

Curvas esfuerzo-deformación en dirección paralela a la fibra evaluadas en dos especies de bambú: *Guadua Angustifolia Kunth* y *Bambusa Oldhamii*

SÁNCHEZ-TIZAPA Sulpicio†*, VÁZQUEZ-JIMÉNEZ René, CUEVAS-SANDOVAL Alfredo, ALTAMIRANO-DE LA CRUZ Gerardo

Facultad de Ingeniería-UAGro

Universidad Autónoma de Nuevo León

Recibido: Agosto, 22, 2017; Aceptado Febrero 9, 2018

Resumen

Este documento presenta curvas de esfuerzo compresión-tensión contra deformación axial en dirección paralela a la fibra de pruebas realizadas en México para dos especies de bambú: *Guadua Angustifolia Kunth* y *Bambusa Oldhamii*. En el caso de la primera especie, las curvas de esfuerzo a compresión son comparadas con las obtenidas en Ecuador y Colombia y se concluye que son semejantes, sin importar las condiciones de ensaye, propiedades físicas-geométricas y posición del espécimen en la caña de bambú. También, se obtuvieron las ecuaciones de dichas curvas mediante un análisis de mínimos cuadrados. Los valores máximos de esfuerzo se registraron en la especie *Bambusa Oldhamii*. Finalmente, con resultados registrados en México y Ecuador se obtuvieron las curvas compresión-tensión contra deformación axial de ambas especies. Estas últimas gráficas muestran un mejor comportamiento del bambú respecto al concreto simple, por lo que este biomaterial podría utilizarse en la industria de la construcción.

Palabras clave: Bambú, *Angustifolia*, *Oldhamii*, Curvas, tensión, compresión.

Abstract

In this paper, experimental stress-strain curves of tensional and compressional tests carried out in Mexico for two bamboo species (*Guadua Angustifolia Kunth* and *Bambusa Oldhamii*) as wells as a comparison with those obtained in Ecuador and Colombia, are presented. For the *Guadua Angustifolia Kunth*, similar curve shapes were observed. This, in despite of variations in the tests conditions, physic and geometric specimen properties, and original specimen position in the bamboo culm. Next, through a least square analysis, characteristic equations for these stress-strain curves were obtained. *Bambusa Oldhamii* species always shown the highest tensional and compressional strengths. Stress-strain curves for theses bamboo species were compared with that of unreinforced concrete. By considering the high strength and ductility capacity, the bamboo has a better behavior under axial stress than the unreinforced concrete and could be used for building construction.

Key words: Bamboo, *Angustifolia*, *Oldhamii*, Relationship, tension, compression.

Citación: SÁNCHEZ-TIZAPA Sulpicio†, VÁZQUEZ-JIMÉNEZ René, CUEVAS-SANDOVAL Alfredo, ALTAMIRANO-DE LA CRUZ Gerardo. Curvas esfuerzo-deformación en dirección paralela a la fibra evaluadas en dos especies de bambú: *Guadua Angustifolia Kunth* y *Bambusa Oldhamii*. Foro de Estudios sobre Guerrero, 2017. Mayo 2018- Abril 2019 Vol.4 No.5 125-136

*Correspondencia al Autor: sstizapa@hotmail.com

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

El sureste de la República Mexicana (estados de Guerrero, Oaxaca y Chiapas) tiene un peligro sísmico alto y coincidentemente también es la zona de menor desarrollo social-económico del país. Uno de los aspectos donde se refleja esta situación es la mala calidad de materiales e inadecuados procesos constructivos en las edificaciones. Esta combinación genera un elevado riesgo sísmico para la sociedad. Por esta razón es necesario proponer materiales de construcción ligeros, de bajo costo, resistentes y que puedan sustituir a los tradicionales como mampostería y concreto reforzado. Atendiendo a las características geográficas, físicas y meteorológicas de esta zona, un biomaterial que podría utilizarse es el bambú; el cual ha mostrado un comportamiento adecuado ante eventos sísmicos. Por ejemplo, en Puerto Limón (Costa Rica), 30 viviendas tuvieron un comportamiento aceptable ante el sismo de M_s 7.5 ocurrido en 1991 (Camacho y Páez, 2002). Una situación similar ocurrió en 1999 en Armenia (Colombia), donde muchas construcciones de este material permanecieron en pie después del sismo M_w 6.4 (González, 2006).

Existen muchas ventajas ecológicas, mecánicas y físicas para la utilización del bambú en la construcción. Así, mientras que para procesar un metro cúbico de acero se requieren 201,292 kJ, el bambú sólo necesita 2,805 kJ (1.39%). Respecto al dióxido de carbono, la producción del acero genera 18,838 kg/m³ mientras que el bambú sólo 221 kg/m³ (Nithplangsriskul, 2011).

Un parámetro que permite definir un adecuado comportamiento sísmico es la relación resistencia a compresión entre peso específico de los materiales. Considerando valores medios, dicha relación es: a) 1042 m para concreto con resistencia a compresión, $f'_c = 25$ MPa (GDF, 2004); b) 3373 m en acero A-36 con esfuerzo de fluencia $f_y = 248.2$ MPa (IMCA, 2014); c) 8664 m para la especie *Bambusa Oldhami*.

Adicionalmente, el bambú tiene una relación de esfuerzos últimos de tensión sobre compresión entre 2.8 y 4.9 (Álvarez, 2012), mientras que en el concreto simple no sobrepasa a 0.10 (González y Robles, 2011). El bajo peso específico del bambú reduce las fuerzas sísmicas de diseño a valores del 13% respecto a las obtenidas en sistemas tradicionales de mampostería (Kakkad y Sanghvi, 2011).

Por otro lado, también existen desventajas, entre las que destacan:

- Pudrición del bambú cuando está en contacto con la humedad del suelo o bajo las lluvias
- Ataque por termitas e insectos después del corte.
- Reducción de propiedades mecánicas y dimensiones con la edad.
- Problemas en el proceso constructivo por la reducción del diámetro del elemento.
- Comportamiento complejo de las juntas.

