

EFECTO SOBRE LA TENSIÓN DE ROTURA EN FLEXIÓN DE LA ALTURA DE LA SECCIÓN EN ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE PINO PONDEROSA

Data de aceite: 02/10/2023

Alfredo Aníbal Guillaumet

Universidad Tecnológica Nacional
Venado Tuerto, Argentina
0000-0001-9279-0019

Roberto D. Manavella

Universidad Tecnológica Nacional
Venado Tuerto, Argentina
0000-0002-8501-4339

María Cecilia Filippetti

Universidad Tecnológica Nacional
Venado Tuerto, Argentina
0000-0002-1778-6738

Lía Caren Meyer

Universidad Tecnológica Nacional
Venado Tuerto, Argentina
0000-0001-5187-1744

Andrea Daina Tosco

Universidad Tecnológica Nacional
Venado Tuerto, Argentina
0009-0003-8501-4339

RESUMEN: La influencia de las dimensiones de la sección transversal en la resistencia a la flexión es un efecto contemplado en distintos reglamentos de estructuras de madera. En las normativas europeas y de Argentina la expresión de

ajuste es común para todas las especies y procedencias, mientras que en la de Estados Unidos de Norteamérica y Chile se considera el grado estructural o la especie. Se han realizado numerosos estudios para verificar la precisión de las expresiones de ajuste para cada combinación de especie -procedencia. En este trabajo se analiza el efecto de la altura de la sección transversal, sobre la resistencia en flexión, en piezas de tamaño estructural de pino ponderosa cultivado en la región andino-patagónica norte de Argentina. Los ensayos de flexión se realizaron sobre 440 cuerpos de prueba de tamaño estructural según las normas argentinas. Los resultados indicaron una tendencia decreciente de la tensión de rotura en flexión con el aumento de la altura, el efecto de la altura resultó superior en la madera de inferior calidad. Los resultados obtenidos convalidan, para elementos estructurales de pino ponderosa, la aplicación del criterio de ajuste propuesto en la norma IRAM 9664 (2013) y el reglamento INTI-CIRSOC 601 (2016).

PALABRAS-CLAVE: efecto altura, Pino ponderosa, madera estructural, resistencia.

EFFECT ON THE BENDING STRENGTH OF THE SECTION HEIGHT IN STRUCTURAL ELEMENTS OF PONDEROSA PINE

ABSTRACT: The influence of the dimensions of the cross section on bending strength is an effect contemplated in different regulations of wood structures. In European and Argentina regulations, adjustment expression is common for all species and origin, while in the United States and Chile, the structural degree or species is considered. Numerous studies have been conducted to verify the accuracy of adjustment expressions for each species combination -origin. This work analyzes the effect of the height of the cross section, on bending strength, in structural pieces of ponderosa pine (*Pinus ponderosa* Douglas X Laws) cultivated in the Northern Andean-Patagonian region of Argentina. Bending tests were carried out on 440 structural size test bodies, in accordance with Argentine standards. The results indicated a decreasing tendency of the bending strength with the increase in height, the height effect was superior to the lower quality wood. The results obtained validate, for structural elements of ponderosa pine, the application of the adjustment criteria proposed in IRAM 9664 (2013) and the INTI-CIRSOC 601 (2016).

KEYWORDS: Height effect, ponderosa pine, structural wood, strength.

1 | INTRODUCCIÓN

En la región andino-patagónica el pino ponderosa (*Pinus ponderosa* Douglas x Laws) se destaca como la especie forestal más plantada. Su explotación se concentra en la precordillera de las provincias de Chubut, Río Negro y Neuquén en Argentina. Más del 50 % del área implantada en la región (44000 ha) tiene una edad de entre 20 y 30 años que, según la costumbre de la zona, es el momento del primer raleo comercial. La mayor parte de las plantaciones no ha recibido un tratamiento de podas adecuado y las piezas presentan una gran cantidad de nudos. Una alta proporción de la madera que se comercializa actualmente proviene de los mencionados raleos con piezas que poseen una alta proporción de madera juvenil.

