

Caracterización de las Propiedades Mecánicas del Bambú (*Bambusa Vulgaris*)

Raúl E. Rodríguez Borbolla

Master of Engineering in Civil Engineering

Supervisor: Gustavo Pacheco, Ph.D.

Civil and Environmental Engineering and Land Surveying Department

Polytechnic University of Puerto Rico

Abstracto — Este estudio contribuye con la recopilación de datos y caracterización de la *Bambusa Vulgaris* de Puerto Rico, que podrán ser usados en investigaciones futuras sobre su aplicabilidad estructural. Se tomaron muestras al azar en dos municipios de Puerto Rico, de la caña de bambú y se prepararon las probetas para los ensayos experimentales a la capacidad de resistencia a la compresión, tracción y flexión. Se tabularon y se graficaron los resultados para determinar las propiedades mecánicas de la caña de bambú. Se compararon los valores obtenidos con los materiales de construcción más comunes y se concluyó que la *Bambusa Vulgaris* tiene propiedades mecánicas muy atractivas para comenzar a ser considerado material de construcción en Puerto Rico.

Key Terms — *Bambusa Vulgaris*, Caña de bambú, Caracterización, Esfuerzos, Material Eco Amigable, Módulo de Elasticidad, Propiedades Mecánicas.

INTRODUCCION

La utilización de la caña de bambú como elemento estructural ha incrementado en los últimos años en la industria de la construcción [1]. Debido al notable impacto ambiental positivo que provee la utilización del Bambú para la conservación de nuestros recursos naturales, lo convierte en un elemento eco amigable muy atractivo para los diseñadores. Es por lo cual se estudiaron las propiedades mecánicas del *Bambusa Vulgaris*, una de las especies comunes de Bambú que se encuentran en Puerto Rico [2].

En este trabajo se presentarán los resultados experimentales para la determinación de las propiedades mecánicas del *Bambusa Vulgaris*, vía pruebas experimentales sobre probetas hechas con piezas de caña de bambú local. La intensidad

principal es determinar los valores de capacidad a la flexión, compresión y tracción, y de esta forma contribuir con la recopilación de datos y caracterización de la *Bambusa Vulgaris* de Puerto Rico, que podrán ser usados en investigaciones futuras sobre su aplicabilidad estructural.

CARACTERÍSTICAS DEL BAMBUSA VULGARIS

La *Bambusa Vulgaris* es de la familia de las gramíneas. Fue introducida aproximadamente hace 150 años a Puerto Rico en alrededor de 1,000 hectáreas, y se puede encontrar fácilmente en áreas de precipitación anual entre 60 y 150 pulgadas según muestra la Figura 1, en donde las zonas en rojo y naranja equivalen al valor mínimo de 35 a 60 pulgadas de precipitación por año, mientras que las zonas amarillas, verdes y azules varían entre 70 a 150 pulgadas de precipitación por año [2]. Para las condiciones de suelo las cañas crecen en un ph de entre 4.5 y 7.5 [1].

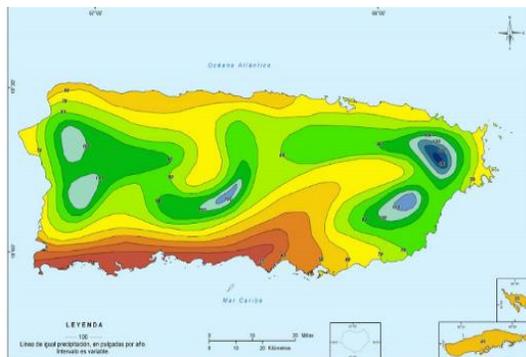


Figura 1
Precipitación e Intervalos de Precipitación en Puerto Rico [2]

Su accesibilidad es altísima ya que su presencia a nivel mundial como subfamilia de caña de bambú es notable en regiones de clima tropical y templado en América, el África subsahariana y Asia ver Figura #2 [3].



Figura 2
Presencia Natural de Caña de Bambú en el Mundo

CARACTERÍSTICAS ECO AMIGABLES

Al decir que la caña de bambú es un elemento eco amigable se refiere al hecho de que permite recoger grandes concentraciones de dióxido de carbono (CO₂) para luego liberar oxígeno siendo una función vital de nuestro sistema ecológico [4].

La caña de bambú por su parte varía según su especie, pero se puede determinar que está listo para ser utilizado como material de construcción entre 3 a 7 años desde su siembra [1]. Es un parámetro interesante si se compara con la madera, otro elemento orgánico utilizado como material de construcción, que cuenta con una gran variedad de especies que podrían tardar entre 15 a 25 años para ser cosechada y poder ser utilizado como material de construcción.