En el aspecto económico, considerando los daños del sismo M_w 6.9 ocurrido en Bhuj, India (1999), fue posible edificar construcciones con dobles muros de mampostería y refuerzo vertical de bambú en lugar del acero de refuerzo, las cuales tenían una relación de costo entre ambos materiales igual a 55% (Sreemathi, 2002). En la ciudad de Chilpancingo, Guerrero (México), se construyó una casa de un nivel, donde el costo de los muros de bambú representó un 60% del evaluado con muros de mampostería confinada (Ascencio, 2010).

En México existen pocas referencias técnicas sobre características y diseño del bambú. Por ejemplo, se estudiaron las propiedades mecánicas y físicas de tres especies que crecen en México con el interés de fomentar su uso en la construcción (Ordoñez y Bárcenas, 2014).

También se reportan resultados en sistemas de cubiertas de marcos planos como alternativa en la construcción de vivienda económica; los marcos con armaduras de bambú y longitud de 6.0 m soportaron adecuadamente las cargas verticales y laterales generadas por efecto sísmico en una vivienda económica (Barragán-Trinidad et al., 2014). También han sido ensayados varios modelos de conexiones entre elementos y armaduras con claros de 3.5 m y 0.35 m (Álvarez, 2012).

Por otro lado, la caracterización mecánica de materiales en especímenes pequeños ante diversas solicitaciones, tensión-compresión y esfuerzos flexionantes, es importante para extrapolar o definir el comportamiento de una estructura construida con estos materiales. De esta forma, por ejemplo, para la mampostería, se han propuesto leyes de comportamiento bilineal de muros a partir de ensayos de muretes (Sánchez et al., 2010).

Objetivos

Los objetivos planteados son:

1. Evaluar las curvas esfuerzo axial contra deformación axial en una muestra pequeña de especies *Guadua Angustifolia* Kunth y *Bambusa Oldhamii* sembradas en Veracruz (México).
2. Obtener expresiones matemáticas de la relación esfuerzo normal-deformación normal de la especie *Bambusa Oldhamii* ensayada en México y de la *Guadua Angustifolia* Kunth ensayada en México, Colombia y Ecuador.
3. Comparar las curvas entre sí y con la curva del concreto simple bajo idéntica sollicitación.

Materiales y métodos

II.1 Pruebas desarrolladas en México

Los culmos de ambas especies usadas son originarios del estado de Veracruz (México) y fueron donados por la empresa Bambuver, previamente curados.

Las pruebas realizadas en 16 especímenes a compresión paralela a la fibra se muestran en la tabla 1, de la especie *Guadua Angustifolia* Kunth sólo se realizaron ensayos en especímenes con nodo.

Especie	Con nodo	Sin nodo
<i>Bambusa Oldhamii</i>	4	6
<i>Guadua Angustifolia</i> Kunth	6	-

Tabla 1. Especímenes ensayados a compresión

La relación de esbeltez media (altura/diámetro exterior, *RE*) en los especímenes a compresión fue de 1.9. Para medir la deformación normal se implementó el sistema mostrado en la figura 1 y la deformación se registró a incrementos de 9.81 kN. También se realizaron pruebas de contenido de humedad y densidad.

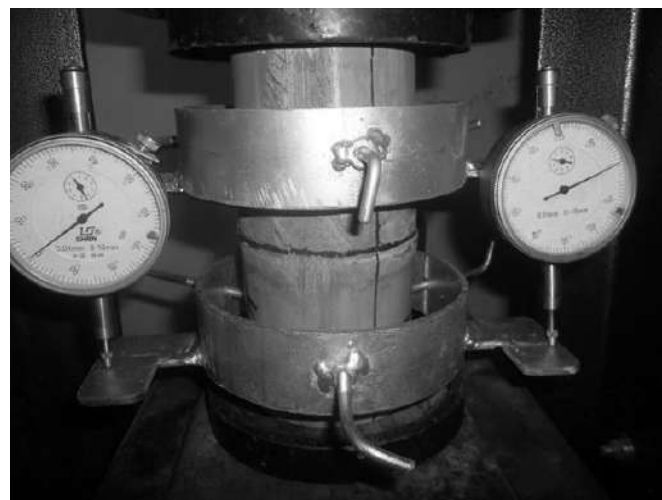
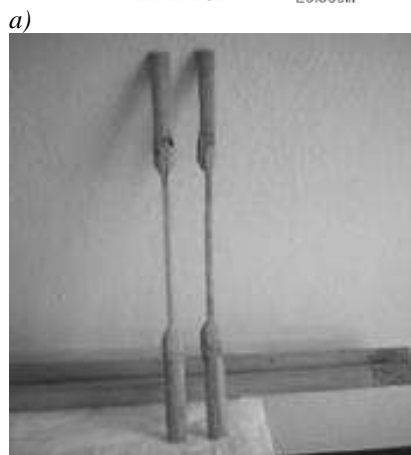
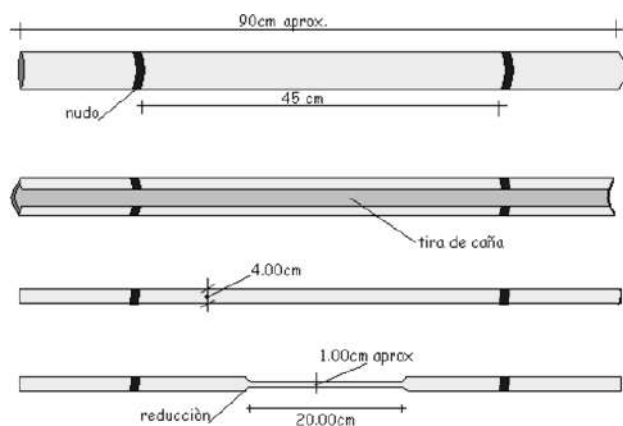


Figura 1. Sistema de medición de deformación en prueba de compresión

Respecto a las pruebas de tensión, Mendoza (2014) reporta resultados de 9 especímenes de la especie *Bambusa Oldhamii*, obtenidos de piezas con 0.90 m de longitud. La figura 2 muestra la geometría y forma final de las muestras.



