



ESTIMACION DE PROPIEDADES ELASTICAS ORTOTROPICAS DE PANELES CLT CON TECNICAS NO DESTRUCTIVAS

ESTIMATION OF THE ORTHOTROPIC ELASTIC PROPERTIES OF CLT PANELS BY NON-DESTRUCTIVE TECHNIQUES

Opazo-Vega, Alexander ^{(1)*}; Torres, Diego ⁽¹⁾; Nuñez, Mario ⁽¹⁾; Oyarzo, Claudio ⁽²⁾

⁽¹⁾ Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Universidad del Bío-Bío. Concepción. Chile

⁽²⁾ Departamento de Ingeniería Civil. Universidad Católica de la Santísima Concepción. Concepción.

* Contacto: aopazove@ubiobio.cl

CÓDIGO: 4620154

Resumen

En Chile los paneles de madera contralaminada (CLT) están surgiendo como una alternativa para alcanzar las metas de construcción sustentable en un país con alta sismicidad. Sin embargo, el proceso actual de fabricación es incipiente y sensible a las variaciones de las dimensiones de la madera, tipos de adhesivos y técnicas de prensado. Por lo anterior es necesario contar con métodos que permitan estimar las propiedades elásticas de los paneles de forma rápida y no destructiva. El presente trabajo tiene por objetivo obtener las propiedades mecánicas ortotropicas elásticas de paneles CLT mediante la técnica de vibraciones transversales. Se ensayan 3 paneles CLT con dimensiones de 90 mm x 400 mm x 2400 mm, simplemente apoyados, instrumentadas con acelerómetros y excitados por medio de un martillo de impacto modal. Para la fabricación de los paneles se utilizan piezas de Pino Radiata y distintos tipos de adhesivos. Primero se estiman las propiedades dinámicas de los paneles a través de técnicas de análisis modal experimental. Posteriormente, las propiedades elásticas ortotropicas se estiman de manera indirecta, a través de una serie de modelos de elementos finitos que buscan minimizar las diferencias entre las propiedades dinámicas medidas experimentalmente con respecto a las modeladas numéricamente. Los resultados obtenidos indican un buen ajuste con las propiedades obtenidas en ensayos de flexión tradicionales, demostrando la validez de este método no destructivo. Además, los modos de vibrar experimentales logran detectar el efecto de algunas imperfecciones en los paneles, proyectándose su uso para la evaluación de calidad estructural en fábricas.

Palabras-clave: madera masiva, análisis modal experimental, actualización de modelos.

Abstract

In Chile, cross-laminated timber panels (CLT) are emerging as an alternative to achieve the goals of sustainable construction in a country with high seismicity. However, the current manufacturing process is incipient and sensitive to variations in the dimensions of the wood, types of adhesives, and pressing techniques. Therefore, it is necessary to have methods that allow estimating the elastic properties of panels quickly and non-destructively. The objective of this work is to obtain the orthotropic elastic mechanical properties of CLT panels using the transversal vibration technique. Three CLT panels are tested with dimensions of 90 mm x 400 mm x 2400 mm, simply-supported, instrumented with accelerometers and excited through a modal impact hammer. Radiata Pine boards and different types of adhesives are used to manufacture the panels. First, the dynamic properties of the panels are estimated through experimental modal analysis techniques. Later, the orthotropic elastic properties are estimated indirectly, through a series of finite element models that seek to minimize the differences between the experimentally measured dynamic properties to the numerically modeled ones. The results obtained indicate a good fit with the properties obtained in traditional bending tests, demonstrating the validity of this non-destructive method. Besides, the experimental vibration modes manage to detect the effect of some imperfections in the panels, projecting their use for the evaluation of structural quality in factories.

Keywords: massive timber panels, experimental modal analysis, model updating.



1. INTRODUCCIÓN

En Chile, los paneles de madera contralaminada (CLT) han estado generando un sostenido interés debido a sus ventajas comparativas para alcanzar las metas de construcción sustentable en un país con alta sismicidad. Las empresas que están empezando a fabricar estos paneles requieren evaluar la calidad estructural de sus productos para evitar problemas en la post-venta. Por lo tanto, es deseable generar técnicas de evaluación no destructivas, que se complementen de buena manera con los ensayos de flexión estática tradicionales.

