Determinación de la rigidez de un tipo de conexión viga-columna en guadua Angustifolia

Fabián Augusto Lamus Báez* / Caori PatriciaTakeuchi Tan**

Fecha de envío: 25 de mayo de 2009
Fecha de aceptación: 3 de agosto de 2009

Resumen

En este documento se presentan los resultados obtenidos para el valor de rigidez a flexión para una conexión entre dos elementos en guadua angustifolia. En la investigación se ensayaron 15 conexiones viga-columna construidas a escala natural y sometidas a ensayos seudo-estáticos de carga y descarga. A partir de los datos experimentales se construyeron las curvas momento-giro para cada una de las probetas ensayadas y se determinó la rigidez de la conexión como la pendiente de dichas curvas. Adicionalmente, se realizó el ensayo de tres pórticos de dos pisos y una luz, ante cargas horizontales aplicadas en el piso superior, y los resultados se emplearon para calibrar un modelo matemático construido en un programa de análisis matricial.

Palabras clave: guadua angustifolia, conexión, rigidez

Stiffness assessment for beam-column joints in bamboo fiber Angustifolia

Abstract

The values of bending stiffness of a connection between two elements built with bamboo fiber Angustifolia are reported in this paper. Fifteen column-beam connections at real scale were built and tested under static loading and unloading cycles. The Moment-slope curves were plotted since experimental data, for anyone of the samples, and the stiffness of connection was determined such as the slope of these figures. Beside, three frames with two levels and one bay were tested under horizontal loads applied at second floor. Experimental results were used for fit a mathematical model built using matrix analysis software.

Keywords: bamboo fiber Angustifolia, joint, stiffness.

* Ingeniero Civil de la Universidad Industrial de Santander. Maestría en Estructuras de la Universidad Nacional de Colombia. Estudiante del Doctorado en Ingeniería –Ciencia y Tecnología de materiales– de la Universidad Nacional de Colombia. Docente auxiliar de la Universidad Nacional de Colombia. Profesor de cátedra de la Universidad de La Salle, Bogotá (Colombia). Correo electrónico: falamusb@unal.edu.co

** Ingeniera Civil y M. Sc en Estructuras de la Universidad Nacional de Colombia. Estudiante del Doctorado en Ingeniería –Ciencia y Tecnología de materiales– de la Universidad Nacional de Colombia. Profesora asociada de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá (Colombia). Correo electrónico: cptakeuchit@unal.edu.co

Introducción

En Latinoamérica la guadua angustifolia ha sido empleada tradicionalmente en la construcción; sin embargo, su uso ha sido restringido a prácticas artesanales con poco sustento técnico. Aunque no se trata de un material nuevo, la documentación con respecto a su comportamiento estructural es casi inexistente, aunque diferentes autores han llevado a cabo algunas investigaciones acerca de sus propiedades físico-mecánicas, entre ellos Carvajal, Ortegón y Romero [1981], Martín y Mateus [1981], Jaimes y Torres [1984], Martínez [1992], González y Díaz [1992], Pantoja y Acuña [2005], Castrillón y Malaver [2004], Khosrow [2004] y Torres [2005].

El conocimiento acerca del comportamiento de los elementos estructurales y las conexiones es aun más escaso, salvo por algunas incursiones de autores como Garzón [1996], Peña y Rodríguez [1997], Clavijo y Trujillo [2000], Uribe y Durán [2002], Prada y Zambrano [2003], Prieto y Sánchez [2001] y Camacho y Páez [2002] en la investigación de estos temas. Aunque Camacho y Páez [2002] realizaron un estudio de pórticos en el plano ante cargas verticales estáticas, con diferentes configuraciones de nudos rígidos, el comportamiento de conexiones y pórticos planos o espaciales, solicitados cíclicamente, no se ha estudiado en forma rigurosa.

Para esta investigación se evaluó el comportamiento de un tipo de conexión, resistente a momento, que pueda ser empleada en la construcción de pórticos con guadua angustifolia, empleando secciones estructurales compuestas por más de un culmo. En una primera fase de experimentación se ensayaron 15 probetas de la conexión, construidas a escala, y se elaboraron las curvas de momento contra giro con los resultados obtenidos. A partir de estos ensayos se determinó un valor para la rigidez de la conexión. En una segunda fase se ensayaron tres pórticos construidos, empleando el tipo de conexión ensayada en la primera fase. Finalmente, se construyó un modelo numérico de los pórticos con base en un programa de análisis matricial, y se calibró a partir de los datos experimentales.

Marco teórico

La guadua angustifolia es un material que presenta alta dispersión en los valores obtenidos experimentalmente para su resistencia y las constantes elásticas necesarias para definir su comportamiento. Esta dispersión se debe en gran parte a que se trata de un material de origen biológico; por tanto, se hace más necesario aun que en otros materiales –obtenidos por procesos industriales– llevar a cabo una caracterización mecánica de éste. En la tabla 1 se presentan los valores de las propiedades mecánicas obtenidas experimentalmente para la guadua empleada en esta investigación.

