

Rigidez de una conexión de columna-cimentación para estructuras de *Guadua angustifolia* Kunth

FABIÁN AUGUSTO LAMUS BÁEZ¹

SOFÍA ANDRADE PARDO²

NANCY TORRES CASTELLANOS³

RESUMEN

Una de las limitantes que encuentran los ingenieros estructurales para el diseño de una edificación y, en general, de cualquier estructura en *Guadua angustifolia* Kunth es la falta de información técnica relacionada con los parámetros necesarios para realizar un adecuado modelo numérico de esta. El grado de empotramiento que puede brindar un apoyo al elemento estructural que soporta es una variable importante durante la modelación estructural, debido a que el criterio del ingeniero en la selección de este parámetro para la modelación puede incidir en la rigidez de la estructura y, por tanto, en su periodo de vibración. En este artículo se presentan los resultados experimentales de la constante de rigidez de una conexión entre una columna de *Guadua angustifolia* Kunth y un elemento de concreto que forma parte de la fundación, cuando la columna está solicitada a cargas laterales monotónicas. Adicionalmente, se ha evaluado la incidencia de cada uno de los componentes de la conexión en la rigidez de la estructura.

Palabras clave: *Guadua angustifolia* Kunth, conexión, cimentación, rigidez, fuerzas laterales.

¹ Doctor en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales por la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Magíster en Ingeniería, Estructuras por la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Ingeniero civil por la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. Profesor asistente del programa de Ingeniería Civil en la Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: falamus@unisalle.edu.co

² Magíster en Ingeniería Civil, Estructuras por la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, Colombia. Ingeniero Civil por la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, Colombia. Profesora de cátedra del programa de Ingeniería Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: sofia.andrade@escuelaing.edu.co

³ Candidato a doctor en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales por la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Magíster en Ingeniería, Estructuras por la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Ingeniera civil por la Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia. Profesora asociada al programa de Ingeniería Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: nancy.torres@escuelaing.edu.co

FECHA DE RECEPCIÓN: 20 DE SEPTIEMBRE DEL 2013 • FECHA DE APROBACIÓN: 10 DE MARZO DEL 2014

Cómo citar este artículo: Lamus Báez, F. A., Andrade Pardo, S. y Torres Castellanos, N. (2014). Rigidez de una conexión de columna-cimentación para estructuras de *Guadua angustifolia* Kunth. *Épsilon* (22), 39-53.

Rigidity of a Column-Foundation Connection for Guadua angustifolia Kunth Structures

ABSTRACT

One of the limitations structural engineers face when designing a building and, in general, any structure in *Guadua angustifolia* Kunth is the lack of technical information related to the parameters needed for a proper numerical model of the same. The degree of embedding that can provide support to its structural element is an important variable during structural modeling, because the judgment of the engineer in the selection of this parameter for modeling can influence the rigidity of the structure and, therefore, its period of vibration. This paper presents the experimental results of the constant of rigidity of a connection between a *Guadua angustifolia* Kunth column and a concrete element that is part of the foundation, when the column is under monotonic lateral loads. Additionally, the impact of each component of the connection on the rigidity of the structure has been evaluated.

Keywords: *Guadua angustifolia* Kunth, connection, foundation, rigidity, lateral forces.

Rigidez de uma conexão de coluna-cimentação para estruturas de Guadua angustifolia Kunth

RESUMO

Uma das limitações que os engenheiros estruturais encontram para o desenho de uma edificação e, em geral, de qualquer estrutura em *Guadua angustifolia* Kunth é a falta de informação técnica relacionada com os parâmetros necessários para realizar um adequado modelo numérico desta. O grau de incorporação que pode oferecer um apoio ao elemento estrutural que sustenta é uma variante importante durante a modelação estrutural, devido a que o critério do engenheiro na seleção deste parâmetro para a modelação pode incidir na rigidez da estrutura e, portanto, em seu período de vibração. Neste artigo se apresentam os resultados experimentais da constante de rigidez de uma conexão entre uma coluna de *Guadua angustifolia* Kunth e um elemento de concreto que faz parte da fundação, quando a coluna está solicitada a cargas laterais monotônicas. Adicionalmente, avaliou-se a incidência de cada um dos componentes da conexão na rigidez da estrutura.

Palavras chave: *Guadua angustifolia* Kunth, conexão, cimentação, rigidez, forças laterais.