En base a lo anterior, una serie de técnicas de evaluación no destructivas de paneles en base a madera, enfocadas en vibraciones, han emergido como una alternativa atractiva para investigaciones en laboratorio o en terreno (Steiger et al. 2012; Zhou et al. 2015; Giaccu et al. 2017; Guan et al. 2017; Zhou et al. 2017). Al combinar estas técnicas con actualizaciones de modelos de elementos finitos es posible estimar las propiedades elásticas de este tipo de paneles. Sin embargo, debido a la heterogeneidad de los paneles CLT (distribución de nudos, comportamiento ortotropico, calidades de adhesivos), es necesario ejecutar actualizaciones de modelos complementarias.

Una de las técnicas más adecuadas para realizar actualizaciones de modelos numéricos en materiales con alta incertidumbre es el Análisis de Sensibilidad Global (GSA) (Boscato et al. 2015). En términos generales GSA investiga como la variabilidad de los factores de entrada de un modelo afectan en sus resultados. Las técnicas GSA consideran el espacio de variabilidad completo de los factores de entrada, por lo tanto, es posible realizar actualizaciones de modelos de elementos finitos menos dependientes de los rangos de valores iniciales escogidos para los factores de entrada.

El presente trabajo describe una nueva aproximación para estimar las propiedades elásticas de paneles CLT basado en la combinación de análisis modal operacional, actualización de modelos de elementos finitos y análisis de sensibilidad global. Esta nueva aproximación fue aplicada a un set de prototipos de paneles CLT, con el propósito de identificar rangos de propiedades elásticas relevantes que minimicen las diferencias entre las estimaciones numéricas y las respuestas experimentales.

2. MATERIALES Y METODOS

2.1. Descripción de los paneles CLT y la implementación de ensayos vibratorios

Se ensayaron 3 especímenes de paneles CLT, fabricados con piezas de madera de Pino Radiata, grado estructural mecánico C24, y dimensiones de 30 mm de espesor, 120 mm de ancho y 2400 mm de largo, pegadas con distintos tipos de adhesivos. Realizando una configuración contralaminada típica de 3 capas a 90°, se obtuvieron paneles con dimensiones nominales totales de 90 mm de espesor, 400 mm de ancho y 2400 mm de largo. La Tabla 1 muestra los detalles constructivos de los paneles testeados.

Como en el presente trabajo se buscaba analizar solo el comportamiento perpendicular al plano del panel, se generaron vibraciones en esa dirección a través de impactos de baja energía. También en la misma dirección de la vibración se instalaron 8 acelerómetros uniaxiales. Con esta configuración de instrumentos, se esperaba identificar los primeros 2 modos de vibrar fuera del plano del panel. Los paneles se apoyaron en sus 2 bordes cortos, sin restringir el giro, y con la distribución de sensores indicados en la Figura 1.



Tabla 1: Características constructivas de los paneles ensayados

Panel #	Longitud (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Densidad (kg/m ³)	Adhesivo cara	Adhesivo canto
1	2400	400	91.26	473.71	PUR ULXJ-803	MD-3381
2	2400	394	90.24	467.58	PUR 5082	PUR 5089
3	2400	394	90.26	468.64	PUR 5082	No aplica



Figura 1: Instalación e instrumentación típica de los paneles para ensayos vibratorios

2.2. Técnicas de análisis modal operacional (OMA) y actualización de modelos de elementos finitos

El análisis modal operacional (OMA) es un set de técnicas que permiten identificar las propiedades modales (frecuencias, razones de amortiguamiento o modos de vibrar) de un elemento o sistema estructural dinámico basado en la medición de su respuesta vibratoria. Dentro de los posibles métodos OMA se seleccionó el de Identificación de Subespacios Estocásticos (SSI) (Van Overschee and De Moor 1996), debido a las ventajas que presenta en términos de precisión al trabajar en el dominio del tiempo directamente. El software ARTeMIS Modal Pro fue utilizado para encontrar los modos de vibrar y las respectivas frecuencias vibratorias de los paneles CLT al ser sometidos a impactos de baja energía.

