

EFECTO DE LA ALTURA EN LA RESISTENCIA A FLEXIÓN EN PIEZAS DE PINO RESINOSO DEL NORESTE DE ARGENTINA

SIZE EFFECT ON BENDING STRENGTH IN SAWN TIMBER OF ARGENTINEAN RESINOUS PINE

Pamela Y. Fank (P) (1); Pablo M. Stefani (2); Juan C. Piter (3)

- (1) Ing. Civil, Becaria doctoral CONICET, Depto. de Ing. Civil – Facultad Regional Concepción del Uruguay – Universidad Tecnológica Nacional, Concepción del Uruguay – Entre Ríos – Argentina.
- (2) Dr., Investigador, ECOMATERIALES-INTEMA-CONICET - Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional Mar del Plata, Mar del Plata – Buenos Aires – Argentina.
- (3) Dr., Investigador, GEMA - Depto. de Ingeniería Civil - Facultad Regional Concepción del Uruguay - Universidad Tecnológica Nacional, Concepción del Uruguay – Entre Ríos – Argentina.
- Dirección para correspondencia: pamela_fank@yahoo.com.ar; (P) Presentador

Resumen

Los cultivos de pino resinoso (*Pinus taeda*, *Pinus elliottii*) del noreste del país proveen la mayor parte de la madera aserrada destinada al uso estructural en Argentina. La redacción del Primer Reglamento Argentino de Estructuras de Madera (CIRSOC 601) durante el año 2013 ha constituido un avance importante y ha motivado la necesidad de comprobar si las reglas de diseño adoptadas reflejan -con la confiabilidad requerida en el moderno diseño estructural- el comportamiento mecánico de las especies cultivadas en el país. Este Reglamento provee los valores de diseño de la resistencia a flexión referidos a una altura de 150 mm y proporciona una expresión que permite ajustarlos cuando la pieza estructural tiene una altura diferente de la adoptada como referencia. Con el propósito de verificar este criterio para la madera aserrada de pino resinoso, se diseñó un proyecto empírico que abarcó un total de 314 piezas representativas de los tamaños estructurales usuales para este material en Argentina. Los cuerpos de prueba fueron sometidos a ensayos de flexión siguiendo el procedimiento de la norma argentina IRAM 9663-1 (2013) y la resistencia a flexión obtenida fue ajustada a la altura de referencia según los lineamientos del Reglamento mencionado. Los resultados mostraron que las diferencias encontradas entre el comportamiento del material ensayado y el criterio adoptado por el CIRSOC 601 (2013) no invalida el empleo del mismo para propósitos prácticos relacionados al diseño estructural. No obstante, emerge como necesario la realización de nuevos estudios orientados a ampliar la base estadística de este trabajo.

Palabras clave: *Pinus taeda*; *Pinus elliottii*; factor de tamaño; madera estructural.

Abstract

Argentina's fast-growing resinous pine (*Pinus taeda*, *Pinus elliottii*) provides most of structural sawn timber in this country. The writing of the first Argentinean specification for wood construction (CIRSOC 601) during 2013 has been an important step forward and has prompted the need to verify if the adopted design rules criteria reflect the Argentinean species mechanical behavior with the reliability required in structural modern design. According to this design rule the bending strength value is referred to a reference height of 150 mm and to correct test results to the reference condition, these values must be divided by one size factor. In order to verify if this criterion is suitable for resinous pine sawn timber, an empirical project that included a total of 314 representative pieces in usual structural sizes was designed. The specimens were subjected to bending tests following the procedure of Argentinean IRAM 9663-1 (2013) and bending strength result was adjusted to the reference height according to the standard guidelines mentioned above. The results showed that the differences between the behavior of tested material and the criterion adopted by CIRSOC 601 (2013) do not invalidate its use for practical purposes related to structural design. However, it is necessary to carry out new studies to expand the statistical basis of this work.

Keywords: *Pinus taeda*; *Pinus elliottii*; size factor; structural timber.

1. INTRODUCCIÓN

Varios estudios sobre madera estructural han demostrado que las propiedades mecánicas -tales como la resistencia a flexión, compresión y tracción- varían con el tamaño de la sección, con la longitud de la pieza y con las condiciones de carga. En particular, una viga sometida a flexión presenta una pérdida de resistencia a medida que aumenta su tamaño. Este fenómeno es generalmente conocido como “efecto de tamaño” (Rouger y Barrett 1995) y ha sido ampliamente estudiado para varios materiales.

A partir de la segunda década del siglo XX fueron llevadas a cabo las primeras investigaciones sobre el efecto del tamaño en la resistencia de la madera y, principalmente, éstas se relacionaban con el efecto de la altura en piezas sometidas a flexión. Newlin y Traver (1924) sugirieron la primera teoría para explicar por qué la resistencia aumentaba al disminuir la altura de la viga, la cual fue conocida como la “teoría del apoyo”. Según esta teoría, cuando las diminutas fibras de madera se someten a compresión a lo largo de su longitud, actúan individualmente como pequeñas columnas de Euler más o menos unidas. En el caso de una viga trabajando a flexión, las fibras más altamente comprimidas se ubican cerca del borde superior y se encuentran con su movimiento restringido por el efecto de las fibras relativamente poco comprimidas que se localizan cerca de la línea neutra. Según este criterio, esto explica los mayores valores del módulo resistente que se obtienen en piezas de reducida altura, donde las fibras de la zona neutra se encuentran más cerca del borde comprimido.