Introducción

Actualmente, el Reglamento Colombiano de Construcción Sismorresistente (NSR-10), en su capítulo G.12 (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica [AIS], 2010), exige explícitamente que todas las uniones de las estructuras de *Guadua angustifolia* Kunth (en adelante, *Guadua a.*) para edificaciones sean consideradas como articuladas y se asuma que no existe transmisión de momentos entre los diferentes elementos que conforman una unión. En la simulación numérica de la estructura, esto implica que los momentos flectores cerca de los nudos sean asumidos como nulos y que se puedan presentar giros considerables en estas zonas. A su vez, en el diseño de los elementos y en sus conexiones, esto permite que el diseñador no se preocupe por la continuidad de la estructura en cuanto a momento flector. Por tanto, se responsabiliza a los muros y a los pórticos con diagonales de la totalidad de las fuerzas laterales que afectan a la edificación.

Si dentro de la estructura del sistema de resistencia de fuerzas horizontales se construyen pórticos y las conexiones no son totalmente articuladas, en realidad el pórtico será capaz de resistir fuerzas sísmicas (Prieto, 2004; Camacho y Páez, 2002; Lamus y Takeuchi, 2009), lo que implicaría, eventualmente, un desfase en cuanto a la ubicación real del centro de rigidez de la estructura en comparación con el calculado durante su análisis. Por otra parte, se estará subestimando la resistencia total de la estructura frente a este tipo de acciones. Claramente, si la participación de los pórticos no afecta la posición del centro de rigidez, desde el punto de vista de comportamiento estructural, se está asignando a la estructura un mayor factor de seguridad, como es lógico, siempre que el grado de ignorancia respecto a la respuesta de esta sea también mayor.

Sin embargo, aunque si bien es cierto que aún existe un largo camino por recorrer en el redescubrimiento de las estructuras de guadua y de bambú en general, en cuanto al comportamiento estructural de estas —sobre todo en lo relacionado con aquellas que se intentan construir dejando de lado el componente artesanal e incluyendo detalles constructivos más tecnificados—, también es verdad que la ingeniería debe avanzar en la investigación, de manera que permita realizar un mayor aprovechamiento de este material de construcción. Al respecto, en Andradre, Lamus y Torres se señala:

Por otra parte, tanto en viviendas como en otras estructuras en las que se requieren espacios abiertos, el uso de estos sistemas basados en muros podría resultar en una limitante en la distribución arquitectónica y, por lo tanto, en la no implementación de la *Guadua a.* como material estructural de un determinado proyecto. Esta situación resulta crítica cuando el área en planta de la edificación es muy reducida, como es el caso de las viviendas de interés social y prioritario, donde la guadua es una alternativa interesante, debido a su bajo costo y a todos los beneficios medioambientales que conlleva su aprovechamiento. (2013, p.25)

Debido a las inquietudes generadas en cuanto al giro de estas conexiones, este artículo da cuenta del comportamiento ante cargas monotónicas de una conexión empernada, zunchada y rellena con mortero entre una columna conformada por cuatro culmos (construida con guadua rolliza) y su cimentación, con el fin de determinar su rigidez. Adicionalmente, se analiza la influencia de los diferentes componentes en el comportamiento de la conexión.

Descripción de la conexión

Aunque la forma de los culmos de *Guadua a.* sea la de un tubo con diafragmas transversales distribuidos a lo largo de él, las secciones usadas por los constructores pueden tener múltiples configuraciones, bien sea por la distribución de los culmos dentro de la sección del elemento, o bien, porque las dimensiones de los tallos de guadua pueden variar al tratarse de un material de origen vegetal. Incluso, se sabe que dentro del mismo tallo tanto la separación entre los nudos como el diámetro y el espesor pueden fluctuar considerablemente (Hidalgo, 2003; Londoño *et al.*, 2002).

De la misma forma, el mecanismo usado para conectar los elementos de bambú a la cimentación puede ser uno u otro de acuerdo con la tradición local o con la inventiva del diseñador o el constructor, dependiendo del caso. En la figura 1 se presenta un esquema de la conexión estudiada en este trabajo.

Para este trabajo se usaron columnas compuestas por cuatro culmos, con diámetro promedio especificado de 110 mm. Los culmos se encuentran unidos entre sí por medio de separadores construidos con el mismo material, los cuales se encuentran conectados mediante el uso de pernos roscados de media pulgada. La sección especificada de las columnas se presenta en la figura 2.

