



COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y DENSIDAD DE LA MADERA DE PINO RESINOSO CULTIVADO EN ENTRE RÍOS. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS PARA 2 PLANTACIONES DE DISTINTA EDAD

Rocío RAMOS; Dora VILLALBA; Ricardo GÓMEZ; Alexandra SOSA ZITTO; Eduardo TORRÁN; Juan Carlos PITER¹

RESUMEN

El trabajo presenta los resultados de un estudio llevado a cabo con madera de dos plantaciones de pino resinoso del noreste de Entre Ríos, una de 37 y otra de 19 años de edad. Se seleccionaron al azar 92 tablas de la primera y 187 de la segunda con dimensiones nominales 25 mm x 100 mm x 2480 mm. En cada tabla se registraron los parámetros adoptados por la norma IRAM 9662-3 (2006) para la clasificación visual por resistencia, y de cada una se extrajeron 2 cuerpos de prueba, uno de la zona más defectuosa y el otro de la de mejor calidad, los que fueron ensayados a flexión según IRAM 9663 (2013). Los resultados se ajustaron a las condiciones de referencia según IRAM 9664 (2013). Los valores del MOR y el MOE fueron similares para ambas edades en cada clase resistente; el material de 37 años mostró una densidad significativamente superior al de 19 años. Los valores del MOR y la densidad son congruentes con los adoptados por IRAM 9662-3 (2006) para esta especie cultivada en Misiones y el noreste de Corrientes. El MOE resultó inferior al adoptado por la norma.

Palabras clave: *madera laminada – resistencia - módulo de elasticidad – densidad - Pinus taeda/elliottii*

1. INTRODUCCIÓN

Los requisitos de fabricación y control de la madera laminada estructural (en adelante MLEE) se encuentran en la norma IRAM 9660-1 (2006), la cual contempla el uso de madera de *Araucaria angustifolia* cultivada en Misiones, *Eucalyptus grandis* de la Mesopotamia y *Pinus taeda/elliottii* de Misiones y el noreste de Corrientes. Actualmente se encuentra en trámite final de aprobación una actualización de la norma antes mencionada, la cual incorpora la MLEE fabricada con dos clones de álamo cultivado en el delta del río Paraná: *Populus deltoides* 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67'.

El pino resinoso cultivado en el noreste de la provincia de Entre Ríos constituye un recurso forestal de importancia para la región, el cual se compone de dos especies (*Pinus taeda* y *Pinus elliottii*) comercializadas en forma conjunta. Aunque la MLEE producida con tablas de estas especies no está contemplada en la norma antes citada, este material estructural es actualmente producido en la provincia y, en consecuencia, resulta de interés iniciar las investigaciones tendientes a conocer sus propiedades más importantes. Un objetivo de mediano plazo es utilizar los resultados obtenidos para promover su inclusión en la normativa IRAM vigente y en los suplementos del recientemente redactado Reglamento Argentino de Estructuras de Madera CIRSOC 601 (INTI-CIRSOC 2013).

Las propiedades mecánicas más importantes para el diseño estructural son la resistencia (en adelante MOR) y el módulo de elasticidad (MOE) en flexión. Resultados experimentales muestran que conociendo estas dos propiedades y la densidad se pueden derivar las restantes propiedades necesarias para el diseño estructural (Glos, 1995). La norma IRAM 9662-3 (2006) establece un método para clasificar visualmente por resistencia las tablas de *P. taeda* y *P. elliottii* cultivado en Misiones y el noreste de Corrientes, y provee los valores característicos del MOR y MOE en flexión, así como de la densidad, para 2 clases resistentes.

