que surgen de la clasificación visual propuesta por la norma IRAM 9662/4:2015²⁵ y de la clasificación mecánica realizada sobre la base del parámetro combinado "PC" obtenido, el análisis se efectúa para las calidades C24 y C20 de la norma UNE-EN 338:2010³⁰. Se considera que para valores del PC > 24 las piezas califican en un C24 y para PC > 20 como C20. Para la calidad C24, la clasificación mecánica presenta solo 7 piezas con sobreestimación (2%) y ninguna subestimación. En esa calidad la clasificación visual presenta 185 probetas con sobreestimación (46%) y ninguna subestimación; 180 de las sobreestimaciones de la clasificación visual se deben a que el módulo de elasticidad no alcanza el valor de la categoría, 2 por la resistencia y 5 no cumplen con ninguno de los dos parámetros. Se debe considerar que para asignar una clase resistente en la clasificación visual se utiliza para la resistencia el valor del percentil 5% y para el módulo de la elasticidad el valor medio. Ambos métodos clasifican en la calidad C24 un número similar de piezas. En la calidad C20 la clasificación mecánica califica un número muy inferior de piezas (75%), todos aciertos, con el consecuente aumento de descarte. En esta clase la clasificación visual presenta 67 sobreestimaciones, 61 de ellas por no alcanzar el módulo de elasticidad exigido, 2 la resistencia y 4 no cumplen con ninguno de los dos parámetros.

Clasificación		Calidad		
		C24	C20	Descarte
Mecánica	Sobreestimación	7	0	0
	acierto	401	265	161
	Subestimación	0	0	0
	TOTALES	408	265	161
Visual	Sobreestimación	187	67	
	acierto	211	111	44
	Subestimación	0	173	41
	TOTALES	398	351	85

Las calidades corresponden a las definidas en la norma UNE-EN 384:2010.

Tabla 7: Número de piezas con aciertos, sobreestimaciones y subestimaciones para clasificación mecánica y clasificación visual de toda la muestra.

Se analiza un modelo más simplificado y se realiza el estudio de regresión simple entre la resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad, el estadístico R-cuadrada se reduce al 33% y se obtiene la ecuación (4) del parámetro combinado PC2:

$$PC2 = 7,968 + 00286 \times E_{m,g} \quad (4)$$

PC2: parámetro combinado 2

$E_{m,g}$: módulo de elasticidad global, en N/mm².

Al analizar los aciertos, sobreestimas y subestimas a partir de la aplicación de PC2” se obtienen exactamente los mismos resultados que con la ecuación anterior y que están transcritos en la tabla 7.

Conclusiones.

De acuerdo a lo expuesto podemos concluir:

Los coeficientes de correlación obtenidos entre la resistencia a la flexión y distintos parámetros – módulo de elasticidad, nudosidad “K” y densidad – son inferiores a los reportados para otras especies o clones, Fank (2017)⁹, Iñiguez (2007)³¹, Piter (2003)⁸, Casado (2010)¹².

A pesar de los bajos coeficientes de correlación se obtuvo una ecuación que permite proponer una clasificación mecánica con un alto índice aciertos, superior al 98% en el grado superior y de un 100% para el grado inferior.

Los parámetros que mostraron significancia estadística para la clasificación mecánica son el módulo de elasticidad y la nudosidad “K”.

Con un menor valor de estadístico R-cuadrado pero con igual número de aciertos, se obtuvo una ecuación solo en función del módulo de elasticidad.

La clasificación mecánica presentó un número de aciertos para la clasificación en grados resistentes muy superior a la obtenida en la clasificación visual; con similar rendimiento en el grado superior (C24) y menor rendimiento en el grado inferior (C20).

Agradecimientos:

A los alumnos y graduados de Ingeniería de la Facultad Regional Venado Tuerto de la Universidad Tecnológica Nacional y de la Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires por su dedicada y responsable colaboración en la ejecución de los ensayos.

Referencias:

1. Glos, P. (1995a). Strength grading. Basis of design, material properties, structural components and joints. Timber Engineering STEP 1, pp: A6/1-A6/8. Centrum Hout, The Netherlands.
2. CIRSOC:2015. Reglamento Argentino de Estructuras de Madera. Disposiciones generales y requisitos para el diseño y la construcción de estructuras de madera en edificaciones. Buenos Aires, Argentina, disponible en <http://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/601/CIRSOC601-completo.pdf>.
3. NDS:2005. National design specification for wood construction. American Forest & Paper Association Inc.
4. Eurocodigo 5 (2005). Design of timber structures–Part 1-1: General–Common

rules and rules for buildings, European Committee for Standardisation, EN 1995-1-1: Brussels, 2005.