La idea de este estudio es motivar el cultivo de la caña de bambú *Bambusa Vulgaris* como conservación natural y a su vez contemplar un por cierto de la misma para ser utilizado como material de construcción. De igual forma, recomendar su uso en aplicaciones de ingeniería geotécnica como material natural para estabilización de taludes y de igual forma utilizar parte de la cosecha como material de construcción. Hasta podría contemplar para el uso recreacional de balsas o estructuras de muelles sin que estos afecten los cuerpos de agua.

METODOLOGÍA

Como el objetivo de la investigación es caracterizar la caña de bambú *Bambusa Vulgaris*

que crece en su hábitat natural en Puerto Rico, se tomaron muestras al azar en dos sitios distintos de la isla según muestran las Figuras 3, 4 y 5. Estas muestras fueron tomadas de trozos de caña de bambú que ya estaban desprendidos de sus tallos y fueron debidamente inspeccionadas para asegurarse de que no tuvieron fisura que pudieran dañar las probetas. Cabe aclarar que para motivos de esta investigación no se tomó en consideración la cosecha de la caña de bambú en menguante de la fase lunar, esta metodología de cosecha se recomienda cuando la caña va a ser utilizada como material de construcción ya que evita que la plaga del escarabajo *Dinoderus minutus* [3] ataque la caña de bambú.



Figura 3
Ubicación de las Muestras Tomadas en el Mapa de Puerto Rico (Google Earth)



Figura 4
Muestra Tomadas para Ensayos de Capacidad en Flexión (Aibonito PR Lat. 18.151880, Long. -66.266799)



Figura 5

Muestra Tomadas para Ensayos de Capacidad en Compresión y Tracción (Corozal PR Lat. 18.31758599, Long. -66.27050286)

Las muestras de la caña de bambú se llevaron al Jardín Botánico de la Universidad de Puerto Rico, donde el Prof. Eugenio Santiago Valentín, PhD (Biólogo y director del herbario) validó que las mismas debían ser *Bambusa Vulgaris* ya que es la especie que crece por naturaleza en Puerto Rico. Lo que no se pudo identificar fue su edad dado a que se tomaron las muestras en su estado natural y no se monitoreo su crecimiento.

Una vez las muestras fueron debidamente clasificadas, se utilizó como guía el estudio realizado para la caracterización de la *Guadua Angustifolia* Kunth, la cual se conoce como una de las especies típicas de caña de bambú en Colombia [5]. Decidimos seguir las guías de este estudio ya que el mismo fue desarrollado en base a una extensa revisión bibliográfica de investigación desde 1950 hasta 2005. Este estudio recomienda la geometría para la preparación de las probetas a utilizarse en los ensayos de laboratorio para la determinación de las propiedades mecánicas según se muestran en las figuras 6, 7 y 8 [5]. De las geometrías recomendadas solo dejamos como constante de cinco pulgadas la altura de las probetas a utilizarse en compresión para evitar que la misma falle por pandeo.

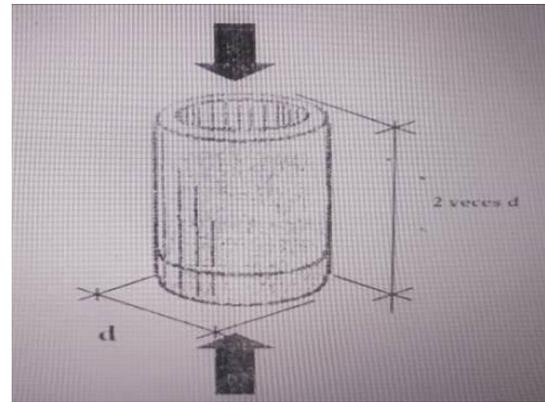


Figura 6

Dimensiones de las Probetas para Ensayos de Compresión Axial (Altura: 5 pulgadas máx.)

