



PROPIEDADES MECÁNICAS Y DENSIDAD DE LA MADERA DE *Pinus elliottii* CULTIVADO EN LA MESOPOTAMIA. ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE PLANTACIONES CULTIVADAS EN ENTRE RÍOS Y MISIONES

Rocío RAMOS¹, Pamela FANK¹, Ricardo GÓMEZ¹, Eduardo TORRÁN¹, Juan Carlos PITER¹

RESUMEN

El trabajo presenta los resultados de un estudio llevado a cabo con tablas aserradas de pino resinoso de la especie *Pinus elliottii* cultivada en las provincias de Entre Ríos y Misiones. Un total de 674 cuerpos de prueba distribuidas en 3 muestras (cada una asociada a una edad de corte y zona de cultivo) fueron ensayados a flexión según IRAM 9663 (2013). En el material clasificado por resistencia según la norma IRAM 9662-3 (2015), los valores característicos del MOR y la densidad superaron a los adoptados por esta norma. Contrariamente, el MOE no alcanzó el valor requerido por la norma en la clase 1 y solamente una de las tres muestras alcanzó el valor adoptado para la clase 2. Los resultados alientan la realización de nuevos estudios que, sobre una base estadística más amplia, permitan analizar la conveniencia de ratificar o modificar los valores adoptados para el MOE por la norma IRAM 9662-3 (2015), con el propósito de garantizar la confiabilidad requerida en el diseño estructural.

Palabras clave: *resistencia, módulo de elasticidad, flexión.*

1. INTRODUCCIÓN

Los cultivos de pino resinoso (*Pinus taeda* y *P. elliottii*) del nordeste del país proveen la mayor parte de la madera aserrada destinada a fines estructurales en Argentina. Lo cual, junto a la reciente redacción del primer Reglamento Argentino de Estructuras de Madera (CIRSOC 601, 2013) y a la necesidad del proyectista de abordar el diseño estructural de manera confiable, hacen indispensable el conocimiento preciso del comportamiento mecánico de la madera aserrada de las especies antes mencionadas.

Actualmente en el país se encuentra en vigencia la norma IRAM 9662-3 (2015) que establece un método para clasificar por resistencia tablas de pino resinoso de Misiones y norte de Corrientes, destinadas tanto a la fabricación de madera laminada encolada estructural como a su empleo en calidad de madera aserrada. El objetivo de las reglas de clasificación es separar las piezas de madera en clases asociadas a propiedades resistentes y elásticas mínimas asegurando así un nivel de confianza adecuado para el empleo de este material en la construcción. Los valores característicos de las propiedades mecánicas, provistos para cada clase resistente por esta norma IRAM, son empleados para determinar los valores de referencia establecidos en los suplementos del Reglamento CIRSOC 601 (2013).

No obstante, el proceso de clasificar y caracterizar madera para uso estructural en Argentina es reciente y las combinaciones especie-procedencia estudiadas son escasas (Guillaumet *et al.*, 2014). Particularmente para el caso de la madera aserrada de *Pinus elliottii*, especie de rápido crecimiento y baja densidad, se evidencia la necesidad de profundizar los estudios existentes y extenderlos para otras zonas de cultivo. Para tal fin, es necesario el desarrollo de investigaciones que se ajusten a los modernos criterios de análisis estadístico para propósitos estructurales y, a los procedimientos de ensayos estáticos en tamaño estructural (IRAM 9663, 2013; IRAM 9664, 2013) que permiten determinar las propiedades fundamentales (resistencia a flexión, módulo de elasticidad en flexión y densidad) con los que se pueden derivar las restantes propiedades mecánicas empleadas en el

¹ Grupo de Estudio de Maderas (GEMA), Departamento de Ingeniería Civil, Facultad Regional. Concepción del Uruguay, Universidad Tecnológica Nacional. Email: piterj@frcu.utn.edu.ar



diseño estructural (Glos, 1995).

El objetivo del presente trabajo es presentar y discutir los resultados obtenidos de un proyecto empírico orientado a efectuar un estudio comparativo de la resistencia, el módulo de elasticidad y la densidad de tablas de *Pinus elliottii* cultivado en 3 plantaciones con diferentes edades de Entre Ríos y Misiones. Se comparan los valores característicos obtenidos con los propuestos por la norma IRAM 9662-3 (2015) con el fin de efectuar un aporte al proceso de revisión de la misma.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El material destinado a la investigación empírica estuvo compuesto por 674 tablas de pino resinoso de la especie *Pinus elliottii*, las que fueron distribuidas en 3 muestras (Cuadro 1) teniendo en cuenta la cantidad de cuerpos de prueba necesarios para lograr resultados estadísticamente confiables (IRAM 9664, 2013). En cuanto a las dimensiones de cada pieza, se respetó la longitud establecida en la norma IRAM 9663 (2013) para ensayos a flexión y se adoptó una sección transversal nominal de 1 x 4 pulgadas por ser de uso frecuente en el país tanto en calidad de madera aserrada como en la condición de láminas destinadas a la construcción de vigas laminadas encoladas.

