

Name of the Theme: e.g. 1.1. Taxonomy & Morphology

RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y FLEXIÓN DE UN LAMINADO DE GUADUA DE BAJO COSTO PRODUCIDO EN COLOMBIA

Compressive and bending strength of a low-cost laminated bamboo Guadua produced in Colombia.

Mateo Gutierrez Gonzalez

PhD researcher, The University of Queensland, Brisbane, Australia.
m.gutierrezgonzalez@uq.edu.au (corresponding author)

Sebastián Medina Sandoval

Ingeniero Civil, Universidad la Gran Colombia, Bogotá D.C., Colombia.
Sebastian.medina@ulagrancolombia.edu.co

Leonardo Andrés Agudelo Gómez

Ingeniero Civil, Universidad la Gran Colombia, Bogotá D.C., Colombia.
leonardoandres.agudelo@ulagrancolombia.edu.co

Resumen

En la última década, la producción de laminados de guadua se ha incrementado considerablemente, sin embargo, academia e industria aún se encuentran determinando cuales son las variables que afectan las propiedades físicas y mecánicas de este material, con el fin de optimizar su producción, regulación y desempeño. Con el fin de promover y mejorar la producción de laminados económicamente competitivos, esta investigación se centró en hacer una caracterización mecánica de un laminado de bajo costo producido en Colombia. A través del análisis de los modos de falla, fue posible describir algunas de las condiciones que gobiernan la ruptura del material cuando se encuentra sometido a compresión y flexión. Se encontró que el esfuerzo último promedio a compresión fue de 10.54 MPa, a flexión con esterillas longitudinales en la capa inferior fue de 14.00 MPa y con esterillas longitudinales en las capas superiores fue de 16.31 MPa. Adicionalmente, se pudo determinar que las fallas obtenidas para las diferentes solicitaciones de carga se debieron a un trabajo insuficiente del pegante al ser incapaz de transmitir esfuerzos cortantes entre las láminas de bambú.

Palabras clave: Guadua laminada, bambú laminado, esfuerzo último, modos de falla laminado, adhesivo, pegante.

Abstract

The laminated bamboo industry has increased considerably during the last decade, however, academia and industry are still looking for the variables that may affect its physical and mechanical properties in order to optimize its production, regulation and performance. This research is focused on making a mechanical characterization of a low-cost laminated bamboo (guadua) produced in Colombia aiming to promote and improve its local production. Through the analysis of different failure modes, it was possible to describe the patterns that govern the material failure, particularly when it is loaded under compression and bending. It was found that the average ultimate compression strength was 10.54 MPa, the ultimate bending strength with bamboo oriented longitudinally at the bottom layer was 14.00 MPa and with bamboo oriented longitudinally at upper layer was 16.31 MPa. Additionally, it was possible to determine that the governing failure mechanism either for compression or bending was due an

insufficient work of the adhesive, which it was unable to transmit the stress between the bamboo sheets.

Keywords: Laminated guadua, laminated bamboo, ultimate strength, failure modes, adhesive, glue.

1. Introducción

El uso del bambú, y particularmente de la especie *Guadua Angustifolia* Kunth es una práctica que ha venido incrementando en los últimos años en Colombia, América Latina y el mundo (Gutierrez Gonzalez, 2016, Van der Lugt et al., 2006). La industria de la construcción ha tenido la necesidad de recurrir a materiales naturales que generen un menor impacto ambiental, y es por esto que materiales como la madera y el bambú han venido siendo utilizados en elementos estructurales principales, así como en elementos no-estructurales tales como pisos, cielo rasos o recubrimientos de pared (Correal, 2016, Trujillo et al., 2016, Hidalgo López, 2003). La guadua posee características físicas y mecánicas sobresalientes que lo convierten en una opción atractiva para esta industria. Posee una alta tasa de renovación, tiene una baja densidad, y posee altos valores de resistencia y rigidez específica si se compara con otros materiales convencionales como el acero, el concreto, o el ladrillo (Nogata and Takahashi, 1995, Wegst et al., 2015). Sin embargo, el bambú en su estado rollizo posee algunas características que hacen que su comercialización, y manipulación sean todo un desafío. Primero, debido a composición anatómica y morfológica, es imposible tener una sección transversal homogénea (Liese and Köhl, 2015). El material no es perfectamente circular y tanto su diámetro como espesor de pared es variable (Trujillo and López, 2016), lo cual complica considerablemente los procesos constructivos, en especial las uniones o conexiones entre elementos estructurales o su conexión a otros elementos dentro de la edificación (Xiao and Sharma, 2016, Xiao et al., 2013, Li et al., 2013, Li et al., 2015). Igualmente, la dispersión en sus propiedades mecánicas es considerablemente alta cuando se utiliza de manera rolliza, lo cual disminuye los valores de esfuerzo característico con los cuales se deben hacer los cálculos en los diseños estructurales con el material (Sharma et al., 2015a). Debido a esta situación, la producción de laminados de bambú se ha convertido en una alternativa bastante apropiada para superar estos desafíos, logrando obtener secciones transversales homogéneas y de mayor tamaño, y disminuyendo significativamente la variabilidad en las propiedades mecánicas. Sin embargo, actualmente no se tienen procesos estandarizados para la producción de laminados de bambú, y se sigue trabajando en incrementar la eficiencia de los pegantes, y disminuir el alto desperdicio de material, la falta de tecnología apropiada para la transformación del bambú (especialmente en países en vía de desarrollo) y los altos costos de producción. De acuerdo con esta necesidad, el Centro de Tecnologías para la Construcción y la Madera del SENA (CTCM) regional Bogotá (Colombia) en alianza con la empresa Muiskey emprendieron el desarrollo de un tipo de laminado de guadua utilizando equipos y tecnología local, mano de obra no tecnificada, y materiales adquiridos localmente, disminuyendo la cantidad de desperdicio, así como el costo final del producto (Colorado, 2017). El objetivo de esta investigación se centró en hacer una caracterización de la resistencia mecánica de estos tableros ante esfuerzos de compresión y flexión. Igualmente, se analizó la influencia de los pegantes y los procesos de fabricación en los mecanismos de falla del tablero. Con el fin de establecer parámetros de referencia, se compararon los resultados con los resultados obtenidos por otros estudios, en donde se analizaron laminados producidos en China, Colombia e Inglaterra (Xiao et al., 2013, Sharma et al., 2015a, Sharma et al., 2015b, Correal et al., 2014, Takeuchi and Cortés, 2011, Archila et al., 2015a) para determinar la efectividad de los procesos escogidos en la fabricación de los tableros y la viabilidad del mismo para ser usado como material de construcción.

