

FLEXIÓN FUERA DEL PLANO DE PANELES DE MADERA CONTRALAMINADA DE PINO PONDEROSA

Tosco, Andrea D.^a; Guillaumet, Alfredo A.^a; Filippetti, Ma. Cecilia^a; Cabrero, José M.^b

^a Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Venado Tuerto,
atosco@frvt.utn.edu.ar ^b Universidad de Navarra, Escuela Técnica Superior de Arquitectura

Palabras clave: pino ponderosa, madera contralaminada, mass timber

RESUMEN

El *Pinus ponderosa* de la Patagonia Andina Norte constituye un recurso forestal abundante con potencial para su valorización en sistemas constructivos sustentables. En este contexto, la madera contralaminada (Cross Laminated Timber, CLT) permite su transformación en un producto estructural de mejor desempeño, requiriéndose la caracterización de sus propiedades para su incorporación en el diseño estructural. El presente estudio tiene por objetivo determinar las propiedades mecánicas de paneles de CLT de cinco capas, de calidad industrial, fabricados con esta especie. Se ensayaron 17 probetas (363 x 115 x 2950 mm) a flexión fuera del plano, de acuerdo con la norma UNE-EN 16351 (AENOR, 2021). Los resultados experimentales revelaron una resistencia característica de 15,5 N/mm², situándose apenas un 3,73% por debajo del valor teórico de referencia de tablas (16,1 N/mm²). Por el contrario, el módulo de elasticidad medio alcanzó los 7946,75 N/mm², superando en un 28,17% al valor de tabla (6200 N/mm²), mientras que la rigidez media eficaz registrada fue de $2,89 \times 10^{11}$ N·mm². Finalmente, el análisis de los modos de fallo evidenció que el desempeño mecánico estuvo fuertemente condicionado por fenómenos precursor de delaminación, lo que abre un margen potencial de mejora mediante la optimización de la línea de adhesivo.

ABSTRACT

Pinus ponderosa from the Northern Andean Patagonia constitutes an abundant forest resource with potential for valorization in sustainable construction systems. In this context, Cross Laminated Timber (CLT) allows its transformation into a higher-performance structural product, requiring the characterization of its properties for incorporation into structural design. This study aims to determine the mechanical properties of five-layer, industrial-quality CLT panels manufactured with this species. Seventeen specimens (363 x 115 x 2950 mm) were tested under out-of-plane bending in accordance with the UNE-EN 16351 standard (AENOR, 2021). The experimental results revealed a characteristic strength of 15,5 N/mm², standing just 3,73% below the theoretical reference value from tables (16,1 N/mm²). Conversely, the mean modulus of elasticity reached 7946,75 N/mm², exceeding the table value (6200 N/mm²) by 28,17%, while the recorded mean effective stiffness was $2,89 \times 10^{11}$ N·mm². Finally, the analysis of failure modes showed that mechanical performance was heavily conditioned by delamination as a precursor phenomenon, which opens a potential margin for improvement through the optimization of the adhesive line.

1. INTRODUCCIÓN

La construcción masiva en madera tecnificada (mass timber), impulsada por paneles de madera contralaminada (CLT), ha experimentado un crecimiento global significativo debido a su alta eficiencia estructural y sostenibilidad ambiental, consolidándose como un eje estratégico para el desarrollo de la edificación sustentable en la región iberoamericana (Reyes et al., 2024, Araya et al., 2022). Al configurarse mediante capas ortogonales alternadas, el CLT optimiza las propiedades mecánicas de las coníferas, permitiendo su uso eficiente en elementos superficiales como entresijos y cubiertas sometidos principalmente a flexión fuera del plano.

En el ámbito internacional, la fabricación de CLT está estandarizada bajo requisitos mecánicos mínimos. Según la normativa europea y manuales de referencia, la clase C24 es la más utilizada en las láminas longitudinales debido a su alta exigencia estructural, mientras que para las capas transversales se admite el empleo de clases menores como la C16 o, como umbral mínimo absoluto, la clase C14 (Asociación Española de Normalización [AENOR], 2010; Karacabeyli y Gagnon, 2019). Esta distribución optimiza el recurso al destinar la madera de mayor calidad visual a las zonas expuestas a las máximas tensiones de flexión.