¹ Grupo de Estudio de Maderas (GEMA), Departamento de Ingeniería Civil, Facultad Regional Concepción del Uruguay, Universidad Tecnológica Nacional. Email: jc.piter@gmail.com



El objetivo de este trabajo es presentar y discutir los resultados de una investigación orientada a determinar las propiedades mecánicas en flexión y la densidad de tablas de pino resinoso cultivado en el noreste de Entre Ríos. En particular, comparar los resultados obtenidos sobre muestras provenientes de dos plantaciones, una con 37 y la otra con 19 años de edad, y verificar si los valores característicos de las propiedades alcanzan los establecidos por la norma IRAM 9662-3 (2006).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El material para los ensayos fue provisto por una empresa fabricante de MLEE interesada en los resultados del proyecto. Luego del secado técnico, se seleccionaron al azar tablas de la producción obtenida del aserrado de árboles provenientes de dos plantaciones de *P. elliotii* ubicadas en el noreste de Entre Ríos, una con 37 años de edad localizada en las cercanías de Nueva Escocia, y la otra con 19 años de edad cultivada en las cercanías de Ubajay. El material obtenido de la plantación de 37 años de edad (en adelante M37) estuvo constituido por 92 tablas, en tanto que el obtenido de la forestación de 19 años de edad (M19) por 187 tablas. En ambas muestras las dimensiones nominales de la sección transversal fueron 25mm x 100mm y 2,48m de longitud.

Luego de ser identificadas, las tablas fueron trasladadas al Laboratorio de Ingeniería Civil de la Facultad Regional C. del Uruguay de la UTN. Después de realizar el registro de las singularidades y defectos teniendo como base los parámetros de clasificación visual por resistencia adoptados por la norma IRAM 9662-3 (2006), de cada tabla se extrajeron 2 cuerpos de prueba destinados a los ensayos de flexión conforme al criterio de la norma IRAM 9663 (2013). Uno de los cuerpos de prueba fue extraído de la zona más defectuosa de cada tabla, es decir la que definía la clase resistente de la misma. El otro fue seleccionado de la zona de mejor calidad de la tabla. Una vez concluido el corte y preparación de los cuerpos de prueba, éstos fueron numerados y colocados en cámara climatizada a una temperatura y humedad relativa ambiente de $20^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ y $65\%\pm 5\%$, respectivamente.

Las pruebas estáticas de flexión fueron llevadas a cabo con las tablas cargadas de plano siguiendo los lineamientos de la norma IRAM 9663 (2013). Para la aplicación de las cargas se utilizó una máquina tipo EMIC 100kN con capacidad de desplazar el cabezal a velocidad constante y registrar las cargas con una precisión del 1%. Los cuerpos de prueba fueron ubicados con una separación entre apoyos igual a $18h\pm 3h$, siendo h el espesor de la tabla, y cargados simétricamente en dos puntos a una distancia igual a $6h\pm 1,5h$ de cada apoyo, quedando ubicada en el tercio central la zona aparentemente más débil. La velocidad de desplazamiento del cabezal de cargas fue en todos los casos, constante y menor a $0,0002h$ (mm/s), alcanzándose la carga de rotura en un tiempo de $300s\pm 120s$. Las deformaciones en período elástico, necesarias para calcular el módulo de elasticidad global, fueron medidas en la parte inferior del centro del vano respecto de los apoyos. Con este fin se utilizaron extensómetros con una sensibilidad igual a $0,01\text{mm}$. El MOR y el MOE fueron calculados con las expresiones provistas en la misma norma.

La densidad aparente (ρ) y el contenido de humedad (H) de cada cuerpo de prueba fueron determinados inmediatamente después de finalizado el ensayo estático conforme a los lineamientos de las normas IRAM 9663 (2013), ISO 3131-1975 (E) (1975) e ISO 3130-1975 (E) (1975), utilizando un trozo libre de defectos y cortado de un lugar cercano a la zona de rotura. Para la determinación de la masa se utilizó una balanza electrónica tipo AND Fx – 3000, con capacidad de registrar $0,01\text{g}$. Las dimensiones necesarias para la obtención del volumen se tomaron a cabo con un calibre tipo Mitutoyo, capaz de registrar $0,01\text{mm}$. El secado del trozo hasta lograr su masa anhidra, se realizó en estufa a una temperatura de $103^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$.

