

Comportamiento estructural de la guadua angustifolia. Uniones en guadua

Structural behavior of the guadua angustifolia. Connections in Guadua

Caori Patricia Takeuchi Tam*

RESUMEN

La guadua es un material natural, renovable en pocos años, con buen comportamiento estructural para solicitaciones de tensión paralela a las fibras, compresión, flexión y torsión. Sin embargo, su resistencia es pobre para esfuerzos de tensión perpendicular a las fibras y para esfuerzos de corte. Un buen diseño de elementos y uniones en guadua, debe tener en cuenta el comportamiento anisotrópico de la guadua.

PALABRAS CLAVE: guadua (bambu), autóctono, resistencia, uniones

ABSTRACT

The guadua (bamboo) is a natural material, renewable in few years, with good structural behavior for solicitations of parallel tension to the fibers, compression, flexion and torsion. However, its strength is poor for perpendicular tension to the fibers and shear. A good design of elements and connections in guadua, must keep in mind the anisotropic behavior of the guadua.

KEYWORDS: guadua (bamboo), autochthonous, strength, connections

Recibido: Abril 13 de 2004

Aceptado: Junio 8 de 2004

Introducción

La naturaleza nos ha privilegiado al darnos un material con excelente comportamiento estructural, renovable y que logra su máxima resistencia, en tan solo tres a cinco años de edad: LA GUADUA (Foto No. 1)



Foto No. 1. Tallo de una guadua angustifolia kunth (tomado de la referencia No 4)

Como elemento, puede llegar a tener una longitud aproximada de 12 metros (3 m de cepa y 9 m de basa aproxima-

damente) e incluso más si pensamos en la sobrebasa (Figura No. 1); en cambio, los tiros de ángulo y varilla que hoy en día se consiguen de 12 m de longitud, hasta hace poco, solo se encontraban de 6 m de longitud en el mercado.

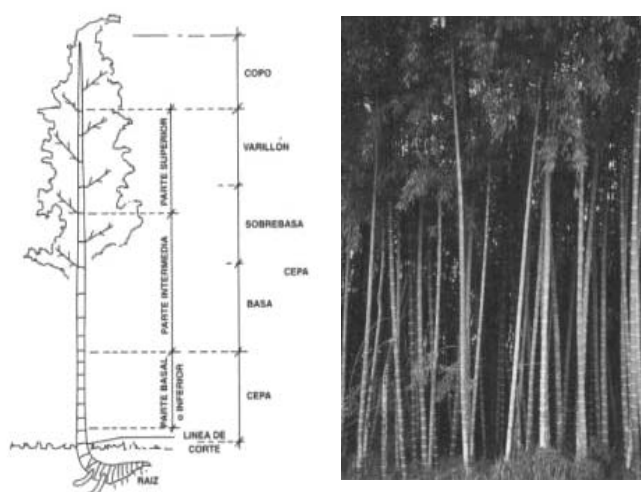


Figura No. 1 Sección longitudinal del tallo (tomada de la referencia No. 4)

*Ingeniera civil. M.Sc. en estructuras. Profesora asociada Universidad Nacional de Colombia. e-mail: cptakeuchit@unal.edu.co

Comportamiento estructural de la guadua

La guadua posee fibras longitudinales con una alta resistencia a la tracción. Se ha llegado a encontrar en ensayos¹ de probetas de guadua tomadas de la pared externa sin incluir los nudos, una resistencia a la tracción promedio de 2.561 kg/cm², resistencia bastante alta si se tiene en cuenta que el acero A36 tiene un esfuerzo de fluencia de 2.530 kg/cm² y un esfuerzo último del orden de 4.000 kg/cm²; por esta razón se conoce a la guadua como el acero vegetal.

En el mismo estudio, se encontró una resistencia a la tracción promedio en probetas tomadas de la pared externa de la guadua con nudo de 1.647 kg/cm², mientras que, al tomar las probetas de ensayo en todo el espesor de la guadua sin incluir el nudo, la resistencia a la tracción fue de 1.562 kg/cm² e incluyendo el nudo, de 873 kg/cm².

La resistencia a la tracción es más alta cuando se hace el ensayo con probetas sacadas de la pared externa que con probetas de la pared completa, debido a dos razones: la primera de ellas es que la parte exterior es dura debido a incrustaciones de sílice, lignina y cutina, y la segunda se debe a que la cantidad de fibras es mayor en la parte externa de la guadua que en la parte interna, como se puede observar en la Foto No. 2.