2. Materiales and métodos

2.1. Materiales

Elaboracion de los tableros

Para la elaboración de los laminados se utilizó *Guadua angustifolia* Kunth procedente del municipio de La Tebaida, Quindío. Los culmos de guadua fueron extraídos de la plantación y posteriormente

fueron transformados en esterilla (Ver figura 1), la cual se produce cortando los nudos y abriendo los culmos para obtener un tablero de bambú picado, tomado de las cepas y basas de los culmos de guadua. A continuación, los paneles de esterilla son trasladados a la planta de producción en donde se realiza la elaboración del laminado. Las láminas de esterilla fueron secadas al sol, y el panel se fabricó con láminas con un contenido de humedad por debajo del 12%. Contrario a los procesos desarrollados y/o descritos por otros Autores (Sharma et al., 2015a), no se utilizaron tiras de bambú rectangulares completamente uniformes en tamaño y longitud. Tampoco se removió la corteza exterior del material, disminuyendo considerablemente el desperdicio. Debido a que la superficie de las tiras de bambú no era completamente regular, los fabricantes decidieron utilizar un adherente expansivo de estructura alveolar a base de poliuretano y aditivos químicos el cual une las esterillas a través de un anclaje mecánico con las fibras de la guadua (Martínez, 2015). Para la realización de esta investigación, el fabricante proporcionó las probetas. Las dimensiones de las probetas debieron ser ajustadas debido a las limitaciones en el proceso de fabricación de los tableros, tal y como se explica en el numeral 2.2.

El laminado se forma pegando y prensando la esterilla, alternando el sentido de las fibras con respecto al anterior, es decir formando un tejido con fibras orientadas en ambas direcciones del plano giradas 90°. Normalmente solo se prensan dos capas de esterilla, las cuales van encontradas por la cara interna de la guadua, conformando un tablero. Los tableros se prensan en tamaños de 2.40 m x 1.40 m con una presión uniformemente distribuida de aproximadamente 0.90 MPa. El pegante utilizado consiste en una matriz de poliuretano expansivo y aditivos químicos. Después de que el tablero se encuentra prensado, se lijan y se cepillan las caras exteriores para mejorar el acabado. En la figura 2 se puede ver el acabado final del tablero, así como las probetas suministradas para la investigación.



Figura 1. Tableros de esterilla utilizados para la elaboración de los laminados (izquierda). Proceso de elaboración de los tableros (centro). Laminados utilizados en el cielo raso del proyecto Universidad La Salle - Solar Decathlon 2015 (derecha).



Figura 2. Laminado de guadua para las probetas del ensayo a flexión (izquierda) y compresión (derecha)

2.2. Ensayos de resistencia mecánica

Para la elaboración de los ensayos, se utilizaron las probetas fabricadas por la empresa Muiskey S.A.

quienes suministraron las probetas requeridas para la investigación. El tamaño de las probetas y las metodologías de ensayo se escogieron a partir de algunas normas técnicas propuestas para madera (ASTM Standard, 1994, European Committee for Standardization, 2012, ICONTEC, 2012, ICONTEC, 1973), sin embargo, debido a limitaciones en el proceso de fabricación o a limitaciones en el montaje de los ensayos, las dimensiones de las probetas no se ajustaron exactamente a las dimensiones propuestas en las normas consultadas. En algunos casos, las probetas no tuvieron secciones perfectamente rectangulares, pero estas variaciones geométricas no causaron ningún tipo de pre esfuerzo en el elemento. Para las velocidades de aplicación de la carga y cálculo de los esfuerzos últimos se siguieron los parámetros descritos en la norma técnica colombiana NTC 5950 y NTC 663 (ICONTEC, 2012, ICONTEC, 1973).

2.2.1. Ensayos a flexión

Para realizar los ensayos de flexión (figura 3 y 4), se utilizaron tres tipos de probeta diferentes: (T1) Tableros con las fibras longitudinales por abajo, (T2) tableros con las fibras longitudinales por arriba, y (T3) tableros de canto, con fibras longitudinales y transversales a cada lado de la probeta. Los ensayos se realizaron mediante el método de carga controlada, basándose en las normas mencionadas anteriormente (ICONTEC, 2012, ICONTEC, 1973) siguiendo el siguiente procedimiento: (1) Se realizó una descripción visual y cualitativa del estado de la muestra de ensayo. (2) Se tomaron medidas de la sección transversal de la probeta en por lo menos tres puntos diferentes a lo largo de la sección transversal, con el fin de obtener un promedio de los valores del ancho y espesor de la probeta. Las dimensiones finales escogidas se pueden ver en la figura 3. (3) Se procedió a localizar la probeta en la máquina de flexión, midiendo la distancia que se va a dejar entre apoyos y calibrando el deformímetro en ceros. (4) Se realiza el proceso de carga del material mediante deformación controlada según lo propuesto en la NTC 5950 hasta llegar a la falla del elemento (Ver figura 4). (5) Se realiza una descripción de la falla observada. El número total de probetas analizadas fue de 41.

