

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**

VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN

DIRECCIÓN DE PROYECTOS

ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INNOVACIÓN FORESTAL

**INFORME FINAL DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

**Construcción y potencial aplicación de estructuras en madera contralaminada  
estructural (CLT) en Costa Rica a partir de maderas de plantación**

**Código: 5402-1401-085**

**(DOCUMENTO I)**

**INVESTIGADORES:**

*Ing. Freddy Muñoz-Acosta. Dr.  
Ing. Roger Moya-Roque. Dr.  
Ing. Carolina Tenorio-Monge. M.Sc.  
Ing. Mauricio Carranza-Solano. Lic.*

Marzo, 2021

## INDICE GENERAL

<b>RESUMEN EJECUTIVO.....</b>	<b>3</b>
<b>INTRODUCCION.....</b>	<b>4</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>6</b>
<b>Artículo 1. ULTRASOUND VELOCITY MAPPING TO EVALUATE GLUING QUALITY IN CLT PANELS FROM PLANTATION WOOD SPECIES.....</b>	<b>7</b>
<i>Aceptación de publicación.....</i>	<i>8</i>
<i>Resumen.....</i>	<i>9</i>
<i>Introducción.....</i>	<i>9</i>
<i>Materiales y Métodos.....</i>	<i>11</i>
<i>Resultados.....</i>	<i>15</i>
<i>Discusión.....</i>	<i>18</i>
<i>Conclusiones.....</i>	<i>22</i>
<i>Agradecimientos.....</i>	<i>22</i>
<i>Referencias.....</i>	<i>22</i>
<b>Artículo 2. CLT FABRICATED WITH <i>Gmelina arborea</i> AND <i>Tectona grandis</i> WOOD FROM FAST-GROWTH FOREST PLANTATION: PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES.....</b>	<b>25</b>
<i>Recepción de artículo.....</i>	<i>26</i>
<i>Resumen.....</i>	<i>27</i>
<i>Introducción.....</i>	<i>29</i>
<i>Materiales y Métodos.....</i>	<i>30</i>
<i>Resultados.....</i>	<i>32</i>
<i>Discusión.....</i>	<i>35</i>
<i>Conclusiones.....</i>	<i>38</i>
<i>Agradecimientos.....</i>	<i>38</i>
<i>Referencias.....</i>	<i>39</i>
<b>Artículo 3. PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE TABLEROS CLT USANDO <i>Tectona grandis</i> L.F. Y <i>Gmelina arborea</i> ROXB., PROCEDENTE DE PLANTACIONES FORESTALES, COSTA RICA.....</b>	<b>52</b>
<i>Recepción de artículo.....</i>	<i>53</i>
<i>Resumen.....</i>	<i>54</i>
<i>Introducción.....</i>	<i>55</i>
<i>Materiales y Métodos.....</i>	<i>56</i>
<i>Resultados.....</i>	<i>59</i>
<i>Discusión.....</i>	<i>63</i>
<i>Conclusiones.....</i>	<i>66</i>
<i>Agradecimientos.....</i>	<i>66</i>
<i>Referencias.....</i>	<i>66</i>
<b>Informe: determinación de características mecánicas de los paneles tipo CLT en madera de <i>G. arborea</i> (melina) y <i>T. grandis</i> (teca).....</b>	<b>71</b>
<b>Aportes de la investigación.....</b>	<b>94</b>
<b>Beneficios de los resultados obtenidos.....</b>	<b>95</b>
<b>Justificación para nuevas investigaciones.....</b>	<b>97</b>
<b>Ponencia The 64<sup>th</sup> SWST International Convention.....</b>	<b>100</b>

## RESUMEN EJECUTIVO

Este proyecto ejecutado entre enero 2019 - diciembre 2020 ref., oficio VIE 951-2018, se enmarca en la línea de investigación en tecnología de productos forestales, biomasa y bioenergía y a los ejes estratégicos institucionales Industria y Hábitat, mientras que la disciplina científica y tecnológica corresponde a la Ingeniería de los materiales. La propuesta de investigación generó investigación aplicada obteniendo resultados aplicables al sector de la industria de la madera y de la construcción. El estudio de las propiedades mecánicas de productos de ingeniería, como lo es la madera contralaminada (CLT) son de importancia para potenciar y dar valor agregado a especies forestales procedentes de plantación como la melina (*Gmelina arborea*) y la teca (*Tectona grandis*). Con la madera de estas especies más adhesivo se construyeron paneles de CLT con dimensiones de 1 150 mm de ancho y 2 400 mm de longitud en 3 y 5 capas con un espesor de cada capa de 19 mm y posicionadas perpendicularmente entre sí. La caracterización mecánica y de delaminación de los 24 paneles fue mediante la técnica de ultrasonido para determinar el tiempo y la velocidad que tardó la onda en atravesar el CLT para luego establecer un mapeo y asociar las propiedades ultrasónicas del panel y su delaminación y determinar la calidad del panel. Luego los paneles fueron seccionados para obtener diferentes probetas destinadas para caracterizar las propiedades físico-mecánicas del panel CLT de acuerdo con normas ASTM. Los ensayos físicos fueron: densidad, contenido de humedad, absorción de humedad y delaminación. Los ensayos mecánicos fueron; flexión en dirección flatwise y edge wise, compresión paralela al plano y esfuerzo en cortenante de la línea de cola. Estos valores de propiedades mecánicas serán referencia para diseñar una tabla de valores de diseño que permitan decidir la aplicación del material tipo CLT en estructuras de madera y que cumplan con las exigencias del Código Sísmico de Costa Rica.

## INTRODUCCIÓN

El sector productivo forestal se ha sumido en una profunda crisis en la última década. Cada año continúa la disminución de la tasa anual de reforestación y se registra un aumento de las importaciones de madera. Los sustitutos de la madera continúan ganando espacios en la construcción y mueblería en general, alejando cada vez más al país de sus metas de carbono neutro para el 2020. El recién formulado Plan Nacional de Desarrollo Forestal (PNDF 2011-2020) plantea dentro de sus siete ejes estratégicos, Posicionamiento del Sector Forestal, Competitividad, Sostenibilidad e Innovación.

La demanda mundial de productos forestales aumenta cada día (Ladrach 2010), lo que permite a las plantaciones forestales satisfacer la demanda de mercado, disminuyendo el consumo de madera procedente del bosque primario. En Europa la madera de plantación según Schmidt et al (2010), se usa cada vez más como elemento estructural en viviendas y edificios comerciales. En el caso de Costa Rica, a pesar de que por dos décadas la madera procedente de las plantaciones forestales suministra un porcentaje importante al sector industrial, aun la madera es usada en productos de poco valor agregado, por ejemplo, las tarimas para transporte de mercancías. Dando como resultado poco valor económico a las plantaciones y el principal efecto, no producen un aporte importante en los sectores rurales que es donde se establecen estos cultivos.

Actualmente se pueden encontrar referencias sobre las propiedades y características de la madera procedente de plantación (Moya y Muñoz, 2010; Moya et al., 2015). Pero aún falta implementar investigaciones que den mayor valor agregado a estas especies en usos como se indicó de alto valor agregado y en especial con un alto consumo de madera. Algunas iniciativas se han desarrollado para el uso estructural de la madera como ha sido las investigaciones en vigas laminadas o tipo I (Moya et al., 2013) o bien lo más reciente que es el mejoramiento estructural de las cerchas de madera (Moya et al., 2018). Así mismo se ha encontrado que en general estas maderas de plantación presentan una densidad menor a  $500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , lo que las convierten en especies aptas para la fabricación de muebles y tarimas. Por lo que debe buscarse productos innovadores para que esta madera sea utilizada en aplicaciones civiles.

Por otra parte, a nivel mundial, principalmente en Europa, Estados Unidos y Canadá existe una tendencia de utilizar madera de plantación en productos de alta innovación que permite la construcción de edificaciones. Este material de ingeniería y de innovación es denominado Cross Laminated Timber (CLT), el cual es un producto de alta resistencia mecánica que ha permitido construir edificios de hasta 10 niveles. En particular la construcción con el material compuesto CLT, según Toosi (2011), tiene ciertas ventajas como: (i) mínimo tiempo de ensamble in situ ya que son elementos prefabricados, (ii) aporte a la conservación del ambiente ya que el CLT al ser construido con madera tiene una capacidad de secuestro de CO<sub>2</sub>, (iii) propiedades térmicas, acústicas e impacto ambiental mejores que las del concreto (iv) costos de construcción competitivos  $\pm$  5-10% menor comparado con el acero/concreto. (v) construcciones seguras y de construcción rápida. (vi) menos contaminante y buen competidor del sistema de construcción con hormigón y (vii) crea nuevas opciones de sistemas constructivos que han sido dominadas por otros materiales de construcción.

Los materiales compuestos del tipo CLT constan de varias capas (por lo general 3 a 7) de piezas de madera seca al horno dispuesto en direcciones alternas, unidas con adhesivo estructural y prensado que forman un panel sólido, recto y rectangular. Los paneles CLT terminados son bastante rígidos, resistentes y estables, manejando la transferencia de carga de esfuerzos en todos los lados (Mills 2010, APA 2018).

Entonces en Costa Rica se dan algunas situaciones que podrían permitir que productos de madera con alta innovación puedan ser implementados en las construcciones con este tipo de producto ingenieril con madera procedente de plantaciones forestales, entre algunas razones están: (1) la madera no debe seguir siendo desplazada por el acero, el concreto y otros materiales importados, ya que es un producto renovable y de menor consumo energético para su transformación, (2) existe un área importante en plantaciones forestales que pueden producir madera para la construcción de un producto de innovación como el CLT y (3) debe generarse la investigación básica de estos productos y mostrar al sector productivo que es posible construir productos innovadores con la tecnología existente en el país.

Innovar con productos como el CLT ofrecería la oportunidad de una construcción continua con un tiempo de montaje rápido y una huella de carbono significativamente reducida en comparación con la construcción con concreto, hormigón y acero. Así mismo estos paneles tienen la ventaja que pueden ser usados en todas las partes de la estructura del edificio, es decir en pisos, paredes y techos y que son los elementos estructurales más importantes. También una ventaja del CLT permitirá reducir el tiempo de construcción, ya que los paneles se fabrican con un diseño de estructura sólida prefabricada. En algunos casos, el tiempo de construcción de un edificio de varios pisos puede ser inferior a una semana por nivel. Como los paneles se pueden ensamblar en tan poco tiempo, el edificio es rápidamente resistente a la intemperie y pronto estará listo para ser utilizado (Stauder 2013). Un aspecto que ha tomado gran interés en las construcciones es la gran cantidad de residuos que se producen, mientras que con los paneles CLT se disminuye la generación de residuos en el sitio de la obra (Stauder 2013).

Diseñar productos innovadores con madera de plantación permitirá continuar con el desarrollo de las actividades económicas en las áreas rurales, dando como resultado un beneficio a esas poblaciones tan necesitadas en la actualidad. Además, de promover una opción de uso a un producto de ingeniería innovador como materia prima para el sector de la construcción en CR con características mecánicas y valores de diseño conocidos, para que esta información esté disponible para ingenieros civiles y arquitectos y ellos puedan diseñar y construir sus obras civiles con seguridad bajo estándares de calidad y paralelo a ello potenciar el uso de la madera procedente de plantación en elementos estructurales con mayor valor agregado.

Por lo anterior, es importante abordar la situación real a nivel nacional, asociada a que la madera ha sido desplazada por materiales como el acero, el concreto, el hormigón y otros elementos constructivos importados, que vienen sustentados por importantes avances tecnológicos, amplia información técnica y un mercadeo muy agresivo. Por lo que, desarrollar el conocimiento y enfocar investigaciones a nuevos materiales como el CLT le permitirán a la

madera competir como producto caracterizado y con propiedades que promuevan el desarrollo de aplicaciones diversas y brindar una opción novedosa para el uso de la madera de plantación, dando así, valor agregado al recurso forestal aportando con un material constructivo para el sector de la construcción a nivel nacional. Por tanto, el objetivo principal del proyecto es diseñar y evaluar las propiedades mecánicas de paneles tipo CLT a partir de madera de plantación *Gmelina arborea* y *Tectona grandis* y su potencial aplicación estructural en Costa Rica.

## REFERENCIAS

- APA 2018. Cross-Laminated Timber (CLT) Innovative solid wood panels offer new large-scale design options <https://www.apawood.org/cross-laminated-timber>
- MILLS, F. 2010. Cross Laminated Timber Frames. S.L. CH. Briefing note 13: 1-21.
- MOYA, R., TENORIO, C., CARRANZA, M., NAVARRO, A., SAENZ, M., PANIAGUA, V. (2018). Mechanical performance in flexure for two spans of trusses made of *Hieronyma alchorneoides* and *Gmelina arborea* woods using nail and screw fastening. *Journal Tropical Forest Science* 30(3):330-341.
- MOYA, R., TENORIO, C., CARRANZA, M., CAMACHO, D., QUESADA-PINEDA, H. 2013. Structural performance of I-beam fabricated of *Gmelina arborea* from fast growing trees. *Journal of Tropical Forest Science* 25(2): 206-212.
- MOYA, R., SALAS, C., BERROCAL, A., VALVERDE, JC. 2015. Evaluation of chemical compositions, air-dry, preservation and workability of eight fast-growing plantation species in Costa Rica. *Maderas y Bosques* 21(especial): 31-47.
- MOYA, R., MUÑOZ, F. 2010. Physical and mechanical properties of eight species from fast-growth plantation in Costa Rica. *Journal of Tropical Forest Science* 22(3): 317-328.
- SCHMIDT, J; KÖNIG, J; KÖHLER, J. 2010. Fire-exposed Cross-Laminated Timber – modelling and tests. In World conference on Timber Engineering, (11<sup>th</sup>, Trentino, IT.) S.e 3268-3276.
- STAUDER, C. 2013. Cross-Laminated Timber An analysis of the Austrian industry and ideas for fostering its development in America. 36 p.
- TOOSI, B. 2011. Cross-Laminated Timber The Market Opportunities in North America. FP Innovations. Creating Forests sector solutions. [www.fpinnovations.ca](http://www.fpinnovations.ca)

# Artículo 1.

---

## ULTRASOUND VELOCITY MAPPING TO EVALUATE GLUING QUALITY IN CLT PANELS FROM PLANTATION WOOD SPECIES

*Róger Moya\**

Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica

Apartado 159-7050, Cartago, Costa Rica

E-mail: [rmoya@tec.ac.cr](mailto:rmoya@tec.ac.cr)

*Carolina Tenorio*

Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica

Apartado 159-7050, Cartago, Costa Rica

E-mail: [ctenorio@tec.ac.cr](mailto:ctenorio@tec.ac.cr)

*Freddy Muñoz*

Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica

Apartado 159-7050, Cartago, Costa Rica

E-mail: [fmunoz@tec.ac.cr](mailto:fmunoz@tec.ac.cr)

\* Corresponding author

*(Accepted for publication, 10 february 2021). Published on line 04 marzo 2021*

<https://www.readcube.com/articles/10.1007/s00226-021-01273-x>

**WOOD SCIENCE AND TECHNOLOGY (WSAT)**

*Journal of the International Academy of Wood Science*

*Indexed in: SCOPUS, Science Citation Index, Science Citation Index Expanded (SciSearch)*

*Journal Impact Factor [IF] 2020: 2,109*

Your Submission WSAT-D-20-00323R2 - [EMID:7aa47d95047d5708]

Inicio del mensaje reenviado:

**De:** "Wood Science and Technology (WSAT)" <em@editorialmanager.com>  
**Fecha:** 10 de febrero de 2021, 09:51:30 GMT-6  
**Para:** Roger Moya Roque <rmoya@itcr.ac.cr>  
**Asunto:** Your Submission WSAT-D-20-00323R2 - [EMID:7aa47d95047d5708]  
**Responder-Para:** "Wood Science and Technology (WSAT)"  
<gursimaran.kaur@springernature.com>

Dear Dr. Roque,

We are pleased to inform you that your manuscript, "Ultrasound velocity mapping to evaluate gluing quality in CLT panels from plantation wood species", has been accepted for publication in Wood Science and Technology.

You will receive an e-mail in due course regarding the production process.

Please remember to quote the manuscript number, WSAT-D-20-00323R2, whenever inquiring about your manuscript.

With best regards,

Johanna Lintl  
Managing Editor





## Ultrasound velocity mapping to evaluate gluing quality in CLT panels from plantation wood species

Roger Moya<sup>1</sup> · Carolina Tenorio<sup>1</sup> · Freddy Muñoz<sup>1</sup>

Received: 20 October 2020 / Accepted: 10 February 2021

© The Author(s), under exclusive licence to Springer-Verlag GmbH, DE part of Springer Nature 2021

### Abstract

Evaluation of the glue line in CLT panels and in other wood composite products in general is of great interest. Non-destructive methods such as determination of the velocity of ultrasound waves going through the materials are commonly applied to evaluate wood products. The present work is aimed at mapping ultrasound velocity (UV) to identify problems of glue line delamination in CLT panels of 3 and 5 layers made from *Gmelina arborea* and *Tectona grandis* timber. The results showed higher UV in the 3-layered panels in both timber species, and low UV and the presence of regions of low velocity in UV isocurves of the 5-layered CLT panels, due to separation of glue line, such as un-gluing and delamination. A UV reference value for glue line free of delamination problems of 927 and 1039 m/s was set for CLT panels of *G. arborea* of 3 and 5 layers, respectively, and of 1073 and 946 m/s for CLT panels of *T. grandis* of 3 and 5 layers, respectively. Values below the UV reference suggest the presence of some anomalies or problems of delamination, such as gluing defects.

### Introduction

Cross laminated timber (CLT) is an innovative engineering product that has excellent physical and mechanical properties (Brandner et al. 2016). Because of its high rigidity and support capacity parallel and perpendicular to the plane and the panels can be fabricated with fire retardant substances, it is most frequently used for wall or floor panels (Wiesner and Bisby 2019). In addition, CLT has favourable environmental, aesthetic and energy properties (Liang et al. 2020). Presently, CLT is considered a relevant product not only because of its structural aspects, but also because of a series of advantages in constructing with CLT elements, such as pre-fabrication, variety of shapes, sizes, dimensions, delivery efficiency and reduced construction costs and noise at job site (Wang et al. 2018).

✉ Roger Moya  
rmoya@itcr.ac.cr

<sup>1</sup> Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, Cartago, Costa Rica

CLT panels are generally composed of an odd number of layers (3, 5 or 7 layers) (Brandner et al. 2016). Each layer consists of adjoining solid wood boards/sheets and each layer is overlaid with adhesive at an angle of 90°. The structural properties of the CLT panels are attributed to this layout, which gives dimensional stability, reduces dispersion of the original properties of the wood, reduces or eliminates the influence of timber cracks and gives the structural element increased rigidity, parallel and perpendicular to the plane (Izzi et al. 2018). As for the mechanical properties, in addition to the intrinsic characteristics of the wood and the number of panel layers, the glue line influences the panel's resistance and performance (Betti et al. 2016; Knorz et al. 2017).

There is a wide variety of standards to evaluate panels and analyse their structural performance, physical properties, durability, and the type of joints to use among other aspects (Young et al. 2016; Brandner et al. 2016; Izzi et al. 2018). Among the properties affecting CLT behaviour is glue line performance (Sikora et al. 2016), which can be evaluated at the time of panel fabrication, or while it is being used (Song and Hong 2016). Evaluation of the glue line in CLT products was adapted from the glulam standards (Dugmore et al. 2019), which in some cases are considered severe for this type of product (Betti et al. 2016; Knorz et al. 2017).

Glue line characteristics are set up during product fabrication (Nairn 2017), determined by the CLT fabrication procedure/technology and the glue line characteristics are summarized in two basic steps: (a) raw material preparation and treatment and (b) raw material organization and gluing (Brandner et al. 2016). In addition to these steps, the species to be glued presents its own features, which affect glue line performance (Pang and Jeong 2020). Therefore, glue line evaluation by means of the two most used methods (delamination test and shear test) or others is advantageous for producers and final consumers, as it allows appropriate, reliable and even reproducible evaluation of glue line performance (Betti et al. 2016). The interface quality, as in all glued structural products, should be tested during fabrication and during performance of this element while in use (Vallée et al. 2017). Thus, establishing reliable and quality glue line procedures is of interest (Sikora et al. 2016). The shear test measures the mechanical resistance of the whole glue line (adhesive + substrate), while the delamination test measures layer separation in the laminated timber caused by failure of the adhesive itself or of the interface between the adhesive and the adherent material (Bucur 2010).

These methods are considered destructive. Thus, there is interest now in evaluating the joints of in-service or fabricated structures by means of non-destructive or semi-destructive methods that complement visual inspection of the glued elements (Gaspar et al. 2018). Non-destructive methods, as vibration, ultrasonic, penetration of pilodyn, X-ray, gama-ray, microwave technique, etc., are applied to a wide variety of timber products and can help determine many wood features (Schimleck et al. 2019). One of those non-destructive methods uses ultrasound waves (Fang et al. 2017). The passage of ultrasound waves through the wood is related to key parameters of the material, such as rigidity, grain orientation, moisture content, cracks, knots and insect damage (Senalik et al. 2014). Compared to other methods, ultrasound techniques are safe and have little effects on the person that carries out the test, while being less expensive than most methods (Schimleck et al. 2019). By means of ultrasound waves, it is possible to

estimate many properties—mechanical properties mostly—of laminated products (Sanabria et al. 2011; Vössing and Niederleithinger 2018).

With these methods, it is possible to characterize the glue line and determine wood delamination (Garab et al. 2010; Concu et al. 2017). Garab et al. (2010) established that it is possible to determine crack depth by measuring the ultrasound wave propagation perpendicular to the grain direction and thus predict internal delamination of glue line into the CLT panels. Application of ultrasound waves detects and measures the delamination of the glue line, especially as regards partially adherent adhesive (Gaspar et al. 2018). Because it can easily detect delamination, the ultrasound technique can be used to map the behaviour of the glue line (Dietsch and Tannert 2015).

*Tectona grandis* and *Gmelina arborea* are the tree species mostly used in reforestation, production and exportation in Costa Rica (Moya et al. 2019). *T. grandis* is the most used wood for commercial reforestation in the tropical region in Latin America (Berrocal et al. 2017), while *G. arborea* constitutes 44% of the wood transformed into pallets. Both species are important in timber consumption in Costa Rica, although limited for structural use (Oficina Nacional Forestal 2018). Currently, there are industries in Costa Rica with the conditions and capability to develop new highly innovative and engineered products and processes using plantation produced timber, which can be implemented in construction to develop structural elements (Leiva-Leiva et al. 2018). These industries can develop engineered wood products manufactured with plantation species and thus promote their structural application (Gong et al. 2019).

Hence, this research aims at mapping the velocity of ultrasound waves to identify glue line delamination problems in CLT panels with 3 and 5 layers built with timber from *Tectona grandis* and *Gmelina arborea* from forest plantations, by using ultrasound waves.

## Methodology

### Origin and characteristics of the wood

Timber from *T. grandis* and *G. arborea* from forest plantations in La Cruz, Guanacaste, Costa Rica and in Pérez Zeledón, San José, Costa Rica, respectively, was used. From each species, 600 un-planed lumber were used, sized 25 mm×100 mm×2500 mm, with high moisture content above 100%. The lumber was dried to 12% final moisture content and then kept in a conditioned chamber at 12% equilibrium moisture content for approximately 4 weeks. Then, the lumber was planed to reach 19 mm thickness and 95 mm width.

### CLT panel fabrication

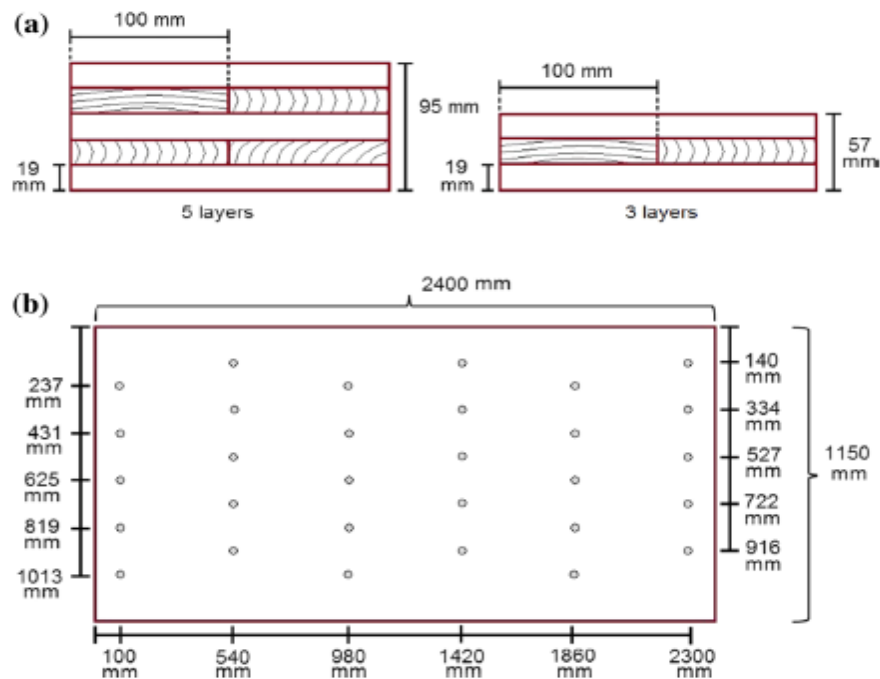
CLT panels measuring 1150 mm wide and 2400 mm long in 2 thicknesses were fabricated: 3 layers, total thickness of 57 mm and 5 layers, total thickness of 95 mm each (Fig. 1a), labelled as CLT3/GA and CLT5/GA for *G. arborea* and CLT3/TG and CLT5/TG for *T. grandis* (Fig. 2a–b). In total, 20 CLT panels were constructed,



including 5 panels per each thickness and each species (2 species  $\times$  2 thicknesses  $\times$  5 samples). Advantage EP-950A® adhesive was used with isocyanate polymer emulsion system (EPI) + Franklin® 200 catalyst (polymeric isocyanate) (Franklin Adhesives and Polymers, OHIO, USA). A grammage of  $200 \text{ g m}^{-2}$  adhesive was applied to one surface of each one of the boards to be glued. The board was placed on a scale and the necessary amount of adhesive was applied using micropore rollers. For pressure application, a hydraulic press ITALPRESSE PL/9/SCF/8 (Italtresse S.A., Bergamo, Italy) was used, at 8.0 MPa pressure during 2 h. The panels were cut to a final size of 1150 mm wide and 2400 mm long and the respective thickness, maintaining approximately 12% moisture content.

### Panel sampling, ultrasound measurement and wood density determination

Ultrasound measurement points were marked on each one of the CLT panels following the scheme described in Fig. 1b. In total, 30 measurement points were used on each one of the CLT panels for both species. Tests were conducted using SYLVAT-ESTDUO ultrasound equipment with two 22 kHz transducers, where the ultrasonic transmitter translator is placed on one side of the CLT panel at sampled point in perpendicular position and the receiver translator is placed in the same position on the other opposite side of the panel. The same holds for the perpendicular position. The time of ultrasound wave was measured across the thickness for the best delamination



**Fig. 1** Scheme of the 5- and 3-layer CLT panel (a) and the UV measurement points on each CLT panel of the two species (b)



**Fig. 2** a CLT panels of *Gmelina arborea* lumber, b CLT panels of *Tectona grandis* and c position of the transducer during ultrasound measurement

presence (Fig. 2c). The time is referred to ultrasound signal propagation time across the thickness from one transducer (emitter) to the other (receiver). Ultrasound velocity (UV) was calculated using Eq. 1 (Fang et al. 2017), and UV was used for identification of the defects after their evaluation (section Measurement of defects).

$$V = \frac{E}{T} \quad (1)$$

where  $V$  = ultrasound velocity in  $\text{m s}^{-1}$ ,  $E$  = sample thickness in  $m$ ,  $T$  = time required by ultrasound wave to travel from one side of CLT panels to the other side in  $s$ .

Wood density of each CLT panel was measured in full dimensions and was determined by CLT panels dimensions (thickness, width and length) and weight; afterwards, density was calculated by the relation weight and volume.

### Measurement of defects

After measuring the time of the ultrasound waves, the defects present in some of the 30 measurement points per panel were measured and observed. All panels were cut in transversal section across its width 1150 in 100, 540, 980, 1420, 1860 and 2300 mm (Fig. 1b). The defects analysed were in each measurement point and were



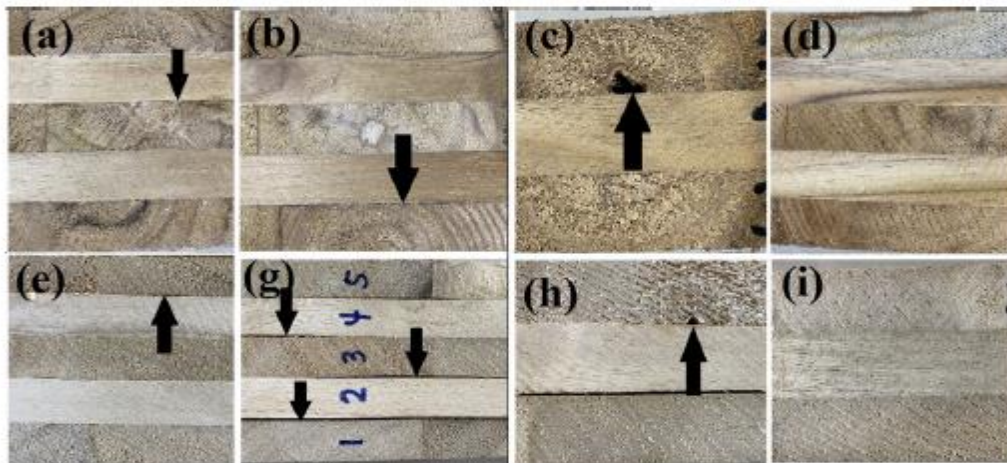
classified into four different types: (i) delamination between layers at the measurement points (Fig. 3a and e); (ii) the presence of un-glued layers (Fig. 3b and g), (iii) the presence of pith or knots (Fig. 3c and h) and (iv) without defect, which was named as UV reference (Fig. 3d and i). The defects were expressed as the percentage ratio of the total number of measurement points with defects and the total points analysed per type of CLT panel (3 or 5 layers) and per species. In the case of measurement points that presented delamination between layers, the thickness of the opening between layers was measured by means of a thickness feeler gauge. When two or more open layers were found in the same measurement point, the values were added to obtain the total delamination per measurement point.

### Determination of ultrasound velocity reference

UV reference was calculated from glue line free of separation (delamination or un-glued line) or without defect of each type of CLT panel. These values were averaged and used as ultrasound reference line.

### Data process of ultrasound velocity

UV isocurves were made, using the spline method of spatial interpolation of the programme QGIS 3.10 (Creative Commons, CA, USA). The spatial interpolation was performed using each one of the measurement points indicated (Fig. 1b). Next, for each species, a univariate analysis of the UV was carried out to determine the limits (5% percentiles) corresponding to the classification of the variable (Table 1). The SAS 8.1 statistics programme for Windows (SAS Institute Inc., Cary, N.C., USA) was used to carry out the analyses. Once classification of each species had been



**Fig. 3** Four different defects in glue line: (1) delamination between layers at the measurement points in *Gmelina arborea* (a) and *Tectona grandis* (e); (2) presence of un-glued layers in *Gmelina arborea* (b) and *Tectona grandis* (g); (3) presence of pith or knots in *Gmelina arborea* (c) and *Tectona grandis* (h); and (4) without defect in *Gmelina arborea* (d) and *Tectona grandis* (i)

made, the areas corresponding to each UV class were calculated and expressed as the relationship between percentage and total area. This procedure was carried out for each panel of the two species by vectorization of the interpolations, using the QGIS 3.10 programme.

### Statistical analysis

One-way ANOVA was applied per species, where CLT panel layer was the independent variable, and density, UV and the defect parameters (delamination, unglued, the presence of pith or knots and without defect) the dependent variables. The Tukey test was used to test the mean difference at a level of significance of  $p < 0.01$ . The species was not included in the model because we know that two species are very different. The SAS 8.1 statistics programme for Windows (SAS Institute Inc., Cary, N.C., USA) was used to carry out the analyses.

## Results

### Ultrasound velocity of CLT panels for *T. grandis* and *G. arborea*

The density and UV values obtained per species per type of CLT panels are presented in Table 2. There were no differences in density between the two types of CLT panels per species, but the two species presented differences in density, with *T. grandis* being the higher. Regarding the UV average, statistical differences were observed in both species between the panels of 3 and 5 layers, where those of 3 layers presented the highest average, minimum and maximum values. In addition, the CLT panels of *T. grandis* presented higher average UV values than *G. arborea*, but CLT panels of *G. arborea* wood presented the highest maximum values.

**Table 1** Ultrasound velocity classes for glue line in CLT panels of *Gmelina arborea* and *Tectona grandis*

Ultrasound velocity class	Species and range of ultrasound velocity (m/s)	
	<i>Gmelina arborea</i>	<i>Tectona grandis</i>
1	0.0–184.0	0.0–253.5
2	184.0–234.5	253.5–426.5
3	234.5–276.0	426.5–493.5
4	276.0–384.5	493.5–639.0
5	384.5–539.5	639.0–882.0
6	539.5–870.5	882.0–1077.0
7	870.5–1216.5	1077.0–1230.5
8	1216.5–1382.0	1230.5–1288.0
9	1382.0–1743.0	1288.0–1461.0
10	1743.0–1999.0	1461.0–1594.0



**Table 2** Density and ultrasound velocity parameters for the CLT panels of the two species

Species	Number of layers in CLT panel	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Average of ultrasound velocity (m/s)	Minimum ultrasound velocity (m/s)	Maximum ultrasound velocity (m/s)	Coefficient of variation (%)
<i>G. arborea</i>	CLT3/GA	0.48 <sup>A</sup>	729.1 <sup>A</sup>	137.2	1999.0	22.0
	CLT5/GA	0.49 <sup>A</sup>	586.2 <sup>B</sup>	82.3	1451.7	18.8
<i>T. grandis</i>	CLT3/TG	0.60 <sup>A</sup>	935.1 <sup>A</sup>	246.8	1594.1	18.5
	CLT5/TG	0.60 <sup>A</sup>	801.0 <sup>B</sup>	74.0	1290.5	19.5

*Legend:* different letters between treatments mean that there are statistical differences ( $p$  value <0.05)

Figures 4 and 5 present the isocurves per UV class in *G. arborea* and *T. grandis* CLT panels, respectively. The different colour represents different range of UV in these figures. The areas from 539.5 to 1216.5 m/s for *G. arborea* and from 882.0 to 1230.5 m/s for *T. grandis* occupy most of the panel of both species. In CLT3/GA and CLT3/TG panels, a greater number of zones or areas of higher UV were observed, corresponding to shades of yellow, in relation to CLT5/GA and CLT5/TG panels, where practically only areas of medium to low UV (represented with green and blue colour in Figs. 4 and 5) appeared. According to UV mapping, it was not possible to determine any type of pattern of variation of UV in any of the species; therefore, the distribution of the UV classes seems to be random.

The previous results were verified with the area percentage values for each UV class determined per species (Table 3). In the case of CLT3/GA and CLT5/GA panels, the area with the highest percentage was that of class 6 (539.5–870.5 m/s) with 44.76% and 60.34%, respectively, of the total panel area (Table 3). For *T. grandis*, the area with the highest percentage in CLT3/TG corresponds to the UV class number 6 (882.0–1077.0 m/s), while for CLT5/TG the area with the highest percentage was found in the UV class 5 (639.0–882.0 m/s) (Table 3).

### Evaluation of defects

Regarding evaluation of defects in CLT panels, delamination presented the highest percentage in both species and both types of panels. In both species, CLT panels with 5 layers presented higher percentage of delamination in comparison with CLT panels of 3 layers. This was more noticeable in CLT panels of *G. arborea*, as almost 83% of the evaluated points presented delamination (Table 4).

In addition, CLT3/GA panels showed no defects such as the presence of knots or pith and un-glued layers appeared more often than in CLT5/GA (Table 4). In CLT3/TG and CLT5/TG panels, the percentage of measurement points without defects was higher than the percentage with defects. There were no un-glued layers in any types of panels, and CLT5/TG panels presented greater percentage of defects classified as the presence of knots or pith than CLT3/TG panels (Table 4).



