

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE MADERA CONTRALAMINADA (MCL)

NUMERICAL SIMULATION OF CROSS-LAMINATED TIMBER (CLT) STRUCTURAL ELEMENTS

Benitez Mendes, Rodrigo Adolfo ⁽¹⁾*; Erpen Benincá, Matheus ⁽²⁾; Benvegna Morsch, Inácio ⁽³⁾

⁽¹⁾ Ing. Civil. Maestrando. CEMACOM, PPGEC, UFRGS. Porto Alegre, Brasil.

⁽²⁾ MSc. Ing. Civil. CEMACOM, PPGEC, UFRGS. Porto Alegre, Brasil.

⁽³⁾ Dr. Ing. Civil. CEMACOM, PPGEC, UFRGS. Porto Alegre, Brasil.

* Contacto: rodrigo.btz@outlook.com

CÓDIGO: 4619322

Resumen

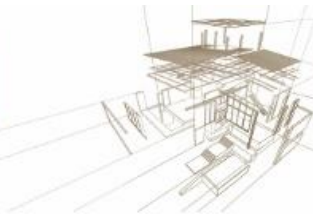
Paneles de madera contralaminada (MCL) han demostrado en las últimas décadas ser un material constructivo confiable y eficiente del punto de vista tanto estructural como ambiental. Esto se debe a su configuración sólida en capas compuestas por tablas de madera aserrada certificada encoladas perpendicularmente entre sí con adhesivo estructural, confiriéndole excelente rigidez en ambas direcciones ortogonales. Por lo tanto, estos son frecuentemente utilizados como muros de corte y diafragmas de piso y cubierta en edificios en altura. Debido a su comportamiento estructural complejo, diversas investigaciones experimentales se han llevado a cabo en los últimos años para comprenderlo mejor, y algunos modelos numéricos, usualmente compuestos por elementos finitos sólidos hexaédricos, se han desarrollado y calibrado con la información experimental disponible. En este contexto, el presente trabajo propone un modelo en elementos finitos utilizando un software comercial, empleando elementos cuadriláteros de 4 nodos con múltiples capas y un modelo constitutivo ortotrópico del material aplicado en distintas direcciones de cada capa. Un conjunto de vigas y paneles, ensayados experimentalmente en un estudio previo, fueron simulados numéricamente con este modelo. Los resultados numéricos obtenidos presentaron buena correlación con los datos experimentales, y la estrategia numérica planteada mostró ser capaz de simular apropiadamente el comportamiento estructural de la madera contralaminada en el régimen elástico.

Palabras-clave: madera contralaminada, simulación numérica, método de los elementos finitos.

Abstract

Cross-Laminated Timber (CLT) panels have proven in recent decades to be a reliable and efficient building material from the structural and environmental point of view. This is due to its solid configuration composed of layers made of certified sawn timber boards glued perpendicular to each other with structural adhesive, providing excellent stiffness in both orthogonal directions. Thus, these panels are frequently used as shear walls and floor/roof diaphragms in tall buildings. Due to its complex structural behavior, several experimental researches have been carried out in recent years to better understand it, and some numerical models, usually composed of solid hexahedral finite elements, have been developed and calibrated with the experimental data available. In this context, the present work proposes a finite element model using a commercial software, employing quadrilateral 4-node elements with multiple layers and an orthotropic material model applied in different directions on each layer. A set of beams and panels, tested experimentally in a previous work, were numerically simulated by this model. The obtained numerical results presented a good correlation with the experimental results, and the numerical modeling strategy showed to be able to simulate properly the behavior of CLT structural elements in the elastic regime.

Keywords: cross-laminated timber, numerical simulation, finite element method.