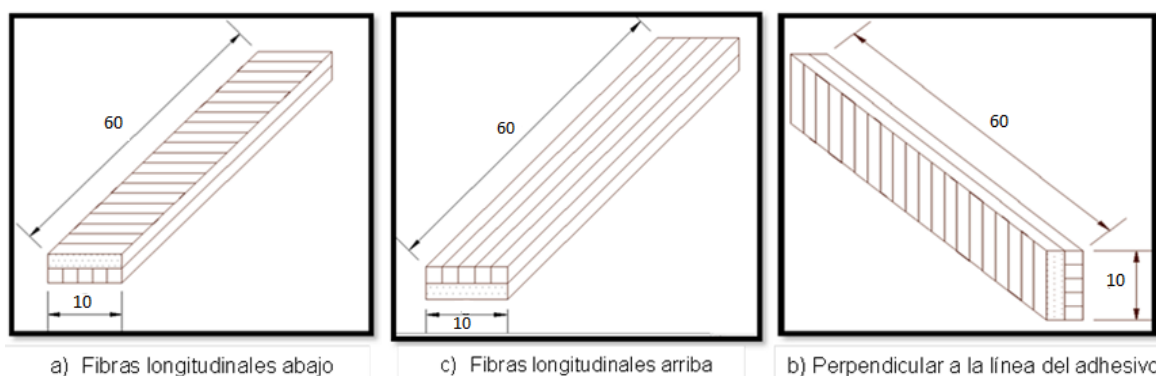


Figura 3. Dimensiones para las probetas a flexión para cada una de las configuraciones escogidas T1 (izquierda), T2 (centro) y T3 (derecha). Medidas expresadas en cm.

Para el cálculo del esfuerzo último a flexión o módulo de rotura del material (MOR) se utilizó la ecuación 1:

$$\sigma_f = \frac{Mc}{I_{xx}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Dónde: M , es el Momento flector máximo; c , es la distancia desde el eje neutro a la fibra más alejada de la probeta, en este caso la mitad de la altura de la probeta; e I_{xx} es el segundo momento del área o momento de inercia de la sección transversal respecto al eje x . Para este caso, como se cuenta con un ensayo a flexión de tres puntos o viga simplemente apoyada, se utiliza la ecuación 2 para calcular momento flector máximo en la probeta al momento de la falla:

$$M = \frac{PL}{4} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Dónde P corresponde a la carga puntual aplicada en el centro de la luz y L la longitud entre apoyos.

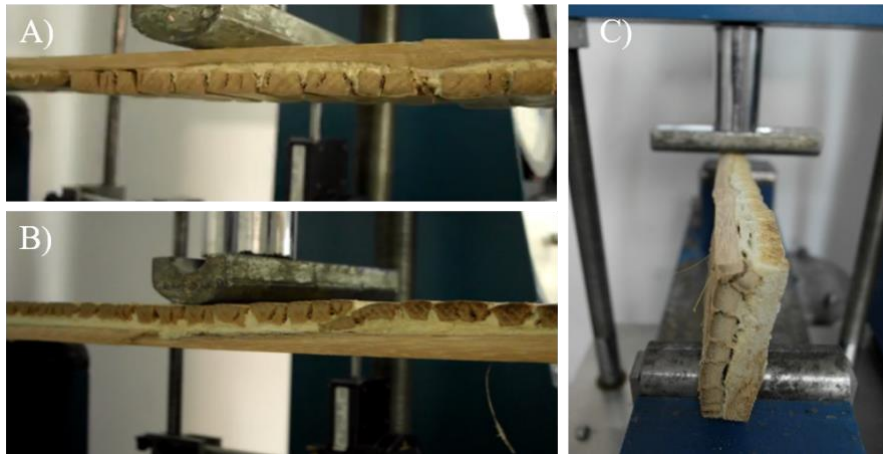


Figura 4. Ensayo de flexión para las diferentes configuraciones: T1(A), T2 (B) y T3 (C).

2.2.2. Ensayos a compresión

Para los ensayos a compresión se utilizaron 25 probetas con dimensiones de 10 cm x 10 cm x 25cm aproximadamente, tal y como se muestra en la figura 5. Para la elaboración de estas probetas fue necesario pegar varios tableros con el fin de poder obtener elementos de sección transversal cuadrada, buscando disminuir las relaciones de esbeltez para obtener una falla puramente por aplastamiento, y así no experimentar inestabilidades geométricas o pandeo lateral debido a las dimensiones de la probeta. Al igual que en la flexión, se siguió el procedimiento descrito en la NTC 5950. Para el cálculo del esfuerzo máximo a compresión se utilizó la expresión descrita en la ecuación 3.

$$\sigma_c = \frac{P_{falla}}{A} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Dónde σ_c es el esfuerzo ultimo a compresión en MPa; P_{falla} es la carga máxima en N y A corresponde al Área de la sección transversal en mm^2 .

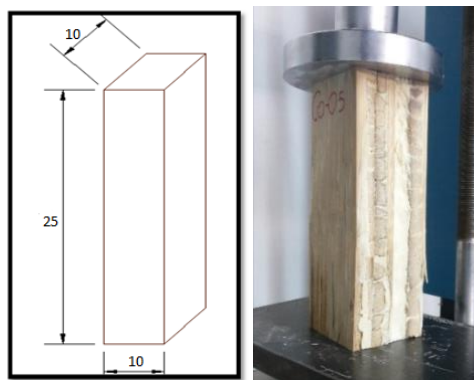


Figura 5. Dimensiones para las probetas del ensayo a compresión (izquierda). Ensayo a compresión en los laminados de guadua (derecha).