Los estudios publicados por Guillaumet *et al.* (2019) presentan al pino ponderosa de la región andino-patagónica como una madera liviana, de baja resistencia a la flexión y con un muy bajo módulo de elasticidad. La clasificación permite un mejor aprovechamiento de las propiedades mecánicas, pero se observa que pocas piezas de las remitidas al laboratorio (15%) clasifican en la calidad superior, motivado principalmente por la alta nudosidad que presentan las vigas, consecuencia de un tratamiento silvicultural no adecuado o ausente. En junio del año 2020 se incorporaron a los suplementos del Reglamento Argentino de Estructuras de Madera INTI-CIRSOC 601 (2016) un método de clasificación visual y las principales propiedades estructurales del pino ponderosa de la mencionada procedencia.

La disminución de la tensión de rotura de flexión con el incremento de la altura de una viga es un tema que ha merecido la atención de numerosos investigadores. Una de las primeras explicaciones fue propuesta por Newlin y Trayer (1924), y expresaba que la falla por inestabilidad del equilibrio de las fibras comprimidas tenía una menor influencia

en piezas de menor altura por la colaboración de fibras cercanas al eje neutro menos solicitadas. Rouger y Barrett (1995) extendieron la teoría del eslabón más débil (Weibull 1939) al comportamiento estructural de la madera.

La norma IRAM 9664 (2013), que adopta criterios similares a EN 384 (2010), establece una altura de referencia de 150 mm y propone el mismo factor de corrección para todas las especies ($k_h = (150/h)^{0,2}$). Piter (2012) y Guillaumet *et al.* (2016) reportaron, para el *E. grandis* y el *P. deltooides* respectivamente, que la expresión establecida en la norma IRAM 9664 (2013) permite minimizar con eficacia el efecto de la altura en la tensión de rotura, mientras que Fank *et al.* (2014), para el *Pinus taeda elliottii* de la Mesopotamia Argentina, reportó una relativa eficacia del factor de corrección.

La influencia de las dimensiones de la sección transversal es un efecto contemplado en los distintos reglamentos de estructuras de madera. En las normativas europeas y argentina la expresión de ajuste es común para todas las especies y procedencias (EN 1995-1-1 2006; INTI CIRSOC 601 2016), mientras que en Estados Unidos de Norteamérica (NDS 2012) o en Chile (NCh 1198 2007) se considera el grado estructural o la especie.

Si bien todos los trabajos mencionados precedentemente manifiestan, en general, una buena eficacia del factor de ajuste del efecto de la altura propuesto en la norma IRAM 9664 (2013), surgen los interrogantes de su aplicación a la variedad de combinaciones especie / procedencia de Argentina y la influencia de la calidad estructural de la madera. Los estudios realizados en Argentina se concentraron en madera de bosques implantados en la Mesopotamia, por lo que resalta el interés de evaluar la eficacia del criterio para esta especie implantada en la zona sur del país.

El objetivo de este trabajo es contrastar los resultados experimentales de la influencia de la altura de la sección transversal en la resistencia de flexión en piezas de tamaño estructural de pino ponderosa cultivado en la zona andina-patagónica norte de Argentina, con el criterio establecido en la IRAM 9664 (2013).

2 | MATERIALES Y MÉTODOS

El material utilizado fue madera de Pinus Ponderosa (*Pinus ponderosa* Douglas x Laws) proveniente de trozas de primer raleo comercial de tres sitios de la cuenca Arroyo del Medio, cercanas a la ciudad de San Carlos de Bariloche. Las tareas de aserrado, secado y cepillado se realizaron en la ciudad de Bariloche.

Denominación	Muestra	Dimensiones Nominales			Cantidad
		Base mm	Altura mm	Largo mm	
Tablas	1	100	25	50	167
	2	50	50	100	56
	3	50	75	150	58
Vigas	4	50	100	200	53
	5	50	125	250	57
	6	50	150	300	49

Tabla 1: Dimensiones y cantidad de cuerpos de prueba para cada muestra.

Las tablas y vigas, envueltas en polietileno, fueron enviadas al Laboratorio del Grupo GIDEC, en la Facultad Regional Venado Tuerto de la Universidad Tecnológica Nacional, donde se confeccionaron 6 muestras con las dimensiones que se indican en la Tabla 1. Los cuerpos de prueba se almacenaron en una cámara a una temperatura de 20 °C y 65% de humedad relativa.

Las probetas se confeccionaron de un largo igual a 20 veces la altura promedio de cada muestra. El relevamiento de los defectos se realizó de acuerdo con los criterios de UNE-EN 1310 (1997) e IRAM 9662-3 (2015). La clasificación visual se realizó de acuerdo con el método propuesto por Guillaumet *et al.* (2019) y adoptado en la actualización 2020 de los Suplementos del Reglamento INTI-CIRSOC (2016), en la Tabla 2 se especifican los principales parámetros para cada calidad. La nudosidad se mide en porcentaje de la altura de la cara donde se manifiesta y el anillo de crecimiento corresponde a mayor dimensión relevada.

Parámetro	Unidad	Calidad 1	Calidad 2
Médula	-	Se admite	Se admite
Nudosidad	mm./mm.	Menor o igual a 1/3	Menor o igual a 2/3
Anillo de crecimiento	mm.	Menor a 12	Menor a 16

Tabla 2: Pautas para la clasificación visual

Los ensayos de flexión para determinar el módulo de rotura (MOR) y el módulo de elasticidad (MOE) se realizaron de acuerdo con IRAM 9663 (2013). La determinación del MOR y el MOE se realizó según la IRAM 9664 (2013). El contenido de humedad y la densidad se determinaron según las normas ISO 13061-1 (2014) e ISO 13061-2 (2014), respectivamente.

La Figura 1 la posición de una pieza en el equipo de ensayos, se pueden apreciar los apoyos y los dispositivos de ingreso de la carga en los tercios de la luz.



Figura1: Viga durante el ensayo a flexión según norma IRAM 9663

3 | RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 2 permite apreciar, para las 440 piezas ensayadas, la tendencia decreciente de (f_m) al aumentar (h). El análisis de regresión lineal arroja una correlación negativa moderadamente fuerte entre ambas variables, $R=-0,55$; valor- $P<0,05$.

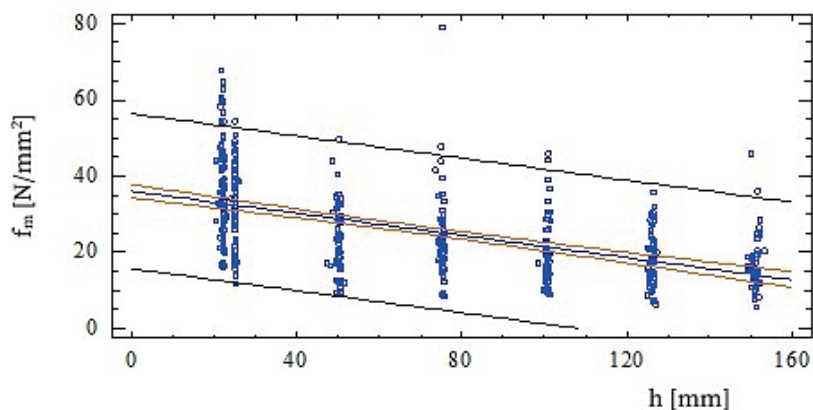


Figura 2: Relación entre la tensión de rotura en flexión (f_m) y la altura de la sección (h).

En la Tabla 3 se presentan los valores obtenidos experimentalmente para la tensión de rotura en flexión (f_m) y la densidad (ρ) ajustada a una humedad del 12%. Se determinaron los valores para la muestra completa y para la misma dividida en calidades resistentes de acuerdo con el criterio propuesto por Guillaumet *et al*/2019. Se puede apreciar una tendencia decreciente, con el incremento de la altura de la sección (h), en los valores medios de (f_m), con excepción de la muestra $3_{50 \times 75}$ que presenta un valor ligeramente superior al de la muestra $2_{50 \times 50}$ en la muestra completa. La desviación estándar indica una gran variabilidad en los valores de (f_m) obtenidos, los coeficientes de variación arrojaron valores entre el 34 % y el 46 %. El contenido de humedad de las probetas al momento del ensayo resultó con un valor medio del 13,1 %, con un coeficiente de variación del 12 %.

Calidad	Parámetro	Unidad	Muestras						
			1 _{100x25}	2 _{50x50}	3 _{50x75}	4 _{50x100}	5 _{50x125}	6 _{50x150}	
Muestra sin clasificar	f_m	f_{m-m}	N/mm ²	34,5	23,1	23,8	20,3	18,2	16,4
		COV	%	34	38	46	44	38	44
	ρ	ρ_m	kg/m ³	390	389	381	390	393	394
		COV	%	11	13	8	9	10	7
			n	167	56	58	53	57	49
Calidad superior	f_m	f_{m-m}	N/mm ²	40,8	30	35,4	33,4	20,6	30,4
		COV	%	25	30	43	24	--	30
	ρ	ρ_m	kg/m ³	389	366	379	389	409	400
		COV	%	11	9	7	5	--	5
			n	92	10	14	10	1	6
Calidad inferior	f_m	f_{m-m}	N/mm ²	27,7	22,2	20,4	15,7	18,9	16,5
		COV	%	32	39	27	36	37	24
	ρ	ρ_m	kg/m ³	396	399	391	383	394	390
		COV	%	11	11	9	9	9	8
			n	45	28	26	24	35	19
Rechazo	f_m	f_{m-m}	N/mm ²	25,5	20,9	19,7	19,1	17	12,9
		COV	%	33	34	36	30	40	30
	ρ	ρ_m	kg/m ³	385	387	370	399	391	395
		COV	%	10	17	8	11	11	7
			n	30	18	18	19	21	24

f_{m-m} : valor medio experimental de la tensión de rotura en flexión. ρ : densidad. ρ_m : densidad media. COV: coeficiente de variación: n: cantidad de cuerpos de prueba.

Tabla 3: Tensión de rotura de flexión(f_m) y densidad (ρ) por muestra y calidad.

Efectividad del criterio de la norma IRAM 9664 (2013) para minimizar el efecto de la altura

Considerando que el criterio de IRAM 9664 (2013) para ajustar la tensión de rotura

en flexión a la altura de referencia ($f_{m-150} = f_m / k_h$, con $k_h = (150 / h)^{0,2}$, (h): altura de la sección en mm) es el mismo que el de EN 384 (2010) y que en artículos publicados para otras especies la efectividad del coeficiente de ajuste variaba con la calidad de la madera, se analizaron los valores de (f_m) para la muestra completa y para la misma dividida en las tres calidades propuestas por Guillaumet *et al.* (2019). Considerando que las muestras son de distinto tamaño, el estudio se realizó sobre la base de los valores medios de resistencia en flexión.

La Tabla 3 presenta los valores medios de tensión de rotura en flexión, coeficientes de variación y cantidad de piezas para cada una de las muestras divididas en calidades resistentes. La muestra 6 presentó una altura promedio de 151,1 mm, considerando que la altura de referencia es 150 mm, se pueden asumir a los valores de resistencia de esa muestra como valores de referencia para el análisis de la efectividad de la corrección propuesta. Se observó un aumento de la correlación entre la resistencia media a la flexión (f_{m-m}) y la altura (h) al disminuir la calidad de la madera, con valores de coeficiente de correlación $R = -0,31$, $R = -0,45$ y $R = -0,52$ para las calidades superior, inferior y el rechazo respectivamente.

En la Figura 3 se presenta el cociente entre la tensión de rotura experimental media (f_{m-m}) y la tensión de rotura de referencia (f_{ref} - muestra 6) y la altura (h), tanto para la muestra sin clasificar como para cada una de las calidades resistentes. Se grafica también el valor del coeficiente de corrección por altura propuesto por la norma IRAM 9663 (2013) ($k_h = (150 / h)^{0,2}$). Se observa que para la calidad superior las relaciones obtenidas son inferiores al coeficiente que surge de la norma, mientras que, para la calidad inferior, el descarte y la muestra sin clasificar los valores son en general superiores. Se observa que las curvas que representan el comportamiento de las dos calidades resistentes aptas para uso estructural resultan más cercanas a la generada por los coeficientes de la norma que las correspondientes al descarte y la muestra completa. En la calidad superior la mayor diferencia se detecta en la muestra $2_{50 \times 50}$, con una diferencia en menos de 21 %, no se consideró la muestra $5_{50 \times 125}$ porque incluye solo una probeta y no tiene representación estadística. En la calidad inferior las diferencias son menores, alcanzando un 16 % en menos para las tablas, muestra $1_{100 \times 25}$. La muestra sin clasificar y el residuo muestran un alejamiento mayor de la propuesta de la norma, alcanzando diferencias de 45 % y el 37 % respectivamente.

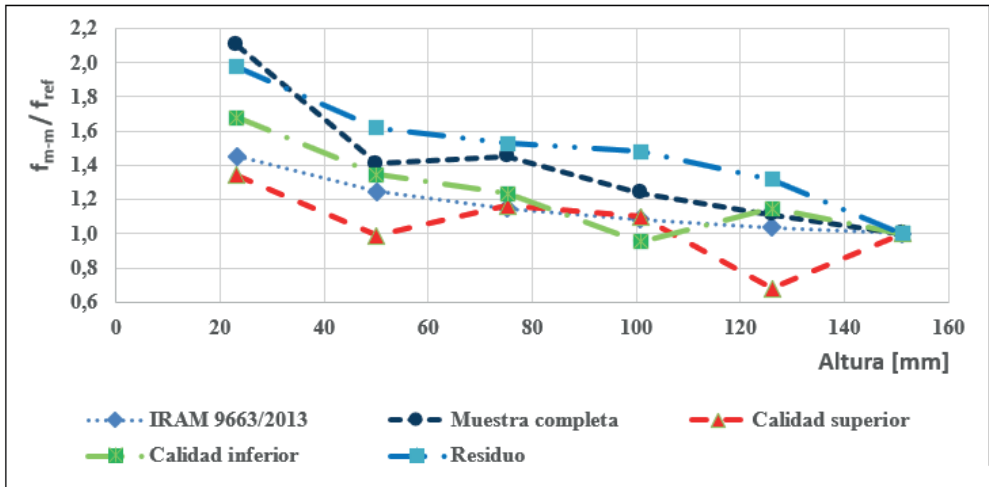


Figura 3: Relación entre valor medio de la tensión de rotura en flexión (f_{m-m}) y la altura de la sección (h) según la norma IRAM 9664 (2013) y los resultados experimentales.

El Reglamento INTI CIRSOC 601 (2016) incluye un factor de ajuste de la resistencia en flexión a la altura de referencia de 150 mm, por lo que resulta de interés la comparación de la resistencia a la flexión ajustada ($f_{m-150-m}$) por la mencionada norma y los valores experimentales de referencia (f_{ref}). En la Tabla 4 se observa que para la muestra sin clasificar las relaciones ($f_{m-150-m} / f_{ref}$) oscilan entre 1,45 y 1,07, para la calidad superior los valores están entre 0,80 y 0,99 (no se consideró la muestra $5_{50 \times 125}$ por las razones expuestas anteriormente), en la calidad inferior varía entre 0,88 y 1,15 mientras que el rechazo lo hace entre 1,27 y 1,36.

El análisis de regresión entre ($f_{m-150-m}$) y (h) de la sección indica que, tanto en la muestra sin clasificar como en el residuo, en la tabla ANOVA resulta el valor- $P < 0,05$ indicando que sigue existiendo una relación estadísticamente significativa entre ambas variables con un nivel de confianza del 95 %; en las calidades superior e inferior resulta el valor- $P > 0,05$ que indica que no hay relación significativa entre las variables, es decir que el ajuste realizado mostró una buena eficacia. Es para destacar que el ajuste entre la muestra $1_{100 \times 25}$ de altura promedio 23,2 mm luego de cepillada, y la muestra de referencia, de altura promedio 151,1 mm, es decir una relación de 6,5 veces, presentó, en las calidades superior e inferior, diferencias del 8 % y 15 % respectivamente.

Calidad	Parámetro	Unidad	Muestras					
			1 _{100x25}	2 _{50x50}	3 _{50x75}	4 _{25x100}	5 _{50x125}	6 _{50x150}
Muestra sin clasificar	f_{m150-m}	N/mm ²	23,7	18,6	20,7	18,7	17,6	$f_{ref} = 16,4$
	COV	%	34	38	47	44	38	44
	f_{m150-m} / f_{ref}		1,45	1,13	1,26	1,14	1,07	1,00
	n		167	56	58	53	57	49
Calidad superior	f_{m150-m}	N/mm ²	28,1	24,1	30,1	30,1	19,9	$f_{ref} = 30,4$
	COV	%	25	30	43	24		30
	f_{m150-m} / f_{ref}		0,92	0,80	0,99	0,99	0,66	1,00
	n		92	10	14	10	1	6
Calidad inferior	f_{m150-m}	N/mm ²	19	17,8	17,8	14,5	18,3	$f_{ref} = 16,5$
	COV	%	32	39	27	36	37	24
	f_{m150-m} / f_{ref}		1,15	1,08	1,08	0,88	1,11	1,00
	n		45	28	26	24	35	19
Rechazo	f_{m150-m}	N/mm ²	17,5	16,8	17,1	17,7	16,4	$f_{ref} = 12,9$
	COV	%	33	34	36	30	40	30
	f_{m150-m} / f_{ref}		1,36	1,30	1,33	1,37	1,27	1,00
	n		30	18	18	19	21	24

f_{m150-m} : valor medio de la tensión de rotura en flexión ajustada según IRAM 9664 (2013). f_{ref} : valor experimental de referencia, muestra 6. COV: coeficiente de variación. n: cantidad de cuerpos de prueba.