Posteriormente, hacia fines de la década del 30, surgió una interpretación más amplia sobre el efecto del tamaño. Esto dio origen a la “teoría del eslabón más débil”, la cual fue desarrollada por Weibull, quien estudió diferentes materiales del tipo frágil. Esta teoría se basa en la concepción estadística de la resistencia y establece una relación entre ésta y el volumen de la pieza (Rouger y Barrett 1995). La misma hace referencia a que una cadena sujeta a tensión es tan resistente como su eslabón más débil, es decir, supone que el fallo de la pieza se produce cuando la tensión alcanza el mismo valor que la tensión que produciría el fallo del elemento más débil -contenido en su volumen- si se ensayara independientemente (Rouger 1995). Considerando que es más probable que aparezca una zona de baja resistencia en una pieza de gran volumen frente a otra de pequeño volumen, la teoría de Weibull ofrece una explicación razonable del motivo por el cual elementos de menor altura presentan mayor resistencia a flexión que aquellos de mayor altura. En el caso particular de las piezas de madera, la sección más débil será aquella determinada por la existencia de singularidades, pudiéndose destacar principalmente la presencia de nudos y la inclinación de las fibras. Los nudos suponen una interrupción de la continuidad de la madera y una pérdida de sección efectiva, dando lugar a una elevada concentración local de tensiones. La desviación de las fibras afecta considerablemente el comportamiento mecánico debido a la naturaleza anisótropa de la madera (Dávalos-Sotelo y Ordóñez Candelaria 2011; Coronel 1996).

La “teoría del eslabón más débil” ha sido aplicada satisfactoriamente para explicar el comportamiento de piezas de madera bajo tracción y corte, pero en el caso de compresión, y particularmente en flexión -que es una mezcla de dos modos de falla-, el uso de la misma es cuestionable (Rouger 1995). En primer lugar, los miembros sometidos a flexión no exhiben un comportamiento de material frágil sobre el cual se basa dicha teoría. Éstos trabajan como un material dúctil, es decir, cuando una pieza alcanza la tensión máxima es posible una redistribución de las tensiones alcanzando cargas de rotura mayores (Rouger y Barrett 1995).

“Estructuras para el Desarrollo, la Integración Regional, y el Bienestar Social”

Debido a la relevancia del efecto del tamaño en la resistencia a flexión, este fenómeno es considerado con diferentes criterios por los distintos países del mundo en la práctica del cálculo y, por consiguiente, es tenido en cuenta por las diferentes normas (American Society for Testing and Materials 2007; European Committee for Standardization 2010 a; Instituto Argentino de Normalización y Certificación 2013 b) y reglas de diseño (Instituto Nacional de Tecnología Industrial 2013; European Committee for Standardization 2006; Instituto Nacional de Normalización 2007; National Design Specification 2005). Teniendo en cuenta que varios estudios concluyeron que el incremento del ancho de la viga no afectaba de forma significativa la resistencia a flexión (Rouger y Barrett 1995), ciertas reglamentaciones -como ser las europeas y las argentinas- contemplan el efecto del tamaño de forma simplificada a través de un parámetro dependiente únicamente de la altura de la sección.

En el caso particular de Argentina, el proyecto de reglamento CIRSOC 601 (Instituto Nacional de Tecnología Industrial 2013) define los métodos y disposiciones generales que se deben emplear en el diseño y construcción de estructuras para edificaciones y obras civiles con madera. Por otra parte, la norma IRAM 9664 (Instituto Argentino de Normalización y Certificación 2013 b) trata sobre las etapas a seguir para la definición de la población, muestreo, ensayos y análisis de resultados que permiten determinar los valores característicos para ser utilizados en el cálculo. Específicamente para la determinación de la resistencia característica a flexión, ambas reglamentaciones adoptan el mismo criterio que la norma europea EN 384 (European Committee for Standardization 2010 a), la cual fija una corrección por el tamaño de la pieza referida a una altura de referencia de 150 mm. Entonces, para corregir los resultados de los ensayos a la altura de referencia, las normas anteriormente mencionadas establecen que la resistencia a flexión debe dividirse por un factor de altura k_h , cuyo valor se obtiene de la siguiente expresión:

$$k_h = \left(\frac{150}{h} \right)^{0,2} \quad (1)$$

donde:

h = altura de la sección sometida a flexión, expresada en mm.

Este factor se aplica a toda la madera aserrada independientemente de la especie, la calidad (grado de resistencia) y el contenido de humedad. A la vez, las normas anteriormente mencionadas establecen que la madera debe ser ensayada en condiciones normalizadas siguiendo los procedimientos establecidos en la norma argentina IRAM 9663-1 (Instituto Argentino de Normalización y Certificación 2013 a) o la norma europea EN 408 (European Committee for Standardization 2010 b), respectivamente.