1. INTRODUCCIÓN

Desde su origen a comienzos los años 90, la producción y uso de paneles de madera contralaminada (MCL) ha aumentado continuamente, y se prevé que esta tendencia se mantenga (Plackner, 2015). Su estructura prefabricada se compone de al menos tres capas de madera serrada, donde dichas capas adyacentes están orientadas ortogonalmente y encoladas con adhesivo estructural para formar un elemento macizo en madera (ICC, 2015). Algunas de las ventajas que caracterizan a este producto de madera industrializado son su alta estabilidad dimensional, buen aislamiento termoacústico, bajo impacto ambiental, excelente relación peso/resistencia, y gran rigidez en ambas direcciones ortogonales, permitiéndolo resistir esfuerzos dentro y fuera de su plano (Brandner et al., 2015).

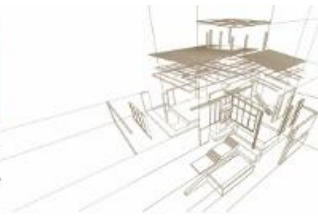
Debido a su configuración en capas cruzadas y siendo su principal material de naturaleza anisótropa, el comportamiento mecánico de los elementos de MCL es complejo. Diversos autores han trabajado para comprender su respuesta ante distintos tipos de solicitaciones mediante diferentes enfoques. Chistovasilis et al. (2016) evaluaron analíticamente las propiedades mecánicas de vigas ensayadas en flexión de 4 puntos. Franzoni et al. (2016) estudiaron la influencia de brechas de distinto tamaño entre láminas en su desempeño a flexión y corte mediante el método de los elementos finitos, utilizando elementos sólidos hexaédricos. Con metodología similar a la anterior, otros tantos investigadores examinaron elementos de MCL a flexión (Baño, Godoy, Vega 2016; Martínez et al. 2018; He, Sun, Li 2018).

Dentro de este contexto, el presente trabajo propone desarrollar un modelo numérico en elementos finitos más sencillo que los mencionados, utilizando elementos de cáscara para simular ensayos estáticos no destructivos de viga y placa de MCL realizados en una investigación previa en la Universidad de British Columbia (Zhang; Lee; Lam, 2018).

2. MODELO NUMÉRICO

El análisis en elementos finitos se realizó a través del *software* Ansys Mechanical APDL R19.2, habiendo adoptado para tal elementos de cáscara cuadriláteros lineales con 4 nodos SHELL181 (**ver** Figura 1). De acuerdo con Ansys Inc. (2016), este elemento es adecuado para analizar placas finas a moderadamente espesas, además de permitir una configuración en capas, detallando la espesura, material, orientación y número de puntos de integración de cada una. En este trabajo se emplearon 5 capas con direcciones perpendiculares entre sí, con 3 puntos de integración en cada una y plano de referencia ubicado en el medio de la capa central. Debido a la naturaleza del modelo, se asumen laterales de láminas encoladas y líneas de encolado perfectamente rígidas (**ver** Figura 2).

Los parámetros de entrada elásticos del modelo fueron adoptados según las clases de resistencia de las maderas utilizadas en la confección de los paneles declaradas por Zhang, Lee y Lam (2018), y se encuentran en la Tabla 1. El módulo de elasticidad longitudinal (E_L) fue retirado de NLGA (2017), a partir del cual se estimaron los demás conforme (Gagnon y Pirvu, 2011), Ecuaciones (1), (2) y (3). Los coeficientes de



Poisson (ν) fueron obtenidos de Kretschmann (2010). Estos parámetros están referenciados de acuerdo a la Figura 3.

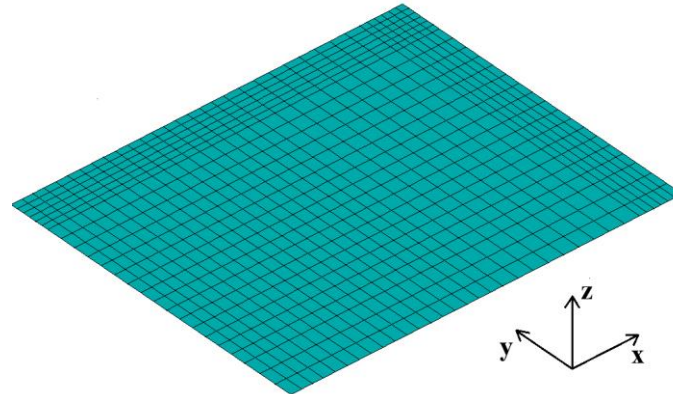


Figura 1: Malla de elementos finitos SHELL181 dispuestos en el plano XY.

