

Efecto del contenido de humedad en la resistencia a tensión paralela a la fibra del bambú *Guadua Angustifolia* Kunth

Moisture content's effect on the fiber parallel tensile strength of bamboo
Guadua Angustifolia Kunth

Mateo Gutiérrez-González^{1*}, Caori Patricia Takeuchi-Tam²

¹*Facultad de ingeniería civil, Universidad La Gran Colombia, Bogotá, Colombia*
Correo-e: mateo.gutierrez@ugc.edu.co

²*Facultad de ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia*
Correo-e: cptakeuchit@unal.edu.co

Resumen— El bambú guadua, se ve afectado por diferentes factores que pueden modificar su resistencia mecánica, entre los que se encuentra el factor de modificación por contenido de humedad. Diferentes estudios han mostrado que la resistencia mecánica del material ante diferentes solicitaciones de carga disminuye a medida que el contenido de humedad aumenta. Para realizar la investigación se tomaron muestras de 10 culmos obtenidos de 3 regiones de Colombia. Se seleccionaron tramos de las diferentes partes de la guadua en altura: cepa, basa y sobrebasa. De cada tramo se extrajeron como mínimo siete probetas, las cuales conservaban características muy similares ya que provenían de la misma sección de bambú y se ensayaron con diferente contenido de humedad. La determinación de la resistencia a tensión paralela a la fibra y el contenido de humedad del material, se hizo siguiendo los procedimientos de la Norma Técnica Colombiana NTC 5525. Se encontró que la resistencia a tensión paralela a la fibra no se ve afectada en el rango de contenido de humedad en el que el material es usado como elemento estructural en construcciones.

Palabras clave— Bambú *Guadua angustifolia* Kunth, contenido de humedad, resistencia a tensión.

Abstract— Bamboo *Guadua* is affected by different factors that can modify its strength, and one of those factors is the related with the moisture content. Several studies have shown that the material strength under different load requirements decreases as moisture content increases. Ten culms from three different regions of Colombia were taken to prepare the test samples. The samples were also taken from different parts of each culm (bottom, middle and top). At least seven samples of each section were extracted (so the samples taken from the same piece of bamboo had similar characteristics) and tested with different moisture content. The tensile strength parallel to the fiber and the material moisture content were determined following the Colombian Technical Standards NTC 5525. Results showed that tensile strength of parallel fiber does not decrease as the moisture content of the material was increased in the range of moisture

content of the material used as a structural element in constructions.

Key Word — Bamboo *Guadua angustifolia* Kunth, moisture content, tensile strength.

I. INTRODUCCIÓN

A raíz de la problemática ambiental y económica que atraviesa el planeta en la actualidad, se ha incrementado el interés por desarrollar investigaciones que estén encaminadas a utilizar recursos renovables y naturales, que puedan reemplazar o complementar los materiales convencionales utilizados en la construcción (acero, cemento y mampostería en arcilla) por otros que tengan un menor costo ambiental, económico y energético. El bambú guadua es un material natural utilizado en Colombia desde hace cientos de años. Pueblos indígenas, colonizadores, campesinos, arquitectos e ingenieros han construido viviendas, puentes, miradores y otras obras civiles de pequeña escala con este material. Durante los últimos años se han adelantado diferentes investigaciones para conocer el comportamiento de estructuras en guadua ante las diferentes solicitaciones de servicio. Con el fin de establecer un procedimiento para el diseño de estructuras de guadua por el método de esfuerzos admisibles, la Universidad Nacional de Colombia en convenio con el Ministerio de Agricultura y Desarrollo rural de Colombia adelantó una investigación para conocer los valores de resistencia máxima y los diferentes factores que pueden afectar la resistencia mecánica del material [12]. Con estos datos, los ingenieros diseñadores pueden aplicar una metodología de diseño que les permita predecir el comportamiento de las estructuras de una manera más aproximada y sus cálculos podrán ser adaptados a cualquier

condición impuesta por el ambiente. El cambio en el contenido de humedad es uno de los factores más importantes que pueden afectar las propiedades mecánicas de materiales naturales como son la madera y el bambú [2, 3]. Por este motivo es necesario conocer cómo es la variación de la resistencia de estos materiales para diferentes condiciones de humedad. En este artículo se presentan los resultados encontrados en una investigación que estudia la relación entre la resistencia a tensión paralela a la fibra y el contenido de humedad del bambú *Guadua angustifolia* Kunth.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Materiales

