

# ESTIMACION DE MODULO DE ELASTICIDAD TEORICO PARA UN PANEL DE MADERA CONTRALAMINADA EN PINO RADIATA CHILENO, MEDIANTE MODELO CONSTITUTIVO BASADO EN LA ELASTICIDAD ANISOTROPICA HOMOGENEIZADA PARA DISEÑOS DE PANELES.

a) Miguel Angel Obando Hernández, b) Dr. Ing. Pablo Enrique Oyarzún Higuera.

a) Estudiante Escuela de Ingeniería en Construcción, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.

b) Profesor patrocinante Instituto de Obras Civiles, Universidad Austral de Chile, Edificio 11.000, Valdivia, Chile

## INTRODUCCIÓN

El desarrollo de materiales compuestos es tendencia en la búsqueda de soluciones innovadoras, y la madera es un tema de gran interés. El presente estudio busca estimar el módulo de elasticidad para un panel de madera contralaminada en pino radiata chileno, a través de un modelo constitutivo basado en elasticidad anisotrópica homogeneizada. La elasticidad es una propiedad esencial para los paneles y el conocimiento del módulo permite asegurar su uso adecuado. Se estudian los efectos del grosor y calidad de capas en la variación del módulo de elasticidad teórico. Existen métodos teóricos alternativos para la obtención de módulos de elasticidad, como el método K, el método de equivalencia de EI (Rigidez) y modelos numéricos. La hipótesis de este estudio es que el módulo de elasticidad para un panel de madera contralaminada en pino radiata chileno se puede estimar mediante un modelo constitutivo.

## OBJETIVOS

Predecir módulo de elasticidad teórico para distintas configuraciones de paneles de madera contralaminada con dimensiones determinadas, utilizando el modelo constitutivo basado en la elasticidad anisotrópica homogeneizada (teoría de mezclas, materiales compuestos en paralelo o en serie), orientando este procedimiento a aplicaciones en el diseño de paneles de madera contralaminada o como complemento en la experimentación de éstos. Por otro lado, describir el procedimiento de analogía al corte y también evaluar resultados de algún método experimental, con tal de comparar valores de módulo de elasticidad con los obtenidos mediante el procedimiento teórico desarrollado.

## MATERIALES

Para este estudio del material constituyente modelado, se realizarán dos comparaciones: el primero, con un panel de CLT 3 capas estudiado por (Opazo-Vega, 2019), cuya información sobre sus materiales constituyentes se encuentran en la Tabla 1; el segundo, con un panel de 5 capas fabricado y ensayado por Hílam-Arauco, cuyas propiedades se encuentran en la Tabla 2.

Grado Estructural	Capa i	Esesor d [mm]	E <sub>i</sub> [MPa]	Ancho [mm]	Largo [mm]
C24	1	30	10200	400	2400
	2	30	340	400	2400
C24	3	30	10200	400	2400
Total	90			400	2400

Grado Estructural	Capa i	Esesor d [mm]	E <sub>i</sub> [MPa]	Ancho [mm]	Largo [mm]
c24	1	30	10200	605	4207
	2	30	340	605	4207
c24	3	30	10200	605	4207
	4	30	340	605	4207
c24	5	30	10200	605	4207
	Total	150		605	4207

## Estructura

Un panel de madera contralaminada (CLT) es un material compuesto unidireccional, el cual está constituido por un número impar de capas, cada una de las cuales está formada por piezas de madera aserrada, unidas mediante un adhesivo estructural en sus caras y cantos. El sistema coordinado (x,y,z) está dispuesto de tal forma que la orientación del panel se encuentre en el eje x, y su eje normal al panel, en el eje y, como se muestra en la Figura 1

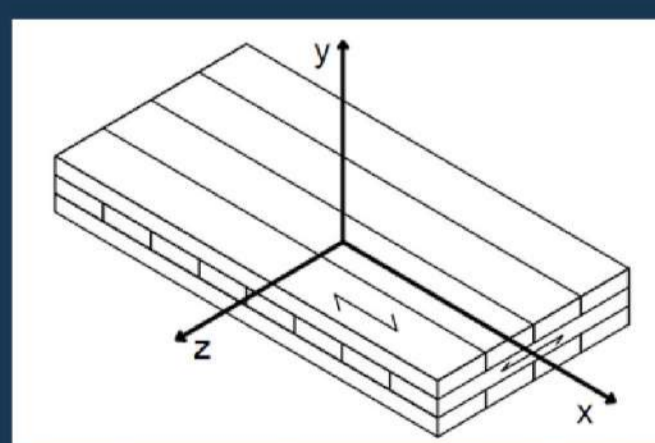


Figura 1. Estructura de un panel unidireccional de madera contralaminada de 3 capas.