El ajuste de los resultados de resistencia, rigidez y densidad a las condiciones de referencia internacional que se establecen en la norma IRAM 9664 (2013) se efectuó en forma individual. El valor del módulo de elasticidad en flexión fue ajustado a un contenido de humedad común del 12%, aumentándose el valor obtenido en el ensayo en un 1% por cada 1% de exceso en el contenido de humedad sobre la condición normalizada, y viceversa. Los valores de la densidad aparente se disminuyeron un 0,5% por cada 1% de exceso, y viceversa. Los resultados obtenidos en los ensayos para la resistencia en flexión fueron corregidos a una dimensión (altura) de referencia de $h = 150\text{mm}$ dividiéndolos por el factor $k_h = (150/h)^{0,2}$.



Para el análisis estadístico, la media aritmética fue adoptada como medida de centralidad y el coeficiente de variación como medidas de la dispersión. Para este último caso fueron utilizados también los valores mínimo y máximo. Los valores característicos fueron determinados siguiendo los lineamientos de la norma IRAM 9664 (2013). La determinación del nivel de significación de las diferencias entre medias se llevó a cabo a través de la prueba de hipótesis nula con el modelo de Student.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro 1 se presentan los resultados obtenidos de los ensayos llevados a cabo con los cuerpos de prueba extraídos de la zona con menor calidad (mayores defectos) de cada tabla, los cuales definen la clase resistente de la misma. En consecuencia, asignando las tablas enteras a las clases que les corresponden conforme al criterio adoptado por la norma IRAM 9662-3 (2006) es posible expresar el rendimiento del material sin sanear. Con el propósito de comparar la influencia de la edad, se indican separados los resultados obtenidos con los cuerpos de prueba extraídos de la plantación con 37 años de edad (M37) y de la forestación con 19 años (M19), tanto para la tensión de rotura (MOR) como el módulo de elasticidad en flexión (MOE) y la densidad (ρ), por clase resistente.

Cuadro 1. Propiedades mecánicas, densidad y rendimiento considerando la zona con menor calidad de cada tabla

Clase resistente		MOR ⁽¹⁾ (N/mm ²)		MOE ⁽²⁾ (N/mm ²)		ρ ⁽²⁾ (kg/m ³)		Rendimiento (%)	
		M37	M19	M37	M19	M37	M19	M37	M19
1	Min	24,3	25,4	6406	5177	471	436	18%	13%
	Med	38,7	37,6	9686	8248	606	503		
	Máx	51,7	55,5	12263	12924	743	600		
	COV	19%	20%	19%	28%	14%	9%		
	Caract ⁽³⁾	18,0	20,7	9686	8248	472	447		
	n	17	24	17	24	17	24		
2	Min	11,3	12,7	2581	3107	414	364	52%	47%
	Med	23,4	28,4	5372	6305	531	484		
	Máx	40,8	50,9	9279	9907	921	596		
	COV	25%	29%	25%	27%	18%	11%		
	Caract ⁽³⁾	12,6	12,8	5372	6305	442	396		
	n	48	87	48	87	48	87		
3 ⁽⁴⁾	Min	10,0	10,7	3027	1880	429	336	29%	41%
	Med	21,3	21,0	4724	4326	523	453		
	Máx	38,3	42,6	8352	8266	814	624		
	COV	32%	28%	33%	28%	16%	12%		
	Caract ⁽³⁾	9,6	10,8	4724	4326	442	380		
	n	27	76	27	76	27	76		

(1): valores de la tensión de rotura (MOR) ajustados a una altura de referencia de 150mm 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): valor característico determinado según IRAM 9664 (2013); (4): no apta para la fabricación de madera laminada encolada estructural; n: cantidad de cuerpos de prueba asignados a cada clase resistente.

Respecto de la densidad, es posible apreciar que M37 exhibe mayores valores que M19 en las 3 clases resistentes, lo cual es congruente con la diferencia de edad (Cuadro 1). Los resultados del análisis estadístico (*t* de Student) mostraron que la hipótesis de igualdad de los valores medios de la densidad para ambas muestras puede ser rechazada a un nivel de significación de 5% ($p < 0,05$). Este resultado confirma una diferencia significativa entre los valores medios de esta propiedad para ambas muestras, es decir que las diferencias encontradas no pueden atribuirse a la aleatoriedad inherente al proceso de muestreo, sino que puede afirmarse que los resultados de M37 son mayores que los de M19 y que en promedio los primeros difieren marcadamente de los últimos.