Cuadro 1. Detalle de las muestras

Muestra	Origen	Cantidad de cuerpos de prueba	Dimensiones promedio (mm)
ER37	Entre Ríos	184	107,8 x 26,1 x 502,0
M27	Misiones	116	106,0 x 24,4 x 499,6
ER19	Entre Ríos	374	106,8 x 25,3 x 502,0

Las piezas necesarias para preparar las muestras ER37 y ER19 fueron obtenidas de árboles provenientes de dos plantaciones ubicadas en el noreste de Entre Ríos, la primera de 37 años de edad localizada en las cercanías de Nueva Escocia y la segunda de 19 años de edad cultivada en las proximidades de Ubajay. Por su parte, las que conforman la muestra M27 fueron extraídas de árboles de 27 años de edad cultivados en el centro de la provincia de Misiones.

Después de climatizadas las muestras en una cámara a temperatura y humedad relativa ambiente de 20 +/-2 °C y 65 +/-5 % respectivamente, se numeraron y determinaron las dimensiones reales de cada probeta (Cuadro 1). Luego se registraron los parámetros de detección visual con mayor influencia sobre el comportamiento mecánico para la especie en estudio: la nudosidad, la presencia de médula y el espesor de los anillos de crecimiento. Teniendo en cuenta únicamente estos 3 parámetros y considerando los lineamientos establecidos en la norma IRAM 9662-3 (2015), cada pieza de madera fue asignada a un determinado grado de calidad: clase 1, clase 2 o clase 3 (descarte). La clase 1 no admite médula, establece un valor menor a 10 mm como máximo espesor del mayor anillo de crecimiento y fija en 1/3 el límite superior de la nudosidad. La clase 2 admite piezas con médula, anillos de crecimiento menores a 15 mm y con una nudosidad de hasta 2/3. La categoría 3 abarca todas aquellas piezas que no cumplen con los requisitos necesarios para pertenecer a las clases 1 o 2.

Una vez preparados y clasificados los cuerpos de prueba, en el laboratorio de Ing. Civil de la Facultad Regional Concepción del Uruguay de la Universidad Tecnológica Nacional se llevaron a cabo las pruebas estáticas de flexión de plano siguiendo el procedimiento de la norma IRAM 9663 (2013). Las tablas se dispusieron con una separación entre apoyos igual a 18 h y fueron cargadas simétricamente a una distancia igual a 6 h desde cada apoyo, siendo h la altura de la sección (Figura 1). Para la aplicación de las cargas se utilizó una máquina de ensayos universales -marca EMIC de accionamiento eléctrico- con capacidad de desplazar el cabezal a velocidad constante y precisión igual al 1 % de la carga aplicada. En los puntos de apoyo y de aplicación de la carga se colocaron placas de acero -de ancho no mayor que la mitad de la altura de la probeta- con objeto de reducir el aplastamiento localizado de la madera.



En todos los casos la velocidad de desplazamiento del cabezal de carga no superó el valor de 0,003 de la altura de la probeta (mm/s) y se registraron las deformaciones correspondientes a escalones de carga de 500 N por medio de un comparador micrométrico con precisión de 0,01 mm ubicado en la parte inferior del centro de la luz. El ensayo se continuó hasta alcanzar la rotura en el tiempo establecido por la norma (300+/-120 s), registrándose la carga máxima, la duración del mismo y observaciones relevantes acompañadas de fotografías. Los valores de la tensión de rotura y del módulo de elasticidad global se calcularon empleando las ecuaciones provistas por la norma IRAM 9663 (2013).