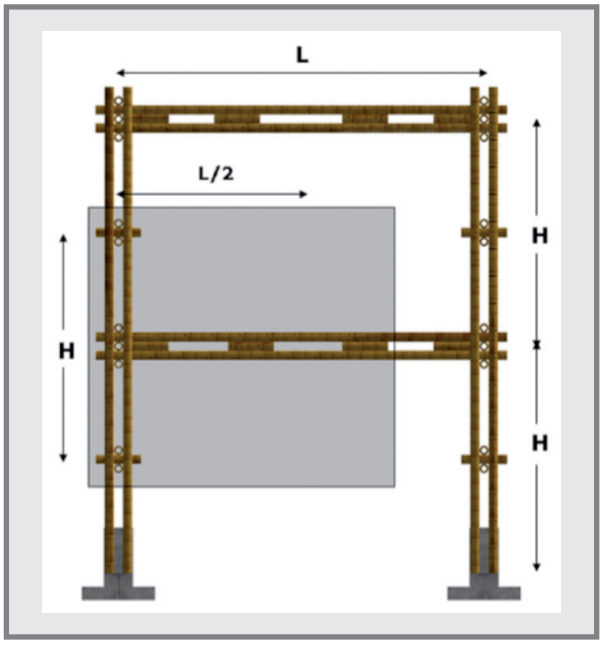
Tabla 1. Propiedades mecánicas de la guadua.

Parámetro	Vr. Promedio	Vr. Característico
Resistencia a la compresión paralela a la fibra	54,80 MPa	36,60 MPa
Resistencia a la tracción paralela a la fibra	146,19 MPa	107,90 MPa
Resistencia al corte paralelo a la fibra	7,47 Mpa	4,38 MPa
Resistencia a la tracción perpendicular a la fibra	1,05 MPa	0,46 MPa
Módulo de elasticidad longitudinal (compresión)	14164,10 MPa	-
Módulo de elasticidad longitudinal (flexión)	15450,20 MPa	-
Módulo de elasticidad circunferencial	668,51 MPa	-
Módulo de rigidez a cortante	774,72 MPa	-

Fuente: Lamus [2008].

Para los coeficientes de Poisson se usó un valor de 0,31, obtenido a partir del promedio de los valores reportados por Ghavami y Marinho [2005]. El módulo de elasticidad longitudinal empleado fue estimado por Rusinque [2007] a partir de los ensayos a flexión, en una investigación paralela en la que se utilizó guadua del mismo lote.

Figura 1. Esquema del pórtico en el plano.

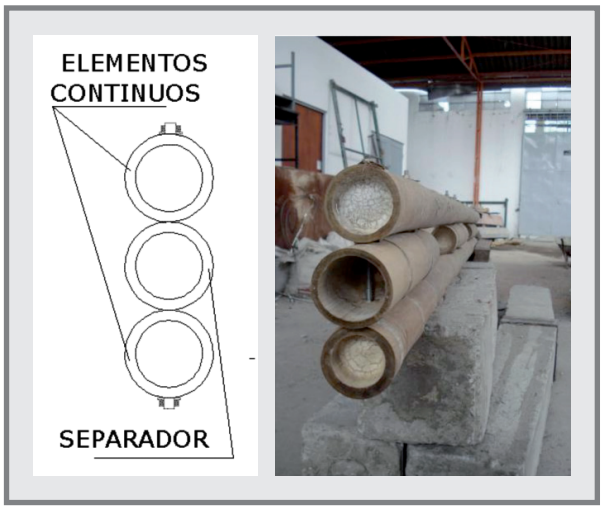


Fuente: Elaboración de los autores.

La conexión que se estudió en esta investigación hace parte de un sistema de pórticos planos como los ilustrados en la figura 1, los cuales serían empleados en la construcción de módulos estructurales para vivienda y otras edificaciones de hasta dos pisos. La altura planteada para el piso (H) es de 2,10 m y la luz entre ejes de columna (L) es de 4,00 m.

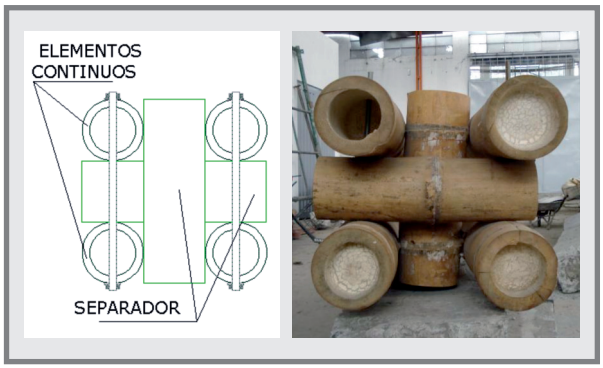
Se diseñó una conexión entre una viga compuesta por dos elementos longitudinales distanciados por separadores de guadua, tal como se muestra en la figura 2, y una columna compuesta por cuatro culmos distanciados también por separadores de guadua, como se muestra en la figura 3.

Figura 2. Viga.



Fuente: Elaboración de los autores.

Figura 3. Columna.