b)
Figura 2. a) Extracción y geometría, b) Muestra de especímenes a tensión. (Mendoza, 2014)

Por otro lado, no existen normas mexicanas para el ensaye de especímenes de bambú, por lo que en este trabajo se utilizó sólo como guía la norma ISO 22157-1 (ISO, 2004). Sin embargo, la instrumentación de los especímenes a compresión se realizó con deformímetros mecánicos siguiendo el procedimiento de ensaye realizado en cilindros de concreto a compresión a diferencia de la utilización de galgas extensométricas propuestas en la norma ISO; en Colombia también se instrumentó con deformímetros mecánicos (González, 2006). Respecto a la prueba de tensión, la medición de la elongación se realizó con un transductor de desplazamiento lineal (LDVT) adherido a la probeta (Mendoza, 2014).

II. Datos obtenidos en Ecuador

En Ecuador, un extenso trabajo experimental fue desarrollado para determinar las propiedades mecánicas y estructurales de la especie *Guadua Angustifolia Kunth*, con el objetivo de proponer valores para diseñar construcciones de forma segura. La información utilizada en este documento corresponde a 11 curvas esfuerzo-deformación registradas en pruebas de compresión paralela a la fibra en especímenes con relación de esbeltez igual a 2.0. Además, se utilizaron diez curvas de esfuerzo de tensión-deformación normal. De ambos ensayos no se reportaron propiedades físicas. La instrumentación se realizó con galgas extensométricas, ver figura 3 (Córdoba, 2014).



Figura 3. Especímenes en tensión después de la prueba (Córdoba, 2014)

II.3 Datos obtenidos en Colombia

En Colombia se realizaron estudios con objeto de evaluar la densidad, contenido de humedad, resistencia a compresión y módulo de elasticidad de la especie *Guadua Angustifolia Kunth*. Los culmos fueron recolectados en dos departamentos de Colombia (Quindío y Caldas). De este documento se utilizaron 20 curvas reportadas de esfuerzo normal a compresión-deformación axial, las cuales fueron obtenidas en especímenes con relación de esbeltez promedio de 2.0, densidad igual a 0.59 y porcentaje de humedad de 12.76%. Los especímenes fueron instrumentados con galgas extensométricas y la carga fue aplicada con una velocidad de 0.01mm/seg (González, 2006).

II. Propuesta para la evaluación de la curva media de una serie de curvas experimentales

En la bibliografía no se encontró un procedimiento para el cálculo de la curva media a partir de curvas experimentales. Por tal razón, los autores desarrollaron la propuesta aquí presentada. La figura 4a presenta una serie de curvas experimentales (curvas 1, 2 y 3) sobre las cuales se requiere dibujar líneas de control (CC1 y CC2), con puntos de intersección P1 a P3 en la línea CC1 y P4 a P6 en la línea CC2. En estas gráficas, las abscisas representan la deformación y las ordenadas representan los esfuerzos. Las coordenadas del punto medio P_i ($\epsilon_{cci}, \sigma_{cci}$) de las tres curvas experimentales intersectadas por la línea CC1 son definidas por las ecuaciones (1) y (2).

$$\epsilon_{cc1} = (\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3)/3 \tag{1}$$

$$\sigma_{cc1} = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3 \tag{2}$$

La figura 4b representa la curva 2 y la línea de control CC1, donde los puntos C22 y C33 pertenecen a la curva experimental y entre éstos se tiene el punto P2, que es la intersección con la curva experimental y coordenadas desconocidas. Considerando que se propone la línea de control CC1, entonces los ángulos θ_1 a θ_3 , así como las coordenadas de C22, C23 y P0 son conocidos; por lo cual es posible plantear la ecuación (3). De acuerdo con la figura 4c se obtiene la ecuación (4).

$$V = L \sin(\theta_1 - \theta_3)/\sin(180 - \theta_1) \tag{3}$$

$$Z = V \sin \theta_1/\sin(180 - \theta_1 - \theta_2) \tag{4}$$

La variación del esfuerzo y la deformación respecto al punto C22 se evalúa mediante las ecuaciones (5) y (6), figura 4d. Con las ecuaciones (7) y (8) se definen las coordenadas del punto P2, en forma idéntica se obtienen las coordenadas de los puntos P1 y P3.

$$\Delta\epsilon = Z \cos \theta_2 \tag{5}$$

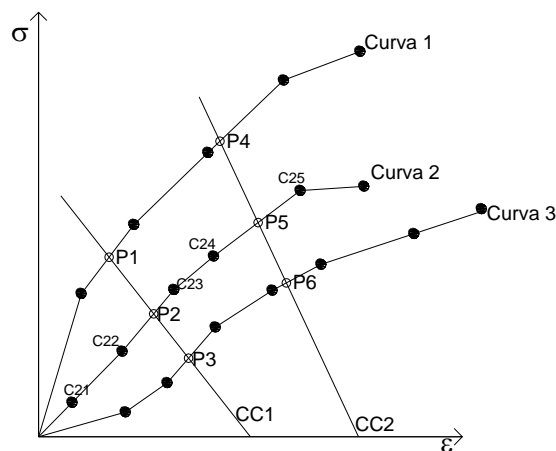
$$\Delta\sigma = Z \sin \theta_2 \tag{6}$$

$$\epsilon_2 = \epsilon_{C22} + \Delta\epsilon \tag{7}$$

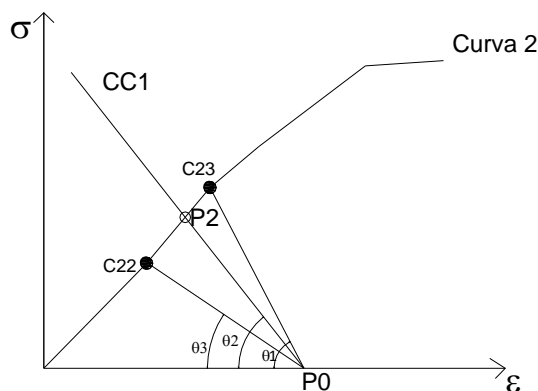
$$\sigma_2 = \sigma_{C22} + \Delta\sigma \tag{8}$$