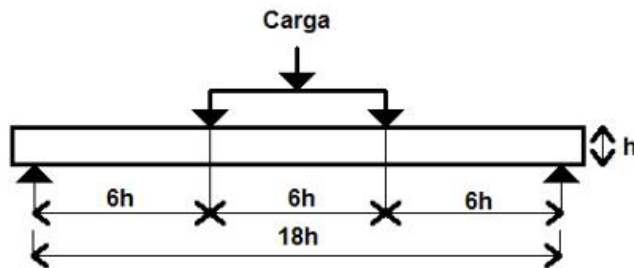


Figura 1. Esquema de ensayo de flexión estática

Después de finalizado cada ensayo se cortó un trozo libre de defectos cercano a la zona de rotura que involucró a toda la sección transversal, el cual fue destinado a la determinación del contenido de humedad y de la densidad conforme a los lineamientos de las normas ISO 3130 (1975) e ISO 3131 (1975). Las medidas del trozo se registraron con un calibre de precisión de 0,01 mm y para la medición de las masas se empleó una balanza electrónica con capacidad para registrar 0,01 g. El secado del trozo hasta lograr su masa anhidra se realizó en estufa a una temperatura de 103 +/-2 °C.

Con el fin de analizar resultados comparables, todos los valores de las propiedades antes mencionadas fueron ajustados a las condiciones de referencia conforme lo establecido en la norma IRAM 9664 (2013): Los valores de la resistencia fueron ajustados a una altura de referencia de 150 mm y los valores del módulo de elasticidad y de la densidad fueron ajustados a un contenido de humedad del 12 %.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos arrojaron valores medios del contenido de humedad de 13,7 %, 11,4 % y 12,5 % asociados a un coeficiente de variación del 4 %, 8 % y 6 % para las muestras ER37, M27 y ER19, respectivamente. Estos resultados permiten descartar una influencia desigual de esta variable sobre la resistencia de las piezas.

En el Cuadro 2 se presentan los valores de las principales propiedades mecánicas y la densidad de las muestras sin clasificar. Los coeficientes de variación indican una dispersión de resultados levemente superior en la muestra de Misiones para las propiedades analizadas. Los valores medios del módulo resistente (MOR) no evidencian una tendencia clara de la influencia de la edad. En el módulo de elasticidad (MOE), al igual que en la densidad, se aprecia que los valores medios aumentan con la edad. Esta tendencia también ha sido reportada por Moya *et al.* (2015) para vigas de la misma especie provenientes de plantaciones de 25 y 15 años, cultivadas en Uruguay.



Cuadro 2. Propiedades mecánicas en flexión y densidad de tablas de *Pinus elliottii*

	MOR ⁽¹⁾			MOE ⁽²⁾			ρ ⁽²⁾		
	(N/mm ²)			(N/mm ²)			(kg/m ³)		
	ER37	M27	ER19	ER37	M27	ER19	ER37	M27	ER19
Min	10,0	13,1	10,7	2581	3031	1880	387	356	336
Med	34,4	31,0	32,5	7455	6964	6361	530	490	474
Máx	67,7	66,4	65,1	15707	16003	15009	921	711	645
C.V.	37%	40%	34%	37%	43%	38%	16%	16%	12%
n	184	116	374	184	116	374	184	116	374

(1) Valores de la resistencia (MOR) ajustados a una altura de referencia de 150 mm conforme a IRAM 9664 (2013); (2) Valores del módulo de elasticidad (MOE) y de la densidad (ρ) ajustados a un contenido de humedad del 12% conforme a IRAM 9664 (2013); ER: Entre Ríos; M: Misiones; C.V.: coeficiente de variación; n: cantidad de cuerpos de prueba.

En el Cuadro 3 se presentan los valores característicos del MOR, el MOE y la densidad para las tres muestras desagregadas por clase resistente conforme al método visual adoptado por la norma IRAM 9662-3 (2015). La diferencia entre los valores determinados para cada clase evidencia la importancia de clasificar por resistencia el material para su mejor aprovechamiento técnico y económico.

Al analizar las distintas procedencias se observa que los valores del MOR resultaron superiores en ambas muestras de Entre Ríos para las clases resistentes 1 y 2. Sin embargo, esta relación no se manifiesta en el MOE y la densidad.

Cuadro 3. Valores característicos de las propiedades mecánicas y densidad de las piezas clasificadas visualmente por resistencia

Clase	Cantidad de cuerpos de prueba			MOR ⁽¹⁾			MOE ⁽²⁾			ρ ⁽²⁾		
				(N/mm ²)			(N/mm ²)			(kg/m ³)		
	ER37	M27	ER19	ER37	M27	ER19	ER37	M27	ER19	ER37	M27	ER19
1	49	26	58	25,0	19,6	22,6	9772	10615	8635	450	458	418
2	95	51	168	14,3	13,1	15,4	6380	6623	7051	434	412	394
3 ⁽³⁾	40	39	148	10,6	10,6	12,4	5788	4975	4686	442	381	381

(1) Valores de la resistencia (MOR) ajustados a una altura de referencia de 150 mm conforme a IRAM 9664 (2013); (2) Valores del módulo de elasticidad (MOE) y de la densidad (ρ) ajustados a un contenido de humedad del 12% conforme a IRAM 9664 (2013); (3) Piezas cuyos defectos exceden los límites establecidos en la norma IRAM 9662-3 (2015) para las clases 1 y 2; ER: Entre Ríos; M: Misiones.

