

**ESTUDIO DE LA COMPOSICIÓN Y LAS PROPIEDADES  
MECÁNICAS DE LOS ELEMENTOS DE UNIÓN ELABORADOS EN  
GUADUA PARA ESTRUCTURAS POLIÉDRICAS DE PUENTES Y  
OTRAS APLICACIONES**

**DANIEL MONTOYA GONZÁLEZ**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA**

**FACULTAD INGENIERÍA MECÁNICA**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**PEREIRA**

**2016**

**ESTUDIO DE LA COMPOSICIÓN Y LAS PROPIEDADES  
MECÁNICAS DE LOS ELEMENTOS DE UNIÓN ELABORADOS EN  
GUADUA PARA ESTRUCTURAS POLIÉDRICAS DE PUENTES Y  
OTRAS APLICACIONES**

**DANIEL MONTOYA GONZÁLEZ**

**Tesis presentada en la asignatura de  
Proyecto de grado como nota de  
Requisito de grado presentado al profesor  
PhD. José Luis Tristancho Reyes**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
PEREIRA**

**2016**

## TABLA DE CONTENIDO

### RESUMEN

### CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

#### 1.1 Marco teórico - Antecedentes

1.1.1 Guadua, recurso natural sostenible

1.1.2 Guadua como material de construcción

1.1.3 Puentes en guadua

1.1.4 Sustratos o materiales de refuerzo

#### 1.2 Aspectos legales y normatividad

1.2.1 Norma NTC 5301:2007 Preservación y secado del culmo de *Guadua angustifolia* Kunth

1.2.2 Norma NTC 5407:2006 Uniones de estructuras con *Guadua angustifolia* Kunth

### CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA Y EXPERIMENTOS

#### 2.1 Objetivos

2.1.1 Objetivo general

2.1.2 Objetivos específicos

#### 2.2 Método de investigación

#### 2.3 Parte experimental

2.3.1 Evaluación del material o sustrato de refuerzo

2.3.1.1 Geometría de la probeta realizada

2.3.1.2 Resultados de pruebas a compresión para material o sustrato de refuerzo

2.3.1.3 Resultados de pruebas a tracción para material o sustrato de refuerzo

2.3.2 Análisis de resultados material o sustrato de refuerzo

2.3.3 Evaluación de los elementos en guadua con material de refuerzo

2.3.3.1 Diseño del elemento de unión en Guadua tipo punta de lápiz

2.3.3.2 Resultados pruebas a tracción del elemento en Guadua con refuerzo

2.3.3.3 Resultados pruebas a compresión del elemento en Guadua con refuerzo

2.3.4 Evaluación de los herrajes y elementos metálicos

2.3.5 Evaluación de guaduas cepas sometidas a compresión con el material de refuerzo

### **CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE RESULTADOS**

3.1 Análisis y conceptos de los elementos de unión hechos en guadua

3.1.1 Ensayos de los prototipos del elemento en Guadua a tracción

3.1.2 Ensayos de los prototipos del elemento en Guadua a compresión

3.2 Análisis y conceptos de los herrajes y elementos metálicos

3.3 Análisis y conceptos de guaduas cepas sometidas a compresión con material de refuerzo

### **CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

4.1 Respuesta de los resultados obtenidos

### **BIBLIOGRAFÍA**

### **ANEXOS**

## **RESUMEN**

La presente investigación consistió en desarrollar y definir un elemento hecho principalmente a base de guadua, que pudiera resistir con las solicitaciones de carga presentes en estructuras poliédricas, más específicamente en un puente peatonal que se construirá en la Universidad Tecnológica de Pereira. Por tal motivo, se debió comenzar tomando como base investigaciones previas realizadas en la universidad sobre propiedades físico-mecánicas de la Guadua para todo el proceso de diseño, probando inclusive el material de refuerzo que deberá llevar por dentro la guadua para proporcionar una mayor resistencia al elemento de unión y poder soportar los esfuerzos del puente y compensar las debilidades de ésta. (Material hueco por dentro)

El proceso de investigación se desarrolló de manera sistemática, empezando por el estudio y definición del material de refuerzo, probando diferentes tipos de materiales compuestos y verificando sus propiedades físico-mecánicas a través de pruebas de laboratorio. Una vez se tuvo definido la composición exacta del material de refuerzo, se procedió a realizar el diseño detallado del elemento de unión hecho en guadua, definiendo aspectos como su forma, tamaño, accesorios, configuración y que debería llevar por dentro el material seleccionado anteriormente; igual que con el material de refuerzo, se realizaron pruebas de laboratorio para obtener los resultados que este prototipo del elemento de Guadua puede proporcionar, de esta manera se realizaron modificaciones de diseño para aumentar la resistencia mecánica de este hasta lograr un resultado aceptable para ser utilizado en puentes peatonales.

# CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

## 1.1 Marco teórico – Antecedentes

### 1.1.1 Guadua, recurso natural sostenible

#### *Guadua angustifolia* Kunth

*Guadua angustifolia* Kunth, es una de las especies más importantes en América, alcanza alturas de 20m a 25m y diámetros de 11 cm en promedio, con un crecimiento diario de 10 cm a 15 cm, con un espesor de 30 a 35 mm de pared en el tercio inferior del tallo, disminuyendo a medida que asciende el culmo hasta un valor aproximado de 10 mm, el crecimiento de los rebrotes equivale a una producción diaria de 500 cm<sup>3</sup> (Londoño X., 2000) en volumen neto. Este aumento de biomasa no es logrado por ningún árbol, lo sorprendente de esto es que alcanza hasta una altura de 20m sin poseer ninguna hoja para la asimilación de energía solar que es necesaria para su crecimiento (Liese W., 2005), se considera el tercer Bambú más gigante del mundo, superado por las especies *Dendrocalamus giganteus* y *Dendrocalamus sinicus*, fue seleccionada dentro de las 20 especies de Bambú más importantes del mundo (Londoño X., 2000).

Inicialmente la Guadua fue identificada por los botánicos alemanes Humbolt y Bonpland como *Bambusa guadua* en 1808, posteriormente en 1822 el botánico, también alemán Karl S. Kunth, profundiza en su Experimento y creó el genero “Guadua”, derivado del vocablo indígena, con el que las comunidades nativas de Colombia y Ecuador denominaban a éste Bambú.

Luego fue renombrada nuevamente como *Guadua angustifolia* Kunth, cuyo significado es “hoja angosta”, el género guadua abarca aproximadamente 30 especies en Latinoamérica (Cruz, 1994), crece en casi todos los países de Latinoamérica con excepción de Chile y las islas del Caribe, se distribuye desde la latitud de 23° N en San Luis de Potosí en México hasta 35° S en la parte norte de la Argentina, su potencial de desarrollo y crecimiento es muy grande en toda la región latinoamericana (Londoño X., 2000).

La Guadua es uno de los recursos naturales más importantes para la región del eje cafetero en Colombia. Es "*patrimonio natural*", que desde diferentes perspectivas o enfoques, se involucra en el "*Que hacer*" del hombre. Involucrándose en las actividades culturales, sociales, económicas y tecnológicas. Las diferentes comunidades conocedoras de las múltiples aplicaciones que tiene la guadua desde el punto de vista urbanístico, especialmente en la construcción. De su belleza paisajista, que armoniza con el verde oscuro de los cafetales. Las plantaciones de Guadua se ven como enormes plumas de un verde claro tendiendo a amarillo haciendo un contraste natural y bellissimo.

Sin embargo, se debe conocer más sobre la *Guadua angustifolia*, ella no ha sido estudiada e investigada como se debe. Sobre todo aquellas actividades que tienen que ver con la relación "*Hombre-Naturaleza*".

Desde épocas precolombinas, los indígenas y en general los de la región andina, se caracterizaron por la utilización de elementos en guadua desde épocas que datan de 3500 AC a 500 AC (Borja G., 1978) en su libro "Arquitectura precolombina", menciona la utilización de la guadua en algunas "vasijas y viviendas". Aunque existen informaciones de aplicaciones más antiguas en las culturas de los indígenas del Ecuador.

Existen importantes documentos de Jorge A. Morán Ubidia, de la Universidad de Guayaquil, denominado "*Usos tradicionales y actuales del Bambú en América Latina, con énfasis en Colombia y Ecuador*" y el de Jorge Enrique Robledo, de la Universidad Nacional sede Manizales, con su libro denominado "*Cien años del bahareque en el viejo Caldas*"; documento de gran importancia desde el punto de vista histórico cultural de la Guadua.

El uso de las guadas en América, desde la época precolombina y hasta el presente, tiene múltiples aplicaciones: La infinita imaginación del hombre, la misma que ante cada necesidad de sobrevivir, encontró en los bambúes su mejor respuesta para las soluciones buscadas.

La modernidad y los nuevos materiales no han podido desarraigar el uso de las guadas. En el siglo XXI millones de familias en continente americano encontrarán soluciones económicas y sociales en el uso del Bambú. Las aplicaciones tradicionales así como la ancestral sabiduría, tendrán respuestas modernas en aplicaciones y usos.

Sin embargo es necesario destacar la extraordinaria influencia que la *Guadua angustifolia* ha tenido en el pasado, presente y futuro de los pueblos de Colombia y Ecuador. Confirmado por la tesis del Dr. James Parsons que planteó la existencia para los dos países de "**la cultura de la guadua**"<sup>2</sup>. Ésta cultura comprende las regiones de ambos países que se inicia en el sur de Antioquia bajando por el eje cafetero, Valle, Valle del Cauca y Nariño, cruzando la frontera del Ecuador e iniciándose en la provincia de Esmeraldas, Manabí hasta Guayas en el sur, a lo largo de toda la región de la Costa Pacífica, con plantaciones de bosque natural y en donde Plantaciones Comerciales pueden ser viables (Parsons J. J., 1991).

Las etnias de la Amazonía, tienen en las diferentes especies de Guadua y en particular en la Guadua (*Guadua angustifolia*), el compañero y aliado para todos sus requerimientos y necesidades de supervivencia.

La *Guadua angustifolia* crece en diferentes tipos de Bosques: Bosque húmedo tropical, bosque muy húmedo tropical, bosque seco tropical y bosque muy húmedo premontano, Holdridge (1967) en (Morales D. & Kleinn C., 2004), en zonas que oscilan entre 900 a 1800 msnm, con temperaturas que oscilan entre 20°- 25° C y una humedad relativa entre 75 – 85%, con una luminosidad solar de 1800 a 2000 horas luz/año y radiación solar de 5,12 Kwh. / m<sup>2</sup> d. promedio anual. Crece en suelos areno-limosos, francos, franco-arenosos y franco-limosos con un pH de 5,5 a 6,0 (Held, C & Manzano I. D., 2003). La precipitación media anual es de 2750 mm.

Acerca de sus dimensiones y cantidad, posee un diámetro promedio es de 10,8 cm con error estándar de 0,5 cm entre los rangos de 9,9 -11,7cm de intervalo de confianza al 95%; Esto coincide con la cantidad del estudio de la investigación de tesis de Maestría (Montoya J. A., 2001) que determino ente 10 -11 cm, el promedio del diámetro. La altura del culmo de 19,1 m con un error estándar de 0,8% entre los rangos de 17,5 – 20,7 m de intervalo de confianza al 95%; Volumen por de 1053 m<sup>3</sup>/ha con un error estándar de 116,9 819,2 – 1286,7 m<sup>3</sup>/ha de Intervalo de confianza al 95%; Biomasa 81,5 ton/ha con un error de 3,4 ton/ha entre los rangos de 74,7 – 88,3 ton/ha de intervalo de confianza al 95% ; la cantidad de culmos por ha 6940 culmos/ha con un error estándar de 473,3 culmos/ha entre los rangos de 5993,4 – 7886,6 culmos/ha con intervalo de confianza al 95% (Morales D. &Kleinn C., 2004a; Morales D. &Kleinn C., 2004b). Además determinaron el área de bosques de Guadua en la región del eje cafetero es de 27.797 ha que corresponde el 2,7% del territorio de Colombia (1.029.524,7 ha). Éste estudio determinó también, el estado de madurez de la Guadua: el 3,7% son renuevos (%ES =12,8%), Guadua verde (viche) de 18,6% (%ES =10,8%), Guadua madura 69,6% (%ES =7,1%), Guadua seca 8,05 (%ES =15,9%), este estudio fue hecho empleando Sistemas de Información Geográfico con fotografías aéreas y muestreo sistemático.