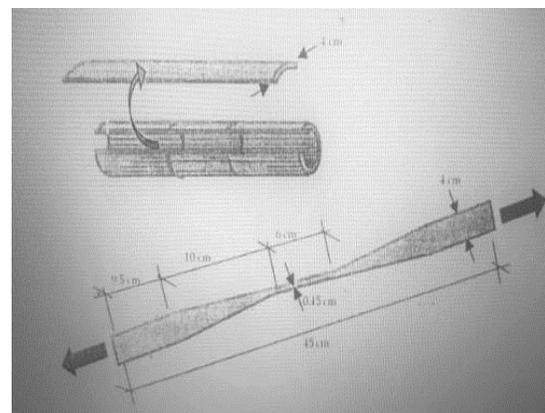


Figura 7

Dimensiones de las Probetas para Ensayos de Tracción Paralela a la Fibra

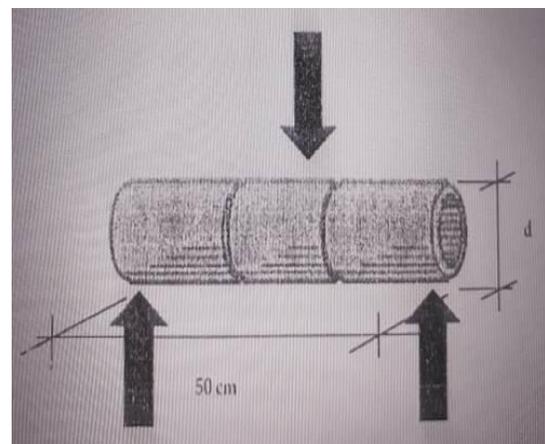


Figura 8

Dimensiones de las Probetas del Ensayo a Flexión

A continuación, se presenta el desarrollo de las probetas para los ensayos de Compresión, Tracción y Flexión respectivamente:

Compresión - En la preparación de las probetas para los ensayos de compresión, se marcó el largo seleccionado de 5 pulgadas y se utilizó una sierra de banco para su debido corte según se muestra en la figura 9. En la figura 10 se muestran las probetas identificadas y listas para ser utilizadas en el ensayo a compresión axial.



Figura 9

Sierra de Banco Utilizada para el Corte de las Probetas para Ensayo a Compresión. Taller de Madera Universidad Politécnica de Puerto Rico



Figura 10

Probetas para Ensayo de Compresión Enumeradas y Listas

Las probetas para los ensayos de compresión axial fueron colocadas en la máquina de la compañía Forney modelo QC-410, con un rango de 4,000 hasta 400,000 libras según su calibración, la misma se encuentra en el laboratorio de materiales de la Universidad Politécnica de Puerto Rico según muestra la Figura 11. Por último, se colocan las probetas en la máquina de pruebas y se comienza el

ensayo para determinar la capacidad a compresión (Figura 12).



Figura 11

Máquina para Ensayos de Compresión (Forney Modelo: QC-410)



Figura 12

Ensayo de Compresión Axial para la Probeta #1

Tracción – Como modo de la preparación de las probetas para los ensayos de tracción paralela a la fibra, se utilizó la maquina sierra de calar de banco para el corte de la caña de bambú (Figura 13). Para mantener un control de calidad en las probetas se preparó una plantilla con las dimensiones requeridas y se trazaron sobre la tira de la caña de bambú según muestra la Figura 14. Esta geometría es adecuada ya que se busca que la probeta falle por tracción y de esta forma se logra que se concentren los esfuerzos en el centro de la probeta.



Figura 13

Sierra de Calar de Banco Utilizada para el Corte de las Probetas para Ensayo de Tracción. Taller de Madera Universidad Politécnica de Puerto Rico



Figura 14

Elaboración de las Probetas para el Ensayo de Tracción

Las probetas para los ensayos de tracción paralela a la fibra fueron colocadas en la máquina de ensayos de la compañía Instron modelo 300 DX-F1-G1, la cual cuenta con un rango de 400 hasta 40,000 libras según su calibración, la misma se encuentra en el laboratorio de materiales de la Universidad Politécnica de Puerto Rico (Figura 15).

La Figura 16 presenta las probetas enumeradas y listas para los ensayos de tracción, cabe destacar que para este tipo de ensayo se debe lijar la probeta en sus apoyos hasta dejarla lo más uniforme posible o sea lisa, ya que cualquier curvatura de la probeta por la geometría de la caña de bambú haría que la

probeta resbale de la máquina de ensayo y por ende no produciría los resultados claros, lo cual sucedió con la probeta número 1 de este ensayo que se tuvo que descartar.

Es importante seguir la geometría sugerida para obligar a la probeta a concentrar sus esfuerzos en el centro de la misma y de esta forma obtener una falla en tracción. Por último, se colocaron las probetas en la máquina y se comenzó el ensayo para determinar la capacidad a tracción paralela a la fibra (Figura 17).