5. Diebold, R.; Glos, P. 1994. Verbesserte Holznutzung durch neuartige maschinelle Festigkeitssortierung. Holz als Roh- und Werkstoff 52:222-222.
6. Görlacher, R. (1997). Möglichkeiten der maschinellen Holzsortierung mit dem GradeMaster 403. In Grazer Holzbau-Fachtagung, Sortierung und Festigkeit B/2:1-10.
7. Diebold, R. (1997). Möglichkeiten der maschinellen Holzsortierung mit dem Euro-GreComat. In Grazer Holzbau-Fachtagung, Sortierung und Festigkeit. B/1:1-19.
8. Piter, J.C. (2003). Clasificación por resistencia de la madera aserrada como material estructural. Desarrollo de un método para el Eucalyptus grandis de Argentina. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de la Plata. 206 p.
9. Fank, P.; Stefani, P.; Piter J.C. (2017). Clasificación mecánica de tablas de pinos resinosos cultivados en el nordeste de Argentina. Maderas. Ciencia y tecnología 19(3): 247 - 264, 2017. DOI: 10.4067/S0718-221X2017005000021.
10. Dávalos-Sotelo, R.; Limón-Godina, R. (2009). Efecto de los nudos sobre la resistencia y rigidez en flexión de la madera de pino. Revista Ciencia Forestal en México 34(106): 205-212.
11. Hanhijärvi, A.; Ranta-Maunus, A. 2008. Development of strength grading of timber using combined measurement techniques. Report of the Combigrade - project - phase 2. VTT Publications 686, 60 pp.
12. Casado, M.; Acuña, L.; Vecilla, D.; A. Basterra, A; Relea E; López, G.; Ramón, G. (2010). The influence of size in predicting the elastic modulus of Populus x euramericana timber using vibration techniques. Structures and Architecture – Cruz (Ed.) Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-49249-2. 8 Pp.
13. Roblot, G.; Bléron, L.; Mériaudeau, F.; Marchal, R. (2010). Automatic computation of the knot area ratio for machine strength grading of Douglas-fir and Spruce timber. European Journal of Environmental and Civil Engineering 14(10): 1317-1332.
14. 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.
15. Borodowski, E.D. (2006). Álamos y sauces en el delta del Paraná: situación del sector y silvicultura. Disertación. Jornadas de Salicáceas 2006. I Congreso internacional de Salicáceas en Argentina. Buenos Aires.
16. Guillaumet, A.; Acuña Rello, L.; Piter, J.C. (2014a). 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.
- 17 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.
18. 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.

19. 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.

20. 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.

21. Cortizo, S.; Monteverde, M.S.; Abbiati (2017). Caracterización de la madera de cinco clones de *Populus deltoides* seleccionados dentro del programa de mejoramiento de INTA. CLEM+CIMAD 2017. Junín, Argentina.

22. Vihavainen T. (1995), Environmental aspects of timber. In Timber Engineering STEP 1, pp. A16/1-A16/8. Centrum Hout, The Netherlands.

23. UNE-EN 1310:1997. Madera aserrada y madera en rollo. Método de medida de singularidades. Agencia Española de Normalización y Certificación. Madrid.

24. UNE-EN 14081-1:2006. Estructuras de madera. Madera estructural con sección transversal rectangular clasificada por su resistencia. Parte 1: Requisitos generales. Agencia Española de Normalización y Certificación. Madrid.

25. 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.

26. UNE- EN 408:2011. Madera aserrada y madera une-laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. Agencia Española de Normalización y Certificación. Madrid.

27. ISO 3131:1975. International Organization for Standardization. Wood – Determination of density for physical and mechanical tests.

28. ISO 3130:1975. International Organization for Standardization. Wood – Determination of moisture content for physical and mechanical tests.

29. UNE-EN 384:2010. Determinación de los valores característicos de las propiedades y la densidad. Agencia Española de Normalización y Certificación. Madrid.

30. UNE-EN 338:2010. Madera estructural. Clases resistentes. Agencia Española de Normalización y Certificación. Madrid.

31. Iñiguez González, I. (2007). Tesis Doctoral. Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de madera aserrada de coníferas de gran escuadría para uso estructural. Universidad Politécnica de Madrid.

España.

Bibliografía:

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 9660-1:2015. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Madera laminada encolada estructural. Parte 2: Métodos de ensayo. Buenos Aires.

IRAM 9661:2015. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Madera laminada encolada estructural. Requisitos de los empalmes por unión dentada. 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.

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.