Estudios llevados a cabo sobre el pino silvestre (*Pinus sylvestris L.*) de España (Hermoso Prieto 2001) y el eucalipto (*Eucalyptus grandis*) cultivado en la Mesopotamia Argentina (Piter 2003) ratifican la idoneidad del exponente 0,2 adoptado en la fórmula (1). No obstante, como sucede con el pino laricio (*Pinus nigra*) de procedencia española (Fernández-Golfín, Hermoso Prieto y Díez 2002), existen especies investigadas que ponen de manifiesto un exponente con valores diferentes al adoptado. Esto implica que para una especie concreta el efecto de la altura puede ser distinto al establecido por las normas como medio para todas las especies. En consecuencia, estas evidencias justifican la necesidad de comprobar el valor real de dicho coeficiente cuando se caracteriza una nueva madera asociada a una determinada procedencia.

Al considerar el caso particular del pino resinoso (*Pinus taeda*, *Pinus elliotti*) cultivado en el nordeste argentino, se advierte que se han llevado a cabo algunos estudios sobre propiedades físicas y mecánicas, pero ninguno contempla el efecto de la altura en la resistencia a flexión.

“Estructuras para el Desarrollo, la Integración Regional, y el Bienestar Social”

Asimismo, cabe destacar que dicho pino resinoso es uno de los recursos forestales cultivados en Argentina con mayor importancia comercial para fines estructurales. Actualmente, la superficie de bosques cultivados en el mencionado país alcanza aproximadamente 1,12 millones de ha, de las cuales el 59% está constituida por plantaciones de coníferas (FAO 2004). La región de la Mesopotamia – integrada por las provincias de Misiones, Corrientes y Entre Ríos- contiene más de la mitad de las plantaciones implantadas de este país, existiendo un total de 550.000 ha donde más del 80% pertenecen a coníferas. A la vez, sólo la provincia de Misiones reúne más del 50% de las plantaciones de pino de Argentina, lo que es equivalente a unas 300.000 ha (SIFIP 2009).

Con referencia al uso estructural de la madera de pino resinoso, los elementos aserrados sometidos a flexión usualmente presentan una altura comprendida entre 25 mm y 150 mm. La menor dimensión se corresponde con tablas cargadas en la cara ancha, mientras que las piezas que acusan una mayor altura son empleadas como vigas cargadas en la cara angosta. Hoy en día en Argentina existen dos normas que establecen métodos de clasificación de la madera aserrada estructural de pino resinoso (*Pinus taeda* y *Pinus elliottii*) del nordeste argentino. La norma IRAM 9670 (Instituto Argentino de Normalización y Certificación 2002) se utiliza para clasificar vigas y la IRAM 9662-3 (Instituto Argentino de Normalización y Certificación 2006) se emplea para clasificar tablas, tanto destinadas a la fabricación de elementos estructurales laminados encolados como aquellas empleadas individualmente para uso estructural cuando se encuentren flexionadas de plano. El objetivo de estas reglas de clasificación es separar las piezas de madera aserrada en clases asociadas a propiedades resistentes mínimas y asegurar así un nivel de confianza adecuado para el empleo de este material en la construcción.

El propósito de este trabajo es verificar si el criterio adoptado por las normativas argentinas -CIRSOC 601 (Instituto Nacional de Tecnología Industrial 2013) e IRAM 9664 (Instituto Argentino de Normalización y Certificación 2013 b)- para considerar la influencia de la altura sobre la resistencia a flexión resulta adecuado para ser empleado en la madera aserrada de pino resinoso (*Pinus taeda* y *Pinus elliottii*) cultivado en el nordeste de Argentina.

2. METODOLOGÍA

El material destinado a la investigación empírica estuvo compuesto por 314 cuerpos de prueba en tamaño estructural de madera aserrada de pino resinoso (*Pinus taeda* y *Pinus elliottii*). El mismo fue dividido en tres muestras, dos con secciones típicas de vigas y una con la sección más usual para tablas. En la Figura 1 se ilustra un cuerpo de prueba de cada muestra.



Figura 1. De izq. a der.: Cuerpo de prueba correspondiente a la Muestra 1, Muestra 2 y Muestra 3.

Para el diseño de las muestras fueron consideradas las secciones transversales representativas de los tamaños estructurales usuales para este material en Argentina. Asimismo,

“Estructuras para el Desarrollo, la Integración Regional, y el Bienestar Social”

en el muestreo se tuvo en cuenta la cantidad de cuerpos de prueba necesarios para lograr resultados estadísticamente confiables de acuerdo a lo establecido en la norma IRAM 9664 (Instituto Argentino de Normalización y Certificación 2013 b). En la Tabla 1 se presenta un detalle de las muestras diseñadas.

Tabla 1. Muestras

Muestra	Ancho	Alto	n		
	(mm)	(mm)	Pt	Pe	Total
Muestra 1	45	150	25	25	50
Muestra 2	45	100	39	25	64
Muestra 3	105	25	100	100	200

Nota: n: cantidad de cuerpos de prueba; Pt: *Pinus taeda*; Pe: *Pinus elliottii*.