Para la realización de los ensayos se utilizó *Guadua angustifolia* Kunth variedad Macana obtenida de tres regiones diferentes de Colombia. (Quindío, Valle del Cauca y Cundinamarca). De cada región se seleccionaron 10 culmos y de cada culmo se obtuvieron secciones de tres diferentes partes del tallo (inferior o cepa, media o basa y superior o sobrebasa). De cada sección se ensayaron grupos de 7 probetas las cuales tienen características similares, ya que cada una proviene de la misma sección, del mismo tallo y de la misma región. En la figura 1 se explica el proceso como fueron obtenidas las probetas. Cada probeta fue ensayada con diferentes contenidos de humedad. Las probetas fueron elaboradas siguiendo los requisitos exigidos para las probetas del ensayo a tensión paralela a la fibra en la Norma Técnica Colombiana NTC 5525 “Métodos de ensayo para determinar las propiedades físicas y mecánicas de la *Guadua Angustifolia* Kunth” la cual está basada en las norma ISO 22157.

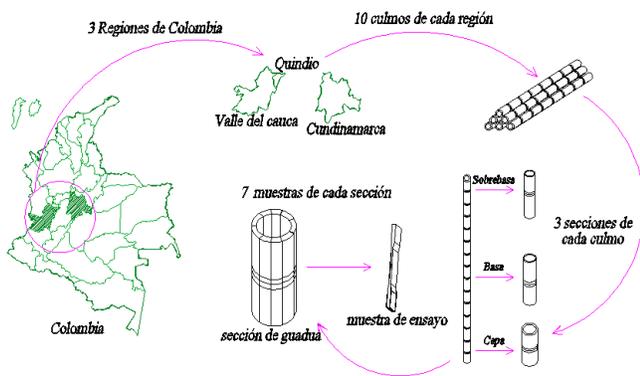


Fig. 1. Esquema para la elaboración de las probetas.

Fig. 1. Elaboration's scheme of the specimens.

B. Método para variar el contenido de humedad

Para obtener diferentes contenidos de humedad en un mismo grupo se sumergieron las probetas en agua durante un determinado tiempo, con el fin de obtener un rango de contenido de humedad que oscilara entre el contenido de

humedad de equilibrio en Bogotá y un valor de humedad por encima del 60%. Los tiempos que se debían sumergir las probetas se obtuvieron a partir unos pre-ensayos que se realizaron con anterioridad a los ensayos definitivos. De estos ensayos se determinó que las probetas debían estar sumergidas por lo menos 48 horas, y de esta manera se podía cubrir un rango de datos donde el contenido de humedad de las probetas aumentaba rápidamente.

Para cada grupo de siete probetas, el proceso iniciaba colocando todas las probetas a excepción de una de ellas, en un recipiente con agua. La probeta restante se dejaba por fuera para ser ensayada con el contenido de humedad de equilibrio *CHE* en Bogotá. Las probetas se retiraban del recipiente con intervalos aproximados de tres horas logrando que las probetas aumentaran su contenido de humedad a medida que pasaban un mayor tiempo sumergidas. Los contenidos de humedad encontrados variaron entre un 12% y 70%.

En una segunda etapa, se decidió reducir el rango de variación del contenido de humedad, con el fin de que los valores de humedad estuvieran cercanos al contenido de humedad en el punto de saturación de las fibras *PSF*, el cual según otros autores [1, 5] se encuentra alrededor del 20%. Para obtener datos de humedad por debajo del punto de saturación de las fibras *PSF*, las probetas debían estar sumergidas como máximo durante un tiempo de 3 horas. En este nuevo procedimiento las probetas fueron retiradas del agua cada 30 minutos aproximadamente. Adicionalmente, dentro de cada grupo de probetas, se ensayó una probeta con un contenido de humedad por debajo del contenido de humedad de equilibrio en Bogotá, lo cual se logró, dejando una probeta dentro del horno de secado a 103 °C, como máximo por 30 minutos. En esta etapa, los contenidos de humedad de las probetas estuvieron en un rango entre 5% y 35%. Este último método, fue el que finalmente se utilizó para la realización de los ensayos de tensión paralela a la fibra.