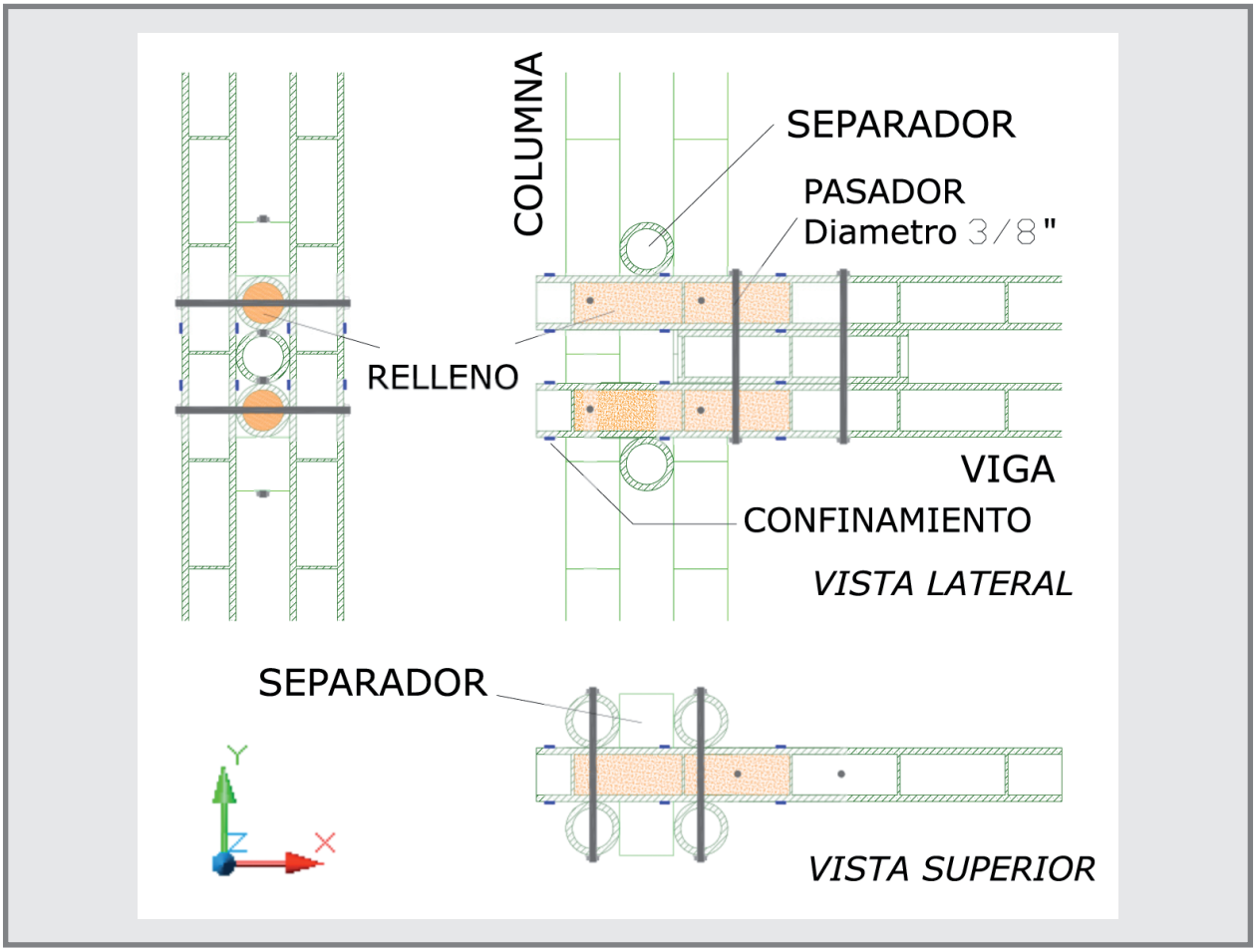


Fuente: Elaboración de los autores.

Para el ensamblaje, tanto de vigas y columnas como de conexiones, se realizaron sólo tramos rectos de guadua con cortes transversales a 90°, y todos los segmentos de guadua se unieron con pernos de 3/8" roscados que los atravesaban de manera perpendicular a su eje longitudinal. El acero de los pernos presentó los siguientes valores: módulo de elasticidad inicial: 170.000 MPa, módulo elastoplástico: 5.000 MPa, coeficiente de Poisson: 0,30, esfuerzo de fluencia: 240 MPa. Para ajustar los elementos se emplearon conjuntos de tuercas y arandelas metálicas, ubicados en las caras exteriores de las secciones.

Adicionalmente se incluyeron dos elementos más con el fin de controlar fallas locales como el aplastamiento y el corte paralelo a las fibras de la guadua. Estos elementos fueron: un relleno en poliuretano rígido de alta densidad y un confinamiento por medio de zuncho metálico realizado con el sistema Bandit®. El poliuretano se fabricó con una densidad aproximada de 0,73 g/cm3; asumiendo una densidad de 1,09 g/cm3 para el poliuretano líquido se obtiene una densidad relativa de 0,67, para la cual el esfuerzo de fluencia puede ser aproximadamente de 16 MPa, y el módulo de elasticidad de 440 MPa según las pruebas a compresión realizadas por Saint Michel *et ál.* [2006]. En la figura 4 se presenta un esquema de la conexión evaluada en esta investigación, en el cual se puede identificar la posición de los diferentes componentes.

Figura 4. Esquema de la conexión.



Fuente: Elaboración de los autores.