La metodología empleada fue similar para todas las muestras. En primera instancia, los cuerpos de prueba fueron numerados y colocados en una cámara climatizada a una temperatura y humedad relativa ambiente de 20+/-2 °C y 65+/-5% respectivamente. Sobre la madera ya climatizada se determinaron las dimensiones reales de las probetas y se registraron los parámetros de detección visual con influencia sobre el comportamiento mecánico. La Muestra 1 y la Muestra 2 -constituidas por vigas- fueron clasificadas conforme a los lineamientos establecidos en la norma IRAM 9670 (Instituto Argentino de Normalización y Certificación 2002) y la Muestra 3 –constituida por tablas- fue clasificada de acuerdo a la norma IRAM 9662-3 (Instituto Argentino de Normalización y Certificación 2006). En todos los casos se asignó a cada pieza un grado de calidad: clase 1, clase 2 o descarte. En esta última categoría se ubicaron todas aquellas piezas que no cumplieron con los requisitos necesarios para pertenecer a la clase 2 según las normas previamente mencionadas.

Una vez acondicionados y clasificados los cuerpos de prueba, se llevaron a cabo las pruebas estáticas de flexión en el laboratorio de Ingeniería Civil de la Facultad Regional Concepción del Uruguay – Universidad Tecnológica Nacional (Entre Ríos, Argentina). Las piezas de la Muestra 1 y de la Muestra 2 fueron flexionadas de canto, y las de la Muestra 3 fueron flexionadas de plano (Ver Figura 2). En ambos casos los ensayos se efectuaron siguiendo el procedimiento de la norma IRAM 9663-1 (Instituto Argentino de Normalización y Certificación 2013 a), la cual está basada en la normativa europea EN 408 (European Committee for Standardization 2010 b).



Figura 2. Ensayo estático de flexión. Izq.: Flexión de plano. Der.: Flexión de canto

Los cuerpos de prueba fueron ubicados con una separación entre apoyos igual a $18h$, siendo h la altura de la sección transversal, y cargados simétricamente a una distancia igual a $6h$ de cada apoyo (Ver Figura 3). Para la aplicación de las cargas se utilizó una máquina de ensayos universales con capacidad de desplazar el cabezal a velocidad constante y precisión igual al 1% de la carga aplicada. En cada caso particular se utilizaron adecuados dispositivos de aplicación de cargas y de apoyo, con objeto de reducir el aplastamiento de la pieza en esas zonas.

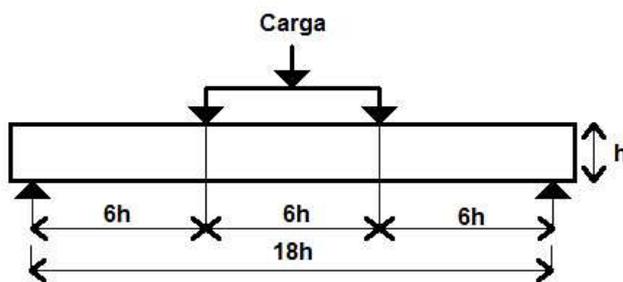


Figura 3. Disposición para el ensayo a flexión estática.

El ensayo se llevó hasta la rotura de la pieza registrándose la carga máxima, la duración del mismo y observaciones relevantes acompañadas de fotografías. El valor de la tensión de rotura (F_m) se calculó empleando la siguiente ecuación provista por la norma IRAM 9663-1 (Instituto Argentino de Normalización y Certificación 2013 a):

$$F_m = \frac{3P_{m\acute{a}x}a}{bd^2} \quad (2)$$

donde:

$P_{m\acute{a}x}$ = carga máxima

a = distancia entre el punto de carga y el apoyo más próximo

b = ancho de la sección transversal

d = altura de la sección

Inmediatamente después de finalizado cada ensayo se cortó un trozo libre de defectos, cercano a la zona de rotura y 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 (International Organization for Standardization 1975 a) e ISO 3131 (International Organization for Standardization 1975 b). 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 de precisión de 0,01 g. El secado del trozo hasta lograr su masa anhidra se realizó en estufa a una temperatura de 103 ± 2 °C. Los valores de la densidad (ρ) y el contenido de humedad (H) fueron calculados con las siguientes expresiones:

$$\rho = \frac{m_t}{V_t} \quad (3)$$

$$H = \frac{m_t - m_a}{m_a} \quad (4)$$

donde:

m_t : masa del trozo libre de defectos

V_t : volumen del trozo libre de defectos

m_a : masa anhidra del trozo libre de defectos

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Considerando que el contenido de humedad se encuentra estrechamente relacionado con las propiedades resistentes de la madera, se calcularon los valores de este parámetro para cada una de las muestras. Los resultados obtenidos arrojaron un valor medio del contenido de humedad del 13,4%, 12,3% y 11,6% para la Muestra 1, Muestra 2 y Muestra 3, respectivamente. Como en todos los casos el contenido de humedad resultó cercano al 12% asociado a un bajo coeficiente de variación (5-7%), se puede descartar una influencia desigual de esta variable sobre la resistencia de las distintas muestras.

La Figura 4 exhibe los resultados de la relación encontrada entre la resistencia a flexión (F_m) y la altura (h) para los 314 cuerpos de prueba ensayados. En ésta se puede apreciar una relación entre ambas variables que, aunque relativamente débil, muestra como tendencia general que un aumento de la altura de la sección se corresponde con una disminución de la resistencia a flexión, lo cual se condice con el criterio adoptado por el primer reglamento argentino de estructuras de madera CIRSOC 601 (Instituto Nacional de Tecnología Industrial 2013) y por la norma IRAM 9664 (Instituto Argentino de Normalización y Certificación 2013 b) y, a su vez, es congruente con la experiencia europea (European Committee for Standardization 2006; European Committee for Standardization 2010 a). La ecuación de regresión lineal resultó igual a $F_m = -0,051h + 42,387$, y el coeficiente de correlación (R) arrojó un valor igual a $-0,17$.