C. Contenido de humedad.

Para la determinación del contenido de humedad se siguió el procedimiento descrito en la Norma Técnica Colombiana NTC 5525. Este procedimiento consiste en calcular el contenido de humedad de la probeta, a partir de la pérdida de peso que ocurre cuando se elimina el agua contenida en la superficie y el interior.

Para determinar el contenido de humedad de cada una de las probetas ensayadas a tensión paralela a la fibra, se obtuvo una muestra de una zona cercana a donde se presentó la falla a tensión. Las muestras eran llevadas inmediatamente después del ensayo mecánico, a una balanza digital con una aproximación de 0.01 g donde se obtenía la masa de la probeta, conocida como masa de la muestra antes del secado, *m*. Después de pesada la muestra, se llevaba a un horno de secado a una temperatura de 103 °C +/- 2 °C donde permanecía 24 horas para ser pesada nuevamente.

Posteriormente, la masa de la probeta debía ser registrada cada 2 horas hasta que la diferencia entre las lecturas sucesivas de masa, fuera inferior a 0.01 g. En este momento la probeta se consideraba totalmente seca y esta masa se denomina como la masa de la probeta después del secado m_0 .

Conocidas las masas de la muestra antes del secado, m , y después del secado, m_0 , se calcula su contenido de humedad mediante la ecuación 1.

$$CH\% = \frac{m - m_0}{m_0} \times 100 \quad (1)$$

Donde,

CH%, corresponde al contenido de humedad del material en porcentaje.

D. Ensayo de resistencia a tensión paralela a la fibra

El ensayo para encontrar la resistencia a tensión paralela a la fibra se realizó siguiendo los procedimientos descritos en la NTC 5525, capítulo 12. El ensayo se realiza aplicando una carga gradualmente creciente sobre una probeta de guadua. A pesar de que los ensayos de tensión son comúnmente utilizados para la caracterización de distintos materiales, para la aplicación de este ensayo en probetas de bambú *Guadua angustifolia*, se requiere tener un cuidado especial en los dispositivos utilizados para sujetar las probetas, ya que al momento de aplicación de la carga, las probetas pueden resbalarse o sufrir concentraciones de esfuerzo importantes, que pueden conducir a una falla por una sollicitación de carga diferente a la requerida.

Para la realización de este ensayo, se elaboraron unas mordazas en acero que tenían un lado rugoso con el cual se sujetaba la probeta. Este sistema garantizaba que la probeta no se resbalaba de la mordaza para cargas inferiores de 15 kN. Para garantizar que las cargas de falla de las probetas ensayadas no superaran este valor, se decidió que el ancho de las probetas fuera igual o menor a 5 mm siendo el espesor de la probeta igual al espesor de la pared del culmo de guadua de donde eran extraídas las muestras. Las probetas contaban con una sección mucho menor en la zona de ensayo (parte central de la probeta), con respecto a la sección de los extremos y todas las probetas tenían un nudo en la mitad de la longitud. La forma y dimensiones de las probetas pueden verse con detalle en la Figura 2.

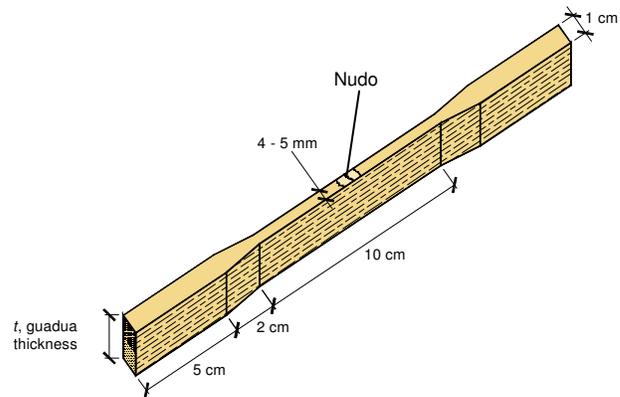


Fig. 2. Características de la probeta de ensayo
Fig. 2. Test sample features

Después de medir las dimensiones de las probetas, y de completar el proceso para variar la humedad, se realizó el ensayo a tensión paralela a la fibra. Cuando no se presentaba la falla en la zona del nudo, la probeta debía ser descartada.