Con referencia a las propiedades mecánicas, la información exhibida en el Cuadro 1 no muestra una clara relación entre la edad de las forestaciones y los valores del MOR y del MOE dentro de cada clase. Estos resultados indican que el material de ambas edades tiene un comportamiento mecánico similar si los parámetros de clasificación (nudosidad, presencia de médula, espesor de los anillos de crecimiento) se encuentran dentro de los límites establecidos para cada clase por IRAM 9662-3



(2006). No obstante, el rendimiento en la clase de más calidad es muy superior para M37 (18%) que para M19 (13%). Además, para la clase de inferior calidad (clase 3) -la cual no puede ser utilizada para la fabricación de MLEE- es significativamente más reducida en M37 (29%) que en M19 (41%).

En el Cuadro 2 se presentan los resultados obtenidos de los cuerpos de prueba obtenidos de la zona de mejor calidad de cada tabla. Esta información, conjuntamente con la exhibida en el Cuadro 1, provee el rango dentro del cual varían las propiedades mecánicas (MOR y MOE) del material analizado. Con relación a la densidad, se observan mayores valores para M37 que para M19 en las 3 clases. Los resultados del test de Student confirmaron que la hipótesis de igualdad de los valores medios de la densidad para ambas muestras puede ser rechazada a un nivel de significación de 5% ($p < 0,05$). Es de señalar que la densidad se determina siempre de un trozo sin defectos, por lo cual las diferencias entre los valores exhibidos en los cuadros 1 y 2 se deben a su variabilidad natural.

Cuadro 2. Propiedades mecánicas y densidad considerando la zona con mayor calidad de cada tabla

Clase resistente		MOR ⁽¹⁾ (N/mm ²)		MOE ⁽²⁾ (N/mm ²)		ρ ⁽²⁾ (kg/m ³)	
		M37	M19	M37	M19	M37	M19
1	Min	32,7	23,8	5202	5277	414	374
	Med	47,9	44,5	9818	8908	538	495
	Máx	67,7	65,0	15707	15009	674	645
	COV	18%	19%	26%	31%	14%	12%
	Caract ⁽³⁾	26,0	26,0	9818	8908	446	417
	n	32	34	32	34	32	34
2	Min	21,2	21,0	2764	3239	387	379
	Med	40,4	42,0	7409	7852	508	485
	Máx	60,5	65,1	12020	12733	727	632
	COV	19%	20%	25%	27%	14%	11%
	Caract ⁽³⁾	23,6	23,6	7409	7852	435	390
	n	47	81	47	81	47	81
3 ⁽⁴⁾	Min	20,8	12,1	3534	2302	421	372
	Med	42,1	31,7	7999	5067	506	450
	Máx	63,5	47,3	13443	9122	658	581
	COV	27%	19%	33%	33%	13%	10%
	Caract ⁽³⁾	14,9	19,6	7999	5067	440	384
	n	13	72	13	72	13	72

(1): valores de la tensión de rotura (MOR) ajustados a una altura de referencia de 150mm 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): valor característico determinado según IRAM 9664 (2013); (4): no apta para la fabricación de madera laminada encolada estructural; n: cantidad de cuerpos de prueba asignados a cada clase resistente.

Las propiedades mecánicas muestran valores similares dentro de cada clase para M37 y M19 salvo en la clase 3 (Cuadro 2). Por otra parte, para cada clase los valores del MOR y del MOE presentados en el Cuadro 2 son superiores a los del Cuadro 1. Esta diferencia puede explicarse considerando que la nudosidad tiene un rango de variación dentro de cada clase, que se extiende desde 0 a 1/3 para clase 1 y entre 1/3 y 2/3 para clase 2 (IRAM 9662-3 2006), y que los cuerpos de prueba extraídos de la zona de menor calidad (Cuadro 1) presentan un valor de este parámetro siempre más cercano al límite superior que los cuerpos de prueba extraídos de la zona de mejor calidad (Cuadro 2). En la comparación de los valores de n (cantidad de cuerpos de prueba asignados a cada clase resistente) de cada muestra -indicados en los cuadros 1 y 2- puede verse que en este último se incrementa de manera significativa la inclusión de cuerpos de prueba en la clase 1, y en particular para M37 donde prácticamente se duplica el valor de n respecto del Cuadro 1. Estos resultados indican que llevando a cabo un saneamiento adecuado de los peores defectos se puede esperar un incremento sensible de la calidad de las tablas destinadas a la fabricación de MLEE, particularmente para M37.