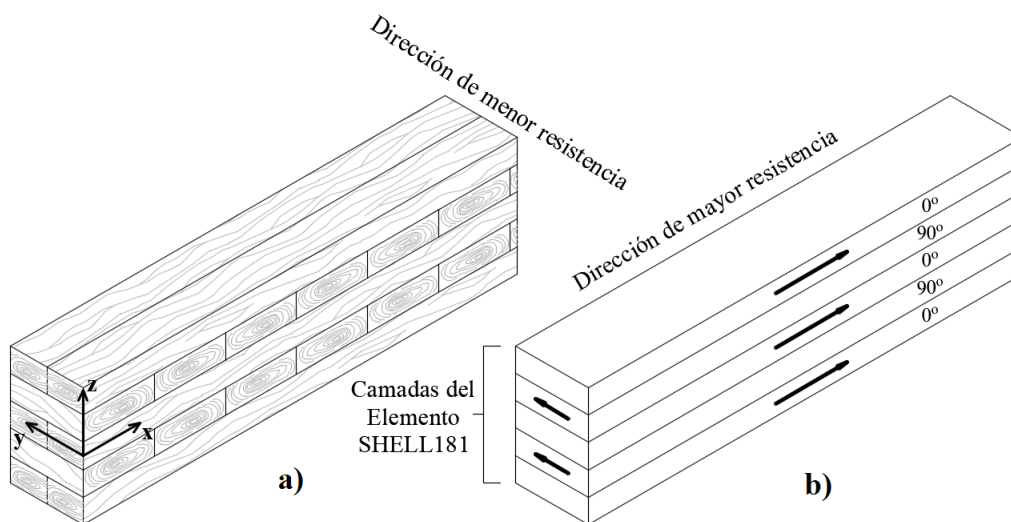


Figura 2: Elemento estructural de MCL. a) real; b) idealizado para el modelo numérico.

$$E_T = E_R = \frac{E_L}{30} \quad (1)$$

$$G_{LR} = G_{LT} = \frac{E_L}{16} \quad (2)$$

$$G_{RT} = \frac{G_{LR}}{10} \quad (3)$$

donde:

- E_L es el módulo de elasticidad longitudinal (MPa),
- E_R es el módulo de elasticidad radial a los anillos de crecimiento (MPa),
- E_T es el módulo de elasticidad tangencial a los anillos de crecimiento (MPa),
- G_{LR} y G_{LT} son los módulos de cizalladura paralelos a las fibras (MPa),
- G_{RT} es el módulo de cizalladura perpendicular a las fibras (*rolling shear*) (MPa).



Tabla 1: Parámetros de entrada elásticos del modelo en elementos finitos.

Orientación de las láminas	E_L (MPa)	E_R (MPa)	E_T (MPa)	G_{LR} (MPa)	G_{LT} (MPa)	G_{RT} (MPa)	ν_{LR}	ν_{LT}	ν_{RT}
Longitudinal	12.411	414	414	776	776	77,6	0,449	0,390	0,292
Transversal	9.653	322	322	603	603	60,3	0,449	0,390	0,292

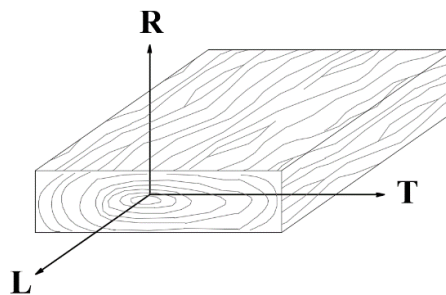


Figura 3: Sistema de referencias local de una pieza de madera utilizado en el modelo numérico.