La resistencia máxima a tensión se determina a partir de la ecuación 2, donde σ_{ult} , corresponde al esfuerzo de falla a tensión, F_{ult} , la carga de falla a tensión y A el área de la sección transversal de la probeta en donde ocurre la falla.

$$\sigma_{ult} = \frac{F_{ult}}{A} \quad (2)$$

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con el fin de conocer la manera como varía la resistencia a tensión paralela con el contenido de humedad, se realizó una gráfica con todos los valores de resistencia última en función del contenido de humedad. Se suponía que por tener diferentes secciones de guadua en altura, esta condición podría afectar los resultados, así que se procedió a hacer un análisis a cada una de las secciones por separado.

La figura 3 presenta todos los puntos obtenidos sin diferenciar por sección de culmo o región de procedencia de a probeta. En total se obtuvieron 478 puntos después de descartar algunos puntos por haber presentado un tipo de falla diferente a la esperada (Por cortante o en un lugar diferente al nudo). Como la guadua aumenta su contenido de humedad de una manera tan rápida, durante los primeros minutos en los que entra en contacto con el agua, fue difícil obtener contenidos de humedad comprendidos entre el 15% y el 20%.

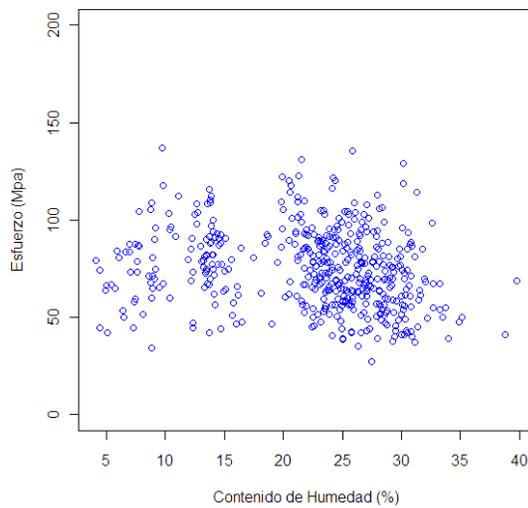


Fig. 3. Gráfico de dispersión para los valores de esfuerzo en MPa vs contenido de humedad.

Fig. 3. Dispersion graphic for strength values vs moisture content.

El box-plot de la figura 4, muestra que la resistencia última promedio obtenida en la parte superior es mayor que la obtenida en la parte media y la parte inferior, además esta sección también presenta una menor variabilidad de los datos. Esta situación es coherente con las características que han sido observadas en el bambú, ya que en la parte superior del culmo, la densidad de fibras es mayor, debido a que el volumen ocupado por el tejido parenquimático se reduce con la altura. Como las fibras son quienes aportan la mayor parte de la resistencia a la tensión, a una mayor densidad de fibras se obtiene un mayor esfuerzo último a tensión.

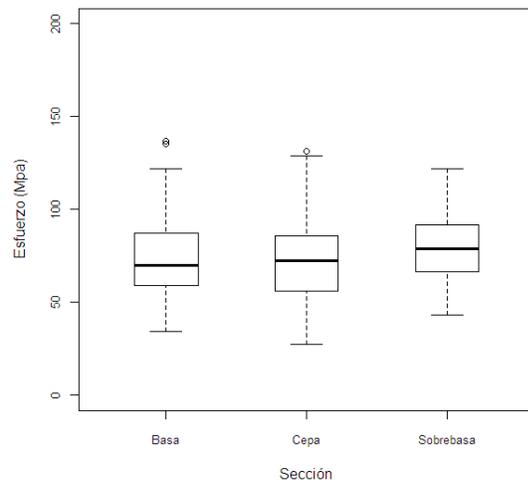


Figura 4. Box-plot para los datos de esfuerzo, separados por cada uno de los tramos de la guadua en altura.

Figure 4. Box-plot for strenght values separated for each one of bamboo culm section.

La figura 5 presenta la variación de la resistencia en función del contenido de humedad, dependiendo de la zona de la guadua en altura. Se puede observar que en general, la sobrebasa presenta un valor de esfuerzo último mayor con respecto a las otras dos secciones, excepto para un rango de

CH entre el 13% y el 21% aproximadamente donde la resistencia a tensión en la cepa es muy similar a la de la sobrebasa. También se puede observar que la tendencia de las curvas correspondientes a las probetas de la basa y de la sobrebasa son muy similares, a diferencia de la curva de la cepa que muestra un comportamiento desigual para tres zonas diferentes: La primera zona corresponde a valores de contenido de humedad menores al 14%, punto que está asociado al contenido de humedad de equilibrio del material en Bogotá, una segunda zona para un contenido de humedad entre el 14% y el 20% y una tercera zona para humedades mayores al 20%.