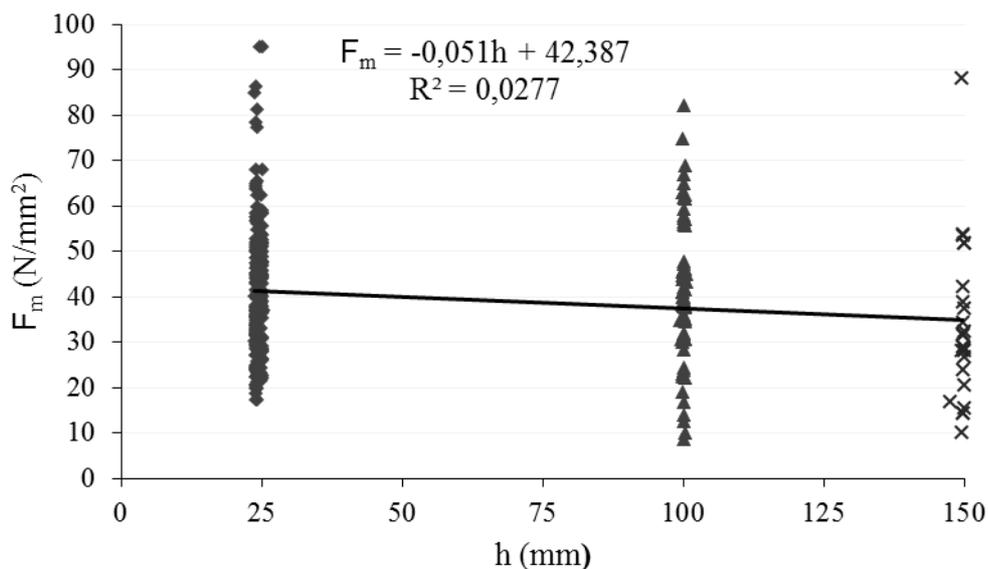


Figura 4. Relación entre la altura (h) y la resistencia a flexión (F_m) para los 314 cuerpos de prueba. ×: Muestra 1; ▲: Muestra 2; ◆: Muestra 3.

“Estructuras para el Desarrollo, la Integración Regional, y el Bienestar Social”

Resultados de investigaciones previas han mostrado que existe una relación entre la calidad de la madera y el efecto de la altura sobre la resistencia a flexión (Rouger 1995). Según Carreira y Alves Dias (2006) algunas singularidades producen efectos más perjudiciales sobre las propiedades mecánicas que otras, resultando determinantes aquellos defectos que tienen una relación directa con la variación de la estructura interna de la madera. Particularmente en el caso del pino resinoso, la nudosidad, la presencia de médula y el espesor de los anillos de crecimiento determinan -en gran medida- la asignación de una pieza de madera a una determinada clase de resistencia. El primer parámetro -además de producir una interrupción del tejido- supone una desviación de las fibras adyacentes, lo que origina una acumulación de tensiones alrededor de los nudos repercutiendo en la resistencia de la madera. El segundo se considera una variable reductora de la capacidad resistente por sí misma y por estar asociada generalmente a la madera juvenil que se desarrolla en los primeros años de vida del árbol. El tercero se encuentra relacionado de forma directa con la densidad de la madera (Haselein *et al.* 2000; Weber 2005), propiedad física que afecta las propiedades mecánicas. En la Figura 5 se presenta la fotografía de la sección transversal de una pieza de pino resinoso donde se pueden apreciar claramente los nudos, la médula y los anillos de crecimiento.



Figura 5. Sección transversal de una pieza de pino resinoso.

Teniendo en cuenta lo expresado en el párrafo anterior, y considerando el propósito de este trabajo, el análisis de los resultados obtenidos se presenta y discute a continuación separando las piezas ensayadas en función de la presencia de los principales parámetros con influencia sobre las propiedades mecánicas del material estudiado (ver Tabla 2). En la primera parte (A) se consideró el total de la muestra. En la segunda (B), se contempló el efecto de la médula, por lo que se dividieron las piezas en dos grupos, uno que admite la presencia de médula y otro que no la admite. En la tercera (C) se tuvieron en cuenta los criterios de las normas de clasificación por resistencia vigentes en Argentina (Instituto Argentino de Normalización y Certificación 2002; Instituto Argentino de Normalización y Certificación 2006), por lo que las piezas se distribuyeron en tres grupos (Clase 1, Clase 2 y descarte).

En la Tabla 2 se resumen los principales resultados obtenidos para la resistencia a flexión de las 3 muestras estudiadas asociadas a los 3 perfiles analizados (A, B y C). En el mismo se presentan los valores medios obtenidos de los ensayos ($F_{m,med}$) y aquellos ajustados a la altura de referencia de 150 mm ($F_{m,med150}$) conforme al criterio adoptado por la norma IRAM 9664 (Instituto Argentino de Normalización y Certificación 2013 b), el correspondiente coeficiente de variación (CV) y la cantidad de cuerpos de prueba (n). Debido al relativamente bajo número de cuerpos de prueba asignados a algunos grupos presentados en la Tabla 2, el análisis de los resultados será llevado a cabo basado en los valores medios en lugar de los percentiles 5% inferiores (Piter 2012).