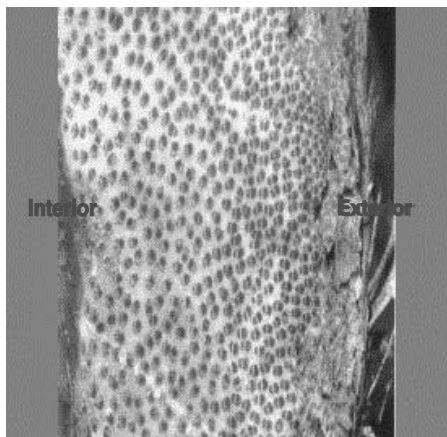


Foto No. 2. Pared de guadua (tomada de la referencia No. 4)

Por otro lado, la resistencia a la tracción en probetas con nudo es menor que sin nudo, debido a que el nudo es la parte débil de la guadua, aspecto tenido en cuenta en el parágrafo 8.5.2 de la propuesta de normas internacionales para ensayos del bambú, *Inbar Standar for determination of physical and mechanical properties of bamboo*² en el que se especifica que las probetas para el ensayo a tracción paralelo a las fibras debe tener un nudo. También se menciona la menor resistencia de probetas a tensión con nudo en *Laboratory manual on testing methods for determination of physical and mechanical properties of bamboo*³.

La guadua macana⁴ tiene una sección transversal circular hueca con diámetro de 7 a 15 cm y espesor de pared de 0.9 a 1.2 cm (Foto No. 3). Al tener esa sección transversal, tiene una gran inercia con respecto a su área. Por tanto, para elementos de guadua solicitados a compresión con longitudes hasta de 3 m, la relación de esbeltez con respecto a cualquier eje que pase por su centro no es muy grande.

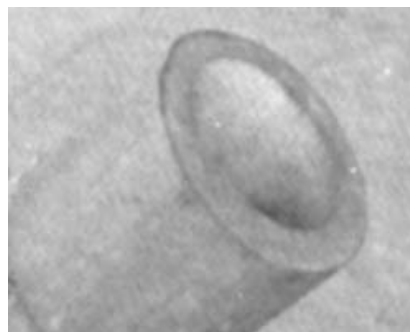


Foto No. 3. Sección transversal del tallo de guadua (tomada de la referencia No. 6)

Por ser un elemento cerrado de gran inercia, al estar solicitado a flexión, no tiene problemas de inestabilidad por pandeo flexotorsional.

Igualmente, por tener una sección transversal tubular, la guadua es altamente resistente a la torsión; es por esto que los cordones superior e inferior de algunas armaduras con uniones excéntricas de diagonales, como la ilustrada en la Foto No. 4, no fallan por torsión.

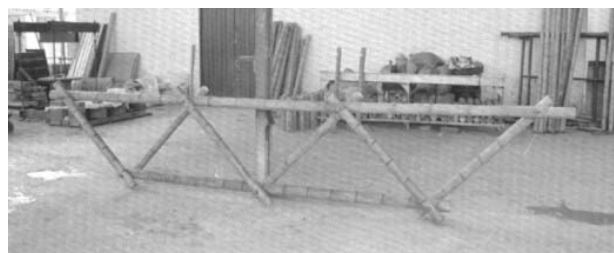


Foto No. 4. Armadura con torsión en los cordones superior e inferior por excentricidad en la unión de las diagonales. (Tomada de la referencia No. 6)

Sin embargo a pesar de todas las ventajas en el uso de la guadua como material estructural solicitado a tracción paralela a sus fibras, compresión, flexión y torsión mencionadas anteriormente, no hay que olvidar que la guadua

1 Carvajal, William N.; Ortegón, William O. y Romero, Carlos J., *Elementos estructurales en bambú*, Bogotá, 1981, Proyecto de grado, Universidad Nacional de Colombia.

2 *Inbar Standar for determination of physical and mechanical properties of bamboo*, January 1999.

3 *Laboratory manual on testing methods for determination of physical and mechanical properties of bamboo*, January 1999.

4 En Colombia existen cuatro especies de guadua: *angustifolia*, *aplixifolia*, *superba* y *weberbaueri*; la guadua *angustifolia* presenta cinco formas denominadas comúnmente: cebolla, macana, rayada negra, cotuda y castilla.



Foto No. 5. Unión de las diagonales con cordón superior (tomada de la referencia No. 6)

por su misma naturaleza, no es un material homogéneo con comportamiento isotrópico.

La guadua está formada por fibras longitudinales fuertes, pero a diferencia de la madera no tiene fibras radiales. Las fibras longitudinales están simplemente pegadas por pectina, en una matriz de lignina relativamente débil y blanda (Foto No 2) lo que hace que la resistencia a la tracción perpendicular de la guadua sea muy pequeña.