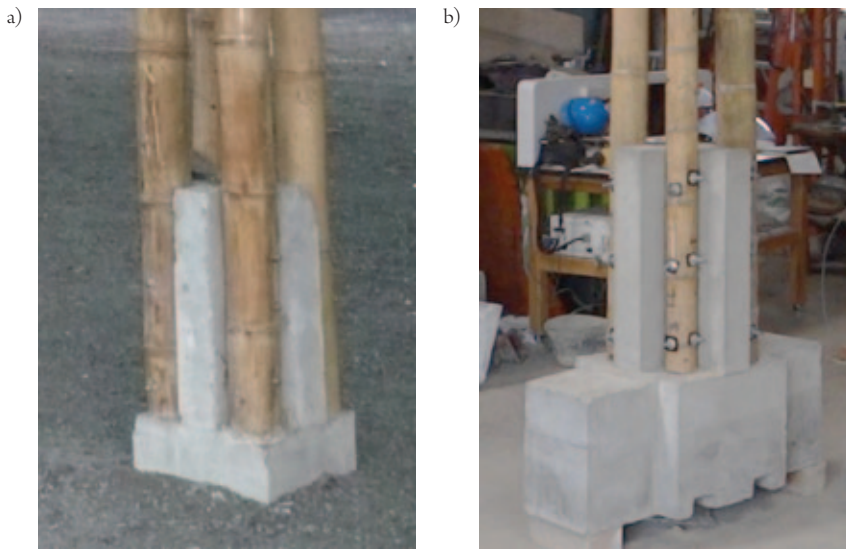


Figura 1. Conexión: a) ejemplo de aplicación del tipo de conexión en una edificación; b) prototipo desarrollado en esta investigación

Fuente: Fabián Augusto Lamus Báez (1a) y Sofía Andrade Pardo (1b).

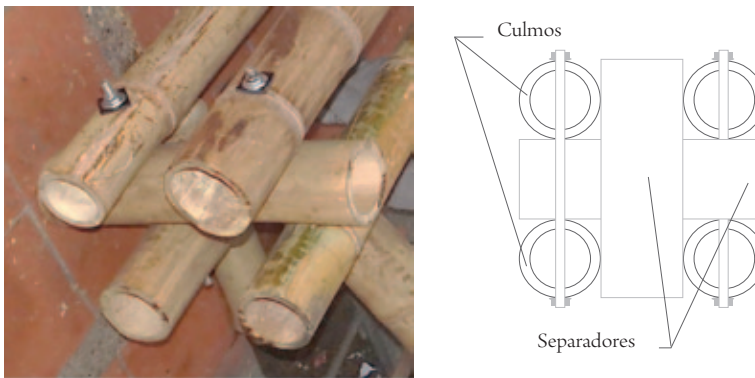


Figura 2. Sección transversal de la columna

Fuente: Fabián Augusto Lamus Báez.

La cimentación empleada corresponde a una zapata con restricciones de giro mediante vigas de centrado. Sobre la zapata se plantea el uso de un pedestal con una sección transversal en forma de cruz (Lamus, 2008), como se aprecia en la figura 3.

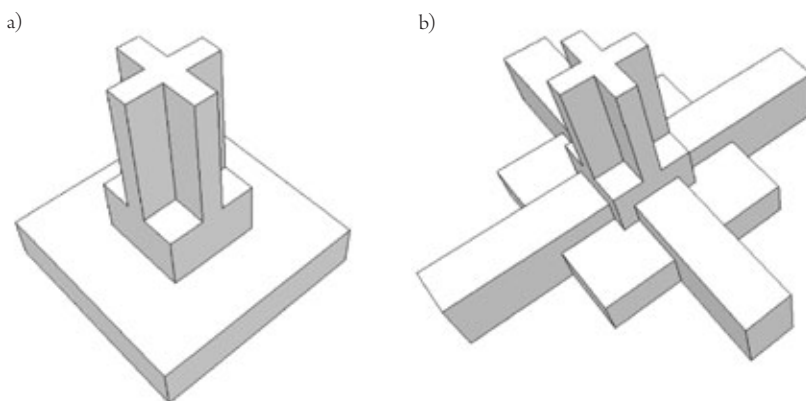


Figura 3. Zapata: a) pedestal en forma de cruz; b) ubicación de las vigas de centrado

Fuente: Sofía Andrade Pardo.