Se simuló numéricamente vigas ensayadas en flexión de 4 puntos según ASTM (2015) y una placa apoyada en sus cuatro vértices cargada centralmente. Conforme el estudio experimental base, se consideraron dos tipos de viga, una Tipo 1 con capas externas orientadas longitudinalmente (mayor dirección) y otra Tipo 2 con capas externas orientadas transversalmente (menor dirección). A fin de disminuir el costo computacional, se aplicaron las debidas condiciones de simetría a los modelos, como se esquematiza en la Figura 4. Las mallas de elementos finitos para las vigas y placa se conformaron de 272 elementos – 315 nodos y 792 elementos – 850 nodos, respectivamente.

La configuración en altura de las vigas y placa de MCL fueron las mismas: 5 capas de 35 mm de espesura cada una, totalizando 175 mm de altura. Las dimensiones de las vigas fueron 305 mm de ancho por 3.660 mm de largo. Las dimensiones de la placa fueron 1.830 mm de ancho por 3.660 mm de largo.

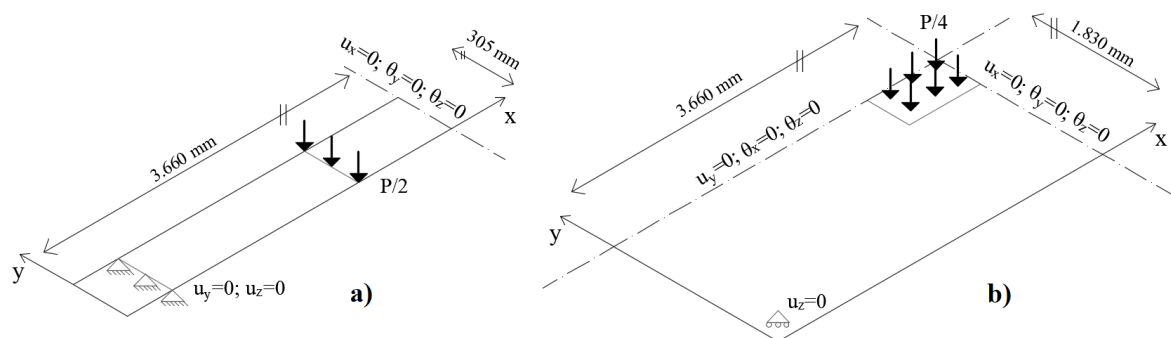


Figura 4: Condiciones de borde consideradas para el modelo numérico. a) Viga en flexión de 4 puntos; b) placa cargada en su centro.



3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Aquí se comparan los resultados experimentales con los obtenidos numéricamente para validar el modelo. Conjuntamente para complementar, se realizó una determinación analítica mediante el procedimiento presentado en el capítulo 10 de la norma norteamericana NDS AWC (2018).

Se determinó el campo de desplazamientos verticales de las vigas sometidas a flexión de 4 puntos (ver Figuras 5 y 6). Los parámetros de validación fueron la deflexión a mitad de la luz entre apoyos (Δ), y la deflexión sin cizalladura (*shear-free*) a mitad de la luz entre puntos de aplicación de carga (Δ_{sf}). Los mismos se compararon con las correspondientes deflexiones despejadas de las Ecuaciones (4) y (5), teniendo como dato los módulos de elasticidad calculados por Zhang, Lee y Lam (2018).

$$MOE_{app} = \frac{Pl^3}{108bd^3\Delta} \quad (4)$$

$$MOE_{sf} = \frac{Pl l_{sf}^2}{4bd^3\Delta_{sf}} \quad (5)$$

donde:

- MOE_{app} es el módulo de elasticidad longitudinal aparente, calculado con la deflexión en la luz entre apoyos (MPa),
- MOE_{sf} es el módulo de elasticidad longitudinal sin cizalladura, calculado con la deflexión en la luz entre los puntos de aplicación de carga (MPa),
- P es el incremento de la carga aplicada debajo del límite de proporcionalidad (N),
- l es la luz entre apoyos (mm),
- l_{sf} es la luz sin cizalladura, entre los puntos de aplicación de carga (mm),
- Δ es el incremento de deflexión de la línea neutra medida en la mitad de l (mm),
- Δ_{sf} es el incremento de deflexión de la línea neutra medida en la mitad de l_{sf} (mm),
- b es el ancho de la viga (mm),
- d es la altura de la viga (mm).