SSI es un método paramétrico que se fundamenta en el análisis de la respuesta tiempo-historia o funciones de correlación. El objetivo principal del método SSI es ajustar un modelo paramétrico directamente a la serie de datos bruta. En ese contexto, se entiende un modelo paramétrico como un modelo matemático que posee ciertos parámetros que pueden ser modificados para cambiar la forma en que el modelo se ajusta a los datos medidos. Este set de parámetros puede minimizar la desviación entre la respuesta simulada y la respuesta medida del sistema. El propósito de la estimación con modelos paramétricos es determinar un modelo adecuado, con un número razonable de parámetros (orden del modelo), tal que el comportamiento dinámico y estadístico sea correctamente representado. En general, en el método SSI no es posible



determinar de antemano el orden del modelo (dimensión “n”). Por lo tanto, es necesario repetir el análisis con diferentes órdenes del modelo y verificar la repetibilidad de los resultados. Este procedimiento iterativo se logra construyendo un diagrama de estabilización. Si se hace el seguimiento a la evolución de los modos, para distintos ordenes incrementales del modelo, es posible identificar aquellos que tienen sentido físico, ya que se alinean verticalmente de una forma estable. En cambio, los modos espurios matemáticos tienden a ser más desalineados e inestables. Mas detalles del método SSI se pueden encontrar en el libro de Rainieri et al. (2014).

Para representar numéricamente el comportamiento dinámico de los paneles CLT se implemento un modelo de elementos finitos (FEM) en el software ANSYS®. Se utilizo el elemento finito Shell181 de 4 nodos, con 6 grados de libertad por nodo, y un tipo de material homogéneo, lineal y elástico, con propiedades ortotropicas. A los modelos FEM de los paneles CLT se les fueron modificando continuamente sus 9 constantes elásticas ortotropicas, dentro de un rango razonable, de manera de minimizar las diferencias entre las propiedades dinámicas experimentales y numéricas. La función objetivo utilizada para la minimización es definida como un problema de mínimos cuadrados no lineales, tal como se muestra en la Ecuación 1.

$$Y = \min_{\mathbf{p}} F(\mathbf{p}) = \frac{1}{2} \|\mathbf{r}(\mathbf{p})\|^2 = \frac{1}{2} \left\| \begin{matrix} \mathbf{r}_f(\mathbf{p}) \\ \mathbf{r}_s(\mathbf{p}) \end{matrix} \right\|^2 \quad (1)$$

Donde r es el vector residual que contiene las diferencias numérico-experimentales entre las frecuencias (r_f) y entre los modos de vibrar (r_s). El vector p representa el set de las variables de diseño (9 constantes elásticas ortotropicas) que se van actualizando. Las expresiones de los distintos vectores residuales se muestran en las Ecuaciones 2 y 3.

$$r_f(\mathbf{p}) = \frac{\lambda_j(\mathbf{p}) - \tilde{\lambda}_j}{\tilde{\lambda}_j} \quad \text{con} \quad \lambda_j = (2\pi f_j)^2 \quad (2)$$

$$r_s(\mathbf{p}) = \frac{\phi_j^l(\mathbf{p})}{\phi_j^r(\mathbf{p})} - \frac{\tilde{\phi}_j^l}{\tilde{\phi}_j^r} \quad (3)$$

En la Ecuación 2, $\lambda_j(\mathbf{p})$ y $\tilde{\lambda}_j$ son las j^{th} frecuencias circulares al cuadrado, numéricas y experimentales respectivamente. Por otra parte, en la Ecuación 3 $\phi_j(\mathbf{p})$ y $\tilde{\phi}_j$ son los j^{th} modos de vibrar numéricos y experimentales. Los super índices l denotan que el grado de libertad de ese modo de vibrar es arbitrario, mientras que el l indican que el grado de libertad es de referencia. Generalmente se escoge como grado de libertad de referencia al de mayor amplitud, de esta forma el vector de residuos r_s también queda normalizado. Además, como se mencionó anteriormente, el vector \mathbf{p} tiene las 9 componentes elásticas ortotropicas, es decir, 3 módulos de elasticidad (E_x, E_y, E_z), 3 coeficientes de Poisson ($\nu_{xy}, \nu_{yz}, \nu_{xz}$) y 3 módulos de corte (G_{xy}, G_{yz}, G_{xz}).