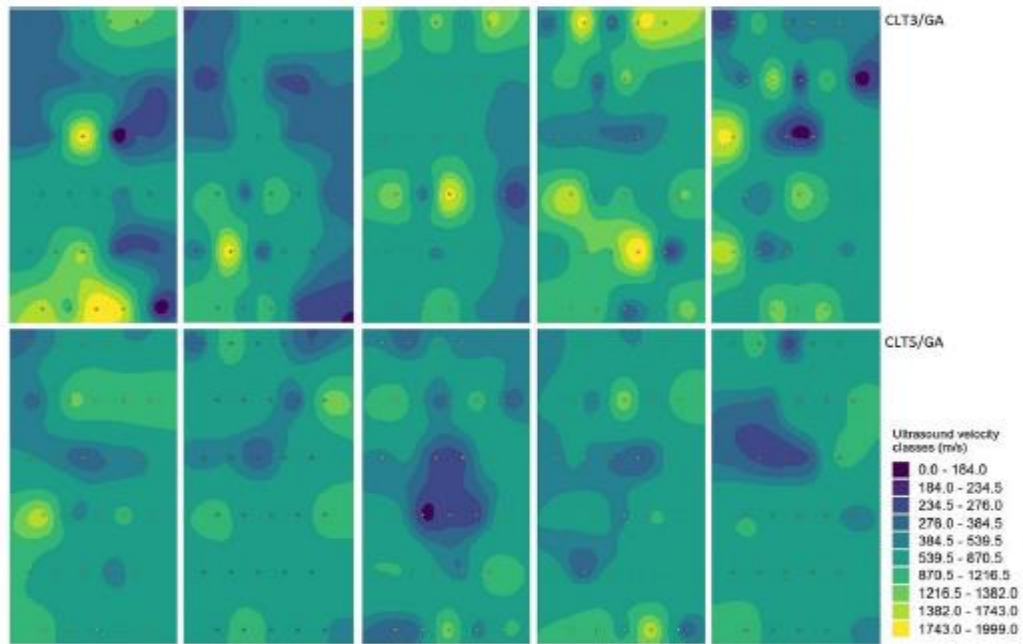


Fig. 4 Isocurves colour of ultrasound velocity in *Gmelina arborea* CLT panels

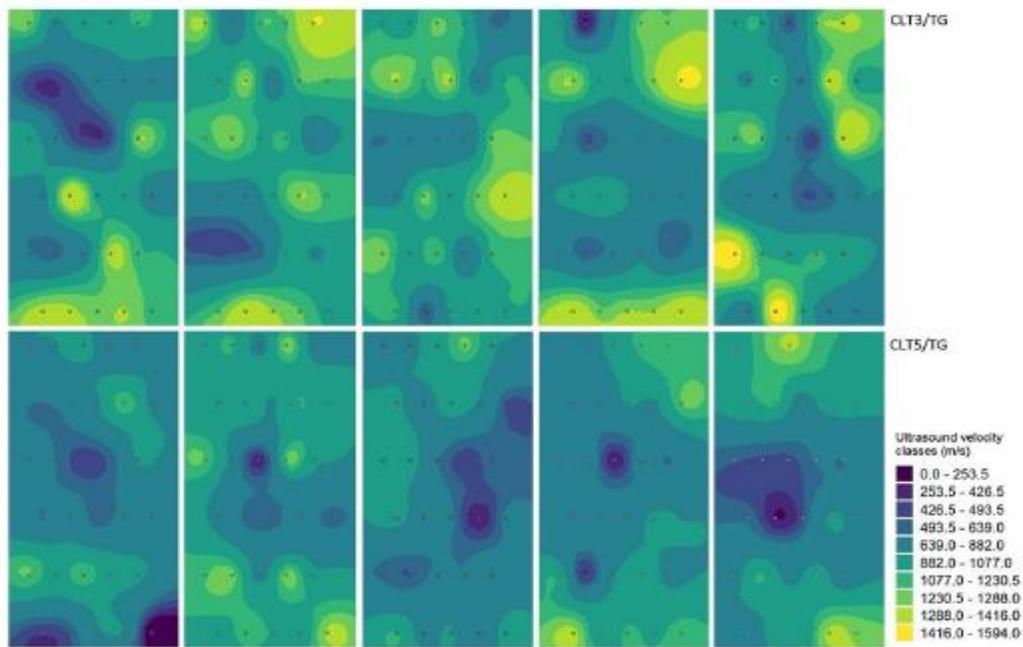


Fig. 5 Isocurves colour of ultrasound velocity in *Tectona grandis* CLT panels

**Table 3** Area percentage per ultrasound velocity class for the CLT panels of the two species

<i>G. arborea</i> CLT panel			<i>T. grandis</i> CLT panel (%)		
Ultrasound velocity class	Area percentage (accumulate percentage)		Ultrasound velocity class	Area percentage (accumulate percentage)	
	CLT3/GA	CLT5/GA		CLT3/TG	CLT5/TG
1	0.50 (0.50)	0.35 (0.35)	1	0.03 (0.03)	0.98 (0.98)
2	0.00 (0.50)	0.00 (0.35)	2	0.82 (0.85)	0.89 (1.87)
3	2.90 (3.40)	3.94 (4.29)	3	1.76 (2.61)	3.78 (5.64)
4	10.48 (13.88)	6.86 (11.15)	4	3.76 (6.37)	7.67 (13.31)
5	12.13 (26.01)	15.50 (26.68)	5	29.10 (35.47)	45.77 (59.08)
6	44.76 (70.77)	60.34 (86.99)	6	31.94 (67.41)	30.24 (89.32)
7	17.85 (88.62)	11.43 (98.42)	7	14.88 (82.30)	7.39 (96.71)
8	7.27 (95.89)	1.15 (99.57)	8	10.42 (92.71)	2.29 (99.00)
9	3.30 (99.19)	0.43 (100.00)	9	6.37 (99.08)	1.00 (100.00)
10	0.81 (100.00)	0.00 (100.00)	10	0.92 (100.00)	0.00 (100.00)

UV evaluation according to type of defect in *G. arborea* showed statistical differences only for un-glued panels; CLT5/GA presented the highest value of UV (844.9 m/s) compared to CLT3/GA values (400.4 m/s) (Fig. 6a). In CLT panels of *T. grandis*, only delamination presented statistical differences; CLT3/TG panels presented the greatest value with 737.7 m/s, while CLT5/TG panels presented the lowest value with 574.0 m/s (Fig. 6b).

Analysis of the UV and delamination demonstrated an inverse linear relationship, since with increasing delamination value, the UV for the 3 and 5 layers CLT panels of the two species decreased (Fig. 7). In addition, most of the UV values determined for all types of CLT panels are below the reference line determined for CLT panels without defects (Fig. 7).

## Discussion

The range of UV values in CLT panels of *G. arborea* and *T. grandis* (Table 2) coincides with the values reported for CLT panels from other species, as is the case of one variety of *Pinus pinaster* (Concu et al. 2017), and yew (*Taxus spp.*) and *Picea abies* from Switzerland (Keunecke et al. 2007). Additionally, UV values of CLT panels of *T. grandis* were greater than the values obtained in CLT panels of *G. melina*. This can be attributed to higher density of *T. grandis* (Table 2); it was observed that UV increases with increasing wood density (de Oliveira and Sales 2006).

There are different reports on UV for solid wood of *T. grandis* and *G. arborea*. Although composite products were fabricated with these species, it is possible to compare wave propagation between solid and composites products due to similar performance (Beall 2002). Reported UV of solid wood of these species reached over 4000 m/s (Karlinsari et al. 2008; Akpan et al. 2014; Olaoye et al. 2019; Olaoye and

**Table 4** Percentage of defects per CLT panel layer for the two species

Species	CLT layer panel	Without defect or UV reference (%)	Delamination (%)	Un-glued (%)	The presence of pith or knots (%)	Total (quantity)
<i>G. arborea</i>	CLT3/GA	42.34	49.55	9.01	0.00	111
	CLT5/GA	15.32	82.90	5.41	1.80	111
<i>T. grandis</i>	CLT3/TG	66.67	26.83	0.00	7.32	123
	CLT5/TG	49.17	32.50	0.00	20.00	120

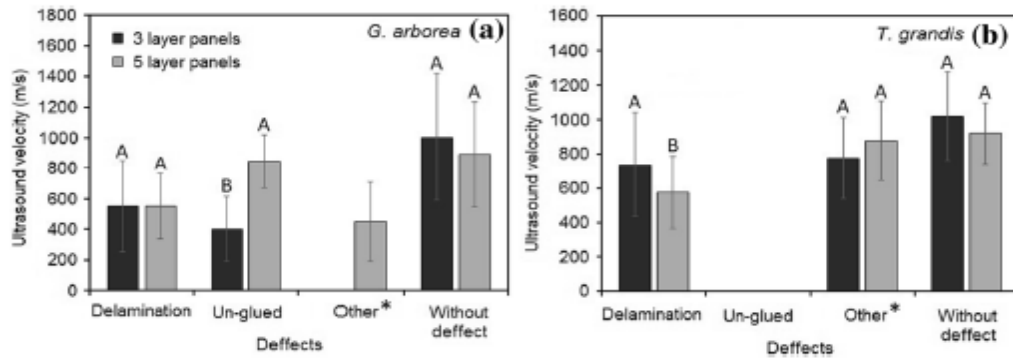
Oluwadare 2020), which is higher than in the present study (Table 2). This difference is attributed to the fact that UV measurement in longitudinal direction presents higher velocity than in transversal direction. Lengthwise UV is greater than transversal (tangential or radial) UV, because wave attenuation is stronger transversally due to larger empty spaces (lumens of the cells or vessels), which are less frequent in longitudinal orientation (Beall 2002).

This result is important since UV is frequently measured in longitudinal direction in CLT panels and in this way, it is not possible to detect all defects associated with glue line. When ultrasound wave is determined in longitudinal direction, the wave can pass through a single piece and probably any glue line is crossed, and then the most important points for the performance of CLT panels were not monitored. Thus, by transversely measuring ultrasound waves, a better evaluation of the glue lines is obtained.

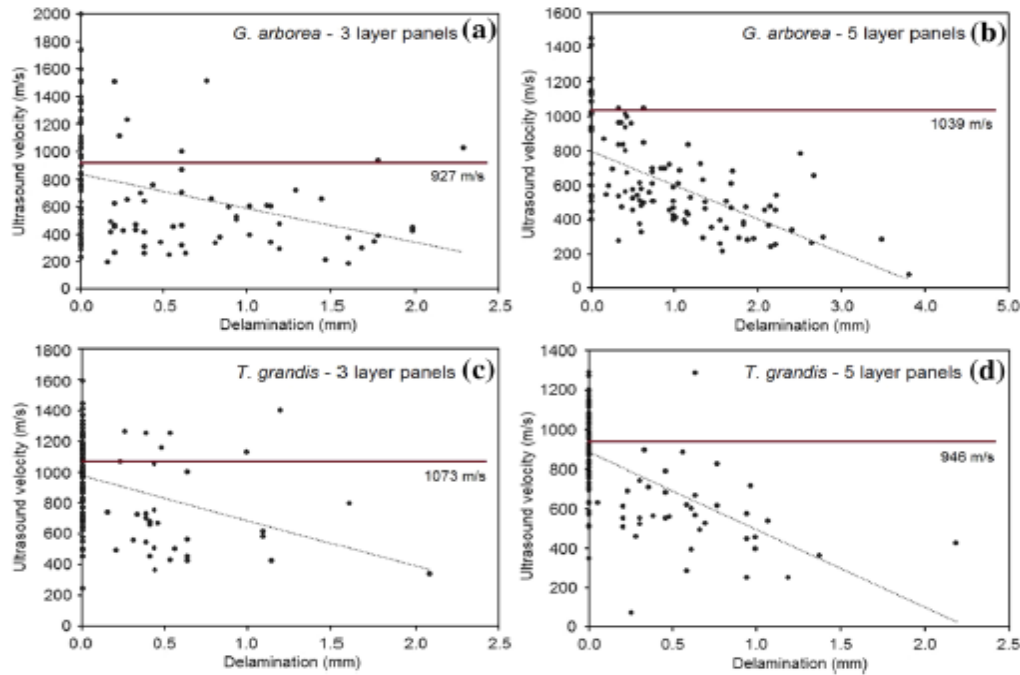
Another possible source of variation influencing the values of UV is the technique used to measure the wave, or the density of the wood. For example, Olaoye et al. (2019) and Olaoye and Oluwadare (2020) in studies with *G. arborea*, reported values of UV slightly above those of CLT panels; these authors determined the velocity of ultrasound waves transversally, using vibration waves. For solid wood of *T. grandis* in transversal direction, Shaji et al. (2000) reported slightly higher values of UV than in CLT panels of the same species in this study (Table 2). Then, this difference could be attributed to higher density of the wood used by Olaoye et al. (2019) and Olaoye and Oluwadare (2020) with *G. arborea* and Shaji et al. (2000) with *T. grandis*.

Important differences were found between the different species, both in the average of the UV values and the amplitude of the values. CLT panels of *G. arborea* presented a lower average than CLT panels of *T. grandis* (Table 2), but *G. arborea* CLT panels presented a broader amplitude in relation to CLT panels of *T. grandis* (Table 1). This difference is attributed to *G. arborea* having lower density; therefore, lower UV (Beall 2002) and many defects in the glue line were found in those CLT panels (Table 4).

Another important difference is that UV was greater in the 3-layer CLT panels than the 5-layer CLT panels for both wood species (Table 2), which is a normal result, since there is a small attenuation of the wave due to the length, in this case the thickness of the panel, through which the wave has to pass (Vun et al. 2004). However, in the case of CLT panels, this assertion should be taken cautiously, since



**Fig. 6** Ultrasound velocity in CLT panels per defect per number of layers for the two species. Legend: different letters between treatments mean that there are statistical differences ( $p$  value  $< 0.05$ ). Legend: \* presence of pith or knots



**Fig. 7** Relationship between delamination and ultrasound velocity in CLT panels per number of layers for the two species. Note: the dark line corresponds to the reference ultrasound velocity determined for each type of panel free of defects.

when UV is analysed in the different categories of defects, the differences in velocity not always appear between thicknesses (Fig. 6). Several results support this statement:



- (i) In the case of CLT panels that did not present delamination in the glue line (Fig. 3d and i), no differences were found in UV in 3-layer and 5-layer CLT panels of *G. arborea* (Fig. 6a) and *T. grandis* (Fig. 6b).
- (ii) The presence of un-glued layers defect category was only observed in *G. arborea* boards (Fig. 3b), in which higher UV was observed in the 5-layer CLT panels (Fig. 6a), because of the larger percentages of un-glued layers found in the 3 layer CLT panels, decreasing the ultrasonic wave (Table 4).
- (iii) Delamination with regard to the number of layers was significantly higher only in 5-layer CLT panels of *T. grandis* (Fig. 6b) (Table 4).

Considering only delamination by glue line defects, the relationship between the opening in delamination and UV decreased when the opening was larger than 1 mm in both species (Fig. 7). The reference values of 927 and 1039 m/s for CLT panels of *G. arborea* of 3 and 5 layers, respectively, and 1073 and 946 m/s for CLT panels of *T. grandis* of 3 and 5 layers, respectively, correspond to the ultrasound velocity of a glue line without delamination. UV values lower than the reference velocity line suggest the presence of anomalies or delamination problems, with an aperture greater than 1 mm, according to the relationships established in Fig. 7.

Mapping UV propagation by means of isocurves (Figs. 4 and 5), illustrates different velocity ranges detected in each CLT panel, which if associated with the values of UV according to the delamination opening, indicate that the UV data of the partially glued panels are somewhat disperse and below the UV reference value (Fig. 7).

Although in the present study, the causes of delamination were not established, other studies have suggested different problems such as insufficient adhesive in the production process as the likely cause of lack of adhesion between the longitudinal and orthogonal layers (Concu et al. 2017) or inadequate preparation of the boards (Emberley et al. 2017), varying thickness (Custódio et al. 2009) or inadequate pressure application (Brandner et al. 2016; Emberley et al. 2017).

According to the results obtained in the different species and thicknesses, there were more delamination problems and un-glued defects in 5-layer CLT panels of *G. arborea* and *T. grandis* (Table 4), which could be due to inadequate wood preparation process, gluing process, its application, or to inadequate pressure application. This problem was evidenced in the UV isocurves (Figs. 4 and 5), which present a broad view of the parts of the panel with low ultrasound velocities. The regions with UV less than 539.5 m/s for *G. arborea* wood and 882.0 m/s for *T. grandis* are present in greater quantity in 5-layer CLT panels, indicating regions of low velocity with possible delamination problems. Importantly, 5-layer CLT panels of *G. arborea* showed a greater quantity of regions with low UV in relation to the CLT panels of *T. grandis* (Fig. 5). Thus, those results suggested that probably the 5-layer panels of *G. arborea* presented problems of the gluing or pressing process.

Finally, the previous results showed that determining UV using SYLVATEST-DUO ultrasound equipment with transducers of 22 kHz to evaluate gluing quality in CLT panels in a transversal direction and after making isocurves of UV (Figs. 4 and 5), allows to establish the sections of the panel with delamination problem or other defects and as a complement the regions without defects. Further, depending

on the UV values, the delamination opening size values can be obtained (Fig. 7), thus achieving a total evaluation of the CLT panels of different thicknesses.

## Conclusion

The evaluation of the velocity of ultrasound waves in CLT panels provides important information about the panel's internal characteristics, especially about two defects: delaminated glue line and un-gluing. In addition to the evaluation of the different parts of the panel, it is possible to map the isocurves of ultrasound waves and thus to identify with a high degree of precision the un-glued areas inside the CLT panels. The zones of the CLT panels without defects presented higher velocities, while the zones with delamination, the presence of un-glued layers or of pith or knot problems, presented a significant drop in velocity, due to the dissipation of the ultrasonic wave. Thus, it would be possible to establish evaluation criteria (quality standards) for the different thicknesses of CLT given by the number of layers. Each element that makes up a layer is important. Special care is advised during preparation, and appropriate gluing and pressure application must be carried out to avoid the presence of empty spaces due to delamination and defects due to inadequate gluing.

The analyses of the ultrasound velocity values and mapping by ultrasound velocity isocurves, in addition to the already known difference between the velocity values of the two species due to the significant difference in wood density, show a higher percentage of area with low UV in the 5-layer panels, indicating glue line problem (delamination, the presence of un-glued layers or the presence of pith or knot problems). The presence of those UV indicates that it is necessary to pay attention to the preparation of the wood, the processes of gluing and pressure application, which affect the glue line.

**Acknowledgements** We thank the Vicerrectoria de Investigación y Extensión of the Instituto Tecnológico de Costa Rica for financing this research and the companies Novelteak de Costa Rica S.A. and Maderas S&Q S.A., for providing the raw material for this study. The authors thank to MSc. Dorian Carvajal Vanegas for the help in ultrasound velocity mapping made in QGIS 3.10 and to Maria Teresa Vargas L. for translation and edition English.

## References

- Akpan N, Abiola JK, Ayeni OD, Bamidele OD (2014) Comparative assessment of selected acoustic properties of talking drums made from wood of *Gmelina arborea* (Roxb) and *Brachystegia eurycoma* (Harms). *J Multidiscip Eng Sci Technol* 1(5):21–27
- Beall FC (2002) Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood properties. *Wood Sci Technol* 36:197–212. <https://doi.org/10.1007/s00226-002-0138-4>
- Berrocal A, Moya R, Rodríguez-Solis AM, Muñoz F (2017) Drying of plantation-grown *Tectona grandis* wood with daily-controlled drying rate schedules. *J Trop For Sci* 29:69–79
- Betti M, Brunetti M, Lauriola MP, Nocetti M, Ravalli F, Pizoo B (2016) Comparison of newly proposed test methods to evaluate the bonding quality of Cross-Laminated Timber (CLT) panels by means of experimental data and finite element (FE) analysis. *Constr Build Mater* 125:952–963. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.113>



- Brandner R, Flatscher G, Ringhofer A, Schockhofer G, Thiel A (2016) Cross laminated timber (CLT): overview and development. *Eur J Wood Prod* 74:331–351. <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0999-5>
- Bucur V (2010) Terms for delamination in wood science and technology. Delamination in wood, wood products and wood-based composites. Springer, Netherlands, Dordrecht, pp 17–31
- Concu G, Fragiaco M, Trulli N, Valdés M (2017) Non-destructive assessment of gluing in cross-laminated timber panels. In: WIT Transactions on Ecology and the Environment. WIT Press, pp 559–569
- Custódio J, Broughton J, Cruz H (2009) A review of factors influencing the durability of structural bonded timber joints. *Int J Adhes Adhes* 29:173–185. <https://doi.org/10.1016/j.ijadh.2008.03.002>
- de Oliveira FGR, Sales A (2006) Relationship between density and ultrasonic velocity in Brazilian tropical woods. *Bioresour Technol* 97:2443–2446. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.04.050>
- Dietsch P, Tannert T (2015) Assessing the integrity of glued-laminated timber elements. *Constr Build Mater* 101:1259–1270. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.064>
- Dugmore M, Nocetti M, Brunetti M, Naghizadeh Z, Wessels CB (2019) Bonding quality of cross-laminated timber: evaluation of test methods on *Eucalyptus grandis* panels. *Constr Build Mater* 211:217–227. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.240>
- Emberley R, Inghelbrecht A, Doyle N, Torero JL (2017) Components and consequences of cross-laminated timber delamination. *Fire Science and Technology 2015*. Springer Singapore, Singapore, pp 273–279
- Fang Y, Lin L, Feng H, Lu Z, Emms GW (2017) Review of the use of air-coupled ultrasonic technologies for nondestructive testing of wood and wood products. *Comput Electron Agric* 137:79–87. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.03.015>
- Garab J, Toth A, Szalai J, Bejo L, Divos F (2010) Evaluating glued laminated beams using a nondestructive testing technique. *Trans Famena* 34:33–46
- Gaspar F, Cruz H, Gomes A (2018) Evaluation of glue line shear strength of laminated timber structures using block and core type specimens. *Eur J Wood Prod* 76:413–425. <https://doi.org/10.1007/s00107-017-1217-4>
- Gong Y, Liu F, Tian Z, Wu G, Ren H, Guan C (2019) Evaluation of mechanical properties of cross-laminated timber with different lay-ups using Japanese larch. *J Renew Mater* 7:941–956. <https://doi.org/10.32604/jrm.2019.07354>
- Izzi M, Casagrande D, Bezzi S, Pasca D, Follesa M, Tomasi R (2018) Seismic behaviour of cross-laminated timber structures: a state-of-the-art review. *Eng Struct* 170:42–52. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.060>
- Karlinasari L, Wahyuna ME, Nugroho N (2008) Non-destructive ultrasonic testing method for determining bending strength properties of *Gmelina arborea*. *J Trop For Sci* 20:99–104
- Keunecke D, Sonderegger W, Pereteanu K, Lüthi T, Niemz P (2007) Determination of Young's and shear moduli of common yew and Norway spruce by means of ultrasonic waves. *Wood Sci Technol* 41:309–327. <https://doi.org/10.1007/s00226-006-0107-4>
- Knorz M, Torno S, van de Kuilen JW (2017) Bonding quality of industrially produced cross-laminated timber (CLT) as determined in delamination tests. *Constr Build Mater* 133:219–225. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.057>
- Leiva-Leiva T, Moya R, Navarro-Mora A (2018) Model calibration of prefabricated timber wall frames made of *Hieronyma alchorneoides* and *Gmelina arborea* timber using nail and screw fasteners. *Drv Ind* 69:3–12. <https://doi.org/10.5552/drind.2018.1722>
- Liang S, Gu H, Bergman R, Kelley SS (2020) Comparative life-cycle assessment of a mass timber building and concrete alternative. *Wood Fiber Sci* 52:217–229. <https://doi.org/10.22382/wfs-2020-019>
- Moya R, Tenorio C, Salas J, et al (2019) Tecnología de la madera de plantaciones forestales: Fichas técnicas [Technology of wood from plantation: technical sheet]. Editorial Tecnológica de Costa Rica, 1ra edn. Editorial Tecnológica de Costa Rica- Editorial Universidad de Costa Rica, Cartago, Costa Rica
- Nairn JA (2017) Cross laminated timber properties including effects of non-glued edges and additional cracks. *Eur J Wood Prod* 75:973–983. <https://doi.org/10.1007/s00107-017-1202-y>
- Oficina Nacional Forestal (2018) Usos y aportes de la madera en Costa Rica [Uses and contributions of wood in Costa Rica]: Estadísticas 2018 & precios 2019. 44

- Olaoye KO, Oluwadare AO (2020) Comparative assessment of acoustic properties of talking drums made from hourglass shell from different geometric shapes of *Gmelina arborea* (Roxb.) wood. *Int Wood Prod J* 11:20–26. <https://doi.org/10.1080/20426445.2019.1706881>
- Olaoye KO, Oluwadare AO, Adelusi EA, Abiola JK (2019) View of acoustic properties of *Gmelina arborea* (Roxb.) wood. *J Mater Sci Res Rev* 4:1–19
- Pang S-J, Jeong GY (2020) Swelling and shrinkage behaviors of cross-laminated timber made of different species with various lamina thickness and combinations. *Constr Build Mater* 240:117924. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117924>
- Sanabria SJ, Furrer R, Neuenschwander J, Niemz P, Sennhauser U (2011) Air-coupled ultrasound inspection of glued laminated timber. *Holzforschung* 65:377–387. <https://doi.org/10.1515/HF.2011.050>
- Schimleck L, Dahlen J, Apiolaza LA et al (2019) Non-destructive evaluation techniques and what they tell us about wood property variation. *Forests* 10:728. <https://doi.org/10.3390/f10090728>
- Senalik CA, Schueneman G, Ross RJ (2014) Ultrasonic-based nondestructive evaluation methods for wood a primer and historical review. *Gen Tech Rep FPL-GTR-235*
- Shaji T, Somayaji S, Mathews MS (2000) Ultrasonic pulse velocity technique for inspection and evaluation of timber. *J Mater Civ Eng* 12:180–185. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2000\)12:2\(180\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2000)12:2(180))
- Sikora KS, McPolin DO, Harte AM (2016) Shear strength and durability testing of adhesive bonds in cross-laminated timber. *J Adhes* 92:758–777. <https://doi.org/10.1080/00218464.2015.1094391>
- Song YJ, Il HS (2016) Evaluation of bonding strength of larch cross-laminated timber. *J Korean Wood Sci Technol* 44:607–615. <https://doi.org/10.5658/WOOD.2016.44.4.607>
- Vallée T, Tannert T, Fecht S (2017) Adhesively bonded connections in the context of timber engineering – a review. *J Adhes* 93:257–287. <https://doi.org/10.1080/00218464.2015.1071255>
- Vössing KJ, Niederleithinger E (2018) Nondestructive assessment and imaging methods for internal inspection of timber. A review. *Holzforsch* 72:467–476. <https://doi.org/10.1515/hf-2017-0122>
- Vun RY, Wu Q, Charles MJ (2004) Through-thickness ultrasonic characterization of wood and agricultural fiber composites. *For Prod J* 54(12):233–239
- Wang JB, Wei P, Gao Z, Dai C (2018) The evaluation of panel bond quality and durability of hem-fir cross-laminated timber (CLT). *Eur J Wood Prod* 76:833–841. <https://doi.org/10.1007/s00107-017-1283-7>
- Wiesner F, Bisby L (2019) The structural capacity of laminated timber compression elements in fire: a meta-analysis. *Fire Saf J* 107:114–125. <https://doi.org/10.1016/j.fire saf.2018.04.009>
- Young TM, Barbu MC, Hindman DP, et al (2016) Comparisons of the production standards for Cross laminated timber (CLT) in Europe versus USA. In: WCTE 2016 - World Conference on Timber Engineering

**Publisher's Note** Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



## Artículo 2.

---

### CLT fabricated with *Gmelina arborea* and *Tectona grandis* wood from fast-growth forest plantations: Physical and mechanical properties

Freddy Muñoz<sup>a</sup>, Carolina Tenorio<sup>b</sup>, Roger Moya<sup>c\*</sup>, Angel Navarro-Moya<sup>d</sup>

<sup>a</sup> Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.

orcid.org/0000-0001-6823-7379

<sup>b</sup> Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.

orcid.org/0000-0003-2901-7079

<sup>c</sup> Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica,

orcid.org/0000-0002-6201-8383

\*rmoya@itcr.ac.cr.

<sup>d</sup> Escuela de Ingeniería en Construcción, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.

orcid.org/0000-0002-0539-7014

(enviado 13 abril 2021)

### **CURRENT FORESTRY REPORTS**

*Indexed in: SCOPUS, Science, EBSCO Discovery Service, Science Citation Index Expanded (SciSearch)*

*Journal Impact Factor [IF] 2019-2020: 4,972*

**Current Forestry Reports - Submission Confirmation CLT fabricated with Gmelina arborea and Tectona grandis wood from fast-growth forest plantations: Physical and mechanical properties for co-author - [EMID:037b78f87ce4c867]**



Traducir mensaje a: Español | No traducir nunca de: Inglés



em.cftr.0.729d76.7fa8214d@editorialmananager.com



en nombre de

Current Forestry Reports <em@editorialmananager.com>

Mar 13/4/2021 13:44

Para: Freddy Munoz Acosta

Re: "CLT fabricated with Gmelina arborea and Tectona grandis wood from fast-growth forest plantations: Physical and mechanical properties"

Full author list: Freddy Muñoz; Carolina Tenorio; Roger Moya, Ph.D.; Angel Navarro-Moya

Dear Freddy Muñoz,

We have just received the submission entitled: "CLT fabricated with Gmelina arborea and Tectona grandis wood from fast-growth forest plantations: Physical and mechanical properties" for possible publication in Current Forestry Reports, and you are listed as one of the co-authors. The manuscript has been submitted to the journal by Dr. Roger Moya who will be able to track the status of the paper through his/her login.

If you have any objections, please contact the editorial office as soon as possible. If we do not hear back from you, we will assume you agree with your co-authorship.

Thank you very much.

With kind regards,

Springer Journals Editorial Office

Current Forestry Reports

## CLT fabricated with *Gmelina arborea* and *Tectona grandis* wood from fast-growth forest plantations: Physical and mechanical properties

### Abstract

Fabrication and use of Cross Laminated Timber (CLT) using tropical woods is still limited. The objective of the present study is to determine the possibility of using CLT panels of 3 and 5 layers, fabricated with *Tectona grandis* and *Gmelina arborea* wood. Delamination, water absorption, density, flexure test, compression and glue-line shear were evaluated. The results showed that CLT panels of *T. grandis* presented higher values of density, less water absorption and lower delamination, with no evident differences between the CLT of 3 and 5 layers. The high density of *T. grandis* resulted in higher values of the mechanical properties. Flatwise and edgewise flexure tests in 5-layer CLT panels of both species presented higher values of bending stiffness compared to those of 3-layer CLT panels. Bending stress values in 3-layer CLT panels were higher than for 5-layer CLT panels. As for shear stress in bending flatwise, in both species, 3-layer CLT surpassed 5-layer CLT panels, but in the edgewise test no differences were observed. MOE and Fc in the compression test were superior in relation to the edgewise test. MOE and Fc in compression flatwise in 3-layer CLT was greater than in 5-layer CLT in both species, but edgewise these values were higher in 5-layer CLT panels. Most common failures were stress and delamination in the flexure test, whereas in the compression test these were: shearing, splitting and crushing. In the glue-line shear test no differences were observed between CLT panels of 3 and 5 layers for both species.

**Keywords:** structural elements, sustainable material, delamination, building material, tropical wood, wood of plantation.

### Highlights

- CLT panels fabricated from *Tectona grandis* and *Gmelina arborea* wood
- Physical and mechanical properties were tested in 3- and 5-layer CLT panels
- *Tectona grandis* wood produced CLT panels with the best properties.
- Differences between two configurations were found in bending and compression tests.

### List of Title Word Abbreviations

CLT: Cross laminated timber

WA: water absorption

MC: moisture content

Fv: Shear stress in bending

Fb: bending stress

Fc: module of rupture in compression test

EI: bending stiffness

MOE: module of elasticity

L1: glue line closest to loading application

L2: central glue line

L3: glue line opposite to loading application for CLT fabricated with 3 layers and central glue line for CLT fabricated with 5 layers

L4: central glue line

L5: glue line opposite to loading application for CLT fabricated with 5 layers

## Introduction

Cross laminated timber (CLT) is an innovative engineering product in the form of a laminated structure fabricated with timber boards placed in 3, 5 or 7 layers [1]. The timber boards are adjacent to each other, superposed with adhesive at an angle of 90° [1]. This product has excellent physical and mechanical properties as construction material [2] and hardwood species present good properties to be used in this product [3]. Because of its high rigidity and support capability in the parallel and perpendicular planes, CLT is frequently used in panels for flooring, roofing and walls, in low to mid-rise constructions [4]. In addition, CLT presents favourable aesthetic, energy and environmental properties, such as carbon dioxide sequestration [1,5].

Furthermore, cross laminating used in CLT panels grants improved dimensional stability, reduces dispersion of the wood's properties and reduces the influence of the defects, while increasing rigidity in the parallel and perpendicular planes [6]. Compared to other construction materials, CLT panels offer good seismic resistance [7], diminish assembling time [8] and allow application of fire retardant treatments [9] or treatments to avoid damage due to fungi or insects [10].

The use of CLT panels in the industry and the study of their properties in countries like United States of America, Canada, Europe, China, Japan, Australia, New Zealand and other temperate countries is widely developed [11]. Abundant information is available on the properties of different types of CLT panels made from Pinus, Larch and Spruce [3,5,12,13].

Regarding the different species used in CLT panel construction, the standard for performance-rated cross-laminated timber in its denomination ANSI/APA PRG320-2012 [14] suggests using conifer wood with minimum 0.35 specific weight, while in Europe, species with densities above 0.42 g·m<sup>-3</sup> are used [15]. More recently, low-added-value timber has been used in CLT panel construction [3,16].

The use of tropical species for CLT panel construction is still limited [17]. However, there are important reports from Malaysia [18] and Brazil [19,20]. The properties of CLT panels of *Falcataria moluccana*, *Anthocephalus macrophyllus*, *Acacia magnium*, hybrid acacia (*A. mangium* × *A. auriculiformis*), *Paraserianthes falcataria*, *Endospermum malaccensis*, *Hevea brasiliensis*, *Canarium sp.*, *Intsia bijuga*, plus several eucalyptus species, have been studied [18,21–24].

*Tectona grandis* is used in commercial reforestation in Latin America [25,26], while *Gmelina arborea* is widely used in Central America [27]. Both species are important in timber consumption in Costa Rica, but their structural uses are limited [28].

Currently, there are industries in Costa Rica with conditions and capacity for the development of new highly innovative engineered products and processes using wood from forest plantations, which can be implemented in the construction sector, specifically in the development of structural elements [29]. These industries can promote the

development of engineering products fabricated with wood from plantation species, thus increasing the use of these species [28].

CLT panel production from *G. arborea* and *T. grandis* wood in Costa Rica is still limited to glulam, I-joint, trusses and plywood and LVL panels [28]. So far, studies on CLT panels have been limited to *T. grandis*. Triwibowo et al. [30] presented the values obtained for 3-layer CLT panels of *T. grandis* indicating that these meet the Japan JAS 1152 standard. On the other hand, Byeon et al. [23] showed the flexure results of 3-layer CLT panels of *T. grandis* compared to other tropical and Korean species, stating that the values of resistance of CLT panels are surpassed by *Intsia bijuga* wood but still comply with Korean standards.

At the initial phase, it is extremely important to develop research, tests, designs and creation of commercial products such as CLT panels to facilitate the manufacturing process, the selection and the use of raw materials from forest plantations in Costa Rica [22]. Thus, the objective of this research is to determine the appropriateness of CLT panels of 3 and 5 layers fabricated with *Tectona grandis* and *Gmelina arborea* woods from forest plantations for structural uses, by evaluating the physical and mechanical properties, such as delamination, water absorption, thickness swelling, moisture content, density, bending flatwise and bending edgewise in flexure test, compression parallel to grain, and glue line shear test.

## **Methodology**

### **Origin and characteristics of the wood**

Timber from *T. grandis* and *G. arborea* from forest plantations in La Cruz, Guanacaste, Costa Rica and in Pérez Zeledón, San José, Costa Rica, respectively, was used. From each species, 600 un-planed boards were used, sized 25 mm x 100 mm x 2500 mm, with high green moisture content. The wood was dried to 12% final moisture content and then kept in a conditioned chamber at 12% equilibrium moisture content. Then, the boards were planed to reach 19 mm thick and 95 mm wide.

### **CLT panels fabrication**

Wide details on fabrication of CLT panels are presented in Moya et al. [31]. CLT panels measuring 1150 mm wide and 2400 mm long in 2 thicknesses were built: 3 layers, total thickness of 57 mm, and 5 layers, total thickness of 95 mm (Fig. 1a) with *G. arborea* and *T. grandis* wood. CLT panels were labelled as 3-layer CLT panel and 5-layer CLT panel. In total, 20 panels were constructed, including 5 panels per each thickness and each species (2 species x 2 thicknesses x 5 samples). Advantage EP-950A® adhesive was used with isocyanate polymer emulsion system (EPI) + Franklin® 200 catalyst (polymeric isocyanate) (Franklin Adhesives and Polymers, OHIO, USA). A grammage of 200 g·m<sup>-2</sup> adhesive was applied to one surface of each one of the boards to be glued. The board was placed on a scale and the necessary amount of adhesive was applied using micropore rollers. For pressure application, a hydraulic press ITALPRESSE PL/9/SCF/8 (Italpresse S.A., Bergamo, Italy) was used, at 8.0 MPa pressure during 3600 s. The panels

were cut to a final size of 1220 mm wide and 2400 mm long, and the respective thickness, maintaining approximately 12% moisture content.

### **Panel sampling**

Sampling sought to obtain the largest quantity of specimens in order to comply the specifications of the performance-rated cross-laminated timber standard, in its denomination ANSI/APA PRG320-2012 [14]. Samples were obtained for density, water absorption (WA), moisture content (MC), flexure test (bending and shear), compression test and glue-line shear test, all of them in flatwise and edgewise orientations. From the CLT panels constructed for each layer configuration (3 and 5 layers) per species, 3 CLT panels were sampled to obtain the specimens for flatwise orientation (Fig. 1b) and 2 CLT panels to obtain the specimens for edgewise orientation (Fig. 1c). The sections of the CLT panels not indicated in the figures were used for the specimens in density, WA, MC and glue-line shear tests.

### **Delamination and physical properties**

The physical properties evaluated were density, water absorption (WA) and moisture content (MC). Forty (40) specimens (2 species x 2-layer configurations x 10 samples) were used, which were 70 mm wide x 100 mm long x thickness of the respective CLT panel. The density was calculated as the correlation between the weight and the volume (length, width and thickness) of the samples. As for MC and WA the standards ASTM D4442 [32] and ASTM D1037 [33] respectively, were used. To determine the WA, equation 1 proposed by Muhod Yusof et al [22] was employed.

$$\%WA = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100 \quad (1)$$

Where:  $W_1$  = mass (g) of the test sample before immersion (the original dry weight);  $W_2$  = mass (g) of the test sample after immersion.

For the delamination test 36 specimens (2 species x 2-layer configuration x 9 samples) were used, each measuring 75 mm wide x 120 mm long x thickness of the respective CLT panel. Before applying the Cyclic Delamination Test [34] an evaluation was performed to discard and mark the open glue lines and measure the length of the closed glue lines. Next, procedure AITC T110 [34] was applied for the cyclic delamination test; the initially closed glue lines were evaluated and the length of the opening by delamination was measured to calculate total delamination (Equation 2).

$$\% Delamination_{total} = \frac{l_{tot,delam}}{l_{tot,glueline}} \times 100 \quad (2)$$

Where:  $l_{tot,delam}$  = total delamination length in mm and  $l_{tot,glueline}$  = sum of the perimeters of all glue lines in a delaminated specimen.

### **Mechanical properties**

The mechanical properties evaluated were: flexure test in flatwise and edgewise orientations, both of them in bending and shear condition, compression parallel to grain test in flatwise and edgewise orientations and glue line shear test. In accordance with the standard for performance-rated cross-laminated timber in its denomination

ANSI/APA PRG320-2012 [14], the standard ASTM D198 [35] was used to determine the flexure test in flatwise orientation in bending and shear conditions and the standard ASTM D4761-19 [36] for the flexure test in edgewise orientation in bending and shear conditions. Tests were performed for 24 beams (2 species x 2-layer configuration x 6 samples) size 300 mm wide x 2400 mm long x respective thickness of the CLT panel for flatwise direction in bending (Fig. 1b), and 24 beams (2 species x 2-layer configuration x 6 samples) size 300 mm wide x 1150 mm long x respective thickness of the CLT panel for flatwise direction in shear (Fig. 1b). For edgewise trials, 32 beams (2 species x 2-layer configuration x 8 samples) measuring 75 mm wide x 1150 mm long x respective thickness of the CLT panel for bending and 32 beams (2 species x 2-layer configuration x 8 samples) measuring 75 mm wide x 575 mm long x thickness for shear (Fig. 1c) were used.

As for compression parallel to the grain test, the ANSI/APA PRG320-2012 establishes the standard ASTM D4761 [36]. Seventy-two (72) samples (2 species x 2-layer configuration x 2 orientations (flatwise and edgewise) x 9 samples) of 70 mm wide x 480 mm long x respective thickness of the CLT panel were used. The glue-line shear test followed the procedure described in ASTM D905 [37] standard, using 120 samples (2 species x 2-layer configuration x 2 orientations (flatwise and edgewise) x 15 samples) de 63 mm long x 50 mm wide and 50 mm thick For both trials the samples were cut from the pieces of the CLT panels that remained after the flexure test.

### **Statistical analysis**

One-way ANOVA was applied to the parameters of the physical (density, MC and WA), delamination and mechanical properties (MOE and Fc in compression and maximum stress in glue-line shear). The Tukey test was used to test the mean difference at a level of significance of  $p < 0.01$  per species per CLT panel layer. The SAS 8.1 statistics program for Windows (SAS Institute Inc., Cary, N.C., USA) was used to carry out the analyses.

## **Results**

### **Physical properties**

Table 1 presents the values of density, WA and MC obtained per species and type of CLT panel. No differences in density, WA and delamination were observed between the configurations (3 and 5 layers) of CLT panels for the same species. As for MC, the CLT panels of *T. grandis* showed no differences, but in the case of *G. arborea* wood, 3-layer CLT panels presented higher MC than 5-layer CLT panels. Regarding the differences between the species, CLT panels of *T. grandis* presented greater density, lower MC, slightly higher values of WA and slightly lower values of delamination.

### **Flexure test in flatwise and edgewise direction**

CLT panels of *T. grandis* wood presented the highest values in relation to CLT panels of *G. arborea* wood in the three parameters evaluated (Table 2). In the flexure tests of the CLT panels for both species, flatwise and edgewise, the 5-layer CLT panels presented values of bending stiffness (EI) statistically superior to the values of the 3-layer CLT panels. Conversely, the values of bending stress (Fb) of the 3-layer CLT panels presented higher means than those of the 5-layer CLT panels (Table 2). As for average values of shear stress in bending (Fv), for both species in flatwise



orientation, the 3-layer CLT panels presented values statistically superior to those of the 5-layer CLT panels. In edgewise orientation no statistical differences were observed between the number of layers composing the CLT panels (Table 2).

Load vs. deflection curves were made to illustrate the differences regarding the flexure test (Fig. 2). Flatwise orientation tests presented greater loads than edgewise orientation trials. In addition, flexure in shear tests (flatwise and edgewise) presented greater loads (Fig. 2b) and lower deflections relative to bending (Fig. 2d). Flatwise bending curves showed that 5-layer CLT panels presented greater loads in relation to 3-layer CLT panels for both species (Fig. 2a, 2c). Conversely, flatwise shear curves showed that 3-layer CLT panels presented greater loads compared to 5-layer CLT panels in both species (Figure 2b, 2d). As for edgewise bending and shear curves, a similar behaviour was observed in flatwise bending, where 5-layer CLT panels in both species presented loads greater than in 3-layer CLT panels (Fig. 2c, 2d). In all curves analyzed (flatwise and edgewise bending and shear), both types of CLT panels of *T. grandis* wood presented greater loads than in panels of *G. arborea* wood (Fig. 2).

Regarding the types of failure in the different layers of the beams of CLT panels in the flexure test in both orientations (flatwise and edgewise), the most frequent failures were due to tension (Fig. 3a) and to delamination (Fig. 3b). The results in flexure tests in flatwise bending and shear of CLT panels of *G. arborea* were:

- In the 3-layer CLT panels in flatwise bending in glue line L1 (glue line closest to loading application) 67% of the beams did not present failure; in glue line L2 (central glue line) 50% of the beams presented delamination and 50% had no failures; in glue line L3 (glue line opposite to loading application) 50% of the beams presented delamination failures and the other 50% tension failures. In the case of 5-layer CLT panels, 67%, 83% and 100% of the beams showed no failure in glue lines L1, L3 and L4, respectively. In glue line L2, 50% of the beams presented delamination and 50% no failure, while in glue line L5 (glue line opposite to loading application), 67% of the beams presented delamination failures.
- In the 3-layer CLT panels in flatwise shear, glue lines L1 and L2 presented 50% delamination failure in beams and 50% beams without failure, while glue line L3 presented a 100% tension failure in beams. In 5-layer CLT panels, in glue lines L1 and L3 over 67% beams showed delamination; in L2 and L4, 67% and 84% of the beams showed no failure, respectively. Lastly, L5 presented tension failures in over 84% of the beams.

As for the beams tested in flatwise bending and shear in CLT panels fabricated with *T. grandis* wood:

- L1 in the 3-layer CLT panels in flatwise bending showed no failures in 100% of the beams tested; in L2, 50% of the beams showed delamination and 50% had no failures. In L3 over 66% of the beams showed tension failures. L1 and L3 in 5-layer CLT panels in flatwise bending presented failure in 100% and 84% of the beams, respectively; in L2 and L4, 50% of the beams had delamination failures and 50% of the beams showed no failure. L5 presented tension failures in over 67% of the beams.
- In L1 in CLT panels in flatwise shear, 84% of the beams showed no failures. In L2, 50% of the beams presented delamination failure and 50% no failure; in L3, 84% showed no failure. In 5-layer CLT panels, in L1, L3 and L5,

84%, 67% and 84% of the beams showed no failure, respectively; in L2, 50% of the beams presented delamination and 50% showed no failure, while in L4 50% presented delamination failure.

In edgewise bending and shear tests in CLT panels of *G. arborea*, beam failures were distributed as follows:

- In the 3-layer CLT panels in edgewise bending, over 63% of the beams did not present failure in L1, 88% of the beams presented tension failure in L2 and 50% of the beams presented failure due to delamination in L3, whereas in the 5-layer CLT panels 88% of the beams did not present failure in L1 and L5, 75% of the beams presented tension failure in L2, 50% of the beams presented failure due to delamination in L3, 50% showed tension failures and 50% no failure in L4.
- In the 3-layer CLT panels tested for edgewise shear, 38% of the beams presented delamination failure and 38% tension failure in L1; 100% of the beams failed because of tension in L2 and 50% presented no failures in L3. In 5-layer CLT panels tested for edgewise shear, 63% did not present failures in L1 and L3, 75% presented tension failure in L2 and L4 and in L5 75% did not present failure.

In edgewise bending and shear trials in CLT panels of *T. grandis*, beam failure distribution was as follows:

- In the 3-layer CLT panels tested for edgewise bending, 50% of the beams showed no failures in L1; 100% and 63% presented tension failure in L2 and L3, respectively. As for 5-layer CLT panels, 50% of the beams did not fail in L1, 88% and 63% failed because of tension in L2 and L4, respectively, while 63% did not fail in L3, and in L5 38% presented tension failure and another 38% did not fail.
- In 3-layer CLT panels tested for edgewise shear, 88%, 100% and 50% of the beams failed due to tension in L1, L2 and L3 respectively, whereas in 5-layer CLT panels, 50%, 63% and 75% did not present failures in L1, L3 and L5 respectively; 75% showed tension failure in L2, 50% failed because of tension in L3 and 50% did not present failure in L4.

### **Compression parallel to grain test**

The values of MOE and module of rupture ( $F_c$ ) in compression test, as well as in the flexure test flatwise, were higher than edgewise values (Fig. 4). The average values of MOE and  $F_c$  in compression flatwise in 3-layer CLT panels were statistically higher than the obtained in 5-layer CLT panels, for both species (Fig. 4a-b), as opposed to the edgewise tests, where the average MOE and  $F_c$  of 5-layer CLT panels presented values statistically higher in 3-layer CLT panels of both species (Fig. 4a-b), with the exception of *G. arborea* panels, where no statistical difference appeared between CLT panels of 3 and 5 layers (Fig. 4b). In both trials (flatwise and edgewise) the average values of MOE and  $F_c$  in CLT panels of *T. grandis* were higher than in *G. arborea* (Fig. 4).

Three types of failure were observed in flatwise and edgewise evaluation in the compression parallel to the grain test: shearing, splitting and crushing (Fig. 5):

- In 3-layer CLT panels of *G. arborea* wood tested for flatwise compression, 78% of the beams presented crushing in L1 and L3 and 78% presented splitting in L2. In 5-layer CLT panels, L1 presented 67% crushing, L2 and L4

presented 78% and 67% splitting, respectively; L3 presented 45% shearing and in L5 100% of the beams showed shearing, crushing or no failure.

- In 3-layer CLT panels of *G. arborea* tested edgewise, 55% of the beams presented splitting failures in L1, 55% crushing in L2 and 55% showed no failures in L3, whereas 5-layer CLT panels presented 55%, 67% and 55% splitting failures in L1, L3 and L5 respectively; 55% presented crushing in L2 and 33% presented crushing failures and 33% of the beams showed no failure in L4.
- In 3-layer CLT panels of *T. grandis* wood in flatwise compression, 55% and 67% of the beams presented crushing failure in L1 and L3 and 45% showed no failure in L2. In 5-layer CLT panels, 45% of the beams presented shearing failure and 45% crushing failure in L1, 55% of the beams presented splitting, shearing and no failure in L2, L3 and L4, respectively, while 67% showed no failure in L5.
- In 3-layer CLT panels of *T. grandis* wood in edgewise compression, 45% and 55% of the beams presented splitting failure in L1 and L3, respectively and 67% crushing failure in L2. As regards 5-layer CLT panels, 88% and 55% of the beams presented no failures in L1 and L3, respectively; 45% presented crushing in L2 and L4 and 88% presented splitting in L5.

#### **Glue-line shear test**

No differences in maximum stress in glue-line shear were observed between the 3- and 5- layer CLT panels in any of the analyzed configurations (flatwise and edgewise) for both species (Table 3). In addition, CLT panels of *T. grandis* wood presented average values of maximum stress higher than the CLT panels of *G. arborea* wood.

#### **Discussion**

CLT panels built with the two-wood species reflect the density conditions of the wood before the manufacturing process. Although an increase in the mass of the panel should be expected from the amount of adhesive used (approximately 0.6 kg due to a grammage of 200 g·m<sup>-2</sup> adhesive in approximately 3 m<sup>2</sup> of panel area for each layer of timber), this increase in the density of 3-layer CLT and 5-layer CLT panels was not significant (Table 1). As for MC, it reflects the behavior of sawn wood. *T. grandis* wood presents uniform MC at the end of the drying process [26], while dried *G. arborea* wood is characterized by great variability of MC [38]. Then, MC variability after drying probably influenced the the differences in MC of *G. arborea* panels, the in higher MC in 3-layer CLT panels than in 5-layer CLT panels, hence the difference between these two configurations (Table 1).

Water absorption has direct effects on the mechanical and physical behaviour of the CLT panels and is related with the various wood polymers, cellulose, hemicellulose and lignin [39]. This study found no differences in the values of WA between the panels of both species and configurations (Table 1). The type of adhesive could have had influence on this property [22].

Noteworthy, the percentage of delamination in CLT panels of *T. grandis* and *G. arborea* was above 50% in both species, which is much greater than the percentage established by the EN16351:2015 standard (20%) [40]. The

characteristics of the glue-line of these same panels were analysed previously by Moya et al. [31], who indicated that the panels presented critical delamination caused by problems in manufacture [41] probably associated with gluing problems [42]. The type of adhesive used could also be contributing to the high percentage of delamination; according to Corpataux et al. [43], the EPI adhesive is inapplicable in the tropics, because of the prevailing moisture conditions of the geographic area, where inappropriate performance of the glue-line causes delamination. Gathering from the results of the delamination test, the adhesive utilized in CLT panels of *T. grandis* and *G. arborea* was not the most suitable and efficient.

The most important factor in the variation of the mechanical properties of CLT panels is the density of each species, as these are positively correlated among them [44,45]. In this study, *T. grandis* wood presents a density of 0.64 g/cm<sup>3</sup>, while *G. arborea*'s density is of 0.48-0.49 g/cm<sup>3</sup>. This difference is reflected in higher values of EI, Fb and Fv in the flexure test (Table 2), lower deflexion with greater load application (Fig. 2), higher MOE and Fc in compression parallel to the grain test (Fig. 4) and greater stress values in glue-line shear test (Table 3).

Comparing the values of EI, Fb and Fv in the flexure test (Table 2) with 3-layer CLT panels fabricated with white pine, red maple and white ash wood [46] or *Pinus radiata* wood [47], gives as a result that 3-layer CLT panels of *T. grandis* and *G. arborea* wood present lower values of EI than those of the previous species. Meanwhile, the values of Fb and Fv of CLT panels of *G. arborea* wood also present lower values than those of white pine, red maple, white ash and *Pinus radiata* wood [46-47], while the values of Fb and Fv of CLT panels of *T. grandis* wood, surpass the values of *Pinus radiata*, white pine, red maple and white ash wood [46-47]. This behaviour is related with the density of the wood; the density of *G. arborea* wood is lower than in *Pinus radiata*, white pine, red maple and white ash wood, whereas *T. grandis* wood presents higher density relative to the previous species.

In both species, in the flexure test, 5-layer CLT panels presented values of EI higher than in the 3-layer CLT panels in both orientations, flatwise and edgewise (Table 2). However, the values of Fb and Fv in 3-layer CLT panels offered better performance in rolling shear, since resistance to shear increases as the span-to-depth decreases [48]. As for span-to-depth in 3-layers, it was approximately 0,025, whereas in 5-layer panels it was 0.042.

Failure mechanisms in CLT panels either in flexure test or compression are unpredictable and unconventional and in most cases occur close to the panel's maximum load [47]. In flexure, when the CLT panel is subjected to a load, it experiments shear stresses perpendicular to the grain inside the orthogonally oriented laminates [49] —a mechanism called "rolling shear stress"— causing tensile and delamination failures [48]. In this study, CLT panels of both species (*G. arborea* and *T. grandis*) showed both types of failure (Fig. 3 and 5). In flatwise bending flexure test, delamination occurred in lower layers (L3), located in the elongated section of the beam in 3-layer CLT panels. Contrariwise, in shear flexure test, stress failure occurred in lower layers (L5), whereas in L4 it presented higher delamination. These results agree with the failure types reported by Navaratnam et al. [47] in 3- and 5-layer CLT panels in *Pinus radiata*.

Compression parallel to the grain reflects again the effect of higher density of the wood of *T. grandis* in relation to *G. arborea* wood, since values of MOE and Fc are higher in *T. grandis* (Fig. 4). CLT panels have potential for mid-rise buildings, where resistance to heavier vertical loads than in low-rise buildings is required [50], therefore resistance to compression plays an important role [51]. Thus, CLT panels of *T. grandis* wood will perform better in compression than CLT panels of *G. arborea* wood.

During the compression test each layer acts independently [50], therefore the resistance of CLT panels flatwise or edgewise is governed by the orientation of each layer. The configuration containing more layers parallel to load application flatwise presents greater resistance than edgewise in both species (Fig. 4). According to Oh et al. [50] the best performance in flatwise beams is given by CLT panels fabricated by gluing layers crosswise; hence, the layers of CLT cross to a loading direction will be stressed in perpendicular to the grain direction under compression. It is estimated that resistance to compression perpendicular to the grain is approximately 10% of the resistance parallel to the grain, whereas contribution of the transversal layers to resistance to compression is considered null [50]. Therefore, greater resistance is expected in testing with samples flatwise, as there is a greater number of longitudinal layers than edgewise.

Importantly, the highest values of MOE and Fc in CLT panels of both species were obtained in compression parallel to grain in the 3-layer configuration panels tested flatwise, whereas edgewise greater resistance was obtained in 5-layer panels for both MOE and Fc (Fig. 4). In compression parallel to grain, as occurred in the flexure test, the behaviour is influenced by shear resistance between layers [52]. Lower resistance to transversal shear of CLT panels in the region of the glue line —known as rolling shear failure [53]— owes to the presence of transversal layers and low resistance to shear and rigidity [54]. Thus, in the flatwise test in 3-layer CLT panels, the number of layers influenced by shear is lower (1 out of 3, equivalent to 33.33% of the cross-section) than in 5-layer CLT panels (2 out of 5, equivalent to 40% of the cross section), resulting in greater resistance to compression in 3-layer CLT panels. However, in the edgewise test these relationships are reversed; in 3-layer CLT panels, the number of shear-influenced layers (2 out of 3, equivalent to 66.67% of the cross-section) is greater than in 5-layer CLT panels (3 out of 5, equivalent to 60% of the cross section), resulting in greater resistance to compression in this last configuration.

Failures in compression parallel to grain (Fig. 5) have different causes [22]: the failure caused by shearing is presented in Fig. 5a and this failure is produced by maximum shear plane along 45°; splitting failure (Fig. 5b) is due to the low bonding integrity between wood and adhesive or shear resistance; and finally crushing failure (Fig. 5c) is due to the weakness in compression and failure along the maximum compression line.

Additionally, layer orientation influences in producing each type of failure. Shearing and crushing are common when the strength is applied parallel to the layer (Figures 5a and 5c). For example, in layers to which a parallel load was applied in the flatwise test, L1 and L3 in 3-layer CLT panels and L1, L3 and L5 in 5-layer CLT panels, in all

cases over 55% of all layers presented shearing and crushing, whereas if the layer receives the load perpendicularly in the flatwise test, CLT panels will likely split (Fig. 5b).

In the evaluation of the mechanical properties in flexion and compression of the 3- and 5-layer CLT panels as established in Annex A PRG-320 standards [14], in both species and in the two types of configuration the values of EI, Fb, Fv and Fc established for different softwood and hardwood species in North America in the categories of E and V, are exceeded; thus, concerning compression and flexural properties of both *G. arborea* and *T. grandis* wood, both species can be considered suitable for CLT panel fabrication. In addition, the types of failures are similar to those reported for other species or are typical failures of this type of products.

The results of the glue-line shear test by Gaspar et al. [55] evidenced no significant differences between the 3-layer and 5-layer CLT panels, either flatwise and edgewise direction, as resulted here with the two species studied (Table 3), meaning that adhesion is not affected by the number of layers used and adherence is conserved. This result does not mean that the strength applied in both panels was uniform in both configurations, since no differences appeared between the 3- and 5-layer CLT panels. Where a slight difference occurs is in resistance according to species. A slight reduction in the values of maximum stress in *G. arborea* panels in relation to *T. grandis* panels was observed (Table 3). Shear stress in the glue-line grows with increasing density of the wood [56]. Density of *T. grandis* is higher than for *G. arborea*, therefore, greater resistance is present in the glue-line of *T. grandis* wood.

## Conclusion

The results of the physical properties obtained show that the density values are within the range of the species commonly used in the manufacture of CLT panels. Moreover, adequate values of water absorption and values of mechanical properties were obtained.

The evaluation of the mechanical properties in bending and compression of the 3- and 5-layer CLT panels in the two species according to the Annex A PRG-320 standard surpasses the values of EI, Fb, Fv and Fc established for different softwood and hardwood species in North America in the E and V categories. In addition, the types of failures observed are similar to those reported for other species or are typical failures of this type of products.

In general, a satisfactory behavior was observed in the glue line shear test. However, high levels of delamination were evidenced, which can be solved with the application of a more appropriate adhesive for the species and climate, or by studying pressure conditions in the manufacture of the CLT panels.

## Acknowledgements

We thank the Vicerrectoría de Investigación y Extensión of the Instituto Tecnológico de Costa Rica for financing this research and the companies NovelTeak de Costa Rica S.A. and Maderas S&Q 2005 S.A. for providing the raw material for this study. The authors thank María Teresa Vargas L. for translation into English.

## Declarations

**Funding:** the funding was provided by *Vicerrectoría de Investigación y Extensión*, of the Instituto Tecnológico de Costa Rica

**Conflict of interest:** The authors declare absolutely no conflict of interest.

**Availability of data and materials:** the data are available.

## References

1. Jeleč M, Varevac D, Rajčić V. Cross-laminated timber (CLT) – a state of the art report. *J Croat Assoc Civ Eng* [Internet]. 2018 [cited 2021 Jan 27];70:75–95. Available from: <https://doi.org/10.14256/JCE.2071.2017>
2. Dolan JD, Wilson A, Brandt K, Bender DA, Wolcott MP. Structural design process for estimating cross-laminated timber use factors for buildings. *BioResources* [Internet]. 2019 [cited 2021 Jan 27];14:7247–65. Available from: [https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes\\_14\\_3\\_7247\\_Dolan\\_Design\\_Process\\_Estimating\\_Crosslaminated](https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_14_3_7247_Dolan_Design_Process_Estimating_Crosslaminated)
3. Espinoza O, Buehlmann U. Cross-Laminated Timber in the USA: Opportunity for Hardwoods? *Curr For Reports* [Internet]. Springer International Publishing; 2018 [cited 2021 Jan 27];4:1–12. Available from: <https://doi.org/10.1007/s40725-018-0071-x>
4. Hindman DP, Bouldin JC. Mechanical Properties of Southern Pine Cross-Laminated Timber. *J Mater Civ Eng* [Internet]. American Society of Civil Engineers (ASCE); 2015 [cited 2021 Jan 27];27:04014251. Available from: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0001203>
5. Espinoza O, Trujillo VR, Laguarda Mallo MF, Buehlmann U. Cross-laminated timber: Status and research needs in Europe. *BioResources* [Internet]. 2016 [cited 2021 Jan 27];11:281–95. Available from: <https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/8002>
6. Giaccu GF, Meloni D, Valdès M, Fragiaco M. dynamic determination of the modulus of elasticity of maritime pine cross-laminated panels using vibration methods. *WIT Trans Ecol Environ* [Internet]. WITPress; 2017 [cited 2021 Jan 27]. p. 571–9. Available from: [www.witpress.com](http://www.witpress.com),
7. Izzi M, Casagrande D, Bezzi S, Pasca D, Follesa M, Tomasi R. Seismic behaviour of Cross-Laminated Timber structures: A state-of-the-art review. *Eng Struct* [Internet]. Elsevier Ltd; 2018 [cited 2020 May 13];170:42–52. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141029617338361>
8. Jing L, Hongpeng X, Xiabin G, Di Y. Technical advantages and limitations of cross-laminated timber high-rise buildings. *Urban Archit* [Internet]. 2017 [cited 2021 Jan 27];17:7. Available from: [https://en.cnki.com.cn/Article\\_en/CJFDTotol-JZCS201714007.htm](https://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTotol-JZCS201714007.htm)
9. Klippel M, Schmid J. Design of Cross-Laminated Timber in Fire. *Struct Eng Int* [Internet]. Int. Assoc. for Bridge and Structural Eng. Eth-Honggerberg; 2017 [cited 2021 Jan 27];27:224–30. Available from: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.2749/101686617X14881932436096>
10. Cappellazzi J, Konkler MJ, Sinha A, Morrell JJ. Potential for decay in mass timber elements: A review of the



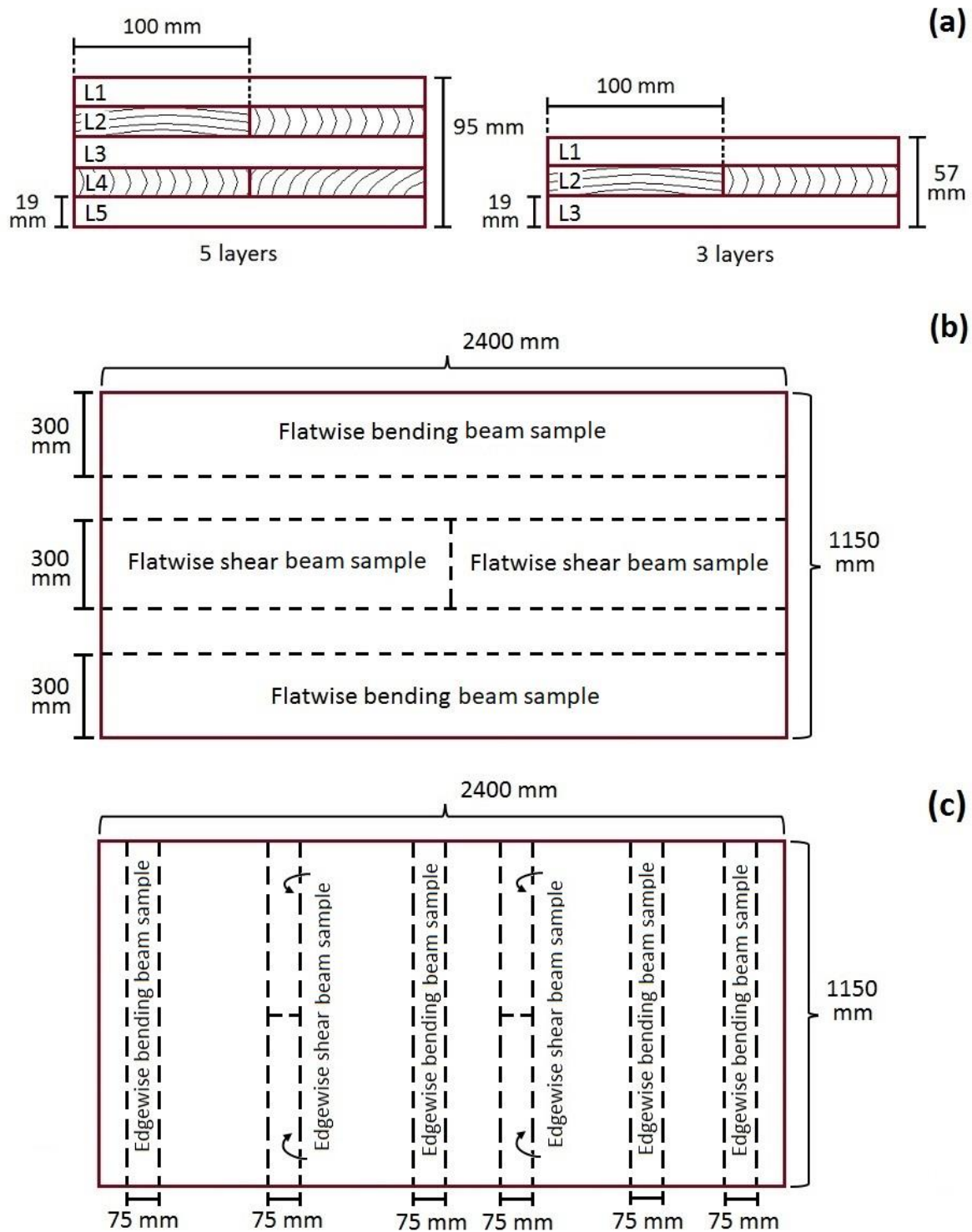
- risks and identifying possible solutions. *Wood Mater Sci Eng* [Internet]. Taylor and Francis Ltd.; 2020 [cited 2021 Jan 27];15:351–60. Available from: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17480272.2020.1720804>
11. Muszynski L, Hansen E, Fernando S, Schwarzmann G, Rainer J. Insights into the global cross-laminated timber industry. *Bioprod Bus* [Internet]. 2017 [cited 2021 Jan 27];2:77–92. Available from: <https://doi.org/10.22382/bpb-2017-008>
  12. Cherry R, Manalo A, Karunasena W, Stringer G. Out-of-grade sawn pine: A state-of-the-art review on challenges and new opportunities in cross laminated timber (CLT) [Internet]. *Constr. Build. Mater.* Elsevier Ltd; 2019 [cited 2021 Jan 27]. p. 858–68. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061819307925>
  13. Pei S, van de Lindt JW, Popovski M, Berman JW, Dolan JD, Ricles J, et al. Cross-Laminated Timber for Seismic Regions: Progress and Challenges for Research and Implementation. *J Struct Eng* [Internet]. American Society of Civil Engineers (ASCE); 2016 [cited 2021 Jan 28];142:E2514001. Available from: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29ST.1943-541X.0001192>
  14. APA. ANSI/APA PRG 320: Standard for performance rated cross-laminated timber [Internet]. *Am. Natl. Stand.* 2018 [cited 2021 Jan 30]. p. 40. Available from: <https://www.apawood.org/ansi-apa-prg-320>
  15. Fink G, Kohler J, Brandner R. Application of European design principles to cross laminated timber. *Eng Struct* [Internet]. Elsevier Ltd; 2018 [cited 2021 Jan 27];171:934–43. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141029617340993>
  16. Adhikari S, Quesada H, Bond B, Hammett T. Potential of Hardwood Lumber in Cross Laminated Timber in North America : A CLT Manufacturer ' s Perspective. *Mass Timber Constr J* [Internet]. 2020 [cited 2021 Jan 27];3:1–9. Available from: [www.masstimerconstructionjournal.com](http://www.masstimerconstructionjournal.com)
  17. Corpataux L, Okuda S, Kua HW. Panel and plate properties of Cross-laminated timber (CLT) with tropical fast-growing timber species in compliance with Eurocode 5. *Constr Build Mater* [Internet]. Elsevier Ltd; 2020 [cited 2021 Jan 27];261:119672. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061820316779>
  18. Latib HA, Cheong LW, Halis R, Mohamad Kasim MR, Yi LY, Ratnasingam J, et al. The prospects of wooden building construction in Malaysia: Current state of affairs. *BioResources* [Internet]. 2019 [cited 2021 Jan 27];14:9840–52. Available from: [https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes\\_14\\_4\\_9840\\_Ab\\_Latib\\_Wooden\\_Building\\_Construction](https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_14_4_9840_Ab_Latib_Wooden_Building_Construction)
  19. Oliveira GL, de Oliveira FL, Brazolin S. Wood preservation for preventing biodeterioration of Cross Laminated Timber (CLT) panels assembled in tropical locations. *Procedia Struct Integr* [Internet]. Elsevier B.V.; 2018 [cited 2021 Jan 28];11:242–9. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2452321618301331>
  20. Nunes G, de Melo Moura JD, Güths S, Atem C, Giglio T. Thermo-energetic performance of wooden dwellings: Benefits of cross-laminated timber in Brazilian climates. *J Build Eng* [Internet]. Elsevier Ltd; 2020 [cited 2021 Jan 27];32:101468. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352710220302692>
  21. Adnan NA, Md Tahir P, Husain H, Lee SH, Anwar Uyup MK, Mat Arip MN, et al. Effect of ACQ treatment on surface quality and bonding performance of four Malaysian hardwoods and cross laminated timber (CLT). *Eur J Wood Wood Prod* [Internet]. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH; 2020 [cited 2021 Jan 27];1–



15. Available from: <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01609-7>
22. Mohd Yusof N, Md Tahir P, Lee SH, Khan MA, Mohammad Suffian James R. Mechanical and physical properties of Cross-Laminated Timber made from *Acacia mangium* wood as function of adhesive types. *J Wood Sci* [Internet]. Springer Tokyo; 2019 [cited 2021 Jan 27];65:20. Available from: <https://link.springer.com/articles/10.1186/s10086-019-1799-z>
23. Byeon JW, Kim TH, Yang JK, Byeon HS, Park HM. Static bending performances of cross-laminated wood panels made with tropical and temperate woods. *J Korean Wood Sci Technol* [Internet]. Korean Society of Wood Science Technology; 2018 [cited 2021 Jan 27];46:726–34. Available from: <https://doi.org/10.5658/WOOD.2018.46.6.726>
24. Liao Y, Tu D, Zhou J, Zhou H, Yun H, Gu J, et al. Feasibility of manufacturing cross-laminated timber using fast-grown small diameter eucalyptus lumbers. *Constr Build Mater* [Internet]. Elsevier Ltd; 2017 [cited 2021 Jan 27];132:508–15. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061816319249>
25. Moya R, Bond B, Quesada H. A review of heartwood properties of *Tectona grandis* trees from fast-growth plantations. *Wood Sci Technol*. 2014;48.
26. Moya R, Berrocal A, Rodriguez-Solis M, Muñoz F. Effect of steam-drying treatment on moisture content, drying rate, color, and drying defects in juvenile wood of *Tectona grandis* from fast-growth plantations. *Dry Technol*. 2017;
27. Rivera-Tenorio M, Moya R. Stress, displacement joints of *Gmelina arborea* and *tectona grandis* wood with metal plates, screws and nails for use in timber truss connections. *Cerne*. 2019;25.
28. Rivera-Tenorio M, Moya R, Navarro-Mora Á. Wooden trusses using metal plate connections and fabricated with *Gmelina arborea*, *Tectona grandis* and *Cupressus lusitanica* timber from forest plantations. *J Indian Acad Wood Sci* [Internet]. Springer; 2020 [cited 2021 Jan 28];17:183–94. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13196-020-00271-z>
29. Leiva-Leiva T, Moya R, Navarro-Mora A. Model calibration of prefabricated timber wall frames made of *Hieronyma alchorneoides* and *Gmelina Arborea* Timber Using Nail and Screw Fasteners. *Drv Ind* [Internet]. Journal Drvna Industrija; 2018 [cited 2020 May 18];69:3–12. Available from: <https://hrcak.srce.hr/196921>
30. Triwibowo D, Sejati PS, Gopar M, Sudarmanto S, Akbar F, Purnomo D, et al. Karakteristik Cross Laminated Timber (CLT) dari Kayu Jati Platinum Hasil Penjarangan dan Limbah Batang Kelapa Sawit (Characteristic of Cross Laminated Timber (CLT) from Thinned Platinum Teak and Oil Palm Stem Waste). *J Sylva Lestari* [Internet]. Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Universitas Lampung; 2020 [cited 2021 Jan 28];8:340. Available from: <https://jurnal.fp.unila.ac.id/index.php/JHT/article/view/3901>
31. Moya R, Tenorio C, Muñoz F. Ultrasound velocity mapping to evaluate gluing quality in CLT panels from plantation wood species. *Wood Sci Technol*. 2021;
32. ASTM. Standard test methods for direct moisture content measurement of wood and wood-based materials. Materials ASFT, editor. *Annu B ASTM Stand Vol 410* [Internet]. West Conshohocken, Pennsylvania, USA: American Society For Testing and Materials; 2016 [cited 2019 Aug 10];ASTM D4442. Available from: <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?D4442-16>
33. ASTM. Standard test methods for evaluating properties of wood-based fiber and particle panel materials. *Annu*

- B ASTM Stand Vol 410 [Internet]. West Conshohocken, PA, USA; 2020 [cited 2021 Jan 30];D1037-12(2):32. Available from: [https://compass.astm.org/EDIT/html\\_annot.cgi?D1037+12\(2020\)](https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?D1037+12(2020))
34. AITC. Test methods for structural glued laminated timber: Am Inst Timber Constr [Internet]. Portland, OR, USA; 2007;T110-Cycli:19–21. Available from: [http://aitc-glulam.org/wp-content/uploads/Manufacturing\\_Standards/AITC-Test-Methods-for-Structural-Glulam\\_2007.pdf](http://aitc-glulam.org/wp-content/uploads/Manufacturing_Standards/AITC-Test-Methods-for-Structural-Glulam_2007.pdf)
35. ASTM. Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes. ASTM D198-09. 2014;1–27.
36. ASTM (American Society for Testing and Materials). Standard test methods for mechanical properties of lumber and wood-base structural material. ASTM D4761-19. 2019;Volume 4.1:9.
37. ASTM. Standard test method for strength properties of adhesive bonds in shear by compression loading. Annu B ASTM Stand Vol 410. West Conshohocken, PA, USA; 2013;ASTM D905-:5.
38. Moya RR, Muñoz FA. Wet pockets in kiln-dried Gmelina arborea lumber. *J Trop For Sci.* 2008;20.
39. Rindler A, Vay O, Hansmann C, Müller U. Dimensional stability of multi-layered wood-based panels: a review. *Wood Sci Technol* [Internet]. Springer Verlag; 2017 [cited 2021 Jan 28];51:969–96. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00226-017-0940-7>
40. CEN. Timber structures - Cross laminated timber - Requirement. EN 163512015. 2015;15.
41. Nairn JA. Cross laminated timber properties including effects of non-glued edges and additional cracks. *Eur J Wood Wood Prod.* Springer Verlag; 2017;75:973–83.
42. Brandner R, Flatscher G, Ringhofer A, Schickhofer G, Thiel A. Cross laminated timber (CLT): overview and development. *Eur J Wood Wood Prod* [Internet]. Springer Verlag; 2016 [cited 2020 May 13];74:331–51. Available from: <http://link.springer.com/10.1007/s00107-015-0999-5>
43. Corpataux L, Muthukrishnan S, Kua H, Okuda S, Harn Wei K. Cross-laminated timber with renewable, fast-growing tropical species in southeast Asia. 2018 [cited 2021 Jan 28]. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/332961754>
44. Saavedra Flores EI, Ajaj RM, Dayyani I, Chandra Y, Das R. Multi-scale model updating for the mechanical properties of cross-laminated timber. *Comput Struct* [Internet]. Elsevier Ltd; 2016 [cited 2021 Jan 28];177:83–90. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0045794916308574>
45. Brandner R, Dietsch P, Dröscher J, Schulte-Wrede M, Kreuzinger H, Sieder M. Cross laminated timber (CLT) diaphragms under shear: Test configuration, properties and design. *Constr Build Mater* [Internet]. Elsevier Ltd; 2017 [cited 2021 Jan 27];147:312–27. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061817308036>
46. Crovella P, Smith W, Bartczak J. Experimental verification of shear analogy approach to predict bending stiffness for softwood and hardwood cross-laminated timber panels. *Constr Build Mater* [Internet]. Elsevier Ltd; 2019 [cited 2021 Jan 28];229:116895. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061819323335>
47. Navaratnam S, Christopher PB, Ngo T, Le TV. Bending and shear performance of Australian Radiata pine cross-laminated timber. *Constr Build Mater* [Internet]. Elsevier Ltd; 2020 [cited 2021 Jan 27];232:117215. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061819326674>
48. Navaratnam S, Ngo T, Christopher P, Linforth S. The use of digital image correlation for identifying failure

- characteristics of cross-laminated timber under transverse loading. Measurement [Internet]. Elsevier B.V.; 2020 [cited 2021 Jan 27];154:107502. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263224120300397>
49. Wang Z, Zhou J, Dong W, Yao Y, Gong M. Influence of technical characteristics on the rolling shear properties of cross laminated timber by modified planar shear tests. Maderas Cienc y Tecnol [Internet]. Universidade Federal de Sao Carlos; 2018 [cited 2021 Jan 28];20:0–0. Available from: [https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-221X2018000300469&lng=es&nrm=iso&tlng=n](https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-221X2018000300469&lng=es&nrm=iso&tlng=n)
50. Oh J-K, Lee J-J, Hong J-P. Prediction of compressive strength of cross-laminated timber panel. J Wood Sci [Internet]. Springer-Verlag Tokyo; 2015 [cited 2021 Jan 30];61:28–34. Available from: <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.springer-fcb3daf3-f727-39ac-a34c-07f0fb0fdc18>
51. Wiesner F, Bisby L. The structural capacity of laminated timber compression elements in fire: A meta-analysis. Fire Saf J [Internet]. Elsevier Ltd; 2019 [cited 2020 May 13];107:114–25. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0379711218301759>
52. Steiger R, Gülzow A, Czaderski C, Howald MT, Niemz P. 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 Wood Prod [Internet]. Springer; 2012 [cited 2021 Feb 2];70:141–53. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00107-011-0521-7>
53. Gong Y, Liu F, Tian Z, Wu G, Ren H, Guan C. Evaluation of mechanical properties of cross-laminated timber with different lay-ups using Japanese larch. J Renew Mater. Tech Science Press; 2019;7:941–56.
54. Franzoni L, Lebée A, Lyon F, Foret G. Influence of orientation and number of layers on the elastic response and failure modes on CLT floors: modeling and parameter studies. Eur J Wood Wood Prod [Internet]. Springer Verlag; 2016 [cited 2021 Feb 2];74:671–84. Available from: <https://link.springer-com.ezproxy.itcr.ac.cr/article/10.1007/s00107-016-1038-x>
55. Gaspar F, Cruz H, Gomes A. Evaluation of glue line shear strength of laminated timber structures using block and core type specimens. Eur J Wood Wood Prod. Springer Verlag; 2018;76:413–25.
56. Yusoh AS, Md Tahir P, Anwar Uyup MK, Lee SH, Husain H, Khaidzir MO. Effect of wood species, clamping pressure and glue spread rate on the bonding properties of cross-laminated timber (CLT) manufactured from tropical hardwoods. Constr Build Mater [Internet]. Elsevier Ltd; 2020 [cited 2021 Feb 4];273:121721. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061820337259>

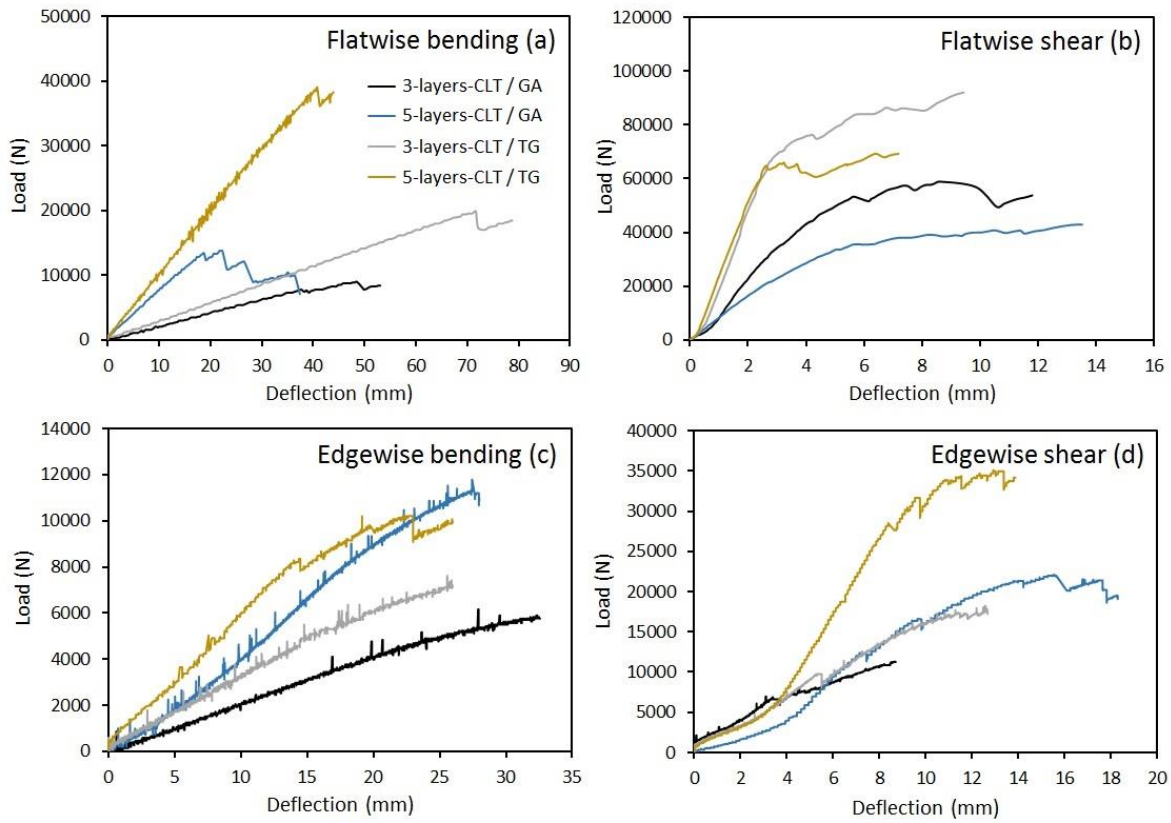


**Fig. 1.**

Configurations of the 5- and 3-layer CLT panels (a) and the flatwise (b) and edgewise (c) sampling method used for the evaluation of the physical and mechanical properties.



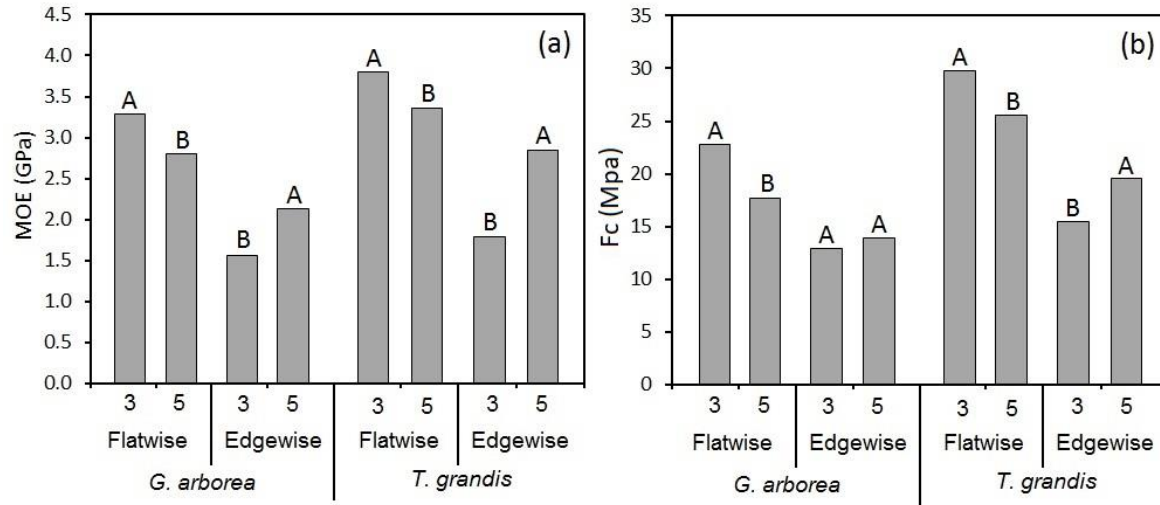
**Fig.**  
**2.**



Load vs deflection plots for flatwise bending (a) and shear (b), and edgewise bending (c) and shear (d) for the 3- and 5-layer CLT panels of both species.



**Fig. 3.** Failures in flexure test: tension (a) and delamination (b) for the 3- and 5-layer CLT panels of the two species.



**Fig. 4.** MOE (a) and Fc (b) parameters for compression parallel to the grain test for the 3- and 5-layer CLT panels of the two species.

Note: different letters between treatments means that there are statistical differences (P-value<0.05)



**Fig. 5.** Failures in compression parallel to the grain test: shearing (a), splitting (b) and crushing (c) for the 3- and 5-layer CLT panels of the two species.

Table 1. Density and moisture content parameters for the CLT panels of the two species.

Species	Physical Property	Configurations	
		3-layer CLT panels	5-layer CLT panels
<i>G. arborea</i>	Density (g/cm <sup>3</sup> )	0.48 <sup>A</sup> (0.45 – 0.51)	0.49 <sup>A</sup> (0.46 – 0.52)
	Moisture content (%)	12.34 <sup>A</sup> (10.85 – 13.79)	10.93 <sup>B</sup> (9.39 – 12.30)
	Water absorption (%)	8.61 <sup>A</sup> (6.90 – 10.60)	8.12 <sup>A</sup> (5.25 – 10.82)
	Delamination (%)	53.25 <sup>A</sup> (8.93 – 93.53)	66.36 <sup>A</sup> (18.70 – 88.34)
<i>T. grandis</i>	Density (g/cm <sup>3</sup> )	0.60 <sup>A</sup> (0.57 – 0.63)	0.60 <sup>A</sup> (0.57 – 0.63)
	Moisture content (%)	10.13 <sup>A</sup> (9.45 – 10.91)	10.21 <sup>A</sup> (9.05 – 11.68)
	Water absorption (%)	8.90 <sup>A</sup> (6.08 – 10.76)	9.36 <sup>A</sup> (7.73 – 12.37)
	Delamination (%)	51.39 <sup>A</sup> (16.24 – 100.00)	61.98 <sup>A</sup> (29.42 – 88.68)

Legend: different letters between configurations means that there are statistical differences (P-value<0.05). Values in parentheses correspond to minimum and maximum values.



Table 2. Flexure test parameters for the 3- and 5-layer CLT panels of the two species.

Species	CLT orientation	CLT panel configuration	EI (N-mm <sup>2</sup> x 10 <sup>10</sup> )	Fb (MPa)	Fv (MPa)
<i>G. arborea</i>	Flatwise	3-layers	3.79 <sup>B</sup> (0.27)	18.26 <sup>A</sup> (5.30)	2.44 <sup>A</sup> (0.36)
		5-layers	13.30 <sup>A</sup> (1.55)	11.78 <sup>B</sup> (1.93)	1.03 <sup>B</sup> (0.21)
	Edgewise	3-layers	0.51 <sup>B</sup> (1.41)	23.40 <sup>A</sup> (5.53)	1.75 <sup>A</sup> (0.50)
		5-layers	1.05 <sup>A</sup> (0.17)	15.59 <sup>B</sup> (4.31)	2.06 <sup>A</sup> (0.25)
<i>T. grandis</i>	Flatwise	3-layers	5.57 <sup>B</sup> (0.53)	44.81 <sup>A</sup> (8.82)	3.53 <sup>A</sup> (0.51)
		5-layers	19.00 <sup>A</sup> (0.70)	26.77 <sup>B</sup> (3.63)	1.69 <sup>B</sup> (0.24)
	Edgewise	3-layers	0.62 <sup>B</sup> (0.15)	27.87 <sup>A</sup> (8.76)	2.63 <sup>A</sup> (0.83)
		5-layers	1.30 <sup>A</sup> (0.30)	17.19 <sup>B</sup> (5.57)	3.26 <sup>A</sup> (0.48)

Note: values in parentheses correspond to the standard deviation. Different letters between configurations means that there are statistical differences (P-value<0.05)

Table 3. Maximum stress in glue-line shear for the 3- and 5- layer CLT panels of the two species.

Specie	Direction loading application	CLT panel configurations	Maximum stress (MPa)
<i>G. arborea</i>	Flatwise	3	3.44 <sup>A</sup> (1.53)
		5	2.45 <sup>A</sup> (1.13)
	Edgewise	3	2.30 <sup>A</sup> (0.72)
		5	1.79 <sup>A</sup> (1.09)
<i>T. grandis</i>	Flatwise	3	4.19 <sup>A</sup> (1.34)
		5	4.53 <sup>A</sup> (1.52)
	Edgewise	3	4.42 <sup>A</sup> (1.49)
		5	3.31 <sup>A</sup> (1.66)

Note: values in parentheses correspond to the standard deviation. Different letters between configurations means that there are statistical differences (P-value<0.05).

## Artículo 3.

---

### PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE TABLEROS CLT USANDO *Tectona grandis* L.F. Y *Gmelina arborea* ROXB., PROCEDENTE DE PLANTACIONES FORESTALES, COSTA RICA.

*José David Sánchez-Machado*

Programa Maestría Ciencias Forestales

Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica

E-mail: [d.sanchez0914@gmail.com](mailto:d.sanchez0914@gmail.com)

*Freddy Muñoz-Acosta\**

Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica

Apartado 159-7050, Cartago, Costa Rica

E-mail: [fmunoz@tec.ac.cr](mailto:fmunoz@tec.ac.cr)

*Róger Moya-Roque*

Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica

Apartado 159-7050, Cartago, Costa Rica

E-mail: [rmoya@tec.ac.cr](mailto:rmoya@tec.ac.cr)

*Carolina Tenorio-Monge*

Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica

Apartado 159-7050, Cartago, Costa Rica

E-mail: [ctenorio@tec.ac.cr](mailto:ctenorio@tec.ac.cr)

\* Corresponding author

(enviado, 17 febrero 2021)

**REVISTA FORESTAL MESOAMERICANA KURU (RFMK)**

*Indexada en: SciELO, DOAJ, LATINDEX, CiteFactor, Dialnet, REDIB, DRIJ, MIAR,  
PERIODICA, OAJI, Actualidad Iberoamericana  
ISI Imapct Factor (IIF): 1,956*

Cartago, 18 de febrero 2021

Respetados autores:

José David Sánchez-Machado  
Freddy Muñoz-Acosta  
Roger Moya-Roque  
Carolina Tenorio-Monge

Hemos recibido su artículo titulado:

**Propiedades físico-mecánicas de tableros CLT usando *Tectona grandis* L.f. y *Gmelina arborea* Roxb., procedente de plantaciones forestales, Costa Rica.**

**El mismo será sometido inmediatamente a los procedimientos de revisión establecidos por la Revista Forestal Mesoamericana Kurú. Oportunamente le enviaremos las resoluciones.**

Le agradecemos mucho nos seleccionara para difundir los resultados de sus investigaciones. Muy atentamente,



Ing. Dorian Carvajal Vanegas  
Escuela de Ingeniería Forestal  
Revista forestal Mesoamericana Kurú,  
Editor

**Propiedades físico-mecánicas de tableros CLT usando *Tectona grandis* L.f. y *Gmelina arborea* Roxb., procedente de plantaciones forestales, Costa Rica.**

**Physical-mechanical properties of CLT using *Tectona grandis* L.f. and *Gmelina arborea* Roxb., from forest plantations, Costa Rica.**

José David Sánchez-Machado<sup>1</sup>  
Freddy Muñoz-Acosta<sup>2\*</sup>  
Roger Moya-Roque<sup>3</sup>  
Carolina Tenorio-Monge<sup>4</sup>

**Resumen**

Se determinaron propiedades físico-mecánicas para caracterizar tableros contralaminados (CLT) de tres capas, elaborados con madera de *Tectona grandis* y *Gmelina arborea*, procedentes de plantaciones forestales. Se usaron dos tipos de adhesivo, emulsión de polímero de isocianato (EPI) y acetato vinílico pre-catalizado mejorado con 3% de nanoarcilla (PVA-na) y dos tratamientos para activar superficie de adhesión: lijado y acetona. Los resultados mostraron que tanto la densidad como las propiedades mecánicas de los tableros CLT con *T. grandis* fue mayor que para el tablero CLT con madera de *G. arborea*. Aplicando ambos adhesivos (EPI y PVA-na) y ambos tratamientos de activación superficial (lijado y acetona) el tablero CLT con *T. grandis* obtuvo el mejor comportamiento mecánico comparado con el tablero CLT con madera de *G. arborea*. Sin embargo, los tableros CLT contruidos usando ambas especies, cumplen con los rangos de propiedades mecánicas (esfuerzo en cortante, compresión paralela y densidad) establecidos por el estándar internacional ANSI/APA PRG 320 CLT.

Palabras clave: *Gmelina arborea*, *Tectona grandis*, plantación, Madera contralaminada, Isocianato, Acetato vinílico pre-catalizado.

**Abstract**

Physical-mechanical properties were determined to characterize three-layer CLT boards made with *Tectona grandis* and *Gmelina arborea* wood, from forest plantations. Two types of adhesive were used, isocyanate polymer emulsion (EPI) and pre-catalyzed vinyl acetate enhanced with 3% nanoclay (PVA-na) and two treatments to activate adhesion surface: sanding and acetone. The results showed that both the density and the mechanical properties of the CLT board with *T. grandis* were higher than for the CLT board with *G. arborea* wood. Applying both adhesives (EPI and PVA-na) and both surface activation treatments (sanding and acetone), the CLT board with *T. grandis* obtained the

---

<sup>1</sup> Programa Maestría en Ciencias Forestales, Escuela Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago-Costa Rica, [d.sanchez0914@gmail.com](mailto:d.sanchez0914@gmail.com)

<sup>2</sup> Escuela Ingeniería Forestal, Centro de Investigación en Innovación Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago-Costa Rica, [fmunoz@tec.ac.cr](mailto:fmunoz@tec.ac.cr) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6823-7379>

<sup>3</sup> Escuela Ingeniería Forestal, Centro de Investigación en Innovación Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago-Costa Rica, [rmoya@tec.ac.cr](mailto:rmoya@tec.ac.cr) ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-6201-8383>

<sup>4</sup> Escuela Ingeniería Forestal, Centro de Investigación en Innovación Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago-Costa Rica, [ctenorio@tec.ac.cr](mailto:ctenorio@tec.ac.cr) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2901-7079>

\*autor para correspondencia



best mechanical performance compared to the CLT board with *G. arborea* wood. However, CLT boards built using both species comply with the ranges of mechanical properties (shear stress, parallel compression, and density) established by the international standard ANSI / APA PRG 320 CLT.

Keywords: *Gmelina arborea*, *Tectona grandis*, plantation, CLT, Isocyanate, Pre-catalyzed vinyl acetate.

## Introducción

Dos de las especies maderables más reforestadas en Costa Rica son *Tectona grandis* L.f. (*T. grandis*) y *Gmelina arborea* Roxb. Ex. Sm (*G. arborea*), las que se introdujeron con fines diferentes a la obtención de madera aserrada [1], [2], [3]. Sin embargo, debido a opciones en el mercado internacional y políticas públicas, se fueron posicionando como materia prima para diferentes productos o usos [1], [4]. La madera de estas especies es apta para el cepillado y lijado [5,6] y además por sus propiedades mecánicas, son aptas para ser empleadas en elementos estructurales [1], [7].

La madera contralaminada (CLT por sus siglas en inglés) es un producto de ingeniería y tecnología de la madera, patentado a mediados de la década de los 90's en Europa [8]. Consiste en un panel rígido en forma de placa compuesto de un número de capas impares de 3 o más capas, en donde cada capa está hecha de tablas colocadas de forma paralela a la fibra y adyacentes entre sí y dispuestas entre capas de forma ortogonal o en ángulo de 90° con respecto a la dirección de la fibra, es un producto prefabricado y con altas prestaciones mecánicas [8-9]. Además, es un material con alta eficiencia energética, capacidad térmica, gran plasticidad arquitectónica, propiedades naturales y superficies agradables, por lo que los paneles CLT son muy utilizados en construcciones de alta demanda estructural y edificaciones de varios niveles en Europa, Canadá y Estados Unidos [8], [10].

Jeleč *et al.* [8] indica que el panel CLT es competitivo y atractivo por ser una estructura laminada más liviana que una estructura de acero o concreto. Además, permite construir elementos de hasta 40 m de longitud, brinda plasticidad y estética de diseño, presenta aislación térmica, alta resistencia química ante ambientes ácidos o alcalinos, tolera cierta exposición al fuego, mayor estabilidad dimensional respecto a la madera sólida, se optimiza el recurso disponible, entre otras ventajas. Por otra parte, Borgström y Fröbel [11], reportan que la resistencia, la rigidez y la gran capacidad de carga que tiene el CLT hace posible su aplicación como material estructural en construcciones de varios niveles.

La elaboración del CLT es un proceso tecnificado, motivo por el cual se deben cumplir un mínimo de requerimientos, los productores de CLT de la unión europea se acogen a la norma EN 16351 que desde el 2016 entro a regir sobre los requisitos de fabricación y control de la calidad [12], mientras que en Canadá y Estados Unidos la norma de validación de uso no obligatorio es la ANSI/APA PRG 320 [13].

En Costa Rica existe referencia de estudios con *G. arborea* y *T. grandis* en aplicaciones de madera estructural provenientes de plantaciones forestales [14], [15], [16], [17], [18], [19]. La *T. grandis* es la especie de mayor reforestación comercial en la zona tropical de

América Latina [20] mientras que la *G. arborea* constituye un 44% del consumo de madera transformada en tarimas, siendo ambas especies importantes en el consumo de madera de Costa Rica, pero muy limitado en usos estructurales [21]. Actualmente, en Costa Rica existen industrias con condiciones y capacidad para el desarrollo de nuevos productos y procesos con alta innovación e ingeniería usando madera procedente de plantación, los cuales pueden ser implementados en el sector construcción, específicamente en el desarrollo de elementos estructurales [22]. Por lo que estas industrias tienen la posibilidad de promover productos de madera de ingeniería, fabricados con especies de plantación y así no limitar su aplicación en estructuras para la construcción [23].

Sin embargo, a pesar de este importante desarrollo, no hay referencias acerca de la producción de tableros tipo CLT, ni edificaciones construidas con este elemento; razón que motiva a iniciar investigación y pruebas físico-mecánicas para caracterizar el comportamiento de estas dos especies aplicadas a la manufactura de un producto estructural y promover el uso de la madera procedente de plantaciones forestales como materia prima para nuevos productos no tradicionales, que al menos en la realidad del desarrollo forestal costarricense es innovador.

Entonces el presente trabajo tiene como objetivo evaluar el comportamiento físico (densidad, contenido de humedad y absorción de agua) y mecánico (módulo de elasticidad dinámico, resistencia a la compresión y resistencia de la línea de cola) en tableros de madera contralaminada tipo CLT en 3 capas, elaborados con dos tipos de adhesivo y dos tratamientos de la superficie a encolar (limpiado con acetona y lijado) fabricado con madera de *T. grandis* y *G. arborea*, procedente de plantaciones forestales.

## **Materiales y métodos**

### *Madera utilizada.*

Se utilizó madera de 25 x 100 x 1200 mm (espesor x ancho x longitud) sin cepillar de *T. grandis* y *G. arborea* procedente de plantaciones entre 10-20 años. La madera de *T. grandis* fue proveída por la empresa NovelTeak S.A., ubicada en el cantón de La Cruz, Guanacaste-Costa Rica, y la madera de *G. arborea* fue proveída por la empresa Maderas S&Q 2005 S.A., ubicada en el cantón de Pérez Zeledón, San José-Costa Rica. Ambos lotes la madera fueron secados al horno al 12%. Luego con la finalidad de garantizar un contenido de humedad uniforme, la madera fue acondicionada  $12\% \pm 3\%$  en una cámara de control a 65% de humedad relativa y una temperatura de 22°C por un periodo de 5-6 semanas. Luego, toda la madera fue dimensionada a 17 x 70 x 470 mm (espesor x ancho x longitud).

### *Adhesivos y tratamientos de activación superficial.*

Se emplearon dos adhesivos: Advantage EP-950A Franklin® sistema de emulsión de polímero de isocianato (EPI)+catalizador 200 Franklin® (isocianato polimérico) fabricado por Franklin Adhesives and Polymers (OHIO, USA) proveído por la empresa NovelTeak S.A. y acetato vinílico pre-catalizado Grip Bond 3 WA-505 fabricado por LANCO® (El Coyol Alajuela, Costa Rica) adquirido en el mercado nacional y mejorado con 3% de

nanoarcilla Dellite 43B®-DMBHT, fabricada por Laviosa-Chimica Mineraria, SpA (Livorno, Italia), que ha mostrado una mejoría en las propiedades de adhesión en las maderas tropicales [24], [25]. Las características de los adhesivos y nanoarcilla son las siguientes:

Advantage EP-950A, sistema de emulsión de polímero de isocianato (EPI) con base acrílico de dos partes, color blanco, Gravedad específica: 1,28, porcentaje de sólidos entre 46,0 – 57,8%, pH de 6,5 – 8,2 y viscosidad típica (cPs): 2 900 – 5 600. En tanto que, el adhesivo grip bond 3 es una resina de acetato polivinílico modificado con resinas alifáticas, color amarillo, porcentaje de sólidos de 48±2% (por peso) y porcentaje de sólidos 46±2% (por volumen), viscosidad: 4 000-5 000 cPs y tiempo de curado (al tacto) 30 minutos.

Las características físicas y químicas de la nanoarcilla son las siguientes: contenido de humedad 3%, contenido de impurezas < 1%, densidad 1.6 g·cm<sup>-3</sup>, tamaño de partículas 7-9 µm, modificado orgánicamente con amonio hidrogenado-dimetil-bencilo.

A la madera aserrada y seca se le aplicaron dos tratamientos superficiales diferentes a la cara a encolar para activar la superficie como se indica en el cuadro 1. La aplicación de acetona al 99,8% aplicada mediante brocha y el lijado de superficie de la madera con lija de grano # 80.

Cuadro 1. Adhesivos y tratamiento de la superficie usados para la fabricación de tableros contralaminados en madera *Tectona grandis* y *Gmelina arborea*

Tratamiento	Tipo de adhesivo	Tratamiento superficial	Nomenclatura
1	Advantage EP-950A	Limpieza con acetona	EPI-acetona
2	Advantage EP-950A	Lijado con lija # 80	EPI-lijado
3	Grip Bond 3 WA-505	Limpieza con acetona	PVA-na-acetona
4	Grip Bond 3 WA-505	Lijado con lija # 80	PVA-na-lijado

#### *Elaboración de tableros.*

Fueron construidos tableros de madera contralaminada (CLT) de 450 x 470 mm de largo de 3 capas, con un espesor de 51 mm. En total se construyeron 16 paneles, correspondientes a 2 paneles por cada tratamiento (2 especies x 2 tipo de adhesivo x 2 tratamientos de la superficie x 2 muestras). Luego de la preparación de la superficie fue aplicado el adhesivo con un gramaje de 200 gr·m<sup>-2</sup> de adhesivo por una cara. La aplicación de ambos adhesivos se realizó con una encoladora de rodillos Burkle modelo D-72250 (Robert Buerkle GmbH Co., Stuttgarter Strasse 123, Germany) previamente graduada al gramaje establecido. El prensado se realizó con una prensa hidráulica ITALPRESSE PL/9/SCF/8 (Italpresse S.A., Bergamo, Italy), a una presión de 8.0 MPa por un tiempo de 3600 s. Los paneles fueron cortados a una dimensión final de 430 x 430 mm por el espesor respectivo de cada panel, mantenido las condiciones de aproximadamente 12 % de contenido de humedad.

### Propiedades evaluadas

Las propiedades evaluadas en cada uno de los paneles fueron la densidad, el módulo de elasticidad dinámico (MOEd) fueron determinados en el panel completo de 430 mm x 430 mm. El porcentaje de contenido de humedad (%CH), porcentaje de absorción de humedad (%AH), esfuerzo máximo de resistencia al cortante y esfuerzo máximo en compresión paralela, se realizó con un muestreo posicional al azar en cada panel de CLT.

### Densidad

A cada panel dimensionado se le midió el espesor, ancho y largo para calcular el volumen y se determinó su masa, luego se calculó la densidad por medio de la relación masa/volumen.

### Módulo de elasticidad dinámico (MOEd)

Se determinó por la técnica no destructiva por ultrasonido, usando equipo electrónico SylvaTest DUO. Se midió el tiempo que tarda la onda ultrasónica para atravesar el espesor de cada CLT, de forma perpendicular a la capa externa en 10 puntos diferentes, para un total de 160 mediciones, es decir, 2 adhesivos x 2 tratamientos x 2 especies x 2 muestras x 10 mediciones (Fig. 1.A). Determinando el valor de tiempo y el espesor del tablero CLT se determina la velocidad del ultrasonido (Ecuación 1). Luego con la ecuación (2) se calcula el módulo de elasticidad dinámico (MOEd).

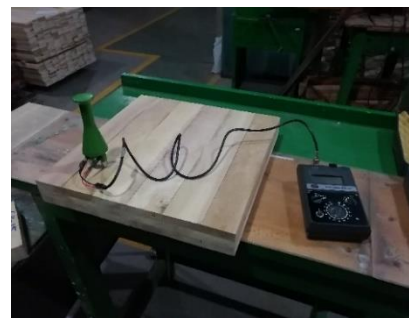
$$v = \frac{d}{t} \quad (1)$$

$$MOE_d = \frac{v^2 * \rho}{1\ 000\ 000} \quad (2)$$

Donde: v= velocidad de la señal de ultrasonido (m/s), d= espesor del tablero CLT (m), t= tiempo que tarda la onda en atravesar el espesor del tablero CLT (s),  $MOE_d$ : módulo de elasticidad dinámico (MPa),  $\rho$ : densidad del material ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) y v: velocidad de la señal de ultrasonido (m/s)



A.



B.

**Figura 1. A.** Procedimiento para medir la velocidad de onda ultrasónica con el equipo SILVATEST DUO en CLT/*T. grandis* perpendicular a la cara principal. **B.** Estimación del contenido de humedad con higrómetro en CLT/*G. arborea*

#### *Contenido de humedad (%CH)*

Este parámetro se determinó con un higrómetro Gann Hydromette HTR 300 (Fig. 1.B). Se midieron 6 puntos en total (3 puntos por cada cara principal del CLT). Luego se obtuvo un promedio para cada CLT por tratamiento.

#### *Porcentaje de absorción de humedad (AH)*

Este parámetro se determinó mediante el estándar ASTM D1037-12 [26], siendo adaptada para probetas de tableros CLT, la cual consistió en cuantificar la cantidad de humedad absorbida por las probetas durante 96 horas continuas de inmersión en agua a temperatura ambiente. Antes de iniciar y al finalizar la inmersión, se tomó el peso de cada probeta. El ensayo de AH se aplicó a 20 probetas en total (1 especie x 2 adhesivos x 2 tratamientos x 5 probetas).

#### *Esfuerzo máximo de resistencia al cortante*

Se realizó mediante la norma ASTM 905-08 [27], la velocidad de corte fue de 5 mm/min. El ensayo de cortante se realizó para 40 probetas en total (1 especie x 2 adhesivos x 2 tratamientos x 10 probetas).

#### *Esfuerzo máximo en compresión paralela*

Se realizó con el estándar UNE-EN 408 [28]. La carga se aplicó a una velocidad constante con cabezal de carga móvil con sistema de bloqueo para evitar desplazamientos angulares. La prueba compresión se realizó para 24 probetas en total (1 especie x 2 adhesivos x 2 tratamientos x 6 probetas).

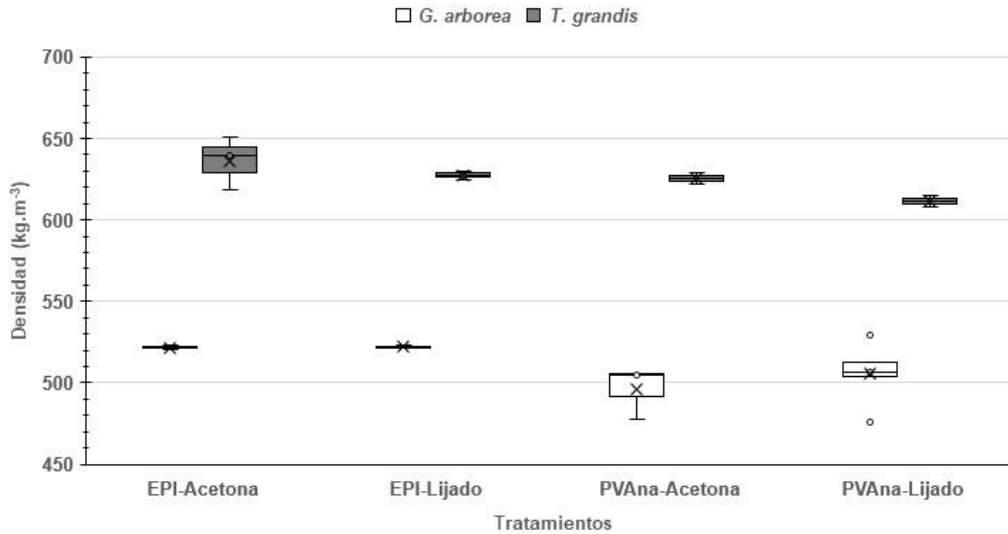
#### *Análisis de datos*

Los datos fueron recolectados y organizados con programa Microsoft Excel®. Luego, una comparación de medias con la prueba t de Student de dos muestras con un  $\alpha = 0,05$ , las comparaciones se realizaron entre los tratamientos superficiales para un mismo adhesivo y especie y entre adhesivos para un mismo tratamiento superficial y especie. Se utilizó el análisis de varianza (ANOVA) de un solo factor para comparar los valores de esfuerzos del MOEd, en cortante y compresión paralela. Se aplicó la prueba Tukey para mostrar las diferencias entre las medias cuando el valor de la prueba  $F$  fue significativo ( $\alpha: 0,05$ ). Los análisis estadísticos se realizaron con el programa estadístico Minitab, Inc. versión 18.1.

### **Resultados**

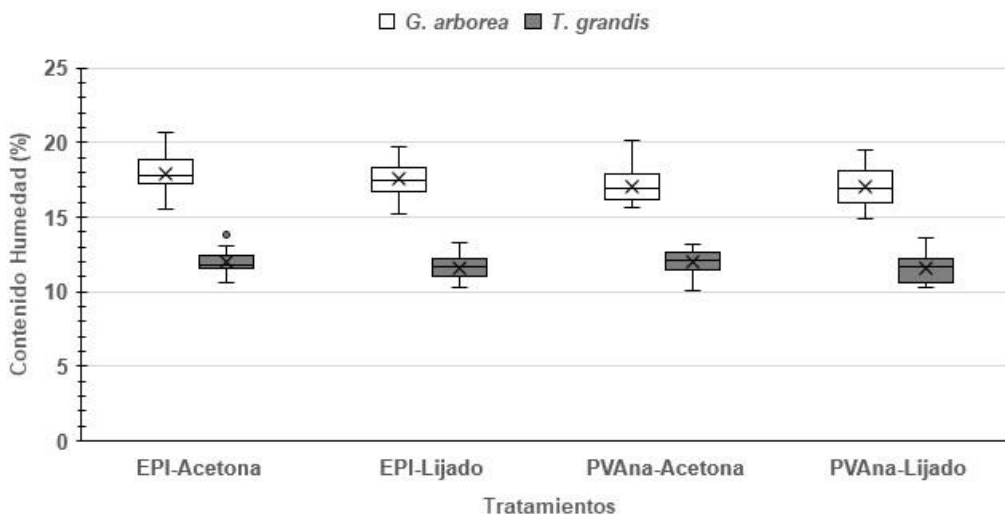
La mayor densidad se presentó en los tableros CLT construidos con madera de *T. grandis* tanto para ambos tratamientos de superficie y adhesivos usados. La variación promedio de la densidad para los tableros CLT con madera de *T. grandis* varía entre 611~636 kg·m<sup>-3</sup> y para los tableros CLT con madera de *G. arborea* la variación fue de 496~521 kg·m<sup>-3</sup> (Figura 2). La densidad del tablero CLT está más influenciada por la densidad propia de la especie que por el efecto del adhesivo o tratamiento superficial aplicado, no hay diferencia estadística entre una misma especie.





**Figura 2.** Valor promedio y variación de la densidad en tableros CLT de *T. grandis* y de *G. arborea* por tratamiento.

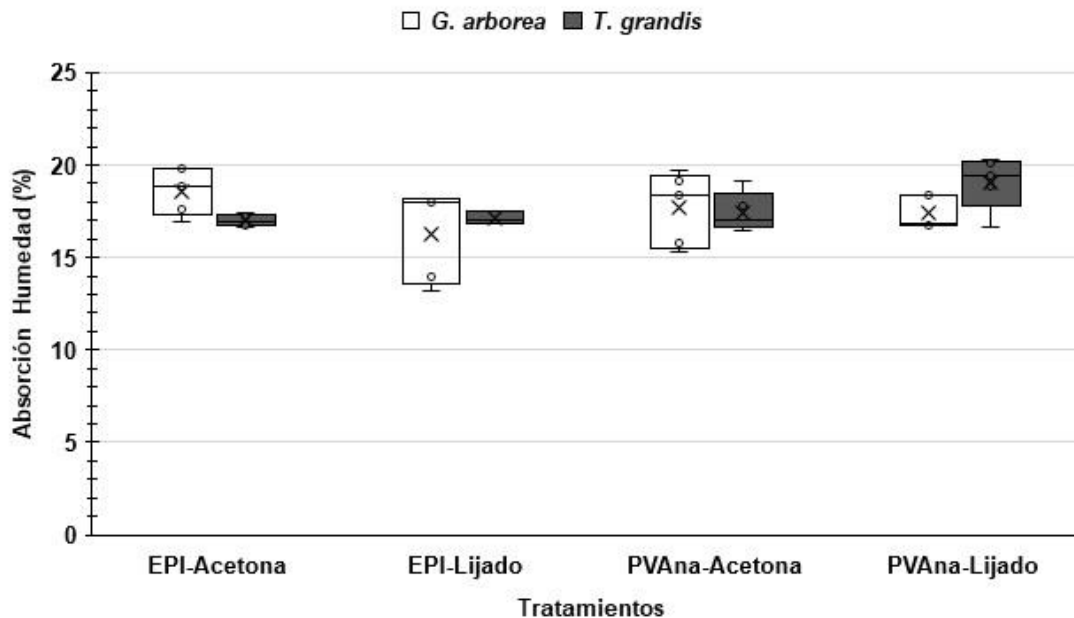
En relación con el valor promedio del %CH se encontró que este parámetro en CLT de *G. arborea* varió entre 17~18% y para los CLT con madera de *T. grandis* el %CH varió entre 11,6~12% (Figura 3), siendo estos valores estadísticamente diferente entre las especies. No se encontró para el % CH del CLT entre una misma especie una diferencia estadística asociada al efecto del adhesivo o tratamiento superficial aplicado.



**Figura 3.** Valor promedio y variación del contenido de humedad (%CH) en tableros CLT *T. grandis* y *G. arborea* por tratamiento.

En la figura 4 se muestran los valores promedio y variabilidad del %AH para 96 h de inmersión continua. Para los tableros CLT elaborados con madera de *T. grandis* el %AH varió entre 17~19% y los tableros CLT en *G. arborea* entre 15~19%, determinándose que

no existe diferencia estadística en los valores de %AH para el CLT con ambas especies. Además, no fue encontrada una diferencia estadística entre un CLT de la misma especie.



**Figura 4.** Valor promedio y variación de la absorción de humedad (%AH) a 96 h de inmersión continua en CLT en *T. grandis* y *G. arborea* por tratamiento.

Los valores promedio y parámetros estadísticos para módulo de elasticidad dinámico (MOEd), esfuerzo máximo en cortante y esfuerzo máximo en compresión paralela a la cara para tableros CLT en *T. grandis* y *G. arborea*, se muestran en el cuadro 2. En general, el CLT con *T. grandis* obtuvo el mejor desempeño mecánico.

Para el caso del CLT con *G. arborea*, se obtuvo diferencia estadística significativa debido a tratamiento superficial y adhesivo (cuadro 1) para:

- MOEd con todos los tratamientos.
- Esfuerzo en cortante solo con los tratamientos 1 y 2.
- Esfuerzo en compresión paralela solo con los tratamientos 3 y 4.

Para el caso del CLT con *T. grandis*, se obtuvo diferencia estadística significativa debido a tratamiento superficial y adhesivo (cuadro 1) para:

- MOEd solo con tratamientos 1 y 2.
- Esfuerzo en cortante todos los tratamientos.
- Esfuerzo en compresión paralela solo tratamientos 3 y 4.

**Cuadro 2.** Valor promedio y parámetros estadísticos comparativos de las propiedades mecánicas para tableros CLT con madera de *T. grandis* y *G. arborea*.

Adhesivo	Tratamiento superficial	<i>G. arborea</i>			<i>T. grandis</i>		
		Promedio	DE	%CV	Promedio	DE	%CV
<b>MOEd (MPa)</b>							
EPI	Acetona	<b>351,05<sup>C,1, α</sup></b>	38,15	10,87	<b>427,58<sup>C,1, α</sup></b>	228,55	53,45
	Lijado	<b>589,68<sup>B,2, α</sup></b>	73,90	12,53	<b>1361,70<sup>A,2, α</sup></b>	137,85	10,12
PVA-na	Acetona	<b>392,11<sup>C,1, α</sup></b>	146,44	37,35	<b>763,23<sup>B,1, β</sup></b>	138,46	18,14
	Lijado	<b>170,58<sup>D,2, β</sup></b>	112,13	65,74	<b>805,93<sup>B,1, β</sup></b>	124,05	15,39
<b>Esfuerzo en cortante (MPa)</b>							
EPI	Acetona	<b>2,24<sup>C,1, α</sup></b>	0,59	26,45	<b>4,32<sup>A,1, α</sup></b>	0,38	8,89
	Lijado	<b>3,75<sup>B,2, α</sup></b>	0,14	3,80	<b>3,96<sup>B,1, α</sup></b>	0,49	12,30
PVA-na	Acetona	<b>2,39<sup>C,1, α</sup></b>	0,24	10,23	<b>4,30<sup>A,1, α</sup></b>	0,43	9,98
	Lijado	<b>2,67<sup>C,2, β</sup></b>	0,22	8,37	<b>3,62<sup>B,2, α</sup></b>	0,53	14,68
<b>Esfuerzo en compresión paralela (MPa)</b>							
EPI	Acetona	<b>24,05<sup>C1, α</sup></b>	1,62	6,74	<b>40,82<sup>A,1, α</sup></b>	1,50	3,67
	Lijado	<b>25,44<sup>C,1, α</sup></b>	0,98	3,84	<b>40,10<sup>A,1, α</sup></b>	1,14	2,83
PVA-na	Acetona	<b>20,24<sup>E,1, β</sup></b>	0,55	2,72	<b>40,72<sup>A,1, α</sup></b>	1,74	4,28
	Lijado	<b>22,09<sup>D,2, β</sup></b>	0,32	1,45	<b>37,08<sup>B,2, β</sup></b>	0,99	2,45

DE= desviación estándar, CV= coeficiente de variación

Letras diferentes entre los tratamientos en cada prueba mecánica indica diferencia estadística significativa a 95% de confianza. Diferentes números entre tratamientos superficiales para un mismo adhesivo, significa medias estadísticamente diferentes (t-Student) a 95% de confianza. Diferentes letras griegas entre adhesivos para un mismo tratamiento superficial significan medias diferentes (t-Student) a 95% de confianza.

El mayor valor de MOEd se obtuvo con el CLT con *T. grandis* y tratamiento 2, el menor valor de MOEd se obtuvo con el CLT con *G. arborea* y tratamiento 4. El mayor valor para esfuerzo de cortante se obtuvo con el CLT de *T. grandis* y tratamiento 1, mientras que el menor esfuerzo en cortante con el CLT de *G. arborea* con tratamiento 1. El esfuerzo en compresión paralela fue mayor para CLT con *T. grandis* y tratamiento 1 y el menor para el CLT con *G. arborea* y tratamiento 3. En general, existe una tendencia que las propiedades incrementan su resistencia mecánica cuando se aplicó el adhesivo tipo EPI y el tratamiento superficial de lijado (cuadro 1 y 2) para los tableros CLT tanto en madera de *T. grandis* y *G. arborea*.

## Discusión

La densidad de la madera de *G. arborea* varía en el rango 480-560 kg·m<sup>-3</sup> [5], [29] y la densidad de la madera de *T. grandis*, de acuerdo con Moya Roque *et al.* [30], Rivero y Moya [31], varía en el rango 580-830 kg·m<sup>-3</sup>, mostrando así que la madera de *T. grandis* presenta mayor densidad y por lo tanto los materiales compuestos como el CLT obtendrán una mayor densidad como se reporta en la figura 2. La densidad de los tableros CLT de *T. grandis* es mayor que los de *G. arborea* por lo que es de esperar que el MOEd, los esfuerzos de cortante y compresión de los tableros CLT de *T. grandis* sean superiores, a los obtenidos con *G. arborea* (Cuadro 2), producto de la mayor densidad de la madera.

No obstante, en algunos productos o materiales compuestos este comportamiento no sigue esta tendencia. La densidad de productos laminados encolados con estas especies es variable, Tenorio *et al.* [32] encontraron que tableros de plywood y LVL a base de madera de *G. arborea* presentan una densidad entre 516~523 kg·m<sup>-3</sup>, rango de densidad similar al obtenido con el CLT con madera de *G. arborea* 476~529 kg·m<sup>-3</sup> (figura 1). En madera laminada encolada de *T. grandis* Aicher *et al.* [33] obtienen 587 kg·m<sup>-3</sup> densidad menor a la obtenida con el tablero CLT/*T. grandis* 607-650 kg·m<sup>-3</sup> (figura 1). En vigas Glulam, Chiniforush *et al.* [34] hallan que la densidad fue 779 kg·m<sup>-3</sup> densidad mayor a la obtenida con el tablero CLT/*T. grandis* de este estudio. En productos laminados de madera, las propiedades mecánicas generalmente se incrementan a mayor densidad [35].

Tenorio *et al.* [32] encuentran que tableros de plywood y LVL elaborados con madera de *G. arborea* tienen un AH a 24 h continuas de inmersión de 17,8 y 15,2%, respectivamente. En este estudio la AH a 96 h continuas de inmersión el CLT/ *G. arborea* obtiene un rango de entre 15,6 y 19,1%. Mientras que para el CLT/*T. grandis* la AH varía entre 17,2% y 19,7% (figura 4), siendo estos valores ligeramente similares entre ellos. Aunque el CLT es un producto contralaminado sigue conservando la cualidad higroscópica de la madera sólida [36], y el ambiente que le rodea influye en el intercambio del %CH del material, factor que debe preverse antes y durante la obra constructiva. EL CLT/*G. arborea*, presentó un rango mayor de variación de absorción de humedad, lo que indica que potencialmente sufrirá mayores cambios dimensionales que CLT/*T. grandis*. Acorde con lo mencionado por Han *et al.* [37] las variaciones de humedad en la madera provocan deformaciones y defectos en los paneles de CLT, en específico, contracciones en ancho y espesor, llegando a producir separación de láminas, por lo que existe la probabilidad de tener este tipo de problemas con los CLT/*G. arborea*.

Karlinasari *et al.* [29], Chauhan y Sethy [38] determinaron el MOEd mediante ultrasonido para madera sólida de *G. arborea* y *T. grandis*, respectivamente y concluyeron para ambas especies que el factor dominante que influyó en el MOEd fue la densidad de la especie. Resultado similar se obtuvo en este estudio con la caracterización de las propiedades mecánicas del tablero CLT, en donde el CLT construido con madera de *T. grandis* presentó mejor comportamiento mecánico que el CLT con madera *G. arborea* (cuadro 2), dado que la densidad determinada para el tablero CLT de *T. grandis* fue mayor a la del tablero CLT de *G. arborea* (figura 2). De acuerdo con Beall [39], es posible hacer comparaciones con productos compuestos de estas especies, ya que la propagación de la onda ultrasónica en productos compuestos es similar a madera sólida. Sin embargo,

debe considerarse que la onda ultrasónica medida en sentido longitudinal es mayor que la determinada en sentido transversal (tangencial o radial), esto porque la atenuación de la onda es mayor en sentido transversal que longitudinal debido a mayores espacios vacíos (lúmenes de la células o vasos), los cuales no se presenta con la misma frecuencia en sentido longitudinal [39]. Otra posible fuente de variación que influye en los valores del MOEd es el tipo de técnica utilizada para medir esta onda o bien la densidad de la madera [40], [41], [42].

El esfuerzo en cortante en productos de madera encolados está asociado a la resistencia de la línea de cola, para el caso de tableros CLT con *T. grandis* se obtuvo el mayor esfuerzo en cortante con un valor de 40,82 MPa con adhesivo tipo EPI y tratamiento con acetona (cuadro 2), al respecto, Moya [43] encontró que la resistencia de la línea de cola se ve positivamente afectada cuando se mejora la humectabilidad de la superficie de *T. grandis* con solventes polares como acetona, Sin embargo, Garro [44] identificó que hay diferencias significativas en la humectabilidad de la madera de *T. grandis* dependiendo de la orientación de corte, madera de corte radial posee mejor humectabilidad que madera con corte tangencial cuando se emplean solventes de origen alcohólico para activar la superficie a encolar. Por otra, parte, Lopes *et al.* [45] reportaron que el duramen de *T. grandis* presenta menor propiedad de humectabilidad que la albura, este se puede tener en cuenta dado que cada pieza de madera aserrada con la que se construyó cada capa del CLT presentó porcentajes de albura y duramen.

Comparando el comportamiento del CLT/*G. arborea* en la resistencia cortante (3,75 MPa con tratamiento EPI-lijado, cuadro 1) con otros materiales contralaminados, Kramer *et al.* [46] obtuvieron con CLT/Hybrid poplar un esfuerzo en cortante de 3,1 MPa. Por otra parte, Tenorio *et al.* [32] encontraron que el esfuerzo en cortante para tableros tipo plywood de *G. arborea* fue de 3,6 MPa, valores de esfuerzo en cortante muy similares al obtenido en el presente estudio con *G. arborea* (Cuadro 2).

Existen diferencias estadísticas significativas en el comportamiento mecánico al esfuerzo en cortante entre CLT/*T. grandis* y CLT/*G. arborea*, por influencia de la especie, adhesivo y tratamiento aplicado. Erniwati *et al.* [47] menciona que factores como la alta densidad y la cantidad de extractivos en la madera afectan negativamente la humectabilidad de la madera. Sin embargo, la figura 3 muestra que la densidad promedio del CLT de *T. grandis* es superior a la del CLT de *G. arborea* y el valor promedio para esfuerzo de cortante para CLT/*G. arborea* es inferior a CLT/*T. grandis*. De acuerdo con Yusoh *et al* [48], la resistencia en el esfuerzo cortante en la línea de cola es mayor con el incremento de la densidad de la madera, En este caso la madera de *T. grandis* tiene mayor densidad que la *G. arborea*, por lo que se tiene mayor resistencia en la línea de cola (cuadro 2).

El tratamiento con acetona mejora la humectabilidad de la madera de *T. grandis*, mientras que no fue tan efectivo para la madera de *G. arborea*, esto se puede asociar a la estructura química de los extractivos de cada especie y su afinidad química con la acetona. Razón por la cual, la acetona solo mejoró la adhesión en el CLT de *T. grandis* obteniendo mayor resistencia mecánica en la línea de cola comparada con el CLT con madera de *G. arborea* (Cuadro 1), esto concuerda con lo expuesto por Erniwati *et al.* [47]. Otros tratamientos como radiación con plasma [49] y ultravioleta [50] mejoran la



humectabilidad de la madera, pero que su aplicación ha sido poco estudiada en maderas de plantación de zonas tropicales.

El esfuerzo máximo en compresión paralela para CLT/*T. grandis* fue de 40,8 MPa y por su parte para CLT/*G. arborea* fue de 25,4 MPa (cuadro 1). Mohd Yusof *et al.* [51] encontraron para CLT/*Acacia mangium* un esfuerzo máximo en compresión paralela de 28,9 MPa. Por otra parte, Oh *et al.* [52] obtuvieron 38,7 MPa en compresión paralela para CLT/*Larix kaempferi*. Comparando el comportamiento en compresión paralela del CLT/*G. arborea* y CLT/*T. grandis* de este estudio, son comparables con otros resultados reportados en literatura, e indican que están dentro de los resultados típicos para este tipo de material, a pesar de ser comparados con CLT y otros productos manufacturados con otras especies y adhesivos diferentes.

Algunas normas europeas [12], [53] establecen requisitos, procedimientos para pruebas mecánicas, y valores de referencia para productos de madera encolada como el Glulam. Sin embargo, al estándar ANSI/APA PRG 320 CLT [13] y CLT Handbook [54] establecen algunos rangos para valores de resistencia en propiedades mecánicas para madera contralaminada CLT (cuadro 3).

**Cuadro 3.** Valores de propiedades mecánicas de los tableros CLT en madera de *T. grandis* y *G. arborea*, comparado con los de referencia según PRG 320 CLT.

Propiedad mecánica	CLT/ <i>G. arborea</i>	CLT/ <i>T. grandis</i>	PRG 320 CLT
Módulo de elasticidad MPa	170~590	428~1 362	6 205 ~11 720
Esfuerzo cortante (MPa)	2,2~3,8	3,6~4,3	2,4~3,9
Esfuerzo en compresión paralela (MPa)	20,2~25,4	37,1~40,8	6,2~23,5
Densidad (kg*m <sup>-3</sup> )	496~521	611~636	400~600

De conformidad con la comparación mostrada en el cuadro 2 se puede indicar que los CLT/*T. grandis* y *G. arborea* de este estudio cumplen los requerimientos y características de resistencia para los esfuerzos de compresión y cortante, así como también la densidad. Lo cual indica que las especies de plantación utilizadas en este estudio pueden posicionarse como materia prima con altas prestaciones para paneles comerciales tipo CLT.

Hay una tendencia general que a mayor espesor del CLT aumenta su rigidez mecánica aumentando su valor de MOE, Sikora *et al.* [55], indican que existe una buena correlación entre el espesor del CLT y las propiedades de resistencia y rigidez del panel. Considerando que el estándar ANSI/APA GPR 320 CLT clasifica por grados de acuerdo con un rango de espesor del CLT que varía entre 105~232 mm, mientras que el CLT construido en este estudio tuvo un espesor de 51 mm. Por lo que los resultados obtenidos para el MOE de este estudio no alcanzaron los requerimientos solicitados por el estándar ANSI/APA GPR 320 CLT.

## Conclusión

La manufactura de tableros CLT en configuración de tres capas fue posible usando las especies de plantación, *Tectona grandis* y *Gmelina arborea*. Lo que permitió caracterizar propiedades físico-mecánicas del material con diferentes tratamientos y adhesivos. Se ha discutido que la densidad influye en las propiedades mecánicas de un material, siendo la madera de *Tectona grandis* más densa que la madera de *Gmelina arborea*, los resultados de propiedades mecánicas para los CLT de este estudio confirman esa relación. Por lo tanto, aplicando ambos adhesivos (EPI y PVA-na) y ambos tratamientos de activación superficial (lijado y acetona) el tablero CLT con *T. grandis* obtuvo el mejor comportamiento mecánico comparado con el tablero CLT con madera de *G. arborea*. En particular el mayor valor de MOEd obtenido para CLT/*T. grandis*, se alcanzó con el adhesivo EPI y tratamiento de lijado, mientras que para los esfuerzos de cortante y compresión se obtuvo con el adhesivo EPI y tratamiento con acetona. Para el CLT con *G. arborea* el valor mayor de resistencia en MOEd, cortante y compresión se alcanzó con el adhesivo EPI y tratamiento de lijado en todos los casos. A pesar de que el tablero CLT con *T. grandis* supera en propiedades mecánicas al tablero CLT con *G. arborea*, es importante indicar que el tablero CLT con madera de *G. arborea* de este estudio cumple con los rangos de propiedades mecánicas (esfuerzo en cortante, compresión paralela y densidad) establecidos por el estándar internacional ANSI/APA PRG 320 CLT.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica por el apoyo financiero al proyecto VIE-1401-085, a la Dirección de Posgrado y Programa de Maestría en Ciencias Forestales por el financiamiento de beca y a las empresas NovelTeak Costa Rica S.A., Maderas S&Q 2005 S.A. y WASA por proveer las materias primas de este estudio.

## Referencias

- [1] Camino R, JP Morales La teca en América Latina, en Las plantaciones de teca en América Latina: mitos y realidades, R Camino, JP Morales, Eds. Turrialba, CATIE, 2013, pp30-42
- [2] R. Moya, "Gmelina arborea en Costa Rica", *Bois et forêts des tropiques*, vol. 279, no. 1, pp. 47-57, 2004.
- [3] F. Rojas, "Principales especies forestales en Costa Rica" (Nota técnica), *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, vol. 2, no. 4, pp. 5-4, 2005.
- [4] F. Rojas-Rodríguez, D. Arias-Aguilar, R. Moya-Roque, A. Meza-Montoya, O. Murillo-Gamboa y M. Arguedas, Manual para productores de melina *Gmelina arborea* en Costa Rica, Cartago, Costa Rica, 2004.
- [5] R. Moya-Roque y L. Leandro-Zúñiga, "Melina: *Gmelina arborea* Kunth. Verbenaceae. Ficha técnica 5", en Tecnología de madera de plantaciones forestales: Fichas técnicas. R. Moya, [et al]. (en línea), *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, vol. 7, nº 18-19, pp. 87-101, 2010.
- [6] R. Moya-Roque, F. Muñoz-Acosta y A. Berrocal-Jiménez, "Teca: *Tectona grandis* L.f. Verbenaceae. Ficha técnica 7, en Tecnología de madera de plantaciones forestales: Fichas técnicas. R. Moya R., [et al]. (en línea), *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, vol. 7, nº 18-19, pp. 117-131, 2010.

- [7] G. González-Trejos y R. Serrano-Montero, "Propiedades y utilización de la madera de melina (*Gmelina arborea* Roxb) procedente de árboles plantados en Costa Rica", *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, vol. 1, nº 1, pp. 77-86, 2012.
- [8] M. Jeleč, D. Varevac y V. Rajčić, "Cross-laminated timber (CLT) – a state of the art report", *GRAĐEVINAR*, vol. 70, pp. 75-95, 2018.
- [9] E. Karacabeyli y B. Douglas, *CLT handbook: Cross-Laminated Timber. US Edition*, FPIInnovations, 2012.
- [10] O. Horx-Strathern, C. Varga y G. Guntschnig, *The future of Timber Construction: CLT-Cross Laminated Timber. A study about changes, trends, and technologies of tomorrow*, ZukunftsInstitut GmbH, Vienna, 2017.
- [11] E. Borgström y J. Fröbel, *The CLT Handbook. CLT structures-Facts and planning*, Swedish Wood, Estocolmo, Suecia, 2019.
- [12] Asociación Española de Normalización (UNE), *UNE-EN 16351:2016. Estructuras de madera. Madera contralaminada. Requisitos*, Asociación Española de Normalización (UNE), Madrid, 2016.
- [13] The Engineered Wood Association (APA)-American National Standards Institute (ANSI), *ANSI/APA PRG 320-2019: Standard for Performance-Rated Cross-Laminated Timber*, The Engineered Wood Association (APA)-American National Standards Institute (ANSI), Georgia, 2019.
- [14] C. Tenorio-Monge, R. Moya-Roque y M. Carranza, "Vigas tipo I para la construcción civil fabricadas con madera de plantaciones de rápido crecimiento en Costa Rica", *Revista Tecnología en Marcha*, no. especial: Día internacional de la mujer, pp. 50-59, 2014.
- [15] R. Moya-Roque y G. Gonzáles-Beltrán, "Esfuerzos admisibles de diseño por grado estructural para nueve maderas de plantación de Costa Rica", *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, vol. 11, nº 26, pp. 1-11, 2013.
- [16] G. Gonzáles, R. Moya, F. Monge, R. Córdoba y J. Coto, "Evaluating the strength of finger-jointed lumber of *Gmelina arborea* in Costa Rica", *New Forests*, vol. 28, pp. 319-323, 2004.
- [17] R. Moya-Roque, C. Tenorio-Monge, M. Carranza-Solano, M. Saenz-Muñoz, Á. Navarro-Mora y V. Paniagua, "Diseño, resistencia y valores estructurales de cerchas prefabricadas con madera de plantación", Proyecto de Investigación (VIE-1401055). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, 2016.
- [18] R. Moya-Roque, C. Tenorio-M, D. Camacho-C, M. Carranza y F. Muñoz-A, "Determinación de los valores de esfuerzos estructurales para vigas de madera perfil Tipo I (Documento II)", Informe final de proyecto de investigación. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, 2011.
- [19] R. Moya-Roque, y G. Gonzáles-Trejos, "Las vigas laminadas estructurales: aspectos a considerar para su fabricación en Costa Rica", *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, vol. 3, nº 8, pp. 70-76, 2006.
- [20] A. Berrocal, R. Moya, M. Rodríguez-Solis, F. Muñoz, "Drying of plantation-grown *Tectona Grandis* wood with daily-controlled drying rate schedules", *Journal of Tropical Forest Science*, vol. 29, no. 1, pp. 69-79, 2017. <http://www.jstor.org/stable/44028276>
- [21] A. Barrantes, S. Ugalde, "Usos y aportes de la madera en Costa Rica: Estadísticas 2018 & precios 2019", *Oficina Nacional Forestal*, agosto, p. 44, 2018.

- [22] T. Leiva-Leiva, R. Moya, A. Navarro-Mora, "Model calibration of prefabricated timber wall frames made of *Hieronyma alchorneoides* and *Gmelina arborea* timber using nail and screw fasteners", *Drvna Industrija*, vol.69, no. 1, pp. 3-12, 2018. doi: 10.5552/drind.2018.1722
- [23] Y. Gong, F. Liu, Z. Tian, G. Wu, H. Ren, C. Guan, "Evaluation of mechanical properties of Cross-Laminated Timber with different Lay-ups using Japanese Larch", *Journal of Renewable Materials*, vol. 7, no. 10, pp. 941-956, 2019. doi: 10.32604/jrm.2019.07354
- [24] F. Muñoz, R. Moya, "Effect of urea formaldehyde resin modified with nano-clay on physical and mechanical properties of particleboards manufactured with wood from plantation species", *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, vol. 12, no. 5, pp. 1-11, 2018. <https://doi.org/10.1166/jbmb.2018.1796>
- [25] F. Muñoz, R. Moya, "Effect of nanoclay-treated UF resin on the physical and mechanical properties of plywood manufactured with wood from tropical fast growth plantations", *Maderas Ciencia & Tecnología*, vol. 20, no. 1, pp. 11-24, 2018. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2018005001202>
- [26] ASTM International, D1037-12, "Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials", *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2012.
- [27] ASTM International, ASTM D905-08, "Standard Test Method for Strength Properties of Adhesive Bonds in Shear by Compression Loading", *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2013.
- [28] Asociación Española de Normalización (UNE), UNE-EN 408, "Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas", *Asociación Española de Normalización (UNE)*, Madrid, 2011.
- [29] L. Karlinasari, M. E. Wahyuna, N. Nugroho, "Non-destructive ultrasonic testing method for determining bending strength properties of *Gmelina* wood (*Gmelina arborea*)", *Journal of Tropical Forest Science*, vol. 20, n° 2, pp. 99-104, 2008.
- [30] R. Moya Roque, F. Muñoz Acosta y A. Berrocal Jiménez, "Teca: *Tectona grandis* L.f. Verbenaceae. Ficha técnica 5. In Tecnología de madera de plantaciones forestales: Fichas técnicas. R. Moya., [et al]. (en línea)", *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, vol. 7, n° 18-19, pp. 117-131, 2010.
- [31] J. Rivero Moreno y R. Moya Roque, "Propiedades físico-mecánicas de la madera de *Tectona grandis* Linn. F. (teca), proveniente de una plantación de ocho años de edad en Cochabamba, Bolivia", *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, vol. 3, n° 9, pp. 50-63, 2006.
- [32] C. Tenorio, R. Moya y F. Muñoz, "Comparative study on physical and mechanical properties of laminated veneer lumber and plywood panels made of wood from fast-growing *Gmelina arborea* trees", *Journal of Wood Science*, vol. 57, pp. 134-139, 2011.
- [33] S. Aicher, Z. Ahmad y M. Hirsch, "Bond line shear strength and wood failure of European and tropical hardwood glulam", *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 76, pp. 1205-1222, 2018.
- [34] A. Chiniforush, A. Akbarnezhad, H. Valipour y S. Malekmohammadi, "Moisture and temperature induced swelling/shrinkage of softwood and hardwood glulam and LVL: An experimental study", *Construction and Building Materials*, vol. 207, pp. 70-83, 2019. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2019.02.114](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.114)
- [35] W. B. P. I. (WBPI), Density Wood Based Panels International (WBPI), 26 October 2016. [En línea]. Available: <http://www.wbpionline.com/features/density-5649027/>. [Último acceso: 2019 diciembre 01].

- [36] S. Chauhan y P. Aggarwal, "Effect of moisture sorption state on transverse dimensional changes in wood", *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 62, pp. 50-55, 2004.
- [37] Y. Han, S.-Y. Park, H. Chung, Y.-S. Chang y H. Yeo, "Dimensional changes of cross-laminated specimens produced under different conditions due to humidity variation", *BioResources*, vol. 14, nº 2, pp. 4035-4046, 2019.
- [38] S. Chauhan y A. Sethy, "Differences in dynamic modulus of elasticity determined by three vibration methods and their relationship with static modulus of elasticity", *Maderas, Ciencia y tecnología*, vol. 18, nº 2, pp. 373-382, 2016.
- [39] FC. Beall, "Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood properties", *Wood Science and Technology* 36:197–212, 2002. doi: 10.1007/s00226-002-0138-4
- [40] KO. Olaoye, AO. Oluwadare, EA. Adelusi; JK. Abiola, "View of Acoustic Properties of *Gmelina arborea* (Roxb.) Wood", *Journal of Materials Science Research and Reviews*, vol. 4, no. 1, pp.1–9, 2019.
- [41] KO. Olaoye, AO. Oluwadare, "Comparative assessment of acoustic properties of talking drums made from hourglass shell from different geometric shapes of *Gmelina arborea* (Roxb.) wood", *International Wood Products Journal*, vol. 11, no. 1, pp. 20–26, 2020. <https://doi.org/10.1080/20426445.2019.1706881>
- [42] T. Shaji, S. Somayaji, MS. Mathews, "Ultrasonic pulse velocity technique for inspection and evaluation of timber", *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 12, no. 2, pp.180–185, 2000. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2000)12:2(180)
- [43] R. Moya-Roque, "Rendimiento y evaluación de adherencia en madera de Teca (*Tectona grandis*) para la fabricación de veleros". Informe de Práctica de Especialidad, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, Cartago, CR, 1990.
- [44] M. Garro-Chavarría, "Efecto del alcohol y el hidróxido de sodio sobre la humectabilidad de la superficie de la madera de *Tectona grandis* L.F. de plantaciones de rápido crecimiento", *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, vol. 6, nº 17, pp. 42-50, 2009.
- [45] J. Lopes, R. A. Garcia y A. M. Nascimento, "Wettability of the surface of heat-treated juvenile teak wood assessed by drop shape analyzer", *Maderas, Ciencia y Tecnología*, vol. 20, nº 2, pp. 249-256, 2018.
- [46] A. Kramer, A. Barbosa y A. Sinha, "Viability of hybrid poplar in ANSI approved cross laminated timber applications", *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 26, nº 7, 2013.
- [47] H. Erniwati, Y. Sudo, H. Yusram, N. Naresworo, "Pengembangan Papan Komposit Berlapis Anyaman Bambu dari Jenis Kayu Cepat Tumbuh dengan Perekat Poliuretan", Disertación, Universidad IPB, Bogor, Indonesia, 2008.
- [48] AS. Yusoh, PMd. Tahir, MK. Anwar Uyup, SH. Lee, H. Husain, MO. Khaidzir, "Effect of wood species, clamping pressure and glue spread rate on the bonding properties of cross-laminated timber (CLT) manufactured from tropical hardwoods", *Construction and Building Materials*, vol. 273, no. 1, pp. 121721, 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121721
- [49] Z. Sun, G. Du y L. Huang, "Effect of microwave plasma treatment on surface wettability of common teak wood", *Frontiers of Forestry in China*, vol. 4, no. 2, pp. 249-254, 2009. DOI: 10.1007/s11461-009-0028-0



- [50] M. Gindl, G. Sinn y S. Stanzl-Tschegg, "The effects of ultraviolet light exposure on the wetting properties of wood", *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 20, nº 8, pp. 817-828, 2006
- [51] N. Mohd Yusof, P. L. S. Md Tahir, M. Asim Khan y R. Suffian James, "Mechanical and physical properties of Cross-Laminated Timber made from *Acacia mangium* wood as function of adhesive types", *Journal of Wood Science*, vol. 65, nº 20, pp. 1-11, 2019. DOI <https://doi.org/10.1186/s10086-019-1799-z>
- [52] JK. Oh, JJ. Lee y JP. Hong, "Prediction of compressive strength of cross-laminated timber panel", *Journal of Wood Science*, vol. 61, pp. 28-34, 2015.
- [53] Asociación Española de Normalización (UNE), Estructuras de madera. Madera laminada encolada y madera maciza encolada, *Asociación Española de Normalización (UNE)*, Madrid, 2017.
- [54] CLT Handbook Cross Laminated Timber Special Publication SP-529E. Eds. Erol Karacabeyli & Brad Douglas. Co-published by U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Binational Softwood Lumber Council (BSLC), 572 pp. 2013.
- [55] KS. Sikora, DO. McPolin, AM. Harte, "Effects of the thickness of cross-laminated timber (CLT) panels made from Irish Sitka spruce on mechanical performance in bending and shear", *Construction and Building Materials*, vol. 116, no. 1, pp. 141-150, 2016. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2016.04.145](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.145)

## **Informe sobre la determinación de características mecánicas de los paneles tipo CLT en madera de *G. arborea* (melina) y *T. grandis* (teca)**

*Ing. Mauricio Carranza-Solano., Lic.*  
*Ing. Freddy Muñoz-Acosta. Dr.*  
*Ing. Roger Moya-Roque. Dr.*  
*Ing. Carolina Tenorio-Monge. M.Sc.*

En el Anexo A se muestran los datos obtenidos al someter a esfuerzos por flexión a diferentes muestras de CLT en madera de Melina y Teca, esto con el fin de llevarlas a la falla y determinar algunas características mecánicas mediante las curvas de esfuerzo – deformación generadas durante la prueba.

Los datos se agruparon según el tipo de madera, la cantidad de capas y la dirección de las fibras que predomina: *edgewise* (por el borde o canto) y *flatwise* (por la cara ancha).

En el mismo anexo mencionado se muestran los resultados obtenidos para cada muestra de datos a partir de un análisis estadístico desarrollado en el programa MiniTab. Además, se realizó un análisis de regresión poblacional para cada tipo de madera con el objetivo de identificar la influencia de parámetros tales como la dirección de las fibras, la carga y el número de capas en los valores de los módulos de elasticidad y de ruptura.

Pudo observarse primeramente que el número de pruebas utilizadas para cada caso de estudio: Melina/Teca a tres capas por el borde (M3E, T3E), Melina/Teca a tres capas por el lado ancho (M3F, T3F), Melina/Teca a cinco capas por el borde (M5E, T5E) y Melina/Teca a cinco capas por el lado ancho (M5F, T5F) no es representativo, por lo que, a pesar de que los resultados cumplan con la prueba de normalidad, no es suficiente para determinar el comportamiento de la madera CLT con las características trabajadas. Además, se corrobora a partir del análisis de regresión que existe variabilidad importante entre los datos, la cual, junto con las muestras tan pequeñas, impide brindar resultados representativos sobre las características mecánicas de la madera CLT.

A partir del coeficiente de determinación estadístico ( $R^2$ ) fue posible detectar la falta de variables por considerar al momento de caracterizar las muestras, entre ellas la calidad de la madera utilizada. En el mismo análisis se observó que para los esfuerzos en flexión la dirección de las fibras con respecto a la carga aplicada y el número de capas fueron determinantes en los resultados. Las muestras falladas en la dirección *flatwise* demostraron un mejor rendimiento, esto debido a que en esta disposición se cuentan con más elementos continuos que aportan mayor resistencia a la flexión en contraste con la posición de *edgewise* (ver Figura 1), en la que predominan piezas verticales que al flexionarse todo el elemento, estas tienden principalmente a desplazarse a lo largo de la curvatura que se dibuja por la deflexión de los elementos continuos que soportan los esfuerzos principales, pero que no son predominantes, y donde eventualmente dichas

piezas perpendiculares a estos tienden a despegarse entre ellas conforme se deforma el elemento.

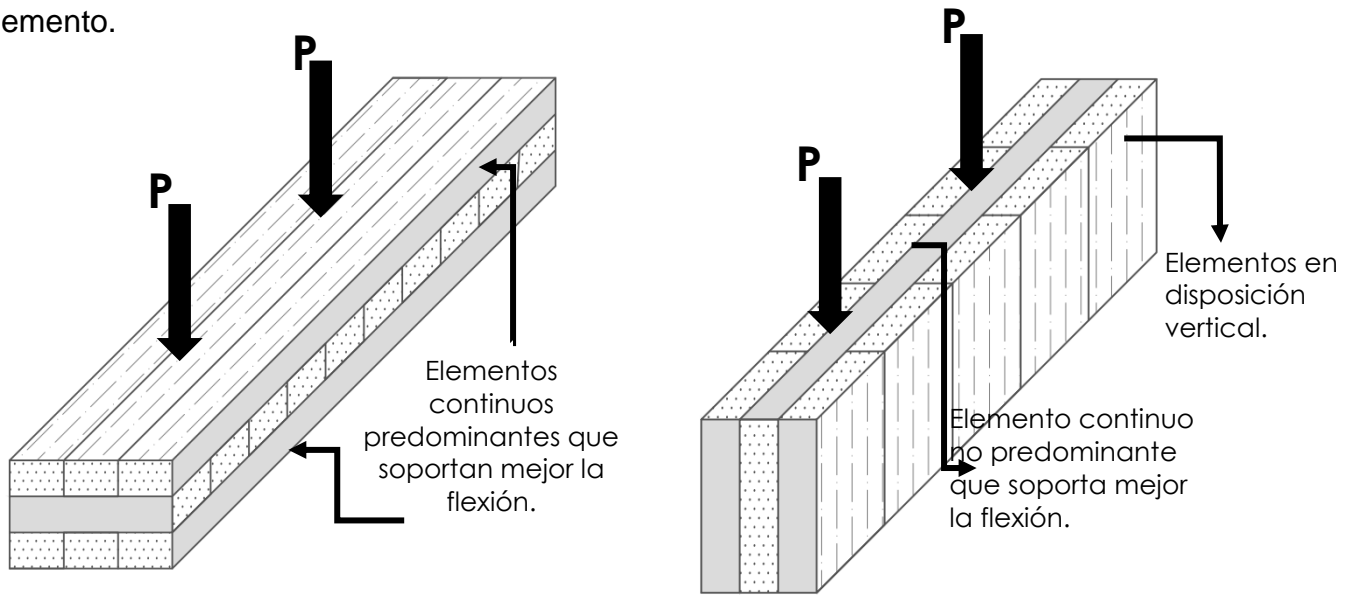


Figura 1. A) Elemento CLT en la dirección flatwise y a tres capas. B) Elemento CLT en la dirección edgewise a tres capas. Fuente: Elaboración propia.

En los datos para las pruebas a compresión, específicamente en las Figuras 24 y 29 del anexo B se pudo observar que los datos no son normales al obtener un *p-value* menor que 0.05. Esto pudo generarse por datos atípicos generados durante las pruebas. Además, en la Figura 31 del anexo B se observa que los resultados del módulo de ruptura para el CLT en Melina no son normales, por lo que no puede realizarse un análisis de regresión lineal con el que se pueda predecir futuros valores. Sin embargo, a pesar de contar con datos normales para el MOE y el MOR en las demás pruebas, se concluye que el comportamiento físico de los elementos de CLT en cuestión requiere de un estudio más amplio, es decir, incluir un número de muestras representativo para el que se recomienda realizar una prueba de estimación de la muestra.

Para los datos obtenidos a partir de las pruebas realizadas a la madera de Teca a esfuerzos en flexión se determinó por medio de un análisis de regresión lineal que los resultados no son normales, por lo que no puede utilizarse dicho modelo a menos de que se revisen nuevamente los puntos atípicos pertenecientes a dicha prueba.

Por el lado de los elementos a compresión se identifica que, nuevamente, la dirección de las fibras de la madera tiene un impacto importante en la capacidad, de lo cual se tuvo como resultado que aquellos donde predominan piezas cuyas fibras sean paralelas a la carga aplicada tienen un mejor rendimiento, por tanto, los elementos identificados como *flatwise* son candidatos para continuar con el proceso de estudio y caracterización.

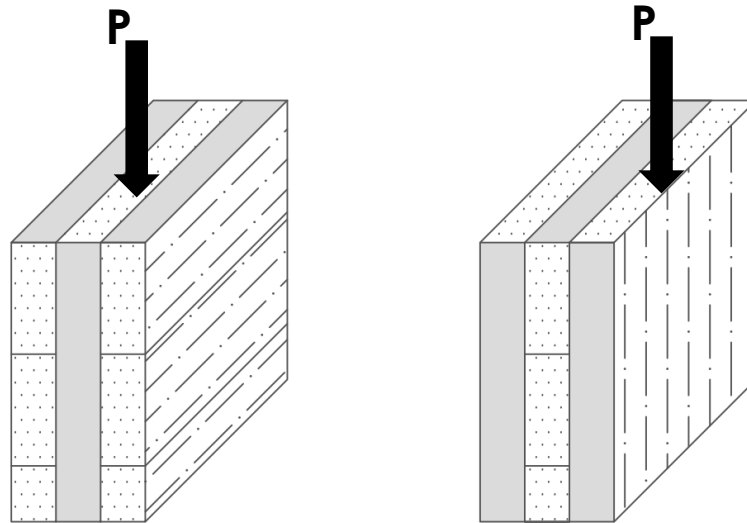


Figura 2. A) Elemento CLT a tres capas en la dirección *edgewise* (predominancia en las fibras perpendiculares a la carga aplicada). B) Elemento CLT a tres capas en la dirección *flatwise* (predominancia en las fibras paralelas a la dirección de la carga aplicada).

En la siguiente tabla se muestran las medias de cada muestra con el fin de mostrar que el rendimiento en los elementos categorizados como *flatwise* es mejor que en *edgewise*.

De la tabla 1 se puede observar que del lado *flatwise* se obtienen los módulos de elasticidad más altos. Para las pruebas de flexión se explica debido a que la mayor parte de los elementos que componen la CLT están dispuestos en semejanza a una viga y logran tomar los esfuerzos a tensión que se generan en la parte inferior y los de compresión en la parte superior, mientras que para los *edgewise* predominan los elementos que no aportan significativamente resistencia a la flexión, lo cual permite concluir que los elementos *flatwise* tienen un mejor comportamiento y son candidatos para continuar con el proceso para la caracterización de dichos elementos.

**Tabla 1.** Medias de los módulos de elasticidad en kilogramos por centímetro cuadrado ( $\text{kg/cm}^2$ ) obtenidos en las pruebas de flexión y compresión para cada uno de los grupos de muestras de CLT en Melina y Teca.

Variable Elemento	MOE ( $\text{kg/cm}^2$ )		MOR ( $\text{kg/cm}^2$ )	
	Flexión	Compresión	Flexión	Compresión
M3E	42671	15873	238.60	132.00
M3F	81232	33472	186.00	231.90
M5E	18533	21673	158.90	141.57
M5F	61456	28598	120.16	180.27
T3E	46996	18204	284.22	157.39
T3F	110147	38694	456.98	303.00
T5E	21882	28994	175.26	199.07
T5F	81155	34180	272.94	260.55

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 2.** Parametros para prueba de flexion en dirección flatwise y edgewise para vigas CLT de 3 y 5 capas en madera de melina y teca

Specie	Beam Test orientation	CLT layer panel	EI ( $\text{N}\cdot\text{mm}^2 \times 10^{10}$ )	Fb (MPa)	Fv (MPa)
<i>G. arborea</i>	Flatwise	3-layers	3.79 <sup>B</sup> (0.27)	18.26 <sup>A</sup> (5.30)	2.44 <sup>A</sup> (0.36)
		5-layers	13.30 <sup>A</sup> (1.55)	11.78 <sup>B</sup> (1.93)	1.03 <sup>B</sup> (0.21)
	Edgewise	3-layers	0.51 <sup>B</sup> (1.41)	23.40 <sup>A</sup> (5.53)	1.75 <sup>A</sup> (0.50)
		5-layers	1.05 <sup>A</sup> (0.17)	15.59 <sup>B</sup> (4.31)	2.06 <sup>A</sup> (0.25)
<i>T. grandis</i>	Flatwise	3-layers	5.57 <sup>B</sup> (0.53)	44.81 <sup>A</sup> (8.82)	3.53 <sup>A</sup> (0.51)
		5-layers	19.00 <sup>A</sup> (0.70)	26.77 <sup>B</sup> (3.63)	1.69 <sup>B</sup> (0.24)
	Edgewise	3-layers	0.62 <sup>B</sup> (0.15)	27.87 <sup>A</sup> (8.76)	2.63 <sup>A</sup> (0.83)
		5-layers	1.30 <sup>A</sup> (0.30)	17.19 <sup>B</sup> (5.57)	3.26 <sup>A</sup> (0.48)

Nota: valores entre parenthesis corresponde a la desviación estándar. Letra diferente entre las medias de los tratamientos indican diferencia estadística ( $P\text{-value} < 0.05$ ).

### Propiedades mecánicas en la prueba de flexion en direcciones *flatwise* y *edgewise*.

A pesar de que la construcción de la tabla con valores de diseño, no fue posible obtenerla dentro de los resultados obtenidos en los ensayos mecánicos en flexión, se determinó que:

- Los paneles CLT de *T. grandis* presentaron valores más altos en relación a los paneles CLT *G. arborea*, en los tres parámetros evaluados (Tabla 2).
- Para la prueba de flexión de los paneles CLT para ambas especies y direcciones, se observó que los paneles CLT de 5 capas presentaron valores de rigidez a la flexión (EI) estadísticamente superiores a los paneles CLT de 3 capas.



- Los valores de esfuerzo en flexión ( $F_b$ ) los CLT de 3 capas presentaron promedios superiores al CLT de 5 capas (Tabla 2).
- En los promedios obtenidos esfuerzo de cortante en flexión ( $F_v$ ), se observó que para ambas especies en la dirección flatwise, los paneles CLT de 3 capas presentaron valores estadísticamente superiores a los paneles CLT de 5 capas. Mientras que, en la dirección edgewise, no se observaron diferencias estadísticas entre el número de capas que componen a los paneles CLT (Tabla 2).

## Conclusiones y Recomendaciones

- Se sugiere incluir entre las características de las muestras la sanidad de la madera, es decir, la cantidad de nudos presentes en las piezas.
- Se recomienda revisar los datos atípicos de las pruebas e incrementar el tamaño de las muestras a un valor mayor o igual de 15 datos. Para datos menores a 15 se debe realizar una prueba de estimación de la muestra, la cual no se realizó y en la que debe determinarse el error permitido en los resultados.
- No se recomienda generar una tabla de diseño con la cantidad de datos por muestra puesto que no es un valor representativo y podría desvirtuar los elementos CLT.
- Haber estimado, al menos, los principales parámetros como la rigidez a la flexión ( $EI$ ), esfuerzo en flexión ( $F_b$ ) y esfuerzo de cortante en flexión ( $F_v$ ) dan una “pista” de como sería el comportamiento estructural del material CLT. Sin embargo, el grupo de investigación, con los resultados obtenidos y en opinión del especialista estructural Ing. M. Carranza, está totalmente consciente que para proponer una tabla de valores de diseño confiable; se debe realizar una mayor cantidad de probetas las que serán sometidas a los ensayos mecánicos y robustecer la base de datos generada y generar resultados estadísticamente confiables.
- Por tanto, lo propuesto en la tabla 2 es una *mini-tabla preliminar de valores de diseño* que deberá ser depurada para finalmente poder proponer a los paneles CLT como un elemento constructivo con aplicación estructural.

## ANEXO A

- Datos de CLT sometido a esfuerzos en flexión.
- Análisis estadístico de los resultados obtenidos en las pruebas a flexión.

### Análisis estadístico de las muestras de CLT en Melina por esfuerzos a flexión

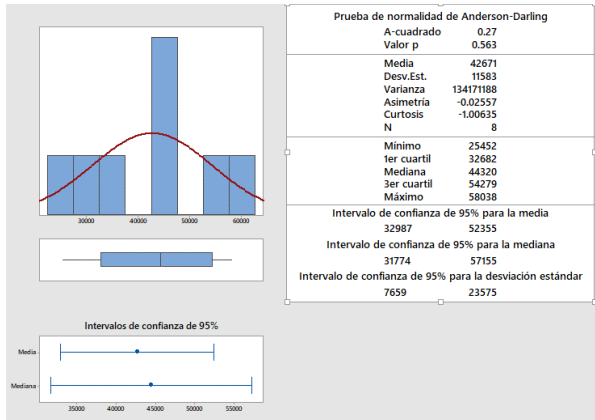


Figura 3. Resumen estadístico para la determinación del módulo de elasticidad (MOE) en kilogramo por centímetro cuadrado ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) de la población de datos de CLT en Melina, tres capas y apoyada por su borde en la prueba a flexión. Copyright 2021 por MiniTab18.

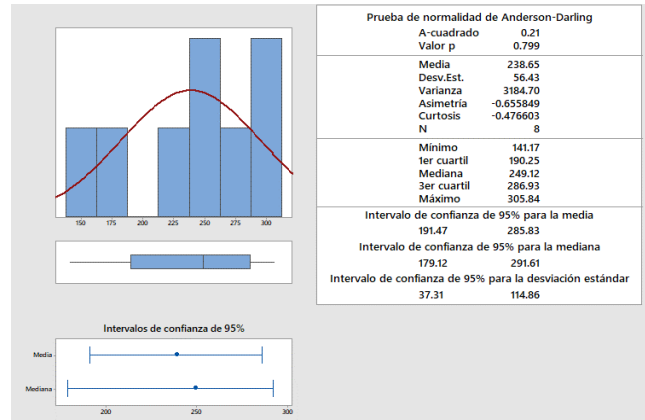


Figura 4. Resumen estadístico para la determinación del módulo de ruptura (MOR) en kilogramo por centímetro cuadrado ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) de la población de datos de CLT en Melina, tres capas y apoyada por su borde en la prueba a flexión. Copyright 2021 por MiniTab18.

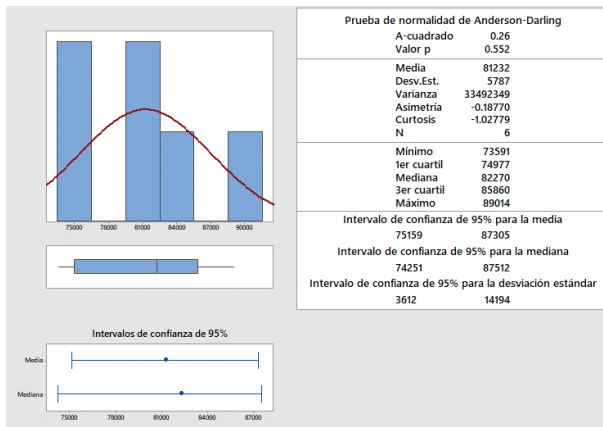


Figura 5. Resumen estadístico para la determinación del módulo de elasticidad (MOE) en kilogramo por centímetro cuadrado ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) de la población de datos de CLT en Melina, tres capas y apoyada por su lado ancho en la prueba a flexión. Copyright 2021 por MiniTab18.

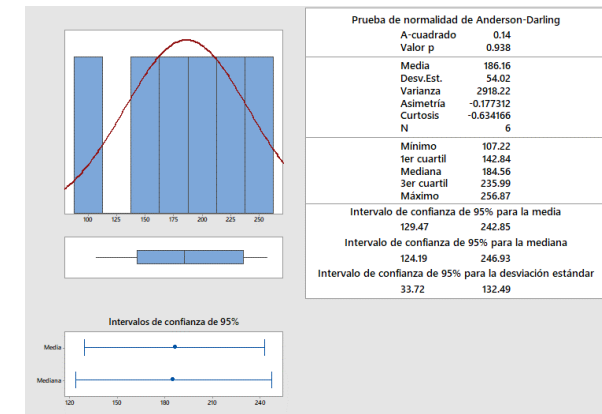


Figura 6. Resumen estadístico para la determinación del módulo de ruptura (MOR) en kilogramo por centímetro cuadrado ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) de la población de datos de CLT en Melina, tres capas y apoyada por su lado ancho en la prueba a flexión. Copyright 2021 por MiniTab18.

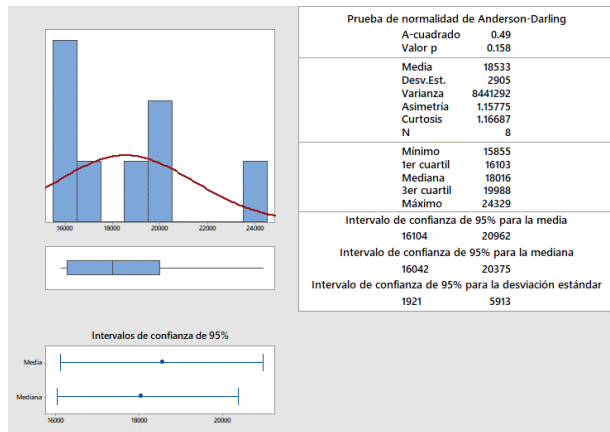


Figura 7. Resumen estadístico para la determinación del módulo de elasticidad (MOE) en kilogramo por centímetro cuadrado (kg/cm<sup>2</sup>) de la población de datos de CLT en Melina, cinco capas y apoyada por su borde en la prueba a flexión. Copyright 2021 por MiniTab18.

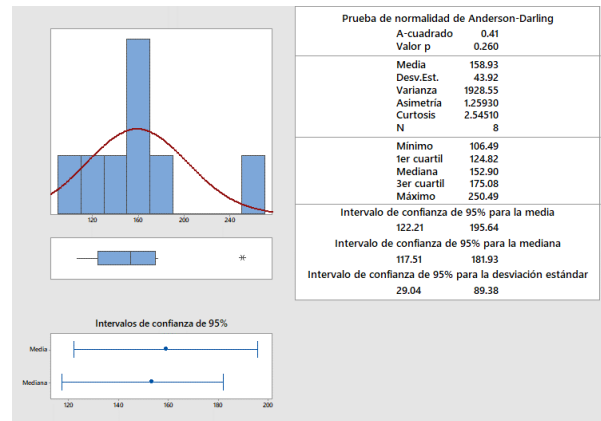


Figura 8. Resumen estadístico para la determinación del módulo de ruptura (MOR) en kilogramo por centímetro cuadrado (kg/cm<sup>2</sup>) de la población de datos de CLT en Melina, cinco capas y apoyada por su borde en la prueba a flexión. Copyright 2021 por MiniTab18.

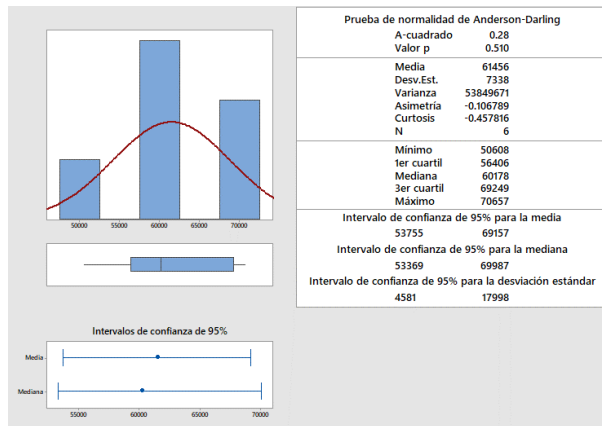


Figura 9. Resumen estadístico para la determinación del módulo de elasticidad (MOE) en kilogramo por centímetro cuadrado (kg/cm<sup>2</sup>) de la población de datos de CLT en Melina, cinco capas y apoyada por su lado ancho en la prueba a flexión. Copyright 2021 por MiniTab18.

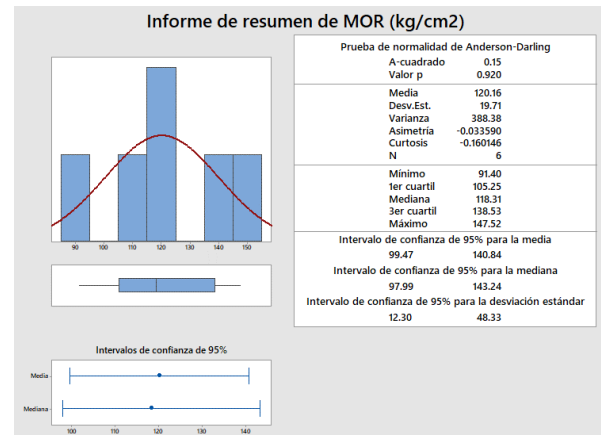


Figura 10. Resumen estadístico para la determinación del módulo de ruptura (MOR) en kilogramo por centímetro cuadrado (kg/cm<sup>2</sup>) de la población de datos de CLT en Melina, cinco capas y apoyada por su lado ancho en la prueba a flexión. Copyright 2021 por MiniTab18.

**Análisis de regresión: MOE (kg/cm<sup>2</sup>) vs. número de capas, carga y dirección.  
Método**

Codificación de predictores categóricos (1; 0)

**Análisis de Varianza**

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	3	15373411368	5124470456	129.79	0.000
Capas	1	2773105309	2773105309	70.23	0.000
Carga LP (kg)	1	520015504	520015504	13.17	0.001
Dirección	1	6376256460	6376256460	161.49	0.000
Error	24	947601982	39483416		
Falta de ajuste	22	944777103	42944414	30.40	0.032
Error puro	2	2824879	1412439		
Total	27	16321013349			

**Resumen del modelo**

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
6283.58	94.19%	93.47%	91.83%

**Coefficientes**

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	81560	5307	15.37	0.000	
Capas	-17219	2055	-8.38	0.000	2.99
Carga LP (kg)	24.22	6.67	3.63	0.001	3.35
Dirección					
Flatwise	35533	2796	12.71	0.000	1.36

**Ecuación de regresión**

Dirección

Edgewise MOE (kg/cm<sup>2</sup>) = 81560 - 17219 Capas + 24.22 Carga LP (kg)

Flatwise MOE (kg/cm<sup>2</sup>) = 117093 - 17219 Capas + 24.22 Carga LP (kg)

**Ajustes y diagnósticos para observaciones poco comunes**

Obs	MOE (kg/cm <sup>2</sup> )	Ajuste	Resid	Resid est.	R
7	58038	45285	12753	2.17	R

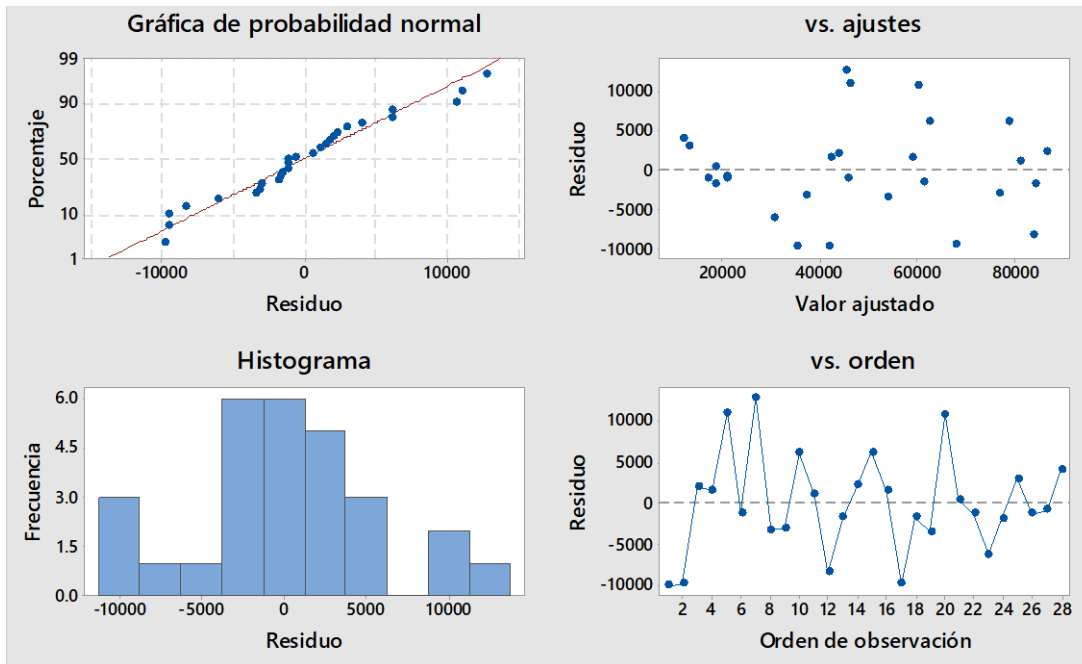


Figura 11. Gráfica de residuos para el Módulo de la elasticidad (MOE) ( $\text{kg/cm}^2$ ) para toda la población de CLT construida con madera de Melina sometida a esfuerzos en flexión. Copyright 2021: MiniTab 18.

### Análisis de regresión: MOR ( $\text{kg/cm}^2$ ) vs. número de capas, carga máxima alcanzada y dirección de apoyo.

#### Método

Codificación de predictores categóricos (1; 0)

#### Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	3	93893	31297.8	67.02	0.000
Capas	1	78761	78760.6	168.67	0.000
Carga max (kg)	1	41442	41441.6	88.75	0.000
Dirección	1	46360	46359.6	99.28	0.000
Error	24	11207	467.0		
Falta de ajuste	23	11205	487.2	270.73	0.048
Error puro	1	2	1.8		
Total	27	105101			

#### Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
21.6093	89.34%	88.00%	85.03%



## Coeficientes

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	399.6	18.1	22.07	0.000	
Capas	-86.38	6.65	-12.99	0.000	2.65
Carga max (kg)	0.1743	0.0185	9.42	0.000	3.16
Dirección					
Flatwise	-100.9	10.1	-9.96	0.000	1.50

## Ecuación de regresión

Dirección					
Edgewise	MOR (kg/cm <sup>2</sup> )	=	399.6	- 86.38 Capas	+ 0.1743 Carga max (kg)
Flatwise	MOR (kg/cm <sup>2</sup> )	=	298.8	- 86.38 Capas	+ 0.1743 Carga max (kg)

## Ajustes y diagnósticos para observaciones poco comunes

Obs	MOR (kg/cm <sup>2</sup> )	Ajuste	Resid	Resid est.
1	141.17	199.36	-58.19	-2.89 R

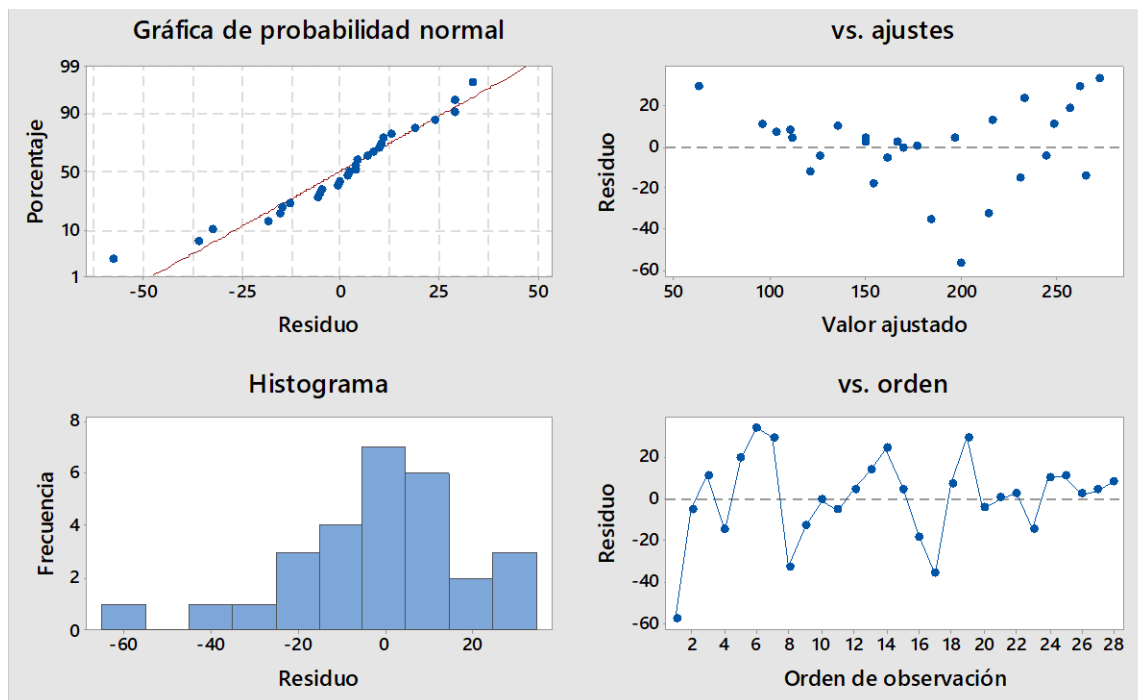


Figura 12. Gráfica de residuos para el Módulo de ruptura (MOR) (kg/cm<sup>2</sup>) para toda la población de CLT construida con madera de Melina sometida a esfuerzos en flexión. Copyright 2021: MiniTab 18.

## Análisis estadístico de las muestras de CLT en Teca por esfuerzos a flexión

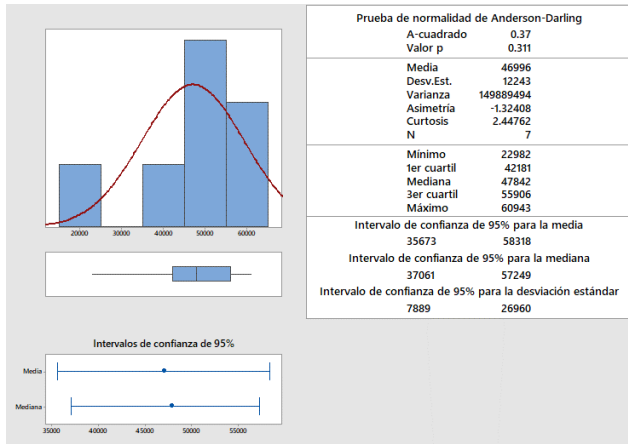


Figura 13. Resumen estadístico para la determinación del módulo de elasticidad (MOE) en kilogramo por centímetro cuadrado (kg/cm<sup>2</sup>) de la población de datos de CLT en Teca, tres capas y apoyada por su borde en la prueba a flexión. Copyright 2021 por MiniTab18.

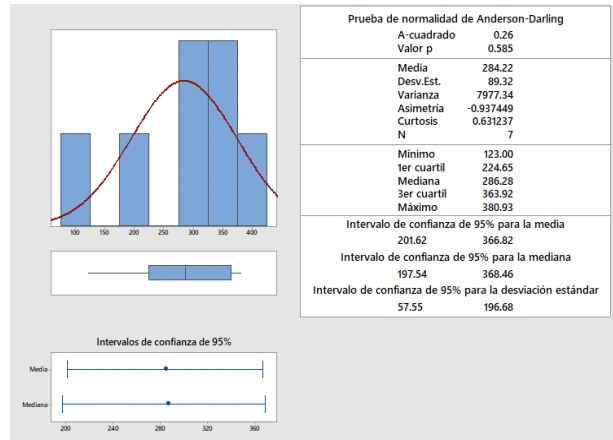


Figura 14. Resumen estadístico para la determinación del módulo de ruptura (MOR) en kilogramo por centímetro cuadrado (kg/cm<sup>2</sup>) de la población de datos de CLT en Teca, tres capas y apoyada por su borde en la prueba a flexión. Copyright 2021 por MiniTab18.

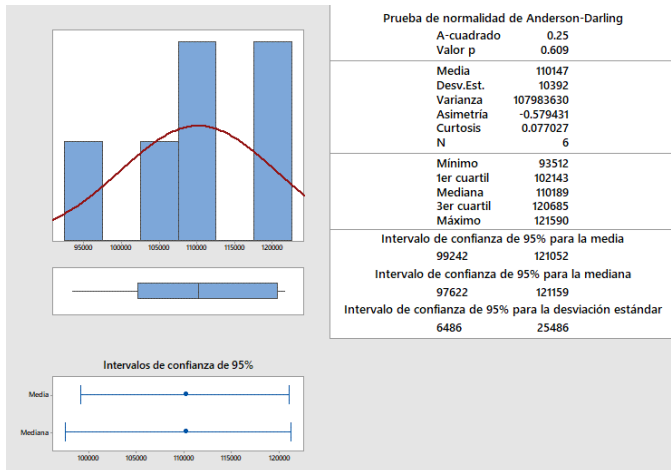


Figura 15. Resumen estadístico para la determinación del módulo de ruptura (MOR) en kilogramo por centímetro cuadrado (kg/cm<sup>2</sup>) de la población de datos de CLT en Teca, tres capas y apoyada por su borde en la prueba a flexión. Copyright 2021 por MiniTab18.

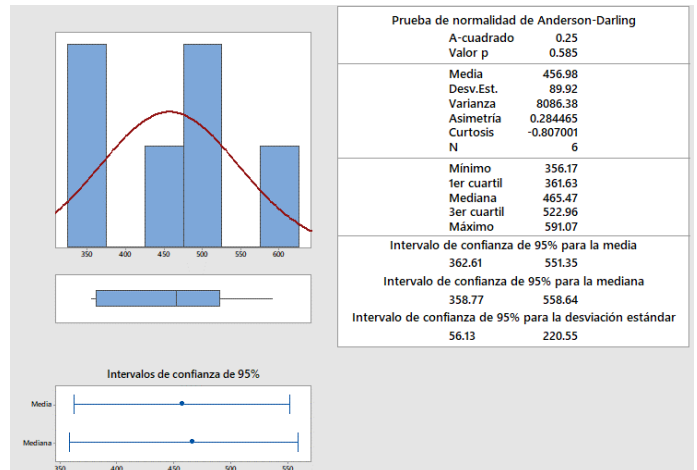


Figura 16. Resumen estadístico para la determinación del módulo de ruptura (MOR) en kilogramo por centímetro cuadrado (kg/cm<sup>2</sup>) de la población de datos de CLT en Teca, tres capas y apoyada por su borde en la prueba a flexión. Copyright 2021 por MiniTab18.

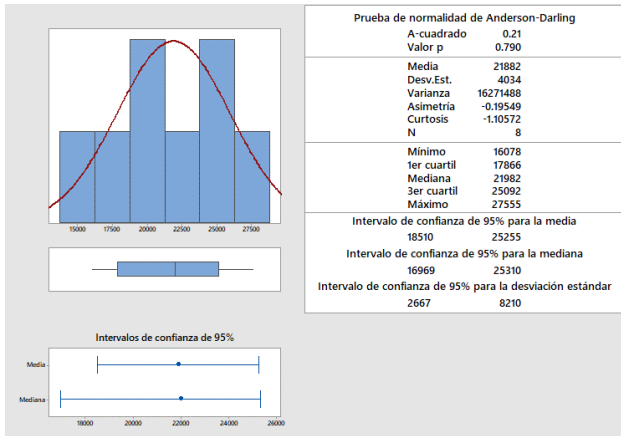


Figura 17. Resumen estadístico para la determinación del módulo de elasticidad (MOE) en kilogramo por centímetro cuadrado (kg/cm<sup>2</sup>) de la población de datos de CLT en Teca, cinco capas y apoyada por su borde en la prueba a flexión. Copyright 2021 por MiniTab18.

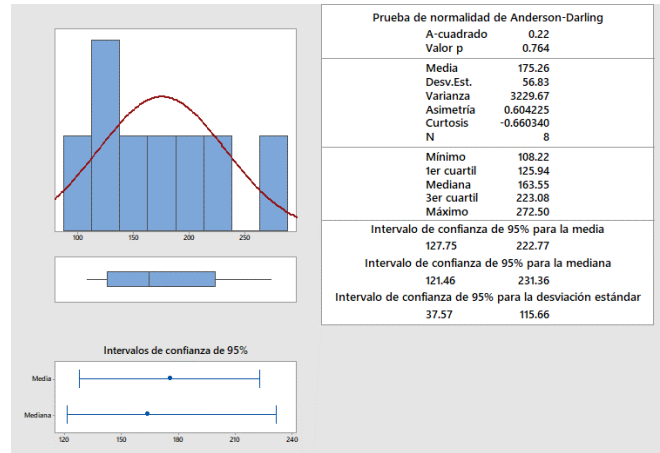


Figura 18. Resumen estadístico para la determinación del módulo de ruptura (MOR) en kilogramo por centímetro cuadrado (kg/cm<sup>2</sup>) de la población de datos de CLT en Teca, cinco capas y apoyada por su borde en la prueba a flexión. Copyright 2021 por MiniTab18.

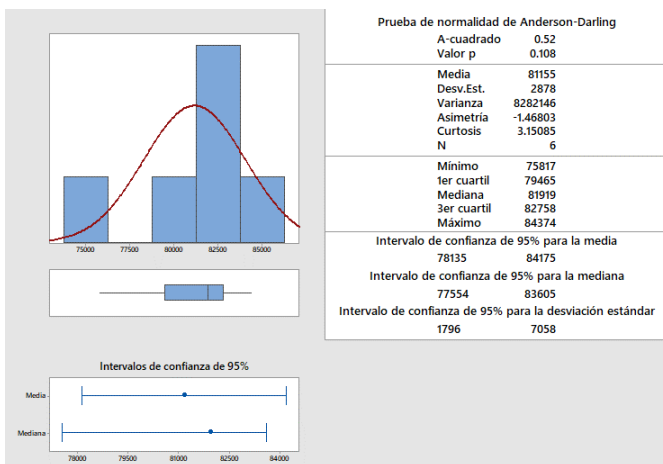


Figura 19. Resumen estadístico para la determinación del módulo de elasticidad (MOE) en kilogramo por centímetro cuadrado (kg/cm<sup>2</sup>) de la población de datos de CLT en Teca, cinco capas y apoyada por su lado ancho en la prueba a flexión. Copyright 2021 por MiniTab18.

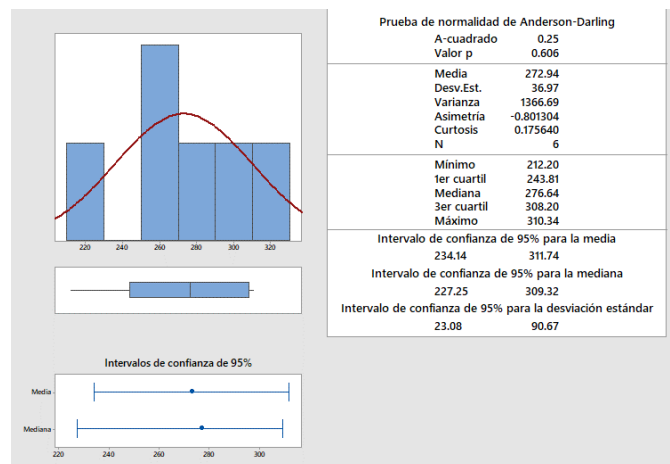


Figura 20. Resumen estadístico para la determinación del módulo de ruptura (MOR) en kilogramo por centímetro cuadrado (kg/cm<sup>2</sup>) de la población de datos de CLT en Teca, cinco capas y apoyada por su lado ancho en la prueba a flexión. Copyright 2021 por MiniTab18.

## Análisis de regresión: MOE (kg/cm<sup>2</sup>) vs. número de capas; carga y dirección de apoyo.

### Método

Codificación de predictores categóricos (1; 0)

### Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	3	30862712575	10287570858	185.52	0.000
Capas	1	4037530568	4037530568	72.81	0.000
Carga LP (kg)	1	344161031	344161031	6.21	0.020
Dirección	1	2572200215	2572200215	46.38	0.000
Error	23	1275430719	55453510		
Total	26	32138143294			

### Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
7446.71	96.03%	95.51%	94.44%

### Coeficientes

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	94973	6722	14.13	0.000	
Capas	-16764	1965	-8.53	0.000	1.88
Carga LP (kg)	8.62	3.46	2.49	0.020	6.22
Dirección					
Flatwise	45958	6748	6.81	0.000	5.47

### Ecuación de regresión

Dirección

Edgewise MOE (kg/cm<sup>2</sup>) = 94973 - 16764 Capas + 8.62 Carga LP (kg)

Flatwise MOE (kg/cm<sup>2</sup>) = 140931 - 16764 Capas + 8.62 Carga LP (kg)

### Ajustes y diagnósticos para observaciones poco comunes

Obs	MOE (kg/cm <sup>2</sup> )	Ajuste	Resid	Resid est.	R
3	22982	46779	-23796	-3.39	R

*Residuo grande R*

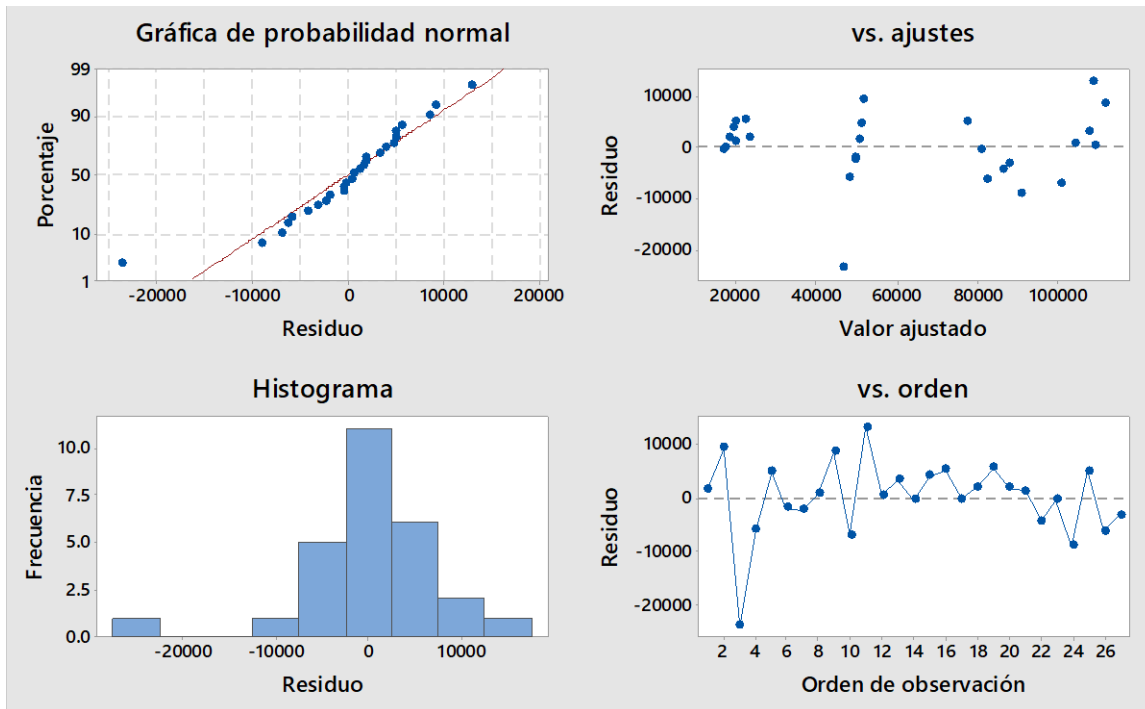


Figura 21. Gráfica de residuos para el Módulo de la elasticidad (MOE) (kg/cm<sup>2</sup>) para toda la población de CLT construida con madera de Teca sometida a esfuerzos en flexión. Copyright 2021: MiniTab 18.

### Análisis de regresión: MOR (kg/cm<sup>2</sup>) vs. número de capas, carga máxima alcanzada y dirección de apoyo.

#### Método

Codificación de predictores categóricos (1; 0)

#### Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	3	306155	102052	27.28	0.000
Capas	1	160939	160939	43.02	0.000
Carga max (kg)	1	41069	41069	10.98	0.003
Dirección	1	1564	1564	0.42	0.524
Error	23	86046	3741		
Total	26	392200			

#### Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
61.1646	78.06%	75.20%	70.65%



## Coefficientes

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	591.8	55.4	10.67	0.000	
Capas	-112.5	17.1	-6.56	0.000	2.12
Carga max (kg)	0.0920	0.0278	3.31	0.003	6.70
Dirección					
Flatwise	-36.7	56.7	-0.65	0.524	5.74

## Ecuación de regresión

Dirección

Edgewise MOR (kg/cm<sup>2</sup>) = 591.8 - 112.5 Capas + 0.0920 Carga max (kg)

Flatwise MOR (kg/cm<sup>2</sup>) = 555.1 - 112.5 Capas + 0.0920 Carga max (kg)

## Ajustes y diagnósticos para observaciones poco comunes

Obs	MOR (kg/cm <sup>2</sup> )	Ajuste	Resid	Resid est.	
3	123.0	284.8	-161.8	-2.81	R
9	591.1	471.4	119.6	2.12	R

Residuo grande R

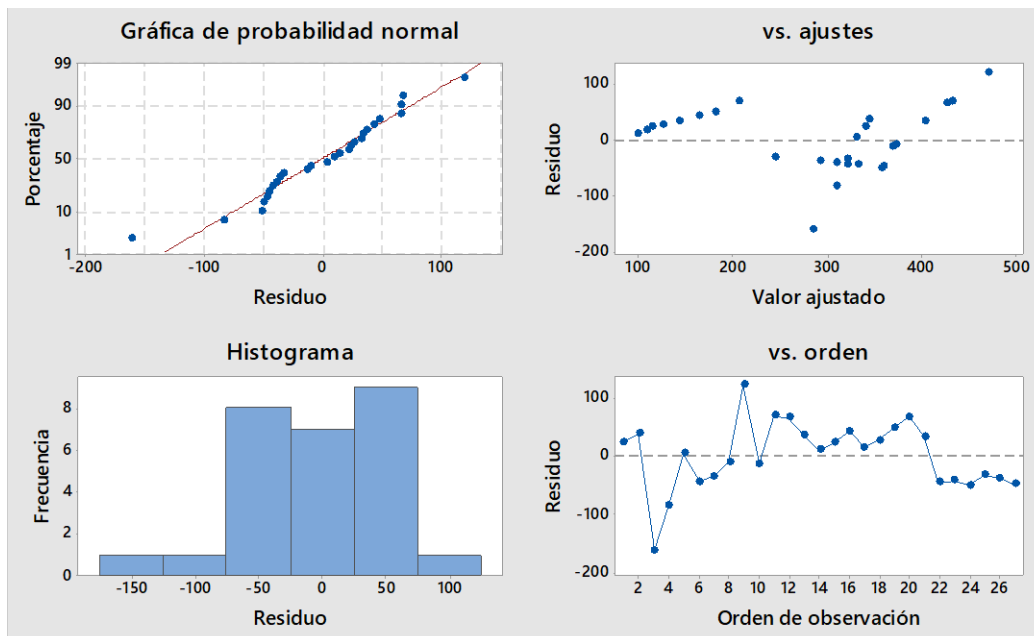


Figura 22. Gráfica de residuos para el Módulo de ruptura (MOR) (kg/cm<sup>2</sup>) para toda la población de CLT construida con madera de Teca sometida a esfuerzos en flexión. Copyright 2021: MiniTab 18.

## ANEXO B

- Datos de CLT sometido a esfuerzos en compresión.
- Análisis estadístico de los resultados obtenidos en las pruebas a compresión.

### Análisis estadístico de las muestras de CLT en Melina por esfuerzos a compresión

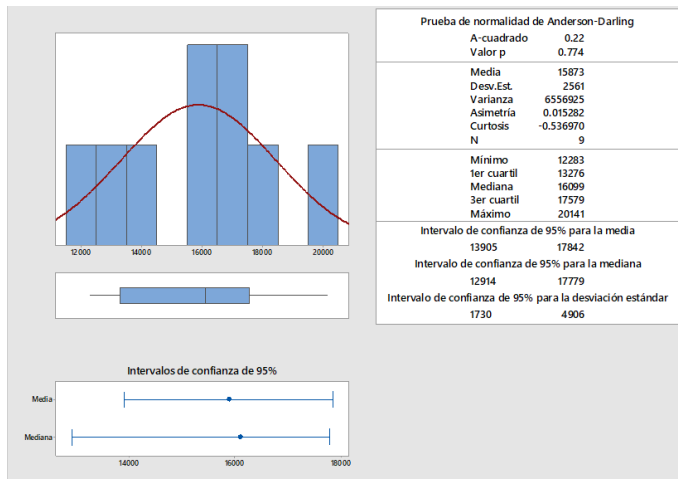


Figura 23. Resumen estadístico para la determinación del módulo de elasticidad (MOE) en kilogramos por centímetro cuadrado ( $\text{kg/cm}^2$ ) de la población de datos de CLT en Melina, tres capas y sometida a compresión perpendicular. Copyright 2021 por MiniTab18.

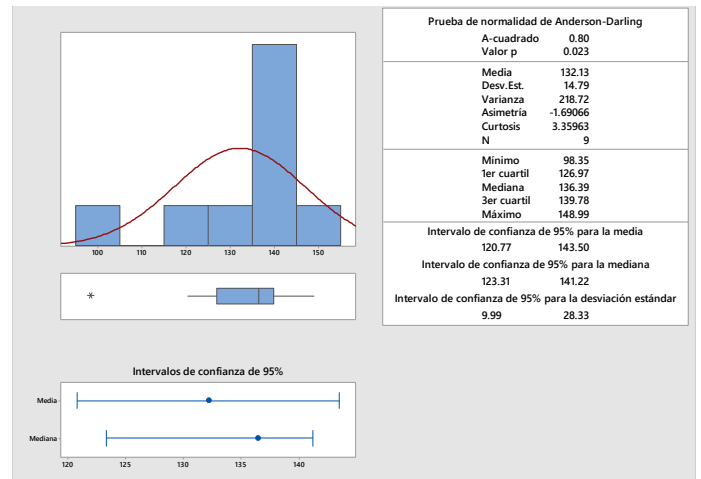


Figura 24. Resumen estadístico para la determinación del módulo de ruptura (MOR) en kilogramos por centímetro cuadrado ( $\text{kg/cm}^2$ ) de la población de datos de CLT en Melina, tres capas y sometida a compresión perpendicular. Copyright 2021 por MiniTab18.

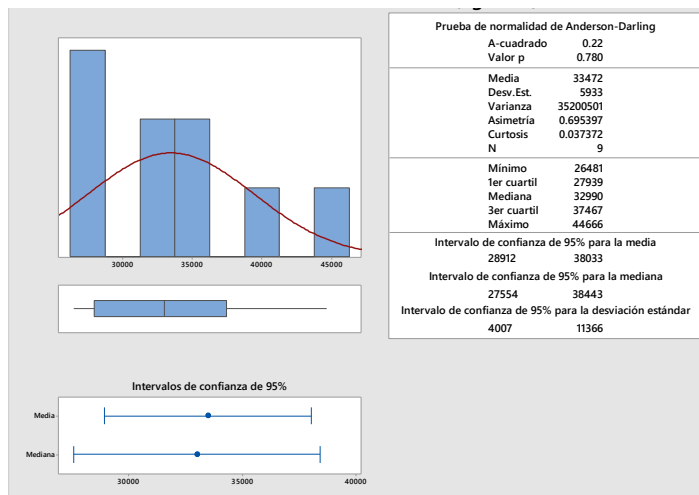


Figura 25. Resumen estadístico para la determinación del módulo de elasticidad (MOE) en kilogramos por centímetro cuadrado ( $\text{kg/cm}^2$ ) de la población de datos de CLT en Melina, tres capas y sometida a compresión paralela. Copyright 2021 por MiniTab18.

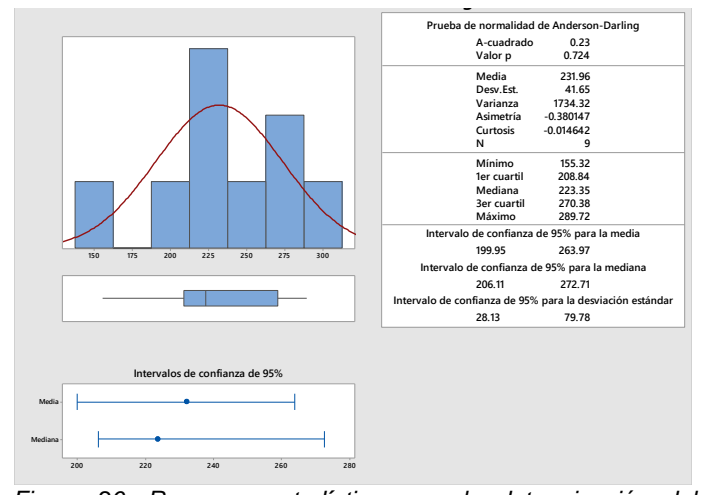


Figura 26. Resumen estadístico para la determinación del módulo de ruptura (MOR) en kilogramos por centímetro cuadrado ( $\text{kg/cm}^2$ ) de la población de datos de CLT en Melina, tres capas y sometida a compresión paralela. Copyright 2021 por MiniTab18.

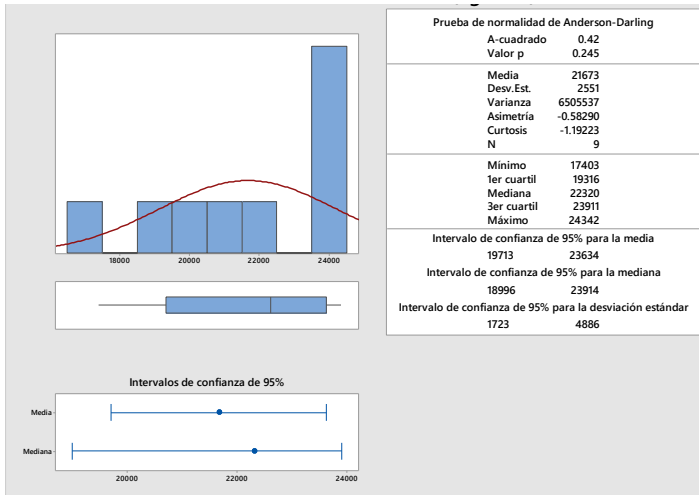


Figura 27. Resumen estadístico para la determinación del módulo de elasticidad (MOE) en kilogramos por centímetro cuadrado (kg/cm<sup>2</sup>) de la población de datos de CLT en Melina, cinco capas y sometida a compresión perpendicular. Copyright 2021 por MiniTab18.

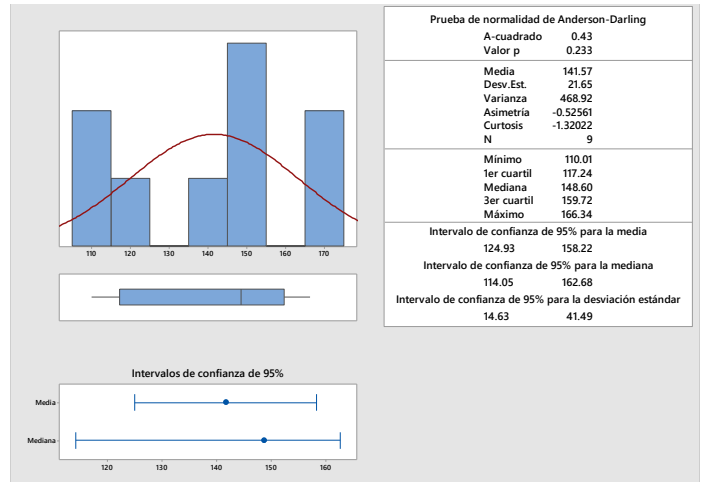


Figura 28. Resumen estadístico para la determinación del módulo de ruptura (MOR) en kilogramos por centímetro cuadrado (kg/cm<sup>2</sup>) de la población de datos de CLT en Melina, cinco capas y sometida a compresión perpendicular. Copyright 2021 por MiniTab18.

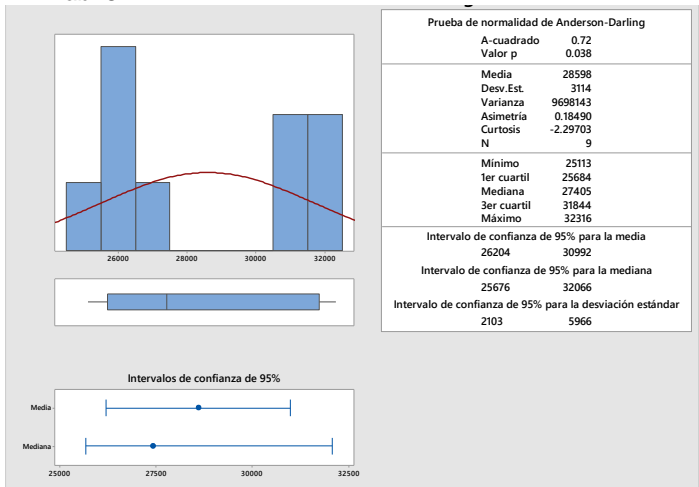


Figura 29. Resumen estadístico para la determinación del módulo de elasticidad (MOE) en kilogramos por centímetro cuadrado (kg/cm<sup>2</sup>) de la población de datos de CLT en Melina, cinco capas y sometida a compresión paralela. Copyright 2021 por MiniTab18.

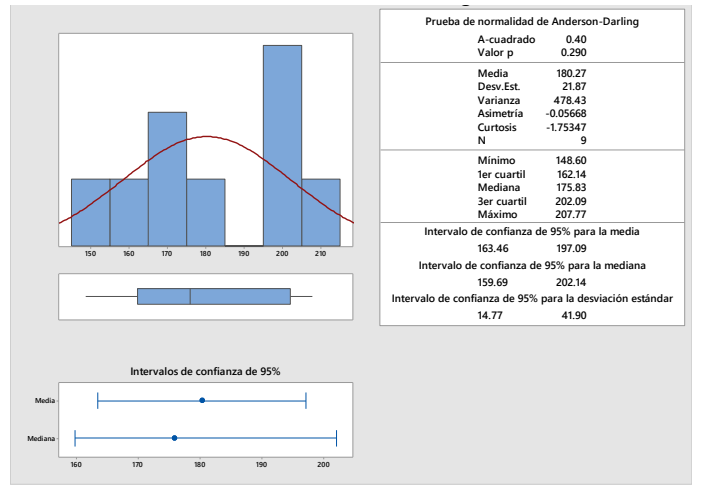


Figura 30. Resumen estadístico para la determinación del módulo de ruptura (MOR) en kilogramos por centímetro cuadrado (kg/cm<sup>2</sup>) de la población de datos de CLT en Melina, cinco capas y sometida a compresión paralela. Copyright 2021 por MiniTab18.

**Análisis de regresión: MOE y MOR (kg/cm<sup>2</sup>) vs. número de capas, esfuerzo máximo alcanzado y dirección de las fibras de las piezas de CLT en Melina por compresión.**

**Método**

Codificación de predictores categóricos (1, 0)

**Análisis de Varianza**

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	3	22240399283	7413466428	1414.38	0.000
Capas	1	252929810	252929810	48.26	0.000
Esfuerzo máximo (kg/cm2)	1	851707335	851707335	162.49	0.000
Dirección	1	108240932	108240932	20.65	0.000
Error	32	167727810	5241494		
Total	35	22408127092			

**Resumen del modelo**

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
2289.43	99.25%	99.18%	99.07%

**Coefficientes**

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Capas	1666	240	6.95	0.000	6.62
Esfuerzo máximo (kg/cm2)	89.26	7.00	12.75	0.000	10.68
Dirección					
Flatwise	4565	1005	4.54	0.000	3.27

**Ecuación de regresión**

Dirección	
Edgewise	MOE (kg/cm2) = 0.0 + 1666 Capas + 89.26 Esfuerzo máximo (kg/cm2)
Flatwise	MOE (kg/cm2) = 4565 + 1666 Capas + 89.26 Esfuerzo máximo (kg/cm2)

### Ajustes y diagnósticos para observaciones poco comunes

Obs	MOE (kg/cm <sup>2</sup> )	Ajuste	Resid	Resid est.	
21	35675	29501	6173	2.81	R
26	39260	34080	5181	2.45	R

Residuo grande R

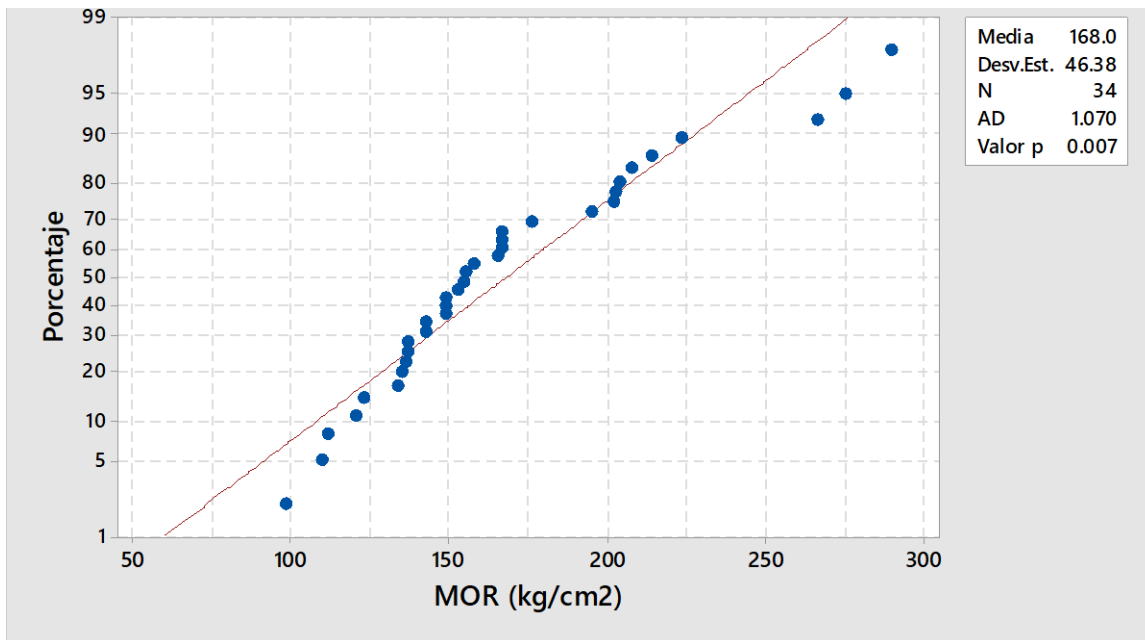


Figura 31. Prueba de normalidad para los resultados del módulo de ruptura (MOR) del conjunto de muestras de CLT en Melina.

## Análisis estadístico de las muestras de CLT en Teca por esfuerzos a compresión

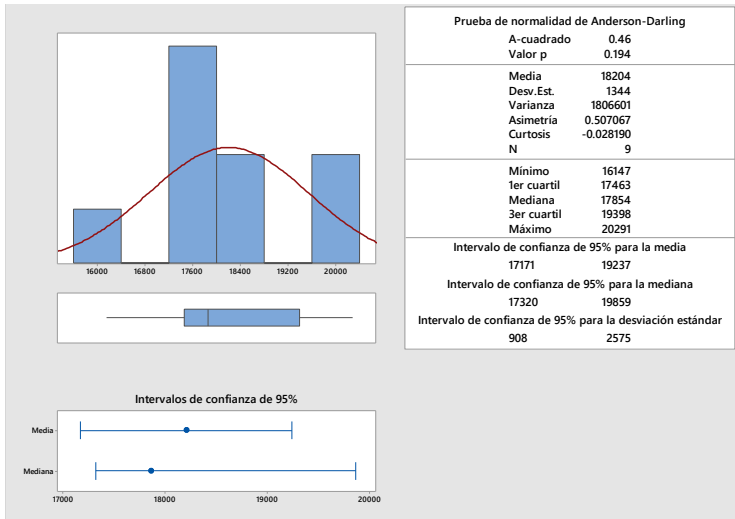


Figura 32. Resumen estadístico para la determinación del módulo de elasticidad (MOE) en kilogramos por centímetro cuadrado (kg/cm<sup>2</sup>) de la población de datos de CLT en Teca, tres capas y sometida a compresión perpendicular. Copyright 2021 por MiniTab18.

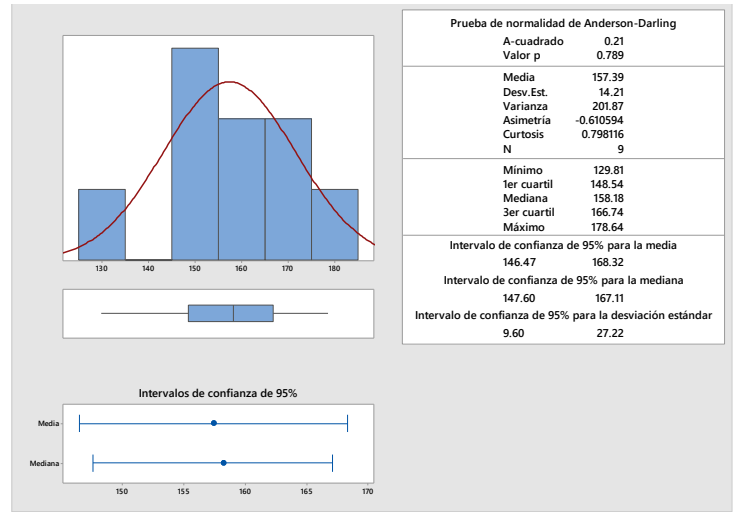


Figura 33. Resumen estadístico para la determinación del módulo de ruptura (MOR) en kilogramos por centímetro cuadrado (kg/cm<sup>2</sup>) de la población de datos de CLT en Teca, tres capas y sometida a compresión perpendicular. Copyright 2021 por MiniTab18.