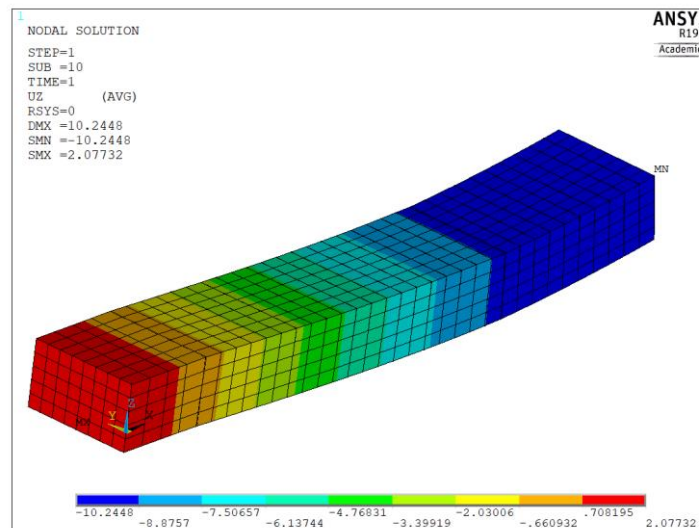
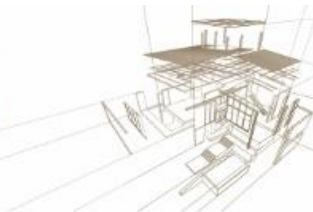


Figura 5: Malla de elementos finitos y campo de desplazamientos verticales en z [mm] de la viga Tipo 1. Resultados en azul oscuro.

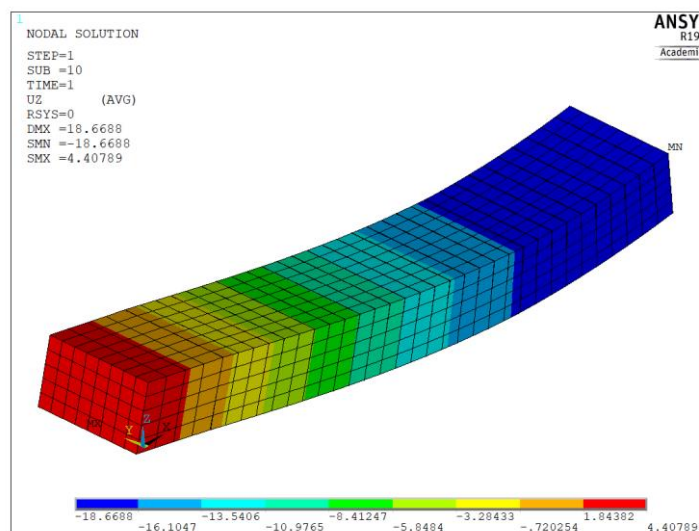
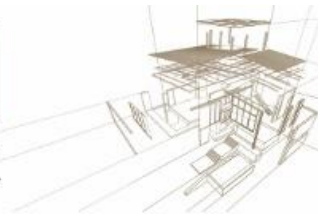


Figura 6: Malla de elementos finitos y campo de desplazamientos verticales en z [mm] de la viga Tipo 2. Resultados en azul oscuro.

Como se observa en la Tabla 2, el máximo error relativo obtenido fue de 14,34%, correspondiente a la estimativa de deflexión respecto a la luz entre apoyos de la viga Tipo 1. Para las deflexiones sin cizalladura se obtuvieron errores menores a 5%. Esto se considera razonable, dado que los datos de entrada del modelo no fueron retirados del lote representativo de la madera que compuso de los paneles (falta de datos), pero de tablas de valores característicos de norma (NLGA, 2017). Eso explica que los valores obtenidos sean conservadores, así como los obtenidos según AWC (2018). Además, la vinculación adoptada considera rótulas ideales, lo que no condice con las condiciones reales de ensayo.