Para obtener rangos de valores óptimos en que las constantes elásticas ortotropicas a la función Y , se utilizó un método de análisis de sensibilidad global llamado Análisis de Sensibilidad Regional (RSA) (Saltelli et al. 2008). El método RSA realiza el muestreo de las variables de entrada (9 constantes elásticas) modificándolas todas a la vez. Además, es un método adecuado para identificar regiones del espacio muestral que correspondan a valores altos o bajos de la variable de salida (función Y). En general, en el método RSA las variables de entrada se separan en 2 set binarios: “bien-comportadas” (B) o “no bien-comportadas” (NB), dependiendo de si su variable de salida asociada esta sobre o debajo de un valor de umbral predefinido. Un indicador de sensibilidad típico de este método es la máxima distancia vertical entre la función de



distribución de probabilidad acumulada empírica (CDF) de los modelos B con respecto a los NB. En la Ecuación 4 se muestra la expresión matemática de este indicador, para el parámetro E_x

$$S_{E_x} = \max_{E_x} |F_{E_x|Y_B}(E_x|Y \in Y_B) - F_{E_x|Y_{NB}}(E_x|Y \in Y_{NB})| \quad (4)$$

donde $F_{E_x|Y_B}$ y $F_{E_x|Y_{NB}}$ son las CDF de E_x cuando se consideran las variables de entrada asociadas con las salidas bien-comportadas (Y_B) y no bien-comportadas (Y_{NB}), respectivamente.

Los rangos de las variables que tienen influencia significativa en los modelos B y NB son obtenidos a través de la comparación de las pendientes de las CDFs. Por ejemplo, los modelos B se concentrarán más fuertemente en aquellos rangos de valores donde la pendiente de su CDF es mas grande que la pendiente de los modelos NB. Para definir a los modelos B, se utilizo un valor umbral de $Y < 0.1$. De acuerdo con las recomendaciones de otras investigaciones (Pianosi et al. 2016), el tamaño muestral de las simulaciones debería estar entre 100 y 1000 veces el número de parámetros de entrada. La herramienta computacional SAFE fue utilizada para ejecutar los análisis de sensibilidad global (Pianosi et al. 2015). La técnica de muestreo de Hiper Cubo Latino fue usada para seleccionar las variables de entrada ya que permite obtener mejores resultados con menos simulaciones que una muestra aleatoria tradicional. Los rangos considerados para las variables de entrada se muestran en la Tabla 2, los cuales fueron estimados experimentalmente a partir de resultados de investigaciones previas (Navarrete 2019)

Tabla 2: Propuesta de rangos de parámetros de entrada para el análisis de sensibilidad global

Valor	E_x, E_y, E_z (MPa)	G_{xy}, G_{yz}, G_{xz} (MPa)	v_{xy}, v_{yz}, v_{xz} (adim)
minimo	200	5	0.05
maximo	13000	600	0.35

3. RESULTADOS Y DISCUSION

3.1. Propiedades modales experimentales de los paneles CLT

En la Tabla 3 se resumen las frecuencias identificadas por el método SSI-UPC. La Figura 2 muestra los modos de vibración asociados con cada frecuencia. Además, en la Figura 3 se indica un ejemplo de la estimación de frecuencias con un diagrama de estabilización del método SSI-UPC.