Esta pobre resistencia a la tracción limita la resistencia a la compresión paralela a las fibras en columnas cortas porque al aplicar la fuerza vertical, se presenta una fuerza radial horizontal (poisson) hacia afuera que separa las fibras debido a que no existe un mecanismo lo suficientemente fuerte, que las mantenga unidas. Los tabiques ayudan en cierta medida, pero al tener un comportamiento pobre a esfuerzos de tracción en su plano, simplemente se rompen, permitiendo la falla de compresión paralela a las fibras por la separación de las fibras longitudinales (foto 6 y 7).

Por la anterior razón, la resistencia a la compresión paralela a las fibras es menor que la resistencia a la tracción de la guadua (por lo menos en un 25%), aún considerando fibra completa y nudo. En su estudio Martín y Mateus⁵ encontraron esfuerzos máximos a compresión paralela a la fibra de 662 kg/cm², para una humedad del 12% y una edad comprendida entre 3 y 5 años, López y Silva⁶ encontraron valores promedio de esfuerzos últimos en columnas cortas de 438 kg/cm² y mínimos de 280 kg/cm², Martínez Cáceres⁷ encontró valores de esfuerzos últimos de 343 kg/cm² y Durán y Uribe⁸ valores promedio de esfuerzos últimos de 504 kg/cm², mínimos de 376 kg/cm² y máximos de 618 kg/cm².

También la resistencia a la compresión perpendicular a las fibras (aplastamiento) es muy baja, Martínez Cáceres encontró valores de esfuerzos últimos en guadua macana de apenas 23 kg/cm² (ni siquiera alcanza la décima parte

de la resistencia a la tracción paralela a las fibras). Al aplicar carga a un cilindro hueco este se deforma y debido a la poca resistencia a la tracción perpendicular a las fibras, se abre como se observa en la foto 8. Cuando el elemento trabaja a compresión perpendicular a las fibras, el comportamiento mejora si se le da un confinamiento a la guadua. Este confinamiento restringe en alguna medida la deformación lateral. Prieto y Sánchez⁹ encontraron en ensayos con dispositivos de carga y apoyo circulares que la carga última promedio aumentó con respecto a la utilización de dispositivos de carga y apoyo plano.



Fotos Nos. 6 y 7. Falla por compresión paralela a las fibras (tomada de la referencia No. 4)



La resistencia al corte paralelo a las fibras, es baja. En el proyecto de Clavijo y Trujillo¹⁰, en ensayos de rasgamiento

5 Martín, J. y Mateus, L., "Determinación de la resistencia a compresión paralela a la fibra de guadua de castilla", Bogotá, 1981, Proyecto de grado, Universidad Nacional de Colombia.

6 López, L. y Silva, M., "Comportamiento sismorresistente de estructuras en bahareque", Manizales, 2000, Proyecto de grado. Universidad Nacional de Colombia.

7 Martínez Cáceres, E., "Puentes en do mayor", Congreso Mundial de Bambu/Guadua, 1992.

8 Durán, A. y Uribe, M., "Estudio de elementos solicitados a compresión armados por tres guaduas", 2002, Proyecto de grado, Universidad Nacional de Colombia.

9 Prieto, E. y Sánchez, J., "Comportamiento de la guadua angustifolia sometida a flexión", 2002, Proyecto de grado. Universidad Nacional de Colombia.

10 Clavijo, S. y Trujillo, D., "Evaluación de uniones a tracción en guadua. 2000", Proyecto de grado, Universidad Nacional de Colombia

con tornillo¹¹ donde hubo dos planos de falla, se encontró un esfuerzo cortante promedio de 42 kg/cm²; López y Silva encontraron en ensayos de corte directo un valor mínimo de 43 kg/cm² y un valor promedio de 69 kg/cm², y Prieto y Sánchez encontraron valores de esfuerzo que corresponden al límite de exclusión del 5% (es decir, de la población ensayada sólo el 5% tiene una resistencia menor) de 47 kg/cm² al calcular el esfuerzo cortante en vigas cortas con longitudes menores de 1.0 m, simplemente apoyadas con carga en los tercios. Todos estos valores cercanos entre sí indican que la resistencia al corte no alcanza tampoco la décima parte de la resistencia a tracción en dirección paralela a las fibras.