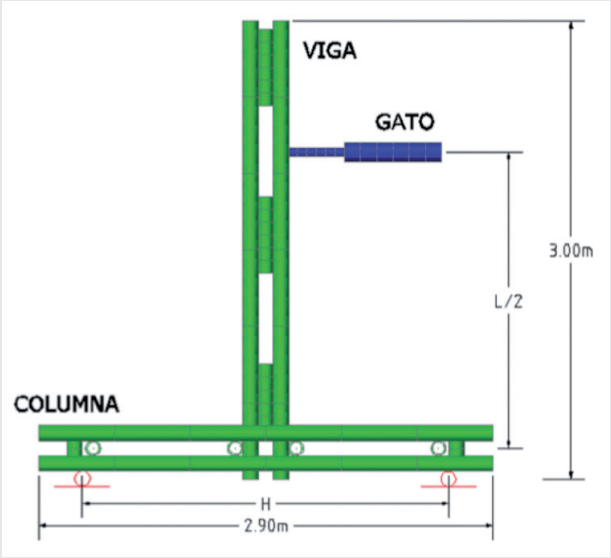
Desarrollo experimental

Se construyeron 15 probetas de la conexión a escala natural, las cuales se dividieron en cuatro grupos; el primer grupo o grupo base estaba conformado por tres probetas, y los tres restantes contaban con cuatro probetas cada uno.

Las probetas del grupo base fueron construidas con sólo guadua angustifolia y pernos. A estas probetas se les llamó tipo pernos (TP); los demás tipos consistieron en probetas elaboradas como las del grupo base pero diferentes de éstas y entre sí por contener componentes adicionales, tal como se especifica a continuación: a un grupo de probetas se les adicionó un confinamiento a los elementos individuales dentro de la zona de conexión, por medio de la instalación de zunchos metálicos, y se les denominó tipo zuncho (TZ); los elementos de la viga en las probetas del grupo tipo relleno (TR) fueron rellenados con poliuretano rígido de alta densidad en los entrenudos en la zona de conexión. Finalmente, el último grupo se construyó adicionándole tanto el relleno como el confinamiento, y sus probetas se denominaron tipo completo (TP).

El ensayo de las probetas consistió en la aplicación de una carga puntual transversal a la viga, a una distancia igual a la mitad de la luz entre ejes de columna, mientras que la columna se encontraba simplemente apoyada a una distancia igual a la mitad de la altura de piso, medida hacia ambos lados de la conexión, tal como se ilustra en la figura 5.

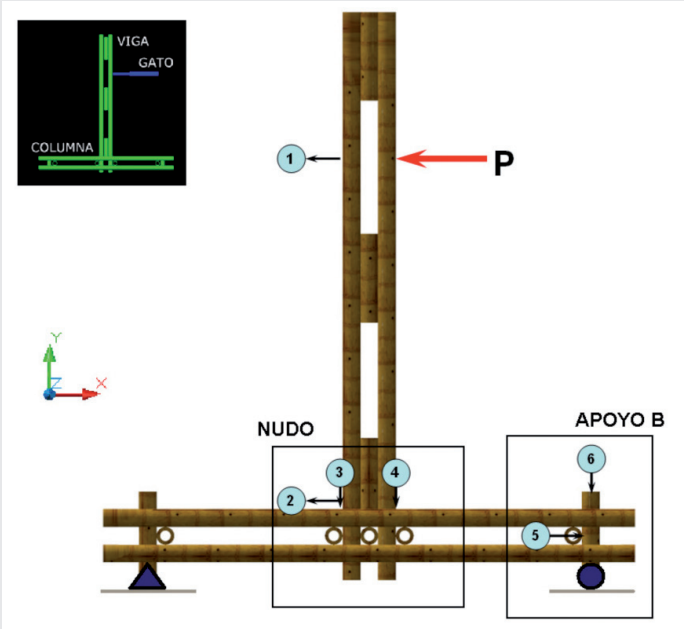
Figura 5. Esquema del ensayo para las conexiones.



Fuente: Elaboración de los autores.

Para cada uno de los grupos se ensayó una probeta ante carga monotónica; las probetas restantes fueron ensayadas mediante la aplicación de ciclos de carga y descarga. En total se realizaron cuatro ensayos monotónicos y once ensayos con ciclos de carga y descarga. Para el cálculo de los giros se tomaron las lecturas de los desplazamientos en las caras de los elementos conectados en el nudo, con base en los comparadores de carátula 2, 3 y 4, tal como se muestra en la figura 6.

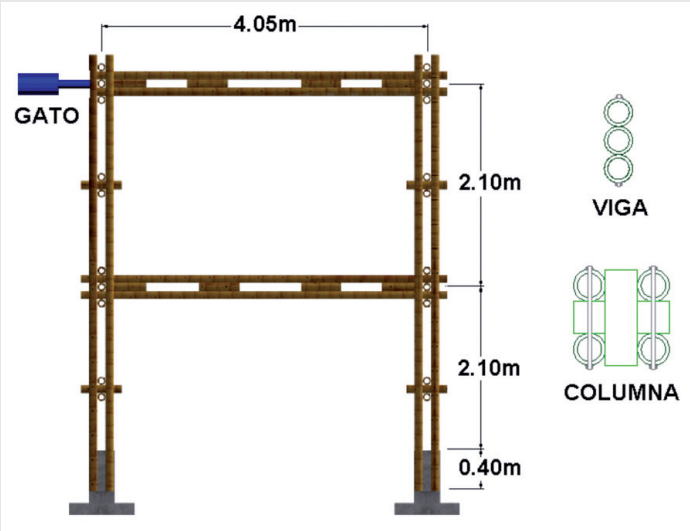
Figura 6. Localización de los comparadores para el ensayo de conexiones.