“Estructuras para el Desarrollo, la Integración Regional, y el Bienestar Social”

Tabla 2. Valor medio de la resistencia a flexión y de la densidad de cada una de las muestras para distintas calidades de madera

		Muestra (Altura nominal)			
		Muestra 1 (150 mm)	Muestra 2 (100 mm)	Muestra 3 (25 mm)	
A	Total	$F_{m,med}$ (N/mm ²)	31,6	41,3	40,6
		$F_{m,med150}$ (N/mm ²)	31,6	38,1	28,3
		COV (%)	49	39	35
		ρ_{med} (kg/m ³)	516	538	464
		COV (%)	14	14	14
		n	50	64	200
B	Sin Médula	$F_{m,med}$ (N/mm ²)	33,7	42,7	43,3
		$F_{m,med150}$ (N/mm ²)	33,7	39,4	30,1
		COV (%)	54	36	34
		ρ_{med} (kg/m ³)	539	552	469
		COV (%)	15	15	15
	n	27	33	147	
	Con Médula	$F_{m,med}$ (N/mm ²)	29,2	39,8	33,4
		$F_{m,med150}$ (N/mm ²)	29,2	36,7	23,2
		COV (%)	38	42	30
		ρ_{med} (kg/m ³)	489	523	451
COV (%)		12	12	12	
n	23	31	53		
C ⁽¹⁾	Clase de resistencia 1	$F_{m,med}$ (N/mm ²)	45,6	59,6	60,3
		$F_{m,med150}$ (N/mm ²)	45,6	55,0	41,9
		COV (%)	45	21	27
		ρ_{med} (kg/m ³)	596	594	541
		COV (%)	16	10	16
	n	7	7	22	
	Clase de resistencia 2	$F_{m,med}$ (N/mm ²)	36,6	44,6	42,0
		$F_{m,med150}$ (N/mm ²)	36,6	41,1	29,2
		COV (%)	42	29	29
		ρ_{med} (kg/m ³)	540	540	462
COV (%)		14	14	12	
n	11	34	100		
Descarte	$F_{m,med}$ (N/mm ²)	26,9	30,8	33,4	
	$F_{m,med150}$ (N/mm ²)	26,9	28,4	23,2	
	COV (%)	44	44	28	
	ρ_{med} (kg/m ³)	491	519	446	
	COV (%)	11	14	13	
n	32	23	78		

Nota: (1) La Muestra 1 y la Muestra 2 fueron clasificadas según la norma IRAM 9670 (2002), y la Muestra 3 fue clasificada de acuerdo a la norma IRAM 9662-3 (2006). $F_{m,med}$: valor medio de la resistencia a flexión; $F_{m,med150}$: valor medio de la resistencia a flexión ajustada a la altura de referencia de 150 mm de acuerdo a la norma IRAM 9664 (2013); ρ_{med} : valor medio de la densidad corregida al contenido de humedad de referencia (12%) de acuerdo a la norma IRAM 9664 (2013); n: cantidad de cuerpos de prueba.

La Muestra 1 está compuesta por vigas con una altura nominal de 150 mm, la cual coincide con la altura de referencia adoptada por la norma IRAM 9664 (Instituto Argentino de Normalización y Certificación 2013 b) y por el reglamento CIRSOC 601 (Instituto Nacional de Tecnología Industrial 2013). Por lo tanto, el valor medio $F_{m,mmed150}$ de dicha muestra será considerado valor de referencia para comparar los resultados de todas las muestras -ajustados a la altura de referencia- y así analizar la efectividad del criterio adoptado por la norma y el reglamento antes mencionados

En la Tabla 2 se observa que, en todos los casos, la Muestra 2 presentó los mayores valores de $F_{m,med150}$ y la Muestra 3 exhibió los menores. La diferencia entre los resultados obtenidos para estas dos muestras en el perfil C podría ser explicada por el hecho de que las mismas fueron clasificadas empleando distintos métodos de clasificación, como se expresó anteriormente. No obstante, esa circunstancia no puede explicar las diferencias encontradas entre las dos muestras de vigas (Muestra 1 y Muestra 2).