Para realizar la conexión se emplearon, en general, cuatro componentes: pernos transversales (T), pernos longitudinales (L), zunchos metálicos (Z) y relleno de mortero (M). Con el fin de evaluar la influencia de cada componente de la conexión, en la respuesta estructural de esta ante cargas monotónicas, en total se construyeron siete diferentes configuraciones, variando únicamente la combinación de los componentes (tabla 1).

Tabla 1. Combinación de componentes en cada configuración

COMPONENTE	CONFIGURACIÓN						
	T	TM	TZ	TMZ	LM	LMZ	LTMZ
Pernos transversales
Pernos longitudinales					.	.	.
Relleno de mortero	
Zuncho metálico		

Fuente: elaboración propia.

Los pernos longitudinales se encontraban anclados al pedestal y se extendían dentro de cada uno de los cuatro culmos de la columna, a lo largo de los 800 mm inferiores. El relleno de mortero se aplicó a los canutos por los cuales pasaba el perno longitudinal, garantizando que estos últimos quedaran bien embebidos. A lo largo de la zona de la conexión se usaron cuatro zunchos metálicos en cada uno de los canutos que conformaban la columna. En las configuraciones que contaban

con pernos transversales, estos se colocaron paralelos a las dos direcciones principales en planta, atravesando de lado a lado la columna y uniéndola con el pedestal en forma de cruz. En la figura 4 se presenta un corte de la conexión que indica la ubicación de cada uno de los componentes de esta.

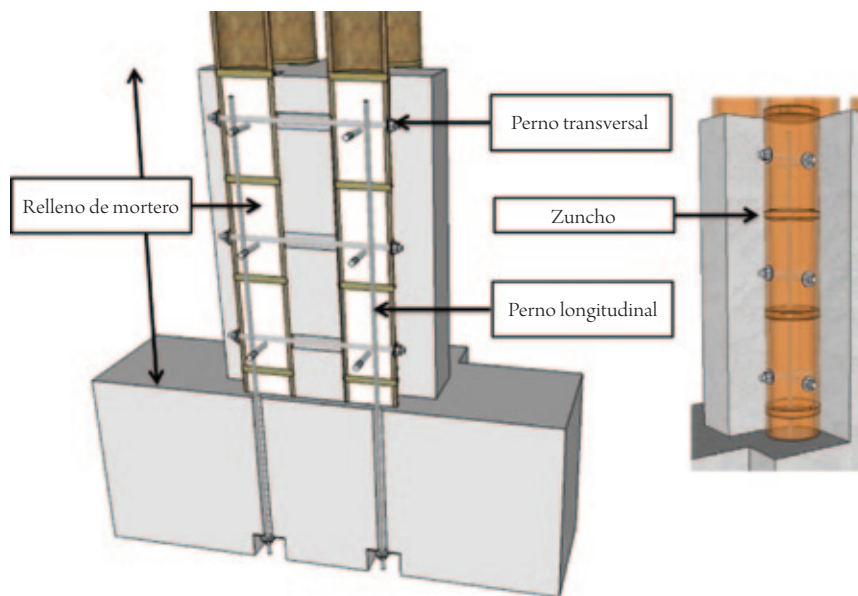


Figura 4. Esquema de la conexión

Fuente: elaboración propia.

Materiales

La *Guadua a.* que se usó en esta investigación presentaba, en el momento de su corte, una edad aproximada de cuatro años. De acuerdo con el proveedor, el material provenía del departamento de Quindío, Colombia. Las columnas fueron ensambladas a partir de tramos de la parte inferior (cepa) y media (basa) de los culmos. Los diámetros promedio de los culmos usados como parte de una columna oscilaban alrededor de los 109 mm, con una desviación estándar de 7 mm.

Con el fin de obtener las propiedades mecánicas de la guadua utilizada en los modelos físicos, se realizaron ensayos de tracción paralela a la fibra, compresión paralela a la fibra y corte paralelo a la fibra, de acuerdo con las especificaciones de la norma

NTC-5525 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [Icontec], 2006). Adicionalmente, se realizaron ensayos de tracción perpendicular a la fibra, usando una adaptación del montaje propuesto en la Universidad Nacional de Colombia (Pacheco, 2006) y ensayos de compresión perpendicular (Torres, 2006). Para cada una de las probetas ensayadas se determinó el contenido de humedad.

Con base en los resultados de los ensayos de caracterización, se determinaron los valores de resistencia ante diferentes sollicitaciones: compresión paralela a la fibra, compresión perpendicular a la fibra, tracción paralela a la fibra, tracción perpendicular a la fibra y cortante paralelo a la fibra. De la misma forma, se calcularon las siguientes constantes elásticas: módulo de elasticidad longitudinal en compresión y módulo de elasticidad circunferencial. En la tabla 2 se presenta un resumen de los resultados para las propiedades mecánicas de la *Guadua a*.