Fuente: Elaboración de los autores.

Para los ensayos de los pórticos se construyeron tres probetas a escala natural, las cuales fueron ensayadas ante cargas horizontales aplicadas en ciclos de carga y descarga. La carga se aplicó como se muestra en el esquema de la figura 7, en uno de los nodos del segundo piso.

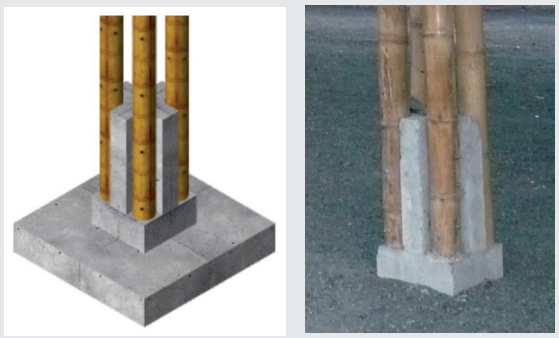
Figura 7. Esquema del ensayo para los pórticos.



Fuente: Elaboración de los autores.

Los pórticos se apoyaron en dos zapatas de concreto reforzado, como las que se ilustran en la figura 8, las cuales restringían los desplazamientos en las tres direcciones; sin embargo, los giros se encontraban parcialmente restringidos.

Figura 8. Zapata.



Fuente: Elaboración de los autores.

En los ensayos de pórticos se midieron los desplazamientos horizontales de los dos pisos, en cuyo caso se emplearon cintas métricas, debido a que la magnitud de éstos superaba ampliamente la carrera de los comparadores de carátula. Tanto los ensayos de las conexiones como los de los pórticos se desarrollaron hasta el desplazamiento permitido por los elementos del montaje, ya que en ninguno de los ensayos las probetas dejaron de admitir carga.

Resultados

Aunque ninguna de las probetas de conexiones dejó de admitir carga hasta el final del ensayo, sí se presentaron diferentes tipos de fallas locales en los elementos que conformaban la conexión. Sin embargo, estas fallas se presentaron en todos los casos en la segunda mitad de los ensayos.

En cuanto a los mecanismos de falla se encontraron diferencias que afectaron las probetas según el tipo de conexión ensayada; no obstante, no se pudo determinar –al menos en el rango de carga para los ensayos– una correlación entre el tipo de probeta y su rigidez. En la tabla 2 se presentan los diferentes mecanismos de falla presentados según el tipo de conexión ensayada.

Tabla 2. Mecanismos de falla.

MECANISMO DE FALLA		GRUPO DE CONEXIONES			
		TP	TZ	TR	TC
1	Aplastamiento en la viga	S	S	C	N
2	Tracción perpendicular en el separador de columna	S	N	S	N
3	Corte paralelo a la fibra en la viga	S	N	S	N
4	Tracción perpendicular en la viga	S	C	S	C
5	Aplastamiento en el agujero del perno	S	S	S	S
6	Flexión permanente en el perno	S	S	S	S

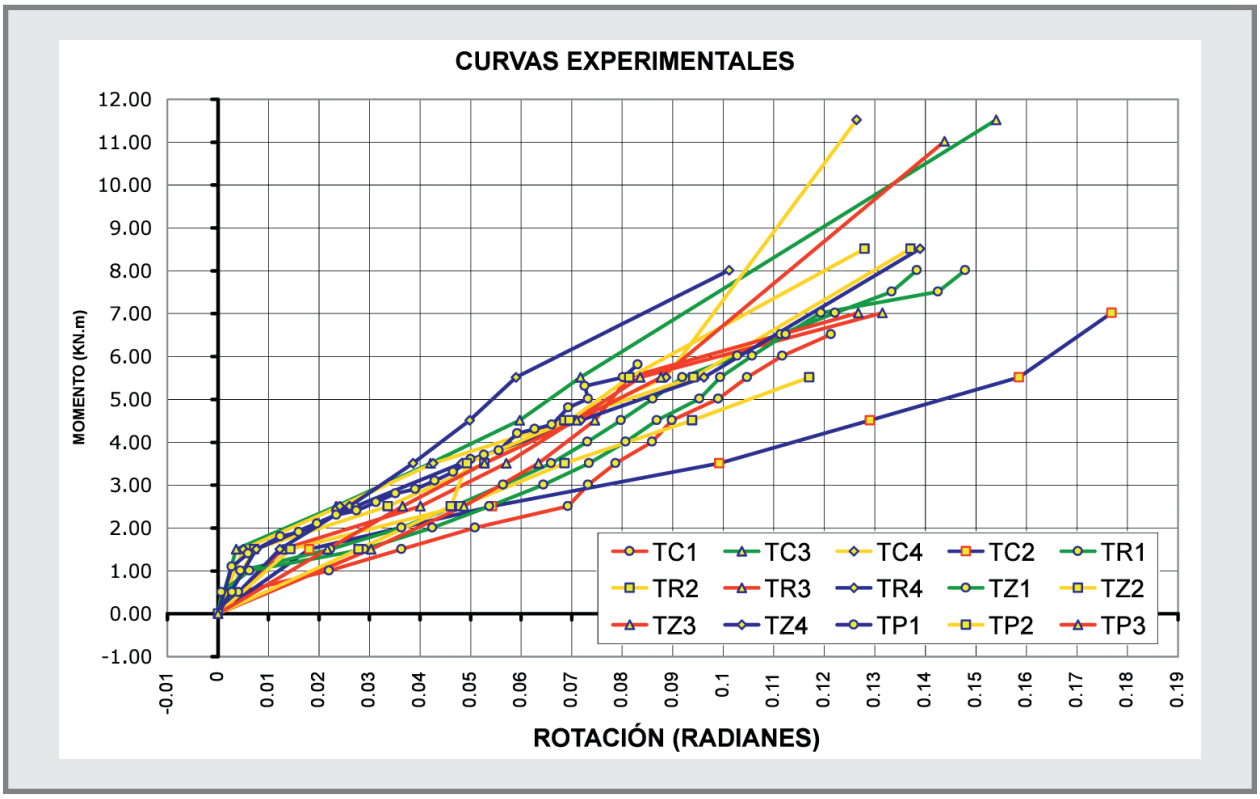
S: Se presenta el tipo de falla y no se controla
N: No se presenta el tipo de falla
C: Se presenta el tipo de falla de manera controlada