Tabla 3: Frecuencias de vibración identificadas a través del método SSI

Panel #	f_1		f_2	
	Promedio (Hz)	CoV (%)	Promedio (Hz)	CoV (%)
1	27.20	1.78	114.79	0.89
2	27.13	1.78	126.09	1.14
3	27.90	1.60	124.72	1.15

De la Tabla 3 se puede observar que los coeficientes de variación (CoV) fueron bastante bajos, lo que demuestra la precisión de los ensayos. Por otra parte, de la Figura 2 se puede evidenciar que tanto el primer como el segundo modo detectado tienen una importante componente



flexural. Además, existió un muy buen ajuste entre los modos obtenidos experimentalmente y los obtenidos con simulaciones numéricas.

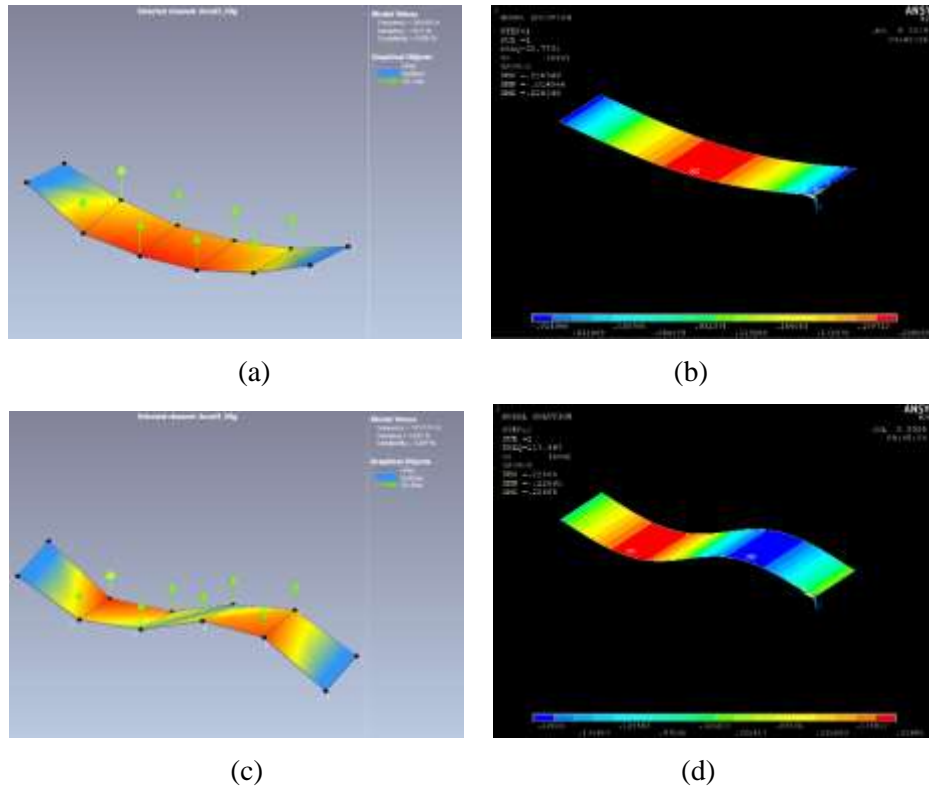


Figura 2: Comparación entre los modos de vibrar experimentales (exp) y simulados numéricamente (num). a) 1er modo exp. b) 1er modo num. c) 2do modo exp. d) 2do modo num.