Tabla 2. Resultados de los ensayos de caracterización de la *Guadua a*.

PROPIEDAD	PROMEDIO (MPa)	DESVIACIÓN ESTÁNDAR (MPa)	COEFICIENTE DE VARIACIÓN (%)	HUMEDAD (%)
Resistencia a la tracción paralela				
Probetas con nudo	124,00	33,80	27,26	
Probetas sin nudo	164,70	51,03	30,98	
Total	144,30	28,79	19,95	10,40
Resistencia a la compresión paralela				
Probetas con nudo	46,70	2,88	6,17	
Probetas sin nudo	48,27	4,43	9,18	
Total	47,60	3,84	8,07	12,17
Resistencia al corte paralelo				
Probetas con nudo	8,48	1,38	16,27	
Probetas sin nudo	8,30	1,39	16,75	
Total	8,39	1,36	16,21	14,21
Resistencia a la tracción perpendicular	1,08	0,50	45,89	11,67
Resistencia a la compresión perpendicular	10,68	3,66	34,27	14,27

Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, en la zona de la conexión de algunas configuraciones (TZ, TLZ, LMZ y LTMZ) se usaron zunchos metálicos de media pulgada, con el sistema Band it[®]. Esta cinta metálica tiene una resistencia mínima de 696 MPa, según los valores reportados por el fabricante (Allegheny Ludlum, 1998).

Las configuraciones TM, TMZ, LM, LMZ y LTMZ se rellenaron usando un mortero de cemento con una relación 1:4. Se evaluó también la resistencia a compresión de este mortero con probetas cilíndricas de 100 mm de diámetro y 200 mm de longitud. El valor de resistencia promedio a la compresión del mortero inyectado en los culmos fue de 17 MPa.

Desarrollo experimental

Para cada una de las siete configuraciones (T, TM, TZ, TMZ, LM, LMZ y LTMZ) se construyó un espécimen para ser ensayado ante cargas monotónicas. Se tuvo el cuidado de garantizar que las dimensiones de los culmos, tanto en diámetro como en espesor, fueran similares para todas las configuraciones.

El ensayo de los especímenes consistió en la aplicación de una carga puntual transversal a la columna, a una altura de 2 m, medida desde la parte superior de las vigas de centrado, como se muestra en la figura 5a. La carga se aplicó usando el actuador dinámico del laboratorio de estructuras de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, empleando como apoyo el marco de carga del mismo laboratorio.

Para los ensayos, las probetas se dispusieron de tal manera que el actuador dinámico trabajara en tracción y se aprovechara la mayor parte de su recorrido disponible. El máximo recorrido del actuador dispuesto para estos ensayos fue de 450 milímetros. La transmisión de carga se realizó por medio de un dispositivo que se conectó a los cuatro culmos que formaban la columna, permitiendo el giro de su parte superior. En la figura 5 se muestra este dispositivo:

Para el cálculo de los giros relativos entre la columna y la viga de centrado de concreto, se usó la ecuación (1), como la diferencia entre el giro de la columna λ y el giro de la viga de centrado α :

$$\omega = \lambda - \alpha \quad (1)$$

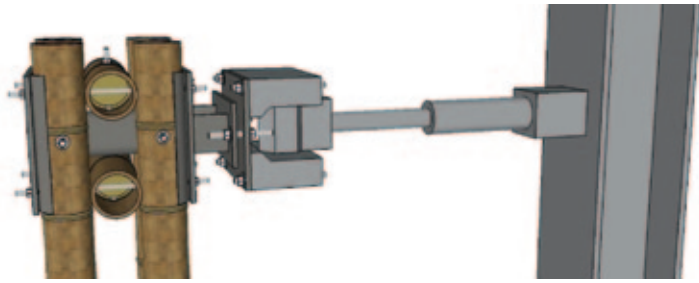


Figura 5. Dispositivo para la aplicación de carga

Fuente: elaboración propia.