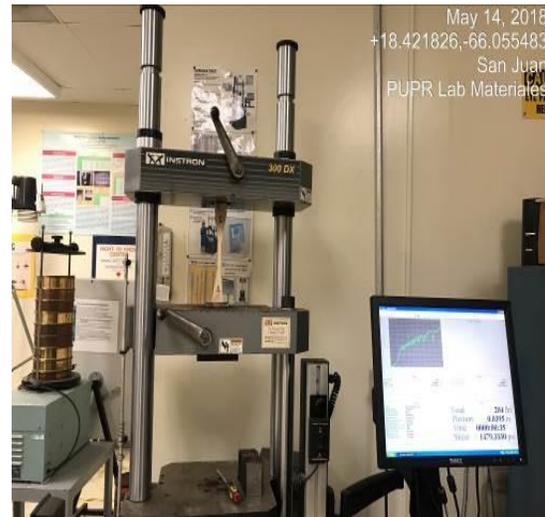


Figura 15

Máquina para Ensayos de Tracción (Instron Modelo: DX-F1-G1)



Figura 16

Probetas Listas para Ensayo de Tracción Paralela a la Fibra



Figura 17
Ensayo de Tracción Paralela a la FIBRA para la
Probeta #8

Flexión - Las probetas para los ensayos a la capacidad (resistencia) de flexión paralela a la fibra fueron colocadas en la máquina de ensayos de la compañía Instron modelo 300 DX-F1-G1, la cual cuenta con un rango de 400 hasta 40,000 libras según su calibración. La misma se encuentra en el laboratorio de materiales de la Universidad Politécnica de Puerto Rico.

En la Figura 18 se presentan las probetas enumeradas y listas para colocarlas en la máquina de ensayos a flexión. Por último, se colocaron las probetas en la máquina y se comenzó el ensayo para determinar la capacidad a flexión según se muestra en la Figura 19.



Figura 18
Probetas Listas para Ensayo de Flexión



Figura 19
Ensayo de Flexión para la Probeta #4

PROPIEDADES MECÁNICAS

Al obtener los resultados de los ensayos a las pruebas de compresión, tracción y flexión se procedió a tabular y graficar los resultados obtenidos para la caracterización de las propiedades mecánicas. A continuación, se presentan los resultados obtenidos:

Compresión - De los ensayos a la capacidad en compresión paralela a la fibra se puede comentar que la Bambusa Vulgaris obtuvo la misma falla en todas las probetas. La falla se caracteriza en cortante debido a que se separan los tejidos de la fibra longitudinalmente y es en este punto donde alcanza su valor máximo a capacidad en compresión ante la ruptura. La Tabla 1 y Tabla 2 muestran los valores de la capacidad a compresión de las probetas ensayadas, donde se observa que los esfuerzos en compresión varían entre 6,713 lb/in² y 11,611 lb/in² (lb/in² = libras sobre pulgada cuadrada)

En relación con el contenido de humedad se observa que el material contenía entre 3.053% y 4.561% de humedad, lo cual podemos mencionar que está en un rango relativamente bajo. El contenido de humedad para esta investigación se determinó a través del cálculo de la pérdida de masa de una muestra durante un proceso de secado artificial constante.

Se calculó el peso específico de las probetas, dividiendo su peso antes de colocarlo en el horno

entre su volumen, donde se multiplican las áreas con el largo (5 pulgadas constante) en todas las probetas. Los valores de los pesos específicos, área y esfuerzos máximos se encuentran en la Tabla 2.

Tabla 1
Valores de Ensayo de Compresión Axial

Probeta	Espesor (in)	% Humedad	Carga (lb)
1	0.286	4.280	20995
2	0.303	4.561	20620
3	0.200	3.125	16080
4	0.203	3.941	14805
5	0.313	4.192	19360
6	0.188	3.704	16710
7	0.188	4.040	16395
8	0.188	3.922	16240
9	0.250	3.162	16335
10	0.188	3.053	16025

Nota: in = pulgadas, lb = libras

Tabla 2
Valores de Ensayo de Compresión Axial

Probeta	Peso Unitario (lb/ft ³)	Área (in ²)	Esfuerzos (lb/in ²)
1	38.047	2.573	8158.79
2	39.371	2.758	7477.33
3	50.614	1.445	11126.98
4	50.180	1.541	9606.58
5	44.121	2.884	6713.15
6	57.311	1.436	11638.04
7	52.535	1.436	11418.65
8	55.563	1.399	11610.79
9	49.087	1.964	8319.33
10	69.516	1.436	11160.95

Nota: lb/ft³ = libras sobre pies cúbicos, lb/in² = libras sobre pulgadas cuadradas.

Tracción - De los resultados obtenidos de los ensayos a tracción de las ocho probetas ensayadas, la probeta #1 se resbaló de la máquina debido a que los apoyos presenciaban una pequeña curvatura, y los resultados de este ensayo fueron descartados. De esta prueba surgió la necesidad de mejorar las condiciones de los extremos de las probetas, donde se lijó hasta desbistar su curvatura y dejar las extremidades lo mas lisas posibles para que la máquina de ensayo agarrara bien la probeta. Una vez esto corregido, se obtuvo los valores según se muestran en las Tablas 3 y 4. La Tabla 3 resume la información sobre las características de las probetas, mientras la Tabla 4 resume la información

sobre las propiedades mecánicas de las probetas ensayadas.

Tabla 3
Valores de Ensayo de Tracción

Probeta	Área (in ²)	% Humedad	Largo Ef. (in)
1	0.138	7.463	12.717
2	0.115	7.258	12.717
3	0.153	7.438	12.717
4	0.128	7.317	12.717
5	0.145	7.627	12.717
6	0.119	7.377	12.717
7	0.132	6.250	12.717
8	0.141	7.463	12.717

Nota: in = pulgadas, in² = pulgadas cuadradas

Tabla 4
Valores de Esfuerzo Máximo y Módulo de Elasticidad del Ensayo a Tracción

Probeta	Esfuerzo Máximo (lb/in ²)	Mod E. (lb/in ²)
1	N/A	N/A
2	14027.78	418031
3	9745.27	138834
4	6687.50	340964
5	8381.74	230899
6	16156.20	927221
7	12585.28	460781
8	13933.73	319229

Nota: lb/in² = libras sobre pulgadas cuadradas

Los resultados obtenidos por la máquina de ensayos a tracción se obtuvieron los valores de los esfuerzos y deformación según se aplicaba una carga de tensión que incrementaba con el tiempo hasta su ruptura. Las deformaciones obtenidas se dividieron entre la longitud efectiva la cual es 12.717 pulgadas para todas las probetas, este valor de longitud efectiva se calculó de la resta del largo total menos el largo de cada uno de los apoyos que eran de 2.5 pulgadas en cada extremo, y obtuvimos la deformación unitaria.

Para el cálculo de Módulo de Elasticidad longitudinal se graficó los esfuerzos (lb/in²) en el eje vertical vs la deformación unitaria (adimensional) en el eje horizontal, donde el Modulo de Elasticidad corresponde a la pendiente del rango elástico de la gráfica. La Figura 20 muestra un ejemplo de la gráfica típica de los ensayos a tracción.



Figura 20

Gráfica Típica de Esfuerzos vs Deformación Unitaria en donde se obtiene el Módulo de Elasticidad para Tracción (Probeta #2)

Los valores de esfuerzo máximo obtenidos del ensayo de tracción paralela a la fibra variaron entre 6,687.50 lb/in² hasta 14,027.78 lb/in². El contenido de humedad de las probetas varió entre 6.25% y 7.63%. Estos valores de contenido de humedad son mayores que las probetas a compresión, pero de igual forma se consideran relativamente bajos.

De los resultados obtenidos en la Tabla 4 se observo que el módulo de Elasticidad varia entre 138,834 lb/in² hasta 927,221 lb/in², donde se observa una tendencia mas pronunciada entre los valores cercanos a los 400,000 lb/in².

Flexión - De los valores obtenidos de los ensayos a flexión de las seis probetas, se observa de la Tabla 5 las propiedades, en donde el contenido de humedad de las muestras seleccionadas varía entre 21.151% hasta 24.856%, estos valores de contenido de humedad son mucho mayores en comparación con las muestras que se tomaron para los ensayos a compresión y tracción.

De la Tabla 6, podemos observar los valores de esfuerzos máximos obtenidos del ensayo a flexión donde varían desde 310.48 lb/in² hasta 755.49 lb/in².

Para obtener el módulo de elasticidad de los ensayos a flexión se graficaron los valores obtenidos de esfuerzos vs deformación unitaria en donde, la deformación unitaria se obtuvo dividiendo la elongación que se va generando según se le va aplicando una carga que aumenta al paso del tiempo

a la probeta entre el largo efectivo (Tabla 5) de cada probeta. Al obtener la deformación unitaria se grafica vs los esfuerzos obtenidos del ensayo y se calcula el módulo de elasticidad resultante de la pendiente de la gráfica según se muestra en la Figura 20 la cual representa los valores obtenidos de la probeta #2. De esta forma se calcularon todos los valores del módulo de elasticidad que se resumen en la Tabla 6 donde observamos que los valores del módulo de elasticidad en flexión varían entre 18,699 lb/in² hasta 29,867 lb/in² y vemos una tendencia clara en el rango de la 18,500 lb/in². Podemos deducir que al igual que la madera el contenido de humedad es un factor para monitorear, ya que la variación al módulo de elasticidad es considerable entre los ensayos de tracción y flexión, condición que ocurre en la madera donde el % de humedad puede variar el módulo de elasticidad hasta un 71% [6], este parámetro se debe considerar para futuros estudios.

Tabla 5
Valores de Ensayo de Flexión

Pr obeta	Área (in ²)	% Humedad	Largo Ef. (in)
1	2.871	24.856	19.685
2	2.887	21.781	19.291
3	2.871	27.154	19.685
4	2.871	23.058	19.685
5	2.327	21.151	18.898
6	3.096	24.675	19.685

Nota: in = pulgadas, in² = pulgadas cuadradas

Tabla 6
Valores de Esfuerzo Máximo y Módulo de Elasticidad del Ensayo a Flexión

Pr obeta	Esfuerzos (lb/in ²)	Módulo de Elasticidad (lb/in ²)
1	461.16	18699
2	310.48	18733
3	394.64	19136
4	378.29	18759
5	367.87	18744
6	755.49	29867

Nota: lb/in² = libras sobre pulgada cuadrada



Figura 21

Gráfica Típica de Esfuerzos vs. Deformación Unitaria en donde se obtiene el Módulo de Elasticidad para Flexión

RESUMEN Y CONCLUSIÓN

Los resultados de los ensayos a las pruebas de compresión, tracción y flexión se tabularon de forma comparativa con otros materiales típicos de construcción según se muestra en la Tabla 7. Podemos observar de los resultados obtenidos que la Bambusa Vulgaris tiene propiedades mecánicas muy atractivas para comenzar a ser considerado material de construcción en Puerto Rico.

Tabla 7

Resumen de los Valores Obtenidos y Comparación con Otros Materiales de Construcción

Material	Bambus Vulgaris	Madera	Concreto	Acero
Módulo de Elasticidad (lb/in ²)	139000 -	1280000 -	3058000 -	29x10 ⁶
Esfuerzos Compresión (lb/in ²)	6700 11600	2300 12000	1500 10000	53000 187000
Esfuerzos Tracción (lb/in ²)	6600 16100	1160 2600	24 62	150000
Esfuerzos Flexión (lb/in ²)	310 750	2000 4300	24 62	36000 65000
Peso Específico (lb/ft ³)	38 70	30 80	95 155	480

Nota: lb/in² = libras sobre pulgada cuadrada

Sería recomendable que se continúen realizando ensayos a la Bambusa Vulgaris, variando los parámetros de contenido de humedad, tiempo desde su cosecha, dimensiones de las probetas entre otros, para poder comparar resultados y establecer

parámetros, estándares de ensayos y manuales de diseño. De igual manera sería recomendable desarrollar un estudio de las conexiones entre las cañas de bambú como elementos estructurales que transfieran diferentes condiciones de cargas aplicadas.

REFERENCIAS

- [1] S. Paudel, "Engineered Bamboo as a Building Material," in *International Network for bamboo and Rattan*, Beijing, Taylor and Francis Group, 2008, pp. 33-40.
- [2] E. G. Mas & O. Garcia-Molinari, "Guía Ilustrada de Yerbas Comunes en Puerto Rico," in Universidad de Puerto Rico Recinto de Mayaguez, Mayaguez, 2006.
- [3] J. K. Francis, "Bambusa Vulgaris Schrad ex Wendl, Common Bamboo," in *U.S Department of Agriculture*, New Orleans, 1993.
- [4] K. Ghavami, "Bamboo: Low cost and energy saving construction materials," in *Taylor & Francis Group*, 2008, pp. 5-21.
- [5] L. O. González-Salcedo, "Elementos para la caracterización mecánica de la Guadua Angustifolia Kunth," in *Scribd*, pp. 1-15, 2005.
- [6] B. Madsen, "Moisture Content - Strength Relationship For Lumber Subjected to Bending," in *Canadian Journal of Civil Engineering*, Canada, 1973.