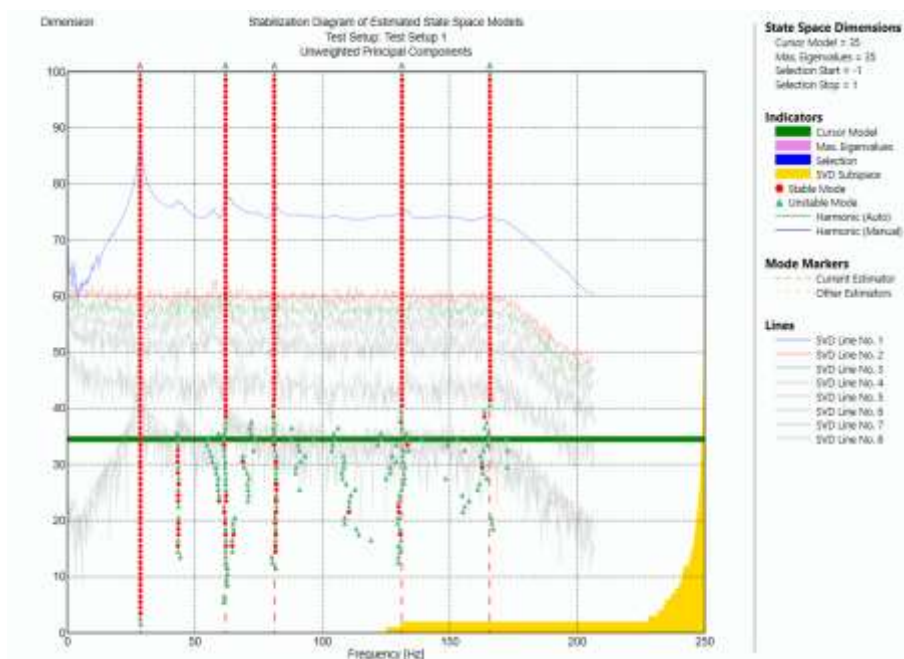


Figura 3: Identificación de las frecuencias de vibración a través del método SSI (con Software ARTEMIS Modal Pro).



3.2. Actualización de los modelos de elementos finitos de los paneles CLT

El método RSA fue utilizado para proponer rangos de valores para las propiedades elásticas de los paneles CLT. En total, se realizaron 1000 simulaciones numéricas de diferentes combinaciones de las 9 propiedades elásticas ortotropicas. Los modelos fueron definidos del tipo B cuando el valor de la función Y fue menor a 0.1. Esta definición de los modelos B garantiza que en promedio las diferencias porcentuales entre las frecuencias numéricas y experimentales no excedió $\pm 10\%$. La Figura 4 presenta los gráficos de dispersión de la función Y con respecto a los diferentes valores las propiedades elásticas consideradas en este estudio para el panel 2. Además, la Figura 5 muestra las curvas CDF obtenidas para cada propiedad elástica en el mismo panel 2.

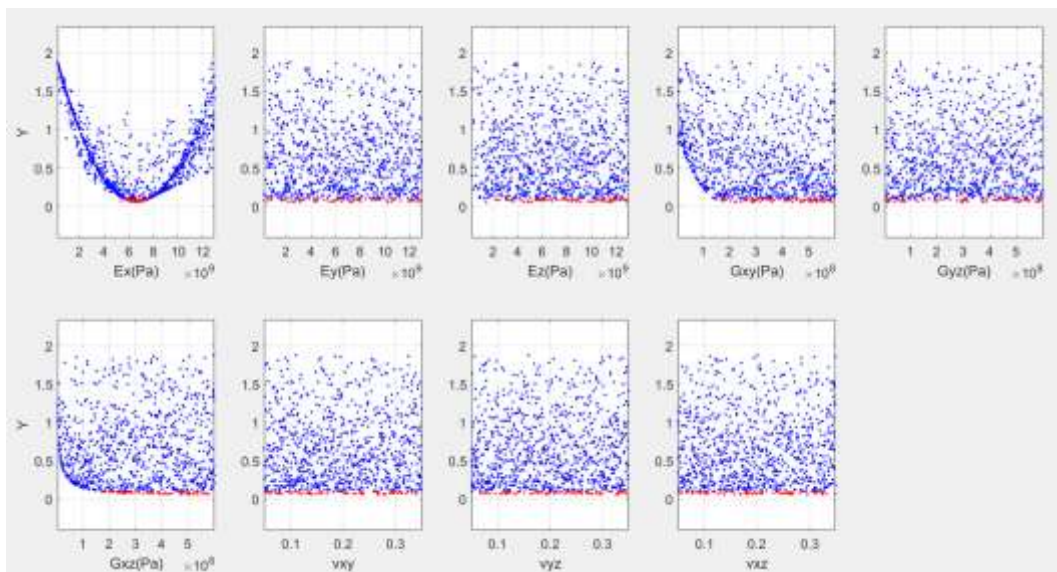


Figura 4: Gráficos de dispersión de la función Y con respecto a las propiedades elásticas muestreadas en el panel 2 (puntos rojos: modelos B, puntos azules: modelos NB).

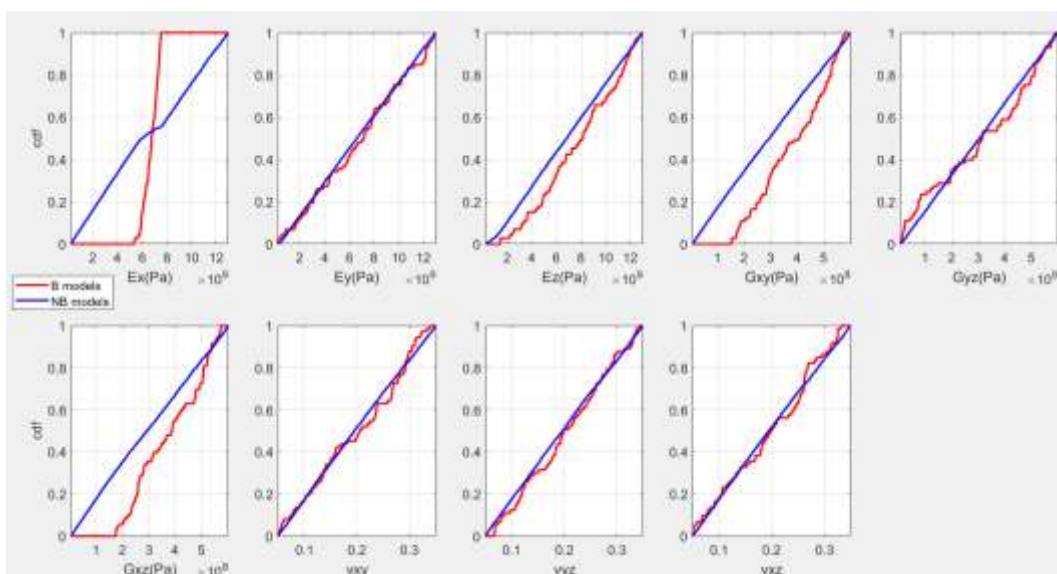


Figura 5: Curvas CDF en modelos B y NB, para las propiedades elásticas del panel 2 (puntos rojos: modelos B, puntos azules: modelos NB).



En la Figura 4 los puntos rojos representan a los modelos B, que fueron solo una pequeña proporción de las simulaciones totales (10% del total). En general solo las propiedades elásticas E_x , G_{xy} y G_{xz} tuvieron influencias significativas en los valores de la función Y. Estos resultados fueron lógicos debido a la alta relación de aspecto de los paneles (largo/ancho) y la condición de simple apoyo en 2 bordes utilizados en los ensayos.

Por otra parte, la Figura 5 muestra que las propiedades elásticas E_x , G_{xy} y G_{xz} tuvieron los indicadores de sensibilidad “S” más altos (ver Ecuación 4). También se observa que solamente E_x , G_{xy} y G_{xz} tuvieron sub-rangos de valores que generan grandes concentraciones de modelos B (pendiente de la curva de modelos B es más grande que la pendiente de la curva NB). Por lo tanto, esas 3 variables en los sub-rangos antes mencionados son recomendadas como variables de actualización de los modelos de paneles CLT. Para el resto de las propiedades elásticas, se puede asumir un valor fijo estándar (por ejemplo, obtenido de la literatura), ya que ellas no tuvieron una influencia significativa en la minimización de la función Y.

La Tabla 4 muestra los resultados de E_x para los 10 mejores modelos dinámicos. Además, en la última columna de la Tabla se indican los resultados E_x obtenidos de ensayos de flexión estáticos (Navarrete et al. 2019). En general se observa una correlación positiva entre los valores de E_x dinámico y E_x estático, aunque los rangos de valores de E_x dinámico siempre fueron menores que los E_x estáticos.