La norma IRAM 9662-3 (2006) provee en su Anexo B los valores característicos del MOR, el MOE y la densidad para el *P. taeda* y *P. elliotii* cultivado en Misiones y el noreste de Corrientes, los cuales se reproducen en el Cuadro 3. Los mismos fueron obtenidos -en línea con el criterio europeo para madera estructural- con los cuerpos de prueba obtenidos de la zona con mayores defectos de cada



tabla. Por lo tanto, para efectuar una comparación de los resultados obtenidos en este trabajo con los adoptados por la mencionada norma, se deben utilizar los valores presentados en el Cuadro 1.

Cuadro 3. Valores característicos de las propiedades mecánicas (MOR y MOE en flexión) y la densidad adoptados por la norma IRAM 9662-3 (2006) para las tablas de *Pinus taeda* y *elliottii* cultivado en Misiones y el noreste de Corrientes

Clase resistente	MOR (N/mm ²)	MOE (N/mm ²)	ρ (kg/m ³)
1	18,0	12000	420
2	11,0	7000	390

Los valores característicos adoptados por la norma antes citada (Cuadro 3) están ajustados a las mismas condiciones de referencia que los resultados obtenidos en este trabajo, por lo cual la comparación se puede hacer en forma directa. La comparación de los valores característicos (Cuadro 1 y Cuadro 3) confirma que tanto M37 como M19 satisfacen los requerimientos de resistencia (MOR) y de densidad (ρ) de la norma para ambas clases resistentes; no así los correspondientes al MOE.

4. CONCLUSIONES

El estudio comparativo entre las muestras procedentes de una población de 37 y otra de 19 años de edad, mostró para la primera una densidad significativamente superior a la segunda. Los resultados obtenidos con los cuerpos de prueba extraídos de la zona de menor calidad de cada tabla mostraron valores similares del MOR y el MOE en flexión para el material de ambas edades dentro de cada clase resistente, aunque la de mayor edad exhibió un rendimiento mayor en las clases superiores. Los resultados obtenidos con los cuerpos de prueba preparados de la zona de mejor calidad de cada tabla mostraron valores superiores del MOR y del MOE -dentro de cada clase resistente- que los encontrados con los cuerpos de prueba obtenidos de la zona de menor calidad. A su vez, permitieron comprobar que practicando un saneamiento adecuado de los peores defectos es posible elevar sensiblemente el rendimiento del material en la clase de calidad superior, particularmente en el material de mayor edad. Se compararon los valores característicos obtenidos con los cuerpos de prueba preparados de la zona con mayores defectos de cada tabla con los adoptados por la norma IRAM 9662-3 (2006) para el *Pinus taeda* y *elliottii* procedente de Misiones y el noreste de Corrientes. El análisis confirmó que las muestras de ambas edades satisfacen los requerimientos de dicha norma para el MOR y la densidad, pero no para el MOE.

5. LITERATURA CITADA

Glos P. (1995) Solid timber – Strength classes. In: Timber Engineering STEP 1. Centrum Hout, The Netherlands, pp. A7/1-A7/8.

INTI-CIRSOC (2013) Reglamento Argentino de Estructuras de Madera CIRSOC 601. Buenos Aires, Instituto Nacional de Tecnología Industrial y Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles, 1 volumen de 176 pág. pdf (<http://www.inti.gov.ar/cirsoc/pdf/601/CIRSOC601-completo.pdf>).

IRAM 9660-1 (2006) Madera laminada encolada estructural-Parte 1: Clases de resistencia y requisitos de fabricación y de control. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires.

IRAM 9662-3 (2006) Madera laminada encolada estructural, Clasificación visual de las tablas por resistencia, Parte 2: Tablas de *Pinus taeda* y *elliottii*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires.

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.

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.

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.