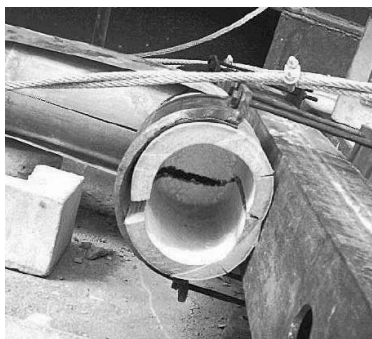


Foto No. 8. Falla por compresión perpendicular a las fibras (tomada de la referencia No. 7).

Comportamiento de la guadua en diferentes uniones

En el diseño de estructuras con guadua, se debe tener especial cuidado con el diseño de las uniones, ya que la falla de las conexiones puede inducir una falla prematura en la estructura.

Es por esto que para tener un mayor conocimiento del comportamiento de las conexiones en guadua y proponer algunas, se han realizado en la Universidad Nacional numerosas investigaciones de conexiones, entre otras las de Jenny Garzón¹²; Clavijo y Trujillo; Flórez¹³, Peña y Rodríguez¹⁴; Jaramillo y Sanclemente¹⁵; Camacho y Páez¹⁶.

Los elementos bajo diferentes solicitaciones de carga (compresión, tracción paralela a las fibras, flexión y torsión) tienen un buen comportamiento; sin embargo, en las uniones pueden tener esfuerzos de tracción perpendicular a la fibra o de corte paralelo a la fibra, como se ilustra en los siguientes ejemplos.

En la unión en T mostrada en la Foto 8, el elemento que aplica la carga comprime al elemento del apoyo, éste se deforma, hasta que falla por tensión perpendicular a la fibra. Adicionalmente, la fisura que se presenta lateralmente en el eje del elemento de aplicación de la carga se produce porque en su extremo se le hace un corte "boca de pescado" para empatar con el otro elemento que, al deformarse, produce la tensión perpendicular a la fibra, esto explica que la fisura sea más grande en el extremo.

En la unión de la Foto 9, al aplicar la tensión paralela a las fibras en el elemento de carga, el pasador por estar apoyado en las paredes del otro elemento produce una fuerza de tracción perpendicular a las fibras, produciendo la falla.

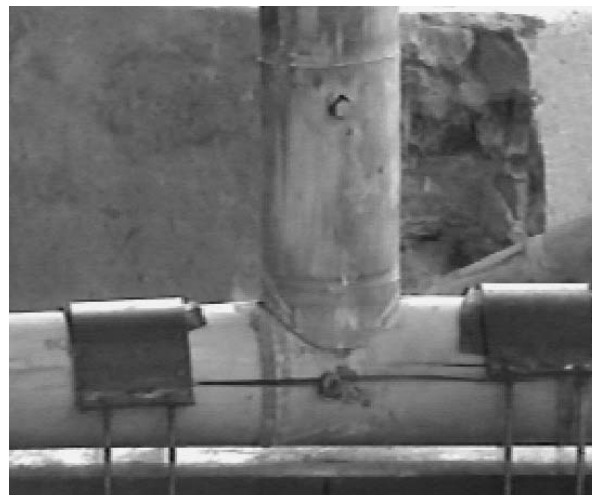


Foto No. 9. Falla por tensión perpendicular a las fibras (tomada de la referencia No. 7)

En la unión de la Foto 10, la diagonal conectada al cordón inferior de la armadura se encuentra solicitada a tensión, el conector utilizado en la unión, produce corte paralelo a la fibra, ocasionando la falla de esta unión debido a que la distancia hasta el extremo no es suficiente, dado la poca resistencia al corte de la guadua.



Foto No. 10. Falla por corte paralelo a las fibras (tomado de la referencia No. 6)

¹¹ En el ensayo de rasgamiento con tornillo, se coloca el tornillo en la lata de guadua a una distancia del extremo. Posteriormente, se aplica una fuerza en sentido paralelo a las fibras longitudinales.

¹² Garzón, J., "Uniones a tensión", Trabajo de grado, Universidad Nacional de Colombia.

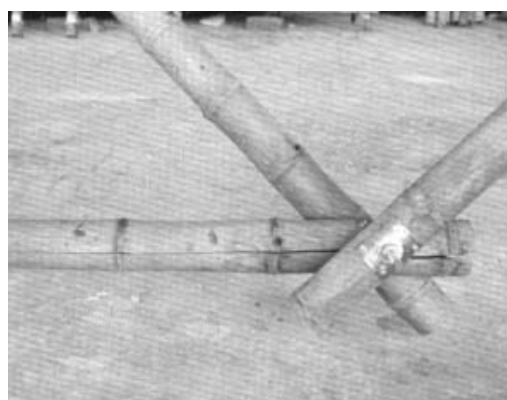
¹³ Flórez, E., Uniones a tensión en guadua con mortero y varilla. Comportamiento de uniones con uso de expansivo en el mortero, 2003, Trabajo de grado, Universidad Nacional de Colombia