La Demanda de Guadua en la región se calcula aprox. en 33.564 m<sup>3</sup> en 2004<sup>8</sup>, de los cuales el sector constructor, de artesanías, de laminados, de muebles, demandaron 12.204 m<sup>3</sup> para el año 2004, de los cuales 4.333 m<sup>3</sup> fue constructores, 4.081 m<sup>3</sup> fue de artesanos, 2.379 m<sup>3</sup> fue de laminados, 1.473 m<sup>3</sup> fue de muebles (Arias M. J., *et al.* 2004).

### **Bienes y Servicios Ambientales de la guadua**

Los Bosques de Guadua, denominados Guaduales desempeñan una función ecológica en su Ecosistema. El concepto de “Bienes y Servicios Ambientales” son los beneficios que las personas obtienen del ecosistema, es una relación Hombre-Naturaleza. Los Bosques son protectores y reguladores hidrológicos en las cuencas, son sistemas conservadores de la biodiversidad y la potencialidad para el secuestro o captura de carbono. Adicionalmente los Bosques de Guadua sirven de soporte en la formación de suelos y reciclaje de nutrientes, aprovisionamiento de alimento etc, se ha determinado que una hectárea de bosque puede almacenar hasta 30.000 litros de agua, es decir, el agua para abastecer hasta 150 personas día, en épocas de verano el agua que se encuentra almacenada es entregada por la planta al suelo en forma paulatina<sup>19</sup>.

Una visión integral de lo que la Guadua o un Bosque de Guadua puede ofrecer, desde diferentes aspectos, Se puede clasificar así:

La Guadua como *Provisión*: ofrece oportunidad de sustento, ofrece trabajo a comunidades para su sustento, proporciona alimento a aves, mamíferos, reptiles, anfibios, suministra agua, combustible, fibra, recursos genéticos, medicinas naturales, Etc.

---

<sup>8</sup> SIR: <http://sir.utp.edu.co/guadua/index>.

<sup>9</sup>[http://www.crq.gov.co/visual\\_crq/documentos/bienes\\_y\\_servicios\\_guadua.pdf](http://www.crq.gov.co/visual_crq/documentos/bienes_y_servicios_guadua.pdf).



La Guadua como *Regulación*: de la regulación de procesos eco-sistémicos, como calidad del aire, regulación del clima, regulación del agua, purificación del agua, control de erosión, control biológico y mitigación de riesgos.

La Guadua como *Culturales*: beneficios no-materiales que enriquecen la calidad de vida, diversidad cultural, valores religiosos y espirituales, conocimiento tradicional y formal, de inspiración, valores estéticos, relaciones sociales, valores de patrimonio, recreación y ecoturismo.

La Guadua como *Soporte*: servicios necesarios para producir otros tipos de servicios, producción primaria, formación de suelo, producción de oxígeno, producción de biomasa, retención de suelos, polinización, provisión de hábitat etc (Giraldo-Herrera E., 2000).

Es una gramínea gigante, que crece en casi todos los continentes a excepción de Europa, su rápido crecimiento, su aporte a la conservación y preservación de la biodiversidad, su función ecológica y su aporte al desarrollo socio-económico del Hombre, hacen del Bambú uno de los más dignos representantes del “Desarrollo Sostenible” en el mundo entero.

De acuerdo con el “NationalForestInventory” 1988, el área de plantaciones de Bambú en la China es de 3.546.300 ha, más de 100 millones de personas viven directa e indirectamente del cultivo, producción y administración del Bambú (Xiao J. H., 1989) y se estima que genera unos ingresos alrededor de sus productos por un valor de US\$450.000 millones (Liese W., 1988).

Se conocen de 60 a 90 géneros y de 1100 a 1500 especies en un rango entre 46°N a 47°S de latitud (De Flander K., 2005), tiene múltiples aplicaciones y usos, algunas especies son comestibles y se emplean como alimento, Taiwán exporta US\$ 50 millones por año. En la industria del papel también es muy utilizado, principalmente en la india desde 1919, pero la producción ha descendido desde un 90% en 1951 a un 58% en 1985 (Shen Z.R., 1992), este descenso se debe principalmente a la falta de materia prima en el proceso de producción.

En la industria de muebles de Bambú en Taiwán en 1978 fue de US\$500 millones y en Filipinas se pasó de exportar en 1985 a 1994, de US\$ 650.000 a 1,2 millones. En China la producción de Bambooplywood, denominado plybambooveneer, se realiza desde hace más de 20 años, existen más de 100 fábricas que produjeron cerca de 400.000 ton en el año 2000. Otro campo importante de aplicación, es la construcción de viviendas en Bambú, la construcción de puentes y estructuras en general.

### **1.1.2. Guadua como material de construcción**

#### ***Guadua angustifolia como material de construcción, aplicaciones y usos.***

Este material vegetal es muy empleado en la región cafetera y en algunas otras regiones de Colombia, debido a su versatilidad, su disponibilidad y sus excelentes propiedades físico-mecánicas, en aplicaciones interiores y exteriores. Su principal aplicación es en el sector artesanal con artículos decorativos (Utensilios domésticos, lámparas, ceniceros, cuadros, mesas, muebles, tapetes, cigarreras, licoreras etc.) y en exteriores (Cercas, bancas, canales de conducción de agua, celosías, ventanas, pajareras etc.).

El sector de artesanías, es el más dinámico en la cadena productiva de la Guadua en la Región del eje cafetero, las artesanías dan a la Guadua un valor agregado alto y es un sector que está en continuo crecimiento. A este sector pertenece una parte de la fabricación de muebles, sobre todo aquellos que emplean herramientas manuales y algunas máquinas que se usan para madera. Usan como materia prima la Guadua rolliza y en latas en menor escala.

En la parte Industrial, se tienen aplicaciones en la elaboración de artículos para viviendas con Guadua rolliza (muebles, mesas, camas, mesitas de noche etc.). Con Guadua laminada se conocen las siguientes aplicaciones (pisos, paneles, vigas, muebles, mesas, puertas, escritorios, sillas etc.). Asia tiene un desarrollo alto en el tema de los laminados, se han desarrollado productos como el “Plybamboo” y el “GlulamóLambo” que aplica procesos de laminación con colas sintéticas.

En la construcción de viviendas y aplicaciones externas. El mayor consumo de éste material está asociado a las aplicaciones en construcción de carácter temporal o permanente, de carácter temporal se conocen los paneles o esterillas, que es la guadua abierta y desenrollada, retirado los nudos internos. También se conocen las aplicaciones temporales de Guadua rolliza, para soportar cargas temporales en las construcciones u obras de ingeniería. De carácter permanente, son las construcciones propiamente dichas de viviendas para todos los gustos y todos los costos. Diferentes culturas han encontrado en el Bambú un material económico para construcciones, ofrece buena acústica, iluminación, facilidad de cambio y formas de refugio (Jayanetti D.L. & Follett P.R., 1998). En una construcción típica puede usarse para los siguientes elementos: Fundaciones, Pisos, Paredes, Cielorraso, Puertas y ventanas, Tuberías de agua. Los tipos de Fundaciones son: Bambú directamente en contacto con el suelo, Bambú sobre el asidero de concreto preformado, Bambú incorporado dentro del asidero en concreto, Composición de columnas de concreto y bambú, Bambú reforzado en concreto, pilas de Bambú (Jayanetti D.L. & Follett P.R., 1998). En la construcción de viviendas, también hay otras aplicaciones como los laminados para pisos, que ha sido un desarrollo mucho más reciente y que apenas está en proceso de desarrollarse en la región del eje cafetero Colombia. Con el Plybamboo se ha desarrollado una técnica para la producción de paneles para la aplicación en viviendas como paredes para viviendas de interés social prefabricadas cumpliendo requisitos específicos (Gonzalez-Beltrán, G., 2003) que emplea láminas de 2440 x 1220 x 12 mm.

En la construcción de estructuras como puentes, andamios, galpones, kioscos etc., la Guadua se ha comportado bien, sus propiedades físico-mecánicas son excepcionales, principalmente cuando ésta es sometida a esfuerzos de flexión, esfuerzo tensión y compresión sobre su eje. Los puentes y los andamios, se salen del contexto de vivienda, son considerados como aplicaciones de mayor magnitud (Jayanetti D.L. & Follett P.R., 1998). Algunos de los puentes en Bambú más conocidos son: Puentes peatonales, puentes con pasamanos, puentes de tráfico ligero, etc.

Los andamios cerca del 90% de los andamios empleados en las construcciones de Hong Kong son hechos con Bambú, son considerados baratos, resistentes y prácticos. Lau (1994) en (Hidalgo-López O., 2003) dice que el Bambú rodeo con sus astas los edificios (rasca-cielos) cuando fueron construidos. Principalmente usan la especie *BambusatuldoidesMunro*, nativa de la provincia Guandong del sur de China, esta especie es una de las más densas de sugenero, fue reportada en PROSEA (1995): Densidad 950-970 Kg/m<sup>3</sup> (0,95-0,97 g/cm<sup>3</sup>); MOR – Módulo de Rotura (con nudo): 79 -94 N/mm<sup>2</sup>; MOR (Sin Nudo ó en el Entrenudo): 84-115 N/mm<sup>2</sup>; Esfuerzo de tensión (con nudo): 95,8 -112 N/mm<sup>2</sup>; Sin Nudo ó en el Entrenudo: 98 -140,5 N/mm<sup>2</sup>; Esfuerzo de corte 50-59 N/mm<sup>2</sup>; Por lo tanto el uso de andamios en Bambú comparados con los metálicos, es la quinta parte de los metálicos (Hidalgo-López O., 2003).

Un documento sobre la investigación científica de la taxónoma y de las propiedades físicas para la construcción, fue publicada por la Universidad Nacional de Colombia, en cabeza de uno de los arquitectos pioneros en el tema, Oscar Hidalgo López, quien ha publicado varios libros y manuales. Existen publicaciones de tipo didáctico de cómo construir un puente (Stamm J., 2001), donde se mencionan aspectos iniciales a tener en cuenta para el diseño, tratamiento, criterios estructurales, construcción y un punto muy importante “costos”.

En el tema de construcción de estructuras, la manufactura de las juntas y uniones en Bambú presenta dificultades debido a su forma hueca. Su forma estrecha, sus nudos y variación de distancias no presentan formas circulares perfectas. Los diseñadores con Bambú deben mantener presente esto mientras diseñan (Janssen J.J.A., 2000). Las Uniones se pueden clasificar así: 1) La junta total de 2 culmos de Bambú puede ser hecha en cualquier contacto del cruce de secciones, o por la reunión de fuerzas de la sección de cruce con el elemento de unión. 2) La reunión de fuerzas puede ocurrir en la parte interna, de la sección de cruce o en la parte externa. 3) Los elementos de unión pueden ser paralela a las fibras o perpendicular a ellas (Janssen J.J.A., 2000).

El bambú es un material vulnerable a circunstancias propias de su estructura anatómica y de situaciones externas a ella. Por lo tanto tiene ventajas y desventajas en sus aplicaciones en la construcción.

#### 1) Ventajas del Bambú como construcción.

- a) Está dotado de extraordinarias propiedades físico-mecánicas, permiten su uso en diseños estructurales.
- b) Su forma circular y hueca, lo hacen un material liviano.
- c) La presencia de nudos en su longitud ayuda a la rigidez y elasticidad, que evita rupturas o aplastamientos al curvarse.

- d) La estructura de las fibras y su dirección de fibras longitudinalmente, permite cortes transversales y longitudinalmente, con herramienta manuales.
- e) La corteza exterior resistente, es lisa, de color natural y no requiere ser pintada o pulida.
- f) Tiene múltiples aplicaciones en la construcción.
- g) Se deja combinar con otros materiales.
- h) En un material de bajo costo.
- j) Es material elástico de buen comportamiento sísmico.

## 2) Desventajas del Bambú:

- a) El Bambú en contacto permanente con la humedad se deteriora y pudre.
- b) Es vulnerable a los defectos bióticos, como el ataque de insectos y hongos.
- c) Cuando está seco es altamente combustible.
- d) La forma irregular de su diámetro y nudos, hace difícil los diseños.
- e) La contracción del material en el proceso de secado.
- f) Las uniones son un inconveniente debido a su forma hueca.