TP: tipo perno, TZ: tipo zuncho, TR: tipo relleno, TC: tipo completa

Fuente: Elaboración de los autores.

En la figura 9 se presentan las curvas giro relativo contra momento, obtenidas para los ensayos de las 15 probetas de las conexiones.

Figura 9. Curvas giro contra momento para las conexiones.



Fuente: Elaboración de los autores.

El giro relativo se calculó como la diferencia entre el giro aproximado en la viga y el giro aproximado en la columna. El giro aproximado en la columna φ_c y el giro aproximado en la viga φ_v se obtuvieron según las siguientes ecuaciones, 1 y 2.

$$\varphi_c = Arc\tan\left(\frac{v_2}{d_2}\right) \qquad (1)$$

$$\varphi_v = Arc\tan\left(\frac{v_4 - v_3}{d_4 + d_3}\right) \qquad (2)$$

En donde v_2, v_3 y v_4 son los desplazamientos medidos en los comparadores de carátula 2, 3 y 4, respectivamente.

La dispersión en la pendiente de las curvas se debe principalmente a los diferentes mecanismos de falla que se presentaron en cada una, así como a la diferencia entre los diámetros y los espesores de los canutos que las conformaban.

Tabla 3. Valores de las pendientes de las líneas de tendencia.

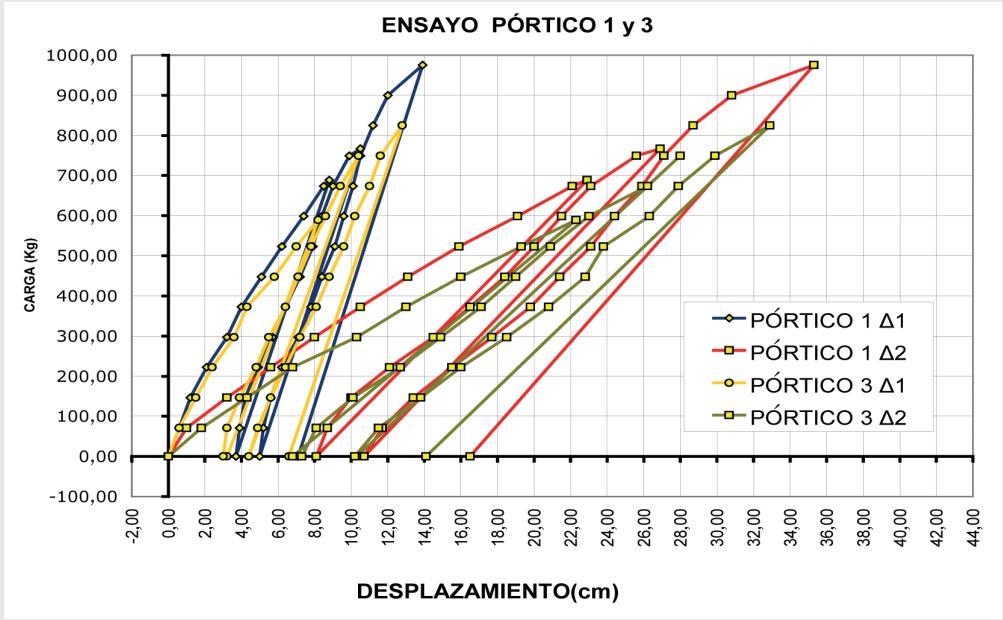
PROBETA	PENDIENTE
TP 1	59,26
TP 2	68,12
TP 3	74,48
TZ 1	53,56
TZ 2	44,09
TZ 3	53,84
TZ 4	55,27
TR 1	55,57
TR 2	57,11
TR 3	53,14
TR 4	78,84
TC 1	52,21
TC 2	34,41
TC 3	70,18
TC 4	76,94
PROMEDIO	59,24

Fuente: Elaboración de los autores.

Así, se determinó un valor de rigidez de 59,24 KN.m/rad para la conexión, el cual se calculó como el promedio de estas pendientes. En la tabla 3 se presentan los valores de las pendientes para las líneas de tendencia de los 15 ensayos.