¹⁴ Peña, C. y Rodríguez, E., "Propuesta de uniones mecánicas para estructuras de guadua", 1997, Trabajo de grado, Universidad Nacional de Colombia

¹⁵ Jaramillo, D. y Sanclemente, G., "Estudio de uniones en guadua con ángulo de inclinación entre elementos", 2003, Proyecto de grado, Universidad Nacional de Colombia

¹⁶ Camacho, V. y Páez, I., "Estudio de conexiones solicitadas a momento flector", 2003, Trabajo de grado, Universidad Nacional de Colombia.

En las uniones de las fotos 11 y 12, las componentes horizontales de las diagonales unidas al elemento horizontal con un pasador, producen corte en este elemento, causando la falla.



Fotos Nos. 11 y 12. Falla por corte paralelo a las fibras (tomada de las referencias Nos. 6 y 7)

Conclusiones

Al diseñar, se debe conocer el material estructural con el que se va a trabajar para aprovechar mejor sus fortalezas y evitar que se presenten fallas al no considerar sus debilidades.

En el momento del diseño se debe tener en cuenta que la guadua es un material anisotrópico. La resistencia a la tracción paralela a la fibra es mucho mayor que la resistencia a la tracción perpendicular a la fibra. La resistencia a la compresión paralela a la fibra es diferente a la resistencia a la compresión perpendicular a la fibra.

La guadua es un material natural, en el cual, la resistencia varía dependiendo de su humedad, edad, lugar de procedencia, condiciones de cultivo y el estado general de la guadua. Por tanto, se deben hacer ensayos de muestras representativas del material a utilizar en la estructura,

para garantizar que tiene una resistencia mayor a la considerada en el diseño.

Es importante el diseño de las conexiones, debido a que en éstas la guadua puede tener solicitaciones de corte o tensión perpendicular. Un mal diseño de las conexiones puede ocasionar en la estructura una falla prematura.

Se debe continuar con las investigaciones sobre este material

Bibliografía

1. Carvajal, William N.; Ortegón, William O. y Romero, Carlos J., "Elementos estructurales en bambú", Bogotá, 1981, Proyecto de grado, Universidad Nacional de Colombia.
2. Clavijo, S. y Trujillo, D., "Evaluación de uniones a tracción en guadua", 2000, Proyecto de grado, Universidad Nacional de Colombia.
3. Camacho, V. y Paéz, I., "Estudio de conexiones solicitados a momento flector", 2003, Trabajo de grado, Universidad Nacional de Colombia.
4. Durán, A. y Uribe, M., "Estudio de elementos solicitados a compresión armados por tres guaduas", 2002, Proyecto de grado, Universidad Nacional de Colombia.
5. Flórez, E., "Uniones a tensión en guadua con mortero y varilla. Comportamiento de uniones con uso de expansivo en el mortero", 2003, Trabajo de grado, Universidad Nacional de Colombia.
6. Gómez, R. y Gutiérrez, J., "Diseño y elaboración a escala natural de armaduras en guadua angustifolia", 2002, Proyecto de grado, Universidad Nacional de Colombia.
7. *Inbar Standar for determination of physical and mechanical properties of bamboo*, January, 1999. Edited by Dr. Jules J. A. Janssen, on behalf of INBAR The international Network on Bamboo and Rattan.
8. Jaramillo, D. y Sanclemente, G., "Estudio de uniones en guadua con ángulo de inclinación entre elementos", 2003, Proyecto de grado, Universidad Nacional de Colombia.
9. *Laboratory manual on testing methods for determination of physical and mechanical properties of bamboo*, January, 1999. Edited by Dr. Jules J. A. Janssen, on behalf of INBAR The international Network on Bamboo and Rattan.
10. López, L. y Silva, M., "Comportamiento sismorresistente de estructuras en bahareque", Manizales, 2000, Proyecto de grado, Universidad Nacional de Colombia.
11. Martín, J. y Mateus, L., "Determinación de la resistencia a compresión paralela a la fibra de guadua de castilla", Bogotá, 1981, Proyecto de grado, Universidad Nacional de Colombia.
12. Martínez Cáceres, E., "Puentes en do mayor", Congreso Mundial de Bambú/Guadua, 1992.
13. Sánchez, J. y Prieto, E., "Comportamiento de la guadua angustifolia sometida a flexión", 2002, Proyecto de grado, Universidad Nacional de Colombia.