Tabla 4: Relación entre la tensión de rotura en flexión ajustada según IRAM 9664(2013) y el valor experimental de referencia.

4 | CONCLUSIONES

Los resultados experimentales en elementos estructurales, vigas y tablas de Pino ponderosa, mostraron una tendencia decreciente de la tensión de rotura en flexión con el incremento de la altura de la sección transversal. Este efecto fue más notable en la madera de menor calidad.

Se confirmó la efectividad del coeficiente de ajuste indicado en IRAM 9664 (2013) y de INTI-CIRSOC (2016) para minimizar el efecto de la altura de la sección sobre la tensión de rotura en flexión, en elementos estructurales de Pino Ponderosa. En la calidad superior la máxima diferencia encontrada fue del 20 % y en la calidad inferior del 15 %. Ambos valores son menores al límite del 20 % adoptado por la normativa argentina para evitar variabilidades excesivas.

REFERENCIAS

EN 1995-1-1. 2006: **Eurocódigo 5 (Design of timber structures - Part 1-1: General)**. Common rules and rules for buildings. European Committee for Standardization.

EN 384. 2010. **Structural timber - Determination of characteristic values of mechanical properties and density**. European Committee for Standardization, Brussels.

Fank, P.; Stefani, P.; Piter, J.C. 2014. **Efecto de la altura en la resistencia a flexión en piezas de pino resinoso del noreste de Argentina**. En XXXVI Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, trabajo 263, Montevideo, Uruguay.

Guillaumet, A.A.; Manavella R.D.; Acuña Rello L.; Pitel J.C. 2016. **Influencia de las dimensiones de la sección transversal sobre la resistencia a flexión en madera de (Populus deltoides 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67' cultivados en Argentina**. Maderas-Cienc Tecnol 18(4): 587 -598.

Guillaumet, A.A.; Filippetti, M.C.; Manavella R.D.; Meyer L.C.; Caballé G.; Martínez Meier G. 2019. **Resistencia a la flexión del Pino Ponderosa**. En 4^{to} Congreso Latinoamericano de Estructuras de Madera. Montevideo, Uruguay.

INTI CIRSOC. 2016. **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.

INTI CIRSOC. 2020. **Suplementos del Reglamento Argentino de Estructuras de Madera CIRSOC 601-2016. Edición 2020-1**. Buenos Aires, Argentina.

IRAM 9662-3. 2015. **Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por resistencia. Parte 3: Tablas de pino taeda elliotti**. 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 las propiedades físicas y mecánicas. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. 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 13061-1. 2014. **Physical and mechanical properties of wood – Test methods for small clear wood specimens. Determination of moisture content for physical and mechanical tests**. International Organization for Standardization

ISO 13061-2. 2014. **Physical and mechanical properties of wood – Test methods for small clear wood specimens. Determination of density for physical and mechanical tests**. International Organization for Standardization.

NCh 1198. 2007. **Madera – Construcciones en madera – Cálculo**. Instituto Nacional de Normalización INN-Chile, Santiago.

NDS. 2012. **National design specification for wood construction**. American Wood Council. Leesburg. EEUU. ISBN 978-0-9827380-7-8.

Newlin, J.A. & 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, U.S. Department of Agriculture, p. 375-393. Reprinted as Report 1310, october 1941.

Piter, J.C. 2012. **Size effect on bending strength in sawn timber of fast-growing Argentinean Eucalyptus grandis. Analysis according to the criterion of European standards.** Eur J Wood Prod 70(1-3):17–24.

Rouger, F.; Barrett, J.D. 1995. **Size effects in timber.** In Informationsdienst Holz, STEP 3: 3/1-3/24. Fachverlang Holz. Düsseldorf, Deutschland.

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

Weibull, W. 1939. **The phenomenon of rupture in solids.** In Royal Swedish Institute for Engineering Research. Proceeding N°153. Stockholm, Sweden.