En concordancia con las conclusiones de Niederwestberg (2018), las diferencias entre los resultados analíticos y numéricos se deben en parte a las discrepancias de



formulación entre el elemento finito utilizado y el método adoptado por AWC (2018). Esta disparidad se torna aún más evidente en el caso de flexión fuera-del-plano en la dirección de menor resistencia, y en el contexto de que la influencia de la cizalladura en la deflexión es considerable en casos donde la relación largura/altura (L/h) del elemento sea menor a 30. En el presente caso de estudio, L/h es igual a 18.

Tabla 2: Incrementos de deflexión aparentes y sin cizalladura (*shear-free*) experimentales y numéricos de las vigas.

Dirección de las fibras de las capas exteriores	Mayor dirección		Menor dirección	
Tipo de incremento de deflección [mm]	Δ	Δ_{sf}	Δ	Δ_{sf}
Zhang; Lee; Lam (2018) (Experimental)	8,960	1,058	17,182	2,168
Presente trabajo (Simulación numérica)	10,245	1,083	18,669	2,270
NDS (analítico)	10,654	-	21,573	-
% error (Numérico vs experimental)	14,34	2,36	8,65	4,70
% error (Numérico vs analítico)	-3,84	-	-13,46	-

Se determinó el campo de desplazamiento verticales de la placa apoyada en sus cuatro vértices con carga concentrada (**ver** Figura 7). El parámetro de validación fue el desplazamiento vertical en su centro, cuya comparación con el resultado experimental puede verse en la Tabla 3. Una vez más, el valor obtenido resulta ser conservador al relacionarlo con el obtenido en ensayo, concordando con el uso de valores de diseño de la madera como parámetros de entrada (**ver** Figura 8). El porcentaje de error relativo obtenido fue de 5,38%, como se presenta en la Tabla 3.

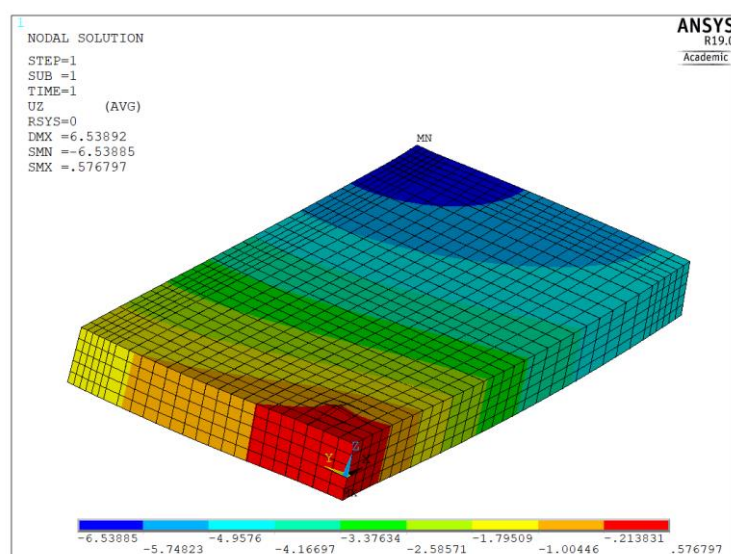


Figura 7: Malla de elementos finitos y campo de desplazamientos verticales en z [mm] de la placa.