En regiones con una industria forestal en desarrollo, como la Patagonia Andina Norte en Argentina, el *Pinus ponderosa* de la Patagonia Andina Norte constituye un recurso forestal abundante con potencial para su valorización en sistemas constructivos sustentables (Caballé et al., 2020; Martínez Meier, 2017). No obstante, las plantaciones locales de rápido crecimiento suelen producir madera con una presencia frecuente de nudos y desviaciones de fibra. Además, se dispone de gran cantidad de madera juvenil con presencia de médula (Guillaumet et al. 2019). Con el fin de maximizar el aprovechamiento del recurso forestal disponible y reducir los costos de descarte, resulta estratégicamente viable fabricar CLT de grado industrial utilizando la materia prima disponible en abundancia. Sin embargo, la inclusión de estas singularidades anatómicas altera la transferencia de tensiones internas, especialmente la rigidez flexional y el corte rodante (*rolling shear*), lo que exige una validación experimental rigurosa antes de su incorporación en los códigos de diseño. Actualmente, no existe información de la caracterización mecánica y normativa de madera contralaminada para esta especie-procedencia.

Para abordar esta brecha de conocimiento, este estudio tiene como objetivo determinar las propiedades mecánicas de paneles de CLT de cinco capas, de calidad industrial, fabricados con *Pinus ponderosa*. Se ensayaron 17 probetas (363 x 115 x 2950 mm) a flexión fuera del plano, de acuerdo con la norma UNE EN 16351 (AENOR, 2021). Se trata de paneles prototipo, enmarcados en una experiencia de producción aún incipiente en Argentina. A su vez, corresponden a un producto de tipo industrial, ya que presentan nudos visibles en ambas caras, reflejando el uso de materia prima con escasa selección visual y priorizando el aprovechamiento del recurso disponible. Los resultados obtenidos buscan sentar las bases normativas para valorizar este recurso forestal y promover sistemas constructivos sustentables en el país. Asimismo, este marco pretende impulsar un manejo silvicultural que optimice la calidad del material disponible para la futura industria de la madera masiva.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Procedencia de la materia prima y caracterización de los prototipos

Los paneles fueron fabricados como prototipos experimentales, con una dimensión nominal de 2400 x 115 x 3000 mm y un esquema de capas simétrico y ortogonal de cinco capas de 23 mm de espesor cada una (23/23/23/23/23 mm). Cada espécimen se fabricó a partir de tablas de *Pinus ponderosa* (145 x 23 x 3050 mm) con edades comprendidas entre 20 a 30 años, procedentes de Junín de los Andes (Neuquén, Argentina). Para el ensamble de las capas se utilizó un adhesivo estructural del tipo emulsión de polímero de isocianato (EPI). El proceso de manufactura se caracterizó por la ausencia de encolado de cantos, uniones dentadas, ranuras o de holguras entre las láminas. La configuración geométrica, física y mecánica de los prototipos se detalla en la *Tabla 1*.

Las capas externas e intermedias se clasificaron en grados estructurales de acuerdo con los criterios de la norma IRAM 9670-5 (Instituto Argentino de Normalización y Certificación [IRAM], s.f.). Específicamente, las capas longitudinales externas (Capas 1 y 5) se conformaron con tablas de Grado 1 (Clase 1, libres de médula); las capas transversales intermedias (Capas 2 y 4) con tablas de Grado 2 (Clase 2, libres de médula); y la capa central longitudinal (Capa 3) con tablas de Clase 2. Previo a la ejecución de los ensayos mecánicos, los especímenes se almacenaron en una cámara de acondicionamiento bajo condiciones controladas de temperatura ($20 \pm 3^\circ\text{C}$) y humedad relativa ($65 \pm 5\%$).

Propiedades de la madera contralaminada

Tipo/Espesor CLT	CL5/115
Grado de laminación	C1/C2/C2/C2/C1
Espesores de laminación (mm)	23/23/23/23/23
Adhesivo	EPI

Datos de la probeta de madera contralaminada

Cantidad	n	17
Dimensiones	$b \times h \times l$	363 x 115 x 2760
Inercia efectiva (mm^4)	$I_{ef,x}$	$3,6 \times 10^7$
Módulo resistente efectivo (mm^3)	$W_{ef,x}$	$6,3 \times 10^5$
Ranuras de alivio		NO
Uniones dentadas		NO
Relación anchura espesor de lámina	b_l/t_l	> 4
Humedad de ensayo (%)	w	12 ± 3

b : anchura en mm; h : grosor en mm; l : luz entre apoyos para el ensayo a flexión, en mm; **C1, C2**: Clase 1 y 2 según IRAM 9670-5 (IRAM, s.f., en revisión pública).