El contenido de humedad de las distintas muestras fue similar, como se expresó anteriormente y, consecuentemente, debe descartarse una influencia diferenciada de esta propiedad física sobre la resistencia. En consecuencia, y con el propósito de conocer las razones que motivaron las diferencias señaladas, se efectuó un análisis detallado de los resultados encontrados para la densidad, propiedad que en los métodos de clasificación empleados fue considerada a través de la observación de los anillos de crecimiento, es decir que fue tenida en cuenta en forma indirecta. Para este fin, los valores de esta propiedad física fueron corregidas al contenido de humedad de referencia (12%) de acuerdo a la norma IRAM 9664 (Instituto Argentino de Normalización y Certificación 2013 b). Es posible apreciar que los valores medios de la densidad (ρ_{med}) exhibidos en la Tabla 2 para la Muestra 3 son, en todos los casos, los menores. La comparación de los resultados obtenidos para la Muestra 1 con respecto a la 3 muestra que la primera exhibe valores mayores que la segunda en un rango comprendido entre el 8% y el 17%. Estas diferencias pueden explicar, al menos parcialmente, las diferencias encontradas en cada grupo entre los valores de la resistencia a flexión ajustada a la altura de referencia ($F_{m,med150}$). La comparación, por su parte, de los resultados exhibidos por la densidad para la Muestra 1 y la Muestra 2 indica que la primera es menor que la segunda en los perfiles A y B en un rango comprendido entre el 2% y el 7%, siendo similar en el perfil C. En este caso, la variable analizada puede explicar, aunque modestamente, las diferencias encontradas entre los valores de la resistencia a flexión ajustada a la altura de referencia ($F_{m,med150}$) en los dos primeros perfiles (A y B) pero no en el perfil C, donde los valores de la densidad resultaron similares para ambas muestras. En consecuencia, no fue posible explicar en su totalidad las diferencias encontradas a través del análisis detallado antes mencionado.

Con el propósito de visualizar claramente las diferencias antes analizadas, y de verificar si las mismas exceden el límite adoptado por la norma IRAM 9664 (Instituto Argentino de Normalización y Certificación 2013 b) para evitar una excesiva variabilidad entre las distintas muestras cuando se obtiene el valor característico de la población, se presentan en la Tabla 3 los valores de la resistencia a flexión ajustada a la altura de referencia de 150 mm ($F_{m,mmed150}$) calculados para cada muestra junto a la diferencia existente entre éste y el valor $F_{m,mmed150}$ promedio de las 3 muestras que conforman cada grupo, el cual también puede apreciarse en la misma tabla.

“Estructuras para el Desarrollo, la Integración Regional, y el Bienestar Social”

Tabla 3. Valor medio de la resistencia a flexión ajustada a la altura de referencia de 150 mm ($F_{m,med150}$) para distintas calidades de madera

		$F_{m,med150}$ (N/mm ²)			
		Muestra Promedio ⁽¹⁾	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
A	Total	32,7	31,6 (3%)	38,1 (17%)	28,3 (13%)
B	Sin Médula	34,4	33,7 (2%)	39,4 (15%)	30,1 (13%)
	Con Médula	29,7	29,2 (2%)	36,7 (24%)	23,2 (22%)
C	Clase de resistencia 1	47,5	45,6 (4%)	55,0 (16%)	41,9 (12%)
	Clase de resistencia 2	35,6	36,6 (3%)	41,1 (15%)	29,2 (18%)
	Descarte	26,2	26,9 (3%)	28,4 (9%)	23,2 (11%)

Nota: Entre paréntesis y junto al valor $F_{m,mmed150}$ calculado para cada muestra se indica la diferencia existente entre éste y el valor $F_{m,mmed150}$ de la muestra promedio. (1) Valor $F_{m,mmed150}$ promedio de los valores de las 3 muestras que integran cada grupo.

Como se puede apreciar en la Tabla 3, los resultados muestran que sólo 1 (B con médula en la Muestra 1 y en la Muestra 2) de los 6 grupos excedió el límite establecido por la norma IRAM 9664 (Instituto Argentino de Normalización y Certificación 2013 b) para evitar una excesiva variabilidad de la resistencia entre muestras obtenidas de una misma población, que es de un 20%.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos de los 314 cuerpos de prueba ensayados mostraron como tendencia general, si bien débil, que la resistencia a flexión crece con la disminución de la altura de la pieza, lo cual está en línea con el criterio adoptado por el primer reglamento argentino de estructuras de madera CIRSOC 601 (Instituto Nacional de Tecnología Industrial 2013) y por la norma IRAM 9664 (Instituto Argentino de Normalización y Certificación 2013 b) siendo congruente además con la experiencia europea. Esa tendencia general, no obstante, no fue confirmada con claridad por los resultados cuando el análisis se llevó a cabo comparando -para las distintas muestras y distintas calidades de madera- los valores de la resistencia a flexión ajustados a la altura de referencia de 150 mm según el criterio de la norma y el reglamento señalados anteriormente. Por otra parte, a través de un estudio detallado se pudo comprobar que las diferencias encontradas entre los valores de la resistencia a flexión ajustados a la altura de referencia según el criterio antes mencionado pueden ser explicadas parcialmente por las variaciones de la densidad entre las distintas muestras. No obstante las diferencias encontradas, los resultados de la resistencia ajustados conforme al criterio analizado se encuentran dentro de los límites adoptados por la norma IRAM 9664 (Instituto Argentino de Normalización y Certificación 2013 b) para evitar una excesiva variabilidad de la resistencia entre muestras obtenidas de una misma población. Consecuentemente, y si bien emerge como necesario ampliar el presente estudio para contar con una mayor base estadística y de esa manera optimizar la precisión del análisis, los resultados encontrados no invalidan -para propósitos prácticos

“Estructuras para el Desarrollo, la Integración Regional, y el Bienestar Social”

vinculados al diseño estructural- el criterio adoptado por el Reglamento Argentino para considerar la influencia de la altura de la pieza sobre la resistencia a flexión.

5. AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento especial a la empresa Laharrague Chodorge S.A. por la donación del material de ensayo, al jefe de laboratorio Ing. Ricardo Gómez por su participación en el acondicionamiento y ajuste del equipamiento, y a los becarios del grupo GEMA por su colaboración en la realización de los ensayos del programa empírico.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Society for Testing and Materials (2007). Standard practice for establishing allowable properties for visually-graded dimension lumber from in-grade tests of full-size specimens. ASTM D1990. West Conshohocken, PA.
- Carreira, M.R. y Alves Dias, A. (2006). Critérios para classificação visual de peças estruturais de *Pinus* SP. Cadernos de Engenharia de Estruturas. v.8. n.34. Pp.17-43.
- Coronel, E. O. (1996). Fundamentos de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas. 2º parte: Fundamentos de las propiedades mecánicas de las maderas. ITM, FCF, UNSE, Argentina.
- Dávalos-Sotelo, R. y Ordóñez Candelaria, V. R. (2011). Influencia de los nudos sobre la resistencia en flexión estática en madera de tamaño estructural. Rev. Mex. Cien. For, v. 2, n. 7, pp 43-46.
- European Committee for Standardization (2006). Eurocódigo 5. Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación. EN 1995-1-1. Madrid.
- European Committee for Standardization (2010 a). Structural timber. Determination of characteristic values of mechanical properties and density. EN 384. Brussels.
- European Committee for Standardization (2010 b). Timber structures. Structural timber and glued laminated timber. Determination of some physical and mechanical properties. EN 408. Brussels.
- FAO (2004). Estudio de tendencias y perspectivas del sector forestal en América Latina al año 2020, Informe Nacional Argentina. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Disponible en <<ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/009/j1901s/j1901s00.pdf>>, acceso 30/01/2014.
- Fernández-Golfín, J.I.; Hermoso Prieto, E. y Díez, M.R. (2002). Análisis del efecto del volumen sobre la resistencia característica a flexión de la madera de los pinos silvestre y laricio de procedencia española. Materiales de Construcción, v. 52, n. 256, p. 43-55.
- Haselein, C.R.; Cechin, E.; Santini, E.J. y Gatto, D.A. (2000). Características estruturais da madeira de *Pinus elliottii* engelm aos 30 anos de idade. Revista Ciência Florestal, v. 10, n. 2, p. 135-144.
- Hermoso Prieto, E. (2001). Caracterización mecánica de la madera estructural de *Pinus sylvestris* L. Tesis Doctoral, Departamento de Industrias Forestales, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2002). Madera estructural. Clasificación y requisitos. Clasificación en grados de resistencia para la madera aserrada de pinos resinosos del noreste argentino mediante una evaluación visual. IRAM 9670. Buenos Aires.

“Estructuras para el Desarrollo, la Integración Regional, y el Bienestar Social”

- Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2006). Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por resistencia. Parte 3: Tablas de pino taeda y ellioti (*Pinus taeda* y *elliottii*). IRAM 9662-3. Buenos Aires.
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2013 a). Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. IRAM 9663-1. Buenos Aires.
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2013 b). Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad. IRAM 9664. Buenos Aires.
- Instituto Nacional de Normalización (2007). Madera - Construcciones en madera - Cálculo. NCh1198. Santiago de Chile.
- Instituto Nacional de Tecnología Industrial (2013). Reglamento argentino de estructuras de madera. Disposiciones generales y requisitos para el diseño y la construcción de estructuras de madera en edificaciones. CIRSOC 601. Buenos Aires.
- International Organization for Standardization (1975 a). Wood – Determination of moisture content for physical and mechanical tests. ISO 3130.
- International Organization for Standardization (1975 b). Wood – Determination of density for physical and mechanical tests. ISO 3131.
- National Design Specification (2005). National design specification for wood construction. NDS-2005. American Forest & Paper Association Inc.
- Newlin, J.A. y Trayer, G.W. (1924). Form factors of beams subjected to transverse loading only. The influence of the form of a wooden beam on its stiffness and strength. Report No.181, Forest Products Laboratory, Department of Agriculture, United States, p. 375-393.
- Piter, J.C.J. (2003). Clasificación por resistencia de la madera aserrada como material estructural: Desarrollo de un método para el *Eucalyptus grandis* de Argentina. Tesis doctoral, Departamento de Construcciones, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de la Plata, Buenos Aires.
- Piter, J.C.J. (2012). Size effect on bending strength in sawn timber of fast-growing Argentinean *Eucalyptus grandis*. Analysis according to the criterion of European standards. Eur. J. Wood Prod.70:17–24.
- Rouger, F. (1995). Volume and stress distribution effects. Timber Engineering STEP 1: Basis of design, material properties, structural components and joints. Centrum Hout, The Netherlands, p. B1/1-B1/8.
- Rouger, F. y Barrett, J.D. (1995). Size effects in timber. In: Informationsdienst Holz, STEP 3. Sachverlag Holz, Düsseldorf, p. 3/1-3/24.
- SIFIP (2009). Sistema de Información Foresto-Industrial Provincial. Ministerio del Agro y la Producción, Inventario Forestal. Disponible en <<http://extension.facfor.unam.edu.ar/sifip/inventario.htm>>, acceso 30/01/2014.
- Weber, E. (2005). Densidad básica de madera de *Pinus taeda* L. Marion de diferentes edades, Misiones, Argentina. Floresta, Curitiba, PR, v. 35, n. 3.