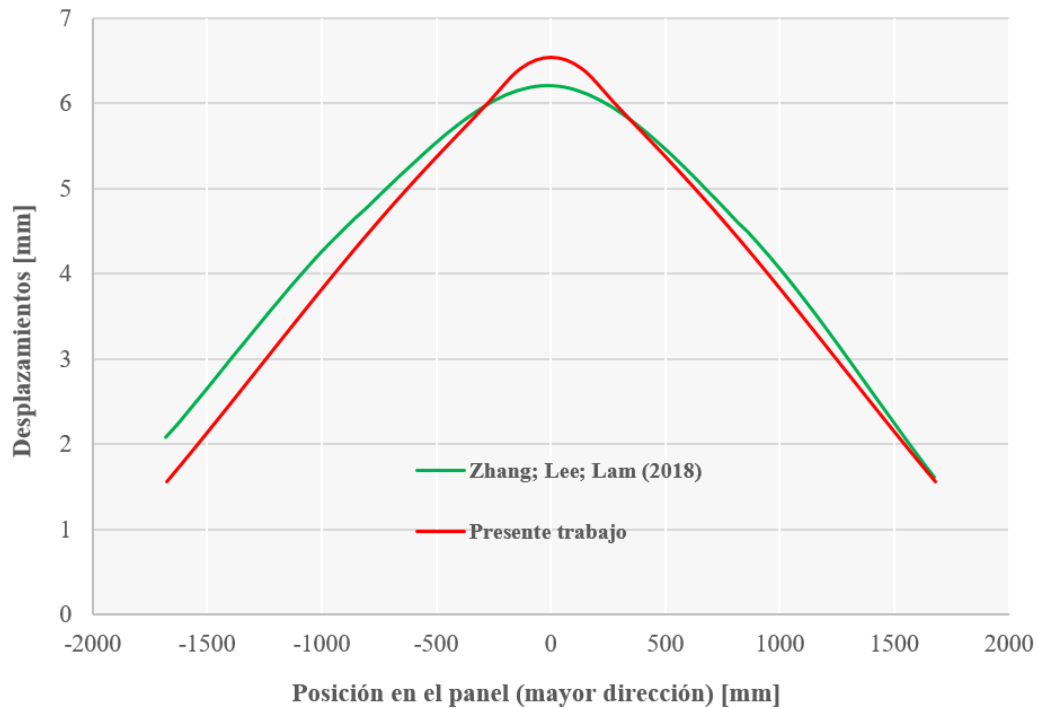
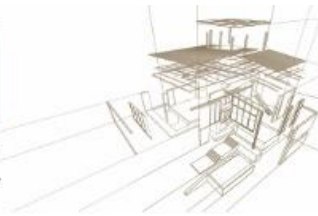


Figura 8: Desplazamientos verticales experimentales y numéricos en la mayor dirección del panel. Nodos analizados desde arista amarilla a arista azul oscuro en Figura 7.

Tabla 3: Desplazamiento vertical experimental y numérico en el centro de la placa.

Caso de análisis	Desplazamiento en el centro de la placa [mm]	% error
Zhang; Lee; Lam (2018) (Experimental)	6,205	5,38
Presente trabajo (Simulación numérica)	6,539	

Por último, se realizó un análisis de sensibilidad incrementando los parámetros de entrada retirados de NLGA (2017), el módulo de elasticidad longitudinal de la madera de las láminas longitudinales y el módulo de elasticidad longitudinal de la madera de las láminas transversales. Se observa en los valores en rojo de la Tabla 4 que aumentando entre 2,5 y 4% dichas propiedades elásticas, los resultados numéricos de flechas máximas se corresponden con los experimentales, con lo cual dicha diferencia refuerza el hecho de haber utilizado valores de diseño para tal análisis. Aumentando en 5% ambas variables mencionadas, se obtuvo una variación de aproximadamente 20% en los desplazamientos de todos los casos.

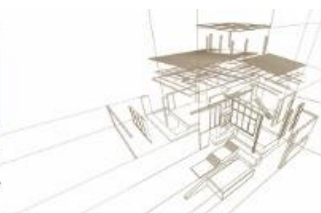


Tabla 4: Análisis de sensibilidad de los parámetros de entrada del modelo.

% Δ	E_L long. (MPa)	E_L trans. (MPa)	Δ_{Tipo1}	% error	Δ_{Tipo2}	% error	Δ_{placa}	% error
0,5%	12.411	9.653	10,245	14,34	18,669	8,65	6,539	5,38
1%	12.473	9.701	10,194	13,78	18,576	8,11	6,506	4,86
1,5%	12.598	9.798	10,093	12,65	18,392	7,04	6,442	3,82
2%	12.787	9.945	9,944	10,98	18,121	5,46	6,347	2,28
2,5%	13.042	10.144	9,749	8,81	17,765	3,39	6,223	0,28
3%	13.369	10.398	9,511	6,15	17,331	0,87	6,070	-2,17
3,5%	13.770	10.710	9,234	3,06	16,826	-2,07	5,894	-5,02
4%	14.252	11.085	8,921	-0,43	16,257	-5,38	5,694	-8,23
4,5%	14.822	11.528	8,578	-4,25	15,632	-9,02	5,475	-11,76
5%	15.489	12.047	8,209	-8,38	14,959	-12,94	5,239	-15,56