Tabla 1. Propiedades de la madera contralaminada y probetas de pino ponderosa

2.2. Procedimiento de ensayo a flexión

Los ensayos de flexión fuera del plano se rigieron por las normas UNE-EN 16351 (AENOR, 2021) y UNE-EN 408 (AENOR, 2012), mediante una configuración de carga simétrica en cuatro puntos, *Figura 1*. La carga se aplicó mediante un sistema hidráulico en un marco rígido con control de desplazamiento a una velocidad constante $\leq 0,3$ mm/s ($\leq 0,003h$). Las fuerzas se registraron con una celda de carga de 50 kN y las deflexiones se monitorizaron con tres comparadores analógicos Mitutoyo (resolución 0.01 mm). El protocolo constó de dos etapas: una fase elástica hasta el $0,4 F_{max}$ para caracterizar la rigidez, seguida del retiro del instrumental de precisión, y una fase continua hasta el colapso final de la probeta.



Figura 1. Ensayo a flexión fuera del plano en el marco de cargas del laboratorio GIDEC, UTN FRVT.

2.3. Desempeño estructural experimental

La rigidez eficaz local a flexión ($EI_{LC,local,eficaz}$) y la resistencia a flexión fuera del plano ($f_{m,x,LC}$) en la dirección del eje fuerte se determinaron conforme a las *Ecuaciones 1 y 2*, basadas en la formulación de Steiner y la respuesta elástica panel.

$$(EI)_{LC,local,eficaz} = E_{local} \cdot I_{LC,eficaz} = \frac{l_2 \cdot l_1^2}{16} \cdot \frac{F_2 - F_1}{w_2 - w_1} \quad (1)$$

$$\sigma_{m,x,LC} = \frac{m_{xy}}{W_{ef,x}} \quad (2)$$

dónde, E_{local} es el módulo de elasticidad local correspondiente a la $I_{LC,eficaz}$, en [N/mm²] obtenida con la fórmula de Steiner para las capas efectivas; l_2 es la distancia de la carga al apoyo en [mm]; l_1 es la distancia de referencia para medir w_{local} , en [mm]; $F_2 - F_1$ es el incremento de carga en [N], en la recta de regresión con un coeficiente de correlación de 0,99 o mejor; $w_2 - w_1$ es el incremento de deformación en [mm], correspondiente a $F_2 - F_1$; b es la anchura en [mm]; t_i es el espesor de las láminas en [mm]; $z_{i,x}$ es la distancia desde el centro de la capa i al eje neutro de la madera contralaminada en [mm]; m_{xy} es el momento en el plano xy y $W_{ef,x}$ es el módulo resistente eficaz en dirección x.

Para evaluar la influencia de las propiedades de las láminas individuales en el comportamiento mecánico global del CLT, se adoptaron los valores mecánicos característicos de las tablas de *Pinus ponderosa* establecidos en la norma IRAM 9670-5 (IRAM, en revisión) para las respectivas clases resistentes utilizadas en cada capa.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Ensayos a flexión fuera del plano

Los resultados experimentales de 17 probetas de madera contralaminada de pino ponderosa de 5 capas ensayadas a flexión fuera del plano se resumen en la *Tabla 2*. La carga última (F_{max}) varió entre 18,4 y 36,1 kN, presentando un coeficiente de variación (COV) del 16,5%. Por su parte, la rigidez eficaz local a flexión ($(EI)_{LC,local,eficaz}$) alcanzó un valor medio de $2,9 \times 10^{11}$ N·mm² con un COV del 11,9% (*Ecuación 1*). Asimismo, la resistencia última a la flexión en las fibras externas ($f_{m,x,LC}$) registró un valor promedio de 21,7 N/mm² con un COV de 16,5% (*Ecuación 2*).

ID	F_{max} (kN)	$(EI)_{LC,local,eficaz}$ ($\times 10^{11}$ N·mm ²)	m_{max} (kN·m)	$\sigma_{m,x,LC}$ (N/mm ²)	Modo de falla
B-5-23-3D	29,2	3,0	15,1	23,9	A
B-5-23-3B	24,2	2,9	12,5	19,8	A
B-5-23-1D	21,2	2,6	11,0	17,4	A
B-5-23-2C	31,4	3,1	16,2	25,7	B
B-5-23-3A	36,1	3,0	18,7	29,6	A
B-5-23-1A	24,0	2,2	12,4	19,6	B
B-5-23-1B	21,6	3,5	11,2	17,7	B
B-5-23-1C	23,0	2,6	11,9	18,8	A
B-5-23-2A	27,2	3,2	14,1	22,3	B
B-5-23-2F	30,6	3,1	15,8	25,1	B
B-5-23-3E	27,2	3,1	14,1	22,3	C
B-5-23-3C	28,6	2,9	14,8	23,4	B
B-5-23-4A	24,0	3,2	12,4	19,7	B
B-5-23-2B	29,4	2,9	15,2	24,1	B
B-5-23-1E	18,4	2,8	9,5	15,0	A
B-5-23-4B	26,1	2,5	13,5	21,4	A
B-5-23-4C	28,6	2,3	14,8	23,4	A
Medio	26,5	2,9	13,7	21,7	
SD	4,4	0,3	2,3	3,6	
COV (%)	16,5%	11,9%	16,5%	16,5%	