Los valores característicos obtenidos en todas las muestras superan a los adoptados por la norma IRAM 9962-3 (2015) en las clases 1 y 2 para el MOR (18 y 11 N/mm²) y para la densidad (420 y 390 kg/m³).

Los resultados del MOE indican que ninguna muestra satisface el valor requerido por la norma en la clase 1 (12000 N/mm²) y solamente la muestra ER19 alcanza el valor adoptado para la clase 2 (7000 N/mm²). Se han reportado resultados que demuestran que la madera de bosques implantados de crecimiento rápido y turnos de rotación cortos presenta gran proporción de madera juvenil asociada a módulos de elasticidad bajos debido al elevado ángulo de inclinación de las microfibrillas en la capa S2 (Cave y Walker 1994, Yin *et al.* 2011). Sin embargo, y a diferencia de lo encontrado para las muestras completas, en las muestras clasificadas por resistencia no se observa una relación clara entre el MOE y la edad del material analizado (Cuadro3).



4. CONCLUSIONES

Los valores medios del MOE y de la densidad, obtenidos para las muestras completas -sin clasificar-, evidenciaron una tendencia general creciente con el aumento de la edad, la cual no se manifestó en el MOR. Las tres propiedades analizadas exhibieron una dispersión de resultados levemente superior para la muestra de Misiones respecto a las dos procedentes de Entre Ríos.

La clasificación visual por resistencia puso en evidencia la diferencia existente entre las propiedades correspondientes a cada clase, ratificando la importancia de su aplicación para aprovechar técnica y económicamente el material destinado a estructuras. A diferencia de lo observado en el comportamiento de las muestras completas, el análisis de los resultados obtenidos para cada clase resistente, no puso de manifiesto una relación entre la edad y el MOE.

En el material clasificado, los valores del MOR resultaron superiores para ambas muestras de Entre Ríos en las clases resistentes 1 y 2; sin embargo esta relación no se manifestó en el MOE y la densidad. Por otra parte, los valores característicos obtenidos para el MOR y la densidad superaron en todos los casos los adoptados por la norma IRAM 9962-3 (2015). Para el MOE, contrariamente, ninguna muestra alcanzó el valor requerido por la norma para la clase 1 y solamente la muestra ER19 alcanzó el valor adoptado para la clase 2.

Los resultados alientan la realización de nuevos estudios que, sobre una base estadística más amplia, permitan analizar la conveniencia de ratificar o modificar los valores adoptados para el MOE por la norma IRAM 9662-3 (2015), con el propósito de garantizar la confiabilidad requerida en el diseño estructural.

5. LITERATURA CITADA

CAVE I., WALKER J. 1994. Stiffness of wood in fast-grown plantation softwoods: the influence of microfibril angle. *Forest Products Journal* 44(5): 43-48.

CIRSOC 601. 2013. Reglamento Argentino de Estructuras de Madera. Instituto Nacional de Tecnología Industrial. Buenos Aires. Argentina.

GLOS P. 1995. Solid timber - Strength classes. In *Timber Engineering STEP 1*, pp. A7/1-A7/8. Centrum Hout. The Netherlands.

GUILLAUMET A., FILIPPETTI M., MANAVELLA R. 2014. Especies provenientes de bosques implantados en Argentina caracterizadas para uso estructural. *In: Encontro Brasileiro em madeiras e em estruturas de madeira*, 14. Natal, RN, Brasil.

IRAM 9662-3. 2015. Madera laminada encolada estructural, Clasificación visual de las tablas por resistencia. Parte 3: Tablas de pino taeda y elliotti (*Pinus taeda* y *elliottii*). Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Buenos Aires. Argentina.

IRAM 9663. 2013. Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Buenos Aires. Argentina.

IRAM 9664. 2013. Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Buenos Aires. Argentina.

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

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

MOYA L., CARDOSO A., CAGNO M., O'NEILL H. 2015. Caracterización estructural de madera aserrada de pinos cultivados en Uruguay. *Maderas. Ciencia y tecnología*, v.17, p. 597-612.

YIN Y., BIAN M., SONG K., XIAO F., XIAOMEI J. 2011. Influence of microfibril angle on within-tree variations in the mechanical properties of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*). *IAWA Journal* 32(4): 431–442.