Tabla 4: Comparación entre E_x dinámicos y E_x estáticos

Panel #	E_x dinamico		E_x estatico
	Min (MPa)	Max (MPa)	(MPa)
1	6064	6501	7012
2	6305	6849	7723
3	6640	7218	8506

4. CONCLUSIONES

En este trabajo, se ha descrito una nueva aproximación para estimar las propiedades elásticas de paneles CLT, basada en análisis modal operaciones (OMA), actualización de modelos FEM y análisis de sensibilidad global (RSA). Se han obtenido resultados satisfactorios que muestran que esta metodología puede ser extendida a configuraciones estructurales mas complejas. Sin embargo, es necesario profundizar las investigaciones en términos de paneles CLT de otras dimensiones y condiciones de apoyo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado dentro del contexto del Grupo de Investigación “Desarrollo de Sistemas Estructurales en Madera” de la Universidad del Bío-Bío, y del programa de Doctorado en Ingeniería Civil de la Universidad Católica de la Santísima Concepción.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSYS® Academic Research Mechanical, Release 19.2

ARTEMIS Modal Pro, Version 5.3, Structural Vibration Solutions A/S, Aalborg Denmark, Copyright 1999–2013.



- Boscato, G.; Russo, S.; Ceravolo, R. (2015). Global sensitivity-based model updating for heritage structures. *Comput-Aided Civ. Inf.*, v.30, n. 8, p. 620-635.
- Giaccu, G. F.; Meloni, D.; Valdès, M. (2017). Dynamic determination of the modulus of elasticity of maritime pine cross-laminated panels using vibration methods. *WIT Transactions on Ecology and the Environment.*, v. 226, p. 571-579.
- Guan, C.; Zhang, H.; Wang, X. (2017). Experimental and Theoretical Modal Analysis of Full-Sized Wood Composite Panels Supported on Four Nodes. *Materials*. v.10, n. 6, p. 683.
- Navarrete, A. (2019). Estudio del tipo de adhesivo estructural y del encolado de canto sobre las propiedades mecánicas de la madera contralaminada. Civil Engineering thesis, Universidad del Bío-Bío, Concepcion, Chile.
- Pianosi, F.; Sarrazin, F.; Wagener, T. (2015). A Matlab toolbox for global sensitivity analysis. *Environ. Modell. Softw.* v.70, p. 80-85.
- Pianosi, F.; Beven, K.; Freer, J. (2016). Sensitivity analysis of environmental models: A systematic review with practical workflow. *Environ. Modell. Softw.* v.79, p. 214-232.
- Rainieri, C.; Fabbrocino, G. (2014). Operational modal analysis of civil engineering structures. Springer, New York.
- Saltelli, A., Ratto, M.; Andres, T. (2008). Global sensitivity analysis: the primer. John Wiley & Sons.
- Steiger, R.; Gülzow, A.; Czaderski, C. (2012). Comparison of bending stiffness of cross-laminated solid timber derived by modal analysis of full panels and by bending tests of strip-shaped specimens. *Eur. J. Wood Prod.* v. 70, n. 1, p. 141-153.
- Teughels, A.; De Roeck, G. (2004). Structural damage identification of the highway bridge Z24 by FE model updating. *J. Sound Vibr.*, v. 278, n. 3, p. 589-610.
- Van Overschee, P.; De Moor, B.L. (1996). Subspace identification for linear systems: Theory—Implementation—Applications, Kluwer Academic Publishers; The Netherlands, Dordrecht.
- Zhou, J.; Chui, Y. H.; Gong, M. (2015). Simultaneous measurement of elastic constants of full-size engineered wood-based panels by modal testing. *Holzforschung*. v. 70, n. 7, p. 673–682.
- Zhou, J.; Chui, Y. H.; Gong, M. (2017). Elastic properties of full-size mass timber panels: Characterization using modal testing and comparison with model predictions. *Compos. Part B-Eng.*, v. 112, p. 203-212.