ISSN:2007-882X

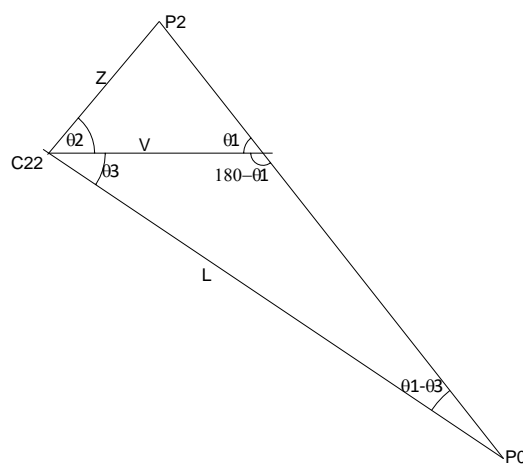
COCYTIEG ® Todos los derechos reservados



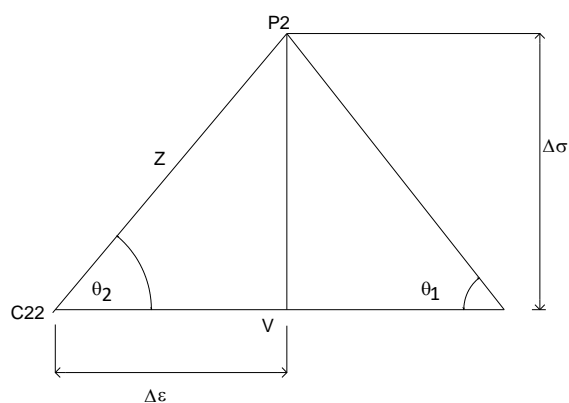
a)



b)



c)



d)

Figura 4. Propuesta para evaluar la curva media de tres curvas experimentales

Finalmente, teniendo las coordenadas de los puntos P1, P2 y P3 y mediante las ecuaciones (1)- (2) se evalúa la coordenada del punto medio de todas las curvas experimentales intersectadas por la línea de control CC1. El procedimiento se repite con la línea de control CC2 (figura 4a) y así sucesivamente, hasta cubrir la longitud de las curvas experimentales. Este proceso fue automatizado mediante un algoritmo desarrollado en el software libre (Scilab Enterprises, 2014).

III Resultados

III.1 Ensayes en México

La tabla 2 presenta los resultados de contenido de humedad, resistencia y densidad de los especímenes ensayados a compresión. El valor medio del contenido de humedad (CH) fue 9.5% para la especie *Bambusa Oldhamii* y 7.8% en la especie *Guadua Angustifolia Kunth*. Los valores medios del esfuerzo a compresión (σ_{mc}) y densidad (D) son: a) 56.1 MPa y 0.66 para *Bambusa Oldhamii*, b) 49.1 MPa y 0.55 para *Guadua Angustifolia Kunth*, respectivamente. La última columna de la tabla 2 indica los tres tipos de falla (F) y significan: a) Cortante paralelo (CP), b) Aplastamiento (A), c) Falla combinada de cortante paralelo y aplastamiento (CPA), la figura 6 presenta cada una de éstas.

La figura 7 contiene diez curvas de especímenes ensayados a compresión de *Bambusa Oldhamii*, en las cuales se midió el módulo de elasticidad medio (E_{mc}), entre el 20% y 80 % del esfuerzo máximo, igual a 24.6 GPa con un coeficiente de variación (CV) de 32%. La figura 8 presenta seis curvas a compresión de la *Guadua Angustifolia Kunth* donde se registró un valor medio de $E_{mc} = 18.4$ GPa.

#	E	RE	CH	σ_{mc}	D	F
			%	MPa		
1		1.6	16.5	50.0	0.47	CP
2	<i>Bambusa Oldhamii</i>	2.0	8.7	53.0	0.46	CP
3	<i>sin nodo</i>	1.8	8.3	65.5	0.60	CP
4		1.9	8.8	61.0	0.80	CP
5		2.0	9.6	61.0	0.79	CPA
6		1.8	9.7	66.0	0.71	CPA
7	<i>Bambusa Oldhamii</i>	1.9	8.9	40.0	0.64	A
8	<i>con nodo</i>	2.0	9.9	65.5	0.84	CP
9		1.9	9.7	59.0	0.72	A
10		2.0	4.6	40.5	0.58	CPA
11		1.9	8.9	53.0	0.31	A
12		1.9	8.4	41.0	0.64	CPA
13	<i>Guadua Angustifolia Kunth</i>	1.9	8.0	68.0	0.84	CP
14		1.9	8.3	45.5	0.51	A
15		1.8	8.8	46.0	0.52	A
16		1.8	4.1	51.0	0.51	CP

Tabla 2 Resultados de las pruebas de compresión y físicas

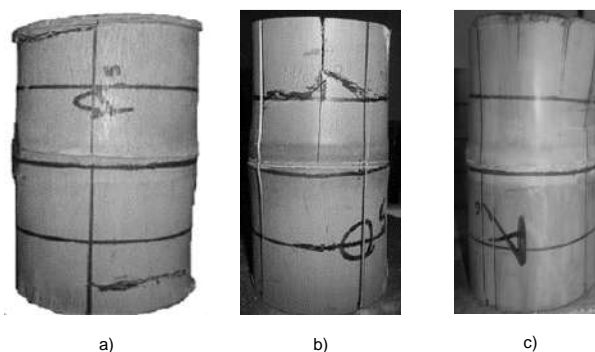


Figura 4. a) Falla por aplastamiento (*Guadua Angustifolia Kunth*), b) Falla por corte paralelo (*Bambusa Oldhamii*), c) Falla por corte paralelo y aplastamiento (*Guadua Angustifolia Kunth*)