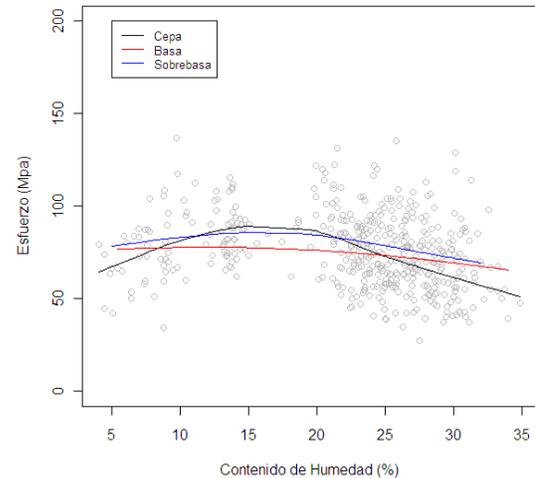


Fig. 5. Variación de la resistencia a tensión en función del contenido de humedad, para cada una de las secciones de la guadua en altura.
Fig. 5. Tensile strength variation in function of moisture content, for each one of bamboo culm section in height.

Para las probetas ensayadas con un contenido de humedad menor al contenido de humedad de equilibrio se observó que frecuentemente aparecía una falla de corte antes que una falla por tensión paralela, lo cual puede explicar la disminución de la resistencia mecánica en la primera zona donde el contenido de humedad es menor al contenido de humedad de equilibrio. Por el otro lado, para contenidos de humedad mayores al punto de saturación de las fibras, que según algunos autores [5] se puede encontrar alrededor del 20%. Si se supone que el tejido parenquimático es el tejido que se degrada debido a la presencia de humedad en el material, es coherente que la parte inferior presente una mayor disminución de la resistencia con un aumento de contenido de humedad en la tercera zona debido a que en la parte inferior es donde se presenta una mayor densidad de tejido parenquimático.

Haciendo un análisis de todos los puntos sin importar la sección del culmo de donde fueron extraídos, ver Figura 6, se puede observar que el comportamiento presentado por la parte inferior del culmo es el que gobierna el comportamiento del material. Como esta es la condición más crítica, se asume que la resistencia a tensión paralela a la fibra se ve afectada por el contenido de humedad cuando se encuentra por debajo del contenido de humedad de equilibrio o por encima del punto de saturación de las fibras. Sin embargo también se puede

observar en la Figura 6 que la resistencia a tensión paralela a la fibra no presenta una variación importante para contenidos de humedad comprendidos entre el 11% y el 20%, los cuales coinciden con el contenido de humedad al que normalmente se encuentra expuesto el material.

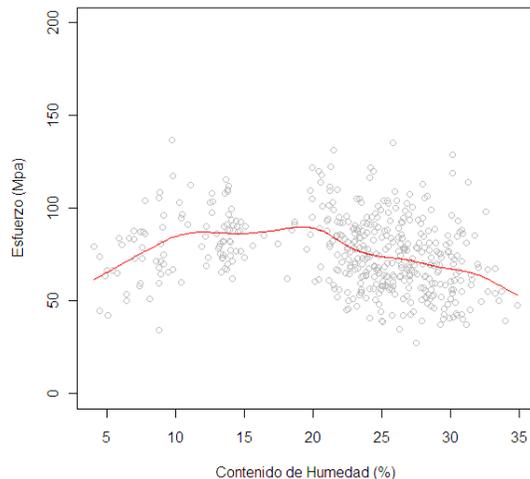


Fig 6. Variación de la resistencia en función del contenido de humedad para cualquier tramo de guadua.

Fig 6. Tensile strength variation in function of moisture content, for whatever bamboo culm section.

Lo encontrado en esta investigación difiere considerablemente con respecto a lo expuesto en título G.12 del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10, ya que allí se expone que para una variación en el CH entre el 12% y el 19%, la resistencia a tensión paralela a la fibra, disminuye hasta un 20%.

IV. CONCLUSIONES

La resistencia a la tensión paralela a la fibra presenta una variación importante cuando el contenido de humedad se encuentra por debajo del contenido de humedad de equilibrio del material, o por encima del punto de saturación de las fibras propuesto por algunos autores [5], sin embargo no presenta una variación considerable para contenidos de humedad comprendidos entre estos dos puntos.