Los giros λ y α se calcularon usando las ecuaciones (2) y (3), respectivamente, a partir de las lecturas de los desplazamientos que se registraron usando transductores de desplazamiento LVDT (*linear variable differential transformer*) en tres puntos de interés (figura 6): 1) en la superficie superior de la viga de centrado, a una distancia d_1 conocida desde el eje del pedestal (desplazamiento $1-\delta_1$); 2) en el borde superior del pedestal, en una de las caras perpendiculares a la dirección de la carga, a una distancia d_2 conocida desde el eje de la viga de centrado (desplazamiento $2-\delta_2$); y 3) en la columna, justo por encima de la cara superior del pedestal, a una distancia d_3 conocida desde el eje de la viga de centrado (desplazamiento $3-\delta_3$):

$$\lambda = \frac{\delta_3}{d_3} \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{\delta_1}{d_1} \quad (3)$$

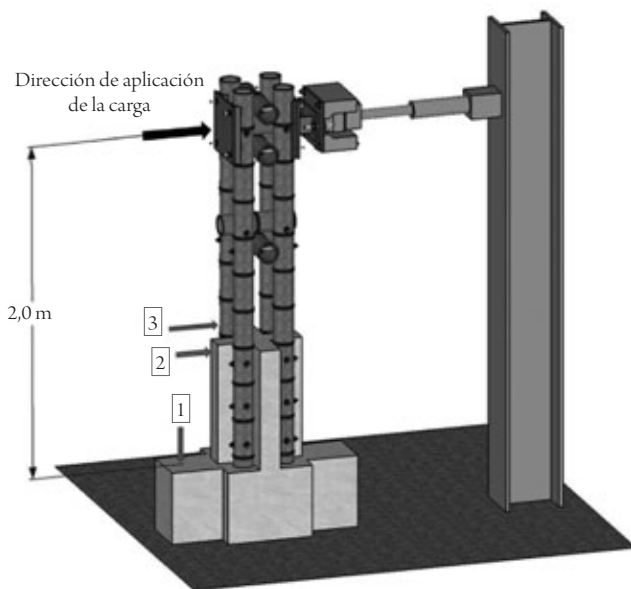


Figura 6. Esquema del montaje

Fuente: elaboración propia.

Resultados

Para cada una de los especímenes ensayados se construyó una curva de momento contra giro relativo ω entre la columna y la viga de centrado (figura 7).

A partir de los resultados experimentales se realizó una aproximación bilineal de las curvas de momento contra giro relativo. Para el primer intervalo se determinó la constante de rigidez secante medida desde el origen hasta el punto donde se presentó el primer descenso en la resistencia, que superara el 10% de la carga máxima obtenida hasta ese punto. El segundo intervalo se construyó realizando una regresión de los datos registrados después del límite del primer intervalo. En la figura 8 se presentan las curvas ajustadas para los ensayos monotónicos de las siete configuraciones.

A partir de los resultados anteriores, en la figura 9 se realiza una comparación entre las rigideces de las diferentes configuraciones, tanto en el rango elástico como en el rango inelástico.

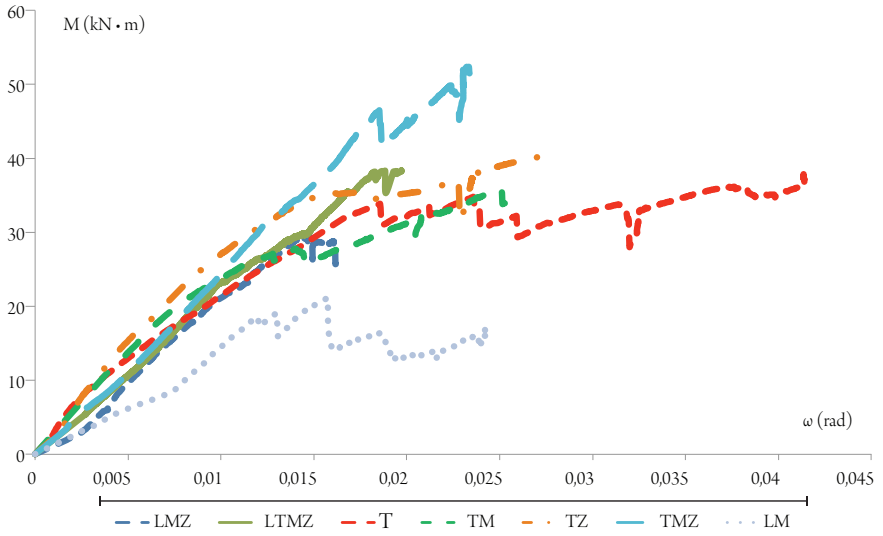


Figura 7. Curvas de momento contra giro relativo (resultados experimentales)

Fuente: elaboración propia.