Tabla 2. Propiedades mecánicas y modos de rotura a flexión de paneles CLT de 5 capas de pino ponderosa en la dirección del eje fuerte (x).

Aplicando la UNE-EN 14358 (AENOR, 2016), la resistencia característica de la madera contralaminada fue de 15,5 N/mm², situándose apenas un 3,73% por debajo del valor teórico de referencia de tablas (16,1 N/mm²). Por el contrario, el módulo de elasticidad medio alcanzó los 7946,75 N/mm², superando en un 28,17% al valor de tabla (6200 N/mm²), mientras que la rigidez media eficaz registrada fue de $2,89 \times 10^{11}$ Nmm².

Los modos de falla más comunes observados durante la ejecución del programa experimental se ilustran en la *Figura 2*, destacándose: (A) flexotracción sin cortante de rodadura en la capa transversal por influencia de delaminación (47,1%), (B) flexotracción con influencia del cortante de rodadura en la capa transversal (47,1%) y (C) falla por delaminación aislada (5,9%).

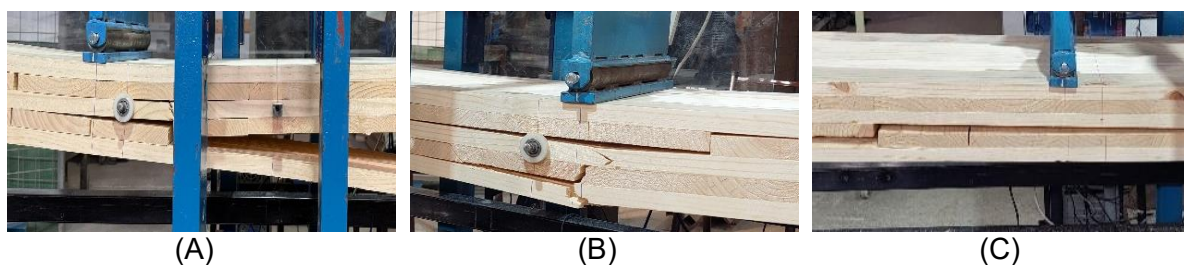


Figura 2. Modos de falla

3.2. Relación lámina-madera contralaminada

De acuerdo con las directrices de la norma UNE-EN 16351 (AENOR, 2021), las propiedades mecánicas globales de los paneles de CLT pueden deducirse analíticamente a partir del comportamiento individual de sus láminas componentes. En la **Tabla 3** se presentan los valores característicos de dos clases resistentes de tablas de pino ponderosa, determinados bajo los criterios de la norma IRAM 9670-5 (IRAM, s.f., en revisión). Asimismo, para aquellas propiedades mecánicas complementarias que no se encuentran explícitamente estipuladas en la normativa nacional IRAM, se adoptaron las relaciones de cálculo e interpolación establecidas por la norma europea UNE-EN 384 (AENOR, 2023).

Grado según IRAM 9670-5		Clase 1 (C1)	Clase 2 (C2)
Resistencia a la flexión (N/mm ²)	$f_{m,k}^{(a)}$	16,1	8,8
Módulo de elasticidad longitudinal (N/mm ²)	$E_{0,mean}^{(a)}$	6200	4400
	$E_{90,mean}^{(b)}$	207	147
Módulo de elasticidad transversal (N/mm ²)	$G_{mean}^{(b)}$	388	275
	$G_{rod}^{(b)}$	38,8	27,5
Densidad (kg/m ³)	$\rho_k^{(a)}$	330	330
	$\rho_{mean}^{(b)}$	396	396

(a) Valores obtenidos de IRAM 9670-5 (b) Valores extrapolados de relaciones establecidas en UNE-EN 384