4. CONCLUSIONES

Se propuso un modelo numérico en elementos finitos para simular ensayos estáticos no destructivos de elementos estructurales de MCL realizados en un estudio previo. Los resultados de dicho modelo demostraron su competencia para estimar el comportamiento elástico de la MCL solicitada a flexión fuera de su plano, además de permitir estimar con razonable precisión y de manera conservadora los módulos de elasticidad longitudinal aparente y sin cizalladura de vigas en flexión de 4 puntos.

No debe pasar en alto que aun habiendo utilizado propiedades de diseño de la madera aserrada declarada como componente de los paneles, se obtuvieron resultados dentro de lo aceptable, considerando la alta variabilidad estructural de este material.

Asimismo, a pesar de que el modelo considere laterales de láminas encoladas, en divergencia con la realidad de los paneles ensayados, este brinda buena respuesta elástica.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue realizado con el apoyo de la *Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior* – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Society for Testing and Materials (ASTM) (2015). D198 - 15 Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes. West Conshohocken, PA, USA.
- American Wood Council (AWC) (2018). National Design Specification for Wood Construction 2018 edition.
- ANSYS Inc. (2016). ANSYS Help System. Version 19, Canonsburg.
- Baño, V., Godoy, D., Vega, A. (2016). World Conference on Timber Engineering 2016, Vienna, Ago.
- Brandner, R., Flatscher, G., Ringhofer, A., Schickhofer, G., Thiel, A. (2015). Cross laminated timber (CLT): overview and development, Eur. J. Wood Prod. v.74, n.4, p. 331-351.
- Christovasilis, I., Brunetti, M., Follesa, M., Nocetti, M., Vasallo, D. (2016). Evaluation of the Mechanical Properties of Cross Laminated Timber with Elementary Beam Theories, Construction and Building Materials, v.122, p. 202-213.
- Franzoni, L., Lebé, A., Lyon, F., Foret, G. (2016). Bending behaviour of regularly spaced CLT panels. World Conference on Timber Engineering 2016, Vienna, Ago.
- Gagnon, S., Pirvu, C. (2011). CLT Handbook: cross-laminated timber. FP Innovations, Quebec, Canada.
- He, M., Sun, X., Li, Z. (2018). Bending and compressive properties of cross-laminated timber (CLT) panels made from Canadian hemlock, Construction and Building Materials, v.185, p. 175-183.
- International Code Council (ICC) (2015). 2015 International Building Code, Country Club Hills, IL, USA.
- Kretschmann, D. (2010). Wood Handbook: Wood as an engineering material, Ch.5 Mechanical Properties of Wood. Forest Products Laboratory, Madison, WI, USA.
- Martínez, J., Martínez, M., Rabanal, F., Diaz, J. (2018). 2nd International Research Conference on Sustainable Energy, Engineering, Materials and Environment, Mieres, Jul.
- National Lumber Grades Authority (NLGA) (2017). Standard Grading Rules for Canadian Lumber. Vancouver, Canada.
- Niederwestberg, J., Zhou, J., Chui Y. (2018). Comparison of Theoretical and Laboratory Out-of-Plane Stiffness Values of Cross Laminated Timber Panels, Buildings, v.8, a. 146.
- Plackner, H. (2015) Cross-laminated timber goes global. Disponible en: https://www.timber-online.net/holzbau/2015/02/cross-laminated_timbergoesglobal.html [Accesado 21/07/2018].
- Zhang, C., Lee, G., Lam, F. (2018) Connection and performance of two-way CLT plates. TEAM report 2017-08, University of British Columbia, Vancouver.