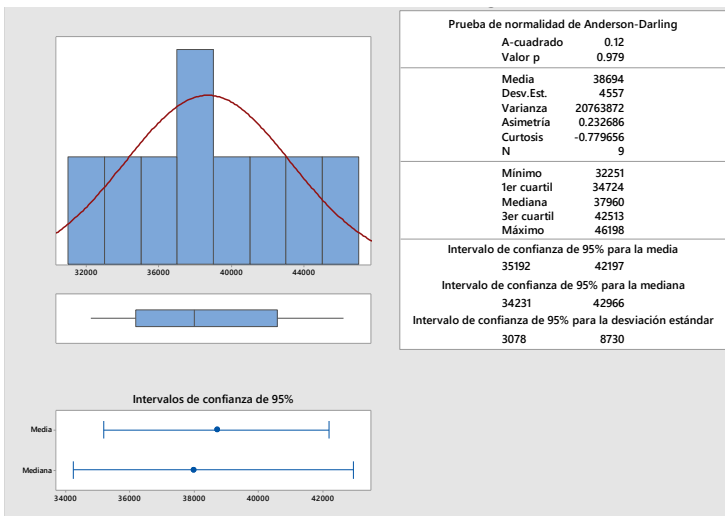


Figura 34. Resumen estadístico para la determinación del módulo de elasticidad (MOE) en kilogramos por centímetro cuadrado (kg/cm<sup>2</sup>) de la población de datos de CLT en Teca, tres capas y sometida a compresión paralela. Copyright 2021 por MiniTab18.

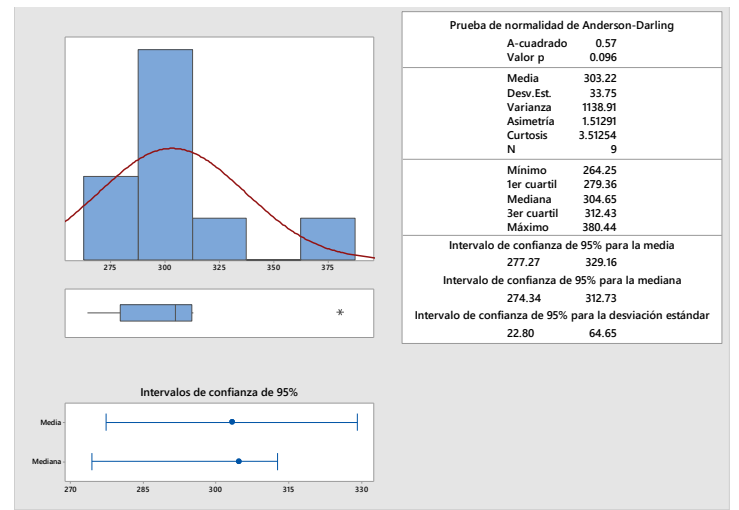


Figura 35. Resumen estadístico para la determinación del módulo de ruptura (MOR) en kilogramos por centímetro cuadrado (kg/cm<sup>2</sup>) de la población de datos de CLT en Teca, tres capas y sometida a compresión paralela. Copyright 2021 por MiniTab18.



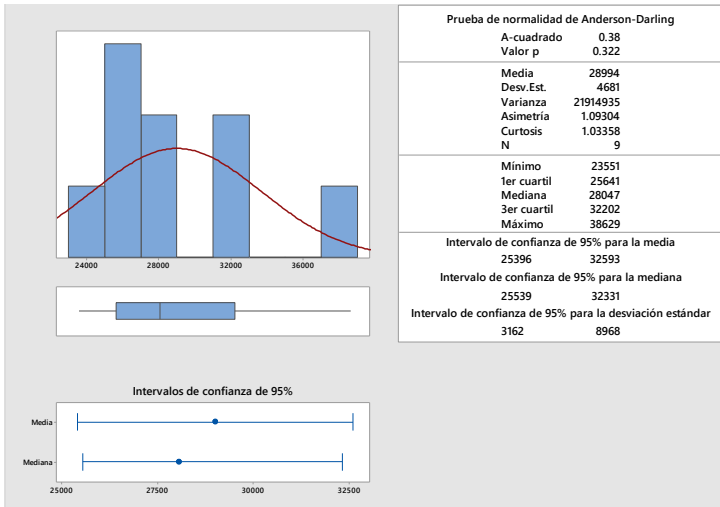


Figura 36. Resumen estadístico para la determinación del módulo de elasticidad (MOE) en kilogramos por centímetro cuadrado ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) de la población de datos de CLT en Teca, cinco capas y sometida a compresión perpendicular. Copyright 2021 por MiniTab18.

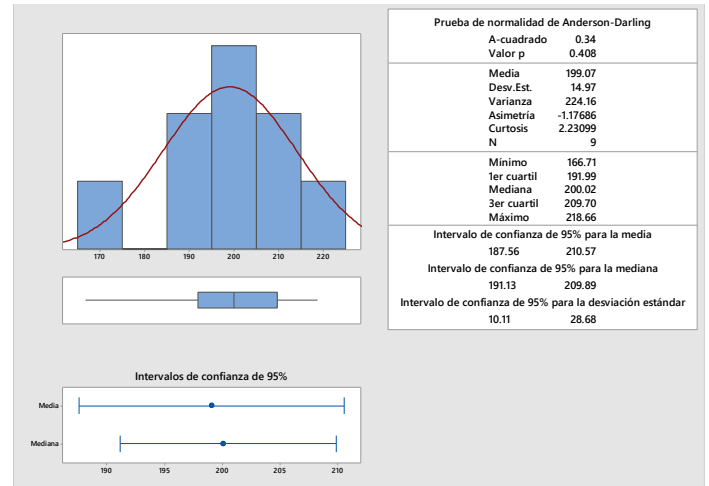


Figura 37. Resumen estadístico para la determinación del módulo de ruptura (MOR) en kilogramos por centímetro cuadrado ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) de la población de datos de CLT en Teca, cinco capas y sometida a compresión perpendicular. Copyright 2021 por MiniTab18.

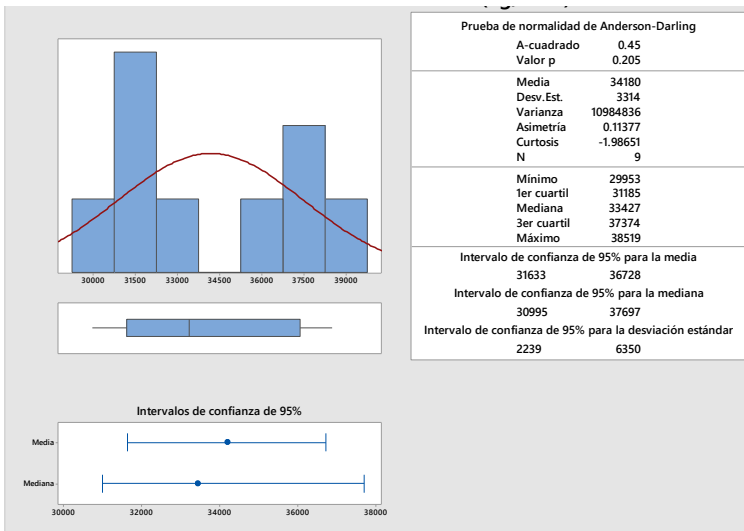


Figura 38. Resumen estadístico para la determinación del módulo de elasticidad (MOE) en kilogramos por centímetro cuadrado ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) de la población de datos de CLT en Teca, cinco capas y sometida a compresión paralela. Copyright 2021 por MiniTab18.

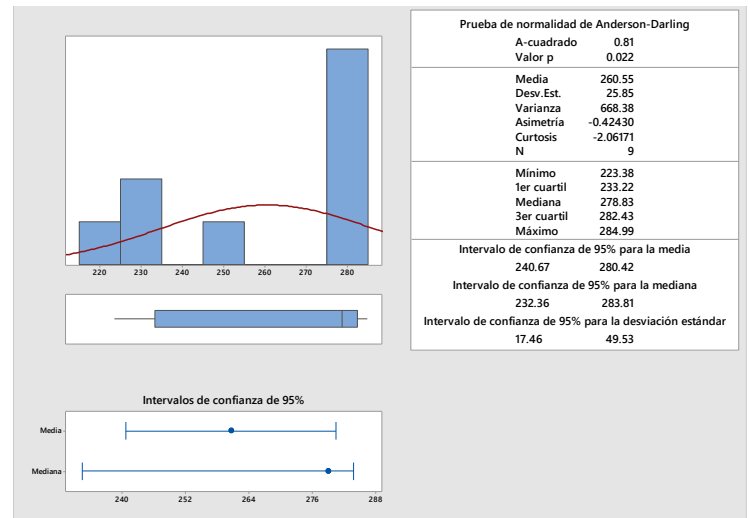


Figura 39. Resumen estadístico para la determinación del módulo de ruptura (MOR) en kilogramos por centímetro cuadrado ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) de la población de datos de CLT en Teca, cinco capas y sometida a compresión paralela. Copyright 2021 por MiniTab18.

## ANEXO C

- Análisis estadístico de los resultados obtenidos en las pruebas a flexión para la determinación de la resistencia a cortante entre juntas.

### Análisis de la falla por cortante de las juntas entre piezas para los elementos de CLT en Melina

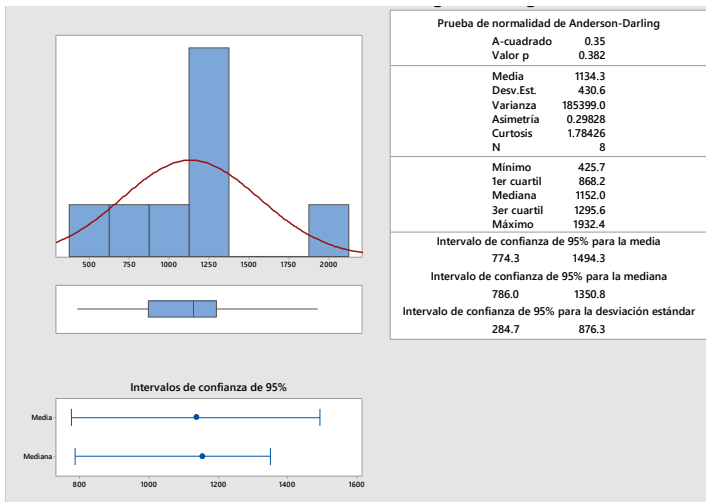


Figura 40. Resumen estadístico para la determinación de la carga máxima (kg) en cortante de los planos de falla de la población de datos de CLT en Melina y tres capas obtenidos de las pruebas a flexión en la dirección edgewise. Copyright 2021 por MiniTab18.

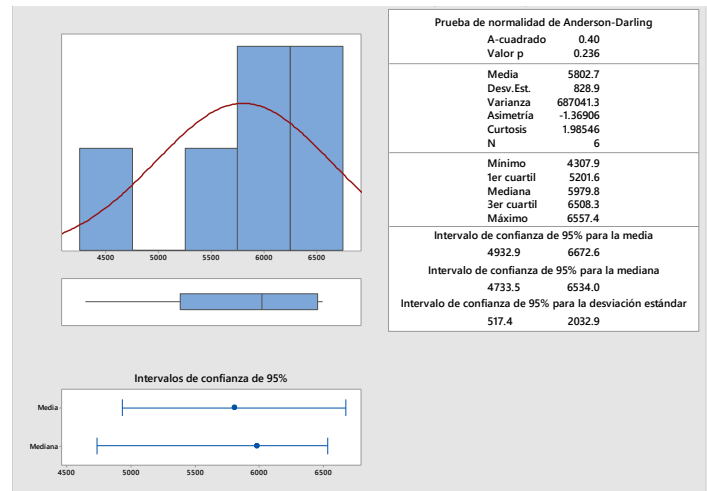


Figura 41. Resumen estadístico para la determinación de la carga máxima (kg) en cortante de los planos de falla de la población de datos de CLT en Melina y tres capas obtenidos de las pruebas a flexión en la dirección flatwise. Copyright 2021 por MiniTab18.

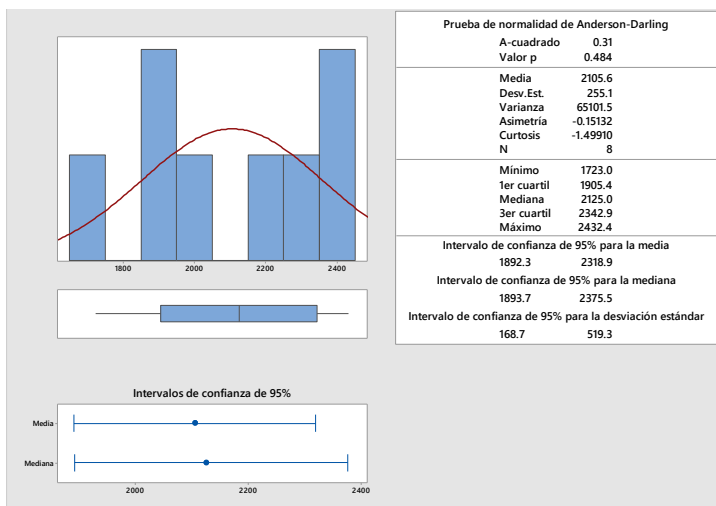


Figura 42. Resumen estadístico para la determinación de la carga máxima (kg) en cortante de los planos de falla de la población de datos de CLT en Melina y cinco capas obtenidos de las pruebas a flexión en la dirección edgewise. Copyright 2021 por MiniTab18.

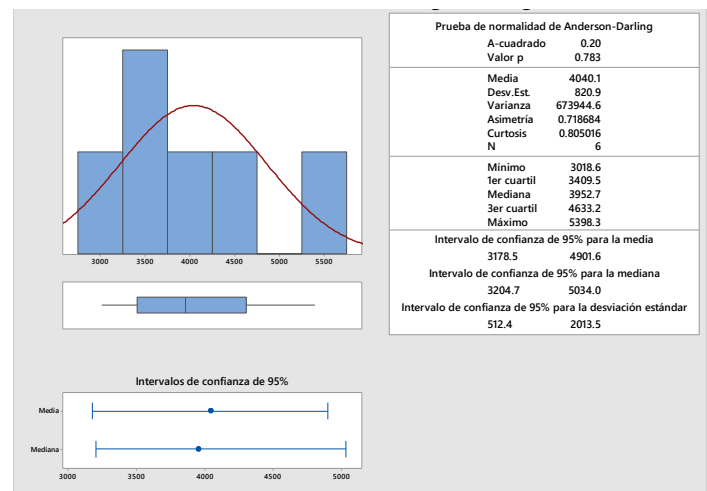


Figura 43. Resumen estadístico para la determinación de la carga máxima (kg) en cortante de los planos de falla de la población de datos de CLT en Melina y cinco capas obtenidos de las pruebas a flexión en la dirección flatwise. Copyright 2021 por MiniTab18.

## Análisis de la falla por cortante de las juntas entre piezas para los elementos de CLT en Teca

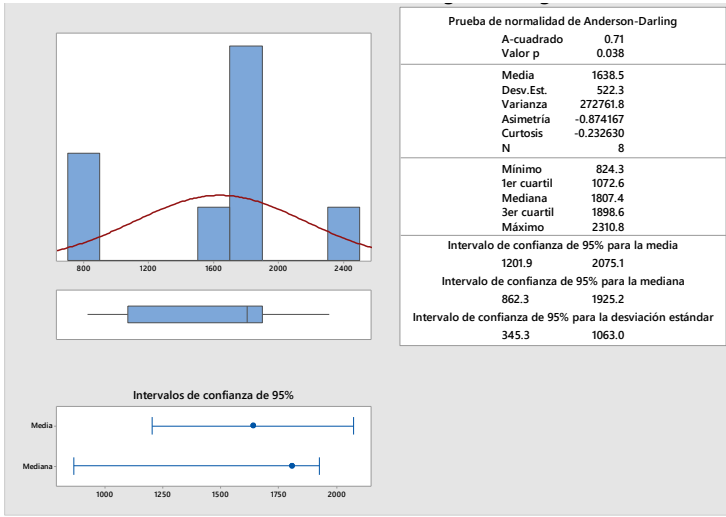


Figura 44. Resumen estadístico para la determinación de la carga máxima (kg) en cortante de los planos de falla de la población de datos de CLT en Teca y tres capas obtenidos de las pruebas a flexión en la dirección edgewise. Copyright 2021 por MiniTab18.

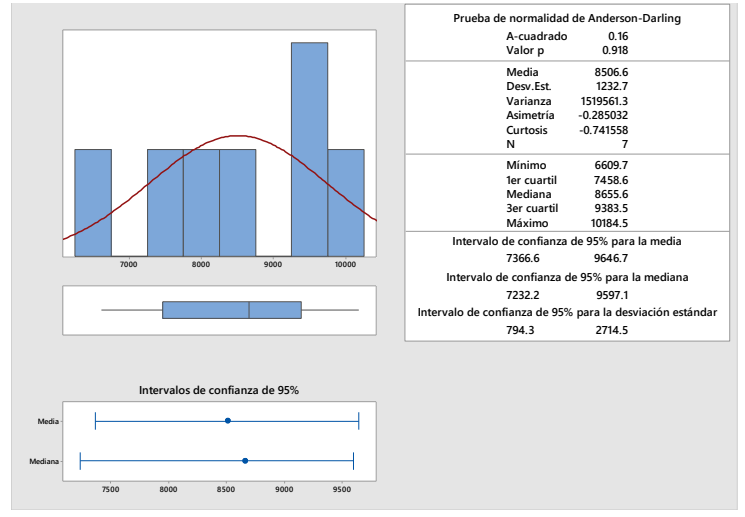


Figura 45. Resumen estadístico para la determinación de la carga máxima (kg) en cortante de los planos de falla de la población de datos de CLT en Teca y tres capas obtenidos de las pruebas a flexión en la dirección flatwise. Copyright 2021 por MiniTab18.

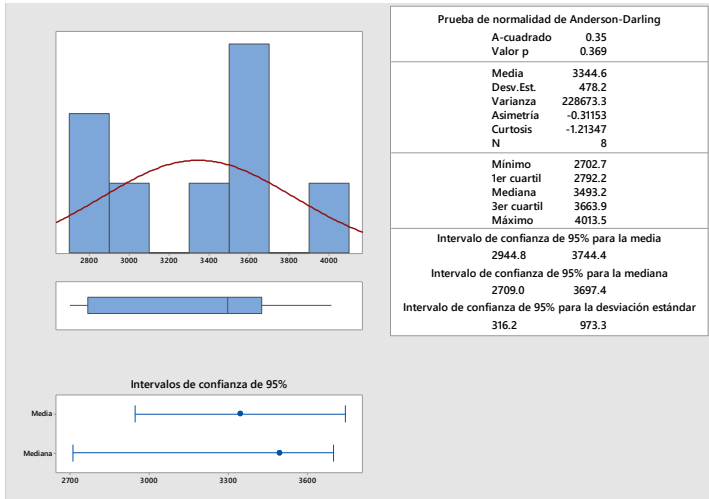


Figura 46. Resumen estadístico para la determinación de la carga máxima (kg) en cortante de los planos de falla de la población de datos de CLT en Teca y cinco capas obtenidos de las pruebas a flexión en la dirección edgewise. Copyright 2021 por MiniTab18.

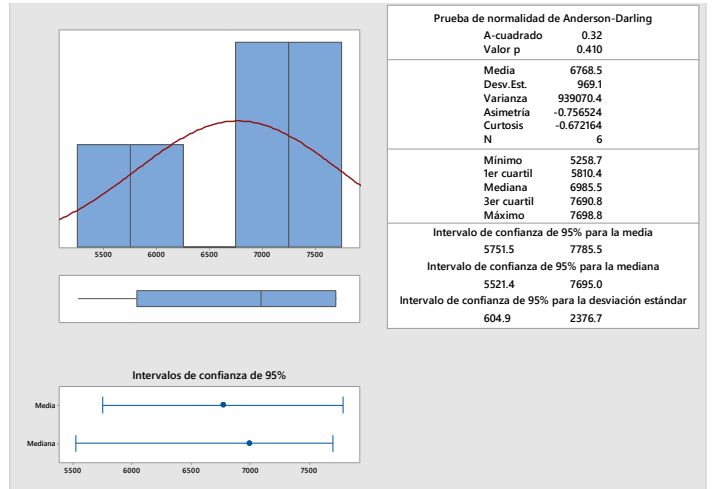


Figura 47. Resumen estadístico para la determinación de la carga máxima (kg) en cortante de los planos de falla de la población de datos de CLT en Teca y cinco capas obtenidos de las pruebas a flexión en la dirección flatwise. Copyright 2021 por MiniTab 2018.

## **Aportes de la investigación**

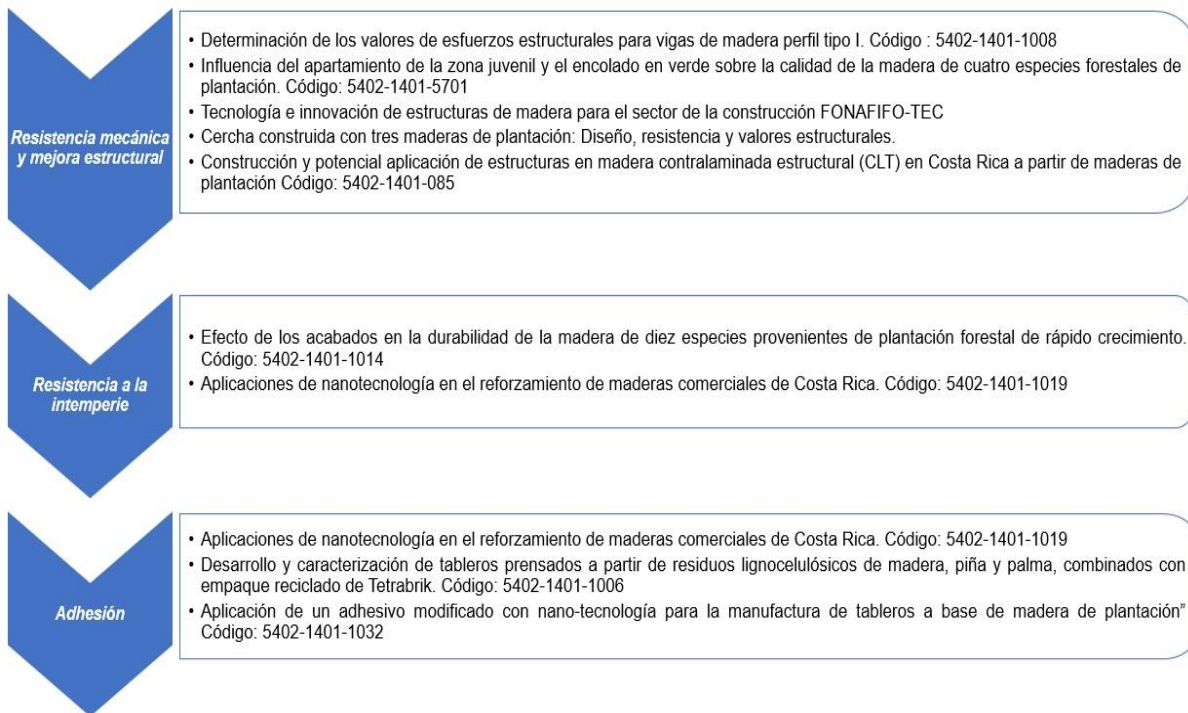
Este proyecto se enmarca en la línea de investigación tecnología de productos forestales, biomasa y bioenergía. El proyecto aportó resultados aplicables al sector de la industria de la madera nacional. Además de potenciar el uso de especies forestales costarricenses procedentes de plantación como la *Gmelina arborea* (melina) y *Tectona grandis* (teca). Por otra parte, a nivel mundial, principalmente en Europa, Estados Unidos y Canadá existe una tendencia de utilizar madera de plantación en productos de alta innovación que permite la construcción de edificaciones. Este material de ingeniería y de innovación es denominado Cross Laminated Timber (CLT), o madera contralaminada el cual es un producto de alta resistencia mecánica que ha permitido construir edificios de hasta 10 niveles.

Entonces en Costa Rica se dan algunas situaciones que podrían permitir que productos de madera con alta innovación puedan ser implementados en las construcciones con este tipo de producto ingenieril con madera procedente de plantaciones forestales, entre las razones esta que (1) la madera no debe seguir siendo desplazada por el acero, el concreto y otros materiales importados, ya que es un producto renovable y de menor consumo energético para su transformación, (2) existe un área importante en plantaciones forestales que pueden producir madera para la construcción de un producto de innovación como el CLT y (3) debe generarse la investigación básica de estos productos y mostrar al sector productivo que es posible construir productos innovadores con la tecnología existente en el país.

Diseñar productos innovadores con madera de plantación permitirá continuar con el desarrollo de las actividades económicas en las áreas rurales, dando como resultado un beneficio a esas poblaciones tan necesitadas en la actualidad. Además, de promover una opción de uso a un producto de ingeniería innovador como materia prima para el sector de la construcción en CR con características mecánicas y valores de diseño conocidos, para que esta información esté disponible para ingenieros civiles y arquitectos y ellos puedan diseñar y construir sus obras civiles con seguridad bajo

estándares de calidad y paralelo a ello potenciar el uso de la madera procedente de plantación en elementos estructurales con mayor valor agregado.

En la figura A, se establece una secuencia de proyectos desarrollados por el Área de Tecnología de Productos Forestales (ATPF) de la Escuela en Ingeniería Forestal del TEC que están asociados a una línea de investigación en productos de Ingeniería en Maderas.



**Figura A.** Secuencia de proyectos del ATPF, que han aportado al sector forestal inmersos dentro de la línea del desempeño de los productos de Ingeniería en Maderas.

### **Beneficios de los resultados obtenidos**

La madera procedente de plantación en Costa Rica, en los últimos 15 años ha sido importante para abastecer de madera al país. Actualmente, el área plantada cubre alrededor del 3,3% del área total del territorio nacional y según estadísticas reportadas por FONAFIFO, a través del programa de pago de servicios ambientales (PSA) se ha estado reforestando, en los últimos cinco años, a una tasa de 4 130 ha/año. El último censo de viveros forestales comerciales del país registró, a finales del 2012, una producción de 7 millones de plantas para reforestación de las cuales, más de un 80%

correspondieron a teca y melina. El gobierno y sus instituciones apoyados por el sector privado proponen elementos básicos en la política forestal y promover tanto las plantaciones forestales, como la tala selectiva en bosques primarios.

Sin embargo, la demanda de madera a nivel nacional ha llevado a la importación de madera y otros productos afectando el consumo de madera nacional. Pero este fenómeno para otros sectores es una oportunidad para abrir espacios para la reflexión en torno al sector forestal, evaluar alternativas y proponer nuevos materiales o productos de ingeniería abriendo nuevo mercado en el área de la construcción e industria del mueble. Maderas reforestadas, como la *Gmelina arborea* (melina) y *Tectona grandis* (teca) son las dos especies principales bajo el régimen de plantación en Costa Rica. La melina tiene una buena calidad superficial para dar acabados uniformes con tintes y lacas, responde muy bien a los procesos de cepillado, moldurado y lijado, es de secado lento con pocas torceduras, grietas y rajaduras, es susceptible a producir bolsas de humedad por presencia de madera ultra húmeda de tipo bacteriológico, en su crecimiento. La melina, se considera moderadamente resistente a la pudrición. Su rango de densidad seca ( $480\sim 560\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) la hace una especie apta para la construcción de madera contralaminada CLT.

Por otra parte, la teca es la especie de mayor reforestación comercial en Costa Rica y la zona tropical de América Latina. Se considera una madera de rápido secado y uniformidad en el contenido de humedad final en la carga de madera, el duramen de árboles jóvenes presenta una durabilidad natural moderada, en tanto que la madera de árboles viejos presenta una alta resistencia al ataque de insectos. En los procesos de cepillado, moldurado y lijado tiene un alto porcentaje de área libre de defectos. Esta especie por su rango de densidad seca ( $580\sim 830\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) es una excelente opción para fabricar madera contralaminada CLT.

Los resultados de este proyecto generaron conocimiento científico y tecnológico necesario para una transformación de la madera proveniente de plantaciones forestales en productos de ingeniería como la madera contralaminada CLT, poco



conocida en nuestro país. Permitiendo así a los productores forestales conocer las propiedades, las características y la palicabilidad de la madera que están cultivando y promover nuevos mercados con esta materia prima.

### **Justificación para nuevas investigaciones**

El progreso y desarrollo de la investigación dentro de la industria de productos a base de madera y la de los adhesivos ha tenido un buen éxito en las últimas décadas. Sin embargo, los requerimientos de la industria de la madera todavía inducen a mejoras técnicas en los adhesivos y su aplicación. Los adhesivos juegan un rol central dentro de la producción de materiales compuestos a base de madera, ya que el tipo y calidad del adhesivo influye en la eficiencia de la adhesión y esta sobre las propiedades de los paneles. La calidad de adhesión, las propiedades y eficiencia de los paneles a base de madera son determinadas por 3 parámetros principales: (i) calidad superficial de la madera, incluyendo la interface entre la madera y adhesivo, (ii) el adhesivo aplicado y (iii) condiciones de trabajo y parámetros de proceso.

El CLT es un producto de ingeniería prefabricado con madera aserrada de grado estructural. Las propiedades del material CLT varían según el fabricante y los materiales básicos utilizados en su producción. La especie de madera usada en la fabricación del CLT influye en la resistencia elástica de este material compuesto Se considera que los CLT proporcionan una buena resistencia sísmica, tiempos de montaje rápidos, retención de carbono y una reducción significativa de las emisiones de gases de efecto invernadero con respecto a otros materiales de construcción.

La aplicación de los paneles CLT es amplia, se pueden utilizar para paredes, suelos, techos, techos curvos y vigas, cubiertas de puentes, y aplicaciones temporales como plataforma de grúas y bases de caminos temporales. Puede ser fabricado con varios métodos y usando maderas tanto de coníferas como latifoliadas. La clave de éxito en la manufactura del CLT radica en la clasificación de la madera y la calidad de las uniones encoladas ya que el CLT se caracteriza por tener propiedades mecánicas homogenizadas. Las especies latifoliadas presentan una potencial resistencia mecánica mayor que las especies de coníferas, esta ventaja de las maderas

latifoliadas puede ser la clave para construcciones en madera con grandes luces y altos esfuerzos.

Dicho lo anterior, la posibilidad de proponer investigaciones asociadas al tema de materiales compuestos a base de madera es amplia, en el caso del CLT la combinación de especies, espesores de capas, combinación de especies entre capas, diferente configuración del CLT, cambios de ángulo entre capas, combinación entre capas madera sólida y otros materiales como plywood, Glulam, LVL entre otros. Sin dejar de lado la aplicación y uso de diferentes adhesivos.

Bajo este panorama, la posibilidad de generar nuevas propuestas de investigación y desarrollar nuevos proyectos, asociando el material madera con la industria de los adhesivos para madera es bastante amplia. Solo con mencionar que, la industria de los adhesivos para madera está en un rol dinámico ofreciendo productos con nuevas características y propiedades que deberán ser evaluadas bajo un modelo científico-experimental y comprobar su eficiencia para que productos de ingeniería a base de madera puedan mejorar su desempeño cuando presten su servicio final. Entonces investigar y estudiar los diversos resultados en la variabilidad de las propiedades físico-mecánicas en productos de ingeniería a base de madera como lo es el CLT, es importante y necesario. Por otra, parte también está la posibilidad de utilización de otras especies de plantación y bosque secundario con potencial para proponer nuevos materiales y aplicaciones.

Adicionalmente, la madera dentro de su constitución química está conformada por polímeros naturales, esto significa que, se abren nuevos horizontes para investigar asociando esa estructura polimérica de la madera con la estructura de los adhesivos, determinando la mejor compatibilidad o afinidad entre ambos materiales y así poder proyectar mejoras en la resistencia mecánica y mejoramiento de propiedades físicas en productos a base de madera.

Finalmente, y en asocio al OE 3., de este proyecto no se obtuvo los resultados esperados, de acuerdo con el informe reportado por un especialista en estructuras en el documento II anexo 1; pues el producto en concreto era generar una tabla con valores de diseño para los tableros CLT en teca y melina de 3 y 5 capas, A pesar de ello, esto abre una oportunidad para proponer y ejecutar un proyecto de investigación, en un futuro cercano, en donde se consideren las recomendaciones técnicas realizadas por el especialista en estructuras para obtener una base de datos más robusta que de soporte para proyectar una tabla con valores de diseño confiable. Pues esta herramienta, es el punto de partida fundamental para que los ingenieros civiles y en construcción realicen los cálculos estructurales y diseño de construcciones utilizando cualquier material.

**Ponencia oral aceptada** en The 64<sup>th</sup> SWST International Convention-Arizona EEUU. International Society of Wood Science & Technology (SWST)

**De:** swst2021convention <notifications@exordo.com>

**Enviado el:** jueves, 25 de febrero de 2021 05:43

**Para:** Roger Moya Roque <rmoya@itcr.ac.cr>

**Asunto:** Submission Receipt - Evaluation of glue-line delamination by establishing of ultrasound velocity mapping in CLT panels from plantation wood species

01 - 06 August 2021

## SWST2021CONVENTION

<https://swst2021convention.exordo.com>

Dear Roger,

You have received this email receipt, as you are listed as one of the co-authors on the submission below. Please take a moment to review the submission.

You can make changes by logging in to your Ex Ordo Dashboard and using the 'Edit' prompt on your My Submissions card (on or before Sunday, 28th February 2021 @ 23:59 America/Los\_Angeles). Further information on how to edit your submission can be found in the article below:

<https://support.exordo.com/article/474-editing-your-submission>

### Evaluation of glue-line delamination by establishing of ultrasound velocity mapping in CLT panels from plantation wood species

- Roger Moya (Instituto Tecnológico de Costa Rica)
- Carolina Tenorio (Instituto Tecnológico de Costa Rica)
- Freddy Muñoz (Escuela de Ingeniera Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica)

#### Abstract

Evaluation of the glue line in CLT panels and in other wood composite products in general is of great interest. Non-destructive methods such as determination of the velocity of ultrasound waves going through the materials are commonly applied to evaluate wood products. The interface quality, as in all glued structural products, should be tested during fabrication and during performance of this element while in use. Thus, establishing reliable and quality glue-line procedures is of interest. The delamination test measures layer separation in the laminated timber caused by failure of the adhesive itself or of the interface between the adhesive and the adherent material. The present work aimed at mapping ultrasound velocity (UV) and identifying problems of glue-line delamination in CLT panels of 3 and 5 layers made from *Gmelina arborea* and *Tectona grandis* timber. The results showed higher UV in the 3-layered panels in both timber species, and reduced UV and presence of regions of low velocity in UV isocurves of the 5-layered CLT panels, due to glue-line flaws, such as un-gluing and delamination. A UV reference value for glue line free of delamination problems of 927

and 1039 m/s was set for CLT panels of *G. arborea* of 3 and 5 layers, respectively, and of 1073 and 946 m/s for CLT panels of *T. grandis* of 3 and 5 layers, respectively. Values under the line of the reference UV suggest the presence of some anomalies or problems of delamination, such as gluing defects.

## Biography - Roger Moya

Roger Moya Roque received his B.S from the Instituto Tecnológico de Costa Rica, your M.S from Universidad de Concepción-Chile and PhD from Universidade de São Paulo-Brazil. At Brazil he studied density and anatomy variation on wood with x-ray densitometry and analysis image, respectively in the PhD research. He joined the Forestry School of Instituto Tecnológico de Costa Rica and has served on committees for large number organizations of Costa Rica. He has authored more than 130 scientific papers and 5 books.

## Topics

- Sustainable Living and Housing

## Other Properties

Presentation Format: Oral

Student Submission: No

Submission ID: 79