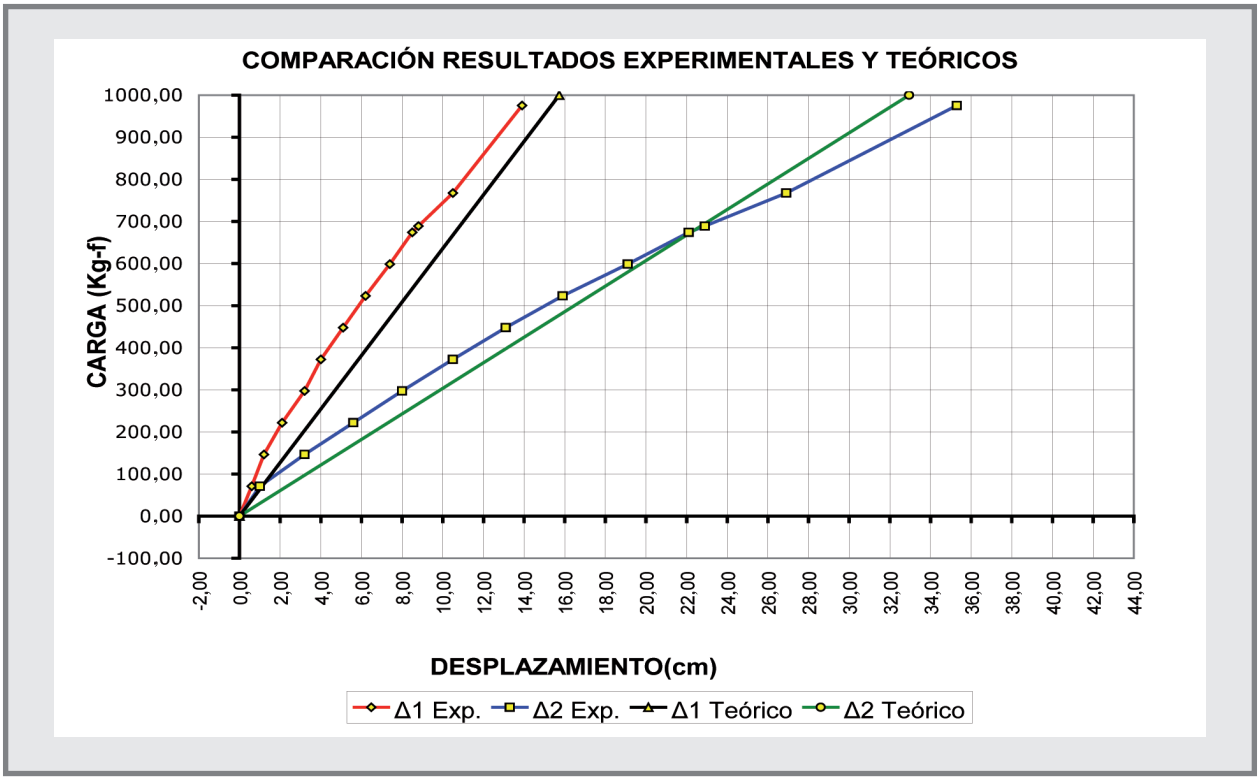
En la figura 10 se presentan las curvas carga contra desplazamiento para dos de los pórticos ensayados. La tercera curva ha sido descartada debido a que durante el ensayo el pórtico presentó una falla en uno de los apoyos. En la figura 11 se presenta una comparación entre las curvas obtenidas para los ensayos de los marcos y los resultados obtenidos de su modelación mediante el análisis matricial con base en el valor de rigidez obtenido experimentalmente para la conexión.

Figura 10. Curvas carga contra desplazamiento para los pórticos.



Fuente: Elaboración de los autores.

Figura 11. Comparación curvas experimentales contra modelación de los pórticos.



Fuente: Elaboración de los autores.

Conclusiones

Para la conexión viga-columna con guadua angustifolia, diseñada en esta investigación, se puede predecir una resistencia a la flexión mayor a 10 KN·m, siempre y cuando se construya empleando materiales de características mecánicas y elementos de secciones geométricas similares a las usadas en este trabajo.

Se estableció que la conexión evaluada tiene una rigidez aproximada de 59,24 KN·m/rad, valor que se puede utilizar en modelos que apliquen el método matricial para predecir el comportamiento de una edificación cuyo sistema estructural incluya ese tipo de conexión y se utilice guadua angustifolia con propiedades físico-mecánicas similares a las de este proyecto.

Los marcos estructurales construidos con este tipo de conexión al ser precisados a cargas laterales presentan grandes desplazamientos; además, pueden superar una deriva del 5% sin presentar fallas que conduzcan al colapso.

La modelación de pórticos que empleen este tipo de conexión, por el método matricial, con el valor de rigidez obtenido experimentalmente para la conexión, permite una buena aproximación al comportamiento de éstos.

Agradecimientos

Este trabajo hace parte de una investigación llevada a cabo en la Universidad Nacional de Colombia, gracias a la financiación otorgada por la Dirección de Investigación-Sede Bogotá.

Referencias

Allegheny Ludlum Corporation. [1998] Stainless Steels Type 201 and Type 201L. Technical Data, Blue Sheet. 1998, Pittsburgh, USA; p. 4.

Camacho, V. y Páez, H. [2002] Estudio de conexiones en guadua solicitada a momento flector. Trabajo de Grado. Ingeniería Civil y Agrícola. Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá.