3. Resultados y discusión

3.1. Esfuerzos ultimos a flexión y compresión.

Con el fin de conocer el efecto de la orientación de las fibras y la disposición de la esterilla en la

resistencia última a flexión de los tableros, se procedió a hacer un análisis a cada una de las configuraciones de las probetas de manera independiente. Los resultados de los ensayos se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Resumen de resultados de los ensayos a flexión y compresión para las diferentes configuraciones.

Tipo de ensayo	Tipo de probeta	Esfuerzo último promedio (MPa)	Desv. Estandar (MPa)	Valor mínimo (MPa)	Valor máximo (MPa)
Flexión	(T1) Fibras Longitudinales abajo ($n=16$)	14.00	4.19	7.10	23.63
	(T2) Fibras longitudinales arriba ($n=15$)	16.31	3.63	9.92	21.97
	(T3) Tablero de canto ($n=6$)	1.29	0.24	1.00	1.54
Compresión	Esterillas orientadas en ambos sentidos ($n=25$)	10.54	3.24	2.86	17.03

Igualmente, en la figura 6, se presentan los diagramas de caja que resumen los resultados de los ensayos de esfuerzo último a flexión y a compresión. Esta gráfica permite evidenciar una alta variabilidad en los resultados la cual puede ser producto de las condiciones de producción del material, así como de las condiciones en las cuales fueron ensayadas las probetas.

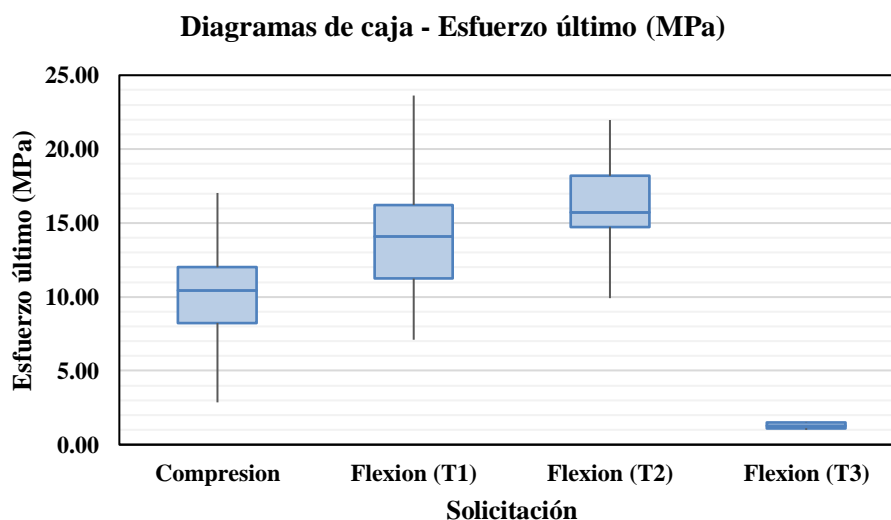


Figura 6. Diagramas de caja para cada una de los ensayos realizados teniendo en cuenta las diferentes configuraciones analizadas.

El esfuerzo último promedio de las probetas con las fibras longitudinales por abajo fue de 14.00 MPa, mientras que el esfuerzo último promedio a flexión con las esterillas longitudinales por arriba fue de 16.31 MPa. Sin embargo, para los tableros ensayados de canto, es decir con fibras longitudinales y transversales a cada lado de la sección transversal la resistencia fue considerablemente menor (1.29 MPa), seguramente debido a la configuración geométrica de los mismos, y a otros tipos de esfuerzo que se pueden inducir por la asimetría en la composición de la sección transversal (torsión). Los tableros con fibras longitudinales arriba y abajo presentaron desviaciones estándar bastante

significativas (4.19 y 3.63 MPa, respectivamente), revelando una alta dispersión en los datos. Por el contrario, las probetas ensayadas de canto presentaron una dispersión relativamente baja (0.24 MPa), y una muy buena repetibilidad. Las probetas ensayadas a compresión presentaron un esfuerzo último promedio de 10.54 MPa con una desviación estándar de 3.24 MPa, presentando una dispersión relativamente similar a los datos obtenidos a flexión. Varios autores han calculado la resistencia y rigidez última del panel laminado cruzado, basados en la resistencia y rigidez de cada lamina, utilizando sus propiedades mecánicas paralelas y perpendiculares a la orientación de la fibra (Oh et al., 2015). Debido a las limitaciones para caracterizar mecánicamente cada lamina, y a que no se contaba con las propiedades mecánicas geométricas de cada lamina, no fue posible utilizar calcular el esfuerzo último basado en la capacidad de cada lamina.

Se ha encontrado en los paneles de madera laminada cruzada, o CLT, que la resistencia y rigidez de estos elementos se ve afectada por la poca resistencia y rigidez que tienen los paneles cuando la carga a compresión es aplicada perpendicularmente a la orientación de las fibras, o en el caso de la flexión, cuando las fibras están orientadas perpendicularmente a la orientación longitudinal de la viga. Para la mayoría de los análisis, la resistencia de estas laminas es considerada nula (Oh et al., 2015, Christovasilis et al., 2016). Son pocos los investigadores que han realizado este tipo de análisis en bambú laminado cruzado (Archila et al., 2015b, Verma and Chariar, 2012), y este tema es aun motivo de investigación.

Al comparar los resultados obtenidos en esta investigación, con los esfuerzos últimos obtenidos en otras investigaciones realizadas en elementos de bambú laminado alrededor del mundo, los resultados muestran que los valores de resistencia alcanzados por el material de estudio son significativamente menores a los reportados anteriormente. La mayoría de estos laminados fueron fabricados con todas las láminas orientadas paralelamente al sentido longitudinal de la muestra. En la tabla 2 y 3 se pueden observar los resultados reportados por otros autores que también ensayaron elementos a flexión y compresión.

Tabla 2. Resumen de resultados de los ensayos a flexión obtenidos en otras investigaciones y su comparación con los resultados presentados en este trabajo.

<i>Investigación de referencia (autor, año)</i>	<i>Esfuerzo último a flexión encontrado (MPa)</i>	FIBRAS LONGITUDINALES ARRIBA		FIBRAS LONGITUDINALES ABAJO	
		Esfuerzo último a flexión Promedio (MPa)	Reducción respecto al esfuerzo último propuesto	Esfuerzo último a flexión Promedio (MPa)	Reducción respecto al esfuerzo último propuesto
<i>(Sharma et al., 2015b)</i>	79.0		79%		82%
<i>(Sharma et al., 2015a)</i>	80.0		80%		82%
<i>(Correal et al., 2014)</i>	103.0		84%		86%
<i>(Xiao et al., 2013)</i>	94.0	16.31	83%	14.00	85%
<i>(Takeuchi, 2014)</i>	91.6		82%		85%
<i>(Archila et al., 2015a)</i>	31.3		48%		55%
<i>(Archila et al., 2015a)</i>	74.1		78%		81%

Exceptuando los resultados presentados por Archila et al en 2015, se puede observar que la reducción en la resistencia a la flexión de este laminado se encuentra entre un 79% y un 85%, es decir que el material analizado solo alcanza entre un 15% y un 21% de la resistencia obtenida por otros tipos de laminados alrededor del mundo. Los resultados demuestran que los procesos de fabricación, la tecnología utilizada, la preparación de las láminas de bambú previo al pegado de las mismas y el tipo de pegante, entre otros, tienen una importancia fundamental en aumentar la resistencia mecánica en la interfaz bambú-pegante. Dichos estudios, mencionan la importancia que tiene cepillar, aplanar y retirar la corteza exterior de las tiras de bambú para mejorar la adherencia de las fibras y el pegante, controlar

la temperatura y presión ejercida durante el pegado, y hacer ensayos de adherencia entre láminas para verificar la acción del pegante, todo con el fin de aumentar la resistencia mecánica del laminado y garantizar que las fallas se den por alcanzar el límite de resistencia del bambú, mas no por una falla del pegante.

Respecto a los resultados obtenidos para las probetas de compresión, la tabla 3 presenta la comparación respecto a los valores de resistencia ultima obtenidos por otros autores (Sharma et al., 2015a, Sharma et al., 2015b, Correal et al., 2014, Takeuchi, 2014, Archila et al., 2015a). Al igual que en la flexión, la disminución en la resistencia también es considerable (La reducción esta entre un 74% y un 85%), lo cual indica que el laminado colombiano de bajo costo analizado en esta investigación solo puede alcanzar entre un 15% y un 26% de la resistencia última a la compresión reportada por los autores mencionados anteriormente. Esta situación puede deberse primero a que, en este caso, el material contiene gran parte de las fibras orientadas en el sentido perpendicular a la aplicación de la carga, lo cual disminuye significativamente la resistencia al ser comparado con productos laminados que solo tienen sus fibras orientadas en una dirección y que son cargadas paralelamente al sentido de orientación de sus fibras. Sin embargo, el proceso de fabricación, y la calidad de los materiales empleados también juegan un papel fundamental en la reducción de la resistencia, como ya fue mencionando anteriormente.

Tabla 3. Resumen de resultados de los ensayos a compresión obtenidos en otras investigaciones y su comparación con los resultados presentados en este trabajo.

<i>Investigación de referencia (autor, año)</i>	<i>Esfuerzo ultimo a compresión encontrado (MPa)</i>	<i>Esfuerzo ultimo a compresión promedio Obtenido (MPa)</i>	<i>Reducción respecto al esfuerzo ultimo obtenido</i>
<i>(Sharma et al., 2015b)</i>	60.0	10.54	82%
<i>(Sharma et al., 2015a)</i>	77.0		86%
<i>(Correal et al., 2014)</i>	62.0		83%
<i>(Xiao et al., 2013)</i>	51.0		79%
<i>(Takeuchi, 2014)</i>	69.2		85%
<i>(Takeuchi and Cortés, 2011)</i>	41.0		74%

3.2. Modos de falla a flexión y compresión

3.2.1. Falla a compresión

De acuerdo al análisis visual de los modos de falla en las probetas sometidas a compresión, se pudo observar que el 100% de las probetas presentaron una falla global inducida por inestabilidad lateral de las láminas. Contrario a lo esperado, las probetas no presentaron fallas por aplastamiento del bambú, y su falla se dio por un desprendimiento de las láminas de bambú debido a la falta de adherencia entre las mismas, lo cual condujo a un pandeo lateral de las láminas de manera independiente.

Una explicación al mecanismo de falla consiste en que el adhesivo no logra garantizar el trabajo conjunto del elemento, por lo cual la carga es distribuida en cada lamina. Generalmente las fallas se inician en los tableros exteriores, los cuales están cepillados y poseen una menor sección transversal, y por lo tanto se comportan como elementos esbeltos que no se encuentran soportados lateralmente, facilitando que la falla normalmente inicie en este punto, donde la carga crítica de falla es menor. Posterior a al colapso de este elemento la sección transversal se reduce y así continúan fallando sucesivamente las demás capas evidenciándose un desprendimiento de las mismas, y demostrando la poca efectividad ante esfuerzos cortantes y de tensión del pegante. En la figura 7 se puede apreciar como las láminas laterales de la probeta se desprenden y fallan por pandeo, conduciendo a una falla progresiva de la probeta. Este tipo de falla puede relacionarse con un análisis en donde no se considere la resistencia de las láminas transversales, lo cual no fue tenido en cuenta para el calculo de los esfuerzos últimos en este trabajo.



Figura 7. Tipos de falla en las probetas sometidas a compresión evidenciando pandeo local de las láminas de esterilla y falta de adherencia entre las capas de esterilla.

Del tipo de falla también se puede observar que los elementos de guadua no presentan una falla por aplastamiento, ya que no se observaron fisuras en los tableros cargados longitudinalmente, contrario a las fallas observadas en otro tipo de laminados, en donde es evidente que el esfuerzo último a compresión está gobernado por el aplastamiento de las láminas de guadua, y no por un colapso en el mecanismo de adherencia entre el pegante y las láminas de bambú (Sharma et al., 2015a, Sharma et al., 2015b, Correal et al., 2014, Takeuchi, 2014, Archila et al., 2015a). En la figura 8 se observan imágenes de probetas de bambú laminado ensayo en la Universidad de Queensland, Australia, en donde se puede ver que la falla del laminado de bambú, material similar al utilizado en la caracterización realizada por los estudios que se tomaron referencia, se da por el aplastamiento del bambú en sí, y no por un pandeo lateral de las láminas.

Al analizar la distribución de los tableros, también se puede observar que el proceso es poco homogéneo (ver figura 5 y 7), ya que las probetas se encuentran conformadas por tableros de esterilla de diferentes dimensiones, lo cual indica que el material fue cepillado previamente o que se utilizaron tableros de esterilla con espesores de pared significativamente diferentes. Esto implica que como el pegante no garantiza el trabajo en conjunto de los tableros, las fallas ocurren por lo general los tableros de menor sección transversal los cuales alcanzan las cargas críticas de pandeo a un menor valor de esfuerzo. Esta situación también genera que la distribución del pegante sea bastante heterogénea, induciendo concentraciones de esfuerzo por la anisotropía de la probeta.



Figura 8. Probetas de bambú laminado ensayadas en la universidad de Queensland en donde falla se encuentra gobernada por la falla por aplastamiento del bambú.

3.2.2. Falla a flexión y cortante

Con respecto a las fallas de flexión, se puede decir que la falla por flexión se encuentra gobernada por una falla a cortante del tablero. De acuerdo con lo observado en las probetas, tanto las probetas con fibras longitudinales por abajo como las probetas con fibras longitudinales por arriba terminan fallando

por un desprendimiento de los tableros en la mitad de la altura del tablero. De acuerdo a la teoría de mecánica de materiales, los esfuerzos máximos a cortante se presentan a la mitad de la altura de la sección transversal. Como el pegante no tiene la suficiente resistencia para soportar el cortante horizontal en el tablero, las láminas se desprenden y esta situación conduce a una falla de la probeta, tal y como puede verse en la figura 9.

Cuando las láminas de bambú se encuentran orientadas longitudinalmente por abajo (T1), la falla dominante en las probetas es por corte en la mitad de la altura, sumándose el desprendimiento entre sí de las esterillas transversales de la parte inferior.

De acuerdo a la figura 9, se puede observar como las fibras superiores sometidas a compresión, tienden a aplastarse unas contra otras, y como el pegante no es lo suficientemente resistente para garantizar el trabajo en conjunto, los tableros superiores e inferiores terminan desprendiéndose, ocurriendo una falla por cortante en el tablero, inducida debido a un esfuerzo de flexión. Esta situación conduce a que la falla por flexión no se da por una falla del bambú en sus fibras sometidas a tensión o compresión, sino por una falla de cortante en el pegante que une los tableros.



Figura 9. Falla de las probetas sometidas a Flexión en la configuración T1

Cuando las fibras longitudinales se encuentran arriba, el pegante es el principal responsable de transmitir los esfuerzos de tensión generados en la parte inferior de la viga. Como el pegante es incapaz de transmitir estos esfuerzos, la falla se inicia por un desprendimiento de las secciones transversales, dejando a las fibras longitudinales superiores como las únicas responsables de soportar la carga (Ver figura 10). Esto conduce a una significativa disminución de la sección y por lo tanto ocurre una falla a flexión de la lámina de arriba.



Figura 10. Falla a flexión para probetas T2 donde se evidencia falla a tracción y cortante del pegante en la parte inferior y en la mitad de la altura de la probeta.

En las probetas ensayadas de canto (T3) se puede observar que el mecanismo de colapso se debe a una falla local de las láminas orientadas paralelo a la colocación de la carga. La falla se da debido a un esfuerzo cortante vertical, la cual se evidencia claramente en la figura 11, donde las láminas se desplazan porque el pegante no puede soportar el esfuerzo cortante, y los esfuerzos de flexión deben ser resistidos únicamente por los tableros orientados longitudinalmente. Esta situación conlleva a una considerable reducción de la sección transversal, además de inducir otro tipo de esfuerzos como esfuerzos cortantes debidos a la torsión.

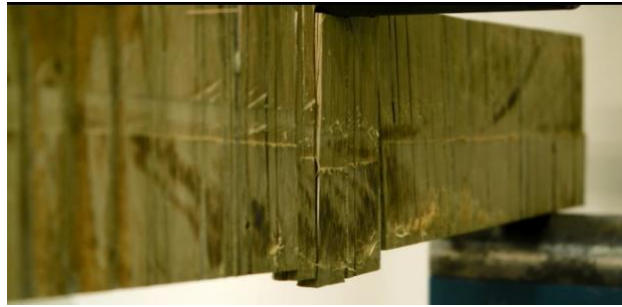


Figura 11. Falla del tablero por cortante vertical en la cara orientada paralela a la colocación de la carga puntual

3.2.2. Efecto del pegante

Después de analizar los valores de resistencia última, así como los modos de falla ante las diferentes solicitaciones de carga impuestas sobre los tableros, se cree pertinente mencionar que el pegante es uno de los principales responsables en la baja resistencia del material. Estudios previos señalan que los pegantes a base de poliuretano presentan menor resistencia mecánica y menor rigidez que otros tipos de pegantes usados para la elaboración de laminados con bambú, como los pegantes en base de formaldehidos o los pegantes de base fenólica (Stoeckel et al., 2013, Luna et al., 2014). Igualmente, la preparación de las superficies a las cuales se debe adherir el pegante, así como la cantidad y la distribución del mismo son fundamentales para conseguir una buena adherencia, situación que posiblemente influyó en la baja resistencia de los tableros analizados.

4. Conclusiones

Se estableció una metodología experimental para la realización de ensayos a compresión y a flexión en laminados de bambú, teniendo en cuenta diferentes configuraciones de acuerdo a la manera en la que las cargas podían ser transferidas al tablero. Se realizaron un total de 25 ensayos a compresión y 41 a flexión, así como su correspondiente análisis estadístico.

Se encontraron valores de esfuerzo último a compresión de 10.54 MPa, a flexión con esterillas longitudinales por abajo de 14.00 MPa y con esterillas longitudinales por arriba de 16.31 MPa.

La falta de estándares o procedimientos que regulen la elaboración de laminados de bambú genera que existan muchos métodos para la elaboración de los tableros, los cuales en muchos casos comprometen considerablemente la resistencia, rigidez, desempeño y durabilidad de elementos hechos en base a laminados de bambú. Procedimientos estandarizados deben garantizar que el pegante se distribuya de manera uniforme a lo largo del laminado, así como cierta homogeneidad en las láminas de bambú (origen, parte de la guadua, tamaño y forma, presencia de nudos, conexión entre las láminas).

Se identificó que el principal responsable de la falla es el pegante, el cual es incapaz de transmitir los esfuerzos entre los tableros de esterilla. La resistencia del laminado podrá mejorar en la medida en que se trabaje con un pegante que pueda transferir esfuerzos correctamente.

A pesar de que la resistencia alcanzada por los tableros puede ser pertinente para su uso como elemento no estructural en acabos (Cielo rasos, fachadas, pisos) o muebles, su baja resistencia mecánica limita considerablemente su uso en aplicaciones donde sea utilizado como elemento estructural principal.

Con el fin de mejorar las propiedades mecánicas del laminado, se debe reevaluar estrictamente su proceso de fabricación, considerando el uso de otras técnicas de prensado, pegado, así como realizar modificaciones al tipo de pegante utilizado.

5. Agradecimientos

Los Autores agradecen al Arquitecto Fabián Martínez (SENA/Muiskey, Colombia) por su colaboración al suministrar los tableros analizados en el presente estudio, así como su apoyo en el entendimiento del material. Igualmente agradecen a la Universidad La Gran Colombia por su gestión y colaboración en la realización de los ensayos enmarcados dentro de esta investigación

6. Referencias

- ARCHILA, H., TAKEUCHI, C. & TRUJILLO, D. Mechanical and physical characterization of composite bamboo-guadua products: Plastiguadua. 68th FPS-IC and WCTE 2014, 2015a.
- ARCHILA, H. A., BRANDON, D., ANSELL, M., WALKER, P. & ORMONDROYD, G. Evaluation of the mechanical properties of cross laminated bamboo panels by digital image correlation and finite element modelling. World Conference on Timber Engineering (WCTE) 2014, 2015b. University of Bath.
- ASTM STANDARD 1994. Standard test method for small clear specimens of timber, D143-94. ASTM. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- CHRISTOVASILIS, I. P., BRUNETTI, M., FOLLESA, M., NOCETTI, M. & VASSALLO, D. 2016. Evaluation of the mechanical properties of cross laminated timber with elementary beam theories. *Construction and Building Materials*, 122, 202-213.
- COLORADO, A. 2017. Nuevo sistema constructivo con corazón de Guadua. *Revista M&M (Revista el mueble y la madera)* [Online]. Available from: <http://revista-mm.com/arquitectura/nuevo-sistema-constructivo-corazon-guadua/> [Accessed Marzo 2017 2018].
- CORREAL, J. F. 2016. 14 - Bamboo design and construction. In: HARRIES, K. & SHARMA, B. (eds.) *Nonconventional and Vernacular Construction Materials.*: Elsevier Ltd.
- CORREAL, J. F., ECHEVERRY, J. S., RAMÍREZ, F. & YAMÍN, L. E. 2014. Experimental evaluation of physical and mechanical properties of Glued Laminated Guadua *angustifolia* Kunth. *Construction and Building Materials*, 73, 105-112.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION 2012. Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties (EN 408:2010+A1). Brussels: European Committee for Standardization.
- GUTIERREZ GONZALEZ, M. Structural design of bamboo guadua *angustifolia* Kunth buildings designed according to the requirements of the NSR-10, Title G.12. *Bamboo in the Urban Environment Symposium, 2016 Pittsburgh*.
- HIDALGO LÓPEZ, O. 2003. *Bamboo: The Gift of the Gods*, The Author.
- ICONTEC, I. C. D. N. T. 1973. *Maderas. Determinación de la resistencia a la flexión - NTC 663.* Bogota - Colombia: ICONTEC.
- ICONTEC, I. C. D. N. T. 2012. *Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas - NTC 5950.* Bogota - Colombia: ICONTEC.
- LI, H.-T., SU, J.-W., ZHANG, Q.-S., DEEKS, A. J. & HUI, D. 2015. Mechanical performance of laminated bamboo column under axial compression. *Composites Part B: Engineering*, 79, 374-382.
- LI, H.-T., ZHANG, Q.-S., HUANG, D.-S. & DEEKS, A. J. 2013. Compressive performance of laminated bamboo. *Composites Part B: Engineering*, 54, 319-328.
- LIESE, W. & KÖHL, M. 2015. *Bamboo - The Plant and its Uses*, Switzerland, Springer International Publishing.
- LUNA, P., TAKEUCHI, C. & CORDÓN, E. Mechanical Behavior of Glued Laminated Pressed Bamboo Guadua Using Different Adhesives and Environmental Conditions. *Key Engineering Materials*, 2014. *Trans Tech Publ*, 57-68.
- MARTÍNEZ, F. Nuevo Proceso de laminación industrializada, Muiskey S.A.S. III Simposio Internacional del Bambú y la Guadua "Recurso Natural para el Desarrollo", 2015 Bogota - Colombia. 44.
- NOGATA, F. & TAKAHASHI, H. 1995. Intelligent functionally graded material: Bamboo.

- Composites Engineering, 5, 743-751.
- OH, J.-K., LEE, J.-J. & HONG, J.-P. 2015. Prediction of compressive strength of cross-laminated timber panel. *Journal of Wood Science*, 61, 28-34.
- SHARMA, B., GATÓO, A., BOCK, M. & RAMAGE, M. 2015a. Engineered bamboo for structural applications. *Construction and Building Materials*, 81, 66-73.
- SHARMA, B., GATÓO, A. & RAMAGE, M. H. 2015b. Effect of processing methods on the mechanical properties of engineered bamboo. *Construction and Building Materials*, 83, 95-101.
- STOECKEL, F., KONNERTH, J. & GINDL-ALTMUTTER, W. 2013. Mechanical properties of adhesives for bonding wood—A review. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 45, 32-41.
- TAKEUCHI, C. & CORTÉS, J. C. 2011. Strengthening of the Bamboo Guadua Chain with production of laminates. *Revista Facultad Nacional de Agronomía, Medellín*, 64, 5983-5991.
- TAKEUCHI, C. P. 2014. Caracterización mecánica del bambú guadua laminado para uso estructural. Universidad Nacional de Colombia.
- TRUJILLO, D., KAMINSKI, S. & LAWRENCE, A. 2016. Structural use of bamboo Part 1: Introduction to bamboo. *The Structural Engineer*, August 2016, 4.
- TRUJILLO, D. & LÓPEZ, L. F. 2016. 13 - Bamboo material characterisation. Elsevier Ltd.
- VAN DER LUGT, P., VAN DEN DOBBELSTEEN, A. & JANSSEN, J. 2006. An environmental, economic and practical assessment of bamboo as a building material for supporting structures. *Construction and Building Materials*, 20, 648-656.
- VERMA, C. S. & CHARIAR, V. M. 2012. Development of layered laminate bamboo composite and their mechanical properties. *Composites Part B: Engineering*, 43, 1063-1069.
- WEGST, U. G., BAI, H., SAIZ, E., TOMSIA, A. P. & RITCHIE, R. O. 2015. Bioinspired structural materials. *Nat Mater*, 14, 23-36.
- XIAO, Y. & SHARMA, B. 2016. 15 - Engineered Bamboo, Elsevier Ltd.
- XIAO, Y., YANG, R. Z. & SHAN, B. 2013. Production, environmental impact and mechanical properties of glulam. *Construction and Building Materials*, 44, 765-773.

Lista de Figuras

Figura 1. Tableros de esterilla utilizados para la elaboración de los laminados (izquierda). Proceso de elaboración de los tableros (centro). Laminados utilizados en el cielo raso del proyecto Universidad La Salle - Solar Decathlon 2015 (derecha).

Figura 2. Laminado de guadua para las probetas del ensayo a flexión (izquierda) y compresión (derecha).

Figura 3. Dimensiones para las probetas a flexión para cada una de las configuraciones escogidas T1 (izquierda), T2 (centro) y T3 (derecha). Medidas expresadas en cm.

Figura 4. Ensayo de flexión para las diferentes configuraciones: T1(A), T2 (B) y T3 (C).

Figura 5. Dimensiones para las probetas del ensayo a compresión (izquierda). Ensayo a compresión en los laminados de guadua (derecha).

Figura 6. Diagramas de caja para cada una de los ensayos realizados teniendo en cuenta las diferentes configuraciones analizadas.

Figura 7. Tipos de falla en las probetas sometidas a compresión evidenciando pandeo local de las láminas de esterilla y falta de adherencia entre las capas de esterilla.

Figura 8. Probetas de bambú laminado ensayadas en la universidad de Queensland en donde falla se encuentra gobernada por la falla por aplastamiento del bambú.

Figura 9. Falla de las probetas sometidas a Flexión en la configuración T1.

Figura 10. Falla a flexión para probetas T2 donde se evidencia falla a tracción y cortante del pegante en la parte inferior y en la mitad de la altura de la probeta.

Figura 11. Falla del tablero por cortante vertical en la cara orientada paralela a la colocación de la carga puntual

Lista de caracteres

M	es el momento flector máximo
c	es la distancia desde el eje neutro a la fibra más alejada de la probeta
σ_f	es el esfuerzo último a flexión o módulo de rotura
I_{xx}	es el segundo momento del área o momento de inercia de la sección trasversal respecto al eje
x	
P	es la carga puntual aplicada
L	la longitud entre apoyos
T1	es la configuración del tablero 1 con fibras longitudinales abajo
T2	es la configuración del tablero 2 con fibras longitudinales arriba
T3	es la configuración del tablero 3 perpendicular a la línea del adhesivo
σ_c	es el esfuerzo último a compresión en MPa
P_{falla}	es la carga máxima en N
A	es el área de la sección transversal en mm ²