En el campo de la Ingeniería química, se debe mencionar la fabricación de papel de Bambú. Según Shen (1992) en (Hidalgo-López O., 2003) la producción de papel en el mundo en 1990 fue de 184.200.000 ton. De los cuales 1.685.000 fue de Bambú, representando el cerca del 1%. El Bambú es considerado dentro de las fibras naturales como una especie promisoría para el desarrollo sostenible, debido a su acelerado ciclo de producción y la alta producción de biomasa. En India se producía el 87% de la pulpa de Bambú en el mundo, en 35 fábricas con una producción anual de 1.300.000 ton en el año 1980. La industria de pulpa de Bambú en le India utiliza principalmente dos especies: *Dendrocalamusstrictus* y *Bambusaarandunacea*. Los países que siguen a India en su producción son: China 200.000 ton, Vietnam 64.000 ton, Brazil 58.000 ton, Bangladesh 42.000 ton, Myan 20.000 ton, Indonesia 11.000 ton, Cambodia 1.000 ton.

## **Propiedades Físico-Mecánicas de la *Guadua angustifolia***

### **• Esfuerzos a Compresión**

El esfuerzo de compresión en el Bambú se determina de acuerdo ISO 22 157-1:2004 Bamboo – Determination of physical and mechanical properties – Part 1, con un test de compresión paralelo al eje,

en especímenes de Bambú, se determina el esfuerzo último de compresión en los culmos y el (MOE) Módulo de elasticidad.

$$\sigma_{ult} = \frac{F_{ult}}{A}; \text{MPa (ó N/mm}^2\text{)} \quad (1)$$

Donde:  $\sigma_{ult}$  es el esfuerzo último de compresión, redondo para cerca de 0,5 MPa

$F_{ult}$  es la máxima carga al cual el espécimen falla, en N.

$A$  es el área de sección transversal en  $\text{mm}^2$ .

Para determinar el (MOE) módulo de elasticidad, el esfuerzo será aplicado, dos por tramo testado, cada una de ellas en el lado opuesto del tramo testado. Éste será calculado de la lectura principal del esfuerzo medido, como relación lineal entre la tensión y el la deformación entre 20% y 80% del  $F_{ult}$ .

Para (Atrops J. L., 1969) quien realizó pruebas de compresión al Bambú pero no menciona la especie, encontró el módulo de elasticidad de compresión de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$E_c = \frac{(P_2 - P_1) * l_0}{F_0 * l}; \text{(kp./cm}^2\text{)} \quad (1)$$

Donde:  $P_1, P_2$ , fuerzas que producen es esfuerzo compresión.

$l_0$  distancia de alargamiento.

$l$  es el espacio libre entre apoyos.

$F_0$  sección transversal de la prueba.

(Atrops J. L., 1969) encontró una variación entre los resultados del MOE, el MOE de compresión fue menor que el de flexión y el de tensión. Para (Hidalgo-López O., 1978; 2003) el esfuerzo de compresión se incrementa con la edad y con la altura, para el caso de la especie *Guadua angustifolia*

Para (Sotela J., 1990, 1992) con los ensayos realizados al la especie *Guadua angustifolia* en dos sitios de Costa Rica, determinó que el MOE y el esfuerzo de compresión calculado con las curvas esfuerzo-deformación fue similar para los dos sitios estudiados, el MOE promedio calculado en el ensayo de

Flexión fue 35% superior que el MOE del ensayo de compresión simple. Para (Ota, M., 1949~1950) hace las primeras recomendaciones para cómo hacer las pruebas de ensayo de compresión, concluye que la forma optima de trabajar los ensayos es con muestras pequeñas y que los especímenes de Bambú deben tener una relación de dimensión de  $b/a = 1$  y  $h/a = 2$ , siendo  $b$  el ancho,  $a$  el espesor y  $h$  la altura.

(Ota M., 1953b) propone unos factores que relacionan el esfuerzo de compresión con la densidad para las especies *Phyllostachispubescens*, *Phyllostachisedulis* y *Phyllostachisnigravar.*, así:

$$\sigma'_c = \frac{\sigma_c}{\rho}; \text{MPa (ó N/mm}^2\text{)} \quad (1)$$

Donde:  $\sigma_c$  es el esfuerzo de compresión.

$\sigma'_c$  relación entre esfuerzo y densidad.

$\rho$  densidad o gravedad específica.

El esfuerzo de compresión tiene una relación exponencial con el contenido de humedad

$$\sigma_c = ae^{b*u}; (\text{Ota, M., 1953b}) \quad (2)$$

$$\sigma_c = au^{-b}; (\text{Fangchun, Z., 1981}) \quad (2)$$

Donde:  $u$  contenido de humedad,  $a$  y  $b$  son constantes experimentales, entre las especies estudiadas,  $b$  en rango de promedio  $-0,0450 \pm 0,00247$  y  $a$  se calcula de la relación de esfuerzo de compresión de su estado verde a seco en horno ( $a / \sigma_{cg} = 2,19 \pm 0,049$ ) para las 3 especies mencionadas, según (Ota, M., 1953b). Para (Fangchun, Z., 1981) de (2)  $b = 0,2045$  y  $a$  constante empírica.

El contenido de humedad relacionado con el esfuerzo de compresión, en (Ota, M., 1953d) concluye la siguiente fórmula:

$$\sigma_{c_1} = \sigma_{c_2} \{1 + 0,058[u_2 - u_1]\} (\text{Ota, M., 1953b}) \quad (2)$$

Donde  $\sigma_{c_1}$ ,  $\sigma_{c_2}$  son los esfuerzos de compresión correspondientes.

$u_1$ ,  $u_2$  valores del contenido de humedad, correspondiente a los esfuerzos.

En general el incremento del esfuerzo de compresión paralelo al grano está directamente relacionado con el contenido de las capas exteriores y de la cantidad de haces vasculares en el tejido, existe correlación del esfuerzo de compresión ( $\sigma_c$ ) y el porcentaje de capas externas “ $C_{ext}$ ”, con la siguiente ecuación cuadrática, de acuerdo a (Ota M., 1950).

$$\sigma_c = 1051,8 + 88,7(C_{ext} - 3); \quad (2)$$

Los nudos en los culmos para (Limaye V. D., 1952; Ota M., 1953a; Janssen J. A. A., 1981) no presentan diferencias significantes en ensayos de compresión con los tramos de los internudos, para (Sehkar A. C., 1960) reporta la misma consideración, pero lo hace con base en los experimentos de Limaye, pero para (Arce-Villalobos, O. A., 1993) éstos resultados en el esfuerzo de compresión, se pueden ver afectados por la necesidad que en los ensayos de compresión lleve unos platos libres de fricción con las caras de las superficies que hacen la compresión paralela al eje, también hace un análisis del comportamiento de los especímenes de Bambú debido a las fuerzas de compresión, hacen que las capas externas de la pared estén sometidas a tensión lateral y las capas internas a compresión. Para (Janssen J. A. A., 1981) los esfuerzos de compresión son muy significantes de acuerdo al porcentaje de fibras y también la posición en el culmo, para él la compresión en el tope es más fuerte que en la base, también hace una diferencia entre la compresión paralela al eje ( $\parallel$ ) y la perpendicular al eje ( $\perp$ ) las distingue así: la compresión ( $\parallel$ ) sin abrochen es fuerte en el Bambú, pero la compresión ( $\perp$ ) al eje es débil (Atrops J. L., 1969; Janssen J. A. A., 1981).

- **Esfuerzos a Tracción**

El esfuerzo de Tracción en el Bambú se determina de acuerdo ISO 22 157-1:2004 Bamboo – Determination of physical and mechanical properties – Part 1, con un test de Tensión paralelo a las fibras, en una tira (tablilla) de Bambú, se determina el esfuerzo último de Tensión paralelo a la fibra por incrementos graduales de carga a la pieza testada y el (MOE) Módulo de elasticidad.

$$\sigma_u = \frac{F_u}{A}; \text{MPa (ó N/mm}^2\text{)} \quad (1)$$

Donde:  $\sigma_u$  es el esfuerzo último de Tensión, redondo para cerca de 0,5 MPa

$F_u$  es la máxima carga al cual el espécimen falla, en N.

$A$  es el área de sección transversal en  $\text{mm}^2$ .

Para determinar el (MOE) Módulo de Elasticidad, el esfuerzo será aplicado, dos por tramo testado, cada una de ellas en el lado opuesto del tramo testado. Éste será calculado de la lectura principal del esfuerzo medido, como relación lineal entre la tensión y el la deformación entre 20% y 80% del  $F_u$ .

Las primeras investigaciones que se reportan con el tema de la propiedades mecánicas del Bambú fueron las de R. von Bauman (1912) en (Hidalgo-López O., 2003) encontró en el esfuerzo de tensión diferencias entre las capas internas y las capas externas, las externas son el doble de esfuerzo que las internas, no se mencionan con cual especie. Luego Sioti Uno (1932) también en (Hidalgo-López O., 2003) reporta que en Japón hacen un estudio muy completo sobre propiedades mecánicas, encuentra que el mayor esfuerzo de tensión del Bambú es en la mitad, es decir la mitad es mayor que la base y el tope con la especie *Bambusastenostachya*, las capas exteriores son 5,5 veces más fuertes que las capas interiores. (Hidalgo-López O., 2003) propone un método para testar especímenes de Bambú para determinar sus propiedades mecánicas, pagina 93, parte 2, sección 6.

Los nudos en los culmos para (Arce-Villalobos, O. A., 1993) muestras diferencia con respecto a los internudos, el MOE en el nudo es 40% del MOE de los internudos paralelo al eje, el esfuerzo de tensión paralelo al eje del nudo es el 30% del internudo, es decir es mayor en ambos casos el esfuerzo de tensión del internudo que del nudo.

Para (Janssen J. A. A., 1981) el esfuerzo de tensión ( $\parallel$ ) al eje es un punto fuerte del Bambú, (Atrops J. L., 1969) realizó pruebas de tensión y encontró que los especímenes de Bambú del tope presentaron hasta un 12% menor en el esfuerzo de tensión que las de la base, no se aclara con que especie, para encontrar el módulo de elasticidad a la tensión, el empleo la siguiente ecuación:

$$E_t = \frac{(P_2 - P_1) * l_0}{F_0 * l}; (\text{kp. /cm}^2) \text{ ó } (0,098 * \text{kp/cm}^2 = 1 \text{ MPa})(1)$$

Donde:  $P_1, P_2$ , fuerzas que producen es esfuerzo.

$l_0$  distancia de alargamiento.

$l$  es el espacio libre entre apoyos.

$F_0$  sección transversal de la prueba.

### 1.1.3 Puentes en Guadua

Históricamente se conocen estructuras en madera desde el imperio romano (aprox. año 50 A.C.), pero una de sus características ha sido que los puentes en madera o en guadua necesariamente han requerido de techos con el fin de proteger las estructuras contra la lluvia y los rayos ultravioletas del sol.



Para la construcción de puentes en guadua, se conocen conceptos básicos estructurales (Cartilla proyecto UTP-GTZ, 2000) tales como: La cercha rey, cercha sencilla, cercha doble, cercha triple y cercha cuádruple; pero también se conocen estructuras con vigas diagonales o la combinación de vigas diagonales con cerchas rey, toda esta información se puede encontrar en dicha cartilla. Un ejemplo de estas cerchas se puede ver en la imagen 1, donde se presentan conceptos estructurales básicos para la construcción de puentes en madera o guadua.

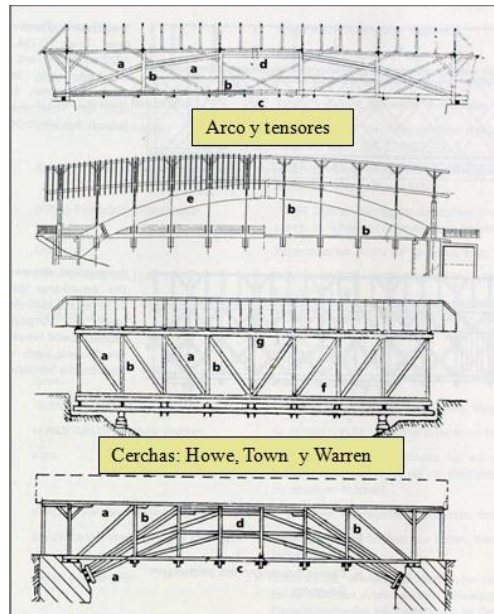


Imagen 1. Conceptos estructurales básicos de puentes en madera o guadua

Se conocen muchas estructuras construidas por el diseñador de puentes Jorg Stamm, entre las que se destacan el guaducto construido en la Universidad Tecnológica de Pereira (Ver imagen 3), que cuenta con una longitud de 40 m de luz libre con sistema cercha “Howe” combinado con arco de carga de 4 guaduas, conformado por 8 módulos, distribuidos en dos cerchas laterales y estribos en los extremos. El puente tiene techo y cubierta en teja para la protección del mismo.