Tabla 3. Propiedades de las láminas de pino ponderosa

Al realizar un análisis comparativo de los parámetros de las clases europeas empleadas para madera contralaminada con la materia prima local, se observa que la clase C14 (AENOR, 2010) presenta una resistencia a la flexión 13,04% menor en comparación con la Clase 1 (14,0 vs. 16,1 N/mm²). No obstante, la categoría europea supera al recurso regional en un 12,90% respecto al módulo de elasticidad medio

(7000 vs. 6200 N/mm²), y en un 13,40% en el módulo transversal (440 vs. 388 N/mm²), exhibiendo a su vez una densidad característica un 12,12% inferior (290 vs. 330 kg/m³). Su desempeño mecánico actual no resulta directamente equiparable al de los componentes utilizados en edificaciones de mediana y gran envergadura. Es en este punto donde las investigaciones en curso y futuros desarrollos normativos permitirán definir con precisión los límites de explotación de este recurso forestal bajo las condiciones reales de nudosidad, presencia de médula y edad que caracterizan a las plantaciones locales en la actualidad.

4. CONCLUSIONES

El presente estudio permitió evaluar el comportamiento mecánico y los principales mecanismos de daño en paneles industriales de madera contralaminada (CLT) de cinco capas fabricados con Pinus ponderosa de la Patagonia Andina Norte, sometidos a ensayos de flexión fuera del plano. A partir de los resultados experimentales y el análisis posterior, se desprenden las siguientes conclusiones:

- El módulo de elasticidad medio de la madera contralaminada alcanzó los 7946,75 N/mm², un 28,17% mayor que el valor de tablas (6200 N/mm²), registrándose además una rigidez media eficaz de $2,89 \times 10^{11}$ N·mm².
- La resistencia característica de la madera contralaminada se determinó en 15,5 N/mm², un valor apenas un 3,73% por debajo de la referencia teórica establecida para tablas de la especie-procedencia (16,1 N/mm²).
- Aunque la delaminación pura representó solo el 6% de las fallas, se constató su alta incidencia como fenómeno precursor de otros colapsos; específicamente, afectó al 52% de las muestras que fallaron por flexotracción sin cortante de rodadura en la capa transversal.
- Los valores característicos exhiben un margen de mejora potencial si se optimiza la línea de adhesivo, dado que el colapso estuvo fuertemente condicionado por fenómenos de delaminación y no por el agotamiento resistente de la madera.

5. REFERENCIAS

- Araya, R., Guillaumet, A., do Valle, Â., Duque, M. d. P., Gonzalez, G., Cabrero, J. M., De León, E., Castro, F., Gutierrez, C., Negrão, J., Moya, L., & Guindos, P. (2022). Development of sustainable timber construction in Ibero-America: State of the art in the region and identification of current international gaps in the construction industry. Sustainability, 14(1), Artículo 271. <https://doi.org/10.3390/su14010271>
- Asociación Española de Normalización. (2010). Madera estructural. Clases resistentes. (UNE-EN 338:2010).
- Asociación Española de Normalización. (2012). Estructuras de madera. Madera aserrada y laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas (UNE-EN 408:2011+A1:2012).
- Asociación Española de Normalización. (2016). Estructuras de madera. Determinación y verificación de los valores característicos (UNE-EN 14358:2016).

- Asociación Española de Normalización. (2023). Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad (UNE-EN 384:2016+A2:2023).
- Caballé, G., Santaclara, O., Diez, J. P., Letourneau, F., Merlo, E., & Martinez Meier, A. (2020). Where to find structural grade timber: A case study in ponderosa pine based on stand and tree level factors. *Forest Ecology and Management*, 459, Artículo 117849. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117849>
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (s.f.). Madera aserrada estructural. Clasificación visual de las piezas para uso estructural. Parte 5: Piezas aserradas de pino ponderosa (*Pinus ponderosa* Douglas ex Lawson) (Proyecto de Norma IRAM 9670-5, en revisión pública).
- Karacabeyli, E., & Gagnon, S. (Eds.). (2019). CLT Handbook: Cross-Laminated Timber (Ed. canadiense). FPIinnovations. ISBN: 978-0-86488-592-0.
- Martínez Meier, A. (Ed.). (2017). *Proceso, producto y gestión de la madera de pino Ponderosa* (1.ª ed.). Ediciones INTA.
- Reyes C., López V., Guindos P. (2024) Guía de diseño y especificación de madera contralaminada (CLT). Centro UC de Innovación en Madera (CIM UC), primera edición, ISBN: 978-956-14-3406-6. Santiago, Chile