## Materiales constitutivos

Para el estudio, el panel puede estar conformado por diferentes tipos de materiales constituyentes; en particular, este estudio abarca la especie de pino radiata chileno. las propiedades mecánicas/elásticas serán consideradas de acuerdo con la Nch 1198 de 2014.

## Consideraciones del Material

La micromecánica se utiliza para combinar materiales con características ortotropicas para crear un material equivalente homogeneizado y anisotrópico. Las capas con fibras paralelas a la orientación del panel se consideran de un material diferente al de las capas con fibra normal al panel, usualmente madera de la misma especie y con el mismo grado estructural debido a sus propiedades ortotropicas (Luccioni, 1993)(Oller, 2002).

Este modelo presenta una estructura de capas paralelas de madera aserrada de la misma especie, con el mismo grado estructural y contenido de humedad, todas con el mismo espesor. Se asume que cada capa ofrece un solo módulo de elasticidad y se supone una unión completamente rígida, sin tener en cuenta la cantidad de uniones fingerjoint o el tipo de adhesivo.

## MODELO CONSTITUTIVO

### Hipótesis y consideraciones de simplificación

La teoría de mezcla en paralelo puede aplicarse para obtener las tensiones de los elementos finitos si se asume que la isodeformación se extiende a todas las capas y el error obtenido es despreciable. Esta teoría se basa en definir cada capa como un material constituyente mediante las ecuaciones de compatibilidad (Luccioni, 1993)(López-Santos F, 2017).

$$\begin{aligned} x\varepsilon_G &= x\varepsilon_1 = x\varepsilon_2 = x\varepsilon_3 = \dots = x\varepsilon_i & (1) \\ x\sigma_G &= x\sigma_1 xV_1 + x\sigma_2 xV_2 + \dots + x\sigma_i xV_i & (2) \\ j\sigma_G &= jE_G \cdot j\varepsilon_G & (3) \\ P &= x\sigma_G \cdot xA_G & (4) \\ xA_G &= d \cdot h_G & (5) \\ xA_G &= xA_1 + xA_2 + xA_3 + \dots + xA_i & (5.1) \\ xA_i &= d_i \cdot h_i & (5.2) \\ xV_i &= \frac{xA_i}{xA_G} & (6) \\ xV_G &= \sum xV_i & (6.1) \end{aligned}$$

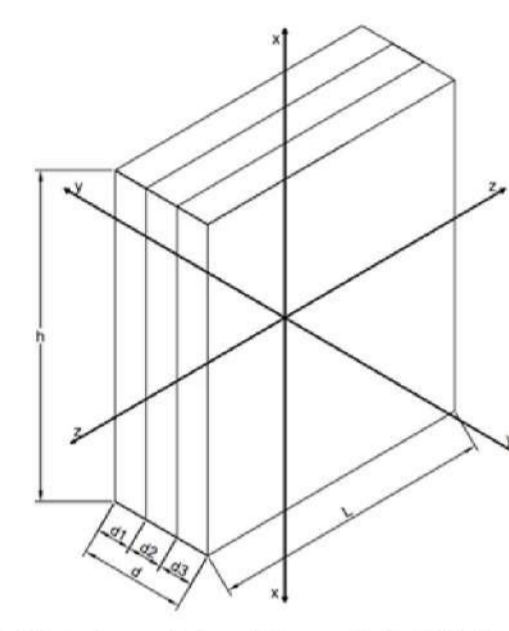


Figura 2. Vista isométrica del panel de CLT 3 capas.

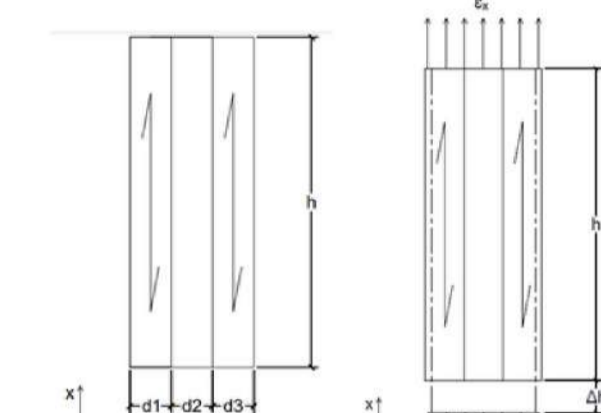


Figura 3. Elemento finito representativo sujeto a deformaciones longitudinales uniformes (López-Santos F, 2017).

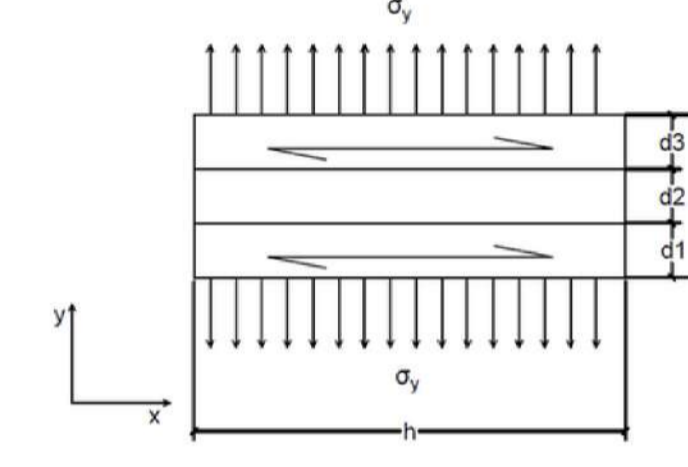


Figura 4. Volumen representativo sometido a esfuerzo uniforme transversal (López-Santos F, 2017).

Módulo de elasticidad dentro del plano

$$x E_G = x E_2 + n_1 x V_1 (x E_1 - x E_2)$$

Módulo de elasticidad dentro del plano

$$y E_G = \frac{1}{\left( n_1 \frac{x V_1}{y E_1} + n_2 \frac{x V_2}{y E_2} \right)}$$

## RESULTADO Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos para los módulos de elasticidad del panel de 3 capas mediante los métodos analíticos y experimentales fueron resumidos en la Tabla 4. El modelo constitutivo y el Método K presentaron resultados más coherentes respecto al resto.

Tabla 4. Comparación de  $x E_G$  obtenidos teóricos y experimentales para panel de CLT con 3 capas.

Nº	Método	$x E_G$ [MPa]
Métodos analíticos		
1	Modelo constitutivo	6913
2	Método K	6905
3	Equivalencia EI ( $I_{x,net}$ )	4085
4	Equivalencia EI ( $I_b$ )	9835
Métodos experimentales		
5	Experimental no destructivo	6596
6	Experimental destructivo	7747

Los resultados obtenidos para el panel de 5 capas (Tabla 3) mostraron una aproximación a los valores promedio experimentales. Los métodos K y Equivalencia EI (Ih) presentaron valores superiores a los del ensayo destructivo. El método Equivalencia EI ( $I_{x,net}$ ), al usar la inercia neta del panel, fue el que más se aproximó al valor promedio experimental, cabe destacar que el valor experimental al cual se le compara es el promedio ya que el contenido de humedad afecta a la rigidez del panel.

Tabla 3. Comparación de  $x E_G$  obtenidos teóricos y experimentales para panel de CLT con 5 capas.

Nº	Método	$x E_G$ [MPa]
Métodos analíticos		
1	Modelo constitutivo	6256
2	Método K	8149
3	Equivalencia EI ( $I_{x,net}$ )	6629
4	Equivalencia EI ( $I_b$ )	8681
Métodos experimentales		
5	Experimental destructivo-Hílam	6824

El modelo constitutivo propuesto mostró buena consistencia al ser comparado con los resultados de los ensayos experimentales destructivos para paneles de 3 y 5 capas fabricadas con CLT. El modelo es simple y fácilmente accesible, generando valores coherentes para el módulo de elasticidad.

Una vez comprobado el modelo, se dispuso a evaluar el comportamiento del módulo de elasticidad respecto a los grados estructurales presente en la Nch 1198 of 2014, los resultados indican que existe una gran similitud entre las clasificaciones G1, MGP10, C24 y GS donde los módulos de elasticidad rondaron 6000-7000 MPa siendo C24 el más utilizado para la fabricación de paneles, además en la Figura 8 se puede visualizar que el panel de cinco capas según el modelo presenta menor módulo de elasticidad que el de tres, por otro lado, se realiza un análisis de sensibilidad del modelo respecto al número de capas (Figura 9), se puede observar que el panel comienza a perder rigidez a medida que aumenta el número de capas.

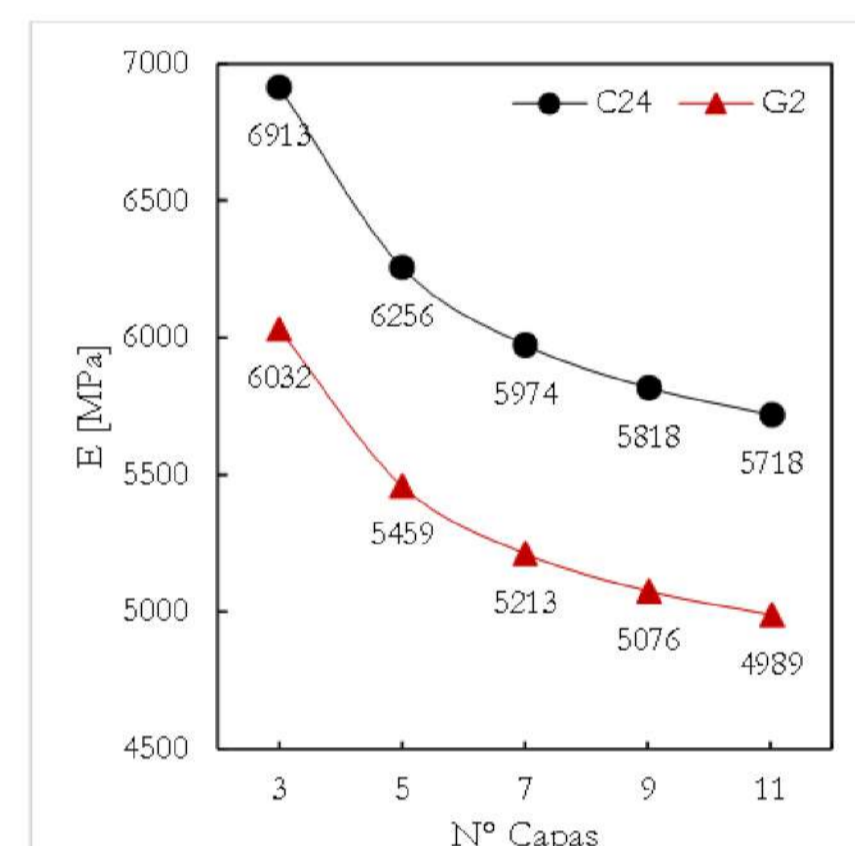


Figura 9. Análisis de sensibilidad del modelo respecto al número de capas de panel, se evalúa en grado estructural "C24" y "G2".

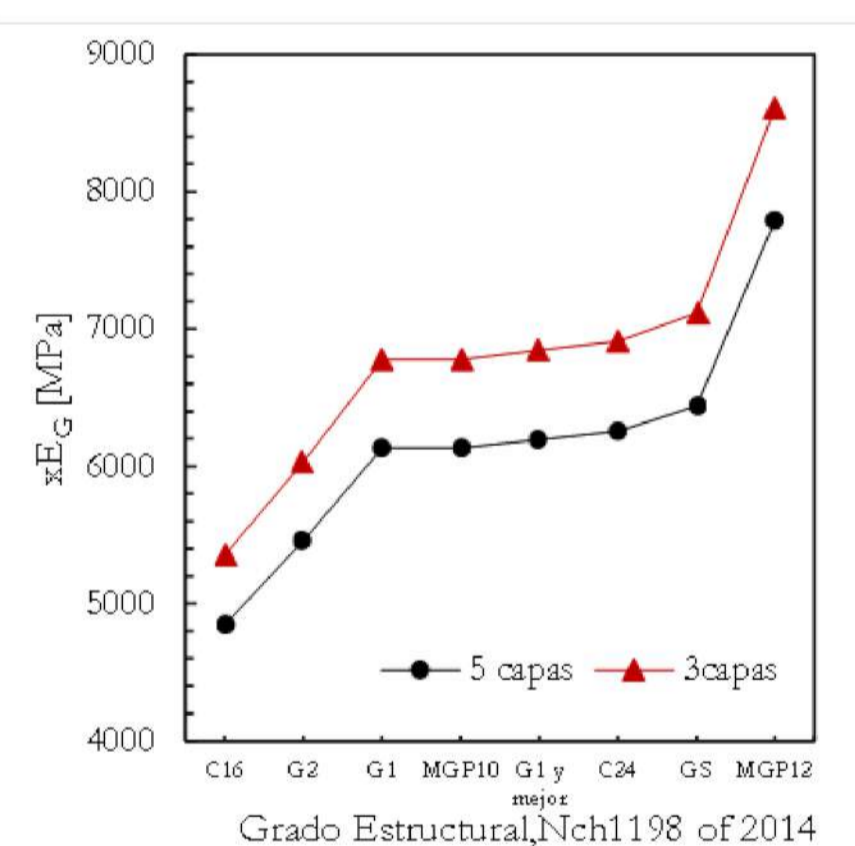


Figura 8. Análisis de sensibilidad del módulo de elasticidad según el grado estructural de las piezas de madera aserrada.

## CONCLUSIONES

La elasticidad anisotrópica homogeneizada proporciona una forma eficiente y sencilla de estimar los módulos de elasticidad teóricos para paneles de madera contralaminada de pino radiata chileno, si bien las propiedades cambian en función del espesor de capa, especie de madera, número de capas, técnica de fabricación, calidad de madera y del adhesivo, como también en la forma en que estos elementos se encuentran dispuestos, al solo considerar algunas de estas variables dentro del modelo, tales como calidad de madera, número de capas y especie de madera, se puede confeccionar un modelo que sea coherente a los resultados esperados, logrando obtener un valor referencial sin tener que desembolsar en laboratorios y ensayos experimentales.

Tal y como hemos podido comprobar los resultados pueden ser confiables para el diseño de paneles de madera contralaminada de 3 y 5 capas, presentado una diferencia de 834 y 568 MPa respectivamente menos que el promedio experimental, aún falta la validación para el resto de las configuraciones, mientras que deja expresada la expresión para estimar debido a que no se tuvo acceso a ensayos que estudiaran el módulo de elasticidad transversalmente.

Tras el análisis del comportamiento de sensibilidad del modelo respecto al grado estructural de material (Figura 8), Se puede deducir que al usar piezas de madera aserrada de una menor calidad como "G1" en comparación a las "C24" no se conciben grandes diferencias respecto a su módulo de elasticidad de los paneles constituido de igual manera, por otro lado al realizar un análisis para observar el comportamiento del panel respecto al número de capas (ver figura 9) se observó que el CLT pierde rigidez a medida que aumentan el número de capas, no obstante, los dos análisis requieren validación contrastándolo con resultado empíricos.

Se abre la posibilidad de seguir trabajando en el modelo, validando su eficacia en paneles de siete, nueve y once capas; para ello es necesario que en Chile aumente la cantidad de fábricas de este material y por ende los laboratorios con el equipo adecuado para poder ensayar estos paneles

## BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Aspila, A., Heinisuo, M., Mela, K., Malaska, M., Pajunen, S., 2022. Elastic design of steel-timber composite beams. Wood Mater. Sci. Eng. 17, 243–252.
- [2]. Giaccu, G.F., Meloni, D., Valdés, M., Fragiaco, M., 2017. Dynamic determination of the modulus of elasticity of maritime pine cross-laminated panels using vibration methods. WIT Trans. Ecol. Environ. 226, 571–579.
- [3]. Godoy, D., Vega, A., Baño, V., 2017. ( Clt ) Fabricados a Partir De Tablas De Pinus Taeda / Elliottii De Bajas Propiedades Mecánicas Characterization of Cross Laminated Timber Made From Wood of Low-Mechanical Properties of Pinus Taeda / 1–11.
- [4]. INN, 2014. Madera - Construcciones en mader - Cálculo. NCh 1198. Inst. Nac. Norm.
- [5]. Karacabeyli, E., Gagnon, S., 2019. Canadian Cross Laminated Timber Handbook: 2019 Edition.
- [6]. López-Santos F, 2017. Materiales Compuestos Unidireccionales Utilizando Micromecánica " 35–43.
- [7]. López-Santos F, 2017. Materiales Compuestos Unidireccionales Utilizando Micromecánica " 35–43.
- [7]. Luccioni, B.M. (Universidad N. de T., 1993. Formulación de un modelo constitutivo para materiales ortotropos.
- [8]. Martínez, X., Oller, S., Barbero, E., 2011. Caracterización de la delaminación en materiales compuestos mediante la teoría de mezclas serie/paralelo. Rev. Int. Metod. Numer. para Calc. y Disen. en Ing. 27, 189–199.
- [9]. Oller, S., 2002. Estado del arte sobre la modelización constitutiva. Dinámica No-Lineal 74.
- [10]. Opazo-Vega, A., 2019. PANELES CLT CON TECNICAS NO DESTRUCTIVAS ESTIMACION OF THE ORTHOTROPIC ELASTIC PROPERTIES OF CLT PANELS BY NON-DESTRUCTIVE TECHNIQUES.
- [11]. Research Institutes of Sweden (RISE), 2019. The CLT Handbook. Swedish Wood.

## AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a todos aquellos que me brindaron su apoyo y ayuda para la realización de esta tesis. En primer lugar, a mis padres, por su incondicional apoyo durante toda mi vida académica. A profesor de tesis, por su paciencia y por sus valiosos consejos. A los profesionales de Hílam Arauco por orientarme con información valiosa.