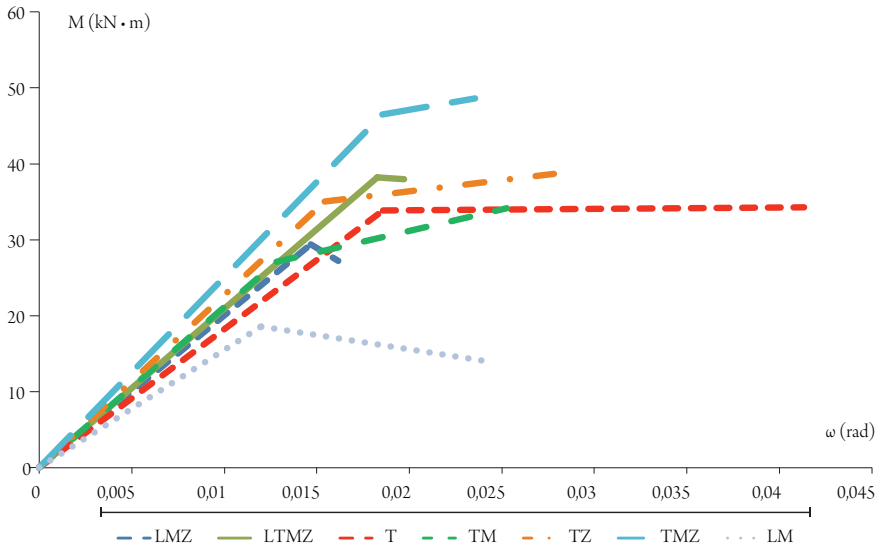


Figura 8. Curvas de momento contra giro relativo (modelos bilineales)

Fuente: elaboración propia.

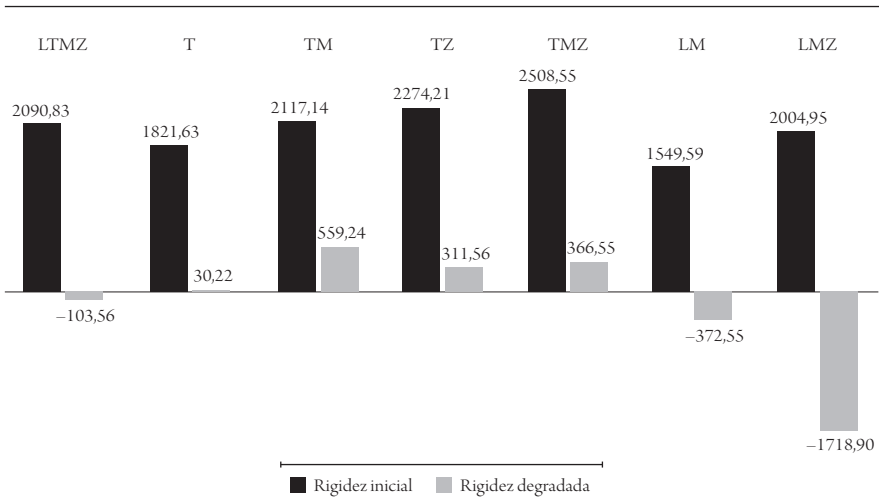


Figura 9. Comparación entre las rigideces iniciales y degradadas

Fuente: elaboración propia.

Finalmente, en la figura 10 se presenta una comparación de los valores de giro para el límite entre los dos intervalos ω_E , los cuales corresponden a aquellos en los que la conexión presenta una pérdida considerable de rigidez. Los valores se presentan en términos de fracción del giro en el límite elástico ω_{E0} con respecto a la configuración completa LTMZ.