Carvajal, W.; Ortegón, W. y Romero, C. [1981] Elementos estructurales en bambú. Trabajo de Grado. Ingeniería Civil y Agrícola. Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá.

Castrillón, B. y Malaver, D. [2004] Procedimiento de ensayos para la determinación de las propiedades físico mecánicas de la guadua. Trabajo de Grado Ingeniería Civil y Agrícola. Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá.

Clavijo, S. y Trujillo, D. [2000] Evaluación de uniones a tracción en guadua. Trabajo de Grado. Universidad Nacional de Colombia.

Echeverri, A. [2007] Trabajo de grado de especialización. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D.C., Colombia.

Garzón, J. [1996] Optimización de estructuras en guadua. Trabajo de Grado. Arquitectura. Universidad Nacional De Colombia-Sede Bogotá.

Ghavami, K. y Marinho, A. [2004] Propiedades físicas e mecánicas do colmo interior do bambú da especie guadua angustifolia. *Revista Brasilera de Engenharia Agrícola e Ambiental*. V. 9, pp. 107-114.

González, C. y Díaz, A. [1992] Propiedades físicas y mecánicas de la guadua (guadua angustifolia Kunth). Trabajo de Grado Ingeniería Agrícola. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín, Facultad de Ciencias Agropecuarias. Medellin.

ISO 22157 International Standard Organization. Determination of Physical and Mechanical Properties of Bamboo. Technical Committee ISO/TC 165, Timber Structures, Subcommittee SC 9, Round Poles, with Co-operation of Inbar, International Network for Bamboo and Rattan.

Jaimes, M. y Torres, G. [1984] Vivienda típica en concreto reforzado con bambú. Trabajo de Grado de Ingeniería Civil. Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingeniería Civil. Bucaramanga.

Khosrow, G. [2004] Engineering Properties of Entire Bamboo Culm of Species Guadua: Contributions to a Sustainable Development. Simposio International de la Guadua. Pereira, Colombia.

Londoño, X. [1992] Distribución, morfología, taxonomía, anatomía, silvicultura y usos de los bambúes del nuevo mundo. En: *Cespedesia*, Vol. 19. Nos. 62-63 (enero-diciembre 1992). Cali, Colombia; pp. 113.

López, L. y Trujillo, D. [2002] Diseño de uniones y elementos en estructuras de guadua. Seminario-taller. Avances en investigación sobre guadua. Pereira, Colombia.

Malaver, D. [2007] Estabilidad de pórticos de guadua angustifolia arriostrados con cables. Trabajo de grado de Especialización. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, D.C., Colombia.

Martín, J. y Mateus, L. [1981] Determinación de la resistencia a compresión paralela a la fibra de guadua de castilla. Tesis de Grado. Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá.

Martínez, E. [1992] Puentes en do mayor. Congreso Mundial de Bambú Guadua.

Pacheco, C. [2006] Resistencia a la tracción perpendicular a la fibra de la guadua angustifolia. Traba-

jo de Grado. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D.C., Colombia

Pantoja, D. y Acuña, F. [2005] Resistencia al corte paralelo a la fibra de la guadua angustifolia. Trabajo de Grado. Universidad Nacional de Colombia. 2006. Bogotá D.C., Colombia.

Peña, C. y Rodríguez, H. [1997] Propuesta de uniones mecánicas para estructuras en guadua. Universidad Nacional de Colombia-Arquitectura. Sede Bogotá.

Prada, J. y Zambrano, J. [2003] Estudio de elementos en guadua solicitados a compresión con perforación para rellenos en mortero. Trabajo de Grado. Ingeniería Civil y Agrícola. Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá.

Prieto, R. [2004] Optimización de unión en guadua ante fuerza sísmica. Tesis de Pregrado. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia; pp. 21-24.

Prieto, E. y Sánchez, J. [2001] Comportamiento de la guadua angustifolia sometida a flexión. Trabajo de Grado (Ingeniero Civil). Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá.

Rusinque, M. [2007] Influencia de la perforación, para inmunización, en los tabiques, en el comportamiento de elementos solicitados a flexión de guadua angustifolia. Trabajo de Pregrado. Universidad Nacional de Colombia. 2007. Bogotá D.C., Colombia; p. 11

Saint-Michel, F.; Chazeau, L.; Cavaille, J. y Chabert, E. [2006] Mechanical Properties of High Density Polyurethane Foams: I. Effect of the Density. *Composites Science and Technology* 66 (2006); P 2700–2708

Takeuchi, C. [2005] Resistencia al corte paralelo a la fibra en guadua angustifolia. IAC-NOCMAT 2005 Rio. Inter-American Conference on Non-Conventional Material and Technologies in Ecological and Sustainable Construction. ISBN 85-98073-05-9. Abmtenc (Brazilian Society for the Science of Non-Conventional Materials and Technologies). Noviembre 11-15, 2005. Rio de Janeiro, Brazil.

Torres, L. [2005] Modelo anisótropo de elementos finitos para el análisis mecánico del bambú y su verificación experimental. Trabajo de Grado. Universidad del Valle. Colombia.

Uribe, M. y Durán, A. [2002] Estudio de elementos solicitados a compresión armados por tres guaduas. Trabajo de Grado. Ingeniería Civil y Agrícola. Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá.