



## COMPORTAMIENTO A FLEXIÓN DE VIGAS DE MADERA REUTILIZADA UNIDA CON BAMBÚ (*Guadua angustifolia kunth*)

## BENDING PERFORMANCE OF BEAMS MADE WITH REUSED WOOD UNITED WITH BAMBOO (*Guadua angustifolia kunth*)

Guerra Riaño, Andrés Felipe <sup>(1)</sup> \*; Lozano Peña, Jorge Enrique <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup>MSc. Ingeniero Civil. Grupo de investigación Madera y Guadua, Universidad Nacional. Bogotá, Colombia

<sup>(2)</sup>MSc. Arquitecto. Grupo de investigación Madera y Guadua, Universidad Nacional. Bogotá, Colombia

\*Contacto: [afguerrari@unal.edu.co](mailto:afguerrari@unal.edu.co)

CÓDIGO:

### Resumen

En esta investigación se estudió el comportamiento mecánico de vigas compuestas por piezas de madera reutilizada obtenida en procesos de deconstrucción unidas con láminas de *Guadua angustifolia kunth* en la parte superior e inferior mediante el sistema de encolado prensado estructural, confinando la madera y asumiendo los mayores esfuerzos de tracción y compresión producidos por la flexión y el cortante. Para este propósito se realizaron ensayos según las normas ASTM D198 y NTC5279 que permitieron hallar parámetros mecánicos como el esfuerzo máximo de las fibras de *Guadua angustifolia kunth* en el límite proporcional, el módulo de rotura, el módulo de elasticidad y la ductilidad al desplazamiento. Como resultado se pudo determinar que el comportamiento mecánico del sistema no está en función de la densidad de las piezas de madera, el contenido de humedad y tamaño, sino de la resistencia mecánica de las fibras de *Guadua angustifolia kunth* y la calidad de la línea de adhesivo. Así mismo se pudo determinar que las vigas tienen un comportamiento dúctil antes de llegar a la falla.

*Palabras-clave: Madera reutilizada, bambú, Guadua angustifolia kunth, sostenibilidad, deconstrucción.*

### Abstract

This research studies the mechanical performance of beams composed of pieces of reused wood obtained in deconstruction processes, joined with *Guadua angustifolia kunth* sheets in the upper and lower part with structural pressing glue system and confining the wood, assuming biggest stresses of traction and compression, produced by bending and shear efforts. For this purpose, tests were according to ASTM D198 and NTC5279 standards to find mechanical parameters such as the maximum stress of the *Guadua angustifolia kunth* fibers in the proportional limit, the modulus of rupture, the modulus of elasticity and the ductility to displacement. The result was: the mechanical performance of the system is not a function of the density of the wood pieces, the moisture content and size, but of the mechanical strength of the *Guadua angustifolia kunth* fibers and the quality of the line of adhesive. Likewise, it was possible to determine that the beams have a ductile performance before the failure.

*Keywords: Reused wood, bamboo, Guadua angustifolia kunth, sustainability, deconstruction.*



## 1. INTRODUCCIÓN

Para reducir los impactos ambientales que genera la industria de la construcción se proponen diferentes alternativas que controlen la extracción de materias primas no renovables. Una opción son los procesos de deconstrucción, en los cuales, los elementos que componen la edificación pueden ser desensamblados utilizados nuevamente sin que se requiera un proceso de transformación. Los sistemas estructurales de madera permiten desensamblar sus componentes de manera sencilla, ya que sus uniones se basan en elementos metálicos. En esta investigación se estudió el comportamiento mecánico a flexión de vigas construidas con piezas de madera reutilizada, unida con esterilla de *Guadua angustifolia kunth* mediante el sistema de laminado estructural prensado encolado. El estudio experimental consistió en realizar ensayos de flexión a vigas de 3 m siguiendo los parámetros de la norma ASTM D198 - NTC5279. Encontrando el esfuerzo de la fibra en el límite proporcional, el módulo de rotura y el módulo de elasticidad de las vigas estudiadas.

## 2. VIGAS DE MADERA REUTILIZADA UNIDAS CON BAMBÚ MEDIANTE EL SISTEMA DE LAMINADO ESTRUCTURAL PENSADO ENCOLADO.

En esta investigación se recolectaron piezas de madera producto de demoliciones y se llevó a unas dimensiones establecidas retirando los elementos metálicos, las imperfecciones y los residuos de otros materiales como adhesivos y morteros. Las piezas de madera son colocadas una junto a otra y se unen mediante una lámina superior e inferior de esterilla de *Guadua angustifolia kunth* en el sistema de laminado encolado, confinando los elementos de madera reutilizada y asumiendo los esfuerzos máximos de compresión y tensión producto de la flexión (figura 1).