La sección de la guadua donde hay una mayor presencia de tejido parenquimático (parte inferior) es la que presenta una mayor variación de la resistencia debido al contenido de humedad.

La guadua no presenta una variación importante de la resistencia a tensión paralela a la fibra en el rango de humedades en las que el material es utilizado como elemento estructural, ya que el contenido de humedad de equilibrio para las principales ciudades de Colombia varía entre 12% y 18.5% según lo expuesto en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10.

La disminución de la resistencia en el rango de humedades por debajo del 10% del contenido de humedad, puede estar relacionada con un debilitamiento en el tejido de soporte o tejido parenquimático, ya que un gran número de probetas ensayadas, en este rango presentaron una falla de corte longitudinal antes o al mismo tiempo que la falla por tensión.

Debido a que todas las probetas presentaron una falla por tensión en el nudo, la presencia del tejido parenquimático en esta zona, es de vital importancia para conocer la variación de la resistencia, ya que el tejido parenquimático que da soporte a las fibras puede degradarse al aumentar el contenido de humedad del material [10].

V. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo técnico y financiero a los diferentes departamentos de la Universidad Nacional de Colombia - sede Bogotá, que colaboraron con el desarrollo de esta investigación. Así mismo agradecen a la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad La Gran Colombia por el apoyo prestado para la realización de esta publicación.

REFERENCIAS

- [1]. **Antonius Janssen, J. J.** Bamboo in building structures [PhD Thesis]. Holanda. Eindhoven University, 1981.
- [2]. **Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS).** Normas Colombianas de Diseño Sismo Resistente (NSR-10). Bogotá, 2010.
- [3]. **Características y propiedades de la Madera.** Junta del Acuerdo de Cartagena. Colombia. 1987
- [4]. **Ghavami, K.** Propriedades físicas e mecânicas do colmo inteiro do bambu da espécie Guadua angustifolia. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.9, n.1, p.107-114. Campina Grande, Brasil. 2005. Disponible en: <http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v9n1/v9n1a16.pdf>
- [5]. **Hidalgo, O.** Bamboo the gift of the gods. 1 ed. Colombia: Editorial D'VINNI Ltda. Bogotá, 2003.
- [6]. **Hongyan Chen, Menghe Miao, Xin Ding.** Influence of moisture absorption on the interfacial strength of bamboo/vinyl ester composites. Composites: Part A, 40, 2013–2019. 2009. Disponible en: [ftp://emci.udg.edu/amade/mayugo/2012_01_articulos_daniel/science\(6\)](ftp://emci.udg.edu/amade/mayugo/2012_01_articulos_daniel/science(6))

- [7]. **Instituto Colombiano de Normas Técnicas.** Métodos de ensayo para determinar las propiedades físicas y mecánicas de la *Guadua angustifolia Kunth* (NTC5525). ICONTEC, Bogotá, 2007.
- [8]. **International Organization for Standardization.** Bamboo structural design (ISO 22156). ISO, 2001.
- [9]. **Ordoñez Candelaria, R. y Dávalos Sotelo, R.** Ajuste de las propiedades mecánicas de la madera estructural por cambios del contenido de humedad. *Madera y Bosques* 2, 43-51, México, 1996. Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/617/61720205.pdf>
- [10]. **Osorio L., Trujillo E., Van Vuure A.W., Lens F., Ivens J., Verpoest I.** The relation between bamboo fiber microstructure and mechanical properties. 14TH European Conference on Composite Materials. Paper ID: 982-ECCM14. Budapest, Hungary. 2010. Disponible en: https://lirias.kuleuven.be/bitstream/123456789/38780/1/982_ECCM14.pdf
- [11]. **Osorio L., Trujillo E., Van Vuure A.W., Ivens J., Verpoest I.** Morphological aspects and mechanical properties of single bamboo fibers and flexural characterization of bamboo/epoxy composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 30(5). 396–408. 2011.
- [12]. **Takeuchi C., Luna P., Granados G., Lamus F., Lozano J.** Metodología de diseño de estructuras en *Guadua angustifolia* como material estructural por el método de esfuerzos admisibles. *Revista educación en ingeniería* (11). ACOFI. Pp 66-75. 2011. Disponible en: <http://www.educacioneningenieria.org/index.php/edi/article/viewFile/117/104>