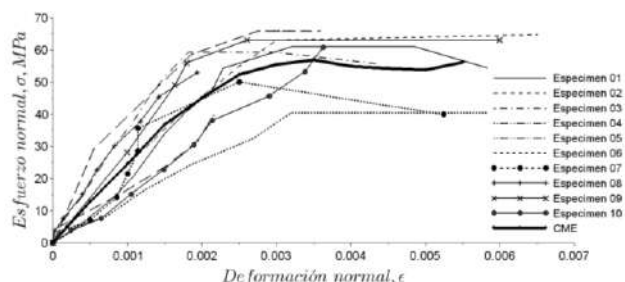


Gráfico 1. Curvas de esfuerzo normal-deformación normal (*Bambusa Oldhamii*, México)

Con la idea de representar el comportamiento mecánico ante carga axial, se obtuvo la curva media experimental (CME) de las diez curvas experimentales de *Bambusa Oldhamii*, figura 7, el cálculo se hizo a cada $\Delta\varepsilon=0.0005$, desde 0.0005 hasta 0.0055 de acuerdo al proceso definido en II.4. La última línea de control interseca al menos cuatro curvas experimentales. A continuación, mediante análisis de mínimos cuadrados se obtuvo la ecuación (9), que define la curva media propuesta (CMP), donde se distinguen dos partes, si la deformación $\varepsilon \leq 0.0035$ se establece una ecuación de segundo grado, en caso contrario se tiene una ecuación de primer grado. Este proceso se repite para los datos de *Guadua Angustifolia Kunth*, ver figura 8 y ecuación (10), para la cual la deformación máxima propuesta fue 0.007.

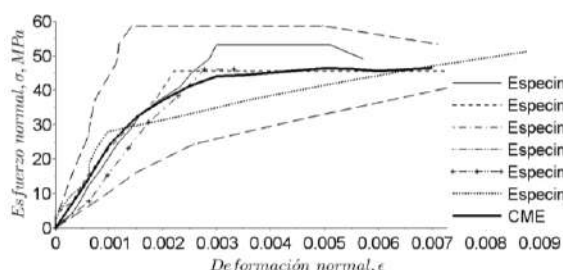


Gráfico 2. Curvas de esfuerzo normal-deformación normal (*Guadua Angustifolia Kunth* México)

$$\sigma = \begin{cases} -3797030.80\varepsilon^2 + 29819.41\varepsilon & \text{si } 0 \leq \varepsilon \leq 0.0035 \\ -864.92\varepsilon + 54.83 & \text{si } 0.0035 < \varepsilon \leq 0.0055 \end{cases} \quad (9)$$

$$\sigma = \begin{cases} -4322731.30\varepsilon^2 + 27500.32\varepsilon & \text{si } 0 \leq \varepsilon \leq 0.0030 \\ 601.79\varepsilon + 42.56 & \text{si } 0.0030 < \varepsilon \leq 0.007 \end{cases} \quad (10)$$

Respecto a la prueba de tensión, la figura 9 contiene nueve curvas experimentales de la especie *Bambusa Oldhamii*, también se presenta la curva media experimental (CME). El valor medio del módulo elástico, medido al 50% del esfuerzo máximo fue $E_{mt} = 14.92$ GPa con un $CV = 39\%$. El valor medio del esfuerzo máximo de las nueve muestras alcanzó $\sigma_{mt} = 273.30$ MPa y $CV=14.4\%$, el cual estuvo asociado a una deformación $\varepsilon = 0.0197$. La ecuación (11) representa la CMP del esfuerzo normal-deformación normal, en este caso $\varepsilon_1 = 0.01$. La figura 10 presenta el estado final de un espécimen después del ensaye.

$$\sigma = \begin{cases} 14553.86\varepsilon & \text{si } 0.0 \leq \varepsilon \leq 0.010 \\ 8111.07(\varepsilon - \varepsilon_1) + 145.54 & \text{si } 0.010 < \varepsilon \leq 0.024 \end{cases} \quad (11)$$

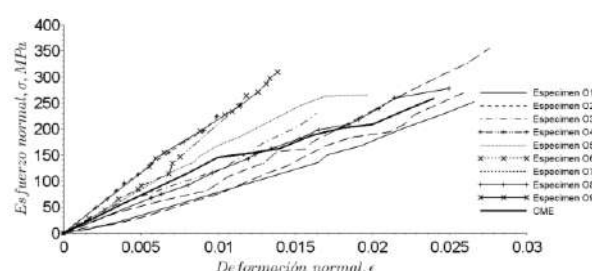


Gráfico 3. Curvas de esfuerzo normal de tensión-deformación normal para *Bambusa Oldhamii* México (Mendoza, 2014)

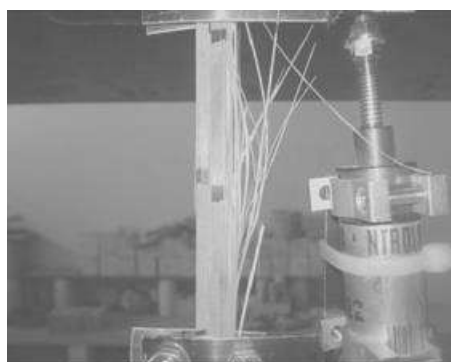


Figura 5. Falla de un espécimen a tensión (Mendoza, 2014)

III.2 Curvas medias experimentales y propuestas para la especie *Guadua Angustifolia* Kunth de Ecuador y Colombia

De acuerdo a la metodología presentada, se obtuvieron las curvas medias experimentales (CME) y propuestas (CMP) del esfuerzo a compresión-deformación normal. En el caso de Ecuador, la ecuación (12) representa la CMP a partir de la curva media experimental y que es válida para deformaciones $\epsilon \leq 0.0035$. En los ensayos de Colombia se propuso la ecuación (3), de tipo parabólica hasta $\epsilon \leq 0.0040$ y lineal de este punto hasta $\epsilon=0.0070$, ver figuras 11 y 12.