Figura 1 Vigas compuestas estudiadas

### 2.1. DECONSTRUCCIÓN.

Es una técnica en la cual se recuperan elementos de construcción durante el desmonte de una edificación, reduciendo el tratamiento de residuos y mitigando impactos ambientales generados en las etapas de extracción de materias primas, procesamiento y disposición final. [1] En los procesos de deconstrucción, los materiales que componen a las edificaciones pueden ser reutilizados y reciclados sirviendo de materia prima para la fabricación de nuevos elementos, haciendo que su ciclo de vida sea cerrado pasando de un análisis de ciclo de vida “creadle to grave” a uno “creadle to creadle” en el cual los materiales pueden ser recolectados, reutilizados o reciclados manteniendo una calidad aceptable. [2] El diseño para la deconstrucción (DfD) es un concepto en el cual, desde el diseño se proyectan las construcciones para que sus elementos se puedan desensamblar, reutilizar, manufacturar y reciclar en industrias. El principal objetivo de esta iniciativa es reducir la contaminación, aumentando la eficiencia económica y de los recursos naturales en demoliciones de edificaciones. [3]



## 2.2. MADERA REUTILIZADA Y MADERA LAMINADA ENCOLADA

Los sistemas estructurales para la construcción en madera hacen que sus elementos sean fáciles de desmontar y reutilizar, sus conexiones se basan principalmente en elementos metálicos como clavos, tornillos pernos y pletinas. En deconstrucción los tamaños de la madera y la forma en que se unen y se cortan los elementos determinan su reutilización, las piezas más grandes tienen más opciones a la hora de evaluar sus posibles nuevos usos. [4] Para llevar a cabo procesos de reutilización de madera es importante analizar las condiciones a las que estuvo expuesto el material en la edificación. [5]. La reutilización de elementos de madera a los que se les ha aplicado adhesivo, presentan una severa reducción en la resistencia cuando se vuelven a utilizar en productos encolados, en los elementos de madera reutilizada que tienen residuos de urea formaldehído se ve significativamente afectado el comportamiento del curado y la calidad de la adhesión del nuevo sistema. [6]. La madera laminada se define como la unión de prismas de madera unidos mediante diferentes métodos, conformando un elemento monolítico continuo en escuadría y en largo. Dependiendo del tipo de unión los elementos laminares pueden ser pernados, calvados o encolados. [7]. Entre los adhesivos sintéticos se encuentran los Formaldehidos, usualmente son a base de fenol formaldehido (PF), resinol formaldehido (RF), fenol-resinol formaldehido (PRF), úrea formaldehído (UF) y melamina formaldehido. Estos polímeros se deben mezclar con catalizadores, cargas y disolventes para su aplicación, el fraguado de estos materiales se produce por la policondensación de la resina cuando reacciona con el catalizador, el tiempo de fraguado depende en gran parte de la temperatura ambiente. [8]

## 2.3. BAMBÚ *Guadua angustifolia kunth* EN EL SISTEMA LAMINADO

La guadua se clasifica como un bambú leñoso del cual existen aproximadamente 1000 especies, 500 de estas especies presentes en América. El bambú *Guadua angustifolia kunth* se encuentra principalmente en países como Colombia, Venezuela y Ecuador, aunque también existe en grandes cantidades en países centroamericanos como Panamá. [9]. Las fibras se encuentran orientadas axialmente dando a la guadua una alta resistencia a la tensión paralela a la fibra, siendo más resistente en la pared externa debido a su dureza y mayor cantidad de fibras. [10] Para la *Guadua angustifolia kunth* en el sistema laminado estructural la calidad y la durabilidad del elemento depende del adhesivo y su resistencia a las condiciones de humedad [11]. En cuanto a la determinación del mejor adhesivo para la fabricación de vigas laminadas de bambú Gonzalez et al., 2009 estudiaron diferentes tipos de pegantes entre ellos la melamina formaldehido, fenol resorcinol formaldehido y poliuretano, encontrando que para todos la falla se presentó en la *Guadua angustifolia kunth* en la zona de interacción con el adhesivo, concluyendo que la falla no se produce en la línea de cola sino en el material blando de la guadua. Como conclusión de la investigación el adhesivo melamina formaldehido fue el mejor en cuanto a sostenibilidad y comportamiento mecánico. [12]

## 3. ANÁLISIS EXPERIMENTAL

### 3.1. TRANSFORMACIÓN DE MATERIAS PRIMAS.

La madera utilizada en esta investigación fue recuperada de la estructura de cubierta de edificios ubicados dentro de la Universidad Nacional de Colombia. Los elementos de madera fueron desmontados tratando de mantener su integridad. Los elementos metálicos de fijación fueron retirados (Figura 2), Cada elemento de madera es cortado perpendicularmente a su eje longitudinal, eliminando defectos como nudos, perforaciones, pudrición, rajaduras y manchas. Mediante este proceso se obtuvieron piezas de 18 cm de altura y 4 cm de espesor. Para el largo de las piezas se definieron diferentes medidas, 260 cm, 130 cm, 86 cm y 65 cm.



Figura 2 Retiro de elementos metálicos - Figura 3 Proceso de cepillado y corte

Las piezas se dejan planas por una de las caras de 18cm y se deja ortogonal una de las caras de 4cm. Este proceso se lleva a cabo utilizando una planeadora para madera. Luego se procede a cepillar cada elemento (figura 3), logrando un espesor uniforme para todas las piezas.

La *Guadua angustifolia kunth* que se utilizó en la construcción de las vigas se obtuvo en la región de El Socorro, Santander – Colombia, municipio ubicado sobre la cordillera oriental los Andes, esta región tiene una temperatura media de 23°C, y se encuentra a una altitud media de 1.300 m. sobre el nivel del mar. Para elaborar las láminas de esterilla, se realizan incisiones en el nudo, este procedimiento se lleva a cabo generando fisuras en los entrenudos. Posteriormente se abre la *Guadua* longitudinalmente y se retira la parte interna de los nudos. Además, se retira el tejido parenquimático para garantizar la adhesión de las fibras de *guadua* con el adhesivo, (figura 4).



Figura 4 Retiro de tejido parenquimatoso y nudos



Figura 5 Proceso de prensado

### 3.2. CONSTRUCCIÓN DE VIGAS.

Las piezas de madera tienen una altura de 16cm, esta altura corresponde a la máxima dimensión que se pudo recuperar teniendo en cuenta que todas las piezas deben tener la misma altura para garantizar la presión de prensado constante. En el sentido longitudinal, se usan diferentes dimensiones para mantener uniforme la distribución de las piezas en esta investigación se logra recuperar longitudes de 260 cm, 130 cm, 86 cm y 65 cm. Se construyen 12 vigas con 6 configuraciones diferentes. El adhesivo utilizado para adherir la esterilla de *Guadua angustifolia kunth* es úreamelamina formaldehído (MUF1442). Se debe garantizar una presión uniforme en los elementos a adherir durante un tiempo determinado por la dosificación de la mezcla (figura 5), luego curan los elementos a temperatura ambiente.

#### 3.2.1. ENSAYO DE ENSAYOS DE FLEXIÓN PARA MADERA EN TAMAÑOS ESTRUCTURALES ASTM D198 - NTC5279.

En este método la viga se somete a un momento flector aplicando dos cargas transversales impuestas simétricamente entre las reacciones (figura 6). El ensayo se realiza hasta la ruptura, se toman mediciones de la deflexión de la viga en el centro de la luz hasta alcanzar la deformación máxima permitida en las deflexiones admisibles contempladas en el título G del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente. Para cada viga se registraron los valores de fuerza (kgf) y desplazamiento (mm) (figura 7). Con los datos obtenidos en el ensayo de flexión siguiendo los parámetros descritos en las normas ASTM D198 - NTC5279 se realiza el cálculo del esfuerzo cortante y momento flector máximo para cada probeta.



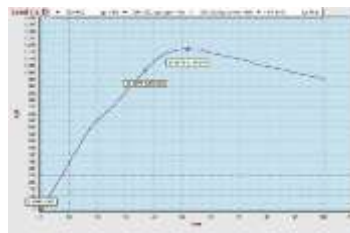


Figura 6 Ensayo de flexión. - Figura 7 Curvas carga (kgf) desplazamiento (mm).

### 3.2.2. CORTANTE MOMENTO FLECTOR Y DEFLEXIÓN PARA LA CARGA MÁXIMA Y LÍMITE PROPORCIONAL.

Probeta	Carga máxima P(N)	Cortante máximo V(N)	Momento máximo M(N*mm)	Deflexión Δ(mm)	Probeta	Carga en el límite proporcional P <sub>lp</sub> (N)	Cortante V <sub>lp</sub> (N)	Momento M <sub>lp</sub> (N*mm)	Deflexión Δ(mm)
G1A	11519.33	5759.67	5414086.22	48.56	G1A	10787.32	5393.66	5070038.05	37.72
G1B	14482.00	7241.00	6806539.91	41.53	G1B	13729.31	6864.66	6452775.70	39.19
G2A	5067.00	2533.50	2381489.05	30.53	G2A	4314.93	2157.46	2028015.22	14.70
G2B	3985.47	1992.74	1873171.65	18.13	G2B	1916.22	958.11	900623.12	6.74
G3A	2353.30	1176.65	1106051.85	7.264	G3A	2353.30	1176.65	1106051.85	7.26
G3B	3530.67	1765.33	1659414.24	24.34	G3B	2458.33	1229.17	1155415.58	15.02
G4A	4861.00	2430.50	2284669.76	26.17	G4A	4860.96	2430.48	2284651.33	26.24
G4B	6367.33	3183.67	2992645.27	47.23	G4B	4917.64	2458.82	2311292.07	25.00
G5A	5560.00	2780.00	2613199.01	25.11	G5A	4400.93	2200.47	2068437.25	17.42
G5B	7966.33	3983.17	3744177.01	35.63	G5B	3115.96	1557.98	1464503.54	10.30
G6A	2850.26	1425.13	1339623.89	10.12	G6A	2850.26	1425.13	1339623.89	10.12
G6B	6259.33	3129.66	2941884.97	35.38	G6B	3143.82	1571.91	1477593.45	10.48

Tabla 1 Esfuerzo cortante, momento y deflexión para la carga máxima y para carga en el límite proporcional

### 3.2.3. CÁLCULO DE LA CONSTANTE DE ELASTICIDAD EN EL ALMA "CE" POR EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS.

A partir de los valores de fuerza y desplazamiento en el rango elástico, se determina la constante de elasticidad en el alma. Es necesario conocer la tasa de deformación que determina el comportamiento del alma dentro para calcular "n" que relaciona el módulo de elasticidad de la guadua y la tasa de deformación en el alma calculando la ubicación del eje neutro y el momento de inercia de una sección transformada. Para conocer la constante de elasticidad del alma se realiza un modelo de elementos finitos de cada viga en las condiciones del ensayo de flexión para la carga registrada en los 8 mm de deformación (Figura 8), el módulo de elasticidad del alma será ajustado mediante iteraciones hasta alcanzar la deformación de los 8 mm. (Tabla 2).

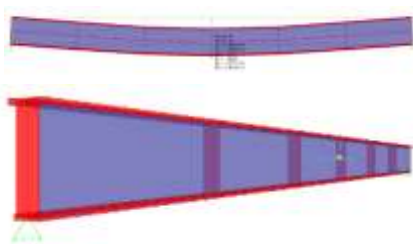


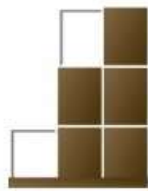
Figura 8 Modelo de elementos finitos

PROBETA	Carga (kgf)	Carga por bloque de carga (kgf)	Deflexión Δ(mm)	Constante de elasticidad del alma CE (kgf/m <sup>2</sup> )	Constante de elasticidad del alma CE (MPa)
G1A	386.4	193.2	8	125000000.00	1225.83
G1B	382.9	191.45	8	125000000.00	1225.83
G2A	272.8	136.4	8	33000000.00	323.62
G2B	197.8	98.9	7	16000000.00	156.91
G3A	234.37	117.185	7.5	23000000.00	225.55
G3B	177.93	88.965	8	8300000.00	81.39
G4A	279.2	139.6	8	35000000.00	343.23
G4B	273.6	136.8	8	32000000.00	313.81
G5A	287.53	143.765	8	41000000.00	402.07
G5B	271.87	135.935	8	32000000.00	313.81
G6A	240.13	120.065	8	20000000.00	196.13
G6B	280.08	140.04	8	36000000.00	353.04

Tabla 2 Constante de elasticidad del alma de las vigas.

### 3.2.4. CÁLCULO DE LA UBICACIÓN DEL EJE NEUTRO Y MOMENTO DE INERCIA I DE LA SECCIÓN.

Para calcular la ubicación del eje neutro y el momento de inercia de cada elemento es necesario analizar cada tipo de viga como un material heterogéneo de sección compuesta. Por lo tanto, es necesario realizar cálculos sobre una sección transformada asumiendo que toda la viga tiene el MOE de la *Guadua Angustifolia Kunth*. (Tabla 3)



	Ye (mm)	PATIN SUPERIOR					ALMA SECCIÓN TRANSFORMADA					PATIN SUPERIOR					Iv (mm <sup>4</sup> )
		b (mm)	h (mm)	A (mm <sup>2</sup> )	I (mm <sup>4</sup> )	Y (mm)	bt (mm)	h (mm)	A (mm <sup>2</sup> )	I (mm <sup>4</sup> )	Y (mm)	b (mm)	h (mm)	A (mm <sup>2</sup> )	I (mm <sup>4</sup> )	Y (mm)	
G1A	99.87	60	10	600	5000	175	4.52	160	722.59	2E+06	90	40	10	400	3333.3	5	8607091.56
G1B	99.87	60	10	600	5000	175	4.52	160	722.59	2E+06	90	40	10	400	3333.3	5	8607091.56
G2A	104.28	60	10	600	5000	175	1.19	160	190.76	406964	90	40	10	400	3333.3	5	7397595.62
G2B	105.56	60	10	600	5000	175	0.58	160	92.49	197316	90	40	10	400	3333.3	5	7166116.11
G3A	105.00	60	10	600	5000	175	0.83	160	132.96	283641	90	40	10	400	3333.3	5	7261889.88
G3B	106.22	60	10	600	5000	175	0.30	160	47.98	102358	90	40	10	400	3333.3	5	7059922.24
G4A	104.14	60	10	600	5000	175	1.26	160	202.33	431628	90	40	10	400	3333.3	5	7424593.88
G4B	104.35	60	10	600	5000	175	1.16	160	184.98	394631	90	40	10	400	3333.3	5	7384079.42
G5A	103.74	60	10	600	5000	175	1.48	160	237.01	505621	90	40	10	400	3333.3	5	7505326.89
G5B	104.35	60	10	600	5000	175	1.16	160	184.98	394631	90	40	10	400	3333.3	5	7384079.42
G6A	105.24	60	10	600	5000	175	0.72	160	115.61	246645	90	40	10	400	3333.3	5	7220927.90
G6B	104.07	60	10	600	5000	175	1.30	160	208.11	443960	90	40	10	400	3333.3	5	7438076.25

Tabla 3 Momento de inercia sección transformada

### 3.2.5. CÁLCULO DEL ESFUERZO MÁXIMO EN LA FIBRA EN EL LÍMITE PROPORCIONAL SF.

El esfuerzo máximo de tensión de las fibras en el límite proporcional se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$S_{ft} = \frac{M_{lp} * C_t}{I_v} \quad (1)$$

S<sub>ft</sub> = Esfuerzo de tensión de la fibra en el límite proporcional.

M<sub>lp</sub> = Momento para en el límite proporcional.

C<sub>t</sub> = Distancia del eje neutro a la fibra más alejada sometida a tensión.

I<sub>v</sub> = Momento de inercia de la viga.

Por otro lado el esfuerzo máximo de compresión de las fibras en el límite proporcional se calcula así:

$$S_{fc} = \frac{M_{lp} * C_c}{I_v} \quad (2)$$

S<sub>fc</sub> = Esfuerzo de compresión en el límite proporcional.

C<sub>c</sub> = Distancia del eje neutro a la fibra más alejada sometida a compresión.

Probeta	Momento M <sub>p</sub> (N*mm)	C <sub>t</sub> (mm)	I <sub>v</sub> (mm <sup>4</sup> )	S <sub>f</sub> (MPa)
G1A	5070038.05	99.87	8607091.56	58.83
G1B	6452775.70	99.87	8607091.56	74.87
G2A	2028015.22	104.28	7397595.62	28.59
G2B	900623.12	105.56	7166116.11	13.27
G3A	1106051.85	105.00	7261889.88	15.99
G3B	1155415.58	106.22	7059922.24	17.38
G4A	2284651.33	104.14	7424593.88	32.05
G4B	2311292.07	104.35	7384079.42	32.66
G5A	2068437.25	103.74	7505326.89	28.59
G5B	1464503.54	104.35	7384079.42	20.70
G6A	1339623.89	105.24	7220927.90	19.52
G6B	1477593.45	104.07	7438076.25	20.67

Tabla 4 Esfuerzo máximo de tensión de la fibra en el límite proporcional

Probeta	Momento M <sub>p</sub> (N*mm)	C <sub>c</sub> (mm)	I <sub>v</sub> (mm <sup>4</sup> )	S <sub>f</sub> (MPa)
G1A	5070038.05	80.13	8607091.56	47.20
G1B	6452775.70	80.13	8607091.56	60.07
G2A	2028015.22	75.72	7397595.62	20.76
G2B	900623.12	74.44	7166116.11	9.36
G3A	1106051.85	75.00	7261889.88	11.42
G3B	1155415.58	73.78	7059922.24	12.07
G4A	2284651.33	75.86	7424593.88	23.34
G4B	2311292.07	75.65	7384079.42	23.68
G5A	2068437.25	76.26	7505326.89	21.02
G5B	1464503.54	75.65	7384079.42	15.00
G6A	1339623.89	74.76	7220927.90	13.87
G6B	1477593.45	75.93	7438076.25	15.08

Tabla 5 Esfuerzo máximo de compresión de la fibra en el límite proporcional

### 3.2.6. CÁLCULO DEL MÓDULO DE RUPTURA SR.

El módulo de ruptura para las fibras en tensión se calcula con la siguiente ecuación:

$$S_{Rt} = \frac{M * C_t}{I_v} \quad (3)$$

S<sub>Rt</sub> = Esfuerzo de tensión de la fibra en el límite proporcional.

M = Momento para la carga máxima.

C<sub>t</sub> = Distancia del eje neutro a la fibra más alejada sometida a tensión.

I<sub>v</sub> = Momento de inercia de la viga.

Por otro lado el módulo de ruptura para las fibras en compresión calcula así:

$$S_{Rc} = \frac{M * C_c}{I_v} \quad (4)$$

S<sub>Rc</sub> = Esfuerzo de compresión de la fibra en el límite proporcional.

M = Momento para la carga registrada en el límite proporcional.

C<sub>c</sub> = Distancia del eje neutro a la fibra más alejada sometida a compresión.

I<sub>v</sub> = Momento de inercia de la viga.



Probeta	Momento M (N*mm)	C <sub>c</sub> (mm)	I <sub>x</sub> (mm <sup>4</sup> )	S <sub>xx</sub> (MPa)
G1A	5414086.22	99.87	8607091.56	62.82
G1B	6806539.91	99.87	8607091.56	78.98
G2A	2381489.05	104.28	7397595.62	33.57
G2B	1873171.65	105.56	7166116.11	27.59
G3A	1106051.85	105.00	7261889.88	15.99
G3B	1659414.24	106.22	7059922.24	24.97
G4A	2284669.76	104.14	7424593.88	32.05
G4B	2992645.27	104.35	7384079.42	42.29
G5A	2613199.01	103.74	7505326.89	36.12
G5B	3744177.01	104.35	7384079.42	52.91
G6A	1339623.89	105.24	7220927.90	19.52
G6B	2941884.97	104.07	7438076.25	41.16

Probeta	Momento M (N*mm)	C <sub>c</sub> (mm)	I <sub>x</sub> (mm <sup>4</sup> )	S <sub>xx</sub> (MPa)
G1A	5414086.22	80.13	8607091.56	50.40
G1B	6806539.91	80.13	8607091.56	63.37
G2A	2381489.05	75.72	7397595.62	24.38
G2B	1873171.65	74.44	7166116.11	19.46
G3A	1106051.85	75.00	7261889.88	11.42
G3B	1659414.24	73.78	7059922.24	17.34
G4A	2284669.76	75.86	7424593.88	23.34
G4B	2992645.27	75.65	7384079.42	30.66
G5A	2613199.01	76.26	7505326.89	26.55
G5B	3744177.01	75.65	7384079.42	38.36
G6A	1339623.89	74.76	7220927.90	13.87
G6B	2941884.97	75.93	7438076.25	30.03

Tabla 6 Modulo de rotura fibras a compresión    Tabla 7 Modulo de rotura fibras a tensión.

### 3.2.7. CÁLCULO DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD E

Para hallar el Modulo de elasticidad de cada viga se despeja E, de la ecuación de deflexión que para una viga simplemente apoyada con dos cargas puntuales ubicadas simétricamente la deflexión en el centro de la luz.

$$E = \frac{P*a}{24 \Delta I} * (3L^2 - 4a^2)(5)$$

a= Distancia entre la reacción y el punto de carga más cercano.

I = Momento de inercia de la viga.

L= Luz, distancia entre las reacciones.

E= Modulo de elasticidad MOE.

Δ= Deflexión.

P= Fuerza.

Probeta	Carga limite proporcional (N)	Δ limite proporcional (mm)	a(mm)	L(mm)	I <sub>x</sub> (mm <sup>4</sup> )	E (Mpa)
G1A	10787.32	37.72	940.00	2820.00	8607091.56	26447.55
G1B	13729.31	39.19	940.00	2820.00	8607091.56	32397.92
G2A	4314.93	14.70	940.00	2820.00	7397595.62	31583.89
G2B	1916.22	6.74	940.00	2820.00	7166116.11	31579.24
G3A	2353.30	7.26	940.00	2820.00	7261889.88	35510.13
G3B	2458.33	15.02	940.00	2820.00	7059922.24	18453.16
G4A	4860.96	26.24	940.00	2820.00	7424593.88	19862.04
G4B	4917.64	25.00	940.00	2820.00	7384079.42	21204.14
G5A	4400.93	17.42	940.00	2820.00	7505326.89	26793.34
G5B	3115.96	10.30	940.00	2820.00	7384079.42	32610.63
G6A	2850.26	10.12	940.00	2820.00	7220927.90	31046.43
G6B	3143.82	10.48	940.00	2820.00	7438076.25	32102.24

Tabla 8 Modulo de elasticidad

## 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los valores de cortante, momento flector y deflexión para la carga en el límite proporcional y la carga máxima presentan una alta dispersión en los resultados, esto se ve reflejado en la gran reducción de la resistencia en el valor característico del Módulo de ruptura y el esfuerzo de la fibra en el límite proporcional del sistema propuesto. Por otro lado, la dispersión en los valores de esfuerzo en la fibra en el límite proporcional fue la mayor de todos los datos recolectados, este comportamiento se debe a que fue difícil garantizar la calidad en toda la línea de encolado por las irregularidades que presenta la esterilla. En el momento en que el patín superior, sometido a esfuerzos de compresión, empieza deformarse y al despegarse de la madera termina el rango elástico del material, entonces la carga máxima al límite proporcional está directamente relacionada con la calidad del adhesivo sobretodo en el patín superior. A continuación, se presenta el resumen de los valores promedio, el valor para el quinto percentil y el valor característico. (Tabla 10)

	PROMEDIO	QUINTO PERCENTIL	VALOR CARACTERÍSTICO
Sft (MPa)	30.26	14.77	7.72
Sfc (MPa)	22.74	10.49	4.94
SRt (MPa)	39.00	17.94	11.36
SRc (MPa)	29.1	12.77	7.56
E (MPa)	28299.23	19228.04	16219.06

Tabla 10 Índice de ductilidad

### 4.1. RELACIÓN ENTRE EL CH DE LAS PIEZAS DE MADERA REUTILIZADA Y EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LAS VIGAS.



Se realizan gráficos relacionando la resistencia y el módulo de elasticidad con el contenido de humedad CH de la madera reutilizada en donde se presenta la falla y la desviación estándar de los contenidos de humedad de las piezas, como parámetro para determinar la influencia de la variación entre los contenidos de humedad de las piezas de madera que componen la viga. (Figura 9)

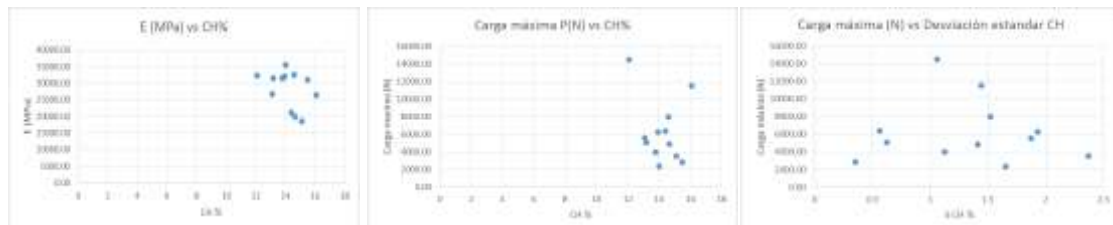


Figura 9 Modulo de elasticidad, carga en el límite proporcional, carga máxima vs CH de la pieza de madera en el lugar de la falla.

No se encuentra una tendencia clara entre la relación del contenido de humedad de la madera reutilizada y el módulo de elasticidad de las vigas, lo mismo ocurre entre el contenido de humedad y la carga máxima registrada en el ensayo de flexión. Al analizar la variación de los contenidos de humedad (desviación estándar del CH) de las piezas que componen las vigas con relación a la carga máxima tampoco se encuentra una tendencia definida. El comportamiento de las vigas no está determinado por el contenido de humedad de las piezas que componen el alma de las probetas ensayadas. Siempre y cuando se garantice la calidad de la línea de cola.

#### 4.2. RELACIÓN ENTRE EL TAMAÑO DE LAS PIEZAS DE MADERA REUTILIZADA Y EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LAS VIGAS

A pesar de que las vigas con piezas de 0.65 x 0.16 m. tienen una carga máxima mayor que las de 0.87 x 0.16 cm. Se puede ver una tendencia en el aumento de la resistencia con relación al tamaño máximo de las piezas que componen la viga. Las vigas con piezas de 1.30 x 0.16 m. fueron las que soportaron la mayor carga y las piezas de 0.87 x 0.16 cm la menor. (figura 10) Durante los ensayos de flexión se observó que existe un desplazamiento entre las piezas de madera que componen el alma de la viga, es por esto que se analiza la relación entre el módulo de elasticidad y la cantidad de juntas en cada viga, además de la relación entre el comportamiento de la carga máxima resistida respecto al número de uniones. (Figura 11)

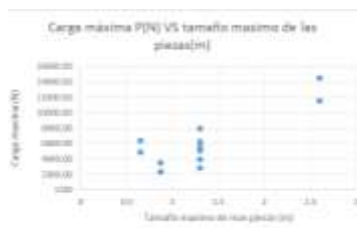


Figura 10 Carga máxima vs tamaño de las piezas de madera reutilizada

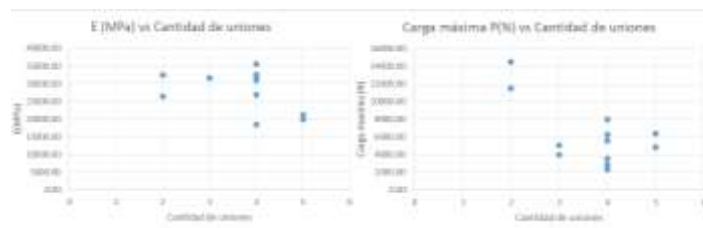


Figura 11 Modulo de elasticidad y Carga máxima vs Cantidad de uniones

En vigas con tres uniones se presenta la menor dispersión de resultados, la carga máxima se registró en vigas con dos uniones, sin embargo, el módulo de elasticidad máximo se presentó en vigas de cuatro uniones. El mejor comportamiento se obtiene en vigas con dos uniones, siendo estas vigas las que tienen la menor cantidad de juntas de todas las vigas analizadas.

#### 4.3. TIPOS DE FALLA





Comportamiento dúctil: falla por tensión en las fibras del patín inferior, este tipo de falla fue común en la mayoría de las probetas ensayadas, al empezar a aumentar la carga las vigas tienen un comportamiento elástico y empiezan a deformarse las fibras del patín superior que no están adheridas a la madera reutilizada. (Figura 15) En esta etapa hay un desplazamiento relativo entre las piezas de madera reutilizada, esta deformación solamente es controlada por la esterilla de guadua. La guadua realiza el mayor aporte a la rigidez de la viga. (Figura 16)



Figura 15 Deformación fibras del patín superior



Figura 16 Desplazamiento relativo piezas de madera reutilizada

Al aumentar la carga y la deflexión, la esterilla de la parte superior empieza a despegarse de las piezas de madera, en este punto se registra el final del comportamiento elástico de la viga, el inicio del comportamiento plástico se caracteriza por que las fibras de guadua del patín inferior empiezan a ser más solicitadas. Ya hay deformaciones permanentes. (Figura 17) Las deformaciones continúan y existen saltos en la gráfica carga deformación a medida que se despegan las fibras del patín superior, sin embargo, en todos los casos la viga continúa asumiendo carga hasta que supera la carga obtenida en el límite proporcional. (Figura 18)

Las deformaciones empiezan a ser mayores para pequeños incrementos de carga sin fallar (ductilidad), la falla se produce cuando se pierde la adherencia entre el patín inferior y el adhesivo o cuando las fibras de guadua superan su resistencia a la tensión. Las piezas de madera reutilizada no sufrieron daños en ninguna viga y se pueden reutilizar nuevamente. (Figura 19)



Figura 17 Separación de la guadua del patín superior.



Figura 18 Esfuerzos asumidos por el patín inferior.



Figura 19 Falla por tensión de las fibras del patín inferior.