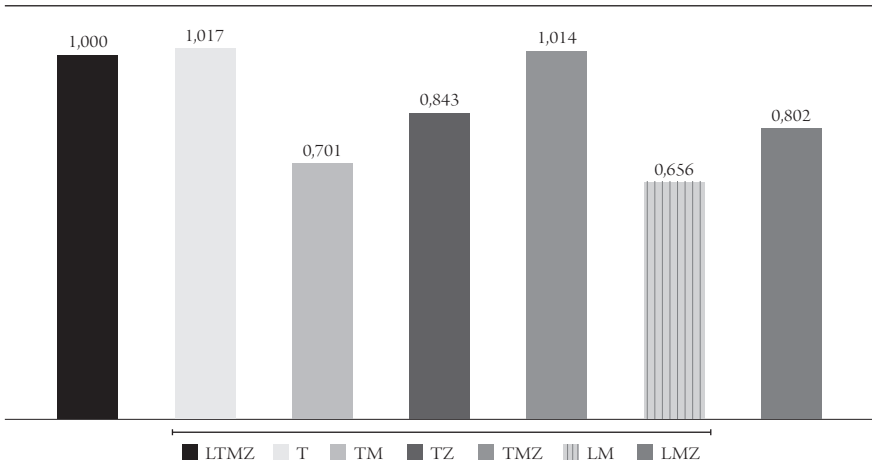


Figura 10. Giro en el límite elástico ω_E / ω_{E0}

Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

La conexión presentada en este artículo es capaz de restringir los giros en la parte inferior de una columna de *Guadua a*. Sin embargo, el rango de momento en el cual la conexión puede desempeñarse como rígida depende de los componentes que conforman la conexión. A su vez, el uso de zunchos metálicos permite obtener valores más altos de rigidez para la conexión, independientemente de que otros componentes se usen.

Las configuraciones construidas usando pernos longitudinales (LMZ, LM y LT-MZ) presentan mayores pérdidas de rigidez de la conexión una vez se supera el límite elástico que aquellas, en las que los pernos solo se usan en dirección transversal.

El uso del relleno incrementa levemente el valor de la rigidez de la conexión con pernos transversales; sin embargo, con el uso de zunchos pueden obtenerse incrementos similares, e incluso es posible obtener mayor rigidez y resistencia al combinar zuncho y relleno.

Finalmente, el uso de pernos longitudinales no aporta resistencia adicional a las conexiones con pernos transversales; por el contrario, la disminuye y causa un comportamiento menos dúctil durante la falla.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Laboratorio de Materiales y Estructuras de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, por facilitar el uso del espacio necesario para la construcción de los especímenes y la realización de los respectivos ensayos en el marco de carga. De la misma forma, al Laboratorio de Estructuras de la Universidad de La Salle, donde se llevaron a cabo los ensayos de caracterización del material usando la Máquina Universal del programa de Ingeniería Civil. Un agradecimiento especial para David Granada, Sebastián Martínez, Diana Parra y los demás estudiantes de pregrado del programa de Ingeniería Civil de la Universidad de La Salle, que contribuyeron tanto en la elaboración de las probetas como durante los ensayos de estas.

Referencias

- Allegheny Ludlum Corporation (1998). Stainless steels type 201 and type 201L. Recuperado de http://www.uespromura.com.au/attachments/SS201_and_SS201L_Specs.pdf
- Andrade, S., Torres, N. y Lamus, F. (2013). Respuesta estructural de una conexión de columnas de *Guadua angustifolia* a su cimentación. En *Memorias, VI Encuentro de Ingenieros de Suelos y Estructuras*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS) (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10)*. Bogotá: Autor.
- Camacho, V. y Paéz, I. (2002). *Estudio de conexiones en guadua solicitados a momento flector* (tesis). Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Flórez, E. (2003). *Uniones a tensión en guadua con morteros y varilla, comportamiento de uniones con uso de expansivo en el mortero* (tesis). Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Hidalgo, O. (2003). *Bamboo, the gift of the gods*. Bogotá: Autor.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (Icontec) (2007). *Métodos de ensayo para determinar las propiedades físicas y mecánicas de la Guadua angustifolia Kunth* (Norma Técnica Colombiana 5525). Bogotá: Autor.
- Lamus, F. (2008). *Calificación de una conexión viga-columna resistente a momento en Guadua angustifolia* (tesis). Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Lamus, F. y Takeuchi, C. (2009, julio-diciembre). Determinación de la rigidez de un tipo de conexión viga-columna en guadua angustifolia. *Épsilon*, 13, 193-204.
- Londoño, X., Camayo, G., Riaño, N. y López, Y. (2002). Characterization of the anatomy of *Guadua angustifolia* (*Poaceae: Bambusoideae*) culms. *Bamboo Science and Culture: The Journal of the American Bamboo Society*, 16(1), 18-31.
- Prieto, R. (2004). *Optimización de unión en guadua ante sollicitación de fuerza sísmica* (tesis de pregrado). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Pacheco, C. (2006). *Resistencia a la tracción perpendicular a la fibra de la Guadua angustifolia* (tesis). Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Torres, L. (2005). *Modelo anisótropo de elementos finitos para el análisis mecánico del bambú y su verificación experimental* (tesis). Cali: Universidad del Valle.