El valor medio del esfuerzo a compresión en Ecuador fue $\sigma_{mc}= 48.9$ MPa y $CV = 10.7 \%$, mientras que el módulo elástico a compresión registró $E_{mc} = 25.5$ GPa con $CV= 21\%$. En el caso de Colombia se registró un valor medio de esfuerzo a compresión $\sigma_{mc} = 52.31$ MPa con $CV =16.2\%$, módulo de elasticidad $E_{mc} = 17.8$ GPa y $CV = 42\%$.

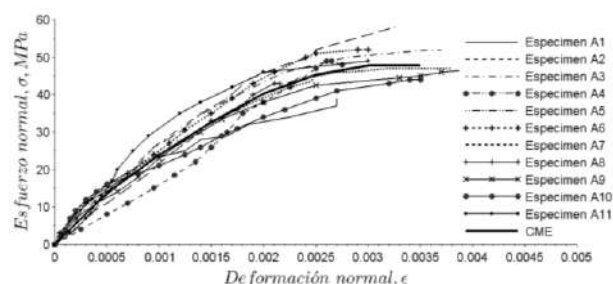


Gráfico 4. Curvas esfuerzo normal-deformación normal de *Guadua Angustifolia* Kunth, Ecuador (Córdoba, 2014)

$$\sigma = -4186304.80 \epsilon^2 + 28423.46 \epsilon \quad \text{si } 0 \leq \epsilon \leq 0.0035 \quad (12)$$

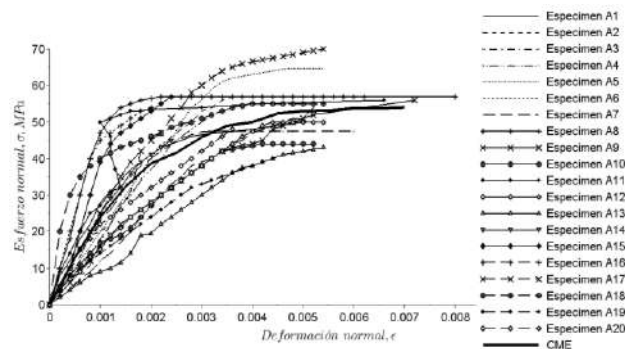


Gráfico 5. Curvas de esfuerzo normal-deformación normal de *Angustifolia* Colombia (González, 2006)

$$\sigma = \begin{cases} -2817267 \epsilon^2 + 24243.87 \epsilon & \text{si } 0 \leq \epsilon \leq 0.0040 \\ 721.42 \epsilon + 49.01 & \text{si } 0.0040 < \epsilon \leq 0.007 \end{cases} \quad (13)$$

La figura 13 presenta las gráficas de tensión de diez pruebas realizadas en Ecuador, así como la curva media experimental. La CMP es definida con la ecuación (14), para este caso $\epsilon_1=0.007$. El valor medio del esfuerzo a tensión fue $\sigma_{mt} =136.0$ MPa y $CV=7.5\%$. El módulo elástico resultó $E_{mt} = 18.4$ GPa con un coeficiente de variación $CV= 26\%$.

$$\sigma = \begin{cases} 16120.18 \epsilon & \text{si } 0 \leq \epsilon \leq 0.007 \\ 8177.15 (\epsilon - \epsilon_1) + 112.84 & \text{si } 0.0070 < \epsilon \leq 0.009 \end{cases} \quad (14)$$

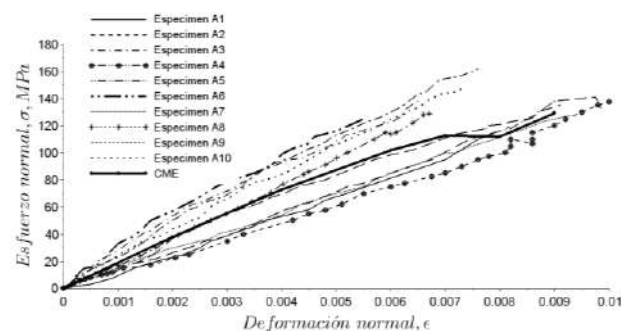
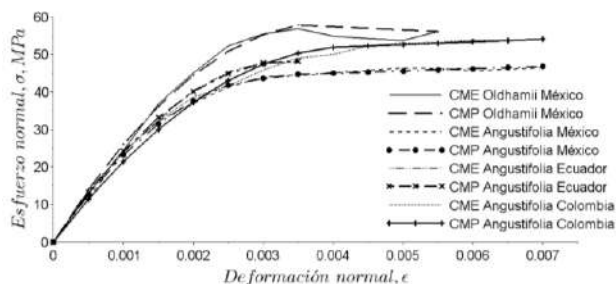
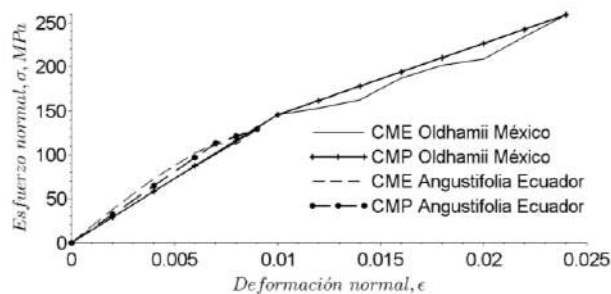


Gráfico 6. Curvas de esfuerzo normal de tensión-deformación normal de *Guadua Angustifolia* Ecuador (13)

En la figura 14 se presentan las curvas medias experimentales(CME) y propuestas (CEP) de compresión y tensión contra la deformación, mientras que la figura 15 presenta las curvas propuestas completas para *Bambusa Oldhamii* (México) y *Guadua Angustifolia* Kunth (Ecuador). La parte negativa es tensión definida por las ecuaciones (11) y (14), la parte positiva representa compresión y se obtiene al graficar las ecuaciones (9) y (12). Para comparación se agregó una curva de concreto simple (Sánchez et al., 2011).



a)



b)

Gráfico 7. Comparación de curvas experimentales y propuestas: a) Compresión, b) Tensión

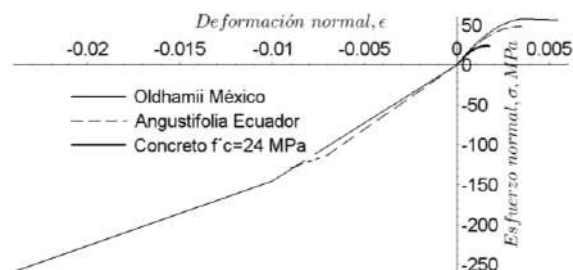


Gráfico 8. Curvas de comportamiento propuestas ante carga monótona en tensión-compresión

Discusión

Las tablas 5 y 6 presentan el resumen de las propiedades mecánicas y físicas de los especímenes ensayados.

Respecto a la densidad (*D*), la *Guadua Angustifolia Kunth* registró valores semejantes para los casos de México y Colombia.

Referente al contenido de humedad (*CH*), los especímenes ensayados en México estaban más secos (7.8% contra 12.76 %). Respecto a la resistencia a compresión (σ_{mc}), la especie *Bambusa Oldhamii* tiene el mayor valor con 56.1 MPa y la resistencia a compresión de la *Guadua Angustifolia Kunth* es parecida en los tres estudios; el módulo elástico en compresión de *Guadua Angustifolia Kunth* (E_{mc}) obtenido en Ecuador resultó más alto, con un valor menor de la deformación (ϵ_{mc} = 0.0035) asociado al esfuerzo medio; los valores de deformación asociados a los esfuerzos medios obtenidos en México y Colombia son similares.

En las pruebas de tensión, nuevamente la *Bambusa Oldhamii-México* registró el mayor esfuerzo (σ_{mt} = 273.3MPa) mientras que la *Guadua Angustifolia Kunth-Ecuador* sólo alcanzó el 49% de este valor (136.0 MPa). En el caso del módulo elástico (E_{mt}) se invirtió la situación, la *Bambusa Oldhamii-México* alcanzó el 81 % (14.92 GPa) del valor registrado por la *Guadua Angustifolia Kunth-Ecuador*.

Especie Origen	Propiedades físicas	
	CH (%)	D
BO/M	9.5	0.66
GAK/M	7.8	0.55
GAK/E	-	-
GAK/C	12.7	0.59

Tabla 5. Valores medios de propiedades físicas

Especie Origen	Propiedades mecánicas					
	Compresión			Tensión		
	σ_{mc}	E_{mc}	ϵ_{mc}	σ_{mt}	E_{mt}	ϵ_{mt}
BO/M	56.1	24.6	5.5 E-3	273.3	14.9	19.7 E-3
GAK/M	49.1	18.2	6.5 E-3	-	-	-
GAK/E	48.9	25.5	3.5 E-3	136.0	18.4	8.0 E-3
GAK/C	52.3	17.8	5.7 E-3	-	-	-

Tabla 6. Valores medios de propiedades mecánicas

En las tablas 5 y 6 se tiene: BO/M, *Bambusa Oldhamii* de México; GAK/M, *Guadua Angustifolia* Kunth de México; GAK/E, *Guadua Angustifolia* Kunth de Ecuador; GAK/C, *Guadua Angustifolia* Kunth de Colombia. CH, contenido de humedad; D, densidad; σ_{mc} , esfuerzo medio de compresión; E_{mc} , módulo de elasticidad a compresión; ε_{mc} , deformación asociada al esfuerzo medio de compresión; σ_{mt} , esfuerzo medio de tensión; E_{mt} , módulo de elasticidad a tensión; ε_{mt} , deformación asociada al esfuerzo medio de tensión.

Referente al modo de falla en las pruebas a compresión no hay un patrón definido, excepto para los cuatro especímenes con nodo de *Bambusa Oldhamii* que fallaron por cortante paralelo (CP), donde se observó un efecto negativo en la resistencia a compresión.

Las curvas medias propuestas a compresión (CMP) son, en la mayoría los casos, una combinación de parábolas y rectas, la parte parabólica termina con deformaciones entre 0.0030 y 0.004, después existe un comportamiento lineal con disminución de rigidez. La figura 14a muestra un comportamiento similar de la especie *Guadua Angustifolia* Kunth en los tres países, sin importar los parámetros de ensaye, la geometría y/o las características físicas de los especímenes, así como la posición que ocupaba el espécimen en la caña de bambú. Así, la pendiente inicial en las tres curvas es semejante hasta deformaciones entre 0.0035 y 0.004, después el material se plastifica.

Con respecto a las pruebas de tensión, la curva media propuesta (CMP) de *Bambusa Oldhamii* muestra una degradación de rigidez a partir de $\varepsilon = 0.01$, mientras que en la *Guadua Angustifolia* Kunth se inicia con $\varepsilon = 0.007$. En el mismo orden, la razón de esfuerzos últimos de tensión-compresión experimentales es 4.87 y 2.78, respectivamente, con una deformación última mayor en la especie *Bambusa Oldhamii*.

La figura 15 muestra las curvas propuestas de ambas especies en tensión y compresión bajo carga monótona, la cual indica la ventaja estructural del bambú respecto al concreto simple, la máxima resistencia del concreto es 20 MPa mientras la especie *Bambusa Oldhamii* alcanza valores cercanos a 60 MPa, ambos tipos de especímenes tenían relaciones similares de esbeltez (dos para el concreto y 1.9 en el espécimen de bambú). En el lado de tensión el concreto no supera esfuerzos mayores al 10% del esfuerzo en compresión (2.0 MPa), mientras la *Bambusa Oldhamii* alcanza 250 MPa.

Conclusiones

Las curvas medias experimentales de esfuerzo a compresión normal-deformación normal de la *Guadua Angustifolia* Kunth obtenidas en los tres países tienen la misma forma, la *Bambusa Oldhamii* presenta una forma similar.

Los resultados en especímenes de ambos materiales, con idénticas relaciones de esbeltez, muestran una mayor ductilidad y resistencia del bambú respecto al concreto simple, la resistencia máxima a compresión de 60 MPa registrada en la *Bambusa Oldhamii* correspondería a un concreto de alta resistencia. En ambas variedades, la curva de esfuerzo de tensión-deformación normal presenta un comportamiento elastoplástico. En la especie *Bambusa Oldhamii* la pendiente del tramo plástico es 55% de la pendiente del tramo elástico, la razón se reduce a 51% en la especie *Guadua Angustifolia* Kunth.

La semejanza de las curvas medias en ensayos a compresión de la *Guadua Angustifolia* Kunth, sin importar el procedimiento de prueba ni las características y origen de los especímenes, sugiere una posible caracterización del comportamiento del material, similar al realizado para el concreto simple o el acero estructural. Así, las curvas compresión-tensión-deformación axial son herramientas necesarias para el análisis de estructuras elaboradas con este material.

Los resultados muestran que, bajo ciertas condiciones, el bambú tiene un mejor comportamiento respecto al del concreto simple. Sin embargo, deben revisarse las desventajas del material, específicamente la durabilidad y resistencia al fuego, que pueden reducir el período de vida útil de las estructuras construidas con este material. Otra problemática en la fase de diseño es el desconocimiento a priori de las propiedades geométricas de los culmos, a diferencia de los perfiles de acero o elementos de madera con secciones previamente definidas.

Los autores concluyen que el aprovechamiento de este biomaterial en la región Sur de la República Mexicana (Guerrero, Oaxaca y Chiapas), donde existen las condiciones meteorológicas apropiadas, ayudaría a reducir la falta de vivienda, disminuir el riesgo de la sociedad ante los efectos de fenómenos naturales y reducir los costos de la construcción.

Referencias

Álvarez, C. E. R. (2012). *Comportamiento mecánico de las conexiones en los elementos de bambú para estructuras ligeras: El caso de las especies del trópico de Veracruz*. (Universidad Politécnica de Madrid, España.). Retrieved from http://oa.upm.es/14530/1/03_2012_ENRI_QUE_ROBERTO_ALVAREZ_CASTIL_LA.pdf.

Ascencio, L. O. (2010). *El uso del bambú como alternativa para viviendas de interés social*. México: Gráficas del Sur.

Barragan-Trinidad, R., Cuevas, A., Sánchez, M., & Ortega, R. (2014). Ensayo de sistemas de cubiertas y marcos planos de bambú como una alternativa sustentable en la construcción de vivienda económica. *Foro De Estudios Sobre Guerrero*, 1(1), 209-213.

Camacho, V., & Páez, I. (2002). Estudio de conexiones en guadua, solicitadas a momento flector. *Civil Engineering Thesis*. Bogotá: Universidad Nacional De Colombia.

Córdova, P. (2014). *Obtención de las propiedades mecánicas y estructurales de la caña guadúa angustifolia kunth del ecuador* (Facultad de Ingeniería. Universidad Católica de Santiago de Guayaquil).

GDF. (2004). Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto (NTC-C). *Gaceta Oficial Del Distrito Federal*. México.

Gonzalez, C. O., & Robles, F. F. (2002). *Aspectos fundamentales del concreto reforzado*. México: Limusa.

González, Q. C. E. (2006). *Resistencia a la compresión paralela a la fibra de la guadua angustifolia y determinación del módulo de elasticidad*. (Universidad Nacional De Colombia. Facultad de Ingeniería).

IMCA. (2014). In Instituto Mexicano de la Construcción en Acero (IMCA) (Ed.), *Manual de construcción en acero* (5th ed.). México: Limusa.

- Kakkad, M. D., & Sanghvi, C. (2011). Comparative study of bamboo (ikra) housing system with modern construction practices. Paper presented at the *National Conference on Recent Trends in Engineering & Technology*, BVM Engineering College, Nagar, Gujarat, India. Retrieved from <http://www.bvmengineering.ac.in/misc/docs/published-20papers/civilstruct/struct/101078.pdf>
- Mendoza, J. N. (2014). *Propiedades físicas y mecánicas del bambú: Perspectivas de empleo para la construcción de viviendas económicas*. (Universidad Autónoma de Guerrero. Facultad de Ingeniería.)
- Ordóñez-Candelaria, V. R., & Bárcenas-Pazos, G. M. (2014). Propiedades físicas y mecánicas de tres especies de guaduas mexicanas (guadua aculeata, guadua amplexifolia y guadua velutina). *Madera Y Bosques*, 20(2), 111-125. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712014000200010.
- Plangriskul, N., & Dorsano, N. (2011). *Materials characterization of bamboo and analysis of bonding strength and internal strength as a structural member in reinforced concrete* Retrieved from <http://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1018&context=matsp>.
- Sánchez, S., Barragán, R., García, V. M., Delgado, D., & Pastrana, E. I. (2011). *Experimental and numerical study of confined masonry walls subject to lateral loads*. México: Ediciones e Impresiones.
- Sánchez, S., Arroyo, R., & Jerez, S. (2010). Modelo de un grado de libertad para evaluar la curva carga lateral-distorsión en muros de mampostería confinada. *Ingeniería Sísmica*, (83), 25-42. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0185-092X2010000200002&script=sci_arttext
- Scilab Enterprises. (2014). *Scilab 5.4.1* (Cecill License; ed.)
- Sreemathi, I. (2002). *Guidelines for building bamboo-reinforced masonry in earthquake-prone areas in india*. Available from University of Southern California. Faculty of the School of Architecture. Retrieved from [https://www.sheltercluster.org/sites/default/files/docs/Guidelines for building bamboo-reinforced masonry in earthquake zone s.pdf](https://www.sheltercluster.org/sites/default/files/docs/Guidelines%20for%20building%20bamboo-reinforced%20masonry%20in%20earthquake%20zone.pdf).
- International Standard (2004). *Bamboo-Determination of physical and mechanical properties, Parte 1, Requirements*, ISO 22157-1. 26 p.