## 5. CONCLUSIONES

La mayor carga máxima registrada en los ensayos de flexión fue de 14482.00 N, para la viga compuesta por dos piezas de madera de baja densidad en los extremos (0.2m x 0.16m) y un elemento central de madera de alta densidad (2.60m x 0.16), esta configuración presenta el menor número de uniones y la pieza de madera de mayor longitud. La menor carga máxima registrada fue de 2353.30 N, para la viga compuesta por dos elementos de alta densidad en los extremos (0.87m x 0.16m), y tres elementos centrales de baja densidad: un elemento central de (0.87m x 0.16m) y dos elementos a cada lado de (0.2m x 0.16m). El esfuerzo de la fibra más alejada del eje neutro en el límite proporcional y el módulo de rotura se calcularon para las fibras sometidas a tensión y a compresión, los máximos esfuerzos se producen en las fibras inferiores sometidas a tensión.

La dispersión de los resultados fue bastante alta, para el esfuerzo de la fibra más alejada del eje neutro en el límite proporcional se tiene un coeficiente de variación de 61.24% en tensión y 67.85% a compresión. En cuanto al módulo de ruptura el coeficiente de variación es de 47.01% a tensión y 52.37% a compresión. Los valores del módulo de elasticidad tuvieron un coeficiente de variación del 20%, teniendo la menor dispersión de todos los resultados. La dispersión alta hace que los valores promedio de esfuerzo de la fibra más alejada del eje neutro en el límite



proporcional y módulo de ruptura se reduzcan en más de un 50% para el quinto percentil y en más del 70% para el valor característico. En el caso del módulo de elasticidad se reduce en un 32% para el quinto percentil y 43% para el valor característico. La dispersión en los resultados se produce por la variación en la calidad en el proceso de encolado teniendo en cuenta que las irregularidades en el espesor de la esterilla provocan deficiencias de presión en algunas zonas, así mismo es difícil mantenerla en su sitio justo antes de aplicarles presión.

No se encontró una relación entre el contenido de humedad de las piezas de madera reutilizada en donde ocurre la falla y la resistencia de las vigas, lo mismo ocurre con el tamaño máximo de las piezas utilizadas y con el número de uniones. El comportamiento depende entonces de la resistencia los elementos de *Guadua angustifolia kunth* y la calidad de la línea de adhesivo. En vigas con tres uniones se presenta la menor dispersión de resultados, la carga máxima se registró en vigas con dos uniones, sin embargo, el módulo de elasticidad máximo se presentó en vigas de cuatro uniones. El mejor comportamiento se obtiene en vigas con dos uniones, siendo estas vigas las que tienen la menor cantidad de juntas de todas las vigas analizadas. En cuanto a la relación entre el módulo de elasticidad y la densidad de la madera reutilizada, el valor máximo y mínimo del módulo de elasticidad se reportó para las vigas construidas con el 65% de maderas de alta densidad, la menor dispersión en los resultados se logró con 87% de maderas de alta densidad. No se establece una tendencia clara entre el módulo de elasticidad de la viga y la densidad de las piezas de madera reutilizada que compone el alma de la viga. Las vigas tienen un comportamiento dúctil, al finalizar su comportamiento elástico, las vigas continúan deformándose plásticamente sin fallar.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Environmental Protection Agency United States.(2008). Lifecycle Construction Resource Guide.
- [2] McDonough, W and Braungart . M. Cradle to cradle: Remaking the way we make things.
- [3] A. B. Guy, "Design for Deconstruction and Materials Reuse."
- [4] D. Zabusova.(2014) "Design for Deconstruction," no. October.
- [5] R. Flak, D. Green, and S. C. Lantz.(1999). "E VALUATION OF LUMBER RECYCLED FROM AN INDUSTRIAL MILITARY BUILDING," vol. 49, no. 8816, pp. 49–55.
- [6] R. Zhong, J. Gu, Z. Gao, D. Tu, and C. Hu. (2017). "International Journal of Adhesion and Adhesives Impacts of urea-formaldehyde resin residue on recycling and reconstitution of wood-based panels," vol. 78, no. May, pp. 60–66.
- [7] Perez, V.(1992) "Manual de madera laminada" Instituto forestal de Chile. Santiago.
- [8] Quevedo, V.(2000). "Adherencia y adhesivos para madera".
- [9] Olarte, Arenas.(2012). "Diseño de conexiones en elementos estructurales de bambú - Guadua laminada pegada prensada para un proyecto de vivienda".
- [10] Carvajal W, Ortegon W & Romero. (1981). "Elementos estructurales en bambú".
- [11] J. Lozano. (2010). "Diversas aplicaciones del bambú en la arquitectura." 2010.
- [12] H. Gonzalez, S. Hellwing, and J. Montoya.(2009) "DETERMINACIÓN DEL ADHESIVO ÓPTIMO EN LA FABRICACIÓN DE VIGAS DE BAMBÚ ( *Guadua angustifolia* ) PROCEDURE TO DETERMINE THE OPTIMUM ADHESIVE FOR MANUFACTURING TIMBER OF BAMBOO ( *Guadua angustifolia* ).
- [13] M. Estrada. (2016) "Modelo numérico micromecánico del proceso de fractura de estructuras fabricadas con bambú *Guadua angustifolia*."