Imagen 2. Puente de guadua en Cúcuta



Imagen 3. Guaducto UTP

En la imagen 2 se presenta el puente de Cúcuta que es una versión de puente asiático combinado con arcos de carga para dar mayor estabilidad y resistencia a las cargas vivías.

#### 1.1.4 Sustratos o materiales de refuerzo

Los materiales que se probaron fueron:

- Resina epóxica
- Resina poliéster
- SikaGrout 200
- SikaDur 31
- Mortero

##### **Resina Epóxica:**

La Resina Epóxica (Epoxy en inglés) es un polímero termoestable que se endurece cuando se mezcla con un agente catalizador. Las resinas epóxicas poseen excelentes propiedades mecánicas, con alta resistencia a los productos químicos agresivos y a los rayos UV; también se usan tanto en la construcción de moldes como de piezas maestras, laminados, extrusiones y otras ayudas a la producción industrial. Los resultados son más baratos, resistentes y rápidos de producir que los hechos de madera, metal, etc. Los compuestos de fibras y epoxi, aunque son más caros que los de resinas de poliéster o de éster de vinilo, producen piezas más resistentes. Un uso muy extendido de las resinas epoxicas también es el usarlas en la creación de replicas artísticas.<sup>1</sup>

##### **Resina poliéster:**

Las resinas de poliéster son compuestos químicos termoplásticos derivados de la destilación del petróleo, están clasificadas dentro de la familia de los plásticos, denominados técnicamente polímeros. Tienen una buena resistencia a la compresión térmica, mecánica y química. Su endurecimiento se consigue a temperatura ambiente, mediante la adición de un catalizador (peróxido de mec). Dependiendo de la categoría de la resina, en ocasiones será necesaria la ayuda de un acelerante (octoato de cobalto) para conseguir el endurecimiento adecuado.<sup>2</sup>

##### **SikaGrout-200:**

SikaGrout-200 es un mortero sin contracción, listo para usar en rellenos de anclajes y trabajos de nivelación. SikaGrout-200 ha sido especialmente diseñado para obtener la consistencia y penetración apropiadas para cada tipo de aplicación, mantiene su estabilidad volumétrica en sentido vertical, desarrolla resistencia rápidamente y alcanza altas resistencias finales. SikaGrout-200 especialmente recomendado cuando se requiera una consistencia plástica o semifluida y cuando se requiera un más rápido desarrollo de resistencias (Sika Colombia SA, 2015).

##### **Sikadur -31:**

Es un adhesivo epóxico de dos componentes, con consistencia pastosa, para la pega de todo tipo de elementos de construcción. Adhiere sobre superficies absorbentes secas o húmedas o superficies metálicas secas.

---

<sup>1</sup> Ferroca, soluciones para el modelo; consultado 01/17 [En línea] : <http://www.feroca.com/es/8-resinas-epoxi>

<sup>2</sup> SagristaProducts; consultado 01/17 [En línea] : <http://www.sagristaproducts.com/es/31-resinas-poliester-para-laminar>

- Para la pega de elementos como: prefabricados, vigas, escaleras, barandas, etc.
- Para la fijación de elementos prefabricados de fachada y el ensamble de elementos de concreto (pilotes, pórticos, etc.)
- Para efectuar pegas entre los más diversos materiales de construcción como: concreto, asbesto-cemento, ladrillo, gres, cerámica, acero, aluminio, madera, vidrio, etc.
- Como acabado de alta resistencia a la abrasión en la reparación y protección de estructuras hidráulicas como: vertederos, canales, túneles de carga, etc. (Sika Colombia SA, 2015).

### **Mortero:**

El mortero es un compuesto de conglomerantes inorgánicos, agregados finos y agua, y posibles aditivos que sirven para pegar elementos de construcción tales como ladrillos, piedras, bloques de hormigón, etc. Además, se usa para rellenar los espacios que quedan entre los bloques y para el revestimiento de paredes. Los conglomerantes más comunes en la actualidad son los de cemento aunque históricamente han sido, la cal, la tierra y el yeso los más utilizados.

Generalmente, se utilizan para obras de albañilería, como material de agarre, revestimiento de paredes, etc.<sup>3</sup>

## **1.2 Aspectos legales y normatividad**

El instituto colombiano de normas técnicas ICONTEC, es el organismo nacional de normalización según decreto 2269 de 1993, este instituto tiene como misión fundamental brindar soporte y desarrollo al productor y también a protección al consumidor. Este instituto colabora con el sector gubernamental y apoya al sector privado de los productores de Guadua para lograr ventajas competitivas en el mercado interno y externo.

Tanto la norma NTC 5301 como la NTC 5407 son normas muy importantes para tener en cuenta en el diseño y construcción de puentes en Guadua, la primera norma se refiere a la calidad del tratamiento de preservación y secado, y la segunda a las técnicas empleadas para el tema de uniones articuladas en guadua.

### **1.2.1 Norma NTC 5301:2007 Preservación y secado del culmo de *Guadua angustifolia* Kunth**

El objeto de la presente norma es:

- Establecer los requisitos que se deben seguir para la preservación y secado de los culmos de *Guadua angustifolia* de acuerdo con las condiciones de uso.

---

<sup>3</sup> Wikipedia, la enciclopedia libre ; consultado 01/17 [En línea] : [https://es.wikipedia.org/wiki/Mortero\\_\(construcci%C3%B3n\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Mortero_(construcci%C3%B3n))

- Los requisitos establecidos en esta norma aplican específicamente para preservar la *Guadua angustifolia* de ataques bióticos y abióticos.
- Los requisitos en esta norma aplican específicamente para establecer el contenido de humedad de acuerdo con su uso final.

### **1.2.2 Norma NTC 5407:2006 Uniones de estructuras con *Guadua angustifolia* Kunth**

El objeto de la presente norma es:

- Establecer los requisitos mínimos que se deben seguir para la elaboración de uniones en la construcción de sistemas estructurales utilizando *Guadua angustifolia* Kunth.
- Los requisitos establecidos en esta norma aplican específicamente para construcciones cuyo elemento estructural primario es la *Guadua angustifolia* Kunth.
- En el texto de esta norma se hace referencia a notas, figuras y apéndices los cuales suministran información complementaria. Estas notas y figuras no deben ser consideradas como requisitos de esta norma.

## **CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA Y EXPERIMENTOS**

### **2.1 Objetivos**

#### **2.1.1 Objetivo general**

Desarrollar una investigación sobre la composición y las propiedades mecánicas de los elementos hechos en guadua que conforman una estructura poliédrica para puentes y otras aplicaciones.

#### **2.1.2 Objetivos específicos**

- Determinar el tipo de material o sustrato adecuado que llevará el elemento de guadua en la parte interior, como refuerzo para soportar cargas a tracción y compresión.
- Determinar el tipo de elemento hecho en guadua adecuado para soportar las cargas presentes en la estructura poliédrica de un puente peatonal.
- Evaluar los resultados obtenidos y definir el elemento final para la aplicación en construcción de puentes poliédricos y otras aplicaciones.

### **2.2 Método de investigación**

La metodología que se utilizará para la presente investigación será un método sistemático, el cual consiste en ir paso a paso realizando el proceso exploratorio, ejecutando múltiples pruebas en laboratorio, de diseño y construcción de las probetas, para ir ajustando los resultados para la toma de nuevas decisiones en torno al proceso investigativo.

### **2.3 Parte experimental**

La parte de la investigación que concierne a experimentación y pruebas, se dividió en dos principales partes, en la primera se buscará realizar una evaluación acerca del material de refuerzo que irá dentro del elemento de guadua, en donde se procede a considerar distintos tipos de materiales, minerales o sintéticos, para determinar sus propiedades mecánicas a través de pruebas de laboratorio y poder establecer el material adecuado para las solicitaciones de carga requeridas, considerando también los costos de estos en el mercado. Una vez se evalúe y se tenga certeza acerca del material de refuerzo que se utilizará dentro del elemento en guadua, se procede con la segunda parte, en donde se realizarán pruebas de resistencia mecánica con un prototipo del elemento de unión hecho guadua que tendrá forma de cono, y al cual se le llamará “punta de lápiz” con el fin de determinar las propiedades mecánicas que obtenidas por. Una vez alcanzado un resultado aceptable para la estructura poliédrica de un puente, se procederá a realizar un análisis costo-beneficio con el fin de optimizar materiales y buscar reducir costos.

#### **2.3.1 Evaluación del material o sustrato de refuerzo.**

Las pruebas del material o sustrato de refuerzo se llevaron a cabo en el laboratorio de pruebas destructivas, ubicado en la sede del SENA en santa Mónica, Dosquebradas, en donde inicialmente se llevaron 24 probetas para probar, 12 a base de resina epóxica y 12 a base de resina poliéster, donde la mitad de las probetas fueron probadas a tracción y la otra mitad a compresión.



Figura 1. Máquina universal laboratorio SENA

El montaje de tracción se hizo con las mordazas de la máquina y los tornillos de las probetas, como se observa en la figura 2. Se presentaron inconvenientes en el montaje de algunas probetas debido a que los dos tornillos de algunas de estas no eran co-lineales, lo que dificultaba que las mordazas de la máquina las sostuvieran con la firmeza necesaria para realizar el ensayo.

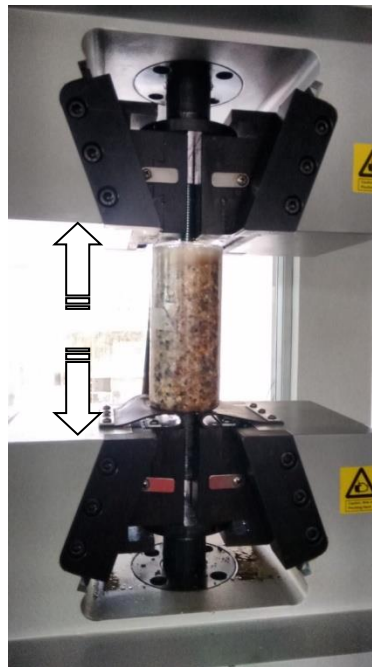


Figura 2. Montaje prueba a tracción de sustrato a base de resina epóxica

El montaje de compresión se realizó en la misma máquina universal, donde no se requerían tornillos para sujetar la probeta ya que esta máquina en su parte inferior cuenta con dos superficies circulares planas que permitían instalar la probeta con superficies planas, como se muestra en la figura 3.

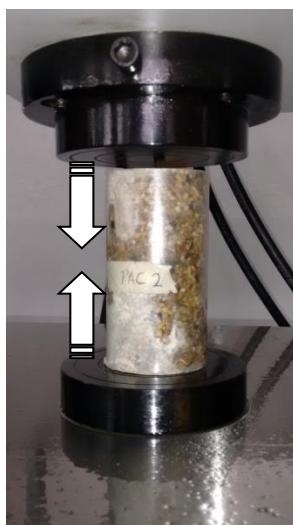


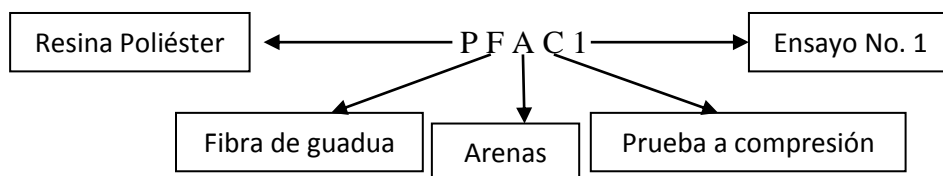
Figura 3. Montaje prueba a compresión de sustrato a base de resina poliéster

Se procedió a considerar diferentes opciones para la realización del material de refuerzo o sustrato que deberá llevar por dentro el elemento en guadua, para lo cual se consideraron 5 sustratos, 2 de ellos materiales sintéticos derivados de petróleo y los otros 3 materiales minerales (Ver figura 4); que se clasificaron con una nomenclatura o código, como se explica a continuación:

<b>Materiales sintéticos</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Materiales minerales</b>	<b>Nomenclatura</b>
Resina Epóxica	E	SikaDur	SD
Resina Poliéster	P	SikaGrout	SG
		Mortero	M

En el orden de la nomenclatura, la primera letra de izquierda a derecha corresponde al material utilizado, la letra seguida a esta, corresponde al tipo de refuerzo utilizado en la mezcla de componentes, nombrando con una letra (A), las arenas de clase gravilla amarilla tipo 1 y 2.

Finalmente, la última letra en la clasificación de los códigos corresponde al tipo de prueba mecánica realizada, siendo (C) pruebas mecánicas a compresión y (T) pruebas mecánicas a tracción.



En algunas nomenclaturas se menciona la letra (F), lo que significa que la probeta tuvo fibra de guadua obtenida de máquina de AUTOCLAVE.



Figura 4. Probetas de tracción hechas con materiales minerales

### 2.3.1.1 Geometría de la probeta realizada

Para realizar las pruebas con el material de refuerzo, se estableció un tamaño estandarizado para todas las probetas que se realizarán, siguiendo la recomendación de las normas sobre ensayos destructivos que especifica que para probetas con sección transversal circular (en forma de cilindro), la altura de esta deberá ser como mínimo 2 veces el diámetro de la misma, de esta manera se decidió el tamaño de la probeta de acuerdo a como se especifica a continuación. (Ver figura 5)

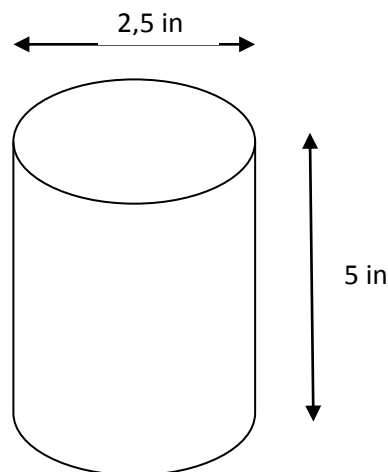


Figura 5. Geometría probetas para ensayos de material de refuerzo

**Nota:** En el anexo D se muestran los planos detallados de los dos tipos de probetas, las que se realizaran a compresión y las que se realizarán a tracción.

### 2.3.1.2 Resultados de pruebas a compresión para material o sustrato de refuerzo

En las tabla 1 y 2 se ven reflejados los resultados obtenidos en las pruebas de resistencia mecánica a compresión de las diferentes combinaciones de los materiales evaluados.



Probeta	Esfuerzo máximo (kgf/cm <sup>2</sup> )	Promedio (kgf/cm <sup>2</sup> )	Promedio (Mpa)	Desviación Estándar	CV - Coef. Variación
EAC1	289,4	255,7	25,1	39,0	15%
EAC2	212,99				
EAC3	264,67				
EFAC1	193,44	202,9	19,9	11,0	5%
EFAC2	215,01				
EFAC3	200,35				
PAC1	440,38	440,0	43,1	5,2	1%
PAC2	434,58				
PAC3	445				
PFAC1	371,7	386,1	37,9	17,8	5%
PFAC2	405,9				
PFAC3	380,51				

Tabla 1. Resultados pruebas a compresión de probetas con material de refuerzo sintético.

Probeta	Esfuerzo máximo (kgf/cm <sup>2</sup> )	Promedio (kgf/cm <sup>2</sup> )	Promedio (Mpa)	Desviación Estándar	CV - Coef. Variación
MAC1	7,08 (N/A)	27,4	2,7	0,5	2%
MAC2	27,69				
MAC3	27,05				
SDAC1	609,23	574,5	56,3	32,3	6%
SDAC2	545,48				
SDAC3	568,66				
SGAC1	197,71	226,5	22,2	36,1	16%
SGAC2	266,94				
SGAC3	214,78				

Tabla 2. Resultados pruebas a compresión de probetas con material de refuerzo mineral.

### 2.3.1.3 Resultados de pruebas a tracción para material o sustrato de refuerzo

En las tablas 3 y 4 se ven reflejados los resultados obtenidos en las pruebas de resistencia mecánica a compresión de las diferentes combinaciones de los materiales evaluados.

Probeta	Esfuerzo máximo (kgf/cm <sup>2</sup> )	Promedio (kgf/cm <sup>2</sup> )	Promedio (Mpa)	Desviación Estándar	CV - Coef. Variación
EAT1	98,08	102,6	10,1	5,0	5%
EAT2	107,98				
EAT3	101,66				
EFAT1	100,25	101,5	10,0	1,8	2%
EFAT2	102,8				
EFAT3	N/A				
PAT1	66,09	67,0	6,6	1,3	2%
PAT2	N/A				
PAT3	67,9				
PFAT1	N/A	80,4	7,9	N/A	N/A
PFAT2	N/A				
PFAT3	80,36				

Tabla 3. Resultados pruebas a tracción de probetas con material de refuerzo sintético.

Probeta	Esfuerzo máximo (kgf/cm <sup>2</sup> )	Promedio (kgf/cm <sup>2</sup> )	Promedio (Mpa)	Desviación Estándar	CV - Coef. Variación
MAT1	20,59	20,6	2,0	N/A	N/A
MAT2	N/A				
MAT3	N/A				
SDAT1	122,57	135,5	13,3	13,7	10%
SDAT2	134,03				
SDAT3	149,89				
SGAT1	3,49 (N/A)	44,2	4,3	12,1	27%
SGAT2	35,62				
SGAT3	52,8				

Tabla 4. Resultados pruebas a tracción de probetas con material de refuerzo mineral.

### 2.3.2 Análisis de resultados material o sustrato de refuerzo

Cuadros comparativos:

En la tabla 5, se muestran los cuadros comparativos, donde la primera columna (cada una de las mezclas que se realizaron) se compara con la fila en color azul (que tiene también todas las mezclas probadas), de esta manera nos aseguramos de comparar cada composición con las demás. Básicamente la convención tiene tres valores, si se califica con 1, significa que la mezcla que se comparó es peor que la referencia, si se califica con 3 es que las dos tiene resultados similares (+/- 20kgf) y si se califica con 5 significa que la mezcla que se comparó es mejor con respecto a la referencia.

Al final, se suman los resultados obtenidos de cada mezcla, siendo mejor el que obtenga una puntuación más alta en un rango de 1 a 30 puntos.

CUADRO COMPARATIVO COMPRESIÓN					CONVENCIÓN	MEJOR	SIMILAR	PEOR
	EAC	EFAC	PAC	PFAC	SDAC	SGAC	MAC	CALIFICACION
EAC	0	5	1	1	1	5	5	18
EFAC	1	0	1	1	1	1	5	10
PAC	5	5	0	5	1	5	5	26
PFAC	5	5	1	0	1	5	5	22
SDAC	5	5	5	5	0	5	5	30
SGAC	1	5	1	1	1	0	5	14
MAC	1	1	1	1	1	1	0	6

Tabla 5. Cuadro comparativo a compresión

CUADRO COMPARATIVO TRACCIÓN					CONVENCIÓN	MEJOR	SIMILAR	PEOR
	EAT	EFAT	PAT	PFAT	SDAT	SGAT	MAT	CALIFICACION
	0	3	5	5	1	5	5	24
	3	0	5	5	1	5	5	24
	1	1	0	1	1	5	5	14
	1	1	5	0	1	5	5	18
	5	5	5	5	0	5	5	30
	1	1	1	1	1	0	5	10
	1	1	1	1	1	1	0	6

Tabla 6. Cuadro comparativo a tracción

Como se observa en las tablas 5 y 6, el material que mejor calificación obtuvo fue el SikaDur, con una calificación de 30 puntos sobre 30, superando a las demás muestras ampliamente, sin embargo, los costos de aplicación de este material son excesivamente altos, razón por la cual se descarta para una obra que requiera grandes cantidades de este material, por lo tanto se recomendaría utilizar este sustrato solo en los elementos que tengan esfuerzos muy críticos dentro de la estructura poliédrica.

En este orden de ideas, las resinas son las siguientes en la lista de resistencia mecánica, pero aunque sean más económicas que el SikaDur, siguen teniendo costos muy elevados para el sostenimiento de un proyecto a gran escala, por lo que se descarta también como opción; lo cual nos deja con la opción del SikaGrout, que al ser un material usado en construcciones es económico y accesible para obras de grandes proporciones, aunque sus resultados hayan sido bajos comparativamente con los otros materiales, pero en cuanto a costos es muy viable su implementación.

### 2.3.3 Evaluación de los elementos en guadua con material de refuerzo

Las pruebas del elemento de unión hecho en guadua se llevaron a cabo en la máquina universal (Ver figura 6) del laboratorio de resistencia de materiales de la Universidad Tecnológica de Pereira, en donde inicialmente se llevó 1 probeta con el diseño original para ser ensayada, esta fue realizada a tracción por ser un ensayo más crítico que la compresión para esta configuración de materiales.



Figura 6. Máquina universal laboratorio resistencia de materiales UTP.

El montaje de tracción se hizo diferente que en la máquina del SENA, debido a que en este caso se utilizaban acoples roscados, en donde se podía atornillar los tornillos de las probetas tipo punta de lápiz, como se observa en la figura 7. Con este otro método de montaje de las probetas se podía solucionar el problema de la colinealidad de los tornillos entre punta y punta de la probeta, lo que permitió probar todas las muestras realizadas.

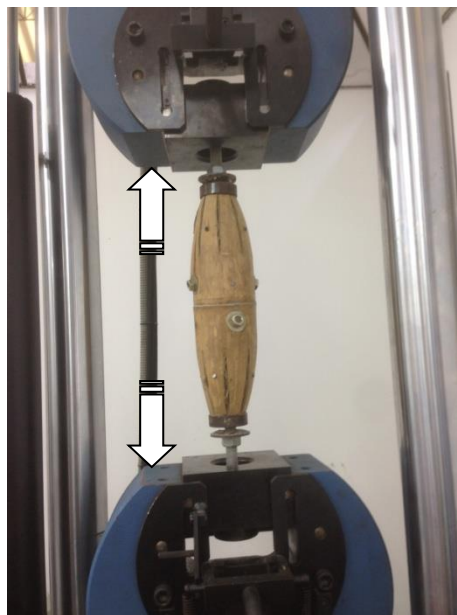


Figura 7. Montaje a tracción del elemento de unión tipo punta de lápiz

El montaje de compresión se realizó en la misma máquina universal, no obstante esta vez los acoples roscados solo iban puestos sobre una superficie plana circular que a su vez se apoyaba sobre una rotula, para que de esta manera buscar siempre que la fuerza ejercida sobre la probeta fuera perpendicular a la

superficie de interés, es decir, que la fuerza fuera aplicada verticalmente sin importar que los tornillos de la probeta no estuvieran totalmente co-lineales, como se muestra en la figura 8.

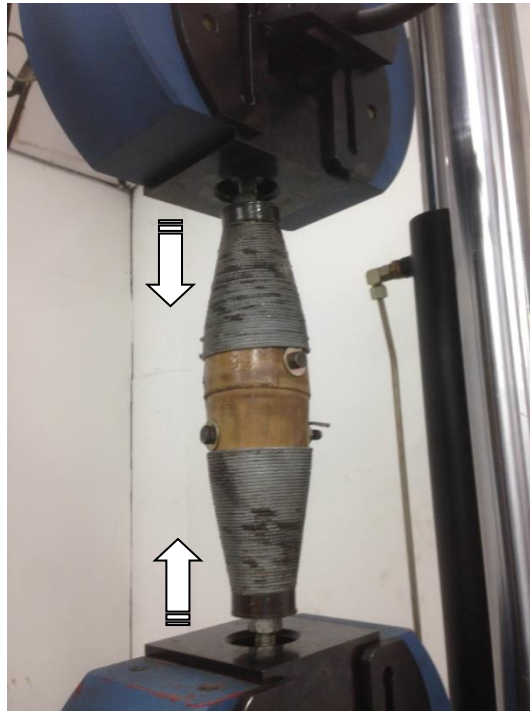
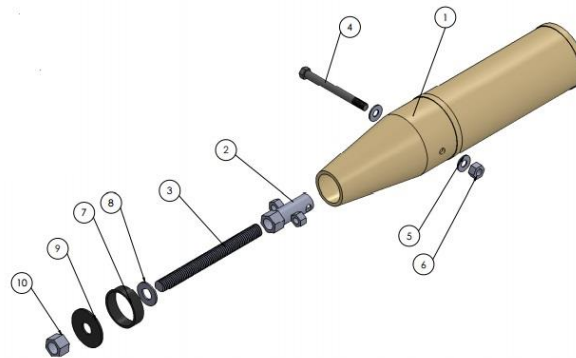


Figura 8. Montaje del elemento de unión tipo punta de lápiz

### 2.3.3.1 Diseño del elemento de unión en guadua tipo punta de lápiz

El diseño original del prototipo del elemento en Guadua se muestra con detalle en un dibujo de explosión con todas las partes que lo conforman y en planos en el anexo C.



Dibujo 1. Elemento de unión hecho en Guadua tipo punta de lápiz

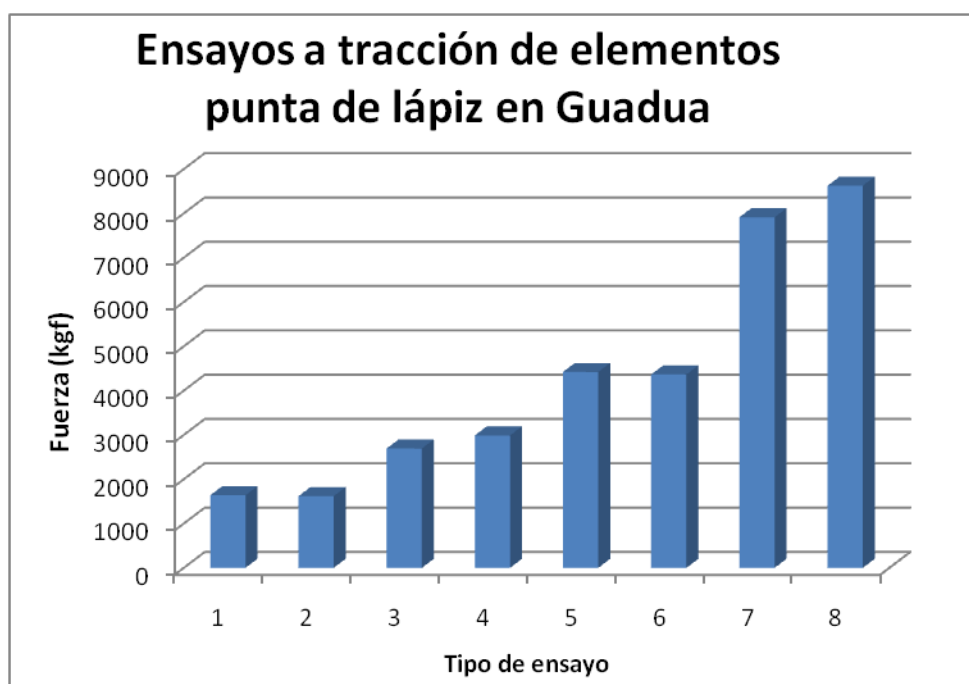
### 2.3.3.2 Resultados pruebas a tracción del elemento en Guadua con refuerzo

En la tabla 7 se presentan los resultados obtenidos de los ensayos a tracción del elemento en Guadua tipo punta de lápiz, con el material de refuerzo seleccionado anteriormente según sus propiedades y beneficios, dichas pruebas fueron realizadas en la máquina universal del laboratorio de resistencia de materiales de la Universidad Tecnológica de Pereira.

Código de ensayo	Tipo de probeta	Fuerza máxima a tracción (kgf)	Fuerza máxima a tracción promedio(kgf)
1	Original	1637,9	1637,9
2	Con nylon	1617,3	1617,3
3	Con clavos	2693,4	2693,4
4	Con clavos, nylon y fibra	2988,8	2988,8
5	Con fibra de vidrio	4421,7	4421,7
6	Punta mejorada con clavos, arandela separada del anillo, perno transversal con tuerca y arandela	4962,1	4364,025
		3788,4	
		3873,5	
		4832,1	
7	Punta mejorada con las especificaciones anteriores y adicionalmente guaya sujeta con resina epóxica	7707,2	7912,55
		8117,9	
8	Punta mejorada con las especificaciones anteriores y con tubo roscado interiormente	7929,6	8624,45
		8932,8	
		8316,1	

Tabla 7. Resultados de las diferentes pruebas a tracción realizadas a elementos hechos en guadua.

Las gráficas obtenidas en los ensayos de la anterior tabla se pueden apreciar en las figuras de anexo B.



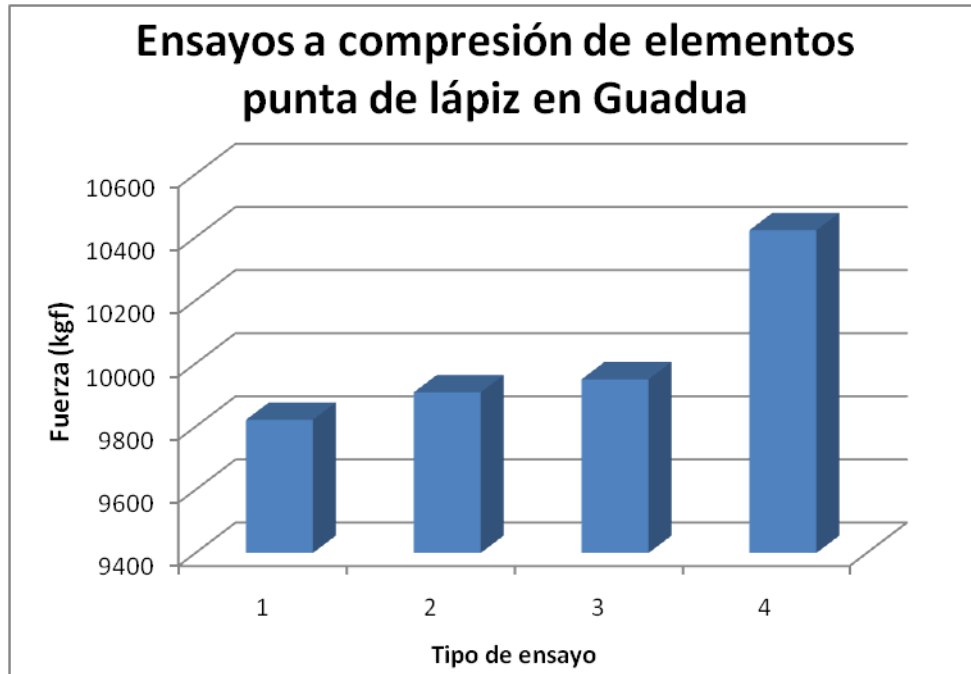
Gráfica 1. Resultados ensayos a tracción de elementos de unión en guadua

### 2.3.3.3 Resultados pruebas a compresión elemento en Guadua con refuerzo

En la tabla 8 se presentan los resultados obtenidos de los ensayos a compresión del elemento en Guadua tipo punta de lápiz, con el material de refuerzo seleccionado anteriormente según sus propiedades y beneficios, dichas pruebas fueron realizadas en la máquina universal del laboratorio de resistencia de materiales de la Universidad Tecnológica de Pereira.

Código de ensayo	Tipo de probeta	Fuerza máxima a compresión (kgf)	Promedio (kgf)
1	Original	9821,6	10025,575
2	Original	9908,6	
3	Original	9949,9	
4	Original	10422,2	

Tabla 8. Resultados de las pruebas a compresión realizadas a elementos hechos en guadua



Gráfica 2. Resultados ensayos a compresión de elementos de unión en guadua

### 2.3.4 Evaluación de los herrajes y elementos metálicos

Para el desarrollo de los elementos metálicos (esferas de hierro fundido, tornillería, etc.) se realizaron tres tipos de pruebas. En primer lugar se realizaron pruebas a los tornillos individualmente en solo un tipo de pernos: Tornillos de acero zincado. El segundo tipo de pruebas se realizó a las esferas de hierro fundido<sup>4</sup>, dentro de las características de este material, se encuentra que es una fundición de hierro nodular con grafito tipo 1 y 2 en una matriz esencialmente ferrítica obtenida de tratamiento térmico; con el objeto de poder determinar la resistencia mecánica de ellas sometida a tensión, realizando la prueba con 2 agujeros concéntricos lineales en la misma dirección o a 180°. Por último, las terceras pruebas fueron realizadas a esferas con las mismas propiedades de las anteriores pruebas, pero esta vez con 18 agujeros en ella [Ver figuras 9 y 10], realizando el mismo ensayo de forma lineal a tracción con el objeto de determinar si los 16 agujeros de más afectaban la resistencia mecánica que obtenían estas esferas.

<sup>4</sup> Fundición de hierro nodular ASTM A536 clase 65-45-12; de matriz principalmente ferrítica,  $S_u = 4224,5 \text{ kgf/cm}^2$   $S_{uc} = 7142,9 \text{ kgf/cm}^2$  ;  $S_y = 2816,3 \text{ kgf/cm}^2$



Figura 9. Esferas con 18 agujeros en hierro fundido



Figura 10. Esferas con 18 agujeros en acero

De acuerdo a lo anterior, se obtuvo los siguientes resultados que se ven reflejados en la siguiente tabla, las gráficas de estos ensayos se pueden apreciar en el anexo B.

Material	Solo tornillo	Promedio solo tornillo	Esfera 2 agujeros	Esfera 18 agujeros	Promedio	Desviación estándar	CV - Coef. Variación
Perno zincado	9953,4	9820,03	9759,8	9876,2	9818,68	58,21	0,59%
	9867,1						
	9639,6						
Perno Grado 5	-	-	20114,4	20219,8	20167,10	74,53	0,37%

Tabla 9. Resultados pruebas elementos metálicos

**Nota:** Los resultados de la tabla 9 se encuentran dados en kilogramo fuerza (kgf). Las esferas probadas en el laboratorio de resistencia de materiales fueron de 4" de diámetro y con un peso aproximado sin perforaciones de 4 kg

En las figuras 11 y 12 se puede apreciar cómo se realizó el montaje para los ensayos de las esferas con 18 agujeros y las esferas con 2 agujeros respectivamente, en donde se observa que cada una de estas es sujeta con una varilla roscada (ya sea zincada o grado 5) y posteriormente tensionada hasta causar la falla. Como se puede observar también, los dos tornillos no están totalmente colineales debido a errores de precisión en la construcción de los agujeros en la esfera o la rosca, sin embargo, al ser un ensayo de tracción, cuando estas son tensionadas se acomodan adecuadamente hasta lograr una buena colinealidad.



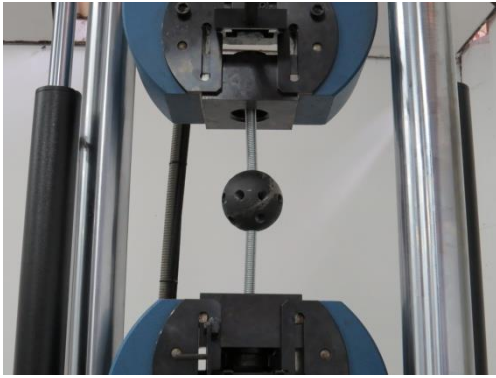


Figura 11. Montaje para ensayos de esfera con agujeros

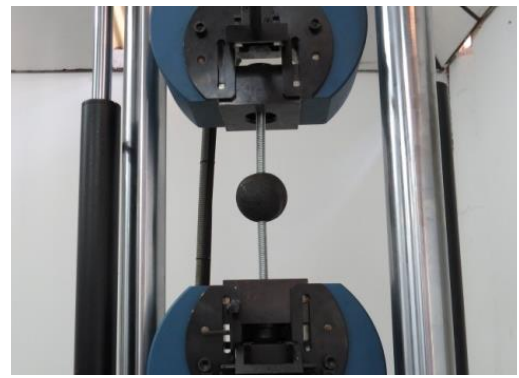


Figura 12. Montaje para ensayos de esfera sin agujeros

### 2.3.5 Evaluación de guaduas cepas sometidas a compresión con material de refuerzo

En las diferentes estructuras poliédricas que se pueden construir, siempre existirán elementos más críticos que otros; debido a que soportan mayores solicitaciones de carga dependiendo de la posición en la que se encuentren dentro de la configuración de la estructura, en este caso en particular, un puente peatonal posee también este tipo de elementos “sobrecargados”. Como solución a esto se propone utilizar guaduas cepas, las cuales están ubicadas la parte inferior de la guadua, cerca de la raíz, y que poseen altas resistencias mecánicas debido a su gran espesor de pared. Ver figura 13



Figura 13. Ejemplo de guadua cepa

A pesar de esto, en los elementos críticos no solo presentan problemas por resistencia de cargas elevadas, también, al ser la guadua un elemento natural conformado por fibras estrechamente unidas entre sí, se presentan pequeñas fisuras o grietas entre estas fibras, las cuales disminuyen notoriamente su resistencia mecánica y pueden significar una futura falla potencial del elemento. Para solucionar este inconveniente

se decidió utilizar cinta band-it<sup>5</sup>, una banda hecha de metal utilizada en los postes de energía, para evitar que las guaduas se agrietaran y perdieran su resistencia mecánica. Ver figura 14



Figura 14. Guaduas cepas con cinta Band-it ensayadas a compresión

De esta manera, se realizaron ensayos de laboratorio que arrojaron los siguientes resultados mostrados en la tabla 10. Las gráficas de estos ensayos se pueden apreciar en las figuras 47, 48, 49 y 50 del anexo B.

No. Probeta	Resistencia última a compresión (kgf)	Promedio	Desviación estándar	Coef. De variación - CV
1	17277,3	17192,225	2308,4801	13,43%
2	14182,5			
3	19804,5			
4	17504,6			

Tabla 10. Resultados de guaduas cepas con cinta Band-it

**Nota:** Cuando se trabaja con guaduas cepas, se dificulta el proceso de fabricación del cono por lo que no se recomienda usar cepas para esta configuración.

<sup>5</sup> La cinta Band-it es una banda o fleje fabricada en acero inoxidable, está patentado con impresiones y marcas de referencia, elimina los costosos desperdicios y complicada medición permitiendo al usuario de manera rápida y precisa desenrollar el largo exacto y requerido del fleje. Su instalación se realiza mediante zunchos y con una herramienta llamada zunchadora.

## CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 3.4 Análisis y conceptos de los elementos de unión hechos en guadua

#### 3.3.1 Ensayos de los prototipos del elemento en Guadua a tracción

De acuerdo a la tabla 7, se realizó una prueba inicial con el diseño del prototipo original del elemento de unión hecho en guadua que se muestra en el numeral 2.3.3.1; en donde se pudo establecer que soporta una carga a tracción de 1.637,9 kgf, lo que muestra un resultado demasiado bajo para las solicitaciones de carga que se esperan tener en un puente poliédrico con estos elementos. En la prueba se logró observar que el elemento se desarmó completamente, abriéndose el cono y separándose la guadua del mortero, ocasionando que se saliera por completo del resto del elemento (Ver figuras 15 y 16), perdiendo absolutamente la resistencia que pudo haber ejercido este si se mantenía en su lugar. Con base en estas apreciaciones, se decidió realizar una serie de modificaciones al modelo original del elemento con el propósito de elevar la resistencia mecánica que presenta este a tensión y evitar que se desarme.



Figuras 15. Prototipo del elemento de Guadua original después de prueba a tracción



Figuras 16. Prototipo del elemento de Guadua original después de prueba a tracción

Se procedió a realizar mejoras al prototipo del elemento de Guadua con diferentes aditamentos propuestos para conseguir mejores resultados, en donde se plantearon 4 opciones: La primera mejorar el elemento con varias hileras de nylon colocadas a lo largo del cono, con el fin de evitar que éste se abriera y se separara el mortero (Ver figura 17), consiguiendo así elevar la resistencia; la segunda opción fue realizar diversas perforaciones en la superficie cónica del elemento y poner clavos de acero gruesos en ellos (Ver figura 18); La tercera fue aplicar fibra de vidrio sobre el cono del elemento, adhiriéndola con una capa de resina epóxica a la superficie de la guadua (Ver figura 19); y por último, realizar una probeta con los tres aditamentos anteriores juntos, esperando así llegar al mejor resultado posible.



Figura 17. Prototipo del elemento de Guadua con nylon



Figura 18. Prototipo del elemento de Guadua con clavos de acero



Figura 19. Prototipo del elemento de Guadua con fibra de vidrio

El resultado de estas pruebas también se refleja en la tabla 7, en donde en la primera opción, el hilo de nylon, no se evidencia ninguna diferencia con respecto al prototipo del elemento de Guadua original, por el contrario alcanza un valor menor de tan solo 1.617,3 kgf, lo que significa que no tuvo efecto alguno en la probeta, esto pudo haber sucedido por su incorrecta aplicación en la probeta ya que es complicado lograr que los hilos se ajusten bien a la probeta y se sostengan en el mismo punto por su forma cónica, lo cual hace que no sirva para la aplicación deseada.

En cuanto a los clavos de acero gruesos, en donde se obtuvo un valor de 2.693,4 kgf, se mejoró notablemente la resistencia del elemento, logrando que el mortero dure unido a la guadua por más tiempo, es una solución rápida y económica, que puede ser muy factible, sin embargo, no se llega aún al resultado esperado.

La tercera opción, la fibra de vidrio adherida con resina epóxica a la superficie de la guadua, resulto ser muy eficiente para elevar la resistencia que puede soportar la probeta antes de fallar, llegando hasta unos 4421,7 kgf y siendo el valor más alto obtenido hasta ese momento, no obstante aún no se conseguía el valor esperado y realizando una revisión sobre este material, se llega a la conclusión de que a pesar de que eleve considerablemente las propiedades mecánicas del elemento, este se ve muy poco estético en contraste al color de la guadua (Ver figura 19) y además su manejabilidad y aplicación es complicada, por lo que decide descartarse por completo.

Para la última opción, por ser la que involucra las tres anteriores se esperaba que el resultado fuera el mejor, sin embargo tan solo alcanzo un valor de 2988,8 kgf quedando muy por debajo del tercer prototipo. Esto pudo haberse generado por errores en la aplicación de los refuerzos para mejorar su resistencia, debido a la dificultad del manejo de la fibra de vidrio, por lo cual se decidió no considerar como una opción válida utilizar los tres refuerzos al tiempo.

Aunque se habían logrado avances significativos hasta el momento en la resistencia mecánica del prototipo del elemento de guadua, los valores alcanzados aún eran muy bajos, teniendo como referencia que la probeta debe resistir más que el tornillo zincado de  $\frac{3}{4}$ " del cual se sostiene el elemento en guadua, de acuerdo a esto, se decidió rediseñar el prototipo del elemento de Guadua original, realizando mejoras de acuerdo a los problemas evidenciados en los ensayos ya realizados, de donde resulta un nuevo prototipo con las siguientes modificaciones:

1. **Tapa superior:** En la parte superior de la probeta se observa una tapa de color negro, que en los ensayos al ser tensado se separaba de la guadua causando que el cono se abriera como se muestra en las figuras 15 y 16, para corregir esta falla, se decide separar la tapa en dos partes, de tal manera que quede una formando un anillo y la otra formando una arandela.
2. **Perno transversal:** En el diseño original se puede apreciar que el perno que atraviesa el cono transversalmente, el cual cumple la función de juntar el mortero con la guadua, llega al mismo nivel que la corteza exterior de la guadua, lo que genera que al este ser tensionado, se flecte y contraiga al interior del cono causando que el mortero y la guadua se separen. Para solucionar esto, se decide cambiar el perno ordinario por un perno grado 5 con el fin de amortiguar de cierta manera la flexión de este, y además se buscara que el perno sobresalga por encima de la corteza exterior de la guadua con el fin de poder colocar una tuerca con arandela para evitar que este se contraiga dentro del cono.
3. **Clavos de acero gruesos:** Al obtener un buen resultado en la prueba realizada con el prototipo del elemento de Guadua original reforzado con clavos de acero grueso en la superficie cónica del elemento, se decidió implementar esta técnica con el fin de obtener resultados más elevados.

Con estas modificaciones de diseño, se realizaron 4 probetas adicionales para ser ensayadas en pruebas de laboratorio, comprobando o no el aumento de su resistencia mecánica. De acuerdo a la tabla 7 en el ítem número 6, en donde se muestran los resultados de estos prototipos con modificaciones de diseño, se evidencia claramente un aumento importante de su resistencia, con un valor promedio de 4364,02 kgf para los 4 ensayos, es un resultado que se acerca más al esperado, comprobando así que las modificaciones realizadas tuvieron un efecto positivo pero que, sin embargo, aún se debe buscar aumentar esta resistencia.

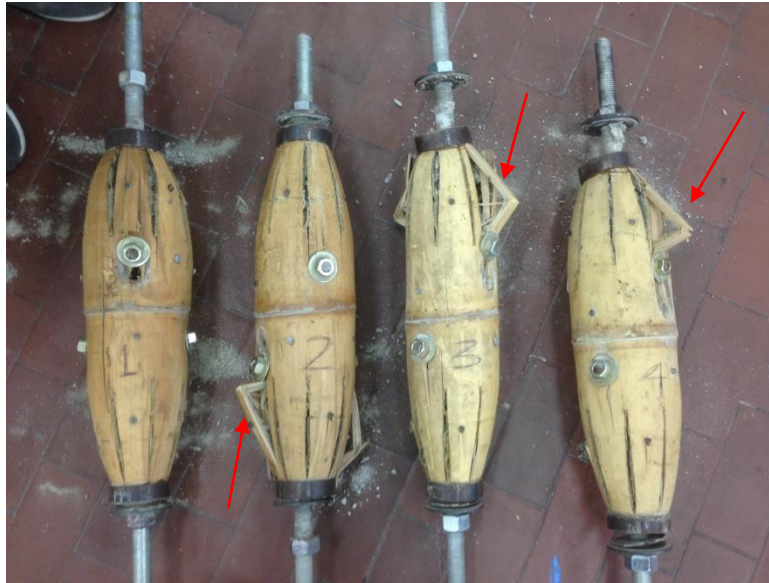


Figura 20. Probetas con modificaciones de diseño ensayadas a tracción

Se logró corregir las fallas provocadas por la separación del perno transversal de la guadua, evitando que los conos del elemento se desarmaran y se saliera el mortero, y gracias a que el anillo, al estar separado de la arandela, se quedaba fijo sosteniendo los filetes del cono, este no se desarmó, de igual forma, se pudo atenuar también la falla de la flexión del perno transversal evitando que este se contraiga dentro del cono del elemento con ayuda de las tuercas y arandelas puestas. Sin embargo, las principales fallas en estas probetas se produjeron por esfuerzos cortantes, como se puede apreciar en la figura 20 indicados con flechas rojas, en donde la fuerza vertical ejercida sobre el perno transversal causa que la guadua se recoja en la línea de acción de la fuerza.

Para solucionar este problema, se pensó en distintas alternativas, una era implementar una arandela más grande que se asemejara a la forma cilíndrica de la guadua, para de esta manera tener más área para resistir la fuerza cortante presentada en el prototipo del elemento de Guadua probado. No obstante, realizando un análisis más profundo se logró establecer que esta fuerza cortante era ejercida directamente por el tornillo desplazándose de manera vertical, y que no tenía nada que ver con la forma o el tamaño de la arandela. De esta manera fue como se planteó una segunda alternativa, la cual consistía en colocar una guaya metálica de 1/8" enrollada a través de toda la superficie del cono (Ver figura 21), con el fin de que esta actuara como una camisa de fuerza que evitara que la guadua se recogiera por el efecto producido de la fuerza cortante del perno, también ayudaba a que el cono no sufriera una deformación tan pronunciada, conservando su forma original y manteniendo su resistencia. Esta guaya, iba a ser además adherida a la superficie cónica del prototipo de elemento en Guadua utilizando resina epóxica, la cual, como se comprobó anteriormente, tiene excelentes propiedades mecánicas y permite que la guaya tenga mayor área de agarre para alcanzar resistencias más elevadas.



Figura 21. Prototipo del elemento de Guadua con guaya metálica de 1/8"

De acuerdo con la tabla 7, el prototipo del elemento de Guadua con guaya logró alcanzar un valor de 7912,55 kgf antes de la falla, en donde se evidencia claramente un gran avance en cuanto a la resistencia última alcanzada por los prototipos, corrigiendo la falla producida por la fuerza cortante y la atenuando la deformación del elemento. Aunque el elemento falló, perdiendo toda su resistencia, físicamente no se veían posibles fallas, el elemento estaba exteriormente casi intacto en el momento en que se terminó el ensayo (Ver figura 22). Pero entonces ¿Dónde ocurrió la falla? Para contestar esta pregunta, se debía desarmar todo el elemento para encontrar el origen de la falla (Ver figura 23), incluyendo el mortero para verificar el estado del sujetador que se encuentra inmerso en este.



Figura 22. Prototipo del elemento de Guadua con guaya metálica de 1/8" ensayada a tracción



Figura 23. Prototipo del elemento de Guadua con guaya metálica de 1/8" desarmado

Cuando se desarmó por completo el elemento de Guadua, se observó que la tuerca soldada al tubo, que en conjunto conforman el sujetador, se habían separado (Ver figuras 24 y 25), causando así la falla de todo

el elemento antes de llegar a las 8 toneladas de fuerza a tracción, como se evidencio durante la prueba. Como se sabe, la falla de piezas metálicas que tengan soldadura no debe ocurrir por donde se realizó esta, lo que puede indicar que la soldadura no se hizo de manera adecuada, ocurriendo algún error a la hora de la aplicación, ya sea cordón demasiado delgado, baches en la soldadura, etc. Probablemente una mejor soldadura hubiera generado que la falla del elemento de Guadua fuera por otro motivo.



Figura 24. Soldadura del sujetador completa



Figura 25 Soldadura del sujetador rota

A pesar de esto se decidió realizar un cambio en el diseño del sujetador, en donde se decidió eliminar la soldadura que une la tuerca hexagonal con el tubo metálico, y dejar únicamente el tubo metálico realizándole una rosca interiormente para que el tornillo zincado de  $\frac{3}{4}$ " pueda entrar atornillado en este.

Con este último diseño del prototipo del elemento de Guadua, se realizaron las pruebas correspondientes a ensayos de tracción de la probeta, estos se reflejan en el numeral 8 de la tabla 7, obteniendo un valor promedio de 8624,45 kgf siendo el resultado más alto registrado, logrado así el objetivo de superar la resistencia mecánica del tornillo zincado de  $\frac{3}{4}$ " haciendo que este fallara primero que el prototipo del elemento en Guadua (Ver figuras 26, 27, 28 y 29).





Figura 26. Prototipo elemento de Guadua final ensayado



Figura 27. Perno transversal después de ser ensayado



Figura 28. Tornillo zincado de 3/4'' después de ensayo



Figura 29. Tornillo zincado de 3/4'' después de ensayo

Según las imágenes anteriores, una observación importante que vale la pena resaltar es que, a pesar de la rotura del tornillo, la deformación presentada por la probeta del elemento de Guadua después del ensayo fue muy leve, provocando que las diferentes partes que componen el prototipo se vean poco alteradas y conserven sus propiedades mecánicas.

Así pues, se había logrado encontrar una configuración adecuada que soportara de manera correcta las sollicitaciones de cargas presentes en estructuras poliédricas, principalmente de puentes peatonales, y otras aplicaciones, tanto del mismo diseño del elemento en sí, como del material de refuerzo más adecuado que deberá llevar por dentro.

### **3.3.2 Ensayos de los prototipos del elemento en Guadua a compresión**

De acuerdo a la tabla 8 del numeral 2.3.3.3, en donde los 4 ensayos realizados obtuvieron un valor promedio de 10.025,57 kgf, siendo este un valor significativamente alto y acorde con lo que se desea alcanzar para la resistencia mecánica del elemento.

Por tal razón, es importante aclarar que no se continuó realizando más pruebas a compresión, del elemento hecho en guadua, debido a que los resultados de la fuerza máxima obtenidos con el primer prototipo del elemento de Guadua fueron los esperados, cumpliendo las sollicitaciones de cargas presentes en puentes (aprox. 10 toneladas como mínimo) y otras aplicaciones similares; es decir, si se le agregan elementos adicionales a la probeta original de guadua, los resultados a compresión aumentarían también significativamente.

### **3.4 Análisis y conceptos de los herrajes y elementos metálicos**

Según la tabla 9 del numeral 2.3.4; se puede observar con estos resultados, que los valores obtenidos en cada una de las pruebas no varían significativamente, con un coeficiente de variación que no alcanza a llegar al 1% estos resultados son, en teoría, los mismos. Esto se debe a que la resistencia que reflejan dichos valores es propia de los tornillos más no de las esferas en sí, confirmando así dos aspectos importantes: el primero que la resistencia de las esferas de fundición de hierro está por encima de los 20.000 mil kgf (resistencia del tornillo grado 5) a pesar de su geometría, y el segundo es que a pesar de que se realicen 18 perforaciones en la esfera, modificando considerablemente su geometría, ésta no presenta alteraciones en sus propiedades mecánicas y continua soportando valores mayores a los 20.000 kgf en pruebas a tensión.

Dicho esto, se tiene que las esferas hechas de fundición de hierro nodular de 4" de diámetro soportan las sollicitaciones de cargas presentes en una estructura poliédrica de un puente peatonal en donde se utilice este elemento, sin importar si la esfera llegase a tener 18 perforaciones roscadas para la conexión de los elementos hechos en guadua, que en este caso, se comportaría como un concentrador de esfuerzos que recibe las cargas dadas por cada uno de estos elementos.

### **3.4 Análisis y conceptos de guaduas cepas sometidas a compresión con material de refuerzo**

Al observar los resultados obtenidos en la tabla 10 del numeral 2.3.5, se evidencia que la resistencia promedio obtenida por estas probetas fue de 17.192,22 kgf; un valor muy elevado si se compara con el resultado a compresión del elemento de unión en guadua de la tabla 8 que obtuvo un valor promedio de 10.025,5 kgf; mejorando considerablemente su resistencia mecánica. Sin embargo, aunque se hayan conseguido resultados más altos, las guaduas cepas son demasiado gruesas para aplicaciones como el elemento tipo pinta de lápiz por su dispendiosa aplicación al momento de fabricar el cono. Por otro lado, se podría utilizar en lugares con esfuerzos críticos y en donde se pueda implementar la guadua con su forma original.

## CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Los costos en el análisis y selección del material de refuerzo fueron de gran importancia ya que en una estructura poliédrica para un puente de 50 m de longitud se usarán alrededor de unos 500 elementos en Guadua, cada uno de estos elementos tendrá dos conos en sus extremos tipo punta de lápiz, con un peso aproximado de 2 a 3 kg por punta lo que hace que el costo del material sea de suma importancia para la toma de una decisión de tales magnitudes.
- De lo anterior se concluye que el material más adecuado con relación a costo-beneficio es el SikaGrout debido a sus excelentes propiedades mecánicas principalmente, también a que es un mortero con aditivos que impide que presente contracción durante su fraguado, y además por sus bajos costos por kilogramo y facilidad de manejo y aplicación en obra.
- Para la fuerza última a tracción soportada por el elemento hecho en guadua tipo punta de lápiz, se inició obteniendo un valor de 1,6 toneladas para el primer diseño, pero finalmente se alcanzó una fuerza última total de 8,6 toneladas con las modificaciones de diseño realizadas a lo largo de la investigación.
- Con el resultado anterior se pudo obtener un rango de seguridad de aproximadamente el doble de las solicitaciones de cargas presentes en el puente, estando en un rango seguro para la implementación del diseño del elemento en guadua tipo punta de lápiz.
- Para la fuerza última a compresión soportada por el elemento hecho en guadua tipo punta de lápiz, se obtuvo un resultado de 10 toneladas en promedio, para esta fuerza obtenida no se realizaron más pruebas debido a que este valor era suficiente para las solicitaciones de carga requeridas.
- Se logró establecer que las esferas hechas en fundición de hierro nodular, de 4" de diámetro, soportan efectivamente las cargas hasta las 20 toneladas en tracción, inclusive si se modifica considerablemente la geometría realizando 18 perforaciones roscadas.
- Los pernos grado 2 soportaron una fuerza última promedio de 9,8 toneladas en tracción, y los grado 5 soportan una fuerza última de aproximadamente 20 toneladas.
- Se pudo comprobar que las guaduas cepas reforzadas con cinta band-it y con el material de refuerzo internamente, alcanzaron una resistencia última en compresión de 17,1 toneladas, aumentando significativamente los esfuerzos en un 70% en comparación a los conos y comprobando que la implementación de la cinta band-it es efectiva.

## BIBLIOGRAFÍA

- Arce-Villalobos O.A. (1993): Fundamentals of the design of bamboo structures. Dissertation. Eindhoven, Netherlands: Technische Universiteit. 261 pp.
- Arias-Galvis M. J., Ocampo D. A., Garcia-Sierra J. H. (2004): Análisis del Mercado de la Guadua con características Especiales en el Eje Cafetero. Proceedings International Symposium Guadua 2004. Pereira-Colombia, 4 pp.
- Atrops J. L. (1969): Elastizität und Festigkeit von Bambusrohren. Der Bauingenieur 44 Heft 6, pp 220 - 225.
- Cruz-Rios H. (1994): La guadua-nuestro bambu. Quindio, Colombia: Corporación Autónoma Regional del Quindio. 293pp.
- De Flander K. (2005): The role of Bamboo in Global Modernity: from Traditional to Innovative Construction Material. Thesis MSc, Wageningen University, Netherlands, 75 pp.
- Fangchun Z., (1981): Studies on Physical and Mechanical Properties of Bamboo Woods. Journal of Nanjing technological College of Forest products, N° 2, Nanjing China, 31 pp.
- Giraldo E. & Sabogal A. (1999): Una alternativa sostenible: la Guadua, técnicas de cultivo y manejo. Corporación Autónoma Regional del Quindío CRQ, Armenia. 192 pp.
- Gonzalez-Beltrán G. E. (2003): Plybamboo Wall-Panels for Housing, Structural Design. Thesis to obtain the degree of Doctor of Technical Sciences at the Eindhoven University, Eindhoven Netherlands. 235 pp.
- Held C. & Manzano I. D. (2003): El sector productivo y el Mercado regional de la Guadua en el eje cafetero colombiano. Informe del proyecto Guadua-Bambú de la Unión Europea, Freiburg-Germany, 61 pp.
- Hidalgo-López O. (2003): Bamboo -The gift of the goods. Oscar Hidalgo Editores. Bogota-Colombia. 553 pp.
- ISO 22 157-1: 2004 (E) – Bamboo – Determination of physical and mechanical properties- Part 1: Requirements, ISO copyright office. 19 pp.
- Janssen J.J.A. (2000): Designing and Building with Bamboo. INBAR Technical Report No 20, Beijing China, 207 pp.
- Jayanetti D. L. & Follett P. R. (1998): Bamboo in construction *An Introduction*. INBAR Technical Report N° 15, Published joint by Trada Technology Limited and INBAR, Bucks UK, 120 pp.
- Liese W. (1992a): Anatomia. Memorias I Congreso Mundial de Bambú – Guadua, Pereira-Colombia. pp 25-29.
- Liese W. (1998): The anatomy of bamboo culms. INBAR Techn. Rep. No 18. Beijing, China. 208 pp.
- Limaye V. D. (1952): Strength of Bamboo (*Dendrocalamus strictus*). Indian Forest Records, Vol. 1 N° 1, Forest Research Institute, Dehra Dun India. 17 pp.

- Londoño X. (2000): Guadua un gigante dormido. Seminario Guadua en la Construcción, memorias seminario, Armenia Quindío Colombia. 3-5 pp.
- Morales D. & Kleinn C. (2004a): Inventario de las existencias de *Guadua angustifolia* en el Eje Cafetero de Colombia. Proceedings International Symposium Guadua 2004. Pereira-Colombia, 11 pp.
- Morales D. & Kleinn C. (2004b): A resources assessment study of Guadua Bamboo (*Guadua angustifolia*) in the coffee Region of Colombia. Proceedings Conference on International Agricultural Research for Development, Berlin- Germany, 4 pp.
- Montoya J. A., (2002a): Investigación tecnológica en métodos para la preservación de la Guadua. Universidad Nacional de Colombia, Tesis MSc., Manizales- Colombia. 180 pp.
- Ota M. (1950): Studies on the Properties of Bamboo Stem (Part 7). The influence of the percentage of structural elements on the specific gravity and compressive Strength of Bamboo Splint. Bulletin N° 19 Kyushu University, Japan. 25-47 pp.
- Ota M. (1955 a): Studies on the Properties of Bamboo Stem (Part 8). The Variation of the Specific Gravity and the compressive Strength of Bamboo Splint in Node-interval. Bulletin N° 21 Kyushu University, Japan. 121 – 131 pp.
- Ota M. (1955b): Studies on the Properties of Bamboo Stem (Part 13). On the Relation between Shearing Strength Parallel to Grain and Moisture Content of Bamboo Splint. Bulletin N° 25 Kyushu University, Japan. 121 – 131 pp.
- Parsons J. J. (1991): Giant American Bamboo in the Vernacular Architecture of Colombia and Ecuador. American Society Geographical of New York, Geographical Review Vol. 81, N° 2, New York, pp 131-152.
- Shen Z. R. (1992): On Development of Bamboo Industry in Continental China. Bamboo and its use, International Symposium on Industrial use of Bamboo, Beijing-China. pp 18-28.
- Sekhar A.C. and Bhartari R. K., (1960): Studies on Strength of Bamboos: A Note on its Mechanical Behaviour. Indian Forest. DehraDun. pp 296 – 301.
- Sika Colombia SA. (2015): Manual Productos Sika, Hoja técnica de producto SikaGrout – 200 y Sikadur
- Sotela Motero, J. (1990): Determinación de las propiedades físicas y mecánicas del Bambú de la especie Guadua de dos zonas de Costa Rica. Proyecto PNUD-COS 87/001, San José de Costa Rica. 65 pp.
- Stamm J. (2001): Guía para la construcción de puentes en Guadua en Guadua. Proyecto UTP-GTZ, Pereira-Colombia. 22 pp.